



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

Διδακτορική Διατριβή

**Διερεύνηση των Γεωτεχνικών Παραμέτρων
που Ελέγχουν τις Καταπτώσεις Βράχων**

Παύλος Ι. Αστερίου

Πολιτικός Μηχανικός, M.Sc.

Επιβλέπων:

Γεώργιος Τσιαμπάος, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Μάιος 2016

ℒ_TEX

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

Διδακτορική Διατριβή

**Διερεύνηση των Γεωτεχνικών Παραμέτρων
που Ελέγχουν τις Καταπτώσεις Βράχων**

Πάυλος Ι. Αστερίου, Πολιτικός Μηχανικός - Μ.Δ.Ε.

Η διατριβή υποβλήθηκε στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου προς
εκπλήρωση των προϋποθέσεων του τίτλου του Διδάκτορος Μηχανικού

ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Γεώργιος Τσιαμπάος
Καθηγητής Ε.Μ.Π. (Επιβλέπων)


Πάυλος Μαρίνος
Ομ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Βασίλειος Παπαδόπουλος
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π. (ε.σ.)

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ



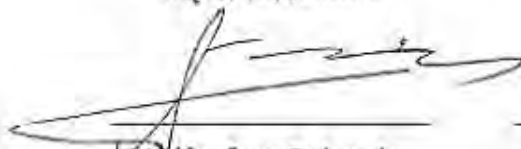
Γεώργιος Τσιαμπάος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.



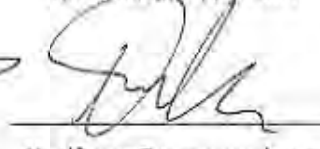
Πάυλος Μαρίνος
Ομ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.




Βασίλειος Παπαδόπουλος
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π. (ε.σ.)



Αλέξανδρος Σοφιανός
Καθηγητής Ε.Μ.Π.



Νικόλαος Σαμπατακάκης
Καθηγητής Π.Π.



Μιχαήλ Καββαδάς
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.



Δημήτριος Ζέκκος
Assoc. Prof., University of
Michigan

Copyright © Παύλος Ι Αστερίου, 2016

Απαγορεύεται η αντιγραφή, η αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, η διανομή, η αναπαραγωγή, η μετάφραση ή η μετάδοση της παρούσας εργασίας εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια του συγγραφέα. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για σκοπό κερδοσκοπικό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από την Ανώτατη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/1932 – Άρθρο 202).

*Στον πατέρα μου, Γιάννη
Στην μητέρα μου, Γιόλα
Στην αδερφή μου, Μάγια*



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

Διδακτορική Διατριβή

**Διερεύνηση των Γεωτεχνικών Παραμέτρων
που Ελέγχουν τις Καταπτώσεις Βράχων**

Παύλος Ι. Αστερίου, Πολιτικός Μηχανικός - Μ.Δ.Ε.

Περίληψη

Η κατάπτωση βραχωδών τεμαχίων σε περιοχές με ανθρώπινη δραστηριότητα μπορεί να προκαλέσει σημαντικά προβλήματα με δυσμενείς κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις. Τα πρόσφατα παραδείγματα από τον Ελλαδικό χώρο είναι αρκετά, όπου σε περιπτώσεις καταπτώσεων υπήρξαν ακόμη και απώλειες ανθρώπινων ζωών.

Οι καταπτώσεις βράχων αποτελούν φυσικό φαινόμενο και εκδηλώνονται με την αιφνίδια και βίαια κίνηση μεμονωμένων βραχωδών τεμαχίων, με κινητήριο δύναμη την βαρύτητα, μετά την αποκόλληση - απόσπασή τους από την αρχική τους θέση στα πρανή. Τα τεμάχια υφίστανται απώλεια ταχύτητας κατά την πρόσκρουση, την κύλιση ή την ολίσθησή τους στην επιφάνεια του πρανούς. Η προσομοίωση της αναπήδησης είναι ιδιαίτερος πολύπλοκη και δεν επιδέχεται αναλυτικής λύσης. Έτσι, έχει επικρατήσει να γίνεται απλουστευμένα με την χρήση των συντελεστών αναπήδησης, που περιγράφουν την απώλεια ταχύτητας ή ενέργειας εξαιτίας της κρούσης.

Γενικώς, στη σχετική βιβλιογραφία διατίθεται πλήθος μαθηματικών ορισμών για τους συντελεστές αναπήδησης, χωρίς να είναι σαφές ποιος περιγράφει καλύτερα την αναπήδηση. Οι τιμές που χρησιμοποιούνται στις πρακτικές εφαρμογές επιλέγονται βάσει της φύσης του υλικού που δομεί το πρανές. Για τον σκοπό αυτό υπάρχουν προτεινόμενες τιμές που θεωρούνται ως χαρακτηριστικές των υλικών. Ωστόσο, παρουσιάζουν σημαντικό εύρος μεταξύ διαφορετικών διερευνήσεων, απόρροια των πολλών και ευμετάβλητων παραμέτρων που επηρεάζουν την απόκριση του τεμάχους.

Η προσέγγιση της παρούσας έρευνας βασίζεται στην πειραματική διερεύνηση και στον επαγωγικό λογισμό. Πιο συγκεκριμένα, αναπτύχθηκαν πειραματικές διατάξεις πρόσφορες για την παραμετρική διερεύνηση της αναπήδησης και πραγματοποιήθηκε σημαντικός αριθμός

δοκιμών στο εργαστήριο και στο πεδίο. Τα αποτελέσματα αξιοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των κρίσιμότερων παραμέτρων που επηρεάζουν την απόκριση του τεμάχους και για την κατάρτιση εμπειρικών συσχετίσεων και μεθοδολογιών εκτίμησης των χαρακτηριστικών της διαγραφόμενης τροχιάς.

Γενικώς, η εκτέλεση μιας δοκιμής για τον προσδιορισμό των συντελεστών αναπήδησης είναι εύκολα πραγματοποιήσιμη, καθώς αρκεί η απελευθέρωση και πτώση ενός τεμάχους σε μια βάση πρόσκρουσης με ταυτόχρονη καταγραφή της κίνησης. Ωστόσο, δεν υφίσταται κανονιστικό πλαίσιο για την διεξαγωγή τέτοιων δοκιμών, με επακόλουθο να μην είναι ευχερής η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων από άλλες σχετικές διερευνήσεις.

Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν, στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας, με φυσικά πετρώματα και με τεχνητά υλικά, για τα οποία προσδιορίστηκαν οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες σύμφωνα με τις εκάστοτε προδιαγραφές. Τα τεχνητά υλικά εμφανίζουν σημαντικά πλεονεκτήματα στην διαμόρφωση των τεμαχών και την συστηματοποίηση της επεξεργασίας. Χρησιμοποιήθηκαν τεμάχη διαφόρων σχημάτων που απελευθερώθηκαν, από κατάλληλους μηχανισμούς ρίψης, σε ελεύθερη πτώση ή παραβολική τροχιά και προσέκρουαν σε επιφάνειες με διαφορετικά χαρακτηριστικά.

Γενικώς, η κίνηση του τεμάχους ολοκληρώνεται σε ιδιαίτερος σύντομο χρονικό διάστημα, οπότε η καταγραφή γίνεται συνήθως με φωτομηχανές ταχείας λήψης. Δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στην αναγνώριση και στον εντοπισμό της θέσης του τεμάχους στις καταγραφές, ενσωματώνοντας στην επεξεργασία τεχνικές μηχανικής όρασης. Έτσι, αυξήθηκε δραστικά η ακρίβεια προσδιορισμού της τροχιάς και συγχρόνως περιορίσθηκε ο απαιτούμενος χρόνος επεξεργασίας, συγκριτικά με τον χειροκίνητο εντοπισμό του. Τούτο, επέτρεψε την εκτέλεση σημαντικού πλήθους δοκιμών στις ελεγχόμενες συνθήκες του εργαστηρίου, απομονώνοντας συγκεκριμένες κάθε φορά παραμέτρους για τον προσδιορισμό της επίδρασής τους.

Αν και το φαινόμενο εξελίσσεται στον τριδιάστατο χώρο, μέχρι πρόσφατα σπανίως λαμβανόταν υπόψη η τρίτη διάσταση στις σχετικές έρευνες, αλλά και στα λογισμικά προσομοίωσης. Στην παρούσα έρευνα, εφαρμόσθηκαν στερεοφωτογραμμετρικές μέθοδοι στην επεξεργασία των καταγραφών, επιτρέποντας την ανακατασκευή της τροχιάς στον χώρο και την εξέταση της εκτροπής του τεμάχους εξαιτίας της κρούσης.

Στο εργαστήριο πραγματοποιήθηκαν περίπου 3000 δοκιμές και εξετάστηκε η επίδραση που ασκούν στην διαγραφόμενη τροχιά οι φυσικές και οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών καθώς και τα χαρακτηριστικά της κίνησης πριν την κρούση. Όσον αφορά στο τέμαχος, εξετάστηκε η επίδραση της μάζας, του σχήματος της ταχύτητας και της γωνίας πρόσκρουσης. Για τις επιφάνειες πρόσκρουσης εξετάσθηκε η επίδραση της τραχύτητας, της αποσάθρωσης, της επικάλυψης με εδαφικό υλικό και της διαφοροποίησης του τύπου του υλικού σε σχέση με αυτό του τεμάχους. Επίσης διερευνήθηκε η επίδραση του προσανατολισμού της επιφάνειας πρόσκρουσης σε σχέση με την διεύθυνση της τροχιάς του πίπτοντος τεμάχους.

Στο πεδίο οι δοκιμές έγιναν σε 3 φάσεις, όπου εκτελεστήκαν συνολικά περίπου 300 δοκιμές. Σκοπός ήταν να εξετασθεί η δυνατότητα αναγωγής των συμπερασμάτων της εκτενούς

εργαστηριακής διερεύνησης στην πραγματική κλίμακα του φαινομένου. Έτσι, οι δοκιμές αυτές πραγματοποιήθηκαν αναπαράγοντας, όσο ήταν εφικτό, τις συνθήκες του εργαστηρίου στην ύπαιθρο.

Τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας είναι εν γένει σε συμφωνία με τα αναφερόμενα στην σχετική βιβλιογραφία. Ωστόσο, δεδομένου του πλήθους των δοκιμών και των παραμέτρων που διερευνήθηκαν, προκύπτει η μεταξύ τους αλληλεπίδραση. Έτσι, συμπληρώνεται, ή σε ορισμένες περιπτώσεις αναθεωρείται, η υφιστάμενη γνώση αναφορικά με τις κρίσιμες παραμέτρους και τον τρόπο που επηρεάζουν την απόκριση του τεμάχους. Επίσης, προτείνονται νέες μέθοδοι για την εκτίμηση της διαγραφόμενης τροχιάς.

Πιο συγκεκριμένα, διατυπώνεται μια συσχέτιση για την εκτίμηση του καθέτου συντελεστή αναπήδησης που εξαρτάται από την σκληρότητα του υλικού και την ορμή του τεμάχους κατά την πρόσκρουση για την απλή περίπτωση της ελεύθερης πτώσης τεμαχών σφαιρικού σχήματος. Οι επιδράσεις του σχήματος και της γωνίας πρόσκρουσης εισάγονται στην εν λόγω σχέση, μέσω διορθωτικών συντελεστών, επιτρέποντας την γενίκευσή της ώστε να εφαρμόζεται στην συνήθη περίπτωση της κεκλιμένης κρούσης ακανόνιστου τεμάχους. Επίσης, καταρτίζεται μια μεθοδολογία, βάσει των χαρακτηριστικών της πρόσκρουσης, για τον προσδιορισμό της διακύμανσης του καθέτου συντελεστή και της γωνίας αναπήδησης, από τα οποία και μπορεί να εκτιμηθεί με ακρίβεια η διαγραφόμενη τροχιά. Τέλος, προτείνεται μια σχέση για την εκτίμηση του εύρους της εκτροπής, εξαιτίας της κρούσης, που λαμβάνει υπόψη την διεύθυνση της τροχιάς πριν την κρούση, την φορά μεγίστης κλίσης και την κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης.

Η κατάρτιση των παραπάνω συσχετίσεων και μεθοδολογιών έγινε με βάση τις εργαστηριακές δοκιμές και οι επιτόπου δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας τους. Δεδομένου ότι η απόκριση των τεμαχών στο πεδίο προσεγγίζεται αρκούτως ικανοποιητικά από τις προτεινόμενες σχέσεις, συμπεραίνεται πως η γενίκευσή τους στην πραγματική κλίμακα του φαινομένου είναι εφικτή, με αποτέλεσμα να αποτελούν χρήσιμα εργαλεία για τον ορθολογικότερο σχεδιασμό των μέτρων αντιμετώπισης των καταπτώσεων βραχωδών τεμαχών.



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING
GEOTECHNICAL DEPARTMENT

Doctoral Thesis

**Investigation of the Geotechnical Parameters
which Control Rock Falls**

Pavlos J. Asteriou, Civil Engineer - M.Sc.

Abstract

Rockfalls in areas with human activity can cause important problems with unfavorable social and economic repercussions. Several events have occurred recently in Greece, some with human fatalities.

Rockfalls constitute a natural hazard that is expressed as the sudden and violent downward movement of rocky blocks, which is gravitationally driven and follows their detachment from their initial position on the slope surface. While the blocks interact with the slope surface, velocity losses occur during impact, rolling or sliding. Rebound response is the most difficult part to predict and its understanding is limited, therefore simulation relies on simplified assumptions. In general, the post-impact part of the trajectory is estimated according to the coefficients of restitution, which describe the velocity or energy losses caused by the impact.

Various definitions for the coefficients of restitution exist in relevant literature, but there is no consensus on which is most appropriate for rockfall trajectory modelling. Their values are usually acquired as a function of the material type, from characteristic values which are considered to be material constants. However, due to the several parameters which influence block's response, a significant scatter is revealed when examining values acquired by different studies.

Hence, this research is based on systematic experimental observations and inductive reasoning. Moreover, experimental apparatuses were developed, allowing parametrical investigation of the rebound process. A significant number of tests were performed in the laboratory as well as in the field. Results were used to address the influential parameters and to express empirical correlations and methodologies for the estimation of the trajectory's characteristics after impact.

A test for the determination of the coefficients of restitution can be easily performed, since it requires the release and impact of a block towards a surface while recording the trajectory. However, there is not any suggested method for such a test, resulting to a difficulty in assessing relevant studies.

Tests were performed with natural rocks and artificial materials, whose properties were determined according to relevant standards. Artificial materials present advantages regarding specimen construction and digital processing. Various block shapes were used and released to free fall or parabolic motion onto surfaces with different characteristics.

In general, the motion is completed within a short time span, therefore its recording is usually performed by high speed cameras. In this research, particular attention was paid to the tracking process of the block by integrating machine vision techniques. This drastically increased tracking accuracy and reduced the required processing time, compared to manual tracking. This allowed the implementation of numerous tests in the laboratory, where specific parameters were isolated in order to determine their effect.

Although the phenomenon is evolving in the three-dimensional space, the third dimension was rarely taken into account until recently in relevant studies or commercial simulation software. In this investigation the reconstruction of the trajectory in the 3D space, was achieved by applying stereo-photogrammetric techniques in the processing of records, thus allowing the consideration of blocks deviation after impact.

The laboratory investigation consists of approximately 3000 tests, where the effects posed by material's physical and mechanical properties and by the motion's characteristics before impact were examined. Regarding the individual blocks, the effect of mass, shape, velocity and impact angle were examined. For the impact surfaces the following effects were taken into account: roughness, weathering, soil cover and the differentiation of the material relative to that of the blocks. Additionally, the effect of the orientation of the impact surface relative to the direction of the trajectory of the blocks was also investigated.

Field tests were done in three phases, where about 300 tests were executed in total. The purpose was to examine the possibility of extrapolating the findings of the aforementioned extensive laboratory investigation to the scale that the phenomenon takes place. Thus, tests were carried out by reproducing, as possible, the laboratory conditions in the field.

Generally, the results of this study are in agreement with those mentioned in the relevant literature. However, given the number of tests and the parameters investigated, the interaction between them is revealed. Thus, current results complete, or in some cases review, the existing knowledge regarding the crucial parameters and the mechanisms that affect the response of the block. Additionally, new methods for estimating the trajectory following the impact are proposed.

In particular, a correlation is expressed in order to estimate the normal restitution coefficient, for the simple case of the one dimensional motion of a spherical block, taking into account Schmidt hammer hardness and the momentum at impact. The effects of block's shape

and impact angle are introduced, through correctional factors, allowing the generalization to the common case of an irregular block at an oblique impact. Additionally, a methodology is established for determining the variation of normal coefficient of restitution and rebound angle based on the characteristics of the impact, from which trajectory after impact can be accurately estimated. Finally, an empirical relationship is proposed for the estimation of deviation range followed after impact, taking into account the direction of the trajectory prior to impact in respect to dip and aspect of the impact surface.

The derivation of these correlations and methodologies was based on the laboratory investigation, while the field tests were used to assess their reliability. Since the response of the blocks in the field tests is approximated sufficiently well by the proposed relations, it is concluded that their generalization to the real scale of rockfall phenomenon is possible and therefore they can constitute useful tools for the rational design of rockfall countermeasures.

Ευχαριστίες

Η εκπόνηση μιας διδακτορικής διατριβής είναι αναμφισβήτητα μια επίπονη διαδικασία, απαιτεί χρόνο και θυσίες. Δεσμεύει χρόνο μα κυρίως δεσμεύει την σκέψη περιορίζοντας πολλές από τις μικρές απολαύσεις της ζωής. Ωστόσο, γράφοντας τις γραμμές αυτές, ήδη αναπολώ στιγμές...

Στις στιγμές αυτές συνέβαλε τα μέγιστα ο επιβλέπων καθηγητής μου, ο Δρ. Γεώργιος Τσιαμπάος. Πέραν της σχολαστικής επίβλεψης επί του ερευνητικού αντικείμενου, μου έδειξε τεράστια εμπιστοσύνη, με υπερασπίστηκε όπου χρειάστηκε και προέβαλε την εργασία μου. Ένα από τα ομορφότερα στοιχεία τα χρόνια αυτά ήταν η συμμετοχή μου στην εκπαιδευτική διαδικασία, στα μαθήματα του προπτυχιακού και μεταπτυχιακού κύκλου σπουδών της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ και στην επίβλεψη διπλωματικών εργασιών, ήταν ευτύχημα που διδάχθηκα από τον κ. Τσιαμπάο την τέχνη της διδασκαλίας. Πρωτίστως όμως, οφείλω να τον ευχαριστήσω για τις αρχές, το ήθος και τις αξίες που μου μετέδωσε και θα με συντροφεύουν στη ζωή.

Στις στιγμές αυτές κυριαρχεί ο τομέας Γεωτεχνικής, που αποτέλεσε το κύριο σημείο αναφοράς μου τα χρόνια αυτά, όχι για τον χρόνο της φυσικής μου παρουσίας εκεί αλλά εξαιτίας των ανθρώπων του, που ειλικρινά ευχαριστώ. Η αρμονική συνύπαρξη καθηγητών, μεταπτυχιακών φοιτητών, επιστημονικού, τεχνικού και διοικητικού προσωπικού καθιστούν τον τομέα κάτι παραπάνω από ένα εργασιακό περιβάλλον. Ιδιαίτέρως, θέλω να ευχαριστήσω τους:

Δρ. Παύλο Μαρίνο, Ομότιμο Καθηγητή του τομέα Γεωτεχνικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ και μέλος της Συμβουλευτικής Επιτροπής, για τις χρήσιμες συμβουλές και παρατηρήσεις του στην παρούσα έρευνα, για τις μοναδικές ταξιδιωτικές ιστορίες που τόσο μαγευτικά μας εξιστορούσε και για τον ισχυρά παρακινητικό του λόγο να δημιουργήσουμε τις δικές μας περιπέτειες,

Δρ. Βασίλειο Παπαδόπουλο, Αν. Καθηγητή (ε.σ.) του τομέα Γεωτεχνικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ και μέλος της Συμβουλευτικής Επιτροπής, για την ουσιαστική ενασχόλησή του με την παρούσα έρευνα και τις παρατηρήσεις του,

Δρ. Μιχαήλ Καββαδά, Αν. Καθηγητή του τομέα Γεωτεχνικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ και μέλος της Εξεταστικής Επιτροπής, για τις ενδιαφέρουσες συζητήσεις που είχαμε όλα αυτά τα χρόνια, που δεν περιορίστηκαν μονάχα σε ερευνητικά αντικείμενα και

Δρ. Γεώργιο Μποκούβαλα, Καθηγητή του τομέα Γεωτεχνικής της Σχολής Πολιτικών Μηχα-

νικών ΕΜΠ, για τις παρατηρήσεις του και την προσοχή που μου έδειξε όλα αυτά τα χρόνια Επίσης, ευχαριστώ θερμά τους:

Δρ. Αλέξανδρο Σοφιανό, Καθηγητή της Σχολής Μεταλλειολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ,

Δρ. Νικόλαο Σαμπατακάκη, Καθηγητή του τμήματος Γεωλογίας του Παν. Πατρών και

Δρ. Δημήτριο Ζέκκο, Associate Professor στο πανεπιστήμιο του Michigan

για την συμμετοχή τους στην Εξεταστική Επιτροπή, τις παρατηρήσεις τους και τον χρόνο που αφιέρωσαν στην αξιολόγηση της έρευνας αυτής.

Οφείλω να αναγνωρίσω την συνδρομή ορισμένων φίλων, που μέσα από τις δικές τους επιστήμες ή τέχνες συνέβαλαν καθοριστικά στην ερευνητική περιπλάνησή μου αυτά τα χρόνια και άρα συνδιαμόρφωσαν τον προορισμό. Πιο συγκεκριμένα:

τον κ. Νίκο Αναγωστόπουλο, Δρ. πολιτικό μηχανικό, που βοήθησε στην επιλογή των τεχνικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα έρευνα. Περαιτέρω, ως τεχνικός διευθυντής της εταιρείας Sika μεσολάβησε για την δωρεάν παροχή των υλικών αυτών,

τον κ. Ντάριο Στεφάνου, σκηνογράφο και βιοτέχνη, που πρότεινε τους καλύτερους τρόπους για την υλοποίηση των ιδεών μου στις πειραματικές διατάξεις, βοήθησε στην κατασκευή τους και μου έδωσε ελεύθερη πρόσβαση στο εργαστήριο και τον εξειδικευμένο εξοπλισμό της βιοτεχνίας του, την Ibx Climbing Holds,

τον κ. Γιάννη Πετρομιανό, εναερίτη και οδηγό βουνού της Ελληνικής Ομοσπονδίας Ορειβάσις και Αναρρίχησης, δάσκαλό μου στο κάθετο περιβάλλον, που βοήθησε στην διενέργεια των επιτόπου δοκιμών, παρέχοντας τεχνογνωσία, προσωπική εργασία και εξειδικευμένο εξοπλισμό,

τους κ. Μάνθο Περλορέντζο, Γιάννη Πουλίδη και Μάκη Καραθανάση, συν-αναρριχητές, που αφιέρωσαν χρόνο συμμετέχοντας στις δοκιμές πεδίου,

την κ. Κατερίνα Αντωνοπούλου, καλλιτέχνη ψηφιακών τεχνών, ηλεκτρολόγο μηχανικό και επιστημονικό συνεργάτη της Ανωτάτης Σχολής Καλών Τεχνών, που με μύησε στις τεχνικές ψηφιακής επεξεργασίας και μηχανικής όρασης και

τον κ. Θάνο Αχτύπη, γλύπτη, για την κατασκευή των σφαιρικών δοκιμών από φυσικά υλικά. Στους παραπάνω, με τους οποίους κοινό τόπο είχαμε τα αναρριχητικά πεδία, επιπλέον των ευχαριστιών οφείλω και μια συγνώμη, διότι η ενασχόληση μου με την παρούσα έρευνα με οδήγησε σταδιακά μακριά τους.

Σημαντική συνδρομή στην εκτέλεση των δοκιμών είχαν οι φοιτητές που εκπόνησαν τις διπλωματικές τους εργασίες υπό την καθοδήγηση μου και την εποπτεία του καθηγητή κ. Τσιαμπάου, που ευχαριστώ θερμά. Πιο συγκεκριμένα, τους προπτυχιακούς φοιτητές κ.κ. Σοφία Γιόκαρη, Θάνο Βούδρη, Ηλία Κωστόγιαννη, Παναγιώτη Βατίστα και Ελεάννα Βασιλοπούλου, καθώς επίσης και τους φοιτητές από το μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών "Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογεϊνών Έργων" κ.κ. Ναπολέοντα Καραγιαννόπουλο, Παναγιώτα Μώρου και Αλέξιο Γκιουρτζίδη. Επίσης, τον κ. Βίκτωρα Ευθυμίου που συνεργαστήκαμε στην αρχή της έρευνας κατά την εκπόνηση της δικής μας μεταπτυχιακής εργασίας και ιδιαίτερα τον Δρ. Χάρη Σαρόγλου, που μας παρακίνησε για την ενασχόληση με το αντικείμενο αυτό, αλλά και για την

μετέπειτα συνεργασία μας.

Ευχαριστώ τον Ειδικό Λογαριασμό Κονδυλίων Έρευνας (ΕΛΚΕ) του ΕΜΠ του οποίου έτυχα υπότροφος κατά τα έτη 2012 έως 2016. Επίσης, το Θωμαΐδειο Ίδρυμα και την Ελληνική Επιστημονική Εταιρεία Εδαφομηχανικής και Γεωτεχνικής Μηχανικής (ΕΕΕΕΓΜ) για την κάλυψη των εξόδων στα συνέδρια του εξωτερικού που μετείχα.

Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ απευθύνεται στην οικογένειά μου...

Περιεχόμενα

Περίληψη	i
Abstract	v
Ευχαριστίες	ix
Περιεχόμενα	xiii
Κατάλογος σχημάτων	xxxv
Κατάλογος πινάκων	xlix
1 Εισαγωγή	1
1.1 Αντικείμενο διατριβής και στόχοι	1
1.2 Δομή και οργάνωση	2
2 Οι Καταπτώσεις Βράχων	5
2.1 Γενικά στοιχεία καταπτώσεων	5
2.1.1 Σύνομη ιστορική αναδρομή	6
2.2 Αίτια καταπτώσεων	7
2.2.1 Ενδογενή αίτια	9
2.2.2 Εξωγενή αίτια	10
2.2.2.1 Περιβαλλοντικά αίτια	10
2.2.2.2 Ανθρωπογενή αίτια	12
2.2.2.3 Σεισμική δράση	12
2.3 Αντιμετώπιση καταπτώσεων	14
2.3.1 Ενεργητικά μέτρα προστασίας	15
2.3.1.1 Αγκυρώσεις	15
2.3.1.2 Πλήρως αγκυρωμένα μεταλλικά πλέγματα	16
2.3.1.3 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα	16
2.3.1.4 Μεταβολή της γεωμετρίας του πρανούς	17
2.3.1.5 Αποστράγγιση πρανούς	17
2.3.1.6 Καθαίρεση επισφαλών όγκων	17
2.3.2 Παθητικά μέτρα προστασίας	17

2.3.2.1	Φράχτες ανάσχεσης	18
2.3.2.2	Μεταλλικά πλέγματα τύπου κουρτίνας	22
2.3.2.3	Τάφροι περισυλλογής τεμαχών	22
2.3.2.4	Στέγαστρα καταπτώσεων	24
2.3.2.5	Οπλισμένα επιχώματα	25
2.3.2.6	Απομειωτήρες κίνησης	25
3	Γενικές Αρχές στις Καταπτώσεις Βράχων	27
3.1	Στοιχεία τροχιάς	27
3.1.1	Παραβολική τροχιά	28
3.1.2	Ολίσθηση	29
3.1.3	Κύλιση	29
3.1.4	Αναπήδηση	31
3.2	Προσομοίωση της αναπήδησης	31
3.2.1	Γενικές αρχές από την θεωρία κρούσεων	31
3.2.1.1	Η γενική περίπτωση της κρούσης	32
3.2.1.2	Η κάθετη κρούση	33
3.2.1.3	Η εφαπτομενική κρούση	35
3.2.2	Η έννοια του συντελεστή αναπήδησης	35
3.2.2.1	Κινηματικός συντελεστής αναπήδησης	36
3.2.2.2	Κάθετος και εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης	37
3.2.2.3	Ενεργειακός συντελεστής αναπήδησης	38
3.2.2.4	Κινητικός συντελεστής αναπήδησης	39
3.2.3	Προσδιορισμός συντελεστών αναπήδησης	39
3.2.3.1	Ανάδρομες αναλύσεις πραγματικών καταπτώσεων	40
3.2.3.2	Επιτόπου δοκιμές καταπτώσεων	41
3.2.3.3	Εργαστηριακές δοκιμές καταπτώσεων	42
3.2.4	Τιμές συντελεστών αναπήδησης	42
3.2.4.1	Τιμές κινηματικού συντελεστή αναπήδησης	44
3.2.4.2	Τιμές καθέτου και εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης	44
3.2.4.3	Τιμές ενεργειακού συντελεστή αναπήδησης	48
3.2.5	Προσομοίωση καταπτώσεων με την χρήση λογισμικών	49
3.2.6	Αξιολόγηση των τιμών για τους συντελεστές αναπήδησης που συναντώνται στην βιβλιογραφία	50
3.2.7	Επίδραση των συντελεστών αναπήδησης στον σχεδιασμό μέτρων αντιμετώπισης	54
3.3	Βιβλιογραφική ανασκόπηση	57
3.3.1	Επίδραση κλίσης επιφάνειας πρόσκρουσης και γωνίας πρόσκρουσης	57
3.3.2	Επίδραση του τύπου του πετρώματος	64

3.3.3	Κρούση σε επιφάνεια με εδαφικό υλικό	70
3.3.4	Προσαρμογή συντελεστών αναπήδησης στα κινηματικά χαρακτηριστικά της κρούσης	72
3.3.4.1	Προσαρμογή με βάση της ταχύτητας πρόσκρουσης	72
3.3.4.2	Προσαρμογή με βάση την μάζα του τεμάχους	76
3.3.4.3	Προσαρμογή με βάση την ορμή του τεμάχους	77
3.3.5	Επίδραση του σχήματος του τεμάχους	78
3.3.6	Επίδραση του μεγέθους του τεμάχους	80
3.3.7	Επίδραση της περιστροφικής συνιστώσας της κίνησης	81
3.3.8	Θεωρητική προσέγγιση της επίδρασης του σχήματος	88
3.3.8.1	Υπολογιστικό προσομοίωμα SASS (Bozzolo et al., 1988)	88
3.3.8.2	Υπολογιστικό προσομοίωμα Azzoni et al. (1995)	91
3.3.8.3	Υπολογιστική μέθοδος Vijayakumar et al. (2012)	92
3.3.9	Εκτροπή από το κατακόρυφο επίπεδο κίνησης εξαιτίας της κρούσης	95
4	Στοιχεία Πειραματικής Διερεύνησης	97
4.1	Πειραματικές διατάξεις	97
4.1.1	Τεμάχη πρόσκρουσης	98
4.1.1.1	Κυβικά δοκίμια	98
4.1.1.2	Κυβικά δοκίμια με λειασμένες ακμές	99
4.1.1.3	Σφαιρικά δοκίμια	100
4.1.1.4	Πολυεδρικά δοκίμια	101
4.1.1.5	Δοκίμια ελλειπτικών δίσκων	102
4.1.2	Επιφάνειες πρόσκρουσης	103
4.1.2.1	Επιφάνειες πρόσκρουσης από βραχώδη υλικά	103
4.1.2.2	Επιφάνειες πρόσκρουσης με εδαφική επικάλυψη	104
4.1.3	Διατάξεις ρίψης	105
4.1.3.1	Διάταξη ελεύθερης πτώσης	105
4.1.3.2	Διάταξη παραβολικής ρίψης	106
4.1.3.3	Διάταξη παραβολικής ρίψης ελλειπτικών δίσκων	106
4.2	Υλικά	108
4.2.1	Βραχώδη υλικά	108
4.2.1.1	Θλιπτική αντοχή άρρηκτου πετρώματος	108
4.2.1.2	Εφελκυστική αντοχή άρρηκτου πετρώματος	111
4.2.1.3	Ταχύτητα διάδοσης υπερήχων	112
4.2.1.4	Δείκτης σημειακής φόρτισης	113
4.2.1.5	Σκληρότητα κατά τη σφύρα Schmidt	116
4.2.1.6	Συγκεντρωτική παρουσίαση ιδιοτήτων βραχωδών υλικών	117
4.2.2	Εδαφικά υλικά	118

4.2.2.1	Αργιλικά υλικά	118
4.2.2.2	Αμμώδη υλικά	119
4.3	Μέθοδοι καταγραφής και επεξεργασίας της κίνησης	120
4.3.1	Γενικά περί των ψηφιακών εικόνων	120
4.3.2	Εξοπλισμός καταγραφής	122
4.3.3	Διδιάστατη ανάλυση	123
4.3.3.1	Δοκίμια τυχαίου σχήματος	126
4.3.3.2	Σφαιρικά δοκίμια	127
4.3.3.2.1	Γεωμετρία κεντρικής προβολής σφαίρας	128
4.3.3.3	Δοκίμιο ελλειπτικού δίσκου	132
4.3.4	Τριδιάστατη ανάλυση	134
4.3.4.1	Βαθμονόμηση φωτομηχανών	134
4.3.4.2	Διόρθωση σφάλματος φακών	139
4.3.4.3	Προσδιορισμός της θέσης των σημείων στον χώρο	140
4.4	Ανάλυση κίνησης	142
4.4.1	Διδιάστατη ανάλυση κίνησης	142
4.4.1.1	Μεταθετική κίνηση	142
4.4.1.2	Περιστροφική κίνηση	146
4.4.1.2.1	Προσδιορισμός γωνιακής ταχύτητας σφαιρικών δοκιμίων	146
4.4.1.2.2	Προσδιορισμός γωνιακής ταχύτητας ελλειπτικών δίσκων	148
4.4.2	Τριδιάστατη ανάλυση κίνησης	149
4.4.2.1	Αποτύπωση επιφάνειας πρόσκρουσης	149
4.4.2.2	Προσδιορισμός κατακόρυφου άξονα	152
4.4.2.3	Ορισμός συστήματος αναφοράς ανάλυσης	153
4.4.2.4	Ανακατασκευή του σχήματος του δοκιμίου	154
4.4.2.5	Ανασύνθεση κίνησης τεμάχους	157
5	Εργαστηριακή Διερεύνηση στις Δύο Διαστάσεις	161
5.1	Επίδραση των φυσικών και μηχανικών παραμέτρων του πετρώματος	163
5.1.1	Διερεύνηση με δοκιμές ελεύθερης πτώσης	163
5.1.1.1	Εξέταση δυναμικών συσχετίσεων με τις ιδιότητες των υλικών	166
5.1.2	Διερεύνηση με δοκιμές παραβολικής ρίψης	170
5.1.2.1	Σχολιασμός συντελεστών αναπήδησης ως προς την γωνία πρόσκρουσης	173
5.1.2.2	Σχολιασμός χαρακτηριστικών τροχιάς	177
5.2	Επίδραση των χαρακτηριστικών πρόσκρουσης	179
5.2.1	Διερεύνηση με δοκιμές ελεύθερης πτώσης	179
5.2.1.1	Επίδραση ταχύτητας και μάζας τεμάχους στους συντελεστές αναπήδησης	184
5.2.2	Διερεύνηση με δοκιμές παραβολικής ρίψης	188
5.2.2.1	Σχολιασμός δοκιμών παραβολικής ρίψης με σφαιρικά τεμάχια	193

5.2.2.1.1	Κάθετος συντελεστής αναπήδησης	193
5.2.2.1.2	Εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης	198
5.2.2.1.3	Κινηματικός συντελεστής αναπήδησης	203
5.2.2.1.4	Ενεργειακός συντελεστής αναπήδησης	203
5.2.3	Διερεύνηση κρούσης μεταξύ ανόμοιων υλικών τεμάχους - βάσης με δοκιμές ελεύθερης πτώσης	206
5.3	Επίδραση του σχήματος του τεμάχους	209
5.3.1	Πειραματική διάταξη	209
5.3.2	Παρουσίαση και αξιολόγηση αποτελεσμάτων	211
5.4	Επίδραση χαρακτηριστικών της επιφάνειας πρόσκρουσης	218
5.4.1	Αποσάθρωση της επιφάνειας πρόσκρουσης	218
5.4.1.1	Πειραματική διάταξη	218
5.4.1.2	Επίδραση της αποσάθρωσης στους συντελεστές αναπήδησης	220
5.4.2	Τραχύτητα επιφάνειας πρόσκρουσης	221
5.4.2.1	Πειραματική διάταξη	222
5.4.2.2	Σχολιασμός δοκιμών με σφαιρικό τέμαχος	223
5.4.2.3	Σχολιασμός δοκιμών με πολυεδρικό τέμαχος	227
5.4.3	Επικάλυψη επιφάνειας με εδαφικό υλικό	230
5.4.3.1	Επικάλυψη επιφάνειας με απόθεση ξηρού εδαφικού υλικού	231
5.4.3.1.1	Επικάλυψη με αργιλικό υλικό	232
5.4.3.1.2	Επικάλυψη με αμμώδες υλικό	233
5.4.3.1.3	Επικάλυψη με μείγμα αμμώδους και αργιλικού υλικού	234
5.4.3.2	Επικάλυψη επιφάνειας με διαστρωμένο αργιλικό υλικό	236
5.4.3.2.1	Διάστρωση με αργιλικό υλικό στο όριο υδαρότητας	236
5.4.3.2.2	Διάστρωση με αργιλικό υλικό σε αποξηραμένη κατάσταση	238
5.4.3.2.3	Διάστρωση με αναζυμωμένο αργιλικό υλικό	240
5.4.3.2.4	Διάστρωση με αναζυμωμένο εδαφικό μείγμα	241
5.5	Σύνοψη	243
6	Εργαστηριακή Διερεύνηση στον Τριδιάστατο Χώρο	247
6.1	Αρχική πειραματική διερεύνηση	248
6.1.1	Περιγραφή πειραματικής διάταξης	248
6.1.2	Παρουσίαση και σχολιασμός αποτελεσμάτων	251
6.1.2.1	Κάθετος συντελεστής αναπήδησης	251
6.1.2.2	Εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης	253
6.1.2.3	Κινηματικός συντελεστής αναπήδησης	255
6.1.2.4	Εκτροπή από το κατακόρυφο επίπεδο	257
6.2	Τριδιάστατη πειραματική διερεύνηση για τον προσδιορισμό της εκτροπής	260
6.2.1	Περιγραφή πειραματικής διάταξης	260

6.2.2	Κρούση σε οριζόντια επιφάνεια	261
6.2.2.1	Συντελεστές αναπήδησης	262
6.2.2.2	Εκτροπή από το κατακόρυφο επίπεδο κίνησης	265
6.2.3	Κρούση σε κεκλιμένη επιφάνεια	267
6.2.3.1	Ομόρροπη κρούση	271
6.2.3.1.1	Επίδραση του σχήματος στους συντελεστές αναπήδησης στην ομόρροπη κρούση	271
6.2.3.1.2	Επίδραση της κλίσης στους συντελεστές αναπήδησης στην ομόρροπη κρούση	272
6.2.3.1.3	Επίδραση του σχήματος στην εκτροπή στην ομόρροπη κρούση	275
6.2.3.1.4	Επίδραση της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης στην εκτροπή	276
6.2.3.2	Αντίρροπη κρούση	278
6.2.3.2.1	Επίδραση του σχήματος στους συντελεστές αναπήδησης στην αντίρροπη κρούση	278
6.2.3.2.2	Επίδραση της κλίσης στους συντελεστές αναπήδησης στην αντίρροπη κρούση	279
6.2.3.2.3	Επίδραση του σχήματος του τεμάχους στην εκτροπή στην αντίρροπη κρούση	282
6.2.3.2.4	Επίδραση της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης στην εκτροπή	283
6.2.3.3	Λοξή κρούση	286
6.2.3.3.1	Στοιχεία κίνησης στη λοξή κρούση σφαιρικών τεμαχών	287
6.2.3.3.2	Συντελεστές αναπήδησης στη λοξή κρούση σφαιρικών τεμαχών	290
6.2.3.3.3	Εκτροπή στη λοξή κρούση σφαιρικών τεμαχών	293
6.2.3.3.4	Συντελεστές αναπήδησης στη λοξή κρούση κυβικών τεμαχών	294
6.2.3.3.5	Εκτροπή στη λοξή κρούση κυβικών τεμαχών	305
6.3	Σύνοψη	307
7	Επιτόπου Πειραματική Διερεύνηση	311
7.1	Επιτόπου δοκιμές στη σπηλιά Νταβέλη - Πεντέλη	312
7.1.1	Περιγραφή πειραματικής διάταξης	312
7.1.2	Περιγραφή δοκιμών σπηλιάς Νταβέλη	316
7.1.3	Παρουσίαση και αξιολόγηση αποτελεσμάτων	316
7.2	Επιτόπου δοκιμές στο θέατρο Βράχων - Βύρωνα	319
7.2.1	Περιγραφή πειραματικής διάταξης	319
7.2.2	Περιγραφή δοκιμών θεάτρου Βράχων	322
7.2.3	Παρουσίαση και σχολιασμός αποτελεσμάτων	323
7.2.3.1	Κάθετος συντελεστής αναπήδησης	323
7.2.3.2	Εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης	325
7.2.3.3	Κινηματικός συντελεστής αναπήδησης	326

7.2.3.4	Εκτροπή	328
7.3	Επιτόπου δοκιμές στο Πεντελικό Όρος	330
7.3.1	Περιγραφή πειραματικής διάταξης	330
7.3.2	Περιγραφή δοκιμών Πεντελικού όρους	332
7.3.3	Παρουσίαση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων από τις δοκιμές στο Πεντελικό όρος	334
7.3.3.1	Επίδραση της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης στους συντελεστές αναπήδησης για ομόρροπη κρούση	334
7.3.3.2	Επίδραση της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης στην εκτροπή για ομόρροπη κρούση	335
7.3.3.3	Επίδραση της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης στους συντελεστές αναπήδησης στην λοξή κρούση	336
7.3.3.4	Επίδραση της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης στην εκτροπή στην λοξή κρούση	344
7.4	Σύνοψη	347
8	Συγκριτική Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων	349
8.1	Επίδραση φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών	349
8.2	Επίδραση μάζας και ταχύτητας πρόσκρουσης	351
8.3	Επίδραση γωνίας πρόσκρουσης	357
8.4	Επίδραση του σχήματος του τεμάχους	362
8.5	Επίδραση γωνιακής ταχύτητας	363
8.6	Επίδραση κλίμακας δοκιμών	366
8.6.1	Δοκιμές στη σπηλιά Νταβέλη - Πεντέλη	366
8.6.2	Δοκιμές στο θέατρο βράχων Βύρωνα	369
8.6.3	Δοκιμές στο Πεντελικό όρος	376
8.7	Αξιολόγηση αναλυτικών μεθοδολογιών σχήματος	378
8.7.1	Αξιολόγηση μεθόδου Vijayakumar et al. (2012)	378
8.7.2	Αξιολόγηση μεθόδου Bozzolo and Pamini (1986)	382
8.7.3	Αξιολόγηση μεθόδου Azzoni et al. (1995)	384
8.8	Εκτροπή τροχιάς εξαιτίας της κρούσης	386
8.9	Θραύση τεμαχών κατά την πρόσκρουση	387
8.10	Συνοψη	392
9	Κατάρτιση Εμπειρικών Συσχετίσεων	395
9.1	Συσχέτιση συντελεστών αναπήδησης με την σκληρότητα	395
9.1.1	Σύγκριση με αντίστοιχες συσχετίσεις	399
9.2	Συσχέτιση συντελεστή αναπήδησης με την ορμή πρόσκρουσης	401

9.2.1	Αξιολόγηση της συσχέτισης του συντελεστή αναπήδησης με τη σκληρότητα και την ορμή βάσει άλλων δοκιμών	405
9.3	Συνδυαστική επίδραση ορμής - τύπου υλικού	407
9.3.1	Συνεκτίμηση της αποσάθρωσης της επιφάνειας πρόσκρουσης	410
9.4	Επίδραση γωνίας πρόσκρουσης	411
9.4.1	Προσδιορισμός της μέγιστης τιμής του καθέτου συντελεστή αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης	411
9.4.1.1	Εξέταση δοκιμών παραβολικής ρίψης με σφαιρικά τεμάχια	411
9.4.1.2	Εξέταση δοκιμών παραβολικής ρίψης με κυβικά τεμάχια με λειασμένες ακμές	413
9.4.1.3	Εξέταση δοκιμών παραβολικής ρίψης με σφαιρικά και πολυεδρικά τεμάχια	416
9.4.1.4	Εξέταση δοκιμών παραβολικής ρίψης με κυβικά τεμάχια	418
9.4.2	Σύνδεση του μέγιστου συντελεστή αναπήδησης με την γωνία πρόσκρουσης και το σχήμα του τεμάχου	419
9.4.2.1	Αξιολόγηση της μεθοδολογίας προσδιορισμού του μέγιστου συντελεστή αναπήδησης με τις δοκιμές πεδίου	421
9.4.3	Προσδιορισμός του εύρους τιμών του καθέτου συντελεστή αναπήδησης βάσει των γωνιών πρόσκρουσης και αναπήδησης	423
9.5	Εκτίμηση της πλευρικής εκτροπής	426
9.5.1	Κατάρτιση εμπειρικής μεθοδολογίας πρόβλεψης της εκτροπής	427
9.5.2	Αξιολόγηση μεθοδολογίας εκτίμησης της εκτροπής με τα δεδομένα της επιτόπου διερεύνησης	433
9.6	Σύνοψη	435
10	Συμπεράσματα - Προτάσεις	437
10.1	Ανακεφαλαίωση βασικών συμπερασμάτων	437
10.2	Πρωτότυπη συμβολή	442
10.3	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	443
	Πρόδρομες Δημοσιεύσεις	447
	Βιβλιογραφία	449
	Παραρτήματα	457
1	Ελεύθερη πτώση κυβικών τεμαχίων με λειασμένες ακμές	461
1.1	Λεπτοκρυσταλλικό Μάρμαρο	461
1.2	Χαλαζιακός Ψαμμίτης	462
1.3	Μάρμαρο	462
1.4	Κρυσταλλικός Ασβεστόλιθος	463
1.5	Ασβεστόλιθος	463

1.6	Πρασινίτης	464
1.7	Σχιστόλιθος	464
1.8	Μάργα	465
1.9	Εποξειδική ρητίνη	465
1.10	Τσιμεντοειδές ένεμα	466
1.11	Πολυεστέρας με χαλαζιακή άμμο	466
2	Παραβολική ρίψη κυβικών τεμαχών με λειασμένες ακμές από ψαμμίτη	467
2.1	Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 0^\circ$	467
2.2	Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 15^\circ$	468
2.3	Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 30^\circ$	468
2.4	Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 45^\circ$	468
2.5	Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 0^\circ$	469
2.6	Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 15^\circ$	469
2.7	Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 30^\circ$	469
2.8	Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 45^\circ$	470
3	Παραβολική ρίψη κυβικών τεμαχών με λειασμένες ακμές από μαρμάρo	471
3.1	Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 0^\circ$	471
3.2	Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 15^\circ$	472
3.3	Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 30^\circ$	472
3.4	Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 45^\circ$	472
3.5	Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 0^\circ$	473
3.6	Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 15^\circ$	473
3.7	Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 30^\circ$	473
3.8	Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 45^\circ$	474
4	Παραβολική ρίψη κυβικών τεμαχών με λειασμένες ακμές από ασβεστόλιθο	475
4.1	Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 0^\circ$	475
4.2	Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 15^\circ$	476
4.3	Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 30^\circ$	476
4.4	Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 45^\circ$	477
4.5	Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 45^\circ$	477
5	Παραβολική ρίψη κυβικών τεμαχών με λειασμένες ακμές από σχιστόλιθο	479
5.1	Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 0^\circ$	479
5.2	Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 15^\circ$	480
5.3	Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 30^\circ$	480
5.4	Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 45^\circ$	481
5.5	Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 45^\circ$	481

6	Παραβολική ρίψη κυβικών τεμαχών με λειασμένες ακμές από μάργα	483
6.1	Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 0^\circ$	483
6.2	Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 15^\circ$	484
6.3	Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 30^\circ$	484
6.4	Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 45^\circ$	485
6.5	Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 45^\circ$	485
7	Ελεύθερη πτώση σφαιρικών τεμαχών από ένεμα τσιμεντοειδούς βάσης	487
7.1	Διάμετρος σφαίρας $d = 3\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 10\text{cm}$	487
7.2	Διάμετρος σφαίρας $d = 3\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 25\text{cm}$	488
7.3	Διάμετρος σφαίρας $d = 3\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 50\text{cm}$	488
7.4	Διάμετρος σφαίρας $d = 3\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 100\text{cm}$	488
7.5	Διάμετρος σφαίρας $d = 3\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 200\text{cm}$	489
7.6	Διάμετρος σφαίρας $d = 3\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 300\text{cm}$	489
7.7	Διάμετρος σφαίρας $d = 4\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 10\text{cm}$	489
7.8	Διάμετρος σφαίρας $d = 4\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 25\text{cm}$	490
7.9	Διάμετρος σφαίρας $d = 4\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 50\text{cm}$	490
7.10	Διάμετρος σφαίρας $d = 4\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 100\text{cm}$	490
7.11	Διάμετρος σφαίρας $d = 4\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 200\text{cm}$	491
7.12	Διάμετρος σφαίρας $d = 4\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 300\text{cm}$	491
7.13	Διάμετρος σφαίρας $d = 5\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 10\text{cm}$	491
7.14	Διάμετρος σφαίρας $d = 5\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 25\text{cm}$	492
7.15	Διάμετρος σφαίρας $d = 5\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 50\text{cm}$	492
7.16	Διάμετρος σφαίρας $d = 5\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 100\text{cm}$	492
7.17	Διάμετρος σφαίρας $d = 5\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 200\text{cm}$	493
7.18	Διάμετρος σφαίρας $d = 5\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 300\text{cm}$	493
8	Ελεύθερη πτώση σφαιρικών τεμαχών από εποξειδική ρητίνη	495
8.1	Διάμετρος σφαίρας $d = 3\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 10\text{cm}$	495
8.2	Διάμετρος σφαίρας $d = 3\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 25\text{cm}$	496
8.3	Διάμετρος σφαίρας $d = 3\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 50\text{cm}$	496
8.4	Διάμετρος σφαίρας $d = 3\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 100\text{cm}$	496
8.5	Διάμετρος σφαίρας $d = 3\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 200\text{cm}$	497
8.6	Διάμετρος σφαίρας $d = 3\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 300\text{cm}$	497
8.7	Διάμετρος σφαίρας $d = 3\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 450\text{cm}$	497
8.8	Διάμετρος σφαίρας $d = 4\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 10\text{cm}$	498
8.9	Διάμετρος σφαίρας $d = 4\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 25\text{cm}$	498
8.10	Διάμετρος σφαίρας $d = 4\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 50\text{cm}$	498
8.11	Διάμετρος σφαίρας $d = 4\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 100\text{cm}$	499

8.12	Διάμετρος σφαίρας $d = 4\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 200\text{cm}$	499
8.13	Διάμετρος σφαίρας $d = 4\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 300\text{cm}$	499
8.14	Διάμετρος σφαίρας $d = 4\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 450\text{cm}$	500
8.15	Διάμετρος σφαίρας $d = 5\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 10\text{cm}$	500
8.16	Διάμετρος σφαίρας $d = 5\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 25\text{cm}$	500
8.17	Διάμετρος σφαίρας $d = 5\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 50\text{cm}$	501
8.18	Διάμετρος σφαίρας $d = 5\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 100\text{cm}$	501
8.19	Διάμετρος σφαίρας $d = 5\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 200\text{cm}$	501
8.20	Διάμετρος σφαίρας $d = 5\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 300\text{cm}$	502
8.21	Διάμετρος σφαίρας $d = 5\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 450\text{cm}$	502
8.22	Διάμετρος σφαίρας $d = 6\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 10\text{cm}$	502
8.23	Διάμετρος σφαίρας $d = 6\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 25\text{cm}$	503
8.24	Διάμετρος σφαίρας $d = 6\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 50\text{cm}$	503
8.25	Διάμετρος σφαίρας $d = 6\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 100\text{cm}$	503
8.26	Διάμετρος σφαίρας $d = 6\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 200\text{cm}$	504
8.27	Διάμετρος σφαίρας $d = 6\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 300\text{cm}$	504
8.28	Διάμετρος σφαίρας $d = 6\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 450\text{cm}$	504
9	Ελεύθερη πτώση σφαιρικών τεμαχίων από μάρμαρο	505
9.1	Διάμετρος σφαίρας $d = 2.7\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 12.5\text{cm}$	505
9.2	Διάμετρος σφαίρας $d = 2.7\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 25\text{cm}$	506
9.3	Διάμετρος σφαίρας $d = 2.7\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 50\text{cm}$	506
9.4	Διάμετρος σφαίρας $d = 2.7\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 100\text{cm}$	506
9.5	Διάμετρος σφαίρας $d = 3\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 12.5\text{cm}$	507
9.6	Διάμετρος σφαίρας $d = 3\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 25\text{cm}$	507
9.7	Διάμετρος σφαίρας $d = 3\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 50\text{cm}$	507
9.8	Διάμετρος σφαίρας $d = 3\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 100\text{cm}$	508
9.9	Διάμετρος σφαίρας $d = 3.4\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 12.5\text{cm}$	508
9.10	Διάμετρος σφαίρας $d = 3.4\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 25\text{cm}$	508
9.11	Διάμετρος σφαίρας $d = 3.4\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 50\text{cm}$	509
9.12	Διάμετρος σφαίρας $d = 3.4\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 100\text{cm}$	509
10	Ελεύθερη πτώση σφαιρικών τεμαχίων από ψαμμίτη	511
10.1	Διάμετρος σφαίρας $d = 2.8\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 12.5\text{cm}$	511
10.2	Διάμετρος σφαίρας $d = 2.8\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 25\text{cm}$	512
10.3	Διάμετρος σφαίρας $d = 2.8\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 50\text{cm}$	512
10.4	Διάμετρος σφαίρας $d = 2.8\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 100\text{cm}$	512
10.5	Διάμετρος σφαίρας $d = 2.8\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 180\text{cm}$	513
10.6	Διάμετρος σφαίρας $d = 3.9\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 12.5\text{cm}$	513

10.7	Διάμετρος σφαίρας $d = 3.9\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 25\text{cm}$	513
10.8	Διάμετρος σφαίρας $d = 3.9\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 50\text{cm}$	514
10.9	Διάμετρος σφαίρας $d = 3.9\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 100\text{cm}$	514
10.10	Διάμετρος σφαίρας $d = 3.9\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 180\text{cm}$	514
10.11	Διάμετρος σφαίρας $d = 4.3\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 12.5\text{cm}$	515
10.12	Διάμετρος σφαίρας $d = 4.3\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 25\text{cm}$	515
10.13	Διάμετρος σφαίρας $d = 4.3\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 50\text{cm}$	515
10.14	Διάμετρος σφαίρας $d = 4.3\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 100\text{cm}$	516
10.15	Διάμετρος σφαίρας $d = 4.3\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 180\text{cm}$	516
11	Παραβολική ρίψη σφαιρικών τεμαχίων από ένεμα τσιμεντοειδούς βάσης	517
11.1	Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 3.0\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 56^\circ$	517
11.2	Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 3.6\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 51^\circ$	518
11.3	Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 3.7\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 47^\circ$	518
11.4	Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 2.6\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 42^\circ$	518
11.5	Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 2.1\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 26^\circ$	519
11.6	Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 3.9\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 32^\circ$	519
11.7	Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.6\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 33^\circ$	519
11.8	Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.1\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 30^\circ$	520
11.9	Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.5\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 45^\circ$	520
11.10	Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.2\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 43^\circ$	520
11.11	Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 6.0\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 42^\circ$	521
11.12	Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.0\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 48^\circ$	521
11.13	Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 6.0\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 48^\circ$	521
11.14	Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 6.6\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 48^\circ$	522
11.15	Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.7\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 65^\circ$	522
11.16	Διάμετρος $d = 4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 3.0\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 55^\circ$	522
11.17	Διάμετρος $d = 4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 3.5\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 51^\circ$	523
11.18	Διάμετρος $d = 4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.7\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 65^\circ$	523
11.19	Διάμετρος $d = 4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 3.4\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 47^\circ$	523
11.20	Διάμετρος $d = 4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 2.2\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 28^\circ$	524
11.21	Διάμετρος $d = 4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 3.8\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 34^\circ$	524
11.22	Διάμετρος $d = 4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.5\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 33^\circ$	524
11.23	Διάμετρος $d = 4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.1\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 32^\circ$	525
11.24	Διάμετρος $d = 4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.4\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 44^\circ$	525
11.25	Διάμετρος $d = 4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.2\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 43^\circ$	525
11.26	Διάμετρος $d = 4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.8\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 41^\circ$	526
11.27	Διάμετρος $d = 4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.1\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 47^\circ$	526
11.28	Διάμετρος $d = 4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.5\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 50^\circ$	526

11.29	Διάμετρος $d = 4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 6.4\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 46^\circ$	527
11.30	Διάμετρος $d = 4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.8\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 67^\circ$	527
12	Παραβολική ρίψη σφαιρικών τεμαχίων από μάρμαρο	529
12.1	Διάμετρος $d = 2.7\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 2.7\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 55^\circ$	529
12.2	Διάμετρος $d = 2.7\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 3.1\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 49^\circ$	530
12.3	Διάμετρος $d = 2.7\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 3.3\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 45^\circ$	530
12.4	Διάμετρος $d = 2.7\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 2.4\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 37^\circ$	530
12.5	Διάμετρος $d = 2.7\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 1.9\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 21^\circ$	531
12.6	Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 2.7\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 55^\circ$	531
12.7	Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 3.1\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 50^\circ$	531
12.8	Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 3.3\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 44^\circ$	532
12.9	Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 2.4\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 36^\circ$	532
12.10	Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 1.9\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 19^\circ$	532
12.11	Διάμετρος $d = 3.4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 2.7\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 55^\circ$	533
12.12	Διάμετρος $d = 3.4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 3.2\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 50^\circ$	533
12.13	Διάμετρος $d = 3.4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 3.3\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 44^\circ$	533
12.14	Διάμετρος $d = 3.4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 2.4\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 37^\circ$	534
12.15	Διάμετρος $d = 3.4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 2.0\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 20^\circ$	534
13	Παραβολική ρίψη σφαιρικών τεμαχίων από ψαμμίτη	535
13.1	Διάμετρος $d = 2.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 2.7\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 51^\circ$	535
13.2	Διάμετρος $d = 2.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 3.1\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 47^\circ$	536
13.3	Διάμετρος $d = 2.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 3.9\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 48^\circ$	536
13.4	Διάμετρος $d = 2.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 2.4\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 36^\circ$	536
13.5	Διάμετρος $d = 2.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 1.9\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 18^\circ$	537
13.6	Διάμετρος $d = 3.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 2.7\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 51^\circ$	537
13.7	Διάμετρος $d = 3.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 3.3\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 48^\circ$	537
13.8	Διάμετρος $d = 3.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 3.5\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 45^\circ$	538
13.9	Διάμετρος $d = 3.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 2.5\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 36^\circ$	538
13.10	Διάμετρος $d = 3.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 1.9\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 19^\circ$	538
13.11	Διάμετρος $d = 4.3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 2.8\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 50^\circ$	539
13.12	Διάμετρος $d = 4.3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 3.3\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 45^\circ$	539
13.13	Διάμετρος $d = 4.3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 3.7\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 45^\circ$	539
13.14	Διάμετρος $d = 4.3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 2.5\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 36^\circ$	540
13.15	Διάμετρος $d = 4.3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 2.0\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 20^\circ$	540
14	Παραβολική ρίψη σφαιρικών τεμαχίων από μάρμαρο	
	συνεκτίμηση περιστροφικής ταχύτητας	541
14.1	Διάμετρος $d = 2.7\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.2\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 65^\circ$	541

14.2	Διάμετρος $d = 2.7\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 3.5\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 32^\circ$	542
14.3	Διάμετρος $d = 2.7\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.2\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 31^\circ$	542
14.4	Διάμετρος $d = 2.7\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.9\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 30^\circ$	542
14.5	Διάμετρος $d = 2.7\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.3\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 41^\circ$	543
14.6	Διάμετρος $d = 2.7\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.0\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 40^\circ$	543
14.7	Διάμετρος $d = 2.7\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.6\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 40^\circ$	543
14.8	Διάμετρος $d = 2.7\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.4\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 48^\circ$	544
14.9	Διάμετρος $d = 2.7\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.1\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 46^\circ$	544
14.10	Διάμετρος $d = 2.7\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.9\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 45^\circ$	544
14.11	Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.2\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 65^\circ$	545
14.12	Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 3.5\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 31^\circ$	545
14.13	Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.3\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 31^\circ$	545
14.14	Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.8\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 30^\circ$	546
14.15	Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.2\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 41^\circ$	546
14.16	Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.9\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 41^\circ$	546
14.17	Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.7\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 41^\circ$	547
14.18	Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.4\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 47^\circ$	547
14.19	Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.1\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 47^\circ$	547
14.20	Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.9\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 46^\circ$	548
14.21	Διάμετρος $d = 3.4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.2\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 65^\circ$	548
14.22	Διάμετρος $d = 3.4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 3.5\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 32^\circ$	548
14.23	Διάμετρος $d = 3.4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.3\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 31^\circ$	549
14.24	Διάμετρος $d = 3.4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.9\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 32^\circ$	549
14.25	Διάμετρος $d = 3.4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.2\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 40^\circ$	549
14.26	Διάμετρος $d = 3.4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.1\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 40^\circ$	550
14.27	Διάμετρος $d = 3.4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.7\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 41^\circ$	550
14.28	Διάμετρος $d = 3.4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.4\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 47^\circ$	550
14.29	Διάμετρος $d = 3.4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.2\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 46^\circ$	551
14.30	Διάμετρος $d = 3.4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.9\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 45^\circ$	551

15 Παραβολική ρίψη σφαιρικών τεμαχίων από ψαμμίτη

συνεκτίμηση περιστροφικής ταχύτητας 553

15.1	Διάμετρος $d = 2.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.5\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 66^\circ$	553
15.2	Διάμετρος $d = 2.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 3.7\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 31^\circ$	554
15.3	Διάμετρος $d = 2.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.5\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 31^\circ$	554
15.4	Διάμετρος $d = 2.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.1\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 31^\circ$	554
15.5	Διάμετρος $d = 2.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.4\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 42^\circ$	555
15.6	Διάμετρος $d = 2.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.1\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 40^\circ$	555
15.7	Διάμετρος $d = 2.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.8\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 40^\circ$	555

15.8	Διάμετρος $d = 2.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.6\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 48^\circ$	556
15.9	Διάμετρος $d = 2.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.3\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 46^\circ$	556
15.10	Διάμετρος $d = 2.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 6.0\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 46^\circ$	556
15.11	Διάμετρος $d = 3.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.5\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 66^\circ$	557
15.12	Διάμετρος $d = 3.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 3.7\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 32^\circ$	557
15.13	Διάμετρος $d = 3.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.5\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 31^\circ$	557
15.14	Διάμετρος $d = 3.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.3\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 33^\circ$	558
15.15	Διάμετρος $d = 3.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.4\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 41^\circ$	558
15.16	Διάμετρος $d = 3.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.2\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 40^\circ$	558
15.17	Διάμετρος $d = 3.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.8\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 40^\circ$	559
15.18	Διάμετρος $d = 3.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.6\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 47^\circ$	559
15.19	Διάμετρος $d = 3.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.4\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 46^\circ$	559
15.20	Διάμετρος $d = 3.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 6.1\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 44^\circ$	560
15.21	Διάμετρος $d = 4.3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.6\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 65^\circ$	560
15.22	Διάμετρος $d = 4.3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 3.8\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 33^\circ$	560
15.23	Διάμετρος $d = 4.3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.5\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 31^\circ$	561
15.24	Διάμετρος $d = 4.3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.1\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 30^\circ$	561
15.25	Διάμετρος $d = 4.3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.4\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 41^\circ$	561
15.26	Διάμετρος $d = 4.3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.1\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 40^\circ$	562
15.27	Διάμετρος $d = 4.3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.8\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 40^\circ$	562
15.28	Διάμετρος $d = 4.3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.6\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 46^\circ$	562
15.29	Διάμετρος $d = 4.3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.3\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 47^\circ$	563
15.30	Διάμετρος $d = 4.3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 6.1\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 45^\circ$	563
16	Ελεύθερη πτώση σφαιρικών τεμαχίων σε επιφάνεια διαφορετικού τύπου	565
16.1	Σφαίρα μαρμάρου $d = 2.7\text{cm}$ σε επιφάνεια πρόσκρουσης τσιμεντοειδούς ενέ- ματος	565
16.2	Σφαίρα μαρμάρου $d = 3\text{cm}$ σε επιφάνεια πρόσκρουσης τσιμεντοειδούς ενέματος	566
16.3	Σφαίρα μαρμάρου $d = 3.3\text{cm}$ σε επιφάνεια πρόσκρουσης τσιμεντοειδούς ενέ- ματος	566
16.4	Σφαίρα ψαμμίτη $d = 2.9\text{cm}$ σε επιφάνεια πρόσκρουσης τσιμεντοειδούς ενέματος	566
16.5	Σφαίρα ψαμμίτη $d = 4.0\text{cm}$ σε επιφάνεια πρόσκρουσης τσιμεντοειδούς ενέματος	567
16.6	Σφαίρα ψαμμίτη $d = 4.3\text{cm}$ σε επιφάνεια πρόσκρουσης τσιμεντοειδούς ενέματος	567
16.7	Σφαίρα τσιμεντοειδούς ενέματος $d = 3\text{cm}$ σε επιφάνεια πρόσκρουσης μαρμάρου	567
16.8	Σφαίρα τσιμεντοειδούς ενέματος $d = 4\text{cm}$ σε επιφάνεια πρόσκρουσης μαρμάρου	568
16.9	Σφαίρα ψαμμίτη $d = 2.9\text{cm}$ σε επιφάνεια πρόσκρουσης μαρμάρου	568
16.10	Σφαίρα ψαμμίτη $d = 4\text{cm}$ σε επιφάνεια πρόσκρουσης μαρμάρου	568
16.11	Σφαίρα ψαμμίτη $d = 4.3\text{cm}$ σε επιφάνεια πρόσκρουσης μαρμάρου	569
16.12	Σφαίρα τσιμεντοειδούς ενέματος $d = 3\text{cm}$ σε επιφάνεια πρόσκρουσης ψαμμίτη	569

16.13 Σφαίρα τσιμεντοειδούς ενέματος $d = 4\text{cm}$ σε επιφάνεια πρόσκρουσης ψαμμίτη	569
16.14 Σφαίρα μαρμάρου $d = 2.7\text{cm}$ σε επιφάνεια πρόσκρουσης ψαμμίτη	570
16.15 Σφαίρα μαρμάρου $d = 3\text{cm}$ σε επιφάνεια πρόσκρουσης ψαμμίτη	570
16.16 Σφαίρα μαρμάρου $d = 3.3\text{cm}$ σε επιφάνεια πρόσκρουσης ψαμμίτη	570
17 Παραβολική ρίψη ελλειπτικών δίσκων	571
17.1 Έλλειψη με λόγο $a/b = 2$ σε επιφάνεια κλίσης $\theta = 0^\circ$	572
17.2 Έλλειψη με λόγο $a/b = 2$ σε επιφάνεια κλίσης $\theta = 14.4^\circ$	572
17.3 Έλλειψη με λόγο $a/b = 2$ σε επιφάνεια κλίσης $\theta = 26.9^\circ$	573
17.4 Έλλειψη με λόγο $a/b = 2$ σε επιφάνεια κλίσης $\theta = 36.9^\circ$	573
17.5 Έλλειψη με λόγο $a/b = 1.74$ σε επιφάνεια κλίσης $\theta = 0^\circ$	574
17.6 Έλλειψη με λόγο $a/b = 1.74$ σε επιφάνεια κλίσης $\theta = 14.4^\circ$	574
17.7 Έλλειψη με λόγο $a/b = 1.74$ σε επιφάνεια κλίσης $\theta = 26.9^\circ$	575
17.8 Έλλειψη με λόγο $a/b = 1.74$ σε επιφάνεια κλίσης $\theta = 36.9^\circ$	575
17.9 Έλλειψη με λόγο $a/b = 1.52$ σε επιφάνεια κλίσης $\theta = 0^\circ$	576
17.10 Έλλειψη με λόγο $a/b = 1.52$ σε επιφάνεια κλίσης $\theta = 14.4^\circ$	576
17.11 Έλλειψη με λόγο $a/b = 1.52$ σε επιφάνεια κλίσης $\theta = 26.9^\circ$	577
17.12 Έλλειψη με λόγο $a/b = 1.52$ σε επιφάνεια κλίσης $\theta = 36.9^\circ$	577
17.13 Έλλειψη με λόγο $a/b = 1.25$ σε επιφάνεια κλίσης $\theta = 0^\circ$	578
17.14 Έλλειψη με λόγο $a/b = 1.25$ σε επιφάνεια κλίσης $\theta = 14.4^\circ$	578
17.15 Έλλειψη με λόγο $a/b = 1.25$ σε επιφάνεια κλίσης $\theta = 26.9^\circ$	579
17.16 Έλλειψη με λόγο $a/b = 1.25$ σε επιφάνεια κλίσης $\theta = 36.9^\circ$	579
18 Ελεύθερη πτώση σφαιρικών τεμαχών σε αποσαθρωμένη επιφάνεια	581
18.1 Υγής επιφάνεια σχιστόλιθου $R = 36.2$	581
18.2 Επιφάνεια σχιστόλιθου με βαθμό αποσάθρωσης III $R = 20$	582
18.3 Επιφάνεια σχιστόλιθου με βαθμό αποσάθρωσης IV $R = 16.3$	582
19 Παραβολική ρίψη σφαιρικών τεμαχών σε τραχεία επιφάνεια	583
19.1 Τραχύτητα επιφάνειας $JRC = 0$ και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 25^\circ$	583
19.2 Τραχύτητα επιφάνειας $JRC = 0$ και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 45^\circ$	584
19.3 Τραχύτητα επιφάνειας $JRC = 0$ και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 60^\circ$	584
19.4 Τραχύτητα επιφάνειας $JRC = 0$ και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 70^\circ$	584
19.5 Τραχύτητα επιφάνειας $JRC = 2$ και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 25^\circ$	585
19.6 Τραχύτητα επιφάνειας $JRC = 2$ και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 45^\circ$	585
19.7 Τραχύτητα επιφάνειας $JRC = 2$ και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 60^\circ$	586
19.8 Τραχύτητα επιφάνειας $JRC = 2$ και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 70^\circ$	586
19.9 Τραχύτητα επιφάνειας $JRC = 6$ και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 25^\circ$	587
19.10 Τραχύτητα επιφάνειας $JRC = 6$ και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 45^\circ$	587
19.11 Τραχύτητα επιφάνειας $JRC = 6$ και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 60^\circ$	588

19.12	Τραχύτητα επιφάνειας $JRC = 6$ και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 70^\circ$	588
19.13	Τραχύτητα επιφάνειας $JRC = 8$ και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 25^\circ$	589
19.14	Τραχύτητα επιφάνειας $JRC = 8$ και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 45^\circ$	589
19.15	Τραχύτητα επιφάνειας $JRC = 8$ και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 60^\circ$	590
19.16	Τραχύτητα επιφάνειας $JRC = 8$ και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 70^\circ$	590
20	Παραβολική ρίψη πολυεδρικών τεμαχών σε τραχεία επιφάνεια	591
20.1	Τραχύτητα επιφάνειας $JRC = 0$ και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 30^\circ$	591
20.2	Τραχύτητα επιφάνειας $JRC = 0$ και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 50^\circ$	592
20.3	Τραχύτητα επιφάνειας $JRC = 0$ και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 65^\circ$	592
20.4	Τραχύτητα επιφάνειας $JRC = 0$ και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 80^\circ$	593
20.5	Τραχύτητα επιφάνειας $JRC = 2$ και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 30^\circ$	593
20.6	Τραχύτητα επιφάνειας $JRC = 2$ και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 45^\circ$	594
20.7	Τραχύτητα επιφάνειας $JRC = 2$ και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 60^\circ$	594
20.8	Τραχύτητα επιφάνειας $JRC = 2$ και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 80^\circ$	595
20.9	Τραχύτητα επιφάνειας $JRC = 6$ και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 30^\circ$	595
20.10	Τραχύτητα επιφάνειας $JRC = 6$ και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 50^\circ$	596
20.11	Τραχύτητα επιφάνειας $JRC = 6$ και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 60^\circ$	596
20.12	Τραχύτητα επιφάνειας $JRC = 6$ και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 80^\circ$	597
20.13	Τραχύτητα επιφάνειας $JRC = 8$ και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 30^\circ$	597
20.14	Τραχύτητα επιφάνειας $JRC = 8$ και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 50^\circ$	598
20.15	Τραχύτητα επιφάνειας $JRC = 8$ και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 60^\circ$	598
20.16	Τραχύτητα επιφάνειας $JRC = 8$ και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 80^\circ$	599
21	Ελεύθερη πτώση σφαιρικών τεμαχών σε επιφάνεια	
	με επικάλυψη ξηρού εδαφικού υλικού	601
21.1	Σφαίρα $d = 3\text{cm}$ σε επιφάνεια χωρίς επικάλυψη	601
21.2	Σφαίρα $d = 4\text{cm}$ σε επιφάνεια χωρίς επικάλυψη	602
21.3	Σφαίρα $d = 3\text{cm}$ σε επιφάνεια με επικάλυψη αργίλου πάχους $t = 1\text{mm}$	602
21.4	Σφαίρα $d = 4\text{cm}$ σε επιφάνεια με επικάλυψη αργίλου πάχους $t = 1\text{mm}$	602
21.5	Σφαίρα $d = 3\text{cm}$ σε επιφάνεια με επικάλυψη αργίλου πάχους $t = 2\text{mm}$	603
21.6	Σφαίρα $d = 4\text{cm}$ σε επιφάνεια με επικάλυψη αργίλου πάχους $t = 2\text{mm}$	603
21.7	Σφαίρα $d = 3\text{cm}$ σε επιφάνεια με επικάλυψη άμμου πάχους $t = 1\text{mm}$	603
21.8	Σφαίρα $d = 4\text{cm}$ σε επιφάνεια με επικάλυψη άμμου πάχους $t = 1\text{mm}$	604
21.9	Σφαίρα $d = 3\text{cm}$ σε επιφάνεια με επικάλυψη άμμου πάχους $t = 2\text{mm}$	604
21.10	Σφαίρα $d = 4\text{cm}$ σε επιφάνεια με επικάλυψη άμμου πάχους $t = 2\text{mm}$	604
21.11	Σφαίρα $d = 3\text{cm}$ σε επιφάνεια με επικάλυψη αργίλου-άμμου (κ.β. 75-25%) πάχους $t = 1\text{mm}$	605

21.12 Σφαίρα $d = 3\text{cm}$ σε επιφάνεια με επικάλυψη αργίλου-άμμου (κ.β. 50-50%) πάχους $t = 1\text{mm}$	605
21.13 Σφαίρα $d = 3\text{cm}$ σε επιφάνεια με επικάλυψη αργίλου-άμμου (κ.β. 25-75%) πάχους $t = 1\text{mm}$	605
21.14 Σφαίρα $d = 3\text{cm}$ σε επιφάνεια με επικάλυψη αργίλου-άμμου (κ.β. 75-25%) πάχους $t = 2\text{mm}$	606
21.15 Σφαίρα $d = 3\text{cm}$ σε επιφάνεια με επικάλυψη αργίλου-άμμου (κ.β. 50-50%) πάχους $t = 2\text{mm}$	606
21.16 Σφαίρα $d = 3\text{cm}$ σε επιφάνεια με επικάλυψη αργίλου-άμμου (κ.β. 25-75%) πάχους $t = 2\text{mm}$	606
22 Ελεύθερη πτώση σφαιρικών τεμαχίων σε επιφάνεια με επάλειψη υδαρούς αργιλικού υλικού	607
22.1 Επιφάνεια χωρίς επικάλυψη	607
22.2 Επιφάνεια με 1 στρώση επάλειψης	608
22.3 Επιφάνεια με 2 στρώσεις επάλειψης	608
22.4 Επιφάνεια με 3 στρώσεις επάλειψης	608
22.5 Επιφάνεια με 4 στρώσεις επάλειψης	609
22.6 Επιφάνεια με 5 στρώσεις επάλειψης	609
22.7 Επιφάνεια με 6 στρώσεις επάλειψης	609
22.8 Επιφάνεια με 7 στρώσεις επάλειψης	610
22.9 Επιφάνεια με 8 στρώσεις επάλειψης	610
22.10 Επιφάνεια με 9 στρώσεις επάλειψης	610
22.11 Επιφάνεια με 10 στρώσεις επάλειψης	611
22.12 Επιφάνεια με 12 στρώσεις επάλειψης	611
23 Ελεύθερη πτώση σφαιρικών τεμαχίων σε επιφάνεια με επάλειψη αργιλικού υλικού σε ξηρά κατάσταση	613
23.1 Ρίψη από ύψος $h_d = 100\text{cm}$ σε επιφάνεια με πάχος επάλειψης $t = 0.05\text{mm}$ – 1 ^η στρώση	613
23.2 Ρίψη από ύψος $h_d = 100\text{cm}$ σε επιφάνεια με πάχος επάλειψης $t = 0.16\text{mm}$ – 2 ^η στρώση	614
23.3 Ρίψη από ύψος $h_d = 100\text{cm}$ σε επιφάνεια με πάχος επάλειψης $t = 0.22\text{mm}$ – 3 ^η στρώση	614
23.4 Ρίψη από ύψος $h_d = 100\text{cm}$ σε επιφάνεια με πάχος επάλειψης $t = 0.48\text{mm}$ – 5 ^η στρώση	614
23.5 Ρίψη από ύψος $h_d = 100\text{cm}$ σε επιφάνεια με πάχος επάλειψης $t = 0.82\text{mm}$ – 8 ^η στρώση	615

23.6	Ρίψη από ύψος $h_d = 100\text{cm}$ σε επιφάνεια με πάχος επάλειψης $t = 1.09\text{mm} - 10^{\text{η}}$ στρώση	615
23.7	Ρίψη από ύψος $h_d = 150\text{cm}$ σε επιφάνεια με πάχος επάλειψης $t = 0.07\text{mm} - 1^{\text{η}}$ στρώση	615
23.8	Ρίψη από ύψος $h_d = 150\text{cm}$ σε επιφάνεια με πάχος επάλειψης $t = 0.17\text{mm} - 2^{\text{η}}$ στρώση	616
23.9	Ρίψη από ύψος $h_d = 150\text{cm}$ σε επιφάνεια με πάχος επάλειψης $t = 0.43\text{mm} - 4^{\text{η}}$ στρώση	616
23.10	Ρίψη από ύψος $h_d = 150\text{cm}$ σε επιφάνεια με πάχος επάλειψης $t = 0.64\text{mm} - 6^{\text{η}}$ στρώση	616
23.11	Ρίψη από ύψος $h_d = 150\text{cm}$ σε επιφάνεια με πάχος επάλειψης $t = 0.77\text{mm} - 8^{\text{η}}$ στρώση	617
23.12	Ρίψη από ύψος $h_d = 150\text{cm}$ σε επιφάνεια με πάχος επάλειψης $t = 0.91\text{mm} - 10^{\text{η}}$ στρώση	617
23.13	Ρίψη από ύψος $h_d = 150\text{cm}$ σε επιφάνεια με πάχος επάλειψης $t = 1.17\text{mm} - 12^{\text{η}}$ στρώση	617
23.14	Ρίψη από ύψος $h_d = 150\text{cm}$ σε επιφάνεια με πάχος επάλειψης $t = 1.41\text{mm} - 14^{\text{η}}$ στρώση	618
24	Ελεύθερη πτώση σφαιρικών τεμαχίων σε επιφάνεια με αναζυμωμένο εδαφικό μείγμα	619
24.1	Επιφάνεια με επικάλυψη αργίλου-άμμου M31 (κ.β. 75-25%) πάχους $t = 1\text{mm}$	619
24.2	Επιφάνεια με επικάλυψη αργίλου-άμμου M31 (κ.β. 75-25%) πάχους $t = 2\text{mm}$	620
24.3	Επιφάνεια με επικάλυψη αργίλου-άμμου M31 (κ.β. 50-50%) πάχους $t = 1\text{mm}$	620
24.4	Επιφάνεια με επικάλυψη αργίλου-άμμου M31 (κ.β. 50-50%) πάχους $t = 2\text{mm}$	621
24.5	Επιφάνεια με επικάλυψη αργίλου-άμμου M31 (κ.β. 25-75%) πάχους $t = 1\text{mm}$	621
24.6	Επιφάνεια με επικάλυψη αργίλου-άμμου M31 (κ.β. 25-75%) πάχους $t = 2\text{mm}$	622
24.7	Επιφάνεια με επικάλυψη αργίλου-άμμου M34 (κ.β. 75-25%) πάχους $t = 1\text{mm}$	622
24.8	Επιφάνεια με επικάλυψη αργίλου-άμμου M34 (κ.β. 75-25%) πάχους $t = 2\text{mm}$	623
24.9	Επιφάνεια με επικάλυψη αργίλου-άμμου M34 (κ.β. 50-50%) πάχους $t = 1\text{mm}$	623

24.10 Επιφάνεια με επικάλυψη αργίλου-άμμου M34 (κ.β. 50-50%) πάχους $t = 2\text{mm}$	624
24.11 Επιφάνεια με επικάλυψη αργίλου-άμμου M34 (κ.β. 25-75%) πάχους $t = 1\text{mm}$	624
24.12 Επιφάνεια με επικάλυψη αργίλου-άμμου M34 (κ.β. 25-75%) πάχους $t = 2\text{mm}$	625
25 Ελεύθερη πτώση κυβικών τεμαχών	627
25.1 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 20^\circ$	627
25.2 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 45^\circ$	628
25.3 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 70^\circ$	628
26 Ελεύθερη πτώση πολυεδρικών τεμαχών	629
26.1 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 20^\circ$	629
26.2 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 45^\circ$	630
26.3 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 70^\circ$	630
27 Ελεύθερη πτώση σφαιρικών τεμαχών	631
27.1 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 20^\circ$	631
27.2 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 45^\circ$	632
27.3 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 70^\circ$	632
28 Παραβολική ρίψη σφαιρικών τεμαχών	633
28.1 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 0^\circ$	634
29 Παραβολική ρίψη κυβικών τεμαχών	635
29.1 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 0^\circ$	636
30 Παραβολική ρίψη σφαιρικών τεμαχών σε επιφάνεια με κλίση $\theta = 13^\circ$	639
30.1 Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = -1^\circ$	640
30.2 Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 33^\circ$	641
30.3 Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 63^\circ$	642
30.4 Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 91^\circ$	643
30.5 Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 123^\circ$	644
30.6 Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 150^\circ$	645
30.7 Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 179^\circ$	646
31 Παραβολική ρίψη κυβικών τεμαχών σε επιφάνεια με κλίση $\theta = 13.5^\circ$	647
31.1 Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 0^\circ$	648
31.2 Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 36^\circ$	649
31.3 Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 81^\circ$	650
31.4 Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 104^\circ$	651

31.5	Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 129^\circ$	652
31.6	Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 180^\circ$	653
32	Παραβολική ρίψη κυβικών τεμαχών σε επιφάνεια με κλίση $\theta = 24^\circ$	655
32.1	Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 0^\circ$	656
32.2	Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 35^\circ$	658
32.3	Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 81^\circ$	659
32.4	Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 96^\circ$	660
32.5	Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 120^\circ$	661
32.6	Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 141^\circ$	662
32.7	Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 180^\circ$	663
33	Παραβολική ρίψη κυβικών τεμαχών σε επιφάνεια με κλίση $\theta = 43.5^\circ$	665
33.1	Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 0^\circ$	666
33.2	Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 51^\circ$	667
33.3	Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 85^\circ$	668
33.4	Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 129^\circ$	669
33.5	Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 180^\circ$	670
34	Επιτόπου δοκιμές στην Σπηλιά Νταβέλη	671
34.1	Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 30^\circ$	672
35	Επιτόπου δοκιμές στο Θέατρο Βράχων - Θέση 1: $\theta = 55^\circ$	673
35.1	Κυβικά τεμάχια	673
35.2	Πολυεδρικά τεμάχια	674
35.3	Σφαιρικά τεμάχια	674
35.4	Φυσικά - ακανόνιστα τεμάχια	675
36	Επιτόπου δοκιμές στο Θέατρο Βράχων - Θέση 2: $\theta = 75^\circ$	677
36.1	Κυβικά τεμάχια	678
36.2	Πολυεδρικά τεμάχια	679
36.3	Σφαιρικά τεμάχια	679
36.4	Φυσικά - ακανόνιστα τεμάχια	680
37	Επιτόπου δοκιμές στο Πεντελικό όρος - Θέση 1: $\theta = 20^\circ$	681
37.1	Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 2^\circ$	682
37.2	Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 41^\circ$	683
37.3	Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 87^\circ$	684
37.4	Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 128^\circ$	685
38	Επιτόπου δοκιμές στο Πεντελικό όρος - Θέση 2: $\theta = 45^\circ$	687
38.1	Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = -1^\circ$	688

38.2 Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 37^\circ$	689
38.3 Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 93^\circ$	690
38.4 Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 152^\circ$	691

Κατάλογος σχημάτων

2.1	Η ιστορική κατολίθωση του Elm	7
2.2	Αίτια καταπτώσεων	7
2.3	Τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών	10
2.4	Εξάρτηση των καταπτώσεων από τις κλιματολογικές συνθήκες	11
2.5	Η κατάπτωση των Τεμπών, εθνικό οδικό δίκτυο Αθηνών – Θεσσαλονίκης	13
2.6	Αγκύρια και πλήρως αγκυρώμενο μεταλλικό πλέγμα	16
2.7	Εύρος εφαρμογής παθητικών μέτρων ανάσχεσης καταπτώσεων	18
2.8	Φράχτες ανάσχεσης καταπτώσεων	18
2.9	Τυπική διατομή εύκαμπτου φράχτη ανάσχεσης	19
2.10	Λεπτομέρειες εύκαμπτων φραχτών ανάσχεσης	20
2.11	Γεωμετρία πλεγμάτων	20
2.12	Μεταλλικά πλέγματα τύπου «κουρτίνας»	22
2.13	Εμπειρικό διάγραμμα σχεδιασμού τάφρων ανάσχεσης	23
2.14	Στέγαστρα καταπτώσεων	24
2.15	Οπλισμένα επιχώματα	25
2.16	Απομειωτήρες κίνησης	26
3.1	Τύποι κίνησης στις καταπτώσεις βράχων	28
3.2	Παραβολική τροχιά	28
3.3	Γεωμετρία επαφής τεμάχους ακανόνιστου σχήματος σε κεκλιμένο πρανές	32
3.4	Προσομοίωση της επαφής στην κεντρική κρούση	34
3.5	Πειραματική διάταξη του Νεύτωνα	35
3.6	Μεγέθη που χρησιμοποιούνται στους ορισμούς των συντελεστών αναπήδησης	36
3.7	Στοιχεία από επιτόπου έρευνα για την διενέργεια ανάδρομων αναλύσεων	40
3.8	Καθέτος και εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης βάσει της σύστασης του πρανούς (Fornaro et al., 1990)	45
3.9	Σύγκριση των βιβλιογραφικών τιμών του καθέτου και του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης με τις προτεινόμενες στο λογισμικό RocFall ανάλογα με την σύσταση του πρανούς	51
3.10	Σχέση μεταξύ γωνιών πρόσκρουσης και αναπήδησης συναρτήσει του λόγου του καθέτου προς τον εφαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης	53

3.11	Εξάρτηση του ύψους αναπήδησης και της ταχύτητας κίνησης του τεμάχου από τον λόγο του καθέτου προς τον εφαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης	53
3.12	Διαγραφόμενες τροχιές και τα χαρακτηριστικά τους για διάφορες τιμές του καθέτου συντελεστή αναπήδησης	56
3.13	Γωνία πρόσκρουσης (α_i) και κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης (ϑ)	57
3.14	Κάθετος και εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης (Wu, 1985)	58
3.15	Πειραματική διάταξη και καταγραφή δοκιμής (Chau et al., 2002)	59
3.16	Συντελεστές αναπήδησης συναρτήσει της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης (Chau et al., 2002)	60
3.17	Κάθετος και εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης (Cagnoli and Manga, 2003)	61
3.18	Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης (Giacomini et al., 2012)	62
3.19	Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης (Wyllie, 2014a)	63
3.20	Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης, για διάφορες τιμές του λόγου ω_i/v_i (Goldsmith, 1960)	64
3.21	Κάθετος συντελεστή αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης, για διάφορες τιμές της γωνίας αναπήδησης (Goldsmith, 1960)	64
3.22	Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της σκληρότητας σφύρας Schmidt (Rayudu, 1997)	65
3.23	Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της σκληρότητας κατά την σφύρα Schmidt της επιφάνειας πρόσκρουσης (Peng, 2000)	66
3.24	Σύγκριση πειραματικών και εκτιμώμενων τιμών για σφαιρικά και ακανόνιστα τεμάχια (Peng, 2000)	67
3.25	Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της σκληρότητας σφύρας Schmidt (Ansari et al., 2015)	69
3.26	Πειραματική διάταξη για την μελέτη κρούσης σε εδαφικό υλικό (Heidenreich, 2004)	70
3.27	Πειραματική διάταξη για δοκιμές μέσης κλίμακας Heidenreich (2004)	71
3.28	Συντελεστής προσαρμογής του καθέτου συντελεστή αναπήδησης συναρτήσει της ταχύτητας πρόσκρουσης (Pfeiffer and Bowen, 1989)	73
3.29	Κάθετος και εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της ταχύτητας πρόσκρουσης και της κλίσης της επιφάνειας (Urciuoli, 1988)	74
3.30	Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της ταχύτητας πρόσκρουσης (Johnson, 1985)	75
3.31	Εξάρτηση του καθέτου συντελεστή αναπήδησης από την ταχύτητα πρόσκρουσης (Ushiro et al., 2000)	76

3.32	Προσαρμογή του καθέτου συντελεστή αναπήδησης συναρτήσεως της ορμής πρόσκρουσης (Bourrier and Hungr, 2011)	78
3.33	Επίδραση σχήματος στους συντελεστές αναπήδησης συναρτήσεως της γωνίας πρόσκρουσης (Chau et al., 1999)	79
3.34	Προσομοίωση της τραχύτητας στο λογισμικό CRSP (Pfeiffer et al., 1993)	80
3.35	Σχέση περιστροφικής προς μεταθετική ταχύτητα από την Japan Railroad Association (Chau et al., 2002)	82
3.36	Σχέση περιστροφικής προς μεταθετική ταχύτητα (Chau et al., 2002)	83
3.37	Σήμανση τεμαχίων για τον προσδιορισμό της γωνιακής ταχύτητας (Spadari et al., 2012)	84
3.38	Κάθετος και εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσεως της περιστροφικής ενέργειας πριν την κρούση (Spadari et al., 2012)	84
3.39	Δοκίμια με ελλειπτικό, κυκλικό, τετραγωνικό και πενταγωνικό σχήμα (Buzzi et al., 2012)	85
3.40	Κάθετος και εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσεως της γωνιακής ταχύτητας (Buzzi et al., 2012)	86
3.41	Κάθετος και εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσεως της γωνιακής ταχύτητας για πρόσκρουση σε επιφάνεια με τεχνητή τραχύτητα (Buzzi et al., 2012)	87
3.42	Προσομοίωση φυσικού ακανόνιστου τεμάχους με ελλειψοειδές	88
3.43	Χαρακτηριστικά της τροχιάς πριν και μετά την κρούση (Bozzolo et al., 1988; Azzoni et al., 1995)	89
3.44	Περιπτώσεις επαφής τεμάχους στο υπολογιστικό προσομοίωμα των Azzoni et al. (1995)	91
3.45	Υπολογιστικό προσομοίωμα Vijayakumar et al. (2012)	92
3.46	Κάθετος συντελεστής αναπήδησης στο κέντρο βάρους από το υπολογιστικό προσομοίωμα (Vijayakumar et al., 2012)	94
3.47	Σχηματική απεικόνιση εκτροπής και πλευρικής διασποράς	95
3.48	Πιθανοτική κατανομή τροχιών μετά την κρούση (Bourrier et al., 2009)	96
4.1	Τυπική διάταξη για την εκτέλεση δοκιμών στο εργαστήριο	98
4.2	Διαμόρφωση κυβικών δοκιμών	99
4.3	Διαμόρφωση κυβικών δοκιμών με λειασμένες ακμές	99
4.4	Σφαιρικά τεμάχια από φυσικά υλικά	100
4.5	Διαμόρφωση σφαιρικών δοκιμών από τεχνητά υλικά	101
4.6	Γεωμετρικά στοιχεία πολυεδρικού δοκιμίου	101
4.7	Διαδικασία διαμόρφωσης πολυεδρικών δοκιμών από φυσικό υλικό	102
4.8	Διαμόρφωση πολυεδρικών δοκιμών από τεχνητά υλικά	102
4.9	Δοκίμια ελλειπτικών δίσκων	103
4.10	Επιφάνεια πρόσκρουσης από φυσικό υλικό	103

4.11	Βάσεις μαρμάρου με τραχύτητα	104
4.12	Προφίλ τραχύτητας επιφανειών πρόσκρουσης	104
4.13	Βάση πρόσκρουσης για δοκιμές με εδαφική επικάλυψη	105
4.14	Μηχανισμός ελεύθερης πτώσης	106
4.15	Βαγονέτο μεταφοράς ελλειπτικών δίσκων	107
4.16	Πειραματική διάταξη εκτέλεσης δοκιμών με δοκίμια ελλειπτικών δίσκων	107
4.17	Συσκευή προσδιορισμού της αντοχής του άρρηκτου πετρώματος	109
4.18	Ηλεκτρονικά μηκυνσιόμετρα για τον προσδιορισμό της αξονικής και περιμετρικής παραμόρφωσης	110
4.19	Τυπική καμπύλης τάσης - παραμόρφωσης	110
4.20	Δοκίμια μετά την εκτέλεση της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης	111
4.21	Διάταξη της δοκιμής Brazil	111
4.22	Δοκίμια μετά την εκτέλεση της δοκιμής Brazil	112
4.23	Δοκιμή προσδιορισμού ταχύτητας διάδοσης κυμάτων	113
4.24	Συσκευή σημειακής φόρτισης	114
4.25	Τύποι δοκιμής σημειακής φόρτισης	115
4.26	Δοκίμια ακανόνιστου σχήματος από αποσαθρωμένο σχιστόλιθο	115
4.27	Μηχανισμός και αρχή λειτουργίας της σφύρας Schmidt	116
4.28	Προσδιορισμός ορίων υδαρότητας αργιλικών υλικών	119
4.29	Καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης άμμων	119
4.30	Σύστημα συντεταγμένων της εικόνας	121
4.31	Διαβάθμιση εικόνας φωτεινότητας γκριζου τόνου	121
4.32	Σύστημα απεικόνισης και συντεταγμένων έγχρωμων εικόνων	121
4.33	Σύνθεση φωτεινότητας γκριζων τόνων για την απεικόνιση χρωμάτων	122
4.34	Φωτομηχανές ταχείας λήψης	122
4.35	Ζεύγος φωτομηχανών για την τριδιάστατη καταγραφή	123
4.36	Ιστόγραμμα φωτεινότητας για την διακριτοποίηση της εικόνας	124
4.37	Στάδια διακριτοποίησης της καταγραφής	125
4.38	Προσδιορισμός γειτνιαζόντων εικονοστοιχείων	125
4.39	Προσδιορισμός κέντρου βάρους δοκιμίου τυχαίου σχήματος	126
4.40	Προσδιορισμός κέντρου βάρους σφαιρικού δοκιμίου	127
4.41	Γεωμετρία κεντρικής προβολής σφαίρας	128
4.42	Προσδιορισμός εύρους απεικόνισης	129
4.43	Γενική περίπτωση κεντρικής προβολής σφαίρας	130
4.44	Σφάλμα προσδιορισμού του κέντρου της σφαίρας	131
4.45	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κανονικής έλλειψης	132
4.46	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της γενικευμένης εξίσωσης της έλλειψης	133
4.47	Εσωτερικός προσανατολισμός φωτομηχανής	135
4.48	Εξωτερικός προσανατολισμός φωτομηχανής	135

4.49	Συγχρονισμένες εικόνες για την βαθμονόμηση των φωτομηχανών	137
4.50	Προσδιορισμός των εσωτερικών σημείων του καννάβου βαθμονόμησης	138
4.51	Προσδιορισμός του εξωτερικού προσανατολισμού	138
4.52	Προσδιορισμός εξωτερικού προσανατολισμού στερεοζεύγους	139
4.53	Ενδεικτική απεικόνιση της παραμόρφωσης της εικόνας εξαιτίας της διαστροφής των φακών	139
4.54	Στερεοφωτογραμμετρική εμπροσθοτομία	140
4.55	Ανάλυση καταγραφών σε μια τυπική δοκιμή με σφαιρικό τέμαχος	143
4.56	Συντεταγμένες κέντρου βάρους τεμάχους στο σύστημα αναφοράς της ανάλυσης .	143
4.57	Μέτρηση ακτίνας σφαίρας στο σύστημα αξόνων της εικόνας	144
4.58	Υπολογισμός ταχύτητας κίνησης	145
4.59	Προσδιορισμός γωνιών πρόσκρουσης και αναπήδησης και στροφή συστήματος αξόνων	146
4.60	Επιλογή σημείων για τον προσδιορισμό της γωνιακής ταχύτητας σε σφαιρικά τεμάχη	147
4.61	Προσδιορισμός της γωνιακής ταχύτητας σε σφαιρικά τεμάχη	147
4.62	Διόρθωση φάσης στον προσανατολισμό της έλλειψης	148
4.63	Αποτύπωση επιπέδου πρόσκρουσης λείας τεχνητής επιφάνειας	150
4.64	Ομόλογες εικόνες για τον προσδιορισμό φυσικής επιφάνειας πρόσκρουσης	151
4.65	Διαδικασία για τον προσδιορισμό φυσικής επιφάνειας πρόσκρουσης	151
4.66	Προσδιορισμός βέλτιστου επιπέδου για την προσομοίωση φυσικής επιφάνειας πρόσκρουσης	152
4.67	Προσδιορισμός κατακόρυφου άξονα με το νήμα της στάθμης	153
4.68	Κατασκευή συστήματος αναφοράς της ανάλυσης	153
4.69	Ανακατασκευή σχήματος με σύγχρονο προσδιορισμό των συντεταγμένων και του προσανατολισμού	155
4.70	Χρωματική κωδικοποίηση κυβικών δοκιμίων	156
4.71	Ανακατασκευή τροχιάς με την υπέρθεση των καταγεγραμμένων εικόνων και σύνθεση της πληροφορίας από την επεξεργασία τους σε ψηφιακό περιβάλλον	157
4.72	Προσδιορισμός συντεταγμένων του κέντρου βάρους	158
4.73	Προσανατολισμός τεμάχους και προσδιορισμός γωνιακής ταχύτητας	159
5.1	Τυπική αλληλουχία στιγμιότυπων δοκιμής ελεύθερης πτώσης	164
5.2	Σχηματική απεικόνιση δοκιμής ελεύθερης πτώσης κυβικών δοκιμίων με λειασμένες ακμές	165
5.3	Λόγος του καθέτου συντελεστή αναπήδησης προς τον κινηματικό συναρτήσεως της γωνίας αναπήδησης	166
5.4	Κινηματικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσεως της πυκνότητας	166
5.5	Κινηματικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσεως της ταχύτητας διάδοσης κύματος	167

5.6	Κινηματικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει των ιδιοτήτων που προσδιορίζονται από την δοκιμή μονοαξονικής θλίψης	168
5.7	Κινηματικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της εφελκυστικής αντοχής	169
5.8	Κινηματικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της σκληρότητας κατά την σφύρα Schmidt	170
5.9	Σχηματική απεικόνιση δοκιμής παραβολικής ρίψης κυβικών δοκιμίων με λειασμένες ακμές	171
5.10	Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης	173
5.11	Προσδιορισμός παραμέτρων για την συσχέτιση του καθέτου συντελεστή αναπήδησης με την γωνία πρόσκρουσης και την σκληρότητα του υλικού	174
5.12	Απόλυτο σφάλμα στην εκτίμηση του καθέτου συντελεστή αναπήδησης από την σχέση 5.2	175
5.13	Σχέση καθέτου συντελεστή με την γωνία αναπήδησης βάσει της γωνίας πρόσκρουσης	175
5.14	Εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης	176
5.15	Κινηματικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης	177
5.16	Σχέση της γωνίας πρόσκρουσης με την γωνία αναπήδησης	178
5.17	Σχηματική απεικόνιση δοκιμής ελεύθερης σφαιρικών τεμαχών	179
5.18	Κινηματικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της ταχύτητας πρόσκρουσης για τεμάχια από τσιμεντοειδές ένεμα με διαφορετική μάζα	180
5.19	Κινηματικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της ταχύτητας πρόσκρουσης για τεμάχια από εποξειδική ρητίνη με διαφορετική μάζα	181
5.20	Κινηματικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της ταχύτητας πρόσκρουσης, για τεμάχια από μάρμαρο με διαφορετική μάζα	182
5.21	Κινηματικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της ταχύτητας πρόσκρουσης, για τεμάχια από ψαμμίτη με διαφορετική μάζα	183
5.22	Κινηματικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της ταχύτητας πρόσκρουσης για σφαιρικά δοκίμια	185
5.23	Μέσες τιμές κινηματικού συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της ταχύτητας πρόσκρουσης για σφαιρικά δοκίμια	187
5.24	Σχηματική απεικόνιση δοκιμής παραβολικής ρίψης σφαιρικών τεμαχών	188
5.25	Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της ταχύτητας πρόσκρουσης	194
5.26	Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης	196
5.27	Σχέση καθέτου συντελεστή με την γωνία αναπήδησης ως προς την γωνία πρόσκρουσης	197
5.28	Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας	198
5.29	Εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της ορθής συνιστώσας της ταχύτητας πρόσκρουσης	199

5.30	Εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της ορθής συνιστώσας της ταχύτητας πρόσκρουσης	200
5.31	Εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας πρόσκρουσης	201
5.32	Εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της εφαπτομενικής συνιστώσας της ταχύτητας πρόσκρουσης	202
5.33	Κινηματικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει του μέτρου της ταχύτητας πρόσκρουσης	204
5.34	Επίδραση συνυπολογισμού της γωνιακής ταχύτητας στον ενεργειακό συντελεστή αναπήδησης	205
5.35	Κάθετος συντελεστής αναπήδησης για κρούση σε επιφάνειες πρόσκρουσης διαφορετικού υλικού	208
5.36	Διαδικασία για τον προσδιορισμό της θέσης του δοκιμίου ελλειπτικού δίσκου	210
5.37	Ανασύνθεση τροχιάς με την υπέρθεση των διαδοχικών θέσεων της έλλειψης	210
5.38	Σχηματική απεικόνιση της δοκιμής με ελλειπτικά τεμάχια και μετρούμενα μεγέθη	210
5.39	Σχέση προσανατολισμού του μεγάλου άξονα της έλλειψης με το μήκος επαφής κατά την κρούση	212
5.40	Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει τη γωνίας πρόσκρουσης για τεμάχια ελλειπτικών δίσκων με διαφορετικούς λόγους αξόνων	213
5.41	Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει τη γωνίας αναπήδησης, (α) ανάλογα με λόγο αξόνων των ελλειπτικών δίσκων και (β) ομαδοποιημένα σύμφωνα με την γωνία πρόσκρουσης	214
5.42	Εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει τη γωνίας πρόσκρουσης για τεμάχια ελλειπτικών δίσκων με διαφορετικό λόγο ημιαξόνων	214
5.43	Εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει του προσανατολισμού του μεγάλου άξονα των τεμαχίων ελλειπτικού δίσκου	215
5.44	Εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει του προσανατολισμού του μεγάλου άξονα των τεμαχίων ελλειπτικού δίσκου	215
5.45	Κινηματικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει τη γωνίας πρόσκρουσης για τεμάχια ελλειπτικών δίσκων με μεταβλητό λόγο αξόνων	216
5.46	Ενεργειακός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει τη γωνίας πρόσκρουσης για τεμάχια ελλειπτικών δίσκων μεταβλητού λόγου αξόνων	217
5.47	Ενεργειακός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει τη γωνίας πρόσκρουσης για τεμάχια ελλειπτικών δίσκων μεταβλητού λόγου αξόνων	217
5.48	Λόγος του καθέτου προς τον κινηματικό συντελεστή αναπήδησης με την γωνία αναπήδησης για δοκιμές με σφαιρικά τεμάχια	220
5.49	Κινηματικός συντελεστής αναπήδησης για αποσαθρωμένες επιφάνειες σχιστόλιθου	221
5.50	Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης σε επιφάνειες διαφορετικού βαθμού τραχύτητας με σφαιρικά τεμάχια	224

5.51	Μέση τιμή του καθέτου συντελεστή αναπήδηση συναρτήσεως της γωνίας πρόσκρουσης σε επιφάνειες διαφορετικού βαθμού τραχύτητας	224
5.52	Εύρος καθέτου συντελεστή αναπήδησης ανάλογα της γωνίας πρόσκρουσης και της τραχύτητας της επιφάνειας	225
5.53	Εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσεως της γωνίας πρόσκρουσης και της τραχύτητας της επιφάνειας	225
5.54	Εύρος εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης ανάλογα της γωνίας πρόσκρουσης και της τραχύτητας της επιφάνειας	226
5.55	Κινηματικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσεως της γωνίας πρόσκρουσης και της τραχύτητας της επιφάνειας	226
5.56	Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσεως της γωνίας πρόσκρουσης και της τραχύτητας της επιφάνειας από τις δοκιμές με πολυεδρικά τεμάχια	227
5.57	Μέση τιμή του καθέτου συντελεστή αναπήδηση συναρτήσεως της γωνίας πρόσκρουσης σε επιφάνειες διαφορετικού βαθμού τραχύτητας	228
5.58	Εύρος καθέτου συντελεστή αναπήδησης ανάλογα της γωνίας πρόσκρουσης και της τραχύτητας της επιφάνειας	228
5.59	Εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσεως της γωνίας πρόσκρουσης και της τραχύτητας της επιφάνειας	229
5.60	Εύρος εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης ανάλογα της γωνίας πρόσκρουσης και της τραχύτητας της επιφάνειας	229
5.61	Κινηματικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσεως της γωνίας πρόσκρουσης και της τραχύτητας της επιφάνειας	230
5.62	Κινηματικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσεως του πάχους αργιλικής στρώσης επικάλυψης σε ξηρά κατάσταση	232
5.63	Κινηματικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσεως του πάχους αμμώδους στρώσης επικάλυψης σε ξηρές συνθήκες	233
5.64	Κινηματικός συντελεστής συναρτήσεως του ποσοστού αργίλου-άμμου στην στρώση επικάλυψης	235
5.65	Κινηματικός συντελεστής συναρτήσεως αριθμού επαλείψεων υδαρών αργιλικών στρώσεων	238
5.66	Κινηματικός συντελεστής συναρτήσεως αριθμού επαλείψεων ξηρών αργιλικών στρώσεων	239
5.67	Κινηματικός συντελεστής συναρτήσεως του πάχους στρώσης αναζυμωμένου μείγματος αργίλου και άμμου	242
6.1	Κυβικό, σφαιρικό και πολυεδρικό δοκίμιο από τσιμεντοειδές ένεμα	249
6.2	Άποψη του ασβεστολιθικού τεμάχους που χρησιμοποιήθηκε ως βάση πρόσκρουσης	249
6.3	Σχηματική απεικόνιση της δοκιμής και μετρούμενα μεγέθη	250
6.4	Χαρακτηριστικές τιμές καθέτου συντελεστή αναπήδησης	252

6.5	Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας αναπήδησης	254
6.6	Χαρακτηριστικές τιμές εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης	255
6.7	Χαρακτηριστικές τιμές κινηματικού συντελεστή αναπήδησης	256
6.8	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της τροχιάς μετά την κρούση	258
6.9	Εύρος εκτροπής συναρτήσει του σχήματος του τεμάχους και της κλίσης της επι- φάνειας πρόσκρουσης	259
6.10	Τύπος κρούσης ανάλογα με την διεύθυνση τροχιάς πριν την κρούση σε σχέση με την φορά μεγίστης κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης	260
6.11	Σχηματική απεικόνιση των δοκιμών κρούσης σε οριζόντια επιφάνεια πρόσκρουσης	261
6.12	Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας αναπήδησης για τα σφαιρικά και τα κυβικά δοκίμια	263
6.13	Ενδεικτικές διατάξεις επαφής κυβικού δοκιμίου στις δυο διαστάσεις	263
6.14	Σχέση καθέτου και εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης συναρτήσει του σχή- ματος του δοκιμίου	264
6.15	Σχηματική απεικόνιση της κίνησης για τον προσδιορισμό της εκτροπής για κρούση σε οριζόντια επιφάνεια πρόσκρουσης	265
6.16	Διεύθυνση και γωνία αναπήδησης της τροχιάς κυβικών και σφαιρικών τεμαχών .	266
6.17	Εκτροπή τεμαχών κυβικών και σφαιρικών τεμαχών μετά από κρούση σε οριζόντια επιφάνεια	266
6.18	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά τροχιάς στον χώρο	267
6.19	Διεύθυνση ρίψης σφαιρικών τεμαχών ανά σειρά δοκιμών	268
6.20	Διεύθυνση ρίψης κυβικών τεμαχών, ανά σειρά δοκιμών, για κλίση επιφάνειας $\vartheta =$ 13.5°	269
6.21	Διεύθυνση ρίψης κυβικών τεμαχών, ανά σειρά δοκιμών, για κλίση επιφάνειας $\vartheta =$ 24°	269
6.22	Διεύθυνση ρίψης κυβικών τεμαχών, ανά σειρά δοκιμών, για κλίση επιφάνειας $\vartheta =$ 43.5°	270
6.23	Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας αναπήδησης ως προς το σχήμα του τεμάχους για κρούση σε επιφάνεια με κλίση $\vartheta \approx 13^\circ$	272
6.24	Μεταβολή συντελεστών αναπήδησης συναρτήσει της κλίσης της επιφάνειας πρό- σκρουσης	274
6.25	Σχέση καθέτου συντελεστή αναπήδησης με την γωνία αναπήδησης	275
6.26	Διεύθυνση αναπήδησης κυβικών και σφαιρικών δοκιμών μετά από κρούση σε επιφάνεια με κλίση περίπου $\vartheta = 13^\circ$	276
6.27	Διεύθυνση αναπήδησης στις δοκιμές ομόρροπης κρούσης κυβικών δοκιμών συ- ναρτήσει της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης	277
6.28	Εκτροπή τεμαχών συναρτήσει της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης	277
6.29	Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας αναπήδησης ως προς το σχήμα του τεμάχους για κρούση σε επιφάνεια πρόσκρουσης με αντίρροπη κλίση	279

6.30	Σχέση καθέτου συντελεστή αναπήδησης με την γωνία αναπήδησης στην αντίρροπη κρούση	281
6.31	Διεύθυνση αναπήδησης μετά την κρούση σε επιφάνεια με αντίρροπη κλίση για κυβικά και σφαιρικά δοκίμια	282
6.32	Εκτροπή κυβικών και σφαιρικών τεμαχών εξαιτίας πρόσκρουσης σε αντίρροπη επιφάνεια ήπιας κλίσης	283
6.33	Διεύθυνση τροχιάς μετά την κρούση σε επιφάνειες πρόσκρουσης με αντίρροπη κλίση	284
6.34	Κατανομή της εκτροπής για κρούση κυβικών δοκιμίων σε επιφάνειες πρόσκρουσης με αντίρροπες κλίσεις	285
6.35	Ευνοϊκή γεωμετρία επαφής για τη αντιστροφή της κίνησης σε επιφάνεια με αντίρροπη κλίση	286
6.36	Διεύθυνση και κλίση τροχιάς σφαιρικών τεμαχών πριν και μετά την κρούση . . .	287
6.37	Ανάλυση κίνησης για κρούση σε επιφάνεια με ομόρροπη και αντίρροπη κλίση . .	288
6.38	Διαγραφόμενη τροχιά συναρτήσει της γωνίας αποχωρισμού (σ_0) με αρχική ταχύτητα $v_0 = 5ms^{-1}$	289
6.39	Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης	290
6.40	Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας αναπήδησης	291
6.41	Εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης .	291
6.42	Εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης .	292
6.43	Εκτροπή συναρτήσει της διαφοράς διεύθυνσης για σφαιρικά τεμάχια	293
6.44	Μεταβολή του καθέτου συντελεστή αναπήδησης με την γωνία πρόσκρουσης σε επιφάνειες πρόσκρουσης διαφορετικής κλίσης και προσανατολισμού	295
6.45	Κάθετος συντελεστής συναρτήσει της γωνίας αναπήδησης σε επιφάνειες πρόσκρουσης διαφορετικής κλίσης και προσανατολισμού	296
6.46	Μεταβολή του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης με την γωνία πρόσκρουσης σε επιφάνειες πρόσκρουσης διαφορετικής κλίσης και προσανατολισμού . . .	298
6.47	Μεταβολή του κινηματικού συντελεστή αναπήδησης με την γωνία πρόσκρουσης σε επιφάνειες πρόσκρουσης διαφορετικής κλίσης και προσανατολισμού	300
6.48	Μεταβολή του κινηματικού συντελεστή αναπήδησης με την γωνία πρόσκρουσης σε επιφάνειες πρόσκρουσης διαφορετικής κλίσης και προσανατολισμού	302
6.49	Σχέση ολικού με τον ενεργειακό συντελεστή αναπήδησης σε επιφάνειες πρόσκρουσης διαφορετικής κλίσης και προσανατολισμού	304
6.50	Εκτροπή συναρτήσει της διαφοράς διεύθυνσης για κυβικά τεμάχια	305
6.51	Κανονικοποιημένες κατανομές της εκτροπής για τις διάφορες περιπτώσεις κλίσης και διαφοράς διεύθυνσης	306
7.1	Δορυφορική άποψη της ευρύτερης περιοχής της Σπηλιάς Νταβέλη	312
7.2	Άποψη του βραχώδους όγκου που αποτέλεσε την επιφάνεια πρόσκρουσης	312

7.3	Προσδιορισμός χαρακτηριστικών της επιφάνειας πρόσκρουσης	313
7.4	Διαμόρφωση τεμαχών στις δοκιμές πεδίου	314
7.5	Θέση εγκατάστασης της φωτομηχανής	315
7.6	Διαγραφόμενη τροχιά στις δοκιμές στην Σπηλιά Νταβέλη	315
7.7	Συντελεστές αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης	317
7.8	Σχέση γωνιών πρόσκρουσης και αναπήδησης	318
7.9	Σχέση καθέτου συντελεστή αναπήδησης με τις γωνίες πρόσκρουσης και αναπή- δησης	318
7.10	Δορυφορική άποψη της ευρύτερης περιοχής του Θεάτρου Βράχων	319
7.11	Θέση εκτέλεσης των δοκιμών	319
7.12	Άποψη των πρηνών που χρησιμοποιήθηκαν ως επιφάνειες πρόσκρουσης	320
7.13	Δοκίμια σφαιρικού, πολυεδρικού και κυβικού σχήματος	321
7.14	Βήματα από την διαδικασία βαθμονόμησης του συστήματος φωτομηχανών	321
7.15	Σχηματική απεικόνιση της κίνησης του τεμάχους - μετρούμενα μεγέθη	322
7.16	Χαρακτηριστικές τιμές καθέτου συντελεστή αναπήδησης	324
7.17	Σχέση καθέτου συντελεστή αναπήδησης με την γωνία αναπήδησης	325
7.18	Χαρακτηριστικές τιμές εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης	326
7.19	Χαρακτηριστικές τιμές κινηματικού συντελεστή αναπήδησης	327
7.20	Εύρος εκτροπής βάσει του σχήματος του δοκιμίου και της κλίσης του πρηνούς	328
7.21	Διεύθυνση τροχιάς και γωνία αναπήδησης σύμφωνα με την κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης	329
7.22	Δορυφορική άποψη της περιοχής εκτέλεση των δοκιμών στο Πεντελικό όρος	330
7.23	Βάσεις πρόσκρουσης	331
7.24	Χρωματική κωδικοποίηση τεμαχών	331
7.25	Σχηματική παρουσίαση της διεύθυνσης ρίψης των τεμαχών	332
7.26	Σχηματική απεικόνιση των χαρακτηριστικών των δοκιμών	332
7.27	Ανακατασκευή τροχιάς στις επιτόπου δοκιμές	333
7.28	Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας αναπήδησης	335
7.29	Στοιχεία τροχιάς μετά της κρούση συναρτήσει της κλίσης της επιφάνειας πρό- σκρουσης	336
7.30	Κατανομές της εκτροπής για κρούση σε επιφάνεια πρόσκρουσης διαφορετικής κλίσης	336
7.31	Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης	337
7.32	Σχέση καθέτου συντελεστή με την γωνία αναπήδησης	339
7.33	Εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης	340
7.34	Κινηματικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης	341
7.35	Ενεργειακός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης	342
7.36	Σύγκριση ενεργειακών συντελεστών αναπήδησης στις δοκιμές με κλίση	343
7.37	Στοιχεία κατεύθυνσης της τροχιάς μετά την κρούση	345

7.38	Εκτροπή συναρτήσεως της διαφοράς διεύθυνσης	346
8.1	Σύγκριση των συντελεστών προσαρμογής του καθέτου συντελεστή αναπήδησης βάσει της ταχύτητας πρόσκρουσης	353
8.2	Εφαρμογή των μεθοδολογιών προσαρμογής του καθέτου συντελεστή αναπήδησης βάσει της ταχύτητας πρόσκρουσης	354
8.3	Σύγκριση του καθέτου συντελεστή αναπήδησης από την σχέση του Johnson (1985) με τα αποτελέσματα των διερευνήσεων ελευθέρης πτώσης με σφαιρικά τεμάχια	355
8.4	Βαθμονόμηση της σχέσης των Bourrier and Hungr (2011)	357
8.5	Σχέση γωνίας πρόσκρουσης με την κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης	358
8.6	Συσχετίσεις γωνίας πρόσκρουσης με τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης από την βιβλιογραφία	358
8.7	Κινηματικά χαρακτηριστικά για την επίτευξη καθέτου συντελεστή αναπήδησης μεγαλύτερο της μονάδας	361
8.8	Σχέση μεταθετικής με την περιστροφική ενέργεια	364
8.9	Σχέση μεταθετικής και περιστροφικής ενέργειας ως προς την γωνία πρόσκρουσης για την ομόρροπη κρούση με κυβικά τεμάχια	365
8.10	Σύγκριση συντελεστών αναπήδησης συναρτήσεως της γωνίας πρόσκρουσης μεταξύ των δοκιμών πεδίου στη σπηλιά Νταβέλη και των αντίστοιχων στο εργαστήριο	368
8.11	Σύγκριση καθέτου συντελεστή αναπήδησης συναρτήσεως της γωνίας πρόσκρουσης μεταξύ των δοκιμών πεδίου στη σπηλιά Νταβέλη και των προτεινόμενων συσχετίσεων των Giacomini et al. (2012) και Wyllie (2014a)	369
8.12	Σύγκριση καθέτου συντελεστή αναπήδησης συναρτήσεως της γωνίας πρόσκρουσης μεταξύ των δοκιμών πεδίου στο Θέατρο βράχων και των αντίστοιχων στο εργαστήριο	373
8.13	Σχέση καθέτου συντελεστή αναπήδησης με την γωνία αναπήδησης και σύγκριση μεταξύ των δοκιμών πεδίου στο Θέατρο βράχων και των αντίστοιχων στο εργαστήριο	375
8.14	Σύγκριση συντελεστών αναπήδησης συναρτήσεως της γωνίας πρόσκρουσης μεταξύ των δοκιμών με κυβικά τεμάχια στο πεδίο και το εργαστήριο	377
8.15	Συντελεστής αναπήδησης στο σημείο επαφής συναρτήσεως του προσανατολισμού της έλλειψης	379
8.16	Συντελεστής αναπήδησης στο σημείο επαφής συναρτήσεως αυτού στο κέντρο βάρους	380
8.17	Συντελεστής αναπήδησης στο σημείο επαφής συναρτήσεως του προσανατολισμού της έλλειψης ως προς το είδος της επαφής	381
8.18	Σύγκριση του συντελεστή αναπήδησης από τις δοκιμές με αυτόν που προσδιορίζεται από την μεθοδολογία Vijayakumar et al. (2012)	382
8.19	Αξιολόγηση της γωνιακής ταχύτητας που προσδιορίζεται με την σχέση των Bozzolo and Pamini (1986)	383

8.20	Αξιολόγηση της γωνιακής ταχύτητας που προσδιορίζεται με την σχέση των Bozzolo and Pamini (1986)	383
8.21	Προσανατολισμός έλλειψης πριν και μετά την κρούση	385
8.22	Σύγκριση του ενεργειακού συντελεστή αναπήδησης από τις δοκιμές με αυτόν που προκύπτει με την μεθοδολογία των Azzoni et al. (1995)	385
8.23	Θραύση τεμάχους μετά από τον πρόσφατό σεισμό της Λευκάδας	388
8.24	Θραύση δοκιμίου από τσιμεντοειδές ένεμα	389
8.25	Χαρακτηριστικές μορφές αστοχίας σφαιρικών δοκιμών σε κρούση	390
8.26	Θραύση σφαιρικών τεμαχών μαρμάρου	391
8.27	Θραύση σφαιρικού τεμάχους στο πεδίο	391
9.1	Σχέση κινηματικού συντελεστή αναπήδησης με την σκληρότητα κατά την σφύρα Schmidt	396
9.2	Συσχέτιση του κινηματικού συντελεστή αναπήδησης με την σκληρότητα	398
9.3	Σχετικό σφάλμα εκτίμησης του κινηματικού συντελεστή αναπήδησης από την σκληρότητα της σφύρας Schmidt με εφαρμογή της σχέσης 9.2	399
9.4	Σύγκριση με τις αντίστοιχες συσχετίσεις των Richards et al. (2001) και Ansari et al. (2015)	400
9.5	Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσκει της ορμής πρόσκρουσης για σφαιρικά δοκίμια διαφορετικής διαμέτρου	402
9.6	Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσκει της κάθετης συνιστώσας της ορμής	403
9.7	Αξιολόγηση της σχέσης εκτίμησης του καθέτου συντελεστή αναπήδησης συναρτήσκει της ορμής και της σκληρότητας του υλικού	405
9.8	Σύγκριση των συσχετίσεων 9.1, 9.4 και των αντίστοιχων σχέσεων από την βιβλιογραφία	406
9.9	Εκτίμηση καθέτου συντελεστή αναπήδησης για κρούση σε διαφορετικά υλικά με την σχέση την σχέση 9.4	407
9.10	Λόγος εκτιμώμενου καθέτου συντελεστή αναπήδησης προς αυτόν που προσδιορίστηκε πειραματικά σε σχέση με τον λόγο της σκληρότητας της βάσης προς του τεμάχους (R_s/R_b)	408
9.11	Αξιολόγηση της σχέσης εκτίμησης του καθέτου συντελεστή αναπήδησης συναρτήσκει της ορμής πρόσκρουσης για κρούση μεταξύ υλικών διαφορετικής σκληρότητας	409
9.12	Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσκει της κάθετης συνιστώσας της ορμής από τις δοκιμές παραβολικής ρίψης με σφαιρικά τεμάχια	411
9.13	Αξιολόγηση της σχέσης εκτίμησης του καθέτου συντελεστή αναπήδησης συναρτήσκει της ορμής πρόσκρουσης για κρούση υπό γωνία	412

9.14	Σύγκριση της τιμής του καθέτου συντελεστή αναπήδησης που προσδιορίσθηκε πειραματικά με την εκτιμώμενη από την σχέση 9.4 συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης	414
9.15	Λόγος πειραματικής προς εκτιμώμενης τιμής του καθέτου συντελεστή αναπήδησης, συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης	415
9.16	Γεωμετρία επαφής σφαιρικού τεμάχους και κυβικού με λειασμένες ακμές	416
9.17	Λόγος πειραματικής προς εκτιμώμενης τιμής του καθέτου συντελεστή αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης για σφαιρικά τεμάχη σε επιφάνειες πρόσκρουσης με διαφορετικό βαθμό τραχύτητας	417
9.18	Λόγος πειραματικής προς εκτιμώμενης τιμής του καθέτου συντελεστή αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης για πολυεδρικά τεμάχη σε επιφάνειες διαφορετικής τραχύτητας	418
9.19	Λόγος πειραματικής προς εκτιμώμενης τιμής του καθέτου συντελεστή αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης για κυβικά τεμάχη	419
9.20	Λόγος πειραματικής προς εκτιμώμενης τιμής του καθέτου συντελεστή αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης, διορθωμένος βάσει του σχήματος του τεμάχους	420
9.21	Αξιολόγηση της μεθοδολογίας προσδιορισμού του μεγίστου συντελεστή αναπήδησης με τις δοκιμές πεδίου	422
9.22	Σχέση καθέτου συντελεστή αναπήδησης με την γωνία αναπήδησης για κρούση υπό γωνία	423
9.23	Κλίση ευθειών $a_r - n_{COR}$ συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης από το σύνολο των δοκιμών παραβολικής ρίψης που εκτελέστηκαν στο εργαστήριο	424
9.24	Βήματα για τον προσδιορισμό του εύρους τιμών του καθέτου συντελεστή αναπήδησης και των αντιστοίχων γωνιών αναπήδησης	426
9.25	Όρια εκτροπής συναρτήσει της διαφοράς διεύθυνσης	428
9.26	Προσδιορισμός συντελεστών συσχέτισης ορίων εκτροπής	431
9.27	Αξιολόγηση της εξίσωσης προσδιορισμού των ορίων εκτροπής	432
9.28	Σχετικό σφάλμα στις τιμές της πρόβλεψης της μεθοδολογίας προσδιορισμού ορίων εκτροπής	433
9.29	Αξιολόγηση της μεθοδολογίας εκτίμησης της εκτροπής συναρτήσει της διαφοράς διεύθυνσης με βάση τις δοκιμές πεδίου	434

Κατάλογος πινάκων

2.1	Αίτια καταπτώσεων στο εθνικό οδικό δίκτυο στην Καλιφόρνια των Η.Π.Α.	8
2.2	Εξωγενή αίτια καταπτώσεων στο εθνικό δρυμό Yosemite, Καλιφόρνια - Η.Π.Α. . .	8
2.3	Μέτρα αντιμετώπισης καταπτώσεων	15
3.1	Ενδεικτικές τιμές συντελεστή κύλισης - ολίσθησης (Azzoni and De Freitas, 1995) .	30
3.2	Παράμετροι που επηρεάζουν την αναπήδηση (Labieuse and Heidenreich, 2009) .	31
3.3	Προτεινόμενες τιμές καθέτου και εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης (Hoek, 1987)	43
3.4	Προτεινόμενες τιμές καθέτου και εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης (Pfeiffer and Bowen, 1989)	43
3.5	Τιμές κινηματικού συντελεστή αναπήδησης	44
3.6	Τιμές καθέτου και εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης	46
3.7	Τιμές ενεργειακού συντελεστή αναπήδησης	48
3.8	Λογισμικά ανάλυσης καταπτώσεων στις 2 διαστάσεις	50
3.9	Λογισμικά ανάλυσης καταπτώσεων στις 3 διαστάσεις	50
3.10	Χαρακτηριστικά τροχιάς συναρτήσεως του καθέτου συντελεστή αναπήδησης	55
3.11	Χαρακτηριστικά της πειραματικής διερεύνησης των Ansari et al. (2015)	68
3.12	Εύρος εκτροπής και πιθανότητα εμφάνισης συναρτήσεως της ταχύτητας πρόσκρουσης (Dorren, 2015)	96
4.1	Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες υλικών	117
4.2	Ιδιότητες αποσαθρωμένων επιφανειών σχιστολίθου	117
4.3	Όρια Atterberg αργιλικών υλικών	118
5.1	Δοκιμές ελεύθερης πτώσης κυβικών τεμαχών με λειασμένες ακμές	165
5.2	Δοκιμές παραβολικής ρίψης κυβικών τεμαχών ψαμμίτη με λειασμένες ακμές . . .	171
5.3	Δοκιμές παραβολικής ρίψης κυβικών τεμαχών μαρμάρου με λειασμένες ακμές . .	172
5.4	Δοκιμές παραβολικής ρίψης κυβικών τεμαχών ασβεστολίθου με λειασμένες ακμές	172
5.5	Δοκιμές παραβολικής ρίψης κυβικών τεμαχών σχιστολίθου με λειασμένες ακμές .	172
5.6	Δοκιμές παραβολικής ρίψης κυβικών τεμαχών μάργας με λειασμένες ακμές . . .	172
5.7	Παράμετροι συσχέτισης του καθέτου συντελεστή αναπήδησης με την γωνία πρόσκρουσης	174
5.8	Δοκιμές ελεύθερης πτώσης σφαιρικών τεμαχών από τοιμεντοειδές ένεμα	180

5.9	Δοκιμές ελεύθερης πτώσης σφαιρικών τεμαχών από εποξειδική ρητίνη	181
5.10	Δοκιμές ελεύθερης πτώσης σφαιρικών τεμαχών από μάρμαρο	182
5.11	Δοκιμές ελεύθερης πτώσης σφαιρικών τεμαχών από ψαμμίτη	183
5.12	Παράμετροι και συντελεστές της συσχέτισης μάζας - ταχύτητας	186
5.13	Δοκιμές παραβολικής ρίψης σφαιρικών τεμαχών από τσιμεντοειδές ένεμα	189
5.14	Δοκιμές παραβολικής ρίψης σφαιρικών τεμαχών μαρμάρου	190
5.15	Δοκιμές παραβολικής ρίψης σφαιρικών τεμαχών ψαμμίτη	190
5.16	Δοκιμές παραβολικής ρίψης σφαιρικών τεμαχών μαρμάρου, με μέτρηση της γωνιακής ταχύτητας	191
5.17	Δοκιμές παραβολικής ρίψης σφαιρικών τεμαχών ψαμμίτη, με μέτρηση της γωνιακής ταχύτητας	192
5.18	Παράμετροι και συντελεστές της συσχέτισης μάζας - ταχύτητας από τις δοκιμές παραβολικής ρίψης	193
5.19	Δοκιμές ελεύθερης πτώσης σφαιρικών τεμαχών σε επιφάνεια πρόσκρουσης από τσιμεντοειδές ένεμα υψηλής αντοχής	207
5.20	Δοκιμές ελεύθερης πτώσης σφαιρικών τεμαχών σε επιφάνεια πρόσκρουσης από μάρμαρο	207
5.21	Δοκιμές ελεύθερης πτώσης σφαιρικών τεμαχών σε επιφάνεια πρόσκρουσης από ψαμμίτη	207
5.22	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ελλειπτικών δίσκων	209
5.23	Πειραματική διερεύνηση με δοκίμια ελλειπτικών δίσκων	211
5.24	Δοκιμές για την διερεύνηση της επίδρασης που έχει η αποσάθρωση της επιφάνειας πρόσκρουσης στους συντελεστές αναπήδησης	219
5.25	Δοκιμές παραβολικής ρίψης με σφαιρικά τεμάχια για την διερεύνηση της επίδρασης της τραχύτητας στους συντελεστές αναπήδησης	222
5.26	Δοκιμές παραβολικής ρίψης με πολυεδρικά τεμάχια για την διερεύνηση της επίδρασης της τραχύτητας στους συντελεστές αναπήδησης	223
5.27	Δοκιμές αναφοράς για την διερεύνηση της επίδρασης της εδαφικής επικάλυψης	232
5.28	Δοκιμές για την διερεύνηση της επίδρασης της εδαφικής επικάλυψης με αργιλικό υλικό	232
5.29	Δοκιμές για την διερεύνηση της επίδρασης της εδαφικής επικάλυψης με αμμώδες υλικό	233
5.30	Δοκιμές ελεύθερης πτώσης για την διερεύνηση της επίδρασης της εδαφικής επικάλυψης από μείγμα αργίλου και άμμου	234
5.31	Δοκιμές για την διερεύνηση της επίδρασης της εδαφικής επικάλυψης με αργιλικό υλικό σε υδαρή κατάσταση	237
5.32	Δοκιμές για την διερεύνηση της επίδρασης της εδαφικής επικάλυψης με αργιλικό υλικό σε ξηρή κατάσταση από ύψος απελευθέρωσης $h_d = 100cm$	238

5.33	Δοκιμές για την διερεύνηση της επίδρασης της εδαφικής επικάλυψης με αργιλικό υλικό σε ξηρή κατάσταση από ύψος απελευθέρωσης $h_d = 150\text{cm}$	239
5.34	Δοκιμές ελεύθερης πτώσης για την διερεύνηση της επίδρασης της εδαφικής επικάλυψης από αναζυμωμένο μείγμα αργίλου και άμμου M31	241
5.35	Δοκιμές ελεύθερης πτώσης για την διερεύνηση της επίδρασης της εδαφικής επικάλυψης από αναζυμωμένο μείγμα αργίλου και άμμου M34	241
6.1	Δοκιμές σε επιφάνεια πρόσκρουσης κλίσεως $\vartheta = 20^\circ$	251
6.2	Δοκιμές σε επιφάνεια πρόσκρουσης κλίσεως $\vartheta = 45^\circ$	251
6.3	Δοκιμές σε επιφάνεια πρόσκρουσης κλίσεως $\vartheta = 70^\circ$	251
6.4	Χαρακτηριστικές τιμές καθέτου συντελεστή αναπήδησης	252
6.5	Χαρακτηριστικές τιμές εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης	253
6.6	Χαρακτηριστικές τιμές κινηματικού συντελεστή αναπήδησης	256
6.7	Χαρακτηριστικές τιμές εκτροπής	257
6.8	Δοκιμές σφαιρικών και κυβικών δοκιμών σε οριζόντια επιφάνεια πρόσκρουσης	262
6.9	Χαρακτηριστικές τιμές συντελεστών αναπήδησης για κρούση σφαιρικών και κυβικών τεμαχών, σε οριζόντια επιφάνεια πρόσκρουσης	262
6.10	Ρίψεις σφαιρικών δοκιμών σε επιφάνεια πρόσκρουσης με κλίση $\vartheta = 13^\circ$	268
6.11	Ρίψεις κυβικών δοκιμών σε επιφάνεια πρόσκρουσης με κλίση $\vartheta = 13.5^\circ$	269
6.12	Ρίψεις κυβικών δοκιμών σε επιφάνεια πρόσκρουσης με κλίση $\vartheta = 24^\circ$	270
6.13	Ρίψεις κυβικών δοκιμών σε επιφάνεια πρόσκρουσης με κλίση $\vartheta = 43.5^\circ$	270
6.14	Χαρακτηριστικές τιμές συντελεστών αναπήδησης για κρούση σφαιρικών και κυβικών τεμαχών σε επιφάνεια πρόσκρουσης με κλίση $\vartheta \approx 13^\circ$	271
6.15	Χαρακτηριστικές τιμές συντελεστών αναπήδησης για κρούση κυβικών τεμαχών σε επιφάνειες πρόσκρουσης διαφορετικής κλίσης	273
6.16	Επίδραση του σχήματος και της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης στην εκτροπή	276
6.17	Εκτροπή κυβικών τεμαχών για πρόσκρουση σε επιφάνεια διαφορετικής κλίσης	278
6.18	Χαρακτηριστικές τιμές συντελεστών αναπήδησης για κρούση σφαιρικών και κυβικών τεμαχών σε επιφάνεια πρόσκρουσης με αντίρροπη κλίση $\vartheta = 13^\circ$	279
6.19	Χαρακτηριστικές τιμές συντελεστών αναπήδησης για κρούση κυβικών τεμαχών σε αντίρροπη επιφάνεια πρόσκρουσης διαφορετικών κλίσεων	280
6.20	Τιμές καθέτου συντελεστή αναπήδησης σφαιρικών τεμαχών σε επιφάνειες πρόσκρουσης κλίσης $\vartheta = 13.5^\circ$ με διαφορετικό προσανατολισμό	290
6.21	Τιμές εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης σφαιρικών τεμαχών σε επιφάνειες πρόσκρουσης κλίσης $\vartheta = 13.5^\circ$ με διαφορετικό προσανατολισμό	291
6.22	Τιμές κινηματικού συντελεστή αναπήδησης σφαιρικών τεμαχών σε επιφάνειες πρόσκρουσης κλίσης $\vartheta = 13.5^\circ$ με διαφορετικό προσανατολισμό	292
6.23	Τιμές ενεργειακού συντελεστή αναπήδησης σφαιρικών τεμαχών σε επιφάνειες πρόσκρουσης κλίσης $\vartheta = 13.5^\circ$ με διαφορετικό προσανατολισμό	292

6.24	Τιμές καθέτου συντελεστή αναπήδησης κυβικών τεμαχών σε επιφάνειες πρόσκρουσης διαφορετικής κλίσης και προσανατολισμού	294
6.25	Τιμές εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης κυβικών τεμαχών σε επιφάνειες πρόσκρουσης διαφορετικής κλίσης και προσανατολισμού	297
6.26	Τιμές κινηματικού συντελεστή αναπήδησης κυβικών τεμαχών σε επιφάνειες πρόσκρουσης διαφορετικής κλίσης και προσανατολισμού	299
6.27	Τιμές ενεργειακού συντελεστή αναπήδησης κυβικών τεμαχών σε επιφάνειες πρόσκρουσης διαφορετικής κλίσης και προσανατολισμού	301
6.28	Τιμές ολικού ενεργειακού συντελεστή αναπήδησης κυβικών τεμαχών σε επιφάνειες πρόσκρουσης διαφορετικής κλίσης και προσανατολισμού	303
6.29	Εκτροπή κυβικών τεμαχών σε επιφάνειες πρόσκρουσης διαφορετικής κλίσης και προσανατολισμού	305
7.1	Στοιχεία επιφάνειας πρόσκρουσης	313
7.2	Διαστάσεις και μάζα τεμαχών	314
7.3	Στοιχεία επιφανειών πρόσκρουσης	320
7.4	Δοκιμές στην θέση 1 του θεάτρου Βράχων $\vartheta = 55^\circ$	322
7.5	Δοκιμές στην θέση 2 του θεάτρου Βράχων $\vartheta = 75^\circ$	323
7.6	Χαρακτηριστικές τιμές καθέτου συντελεστή αναπήδησης	323
7.7	Χαρακτηριστικές τιμές εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης	325
7.8	Χαρακτηριστικές τιμές κινηματικού συντελεστή αναπήδησης	327
7.9	Χαρακτηριστικές τιμές εκτροπής	328
7.10	Χαρακτηριστικά επιφανειών πρόσκρουσης	331
7.11	Ρίψεις κυβικών δοκιμών σε επιφάνεια πρόσκρουσης με κλίση $\vartheta = 20^\circ$	333
7.12	Ρίψεις κυβικών δοκιμών σε επιφάνεια πρόσκρουσης με κλίση $\vartheta = 45^\circ$	333
7.13	Χαρακτηριστικές τιμές συντελεστών αναπήδησης στην ομόρροπη κρούση	334
7.14	Χαρακτηριστικές τιμές καθέτου συντελεστή αναπήδησης στην λοξή κρούση	337
7.15	Χαρακτηριστικές τιμές εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης στην λοξή κρούση	340
7.16	Χαρακτηριστικές τιμές κινηματικού συντελεστή αναπήδησης στην λοξή κρούση	341
7.17	Χαρακτηριστικές τιμές ενεργειακού συντελεστή αναπήδησης στην λοξή κρούση	342
7.18	Χαρακτηριστικές τιμές ολικού ενεργειακού συντελεστή αναπήδησης στην λοξή κρούση	343
7.19	Χαρακτηριστικές τιμές εκτροπής στην λοξή κρούση	344
8.1	Μεγέθη που συναντώνται στο πρόβλημα των καταπτώσεων εκφρασμένα ως προς τις θεμελιώδεις διαστάσεις τους	370
9.1	Παράμετροι συσχέτισης καθέτου συντελεστή αναπήδηση με την ορμή πρόσκρουσης από τις δοκιμές ελεύθερης πτώσης	403

9.2	Συνεκτίμηση του βαθμού αποσάθρωσης της επιφάνειας πρόσκρουσης με την σχέση 9.8	410
9.3	Συντελεστές σχήματος, c_s	421
9.4	Κλίση ευθείων $a_r - n_{COR}$ συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης	424
9.5	Παράμετροι συσχέτισης κάτω ορίου εκτροπής (ποσοστημόριο p_5)	429
9.6	Παράμετροι συσχέτισης άνω ορίου εκτροπής (ποσοστημόριο p_5)	429

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο διατριβής και στόχοι

Η κατάπτωση τεμαχών βράχων σε περιοχές με ανθρώπινη δραστηριότητα έχει, όχι μόνο οικονομικές επιπτώσεις, αλλά και κοινωνικές, αρκετές φορές με ανθρώπινα θύματα και σημαντικές καταστροφές. Το πρόβλημα συναντάται κυρίως σε ορεινές χαράξεις συγκοινωνιακών έργων ή σε ορεινούς οικισμούς. Στον ελλαδικό χώρο οι καταπτώσεις αποτελούν συχνό φαινόμενο λόγω της έντονης μορφολογίας, της τεκτονικής καταπόνησης των βραχωδών σχηματισμών και της υψηλής σεισμικής δραστηριότητας.

Γεγονότα που συνέβησαν στον ελλαδικό χώρο τα τελευταία χρόνια είχαν ως αποτέλεσμα την απώλεια ανθρώπινων ζώων, όπως π.χ. στα Τέμπη (2010), στην Σαντορίνη (2011), στο Άργος (2012), στην Κρήτη (2015) και στον πρόσφατο σεισμό της Λευκάδας (Νοέμβριος 2015). Συνεπώς, η σημαντικότητα των επιπτώσεων καθιστά απαραίτητη την ενδεδειγμένη αντιμετώπισή του, με το σχεδιασμό των κατάλληλων μέτρων προστασίας, ανάγκη που προϋποθέτει την εις βάθος κατανόηση του μηχανισμού που διέπει το φαινόμενο.

Τα τεμάχια βράχων μετά την αποκόλλησή τους από το πρηνές και κατά την διάρκεια της κίνησής τους, υφίστανται απώλεια ενέργειας κατά την πρόσκρουση, την κύλιση ή την ολίσθησή τους επί της επιφάνειας του πρηνούς. Η αναπήδηση των τεμαχίων που συμβαίνει κατά την πρόσκρουσή τους στο πρηνές είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη.

Ωστόσο, στις περισσότερες μεθόδους που χρησιμοποιούνται σήμερα, η αναπήδηση προσομοιώνεται με έναν απλουστευμένο τρόπο. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται οι συντελεστές αναπήδησης, που περιγράφουν την απώλεια ταχύτητας του τεμάχους εξαιτίας της πρόσκρουσης. Στη πράξη, οι τιμές των συντελεστών αναπήδησης επιλέγονται βάσει μιας αδρομερούς περιγραφής του υλικού που δομεί το πρηνές, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη σημαντικές παράμετροι που επηρεάζουν την απόκριση του τεμάχους.

Στην διεθνή βιβλιογραφία διατίθενται πλήθος μαθηματικών ορισμών για τους συντελεστές αναπήδησης, οι οποίοι διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους, χωρίς να είναι σαφές ποιος από αυτούς αντιπροσωπεύει καλύτερα το φαινόμενο. Επίσης, οι προτεινόμενες τιμές των συ-

ντελεστών που συναντώνται στην βιβλιογραφία παρουσιάζουν σημαντικό εύρος, απόρροια των διαφορετικών ορισμών και των πολλών και ευμετάβλητων παραμέτρων που τις επηρεάζουν.

Οι συντελεστές αναπήδησης είναι ουσιώδεις για την ορθή διαστασιολόγηση των έργων αντιμετώπισης των καταπτώσεων στην καθημερινή πρακτική του πολιτικού μηχανικού. Με τα διαθέσιμα σήμερα δεδομένα, η δυνατότητα καλής πρόβλεψης της τροχιάς είναι περιορισμένη. Ως εκ τούτου, θεωρείται ότι το επίπεδο γνώσεων στην επιστημονική περιοχή της έρευνας επιδέχεται σημαντικών αναθεωρήσεων και βελτιώσεων.

Σκοπός της εν λόγω διδακτορικής διατριβής είναι η βελτίωση των μεθόδων επιλογής των συντελεστών αναπήδησης και ο προσδιορισμός της εξάρτησής τους από τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων, την γεωμετρία του πρσανούς και τα κινηματικά χαρακτηριστικά της πρόσκρουσης.

Λόγω της πολυπλοκότητας του φαινομένου, και συγκεκριμένα του πλήθους των μεταβλητών που το επηρεάζουν, το πρόβλημα δεν επιδέχεται αναλυτικής λύσεως. Συνεπώς στην παρούσα διατριβή, η διερεύνηση των ανωτέρω γίνεται κυρίως με συστηματική επεξεργασία και ανάλυση πειραματικών δεδομένων, προερχόμενα τόσο από δοκιμές εργαστηρίου όσο και πεδίου, ενώ τα συμπεράσματα εκφράζονται με στατιστικές-εμπειρικές συσχετίσεις.

Έτσι, οι στόχοι της παρούσας διατριβής, όπως καθορίστηκαν κατά την έναρξή της, είναι:

- η δημιουργία πρότυπης εργαστηριακής διάταξης καθώς και της αντίστοιχης μεθοδολογίας για την διερεύνηση του φαινομένου των καταπτώσεων βράχων
- η διατύπωση εμπειρικών συσχετίσεων που θα εκφράζουν την εξάρτηση των συντελεστών αναπήδησης από τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων καθώς και από τις γεωμετρικές και κινηματικές συνθήκες
- η δημιουργία βάσης δεδομένων τιμών συντελεστών αναπήδησης για χαρακτηριστικά πετρώματα του Ελληνικού χώρου

1.2 Δομή και οργάνωση

Οι καταπτώσεις βράχων έχουν αποτελέσει αντικείμενο έρευνας για αρκετούς ερευνητές στο παρελθόν, οι οποίοι κατέδειξαν τους μηχανισμούς που διέπουν το πρόβλημα και κατήρτισαν μεθόδους για την πρόβλεψη της τροχιάς και τον σχεδιασμό των μέτρων αντιμετώπισής τους. Ωστόσο οι εν λόγω μεθοδολογίες βασίζονται κυρίως σε πειραματικά δεδομένα περιορισμένης έκτασης και εμπειρικές συσχετίσεις, με αποτέλεσμα η γενίκευσή τους να είναι εν γένει προβληματική, ενώ τα συμπεράσματα μεταξύ των ερευνών είναι συχνά αντικρουόμενα. Παράλληλα, οι δυνατότητες επανεξέτασης του θέματος αυξήθηκαν σημαντικά τα τελευταία χρόνια με την ανάπτυξη των φωτομηχανών υψηλής ταχύτητας που επιτρέπουν την λεπτομερή καταγραφή της κίνησης και των τεχνικών μηχανικής όρασης που καθιστούν ταχεία, ευχερή και ακριβή την επεξεργασία σημαντικού πλήθους δοκιμών.

Στο πλαίσιο αυτό, η μεθοδολογία της έρευνας αποτελείται από τα εξής στάδια:

- την βιβλιογραφική έρευνα που αφορά στην διερεύνηση της μεθοδολογίας προσδιορισμού των συντελεστών αναπήδησης και στην συγκέντρωση, ταξινόμηση και αξιολόγηση όλων των διαθέσιμων πειραματικών δεδομένων από άλλους ερευνητές
- στον σχεδιασμό, κατασκευή και βαθμονόμηση των πειραματικών διατάξεων και την ανάπτυξη των κατάλληλων μεθοδολογιών
- στην εκτέλεση δοκιμών για τον προσδιορισμό των συντελεστών αναπήδησης σε χαρακτηριστικά πετρώματα του ελλαδικού χώρου υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες.
- στην διατύπωση εμπειρικών σχέσεων που συνδέουν τους συντελεστές αναπήδησης με τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων καθώς και με τα γεωμετρικά και κινηματικά χαρακτηριστικά της τροχιάς των τεμαχών

Τα παραπάνω, παρουσιάζονται στην διατριβή αυτή ως ακολούθως:

Στο κεφάλαιο 2 ορίζεται το φαινόμενο και γίνεται μια σύντομη ιστορική αναδρομή, αναφέρονται τα αίτια που το προκαλούν και συνδέονται με σημαντικά συμβάντα από τον Ελλαδικό χώρο. Επίσης, παρουσιάζονται εν συντομία τα μέτρα και οι τεχνικές που υπάρχουν για την αντιμετώπιση των επιπτώσεών τους.

Στο κεφάλαιο 3 γίνεται μια λεπτομερής βιβλιογραφική ανασκόπηση που αφορά στα στοιχεία της κίνησης των τεμαχών στις καταπτώσεις βράχων, στις μεθόδους για την προσομοίωση της αναπήδησης και για τον προσδιορισμό των συντελεστών αναπήδησης, όπου αναφέρονται και σχολιάζονται χαρακτηριστικές τιμές τους. Στην συνέχεια εξετάζονται συγκεκριμένες παράμετροι που επιδρούν στην απόκριση του τεμαχούς στην κρούση, όπου παρατίθενται τα συμπεράσματα παλαιότερων ερευνών.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα στοιχεία της πειραματικής διερεύνησης. Περιγράφονται οι πειραματικές διατάξεις που αναπτύχθηκαν, αναφέρονται τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν και οι ιδιότητες τους. Στην συνέχεια, αναλύονται οι μέθοδοι καταγραφής και επεξεργασίας της κίνησης και ο τρόπος προσδιορισμού των συντελεστών αναπήδησης.

Στα κεφάλαια 5 και 6 παρουσιάζονται και αξιολογούνται οι δοκιμές που έγιναν στο εργαστήριο και το πεδίο. Το πειραματικό μέρος της παρούσας διδακτορική διατριβής αποτελεί το βασικό στάδιο της έρευνας όπου επιτεύχθηκε η συγκέντρωση πρωτογενών δεδομένων. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές για την διερεύνηση της επίδρασης στους συντελεστές αναπήδησης και στην διαγραφόμενη τροχιά, παραγόντων όπως:

- των φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών των πετρωμάτων
- της ταχύτητας πρόσκρουσης και της μάζας των τεμαχών
- του σχήματος των τεμαχών
- της τραχύτητας της επιφάνειας πρόσκρουσης

- της αποσάθρωσης της επιφάνειας πρόσκρουσης
- της επικάλυψης με εδαφικό υλικό στην επιφάνεια πρόσκρουσης
- του προσανατολισμού της επιφάνειας πρόσκρουσης σε σχέση με την διεύθυνση της τροχιάς του πίπτοντος τεμάχους

Επίσης, εκτελέστηκαν δοκιμές στο πεδίο, που παρουσιάζονται και αξιολογούνται στο κεφάλαιο 7 αναπαράγοντας τις συνθήκες της εργαστηριακής έρευνας σε μεγαλύτερη κλίμακα ώστε να εξετασθεί η επίδραση της κλίμακας και να αναχθούν τα αποτελέσματα της εργαστηριακής διερεύνησης σε μεγαλύτερη κλίμακα.

Συνολικά πραγματοποιήθηκαν περίπου 3000 δοκιμές στο εργαστήριο και 300 δοκιμές στο πεδίο, σε τρεις θέσεις στην Αττική.

Στο κεφάλαιο 8 γίνεται συγκεντρωτική αξιολόγηση των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν ώστε να προσδιοριστούν οι κρίσιμες παράμετροι που επιδρούν στην αναπήδηση. Αυτό επιτυγχάνεται με την απομόνωση κάθε παραμέτρου και την ποιοτική εξέταση της επίδρασής της στην απόκριση του τεμάχους. Επίσης, για κάθε παράμετρο γίνεται σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα από παλαιότερες έρευνες.

Στο κεφάλαιο 9 παρουσιάζονται οι εμπειρικές συσχετίσεις-μεθοδολογίες που καταρτίστηκαν από την παρούσα διδακτορική διατριβή. Πιο συγκεκριμένα, προτείνονται συσχετίσεις για:

- την εκτίμηση των συντελεστών αναπήδησης συναρτήσει των γεωτεχνικών παραμέτρων του υλικού σε συνδυασμό με την ταχύτητα πρόσκρουσης και την μάζα του τεμάχους.
- την διακύμανση των συντελεστών αναπήδησης συναρτήσει των χαρακτηριστικών πρόσκρουσης
- την εκτίμηση της εκτροπής της τροχιάς εξαιτίας της κρούσης συναρτήσει της διεύθυνσης της τροχιάς πριν την κρούση, της φοράς μεγίστης κλίσης και της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης.

Στο κεφάλαιο 10 συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα και οι προτάσεις που προέκυψαν από τη παρούσα διδακτορική διατριβή, προτείνονται τα απαραίτητα στοιχεία για την τυποποίηση της πειραματικής έρευνας, αναφέρεται η πρωτότυπη συμβολή της στην μελέτη των καταπτώσεων και γίνονται προτάσεις για μελλοντική επέκταση της έρευνας.

Τέλος, στα παραρτήματα παρατίθενται αναλυτικά τα αποτελέσματα των δοκιμών εργαστηρίου και υπαίθρου, καθώς αποτελούν πρωτογενή δεδομένα που δύνανται να χρησιμοποιηθούν περαιτέρω για την βαθμονόμηση αριθμητικών προσομοιωμάτων.

Κεφάλαιο 2

Οι Καταπτώσεις Βράχων

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια σύντομη αναφορά στο φαινόμενο των καταπτώσεων, στα αίτια που το προκαλούν και παρουσιάζονται τα μέσα για την αντιμετώπιση του. Επίσης, αναφέρονται περιστατικά που συνέβησαν στον Ελληνικό χώρο, τα οποία συνδέονται με τα αίτια που τα προκάλεσαν και παρατίθενται οι επιπτώσεις που επέφεραν στην ανθρώπινη ζωή και δραστηριότητα.

2.1 Γενικά στοιχεία καταπτώσεων

Ως κατάπτωση (*rockfall*) νοείται η αστοχία που λαμβάνει χώρα σε απότομα φυσικά ή τεχνητά πρανή. Εκδηλώνεται με την αποκόλληση από το πρανές και την αιφνίδια προς τα κάτω κίνηση ενός ή περισσότερων βραχωδών τεμαχών, υπό την επήρεια της βαρύτητας.

Οι καταπτώσεις έχουν αποτελέσει αιτία για σημαντικές καταστροφές σε κατασκευές, κυρίως σε ορεινούς οικισμούς και συγκοινωνιακά δίκτυα, επιφέροντας δυσμενείς οικονομικές επιπτώσεις και σε ορισμένες περιπτώσεις την απώλεια ανθρώπινων ζωών.

Σύμφωνα με τον Varnes (1978) ως κατάπτωση ορίζεται η κίνηση βραχώδους όγκου, ανεξαρτήτως μεγέθους, εξαιτίας της βαρύτητας. Προκαλείται μετά από την αιφνίδια αποκόλληση των τεμαχών σε πρανή με απότομη κλίση και εκδηλώνεται με την ελεύθερη πτώση, την κύλιση ή την αναπήδηση των τεμαχών. Η ταχύτητα που αναπτύσσεται είναι μεγάλη και συνήθως αυξάνει προς τα κάτω, υπό την επίδραση της βαρύτητας. Πρόκειται για συνήθη φαινόμενα σε απότομα βραχώδη πρανή και ακτές λόγω της δράσεως των θαλασσίων κυμάτων ή των σεισμικών διεγέρσεων. Οι Chen et al. (1994) χαρακτηρίζουν τις καταπτώσεις ως τις απότομες κινήσεις ανεξάρτητων βραχωδών τεμαχών από πρανή μεγάλης κλίσης εξαιτίας της βαρύτητας. Οι K. Lee and Elliott (1998) ορίζουν τις καταπτώσεις ως την προς τα κάτω κίνηση βραχωδών τεμαχών που αποσπώνται από ελεύθερα μέτωπα πρανών και αν δεν συγκρατηθούν ενέχουν τον κίνδυνο να καταστρέψουν ή να βλάψουν κατασκευές και να εμποδίσουν την ομαλή κυκλοφορία μιας οδού.

Η μελέτη του φαινομένου διακρίνεται σε τρεις φάσεις:

- στις συνθήκες που προκαλούν την εκδήλωσή του
- στην πρόβλεψη της τροχιάς που διαγράφουν τα τεμάχια
- στον σχεδιασμό των μέτρων αντιμετώπισης του φαινομένου

Το μέγεθος των βραχωδών τεμαχίων μπορεί να κυμαίνεται από μερικά κυβικά εκατοστά έως δεκάδες κυβικά μέτρα. Όμως, ακόμη και ένα τέμαχος με μικρές διαστάσεις, μάζας περίπου $m = 0.5\text{kg}$, που κινείται με ταχύτητα $v = 10\text{ms}^{-1}$, αναπτύσσει μεγαλύτερη κινητική ενέργεια από αυτή που απαιτείται για την θραύση ενός ανθρώπινου κρανίου (Yoganandan et al., 1995) καθιστώντας το ικανό να επιφέρει θανάσιμο τραυματισμό.

Ο Sprang (1987) προτείνει τον περιορισμό χρησιμοποίησης του όρου «κατάπτωση» σε περιπτώσεις που τα τεμάχια εκδηλώνουν κινητική ενέργεια έως $E = 500\text{KNm}$, που αντιστοιχεί στην κίνηση ενός τεμαχίου μάζας $m = 5000\text{kg}$ σε ελεύθερη πτώση από ύψος $h = 5\text{m}$.

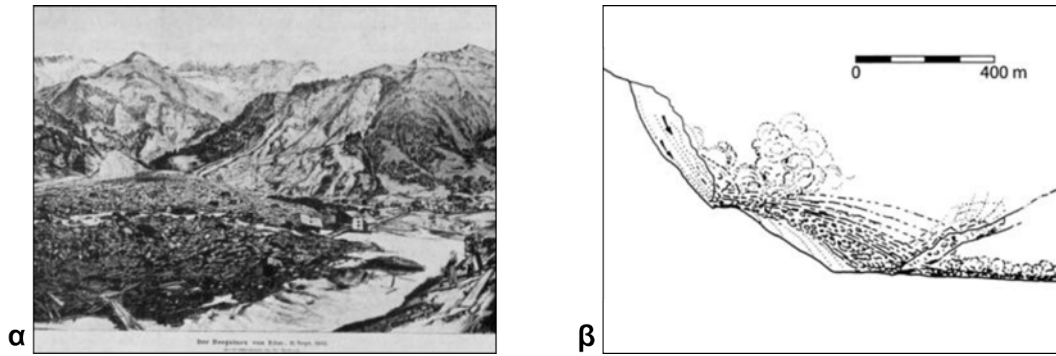
Αν και είναι σύνθητες τα τεμάχια που καταπίπτουν κατά την εκδήλωση του φαινομένου να είναι περισσότερα του ενός, ο ορισμός της κατάπτωσης και οι συνήθεις μέθοδοι ανάλυσης αναφέρονται σε τεμάχια που αναπτύσσουν αμελητέα δυναμική αλληλεπίδραση μεταξύ τους.

2.1.1 Σύντομη ιστορική αναδρομή

Το παλαιότερο συμβάν εντοπίζεται στα έργα των Κικέρωνα, Στράβωνα και Πλινίου, ως επακόλουθο του καταστροφικού σεισμού στην Σπάρτη. Ο σεισμός αυτός συνέβη το 550 π.Χ. και το μέγεθός του εκτιμάται σε περίπου 7Ms . Ως αποτέλεσμα είχε τις καταπτώσεις βράχων από τον Ταΰγετο, οι οποίες προκάλεσαν πρόσθετες καταστροφές (Παπαζάχος and Παπαζάχου, 1989).

Η πρώτη αναφορά γίνεται στην Ουρανία (8.37.3) του Ηροδότου ως μια «θαυματουργή» κατάπτωση βράχων από τον Παρνασσό το 480 π.Χ. Ο στρατός του Ξέρξη πλησιάζει στο ιερό της Προναίας Αθηνάς, μέσα σε μια καταιγίδα με κεραυνούς. Τότε, δυο μεγάλοι βράχοι αποσπάστηκαν και κυλώντας με θόρυβο καταπλάκωσαν πολλούς από τους βαρβάρους, που τρομοκρατημένοι έφυγαν από Ιερό χωρίς να το ληλατήσουν.

Η πρώτη φορά που χρησιμοποιήθηκε ο όρος κατάπτωση και περιγράφηκε η κίνηση των τεμαχίων μέσω των διαγραφόμενων τροχιών τους (Σχήμα 2.1), ήταν από τους E. Buss και A. Heim το 1882. Στο βιβλίο «Der Bergsturz von Elm» περιγράφεται η μεγάλη κατολίσθηση στο Elm της Ελβετίας που έλαβε χώρα την 11^η Σεπτεμβρίου του 1882 (Voight and Pariseau, 1978). Συνέβη σε λατομείο σχιστόλιθου εξαιτίας της υπερεκμετάλλευσης των κοιτασμάτων. Οι τραγικές συνέπειες του συμβάντος ήταν ο θάνατος 114 ανθρώπων και η καταστροφή 83 κτισμάτων, τα οποία θάφτηκαν στα χαλάσματα.



Σχήμα 2.1: Εικόνες από το βιβλίο «Der Bergsturz von Elm»: (α) Γενική άποψη του Elm μετά την κατολίσθηση (Voight and Pariseau, 1978) και (β) σκαρίφημα της κίνησης των υλικών της κατάπτωσης (Hsu, 2004)

Το 1883 συνέβη κατάπτωση στα βόρεια τείχη της Ακρόπολης των Αθηνών, εξαιτίας των εργασιών καθαίρεσης επισφαλών τεμαχών. Ως συνέπεια ήταν η ολοσχερής καταστροφή 3 οικιών, ευτυχώς χωρίς θύματα αφού η περιοχή είχε αποκλειστεί από την αστυνομία. Όμως, οι εργασίες καθαίρεσης έγιναν με αφορμή πρότερη κατάπτωση στον οικισμό «Αναφιώτικα», που είχε ως αποτέλεσμα τον θάνατο 3 ανθρώπων (Εφημερίς, 21/12/1883 αρ. φύλ. 355).

2.2 Αίτια καταπτώσεων

Η επιδεκτικότητα εμφάνισης καταπτώσεων σε ένα πρανές καθορίζεται από γεωλογικά και γεωμορφολογικά αίτια, πρωτίστως από την ποιότητα της βραχομάζας και την μορφολογία του ανάγλυφου. Το έναυσμα για την πραγματοποίηση μιας κατάπτωσης αποδίδεται ως επί το πλείστον σε εξωτερικούς παράγοντες, περιβαλλοντικής ή ανθρώπινης προελεύσεως. Έτσι, τα αίτια διακρίνονται σε ενδογενή ή εξωγενή αντίστοιχα και αναπαρίστανται στο σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2: Αίτια καταπτώσεων

Στον πίνακα 2.1 αναφέρονται τα αίτια και η αντίστοιχη ποσοστιαία κατανομή από 308 περιστατικά καταπτώσεων που συνέβησαν στο εθνικό οδικό δίκτυο της πολιτείας της Καλιφόρνιας στις Η.Π.Α. Παρατηρείται ότι περίπου τα δυο τρίτα των συμβάντων σχετίζονται με την δράση του νερού, ενώ περιέργως δεν αναφέρεται η σεισμική διέγερση ως η αιτία κάποιου συμβάντος.

Πίνακας 2.1: Αίτια καταπτώσεων στο εθνικό οδικό δίκτυο στην Καλιφόρνια των Η.Π.Α. (Turner and Schuster, 2012)

Αιτία Κατάπτωσης	Ποσοστό Εμφάνισης [%]
Βροχοπτώσεις	30
Θερμοκρασιακές μεταβολές	21
Ασυνέχειες βραχομάζας	12
Άνεμος	12
Παγετός	8
Επιφανειακή απορροή	7
Επίπεδη αστοχία	5
Πανίδα	2.3
Αποσάθρωση	1
Ριζικό σύστημα	0.6
Πηγές	0.6
Δονήσεις από την κυκλοφορία οχημάτων	0.3
Αποδόμηση εδάφους	0.3

Στον πίνακα 2.2 παρουσιάζονται αντίστοιχα τα εξωγενή αίτια από 153 περιστατικά καταπτώσεων στον εθνικό δρυμό Yosemite στην Καλιφόρνια των Η.Π.Α. Ομοίως, το ποσοστό αυτών που οφείλεται στην δράση του νερού κυμαίνεται περί του 70%.

Πίνακας 2.2: Εξωγενή αίτια καταπτώσεων στο εθνικό δρυμό Yosemite, Καλιφόρνια - Η.Π.Α. (Guzzetti et al., 2003)

Αιτία Κατάπτωσης	Αριθμός Συμβάντων	Ποσοστό Εμφάνισης [%]
Βροχοπτώσεις	78	51.0
Βροχοπτώσεις και παγετός	15	9.8
Θερμοκρασιακές μεταβολές	18	11.8
Σεισμικές διεγέρσεις	21	13.7
Κατασκευαστική δραστηριότητα	12	7.8
Ανεμοθύελλες, επιφανειακή απορροή	9	5.9

2.2.1 Ενδογενή αίτια

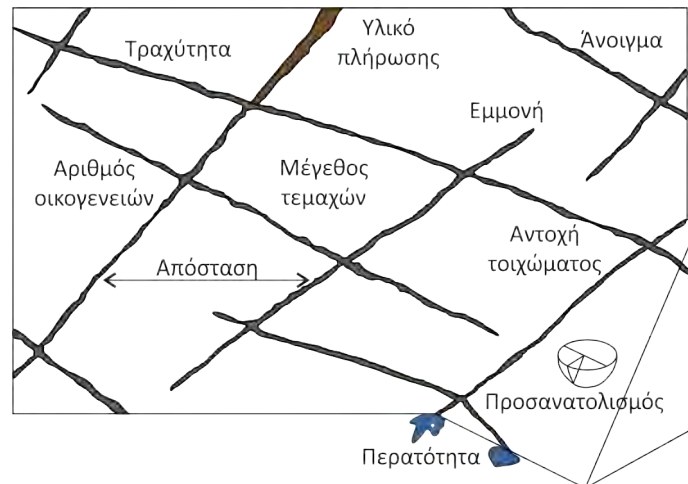
Προϋπόθεση για την πραγματοποίηση μιας κατάπτωσης είναι η απόσπαση ενός τεμάχου από την αρχική του θέση και η δυνατότητα μετακίνησής του. Συνεπώς, η μορφολογία του ανάγλυφου και η κατάσταση της βραχομάζας αποτελούν τα κρισιμότερα στοιχεία για την εκδήλωση του φαινομένου.

Η επιδεκτικότητα πρόκλησης καταπτώσεων συνδέεται με το είδος του πετρώματος, καθώς ο τρόπος γένεσης και επακόλουθη τεκτονική καταπόνηση καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την τεχνική του συμπεριφορά. Η ορυκτολογική σύσταση καθορίζει την αντοχή του άρρηκτου πετρώματος και την δυνατότητα αποσάθρωσής του. Ωστόσο, η αντοχή του άρρηκτου πετρώματος δεν αποτελεί κρίσιμη παράμετρο για τις καταπτώσεις, αφού ακόμα και ασθενείς σχηματισμοί έχουν ικανοποιητική διατμητική αντοχή ενώ σε άρρηκτη εμφάνιση βράχου ή σε πολύ συμπαγή βραχομάζα δεν υφίστανται, εξ ορισμού, τεμάχη για να αποσπαστούν.

Η κατάσταση των ασυνεχειών είναι η βασική παράμετρος που καθορίζει την δυνατότητα εκδήλωσης καταπτώσεων, εφόσον ικανοποιούνται οι γεωμετρικές απαιτήσεις. Οι παράμετροι για τον χαρακτηρισμό των ασυνεχειών και της δομής της βραχομάζας (Barton, 1978) είναι: ο προσανατολισμός, η απόσταση, η εμμονή, ο αριθμός οικογενειών, το μέγεθος των τεμαχών, η τραχύτητα, η αντοχή του τοιχώματος, το άνοιγμα, το υλικό πλήρωσης και η περατότητα (Σχήμα 2.3).

Ο προσανατολισμός και η κλίση των ασυνεχειών σε συνδυασμό με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πρσανούς καθορίζουν την δυνατότητα κινηματικής αστοχίας. Εφόσον ικανοποιούνται οι γεωμετρικές συνθήκες για την εκδήλωση αστοχίας, θα πρέπει οι δυνάμεις ολίσθησης να υπερτερούν της διατμητικής αντοχής στο επίπεδο της ασυνέχειας. Σύμφωνα με τον Barton (1973), η διατμητική αντοχή των ασυνεχειών εξαρτάται από την τραχύτητα, την αντοχή των τοιχωμάτων και την ορθή τάση στο επίπεδο αστοχίας. Τυχόν υλικό πλήρωσης στις ασυνέχειες μεταβάλλει την τριβή μεταξύ των επιπέδων των ασυνεχειών, συνήθως δυσμενώς. Η παρουσία νερού στην βραχομάζα εξαρτάται, εκτός των άλλων, από το άνοιγμα και την περατότητα τους. Τέλος, η απόσταση, η εμμονή και το πλήθος των ασυνεχειών καθορίζουν το μέγεθος των τεμαχών που δύναται να αποσπαστούν, και άρα σχετίζονται με τις συνέπειες μιας κατάπτωσης.

Η επιδεκτικότητα ενός πρσανούς σε καταπτώσεις σχετίζεται επίσης και με τις τεκτονικές δομές της βραχομάζας. Σύμφωνα με τους Coe and Harp (2007) σε αντικλινικές δομές πτυχώσεων υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα εκδήλωσης καταπτώσεων, η οποία εντείνεται με την αύξηση της καμπυλότητας της πτύχωσης. Επίσης, η πιθανότητα εμφάνισης καταπτώσεων στις παρειές πτυχωμένων δομών αυξάνεται όσο η κλίση των στρωμάτων γίνεται πιο απότομη.



Σχήμα 2.3: Τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών (Hudson, 1989)

2.2.2 Εξωγενή αίτια

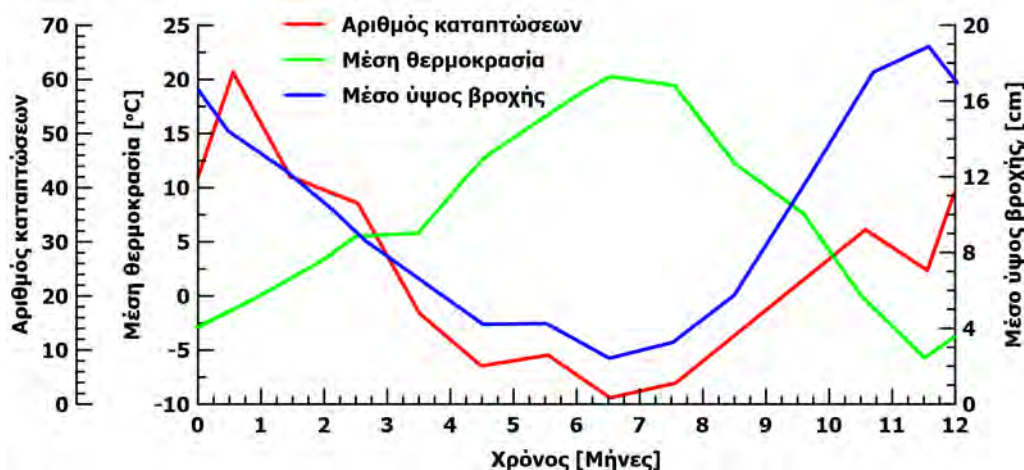
Τα εξωγενή αίτια, τα οποία είναι υπεύθυνα για την εκδήλωση μιας κατάπτωσης, απαρτίζονται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, την ανθρώπινη δραστηριότητα και την σεισμική διέγερση. Στην πλειοψηφία των καταγεγραμμένων συμβάντων, περισσότεροι του ενός εκ των μηχανισμών που αναφέρονται παρακάτω συμβάλλουν στην εκδήλωση μιας κατάπτωσης.

2.2.2.1 Περιβαλλοντικά αίτια

Μια από τις σημαντικότερες αιτίες για την εκδήλωση μιας κατάπτωσης είναι οι ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις και η επακόλουθη επιφανειακή απορροή. Το επιφανειακό νερό εισέρχεται στις ανοιχτές ασυνέχειες τροφοδοτώντας την υπόγεια υδροφορία. Γενικότερα, το υπόγειο νερό έχει σημαντικές επιπτώσεις στην ευστάθεια των βραχωδών πρηνών (Hoek and Bray, 1981). Η υπόγεια ροή και η ανάπτυξη υδροστατικών πιέσεων επιδρούν αρνητικά στην ευστάθεια, προκαλώντας τα εξής:

- η παρουσία νερού μειώνει την τριβή στα επίπεδα των ασυνεχειών, υποβαθμίζοντας την διατμητική αντοχή της ασυνέχειας
- στην περίπτωση που η ασυνέχεια είναι πληρωμένη με αργιλικό υλικό, δύναται η διάγκωση της αργίλου, κατά τον διαποτισμό της με νερό, να προκαλέσει χαλάρωση της βραχομάζας και μετακίνηση - απόσπαση κάποιου τεμάχους
- σε περιπτώσεις μη επαρκούς αποστράγγισης ασκούνται υδροστατικές πιέσεις στα τεμάχη
- η ροή του νερού δια μέσου των ασυνεχειών μπορεί να παρασύρει τυχόν εδαφικό υλικό χαλαρώνοντας περαιτέρω τη βραχομάζα
- η παρουσία και η ροή νερού στις ασυνέχειες εντείνουν την αποσάθρωση και την διάβρωση της βραχομάζας μειώνοντας εν γένει την αντοχή της

Γενικά, παρατηρείται ένταση των καταπτώσεων σε περιόδους με χαμηλή θερμοκρασία και υψηλές βροχοπτώσεις (Paronuzzi, 2009; Σακελλαρίου et al., 1995, κ.α.). Ενδεικτικά στο σχήμα 2.4 παρουσιάζεται η συσχέτιση των κλιματολογικών χαρακτηριστικών με την συχνότητα εκδήλωσης καταπτώσεων.



Σχήμα 2.4: Εξάρτηση των καταπτώσεων από τις κλιματολογικές συνθήκες, από τους Legget and Karrow (από Σακελλαρίου et al., 1995)

Η αποσάθρωση εξαρτάται μεν από την ορυκτολογική σύσταση του σχηματισμού, αλλά η εξέλιξή της καθορίζεται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Διακρίνεται στη μηχανική αποσάθρωση (θρυμματισμός του πετρώματος χωρίς αλλαγή της χημικής σύστασης του) και στη χημική αποσάθρωση. Κύριοι συντελεστές της μηχανικής αποσάθρωσης είναι:

- η παγετώδης αποσφήνωση: προκαλείται κατά την μετατροπή του νερού σε πάγο και συνοδεύεται από αύξηση όγκου ασκώντας σημαντικές δυνάμεις στη βραχώμαζα
- η κρυστάλλωση αλάτων: τα διαλυμένα άλατα που βρίσκονται σε πόρους, ασυνέχειες ή μικρό-έγκοιλα της ασυνέχειας, αυξάνουν σε όγκο κατά την κρυστάλλωσή τους προκαλώντας σημαντικές δυνάμεις στη βραχώμαζα - παρόμοια με τον μηχανισμό της παγετώδους αποσφήνωσης
- η θερμική διαστολή και συστολή: τα ορυκτά που δομούν το πέτρωμα έχουν διαφορετική απόκριση στις θερμοκρασιακές μεταβολές με αποτέλεσμα να διαστέλλονται και να συστέλλονται ανομοιόμορφα, προκαλώντας τον κατακερματισμό του πετρώματος
- η βιογενής δράση: οι ρίζες των φυτών διεισδύουν και διευρύνουν της ασυνέχειες της βραχομάζας με αποτέλεσμα την χαλάρωση του πετρώματος. Αντίστοιχα, μπορεί να λειτουργήσουν οι υπόγειες εκσκαφές από ζώα

Κατά την χημική αποσάθρωση συμβαίνει εξαλλοίωση των πετρωμάτων, δηλαδή αλλαγή της ορυκτολογικής τους σύστασης, με τη βοήθεια αντιδράσεων όπου κυρίως συμμετέχει το νερό. Διακρίνονται τρεις βασικές διεργασίες χημικής αποσάθρωσης: η διάλυση, η υδρόλυση και η οξείδωση.

Ο άνεμος μπορεί επίσης να προκαλέσει καταπτώσεις είτε εξαιτίας του φορτίου που ασκεί στην επιφάνεια ενός τεμάχους ή μέσω της κίνησης που προκαλεί σε κορμούς δέντρων, που μεταφέρεται μέσω του ριζικού συστήματος στην βραχομάζα, συντελώντας στην χαλάρωσή της.

2.2.2.2 Ανθρωπογενή αίτια

Η ανθρωπίνη δραστηριότητα μπορεί να προκαλέσει καταπτώσεις, κυρίως εξαιτίας των δονήσεων που μεταφέρονται στην βραχομάζα. Η προέλευση των δονήσεων μπορεί να είναι η κυκλοφορία βαρέων οχημάτων, ειδικά των σιδηροδρομικών συρμών, καθώς και οι εργασίες εκσκαφής πρανών ή σηράγγων με την χρήση εκρηκτικών.

Επίσης μετά την διαμόρφωση ορυγμάτων, η αποτόνωση των διαμορφωμένων μετώπων προκαλεί την χαλάρωση της βραχομάζας, η οποία συνήθως συνοδεύεται από εφελκυστικές ρωγμές που είναι παράλληλες με το μέτωπο, ευνοώντας των σχηματισμό σφηνών.

Έχουν επίσης αναφερθεί περιστατικά που οφείλονται στην παρουσία ζώων στο πρανές ή ακόμα και σε αναρριχητική δραστηριότητα.

2.2.2.3 Σεισμική δράση

Στον ελλαδικό χώρο, σύμφωνα με τους Koukis et al. (1994), η αστοχία με την μορφή καταπτώσεων βράχων είναι ο συνηθέστερος τύπος μεταξύ των αστοχιών σε βραχώδη πρανή, με συχνότητα εμφάνισης 56%.

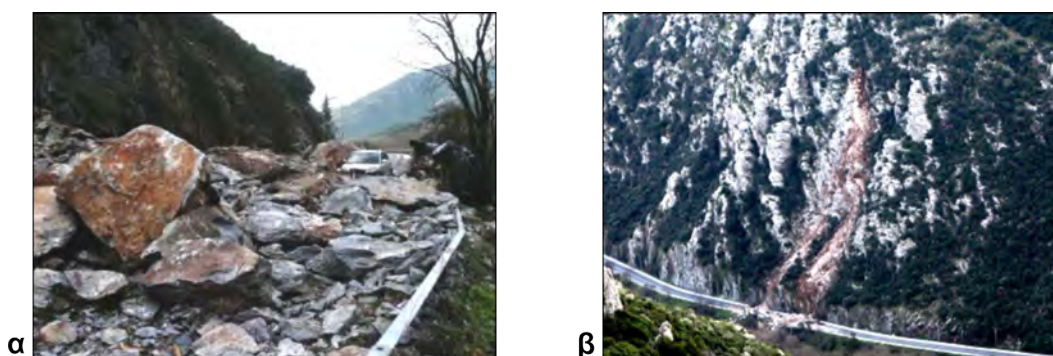
Στην δημοσίευση των Ambraseys and Jackson (1990), που πραγματεύεται τους σεισμούς μεγέθους μεγαλύτερου των 5.8Ms που συνέβησαν στην κεντρική Ελλάδα από το 1890 έως το 1988, αναφέρονται καταπτώσεις βράχων μετά τους σεισμούς: της Θήβας (Ms6.0 - Μάιος, 1893), του Μαρτίνου (Ms6.4 - Απρίλιος, 1894), της Αταλάντης (Ms6.9 - Απρίλιος, 1894), της Κυπαρισσίας (Ms6.1 - Ιανουάριος, 1899), της Φωκίδας (Ms6.3 - Μάιος, 1909), της Λακωνίας (Ms6.4 - Ιούλιος, 1927), της Κορίνθου (Ms6.3 - Απρίλιος, 1928), της Μαγνησίας (Ms6.0 - Μάρτιος, 1930), της Κορίνθου (Ms5.9 - Απρίλιος, 1930), της Μεσσηνίας (Ms6.9 - Οκτώβριος, 1947), της Μεγαλόπολης (Ms5.9 - Απρίλιος, 1965), της Ερατεινής (Ms6.5 - Ιούλιος, 1965), των Κρεμαστών (Ms6.2 - Φεβρουάριος, 1966), των Αντικύρων (Ms6.2 - Απρίλιος, 1970), των Αλκυονίδων (Ms6.7 - Φεβρουάριος, 1981).

Από το σύνολο των μεγάλων σεισμών $M_s > 5.8$ μεταξύ του 1890 και 1988 που συγκεντρώνει η εν λόγω εργασία (Ambraseys and Jackson, 1990), προκλήθηκαν καταπτώσεις βράχων στους 16 από τους 30 σεισμούς. Ο αριθμός ενδέχεται να είναι υψηλότερος αφού η δημοσίευση αυτή εξετάζει διαφορετικό ζήτημα και δεν παρέχει ενδελεχείς λεπτομέρειες για τις συνέπειες κάθε συμβάντος. Έτσι πιθανολογείται ότι προκλήθηκαν καταπτώσεις και σε κάποιους από τους υπόλοιπους σεισμούς, αλλά δεν αναφέρονται. Από το σύνολο των περιπτώσεων που εξετάζουν μόνο σε μια αναφέρεται ρητά ότι δεν προκλήθηκαν καταπτώσεις.

Μετά το 1988, είναι γνωστά αρκετά περιστατικά σεισμών που είχαν ως συνέπειες την εκδήλωση καταπτώσεων. Ενδεικτικά αναφέρονται οι περιπτώσεις των σεισμών της Αθήνας το 1999 (G. Papadopoulos et al., 2000), της Λευκάδας το 2003, της Τιθορέας (Parathanassiou et al., 2013; Saroglou, 2013), του Σαντομερίου Αχαΐας τον Ιούνιο του 2008 (Sabatakakis et al., 2015) και του πρόσφατου σεισμού της Λευκάδας ($M_s 6.1$ - Νοέμβριος 2015) που είχε ως συνέπεια την απώλεια ανθρώπινης ζωής από κατάπτωση βράχου.

Ίσως το σημαντικότερο πρόσφατο περιστατικό στην Ελλάδα είναι η μεγάλη κατάπτωση των Τεμπών τον Δεκέμβριο του 2009. Ασβεστολιθικοί ογκόλιθοι αποκολλήθηκαν από ύψος περίπου $h = 80m$ σε σχέση με το επίπεδο της εθνικής οδού Αθηνών – Θεσσαλονίκης. Στη συνέχεια, κύλησαν, θραύτηκαν και παρέσυραν μικρότερους ογκόλιθους μέχρι να καταλήξουν επί της οδού (Σχήμα 2.5). Το αποτέλεσμα ήταν ο συνολικός όγκων των υλικών της κατάπτωσης να ανέλθει στα $V = 300m^3$, ενώ το μεγαλύτερο σε όγκο τέμαχος ήταν της τάξεως των $20m^3$ (Γκαζέτας et al., 2010). Οι συνέπειες ήταν σημαντικές, αφού ο βασικός οδικός άξονας της χώρας παρέμεινε κλειστός για διάστημα μεγαλύτερο των 5 μηνών, επιφέροντας δυσμενείς επιπτώσεις, οικονομικές και κοινωνικές. Επίσης, σημαντικό ήταν το κόστος για την αποκατάσταση των ζημιών και την αντιμετώπιση του προβλήματος.

Στην περιοχή των Τεμπών, τα πρανή εμφανίζουν μεγάλες κλίσεις και αποτελούνται από ασβεστολιθική βραχομάζα έντονα κερματισμένη, με πλήθος ασυνεχειών, σχηματίζοντας σφήνες που είναι σε οριακή κατάσταση ισορροπίας. Τις μέρες πριν από την εκδήλωση της αστοχίας υπήρχαν παρατεταμένες και έντονες ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις στην περιοχή. Έτσι, συνέβαιναν καταπτώσεις μικρών τεμαχών με αυξανόμενη συχνότητα, οι οποίες ανάγκασαν τους υπευθύνους του έργου να διακόψουν προσωρινά την κυκλοφορία των οχημάτων στο παρακείμενο τμήμα της εθνικής οδού, ώστε να αξιολογήσουν την κατάσταση. Η μεγάλη αστοχία συνέβη κατά την διάρκεια της αυτοψίας, επιφέροντας τον θανάσιμο τραυματισμό του μηχανικού Σέρτζιο Σιάνι που ήταν παρών στην επιτόπου έρευνα, ως υπεύθυνος του γεινιάζοντος εργοταξίου διάνοιξης των σηράγγων των Τεμπών.



Σχήμα 2.5: Η κατάπτωση στο εθνικό οδικό δίκτυο Αθηνών – Θεσσαλονίκης, στην περιοχή των Τεμπών: (α) τεμάχιο που κατέληξε στο οδόστρωμα (Christaras et al., 2010) και (β) η θέση απόσπασης των τεμαχών από το πρανές (πηγή: αρχείο Γ. Τσιαμπάου)

Τον Απρίλιο του 2012 συνέβη κατάπτωση ενός μεμονωμένου τεμάχους στον Ι.Ν. της Ζωοδόχου Πηγής Κεφαλαρίου του Άργους κατά την διάρκεια του εορτασμού της Ζωοδόχου Πηγής. Το συμβάν είχε ως αποτέλεσμα τον θανάσιμο τραυματισμό μιας νεαρής μητέρας. Το τέμαχος αποσπάστηκε από ύψος $h = 10m$ και είχε διαστάσεις περίπου $20 \times 20 \times 15cm$. Το παρακατακόρυφο ασβεστολιθικό πρανές από όπου αποσπάστηκε το τέμαχος ήταν καλυμμένο από αναρριχόμενα φυτά και στην στέψη του είχε χαμηλή βλάστηση. Αν και δεν υπάρχει επίσημο πόρισμα για το συμβάν, η κατάπτωση αποδίδεται - από τον γράφοντα μετά από επιτόπου έρευνα - στους ισχυρούς ανέμους που έπνεαν την στιγμή του ατυχήματος. Ο αέρας έθετε σε κίνηση τα φυτά, η οποία μεταφερόταν μέσω του ριζικού σύστηματος της βλάστησης στο εσωτερικό της βραχώμαζας με αποτέλεσμα την σταδιακή χαλάρωσή της και τελικά την απόσπαση του τεμάχους.

Πρόσφατες καταπτώσεις που είχαν ως συνέπεια την απώλεια ή τραυματισμό συνανθρώπων μας, έχουν συμβεί επίσης στην Κακιά σκάλα το 2010, στην Σαντορίνη το 2011 και το 2015 στα Σφακιά, στον Μύρτο αλλά και κατά τον σεισμό της Λευκάδας.

2.3 Αντιμετώπιση καταπτώσεων

Στόχος των επεμβάσεων αντιμετώπισης των καταπτώσεων είναι ο περιορισμός της διακινδύνευσης που εμφανίζει μια θέση. Η διακινδύνευση ορίζεται ως το γινόμενο της επικινδυνότητας του πρανούς με τις συνέπειες ενός συμβάντος και περιγράφει τις συνέπειες της αστοχίας σταθμισμένες ως προς την πιθανότητα εμφάνισής τους. Η επικινδυνότητα αντιπροσωπεύει την πιθανότητα να συμβεί μια αστοχία, ενώ οι συνέπειες αντικατοπτρίζουν το κόστος της αστοχίας.

Γενικώς δεν υπάρχει ευρέως αποδεκτό επίπεδο διακινδύνευσης, έτσι ο στόχος μιας επέμβασης είναι ο περιορισμός της διακινδύνευσης σε επίπεδο τόσο χαμηλό όσο είναι ευλόγως εφικτό (*ALARP – As Low As Reasonable Practicable*). Συνεπώς, σε κάθε περίπτωση πρέπει να γίνεται ανάλυση της διακινδύνευσης ώστε να αξιολογείται η αποτελεσματικότητα των επεμβάσεων σε συνδυασμό με την παραμένουσα διακινδύνευση.

Οι επεμβάσεις για την αντιμετώπιση των καταπτώσεων μπορεί να στοχεύουν είτε στην σταθεροποίηση του πρανούς μειώνοντας την πιθανότητα εμφάνισης της αστοχίας (δηλαδή την επικινδυνότητα), είτε στην ελεγχόμενη ανάσχεση της κίνησης των τεμαχών περιορίζοντας τις συνέπειες μιας κατάπτωσης. Έτσι οι επεμβάσεις διακρίνονται σε ενεργητικές και παθητικές αντίστοιχα. Τα κριτήρια για την επιλογή της βέλτιστης μεθόδου επέμβασης είναι:

- η αποτελεσματικότητα, δηλαδή ο περιορισμός της διακινδύνευσης
- ο χρόνος ζωής και η ανθεκτικότητα του έργου
- η πολυπλοκότητα εφαρμογής
- τυχόν ιδιαίτερες κατασκευαστικές απαιτήσεις ή περιορισμοί

- περιβαλλοντικά ζητήματα και αισθητική
- το κόστος
- οι απαιτήσεις συντήρησης

Σε περιπτώσεις όπου δεν είναι εφικτός ο περιορισμός της διακινδύνευσης σε ικανοποιητικά επίπεδα, οι λύσεις θα πρέπει να είναι πιο δραστικές, όπως για παράδειγμα η αλλαγή της χάραξης μιας οδού ή ακόμα και η απαγόρευση χρήσης μιας περιοχής.

Τα μέτρα προστασίας παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 2.3. Στις ενότητες 2.3.1 και 2.3.2 αναφέρονται, εν συντομία, τα χαρακτηριστικά και οι βασικές αρχές λειτουργίας των ενεργητικών και των παθητικών μέτρων προστασίας αντίστοιχα.

Πίνακας 2.3: Μέτρα αντιμετώπισης καταπτώσεων

Ενεργητικά Μέτρα Προστασίας	Παθητικά Μέτρα Προστασίας
Αγκυρώσεις	Φράχτες ανάσχεσης
Πλήρως αγκυρωμένα μεταλλικά πλέγματα	Μεταλλικά πλέγματα «κουρτίνας»
Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα	Τάφροι περισυλλογής τεμαχίων (βραχοπαγίδες)
Μεταβολή της γεωμετρίας του πρσανούς	Στέγαστρα καταπτώσεων
Αποστράγγιση	Οπλισμένα επιχώματα
Καθαίρεση επισφαλών όγκων	Απομειωτήρες κίνησης

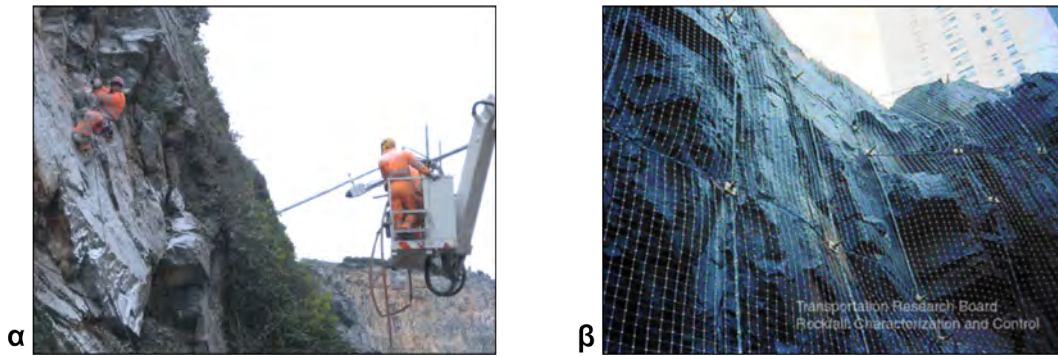
2.3.1 Ενεργητικά μέτρα προστασίας

Στόχος των ενεργητικών μέτρων προστασίας είναι η μείωση της πιθανότητας εμφάνισης μιας αστοχίας, περιορίζοντας την δυνατότητα απόσπασης ή μετακίνησης των τεμαχίων από την αρχική τους θέση. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της αύξησης της αντοχής της βραχομάζας, τον περιορισμό των δυνάμεων που προκαλούν την αστοχία ή τον περιορισμό της δυνατότητας κινηματικής αστοχίας των τεμαχίων.

Σύμφωνα με τον Sprang (1987), οι καταπτώσεις που η αναπτυσσόμενη κινητική ενέργεια είναι μεγαλύτερη των 500KNm πρέπει να αντιμετωπίζονται με ενεργητικά μέτρα προστασίας, καθώς μόνο τα παθητικά μέτρα είναι μη αποδοτικά για τέτοια μεγέθη.

2.3.1.1 Αγκυρώσεις

Οι αγκυρώσεις χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση της ευστάθειας ενός πρσανούς. Δύναται να είναι ενεργητικές ή παθητικές. Οι ενεργητικές (ή προεντεταμένες) αγκυρώσεις ασκούν θλιπτική δύναμη στην βραχομάζα μέσω της πλάκας έδρασης, αυξάνοντας την διατμητική αντοχή των ασυνεχειών. Οι παθητικές αγκυρώσεις ενεργοποιούνται μετά από μικρό-μετακίνηση του τεμάχους. Χρησιμοποιούνται ευρύτατα εδώ και δεκαετίες με πολύ καλά αποτελέσματα. Επίσης, μεμονωμένες αγκυρώσεις χρησιμοποιούνται για την σταθεροποίηση διακριτών όγκων με σημαντικό μέγεθος ($> 2m^3$).



Σχήμα 2.6: Αγκύρια και πλήρως αγκυρώμενο μεταλλικό πλέγμα: (α) εργασίες εγκατάστασης αγκυρίων σε κατακόρυφο πρανές στην περιοχή των Τεμπών και (β) πλήρως αγκυρώμενο μεταλλικό πλέγμα ενισχυμένο με οριζόντια και κάθετα στρματόσχοινα (Turner and Schuster, 2012)

Η εγκατάσταση των αγκυρίων μπορεί να είναι ιδιαίτερα προβληματική σε θέσεις περιορισμένης πρόσβασης. Για πρανή με ύψος έως περίπου 30m, μπορούν να γίνουν με την χρήση τηλεσκοπικού γερανού (Σχήμα 2.6-α). Σε ψηλότερα πρανή καθώς και σε θέσεις όπου δεν υπάρχει δυνατότητα προσέγγισης από μηχανοκίνητα μέσα κατασκευάζονται με εργαλεία χειρός από ειδικούς τεχνητές, τους εναερίτες.

2.3.1.2 Πλήρως αγκυρωμένα μεταλλικά πλέγματα

Πρόκειται για μεταλλικά πλέγματα από γαλβανισμένο συρματόπλεγμα με βρόγχο λίγων εκατοστών (< 10cm) που εφάπτονται στο πρανές μέσω συστηματικών αγκυρώσεων. Συχνά είναι ενισχυμένα με οριζόντια και κάθετα συρματόσχοινα μεγαλύτερης διαμέτρου (Σχήμα 2.6–β) ή είναι προενταταμένα ενισχύοντας την αντοχή του πρανούς, αποτρέποντας έτσι την αποκόλληση τεμαχών και την πτώση τους.

Χρησιμοποιούνται κυρίως σε περιπτώσεις όπου ο διαθέσιμος χώρος στον πόδα του πρανούς είναι περιορισμένος ή ανύπαρκτος. Εφαρμόζονται σε πρανή όπου το μέγεθος των τεμαχών που δύναται να αποσπαστούν είναι σχετικά μικρό (μεγίστη διάσταση τεμάχους < 1m).

Η συντήρηση των πλήρως αγκυρούμενων μεταλλικών πλεγμάτων είναι δύσκολη και επικίνδυνη. Γίνεται μέσω της αποσυναρμολόγησης του πλέγματος από τις κατώτερες σειρές αγκυρώσεων ώστε να απομακρυνθούν τα τεμάχη που έχουν συγκρατηθεί.

2.3.1.3 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα χρησιμοποιείται για την επένδυση του πρανούς με σκοπό την σταθεροποίηση των επισφαλών τεμαχών και τον περιορισμό της αποσάθρωσης και διάβρωσης του πρανούς. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να συνοδεύεται από αποστραγγιστικές οπές ώστε να αποτρέπεται η δημιουργία υδατικών πιέσεων στην βραχώμαζα.

Αν και στο παρελθόν το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα έχει εφαρμοστεί αρκετά, πλέον η χρήση του τείνει να εκλείπει κυρίως για περιβαλλοντικούς και αισθητικούς λόγους.

2.3.1.4 Μεταβολή της γεωμετρίας του πρανούς

Η μεταβολή της γεωμετρίας του πρανούς επιτυγχάνεται με την μείωση της κλίσης του πρανούς ώστε να περιορισθεί η δυνατότητα κινηματικής αστοχίας. Επίσης, με την κατασκευή αναβαθμών επιτυγχάνεται περιορισμός της ταχύτητας κίνησης των τεμαχών.

2.3.1.5 Αποστράγγιση πρανούς

Η επιφανειακή απορροή ελέγχεται με την κατασκευή τάφρων απορροής στην στέψη του πρανούς, περιορίζοντας την ποσότητα νερού που κατεisdύει στην βραχώμαζα και την επιφανειακή αποσάθρωση – διάλυση της βραχώμαζας.

Η αποστράγγιση επιτυγχάνεται με αποστραγγιστικές οπές, υποβαθμίζοντας τον υδροφόρο ορίζοντα και μειώνοντας τις υδροστατικές πιέσεις που ασκούνται στις ασυνέχειες. Οι αποστραγγιστικές οπές εγκαθίστανται ανά 3 έως 10m μήκους του πρανούς και το μήκος τους πρέπει να είναι τουλάχιστον όσο το 1/3 του ύψους του πρανούς.

2.3.1.6 Καθαίρεση επισφαλών όγκων

Η καθαίρεση των επισφαλών όγκων, δηλαδή των οριακά σταθερών τεμαχών καθώς και των έντονα αποσαθρωμένων ή χαλαρών δομών, είναι ένας από τους πλέον διαδεδομένους τρόπους αντιμετώπισης. Συγκριτικά με τις άλλες επεμβάσεις είναι αρκετά αποδοτική και σημαντικά οικονομική. Συνήθως, εφαρμόζεται πριν από κάθε άλλη εργασία αφού βελτιώνει σημαντικά τις συνθήκες ασφάλειας του εργοταξίου.

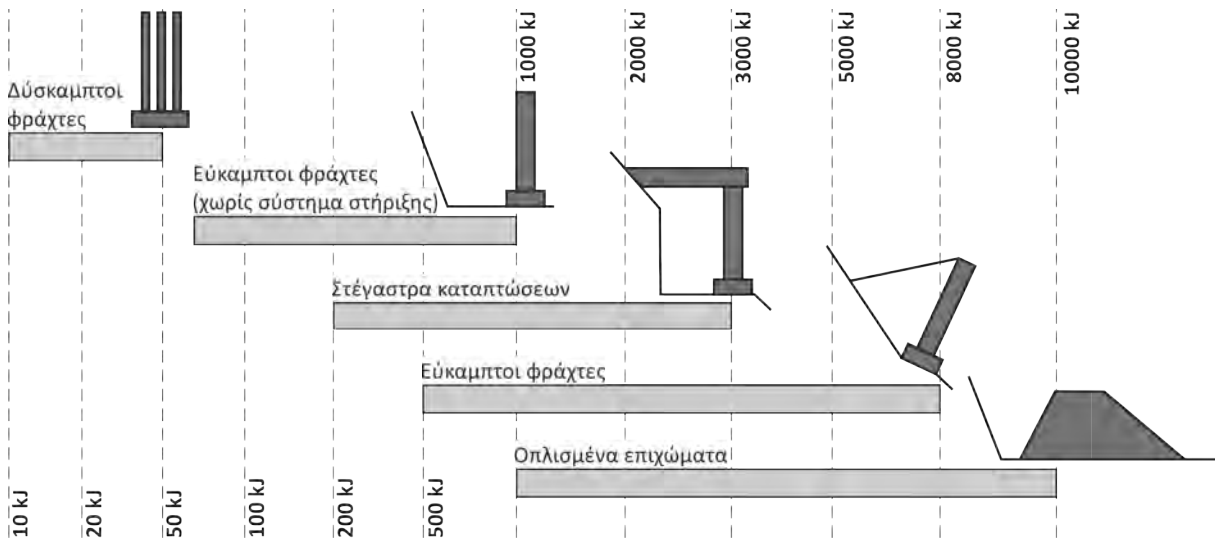
Αποτελεί συγχρόνως βοήθημα στον σχεδιασμό των παθητικών μέτρων προστασίας, αφού με την παρατήρηση των τροχιών που διαγράφουν τα τεμάχια κατά την καθαίρεσή τους, γίνεται έλεγχος των παραδοχών της μελέτης. Μειονέκτημα αποτελεί η περιορισμένη διάρκεια ζωής, λόγω της εξελισσόμενης χαλάρωσης και αποσάθρωσης του πρανούς, οπότε οι εργασίες καθαίρεσης πρέπει να επαναλαμβάνονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα, ανάλογα των επιτόπου συνθηκών.

Η καθαίρεση γίνεται από την στέψη προς τον πόδα του πρανούς, ώστε να περιορίζεται ο κίνδυνος από την πτώση τεμαχών στο προσωπικό και στον εξοπλισμό. Πραγματοποιείται με χειρονακτικά ή μηχανικά μέσα καθώς και με την χρήση εκρηκτικών.

2.3.2 Παθητικά μέτρα προστασίας

Τα παθητικά μέτρα προστασίας πλεονεκτούν έναντι των ενεργητικών καθώς είναι αποδοτικότερα, απλούστερα στην κατασκευή, τοποθετούνται σε θέση που επιλέγεται από τον μελετητή και έχουν λιγότερες περιβαλλοντικές και αισθητικές επιπτώσεις. Τα εύρη εφαρμογής τους, βάσει της κινητικής ενέργειας που αναπτύσσει το τεμάχος, παρουσιάζονται στο σχήμα

2.7.

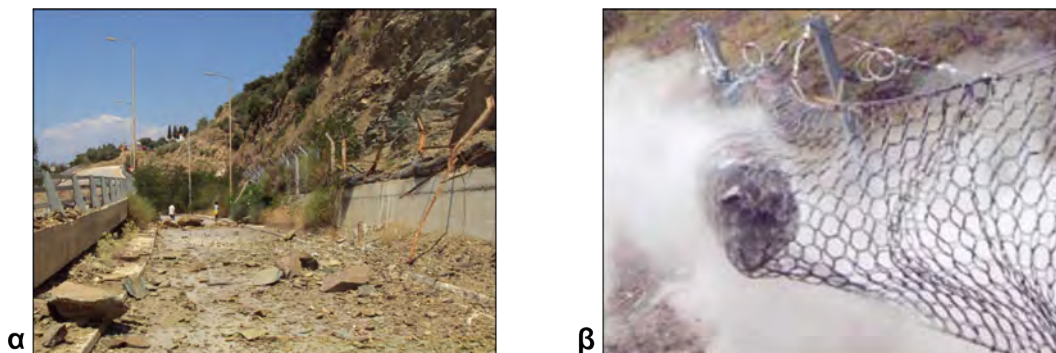


Σχήμα 2.7: Εύρος εφαρμογής παθητικών μέτρων ανάσχεσης καταπτώσεων ανάλογα με την κινητική ενέργεια (σε kJ) που μπορούν να ανασχέσουν (πηγή: www.Geobrugg.com)

2.3.2.1 Φράχτες ανάσχεσης

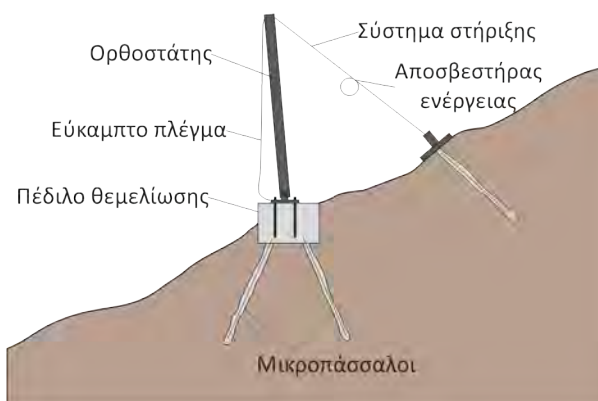
Οι φράχτες ανάσχεσης έχουν σκοπό την συγκράτηση των τεμαχών αποσβαίνοντας την κινητική τους ενέργεια και κατατάσσονται σε εύκαμπτους ή δύσκαμπτους, ανάλογα με την αρχή λειτουργίας τους. Η βέλτιστη θέση για την εγκατάσταση είναι αυτή που ελαχιστοποιούνται η κινητική ενέργεια και το ύψος αναπήδησης. Ωστόσο, στην πράξη καθορίζεται σε σημαντικό βαθμό από τις δυνατότητες πρόσβασης στο πρανές.

Ιδιαίτερα διαδεδομένοι σε έργα οδοποιίας είναι οι δύσκαμπτοι φράχτες από προκατασκευασμένα στοιχεία σκυροδέματος, τύπου Jersey (Σχήμα 2.8-α). Αν και η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας είναι περιορισμένη < 100kJ, εμφανίζουν σημαντικά πλεονεκτήματα: έχουν σχετικά μικρές διαστάσεις συνεπώς δεν καταλαμβάνουν ωφέλιμο χώρο της διατομής, είναι οικονομικοί και η εγκατάστασή τους είναι ταχεία και εύκολη. Συχνά χρησιμοποιούνται επικουρικά των τάφρων ανάσχεσης.



Σχήμα 2.8: Φράχτες ανάσχεσης καταπτώσεων: (α) ανεπαρκής δύσκαμπτος φράχτης ανάσχεσης στα Λουτρά Αιδηψού (προσωπικό αρχείο) και (β) ανάσχεση τεμάχους από εύκαμπτο φράχτη μέσω της παραμόρφωσης του συστήματος (πηγή: www.geobrugg.com)

Οι εύκαμπτοι φράχτες ανάσχεσης απορροφούν την ενέργεια του τεμάχου μέσω της παραμόρφωσής τους (Σχήμα 2.8-β). Έχουν την ικανότητα να απορροφούν κινητική ενέργεια της τάξης των 8000kJ, που αντιστοιχεί σε μάζα τεμάχου 10t που κινείται με ταχύτητα 40ms^{-1} . Τα βασικά τους στοιχεία είναι: το πλέγμα, οι αποσβεστήρες ενέργειας, το σύστημα στήριξης, οι ορθοστάτες και το σύστημα θεμελίωσης (Σχήμα 2.9).



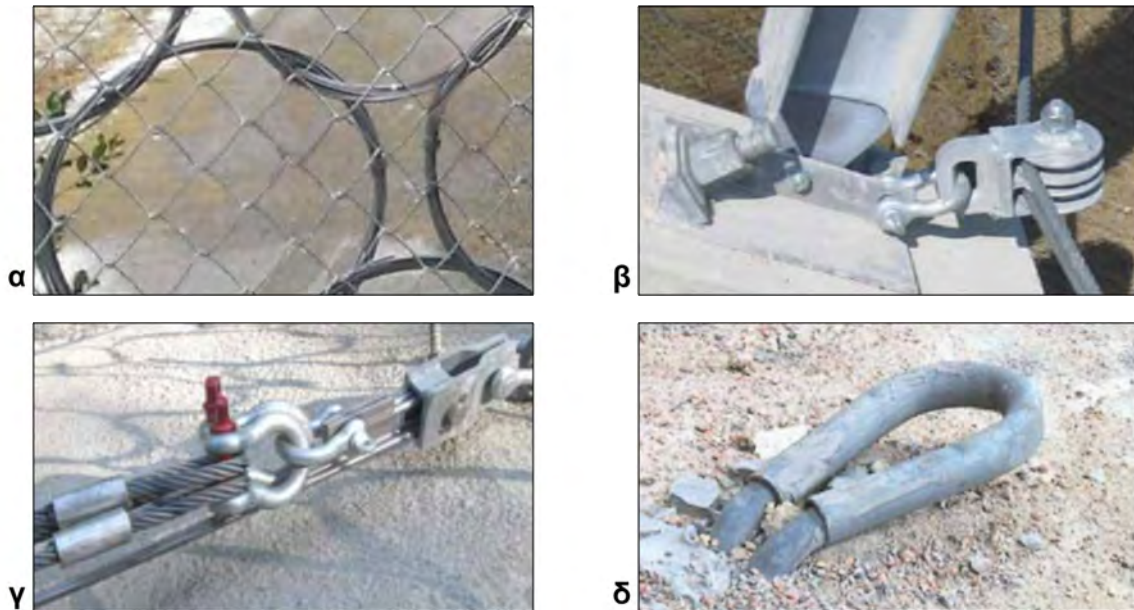
Σχήμα 2.9: Τυπική διατομή εύκαμπτου φράχτη ανάσχεσης

Το σύστημα θεμελίωσης καθορίζεται από τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά της εκάστοτε θέσης. Σε έδαφος ή βραχώμαζα χαμηλής αντοχής, η θεμελίωση γίνεται με μεμονωμένα πέδιλα ή φρεάτια σκυροδέματος, ενώ εάν απαιτείται ενίσχυση του υπεδάφους μπορεί να γίνει με μικροπάσσλους ή αγκυρώσεις. Σε καλής ποιότητας βραχώμαζα, η θεμελίωση γίνεται με αγκυρώσεις απ' ευθείας στο φυσικό ανάγλυφο ή εάν απαιτείται σε κατάλληλα εξομαλυμένο επίπεδο με χρήση αυτοεπιπεδούμενου ενέματος.

Οι ορθοστάτες είναι μεταλλικά στοιχεία τύπου HEB ή αντίστοιχα, με συνήθη διάσταση 100 έως 300mm. Η εγκατάστασή τους γίνεται ανά 5 έως 10m μήκους του φράχτη. Δύναται να είναι πακτωμένοι στην θεμελίωση ή αρθρωτοί ανάλογα με τις απαιτήσεις παραμόρφωσης του συστήματος (Σχήμα 2.10-β).

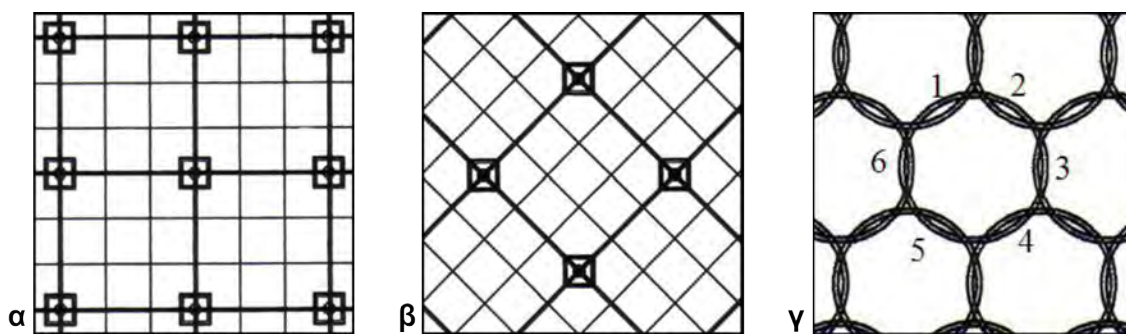
Το σύστημα στήριξης είναι ένα χωροδικτύωμα από συρματόσχοινα που συνδέει τους ορθοστάτες με το πλέγμα και φέρει τους αποσβεστήρες ενέργειας. Έτσι μεταφέρει τα φορτία από την ανωδομή στην θεμελίωση. Τα συρματόσχοινα αγκυρώνονται στη βραχώμαζα (Σχήμα 2.10-δ) ανάντη της θέσης εγκατάστασης του φράχτη. Το πλήθος και η διάταξη των αγκυριών καθορίζεται από την χωρητικότητα του φράχτη.

Οι αποσβεστήρες ενέργειας (Σχήμα 2.10-γ) είναι μεταλλικές διατάξεις που χρησιμοποιούνται για την απόσβεση της ενέργειας που δεν μπορεί να παραλάβει το πλέγμα και το σύστημα θεμελίωσης. Ενεργοποιούνται μόνο σε ακραία φαινόμενα, δηλαδή κοντά στην φέρουσα ικανότητα της κατασκευής, και παραμορφώνονται πλαστικά αυξάνοντας την δυνατότητα απόσβεσης ενέργειας του συστήματος.



Σχήμα 2.10: Λεπτομέρειες εύκαμπτων φραχτών ανάσχεσης: (α) πλέγμα από αλληλοεμπλεκόμενους δακτυλίους, (β) σύνδεση του ορθοστάτη με άρθρωση στο θεμέλιο και ένωση με το σύστημα στήριξης, (γ) γραμμικός αποσβεστήρας ενέργειας και (δ) κεφαλή αγκυρίου για την σύνδεση του συστήματος στήριξης (πηγή: www.geobrugg.gr)

Το πλέγμα είναι το βασικό στοιχείο του φράχτη για την συγκράτηση των τεμαχών (Σχήμα 2.10–α). Αποτελείται από συρματόσχοινο διαμέτρου από 3 έως 10mm, το οποίο είναι γαλβανισμένο ή επικαλυμμένο με pnc ώστε να αυξάνεται η ανθεκτικότητά του έναντι διάβρωσης. Η πλέξη καθορίζει την δυνατότητα παραμόρφωσης του πλέγματος, με τον βρόχο να κυμαίνεται από 5 έως 15cm με τετραγωνικό, κυκλικό ή ρομβοειδές σχήμα (Σχήμα 2.11). Η πλέον αποτελεσματική πλέξη επιτυγχάνεται με αλληλοεμπλεκόμενους δακτυλίους.



Σχήμα 2.11: Γεωμετρία πλεγμάτων: (α) τετραγωνική, (β) ρομβοειδής και (γ) αλληλοεμπλεκόμενοι δακτύλιοι (Turner and Schuster, 2012)

Το πλέγμα πρέπει να είναι αρκούντως εύκαμπτο, ώστε να μην κινδυνεύει από διάτρηση, αλλά συγχρόνως να διατηρεί το σχήμα του σε κατάσταση ηρεμίας. Συνδέεται με το σύστημα στήριξης και όχι με τους ορθοστάτες (Σχήμα 2.10–β), ώστε να αποφεύγεται η ένωση ενός εύκαμπτου με ένα δύσκαμπτο στοιχείο.

Τα πλεονεκτήματα των εύκαμπτων φραχτών ανάσχεσης είναι σημαντικά, έτσι αποτελούν την πλέον διαδεδομένη και αναγνωρίσιμη μορφή επέμβασης.

- προσαρμόζονται σε κάθε μορφολογία του ανάγλυφου χάρη στην αρθρωτή δομή τους
- υπάρχουν αρκετές δυνατότητες για την θεμελίωση των ορθοστατών που προσαρμόζονται εύκολα στις εκάστοτε επικρατούσες γεωτεχνικές συνθήκες
- το κόστος προμήθειας και εγκατάστασης είναι σχετικά χαμηλό
- η εγκατάσταση, εφόσον γίνεται από εξειδικευμένο προσωπικό, είναι ταχεία και εύκολη
- η αντικατάσταση και επιδιόρθωση μεμονωμένων εξαρτημάτων είναι γρήγορη, εύκολη και οικονομική, χάρη στην αρθρωτή δομή του συστήματος
- η ενέργεια πρόσκρουσης απορροφάται κυρίως από το πλέγμα και τα συρματόσχοινα – αποσβεστήρες με αποτέλεσμα οι τάσεις που μεταφέρονται στο σύστημα θεμελίωσης να είναι περιορισμένες
- είναι αποτελεσματικοί και για ταυτόχρονες προσκρούσεις σε διαφορετικά σημεία του φράχτη ή για δευτερεύουσες προσκρούσεις στο ίδιο τμήμα, εξαιτίας της συνεργασίας ολόκληρης της εμπρόσθιας πλευράς για την ανάληψη της φόρτισης
- δεν επηρεάζουν την επιφανειακή απορροή των υδάτων
- η αισθητική επιβάρυνση είναι περιορισμένη εξαιτίας της οπτικής διαπερατότητας και των ανοιχτόχρωμων στοιχείων της κατασκευής
- οι διαστάσεις, η ποιότητα των υλικών καθώς και οι τεχνικές προδιαγραφές τους είναι τυποποιημένες, και συνοδεύονται από σχετικά πιστοποιητικά

Ωστόσο, εμφανίζουν τα ακόλουθα μειονεκτήματα:

- τα τεμάχια που έχουν συγκρατηθεί μετά από κάποιο συμβάν πρέπει να απομακρύνονται άμεσα ώστε ο φράχτης να επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση και να είναι ικανός να ανταποκριθεί στο επόμενο περιστατικό. Έτσι, είναι σκόπιμο να υπάρχει μόνιμη πρόσβαση για βαρέα οχήματα ενώ απαιτείται επιθεώρηση της κατασκευής σε τακτά χρονικά διαστήματα
- η παραμόρφωση του πλέγματος του φράχτη είναι σημαντική, οπότε πρέπει να προβλέπεται ελεύθερος χώρος κατάντη της θέσης εγκατάστασης του
- έχουν περιορισμένη αντοχή στη διάβρωση, λόγω του μεταλλικού χαρακτήρα της κατασκευής. Έτσι, η εγκατάστασή τους σε παράκτιες περιοχές καθίσταται προβληματική. Σύμφωνα με την ΕΟΤΑ (European Organisation for Technical Approvals - ETAG, 2008) ο χρόνος αποτελεσματικής λειτουργίας σε κανονικές συνθήκες είναι 25 χρόνια, συνεπώς αρκετά λιγότερο εάν πρόκειται για παράκτιες περιοχές και θέσεις με υψηλή συχνότητα καταπτώσεων

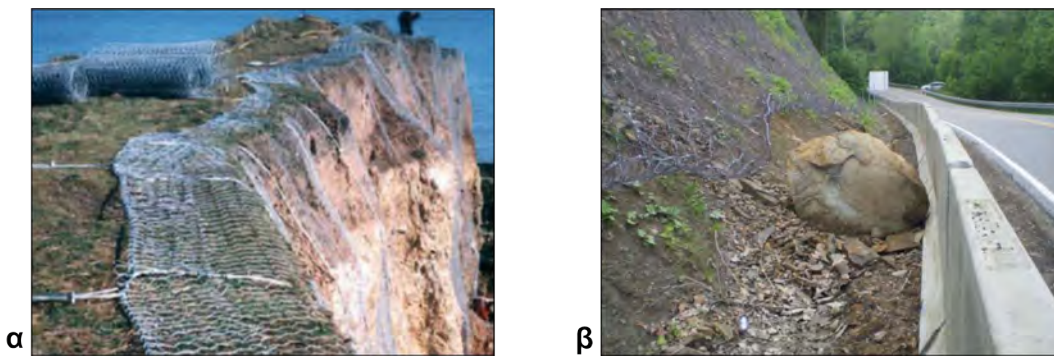
- στην περίπτωση ανάσχεσης τεμάχους με ενέργεια κοντά στην ικανότητα απορρόφησης του φράχτη, οι αποσβεστήρες ενέργειας ενδέχεται να ενεργοποιηθούν, οπότε χρειάζονται αντικατάσταση ή συντήρηση

2.3.2.2 Μεταλλικά πλέγματα τύπου κουρτίνας

Είναι μεταλλικά πλέγματα που καλύπτουν την επιφάνεια του πρανούς αλλά σε αντίθεση με τα πλήρως αγκυρωμένα πλέγματα, πακτώνονται μόνο στην κορυφή του πρανούς (Σχήμα 2.12-α). Έτσι ένα τέμαχος που θα αποσπαστεί θα ακολουθήσει μια ελεγχόμενη πορεία, μεταξύ του μετώπου και της κουρτίνας, μέχρι τον πόδα του πρανούς όπου και θα τερματίσει την κίνηση του. Τα μεταλλικά πλέγματα συνήθως συνδυάζονται με κάποια προσβάσιμη τάφρο ανάσχεσης (Σχήμα 2.12-β), από όπου γίνεται η συγκομιδή και η απομάκρυνση των τεμαχών.

Είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικά για την αντιμετώπιση μικρών τεμαχών (μεγίστης διάστασης $< 1.5m$) καθώς και μικρών κατολισθητικών φαινομένων, έως $10m^3$. Συνήθως τοποθετούνται σε πρανή με κλίση 60 έως 90° και ύψους 15 έως 45m, αν και έχουν εφαρμοσθεί με επιτυχία και σε πρανή ύψους 120m (Muhunthan et al., 2005; Giacchetti and Grimod, 2015).

Συγκριτικά με τα πλήρως αγκυρωμένα πλέγματα, εμφανίζουν σημαντικά μικρότερο κόστος κατασκευής, κυρίως εξ αιτίας του περιορισμένου αριθμού αγκυρώσεων. Επίσης, οι απαιτήσεις συντήρησης είναι λιγότερες και οι εργασίες ευκολότερες, αφού τα τεμάχη δεν συγκρατούνται επί του πρανούς και δεν απαιτείται αποσυναρμολόγηση τους. Παρόλα αυτά, δεν προσφέρουν καμία ενίσχυση στην αντοχή του πρανούς.



Σχήμα 2.12: Μεταλλικά πλέγματα τύπου «κουρτίνας»: (α) στήριξη του πλέγματος στην στέψη του πρανούς (πηγή: www.maccaferri.com) και (β) περιορισμός του τεμάχους με την βοήθεια τάφρου ανάσχεσης τύπου jersey (πηγή: www.marshall.edu)

2.3.2.3 Τάφροι περισυλλογής τεμαχών

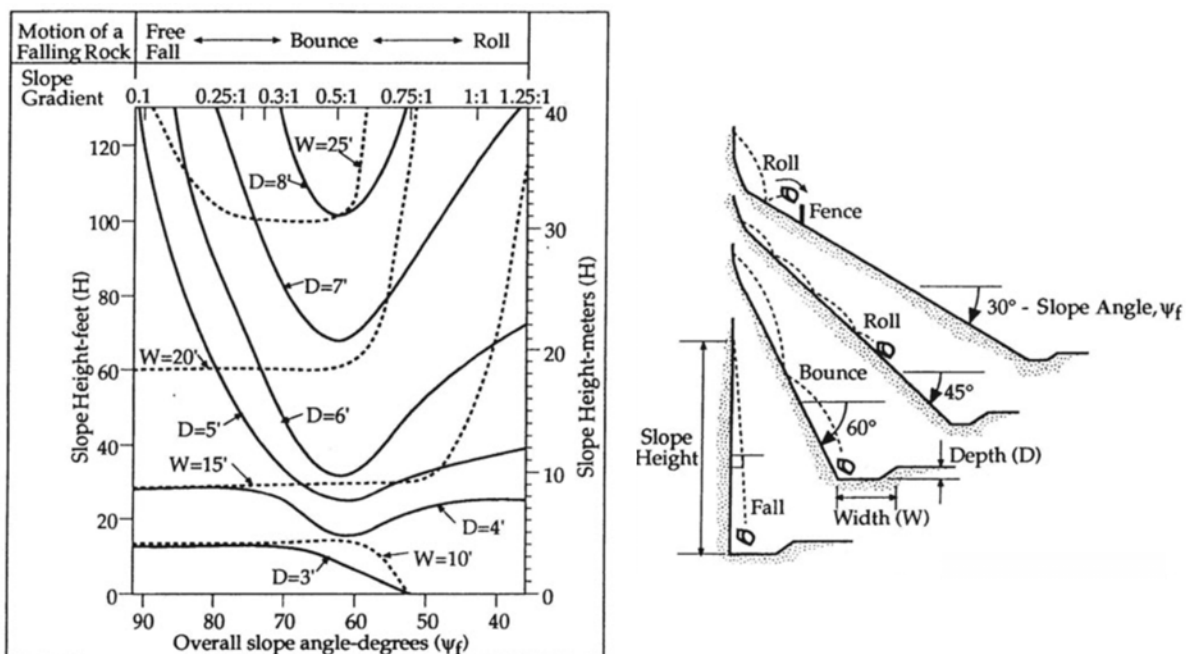
Οι τάφροι περισυλλογής (ή βραχοπαγίδες) κατασκευάζονται συνήθως στον πόδα του πρανούς κυρίως σε έργα οδοποιίας. Έχουν σκοπό να εμποδίσουν τα τεμάχη να φτάσουν στο οδόστρωμα, περιορίζοντας την δυνατότητα μετακίνησής τους μέσω αλλαγής της γεωμετρίας του πόδα του πρανούς. Τα βασικά χαρακτηριστικά μιας τάφρου είναι το πλάτος, το βάθος, το σχήμα και το υλικό πλήρωσης.

Το πλάτος καθορίζεται από την θέση όπου θα γίνει η πρόσκρουση του τεμάχου και την απαιτούμενη απόσταση για να σταματήσει η μετέπειτα κίνησή του. Το βάθος πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το αναμενόμενο ύψος αναπήδησης ώστε να μην μπορεί το τέμαχος να την υπερπηδήσει. Το σχήμα της τάφρου μπορεί να είναι τριγωνικό ή τραπεζοειδές. Η βάση της τάφρου μπορεί να επικαλυφθεί με χαλαρό αδρόκοκκο υλικό, το οποίο απορρόφα σημαντική ποσότητα ενέργειας περιορίζοντας έτσι την ταχύτητα και το ύψος αναπήδησης των τεμαχών.

Γενικά, πρέπει να υπάρχει πρόσβαση από μηχανικά μέσα για την συντήρησή τους, ωστόσο αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα αφού συνήθως κατασκευάζονται εφαπτομενικό σε έργα οδοποιίας. Το απαιτούμενο πλάτος μιας τάφρου είναι σημαντικό ειδικά σε υψηλά πρανή, έτσι η κατασκευή τους οδηγεί στην εκσκαφή πρανών ακόμα μεγαλύτερου ύψους και επομένως με δυσμενέστερες συνθήκες ευστάθειας.

Η κατασκευή τάφρου κατά την διάνοιξη μιας οδού είναι αρκετά οικονομική και αποδοτική. Αντίθετα, η κατασκευή τάφρου σε υφιστάμενη οδό είναι προβληματική κυρίως εξαιτίας γεωμετρικών περιορισμών.

Το έναυσμα για την έρευνα και την μελέτη των καταπτώσεων, προήλθε από την ανάγκη διαστασιολόγησης των τάφρων περισυλλογής τεμαχών. Πρωτοπόρος υπήρξε ο A. Ritchie, επικεφαλής γεωλόγος της υπηρεσίας αυτοκινητοδρόμων στη πολιτεία της Ουάσινγκτον (Washington State Department of Highways). Μετά την εκτέλεση σημαντικού αριθμού δοκιμών πεδίου το 1959, κατήρτισε εμπειρικά διαγράμματα σχεδιασμού (Σχήμα 2.13).



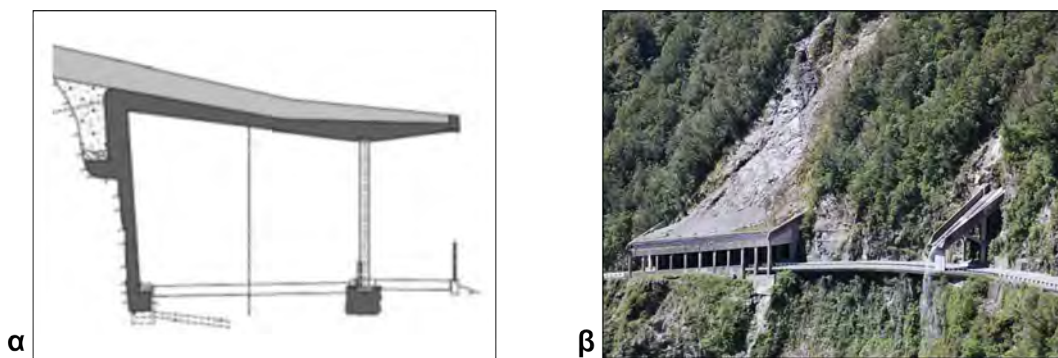
Σχήμα 2.13: Εμπειρικό διάγραμμα σχεδιασμού τάφρων ανάσχεσης (Pierson et al., 2001), το οποίο βασίζεται στην έρευνα του Ritchie (1963)

2.3.2.4 Στέγαστρα καταπτώσεων

Τα στέγαστρα καταπτώσεων είναι ογκώδεις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα που καλύπτουν ένα επισφαλές σε καταπτώσεις τμήμα μιας οδού (Σχήμα 2.14). Στην οροφή τους τοποθετείται αδρόκοκκο υλικό με σκοπό τον περιορισμό των φορτίων που ασκούνται στον φέροντα οργανισμό της κατασκευής. Η στρώση του αδρόκοκκου υλικού επιβραδύνει σταδιακά το τέμαχος αυξάνοντας την διάρκεια της κρούσης, περιορίζοντας έτσι τα αναπτυσσόμενα φορτία. Επίσης, οι τάσεις που ασκούνται στον φέροντα οργανισμό κατανέμονται σε μεγαλύτερη επιφάνεια.

Εναλλακτικά, η πλάκα της οροφής μπορεί να κατασκευαστεί υπό κλίση. Έτσι, τα τεμάχια συνεχίζουν την προς κατάντη κίνησή τους χωρίς να επηρεάζουν την λειτουργικότητα της οδού. Κατασκευές τέτοιου τύπου είναι πιο ελαφριές, αφού τα φορτία που προκαλούνται από την πρόσκρουση σε κεκλιμένη επιφάνεια είναι σημαντικά μικρότερα.

Το κόστος κατασκευής είναι ιδιαίτερα υψηλό σε σχέση με άλλες μορφές επεμβάσεων ενώ η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας είναι περιορισμένη, της τάξεως των 3000kJ. Όμως, οι απαιτήσεις συντήρησης είναι ελάχιστες και η κατασκευή δεν καταλαμβάνει ωφέλιμο χώρο. Έτσι υπερτερεί για την προστασία ορεινών οδικών χαράξεων με ιδιαίτερα απότομη μορφολογία που εμφανίζουν συχνές καταπτώσεις μικρού σχετικά μεγέθους. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι στις Ελβετικές Άλπεις κατασκευάστηκαν μεταξύ του 1960 και 1990 στέγαστρα συνολικού μήκους περί των 3000m.

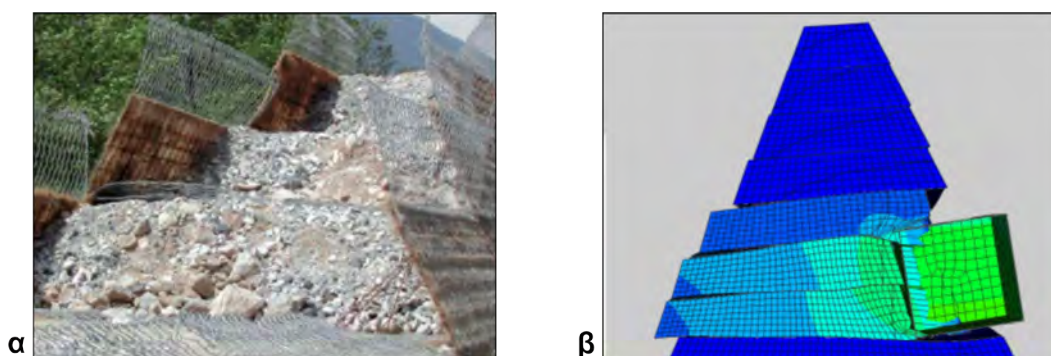


Σχήμα 2.14: Στέγαστρα καταπτώσεων: (α) Τυπική διατομή στεγάστρου καταπτώσεων με κεκλιμένη στέγη (Schellenberg, 2009) και (β) στέγαστρο σε αρμονία με το φυσικό περιβάλλον στην Νέα Ζηλανδία (πηγή: wikimedia.org)

2.3.2.5 Οπλισμένα επιχώματα

Τα οπλισμένα επιχώματα κατασκευάζονται σε στρώσεις από αδρομερή υλικά (Σχήμα 2.15-α) που συλλέγονται επιτόπου και ενισχύονται με γεωυφάσματα ή γεωπλέγματα. Ο λόγος βάσης προς ύψος κυμαίνεται από $b/h = 2 \div 3$ και οι παρειές είναι σχεδόν κατακόρυφες.

Από όλα τα μέτρα αντιμετώπισης καταπτώσεων, εμφανίζουν την μεγαλύτερη δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας εξαιτίας της μεγάλης μάζας τους και της παραμόρφωσης που μπορούν να δεχθούν. Πρακτικά πρόκειται για συνδυασμό εύκαμπτου και δύσκαμπτου συστήματος ανάσχεσης, αφού η απόσβεση ενέργειας οφείλεται αφενός στις αδρανειακές δυνάμεις προερχόμενες από την αυξημένη μάζα της κατασκευής και αφετέρου στην παραμόρφωση μορφής κρατήρα στην παρειά και την μερική ολίσθηση μεταξύ των στρώσεων και του οπλισμού (Σχήμα 2.15-β). Εξαιτίας των δυο αυτών συζευγμένων μηχανισμών που λειτουργούν για την απορρόφηση της ενέργειας των τεμαχών, η διαστασιολόγηση είναι ιδιαίτερα δύσκολη και αποτελεί αντικείμενο εκτεταμένης έρευνας (Ronco et al., 2009; Lambert et al., 2015).



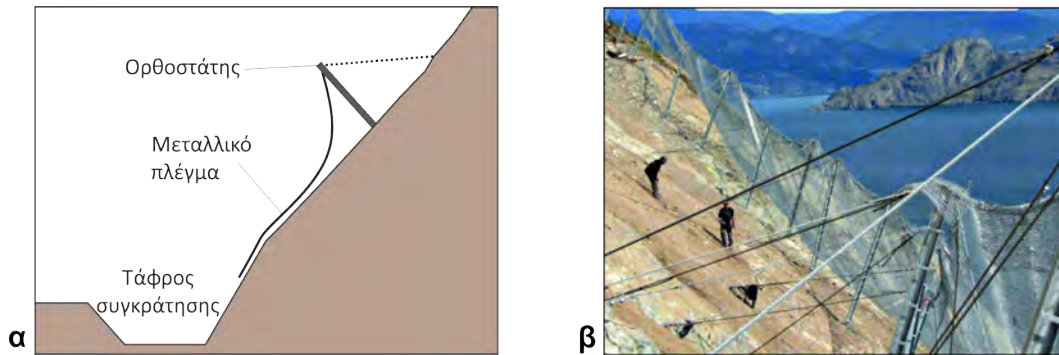
Σχήμα 2.15: Οπλισμένο επίχωμα: (α) κατά την κατασκευή, όπου διακρίνονται οι στρώσεις αδρομερούς υλικού και η ενίσχυση με γεωσύνθετα (πηγή: www.maccaferi.com) και (β) παραμόρφωση της κατασκευής για την ανάσχεση του τεμάχου (Ronco et al., 2009)

2.3.2.6 Απομειωτήρες κίνησης

Οι απομειωτήρες κίνησης αποτελούν υβριδικά συστήματα προστασίας. Πρόκειται για συνδυασμό μεταλλικών πλεγμάτων και φραχτών ανάσχεσης, εμφανίζοντας σημαντικά πλεονεκτήματά. Οι ορθοστάτες χρησιμοποιούνται για την ανάρτηση της μιας πλευράς του πλέγματος πάνω από την επιφάνεια του πρανού, ενώ το υπόλοιπο πλέγμα κείται στην επιφάνειά του (Σχήμα 2.16). Έτσι τα τεμάχια διέρχονται μεταξύ του πρανού και του πλέγματος, περιορίζοντας σημαντικά την κινητικότητά τους ενέργειας και οδηγούνται σε κάποιο προσχεδιασμένο σημείο περισυλλογής.

Εν αντιθέσει με τους εύκαμπτους φράχτες ανάσχεσης, που απαιτείται αντικατάσταση των αποσβεστήρων, λειτουργούν αποτελεσματικά για τον περιορισμό τεμαχών μεγάλου όγκου χωρίς να παρουσιάζουν σημαντικές φθορές, περιορίζοντας το κόστος συντήρησής τους.

Επίσης, σε περιοχές με ροές αποσαθρωμένου επιφανειακού υλικού ή έντονες χιονοπτώσεις πλεονεκτούν, καθώς δεν συγκρατούνται τα υλικά αυτά και δεν μειώνεται η αποτελεσματικότητα της κατασκευής και το διαθέσιμο ύψος ανάσχεσης.



Σχήμα 2.16: Απομειωτήρες κίνησης: (α) σκαρίφημα με τα βασικά στοιχεία του συστήματος και (β) κατά την εγκατάσταση (πηγή: www.maccaferi.com)

Κεφάλαιο 3

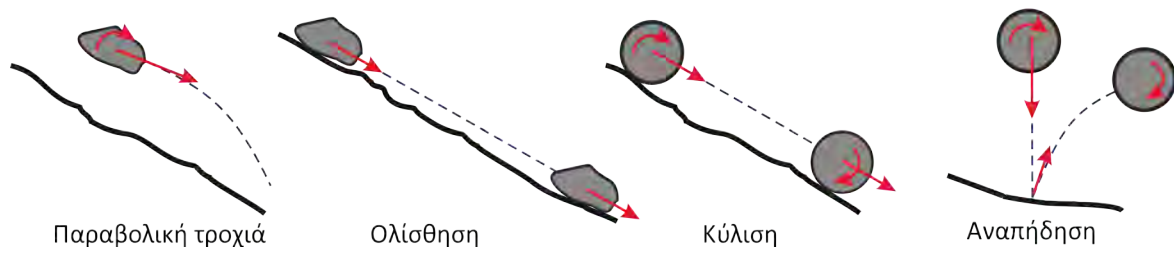
Γενικές Αρχές στις Καταπτώσεις Βράχων

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο για την ερμηνεία της αναπήδησης και οι σχετικές επί του αντικειμένου έρευνες. Αρχικά, αναφέρονται οι τέσσερις τύποι κίνησης που αναλύεται η τροχιά κατά την διάρκεια μιας κατάπτωσης. Έπειτα, δίνεται έμφαση στην κρούση του τεμάχους με το πρανές, που αποτελεί το θέμα της παρούσας έρευνας. Αναλύεται η μηχανική συμπεριφορά κατά την διάρκειά της, δίνονται οι ορισμοί για τους συντελεστές αναπήδησης με τους οποίους προσομοιώνεται, και παρατίθενται οι τιμές που έχουν προσδιοριστεί σε πρότερες έρευνες. Στην συνέχεια, αξιολογούνται και μέσω μιας απλής παραμετρικής ανάλυσης επιδεικνύεται η επίδραση που έχουν στον σχεδιασμό των μέτρων αντιμετώπισης των καταπτώσεων. Τέλος, γίνεται μια εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση, κυρίως των πειραματικών διερευνήσεων που έχουν πραγματοποιηθεί, η οποία παρατίθεται ως προς τις παραμέτρους που επηρεάζουν την απόκριση του τεμάχους στην κρούση.

3.1 Στοιχεία τροχιάς

Οι καταπτώσεις βράχων λαμβάνουν χώρα κυρίως σε απότομα πρανή. Τα τεμάχη μετά την αποκόλλησή τους από το πρανές και όσο βρίσκονται στο αέρα διαγράφουν μια παραβολική τροχιά, όπου η κίνηση είναι επιταχυνόμενη εξαιτίας της βαρύτητας. Η κρούση του τεμάχους με την επιφάνεια του πρανούς έχει σαν αποτέλεσμα τον περιορισμό της κίνησης, μεταβάλλοντας τον τύπο της σε κύλιση, ολίσθηση ή μέσω της αναπήδησης σε νέα παραβολική τροχιά (Σχήμα 3.1)

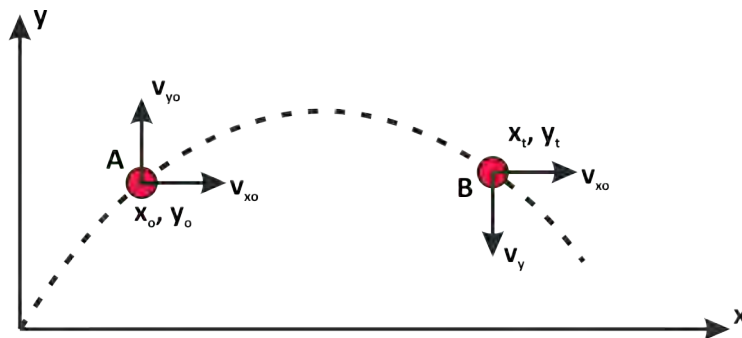
Σύμφωνα με τον Ritchie (1963), ο τύπος της κίνησης συνδέεται με την κλίση του πρανούς (σχήμα 2.13). Πιο συγκεκριμένα, στα τμήματα πρανούς που εμφανίζουν κλίση $\theta < 45^\circ$ αναμένεται κύλιση, στα τμήματα με κλίση από 46° έως 63° αναμένεται αναπήδηση και στα απότομα τμήματα του πρανούς, με κλίση μεγαλύτερη των 63° , η κίνηση θα είναι παραβολικής τροχιάς (όπου καταχρηστικά χρησιμοποιείται ο όρος «ελεύθερη πτώση»).



Σχήμα 3.1: Τύποι κίνησης στις καταπτώσεις βράχων (Descoeudres and Zimmermann, 1987)

3.1.1 Παραβολική τροχιά

Όσο το τέρμαχος είναι στον αέρα, η τροχιά που διαγράφει μπορεί να περιγραφεί ικανοποιητικά με την χρήση των γενικευμένων εξισώσεων κίνησης. Έστω, ότι το κέντρο βάρους του τεμάχους βρίσκεται την χρονική στιγμή t_0 στη θέση $A(x_0, y_0)$ με ταχύτητα v_{x0} και v_{y0} κατά τους άξονες x και y αντίστοιχα (Σχήμα 3.2).



Σχήμα 3.2: Παραβολική τροχιά

Στο τέρμαχος επιδρά μόνο η βαρύτητα, συνεπώς η κίνηση θα είναι ομαλά επιταχυνόμενη κατά τον άξονα y και ευθύγραμμη ομαλή στον άξονα x . Η αντίσταση στην κίνηση που αναπτύσσεται εξαιτίας του αέρα (οπισθέλκουσα δύναμη), επηρεάζει ανεπαίσθητα την ταχύτητα του τεμάχους οπότε και δεν λαμβάνεται υπόψη, πρακτική που ακολουθείται στο σύνολο των σχετικών του αντικείμενου ερευνών (Bozzolo and Pamini, 1986; Azzoni et al., 1992, κ.α.).

Μετά από χρονικό διάστημα t , το τέρμαχος θα βρίσκεται στην θέση $B(x_t, y_t)$, η οποία εξαρτάται από τις αρχικές ταχύτητες και προσδιορίζεται από τις σχέσεις:

$$x_t = x_0 + v_{x0}t \tag{3.1}$$

$$y_t = y_0 + v_{y0}t - \frac{1}{2}gt^2 \tag{3.2}$$

όπου:

x_0, y_0 οι συντεταγμένες της αρχικής θέσης του τεμάχους

v_{x0}, v_{y0} η οριζόντια και η κατακόρυφη ταχύτητα του τεμάχους στην αρχική θέση

g η επιτάχυνση της βαρύτητας ($= 9.81ms^{-1}$)

Επιλύοντας την σχέση 3.1 ως προς τον χρόνο t και αντικαθιστώντας στην σχέση 3.2, προκύπτει η εξίσωση της τροχιάς:

$$y_t = y_o + v_{yo} \frac{x - x_o}{v_{xo}} - \frac{1}{2}g \left(\frac{x - x_o}{v_{xo}} \right)^2 \quad (3.3)$$

3.1.2 Ολίσθηση

Κατά τη διάρκεια της ολίσθησης το τεμάχος είναι σε συνεχή επαφή με το πρανές. Για να συμβεί ολίσθηση πρέπει ο συντελεστής τριβής, μεταξύ του βραχώδους τεμάχους και του πρανούς, να είναι μικρότερος από την εφαπτομένη της γωνίας κλίσης του πρανούς. Γενικά, η ολίσθηση είναι ο επικρατέστερος τύπος κίνησης κατά την έναρξη και την λήξη της κατάπτωσης (Bozzolo and Pamini, 1986).

Η δύναμη που αναπτύσσεται στο τεμάχος από την τριβή ολίσθησης προσδιορίζεται από το νόμο του Coulomb, συναρτήσσει της κάθετης συνιστώσας του βάρους, ως εξής:

$$F_f = \mu_f mg \cos \vartheta \quad (3.4)$$

όπου:

μ_f ο συντελεστής τριβής

m η μάζα του τεμάχους

ϑ η κλίση του πρανούς

Η φορά της δύναμης F_f είναι αντίρροπη της κίνησης του τεμάχους, συνεπώς δρα υπέρ του περιορισμού της κίνησης. Οι τυπικές τιμές που λαμβάνει ο συντελεστής τριβής μ_f κυμαίνονται από 0.6 έως 1 (Bozzolo and Pamini, 1986) και εξαρτώνται από το τύπο του υλικού της επιφάνειας του πρανούς.

3.1.3 Κύλιση

Η κίνηση του τεμάχους μετατρέπεται σταδιακά σε κύλιση, όταν η κλίση του πρανούς είναι έως $\vartheta = 45^\circ$ (Ritchie, 1963). Κατά την κύλιση τα σημεία της περιφέρειας του τεμάχους περιστρέφονται όντας σε συνεχή επαφή με το πρανές. Έτσι, το κέντρο βάρους του τεμάχους μπορεί να θεωρηθεί ότι κινείται παράλληλα με την επιφάνεια του πρανούς.

Επίσης, η πιθανότητα ο τύπος της κίνησης να είναι κύλιση εξαρτάται και από το σχήμα του τεμάχους. Αυξάνεται όσο το κέντρο βάρους του τεμάχους προσεγγίζει το γεωμετρικό του κέντρο, δηλαδή μεγιστοποιείται στην περίπτωση της σφαίρας. Επίσης, εξαρτάται και από την τραχύτητα του πρανούς σε σχέση με το μέγεθος του τεμάχους. Στην συνήθη περίπτωση, που οι διαστάσεις του τεμάχους είναι σημαντικά μεγαλύτερες από τις οδοντώσεις της τραχύτητας του πρανούς, ο τύπος κίνησης είναι ένας συνδυασμός κύλισης και ολίσθησης.

Ο Statham (1976) προτείνει την χρήση του νόμου του Coulomb για την προσομοίωση και αυτής της περίπτωσης, χρησιμοποιώντας ωστόσο μια παραλλαγή του συντελεστή τριβής, τον συντελεστή τριβής-κύλισης.

$$F_f = \mu_r mg \cos \vartheta \quad (3.5)$$

όπου:

μ_r ο συντελεστής τριβής συνδυασμού κύλισης - ολίσθησης

Ο συντελεστής τριβής-κύλισης εξαρτάται από το υλικό που δομεί το βραχώδες πρανές και την σχετική τραχύτητα που αναπτύσσεται μεταξύ τους. Προσδιορίζεται από την σχέση:

$$\mu_r = \mu_o + kd^*/d \quad (3.6)$$

όπου:

μ_o ο συντελεστής τριβής του πρανούς για δυναμικές συνθήκες ($0.37 \leq \mu_o \leq 0.67$)

k εμπειρική σταθερά ($0.17 \leq k \leq 0.26$), χωρίς να δίνεται περαιτέρω περιγραφή της

d, d^* η χαρακτηριστική διάσταση των τεμαχών που δομούν το πρανές και του τεμάχους αντίστοιχα

Ενδεικτικές τιμές του συντελεστή τριβής κύλισης-ολίσθησης, που προέρχονται από ανάδρομες αναλύσεις καταπτώσεων, παρατίθενται στον πίνακα 3.1 (Azzoni and De Freitas, 1995).

Πίνακας 3.1: Ενδεικτικές τιμές συντελεστή κύλισης - ολίσθησης (Azzoni and De Freitas, 1995)

Χαρακτηριστικά πρανούς	Συντελεστής κύλισης - ολίσθησης, $\mu_o[-]$
Ασβεστολιθικό πρανές	0.4
Κορήματα και έδαφος συμπυκνωμένο	0.55
Κορήματα και έδαφος χαλαρό	0.75
Μέτρια συμπυκνωμένα κορήματα με τεμάχη βράχων	0.6
Μαλακά κορήματα ελαφρώς συμπυκνωμένα	0.6
Λάσπη	0.85
Τεχνητές επιχώσεις	0.6

3.1.4 Αναπήδηση

Η αναπήδηση είναι ιδιαίτερα δύσκολο να προσομοιωθεί καθώς επηρεάζεται από πληθώρα παραμέτρων, οι οποίες παρουσιάζουν σημαντική μεταβλητότητα. Οι παράμετροι αυτές έχουν ταξινομηθεί από τους Labiouse and Heidenreich (2009) σε τρεις βασικές κατηγορίες (Πίνακας 3.2).

Πίνακας 3.2: Παράμετροι που επηρεάζουν την αναπήδηση (Labiouse and Heidenreich, 2009)

Χαρακτηριστικά πρανούς	Χαρακτηριστικά τεμάχους	Κινηματικά χαρακτηριστικά
Αντοχή	Αντοχή	Μεταθετική ταχύτητα
Ελαστικότητα	Ελαστικότητα	Γωνιακή ταχύτητα
Τραχύτητα	Μέγεθος (μάζα)	Γωνία πρόσκρουσης
Κλίση	Σχήμα	Προσανατολισμός

Για την προσομοίωση της τροχιάς έχει επικρατήσει η χρήση των συντελεστών αναπήδησης, οι οποίοι εκφράζουν την μεταβολή των κινηματικών χαρακτηριστικών του τεμάχους εξαιτίας της κρούσης. Στην βιβλιογραφία είναι διαθέσιμοι αρκετοί ορισμοί των συντελεστών αναπήδησης, χωρίς όμως να υπάρχει συμφωνία μεταξύ των ερευνητών για το ποιος είναι καταλληλότερος για την περιγραφή της αναπήδησης (Chau et al., 2002).

Στην επόμενη ενότητα γίνεται εκτενής αναφορά στους διαθέσιμους ορισμούς των συντελεστών αναπήδησης, στις μεθόδους προσδιορισμού τους και στις τυπικές τιμές που λαμβάνουν σύμφωνα με τα αναφερόμενα στην σχετική βιβλιογραφία.

3.2 Προσομοίωση της αναπήδησης

Στην ενότητα αυτή αναφέρονται αρχικά κάποια βασικά στοιχεία από την θεωρία των κρούσεων. Έπειτα παρουσιάζονται οι διαθέσιμοι ορισμοί των συντελεστών αναπήδησης και παρατίθενται οι τιμές τους, όπως έχουν προκύψει από πειραματικές διερευνήσεις, ανάδρομες αναλύσεις ή από την εμπειρία. Στην συνέχεια γίνεται μια συγκριτική αξιολόγηση αυτών και εξετάζεται, μέσω απλών παραμετρικών αναλύσεων, η επίδραση που έχουν στον σχεδιασμό.

3.2.1 Γενικές αρχές από την θεωρία κρούσεων

Με τον όρο κρούση νοείται η αλληλεπίδραση δυο σωμάτων μεταξύ των οποίων υπάρχει σχετική κίνηση. Τα βασικά χαρακτηριστικά του φαινομένου είναι η πολύ σύντομη διάρκεια και οι ιδιαίτερα ισχυρές δυνάμεις που αναπτύσσονται.

Όταν τα σώματα έρχονται σε επαφή, ένα μέρος της αρχικής τους μηχανικής ενέργειας μετατρέπεται σε παραμόρφωση. Στην περίπτωση που δεν υπάρχουν απώλειες ενέργειας, η κρούση καλείται ελαστική και ισχύουν οι αρχές διατήρησης της ενέργειας και της ορμής. Η κρούση χαρακτηρίζεται ως πλαστική όταν μετά από την επαφή τα σώματα ενώνονται και έχουν

κοινά κινηματικά χαρακτηριστικά. Τέλος, στην ανελαστική κρούση, που αποτελεί την πλέον συνηθισμένη περίπτωση, συμβαίνει απώλεια μέρους της κινητικής ενέργειας, που μετατρέπεται σε μόνιμη παραμόρφωση, θερμότητα, ήχο κ.α.

Στις καταπτώσεις βράχων, οι κρούσεις που λαμβάνουν χώρα μπορεί να είναι είτε μεταξύ τεμάχους και πρανούς είτε μεταξύ τεμαχών. Παρόλα αυτά οι συνήθεις μέθοδοι ανάλυσης που χρησιμοποιούνται στις καταπτώσεις, αναφέρονται σε τεμάχη που αναπτύσσουν μεταξύ τους αμελητέα δυναμική αλληλεπίδραση, δηλαδή δεν μελετώνται οι κρούσεις μεταξύ των τεμαχών (Hung and Evans, 1988).

3.2.1.1 Η γενική περίπτωση της κρούσης

Στην γενική περίπτωση κρούσης ακανόνιστου τεμάχους επί κεκλιμένου πρανούς (Σχήμα 3.3), η απόκριση του τεμάχους μπορεί θεωρητικά να προσδιοριστεί χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις κίνησης της κλασικής μηχανικής, ως εξής:

$$\int_{S_c} d\vec{F} = m_b \vec{\gamma} \quad (3.7)$$

$$\int_{S_c} \vec{r} \wedge d\vec{F} = I \vec{\xi}_b \quad (3.8)$$

όπου:

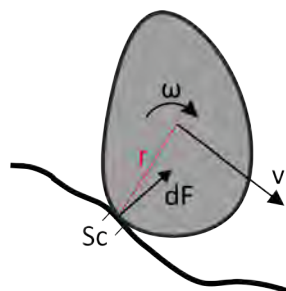
S_c η επιφάνεια επαφής

$d\vec{F}$ η δύναμη που αναπτύσσεται στην επιφάνεια επαφής

$\vec{\gamma}, \vec{\xi}_b$ η μεταθετική και γωνιακή επιτάχυνση, αντίστοιχα

\vec{r} ο μοχλοβραχίονας μεταξύ του σημείου επαφής και του κέντρου βάρους του τεμάχους

I η ροπή αδράνειας



Σχήμα 3.3: Γεωμετρία επαφής τεμάχους ακανόνιστου σχήματος σε κεκλιμένο πρανός

Η επίλυση των παραπάνω σχέσεων απαιτεί τον προσδιορισμό της αναπτυσσόμενης δύναμης F , η οποία μεταβάλλεται κατά την διάρκεια της επαφής και εξαρτάται από την μεταθετική και γωνιακή επιτάχυνση.

Η μεταθετική και η γωνιακή ταχύτητα του τεμάχους μετά την κρούση προσδιορίζονται ως εξής:

$$\vec{v}_r = \vec{v}_i + \int_{t_i}^{t_r} m_b \vec{v}_b dt \quad (3.9)$$

$$\vec{\omega}_r = \vec{\omega}_i + \int_{t_i}^{t_r} I \vec{\xi}_b dt \quad (3.10)$$

όπου:

\vec{v}_i, \vec{v}_r η μεταθετική ταχύτητα πριν και μετά την κρούση, αντίστοιχα

$\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_r$ η γωνιακή ταχύτητα πριν και μετά την κρούση, αντίστοιχα

Όμως, η ακριβής γεωμετρία του τεμάχους, της επιφάνειας πρόσκρουσης και της μεταξύ τους σχετικής θέσης είναι πρακτικώς αδύνατο να είναι εκ των προτέρων γνωστά. Έτσι, η επίλυση των παραπάνω εξισώσεων είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη, ενώ η αναλυτική λύση δεν έχει πρακτική αξία εξαιτίας των σημαντικά διαφορετικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών που συναντώνται σε μια πραγματική κατάπτωση, τόσο των τεμαχών όσο και της επιφάνειας του πρανούς.

Συνεπώς, σε κάθε μέθοδο προσομοίωσης θα εμπεριέχεται κάποια απλουστευτική παραδοχή. Εξαιτίας της έντονης μεταβλητότητας των γεωμετρικών και κινηματικών χαρακτηριστικών της πρόσκρουσης, η καλύτερη προσέγγιση επιτυγχάνεται με εφαρμογή στοχαστικών – πιθανοτικών μεθοδολογιών ανάλυσης (Lambert and Nicot, 2013).

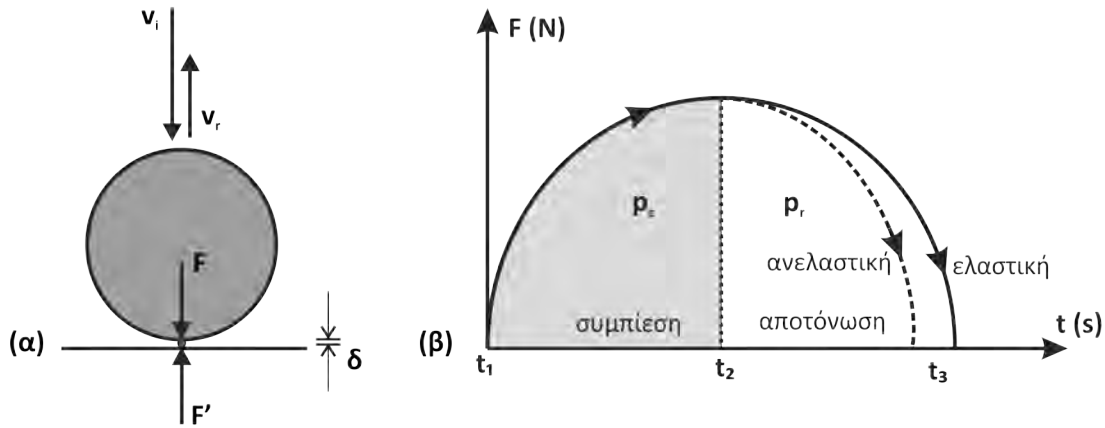
Στις επόμενες υποενότητες περιγράφονται δυο ειδικές περιπτώσεις κρούσης: η κάθετη και η εφαπτομενική. Οι περιπτώσεις αυτές χρησιμοποιούνται στην μηχανική κρούσεων για να περιγράψουν τους δυο διακριτούς μηχανισμούς που μετέχουν κατά την κάθετη και την εφαπτομενική διεύθυνση αντίστοιχα.

3.2.1.2 Η κάθετη κρούση

Σε μια κάθετη κρούση μεταξύ μιας μη-περιστρεφόμενης σφαίρας και ενός οριζόντιου επιπέδου (Σχήμα 3.4-α) αναπτύσσονται ιδιαίτερα ισχυρές δυνάμεις στην σύντομη χρονική διάρκεια που έχει η επαφή. Η θέση επαφής μπορεί να προσομοιωθεί σαν ένα δυστενές ελατήριο ή ισοδύναμα με ένα παραμορφώσιμο στοιχείο.

Κατά την διάρκεια της επαφής το στοιχείο αυτό αρχικά συμπιέζεται (φάση συμπίεσης) και στην συνέχεια απελευθερώνει την ενέργεια που συγκέντρωσε, κάνοντας το τεμάχος να αναπηδήσει (φάση αποτόνωσης). Στην φάση της συμπίεσης οι παραμορφώσεις είναι ελαστικές για ένα πολύ σύντομο χρονικό διάστημα και στην συνέχεια γίνονται πλαστικές.

Στο σχήμα 3.4-β παρουσιάζεται σχηματικά η ανάπτυξη της δύναμης F συναρτήσει του χρόνου. Το γραμμοσκιασμένο χωρίο περιγράφει την κινητική ενέργεια που καταναλώνεται κατά την επαφή και ισούται με την αναπτυσσόμενη ώθηση. Όταν ανακτάται όλη η ενέργεια που



Σχήμα 3.4: (α) Προσομοίωση της επαφής στην κεντρική κρούση και (β) αναπτυσσόμενη δύναμη στην επιφάνεια επαφής συναρτήσει της διάρκειάς της

καταναλώθηκε για την συμπίεση του ελατηρίου, η κρούση είναι ελαστική ενώ όταν ανακτάται μέρος της είναι ανελαστική.

Για την περίπτωση της κεντρικής κρούσης, το όριο μετάβασης από την ελαστική στην πλαστική παραμόρφωση μπορεί να προσδιορισθεί συναρτήσει της ταχύτητας πρόσκρουσης και των ιδιοτήτων των υλικών.

Ο Stronge (2004), επεκτείνοντας την θεωρία του Hertz, όρισε την κρίσιμη ταχύτητα, v_{yield} , πέραν της οποίας αναπτύσσονται πλαστικές παραμορφώσεις, ως εξής:

$$v_{yield}^2 = \frac{3}{5} \left(\frac{3\pi}{4} \right)^4 \left(\frac{2.2(1 - \nu^2)\sigma_{yield}}{E} \right) 1.1 \frac{\sigma_{yield}}{\rho} \quad (3.11)$$

όπου

σ_{yield} η τάση διαρροής

ν ο λόγος Poisson

ρ η πυκνότητα του υλικού

Εφαρμόζοντας την παραπάνω σχέση για τις ιδιότητες ενός τυπικού πετρώματος μέσης-υψηλής αντοχής ($\sigma_{ci} = 100MPa$, $E = 40MPa$, $\rho = 26kN/m^3$), η κρίσιμη ταχύτητα προκύπτει ίση με $v_{yield} \approx 0.1ms^{-1}$. Συνεπώς, είναι πρακτικά αδύνατο να παρατηρηθεί ελαστική κρούση στις καταπτώσεις βράχων, καθώς οι αναπτυσσόμενες ταχύτητες είναι τάξεις μεγέθους μεγαλύτερες.

Η διάρκεια, t , της κρούσης είναι (Argaei et al., 2010):

$$t = 2.94 \left(\frac{1.25\sqrt{2}\pi\rho(1 - \nu^2)}{E} \right)^{0.4} \frac{R}{(2v_i)^{0.2}} \quad (3.12)$$

3.2.1.3 Η επαπτομενική κρούση

Κατά την επαπτομενική διεύθυνση, η ταχύτητα μειώνεται εξαιτίας των αναπτυσσόμενων τριβών μεταξύ του τεμάχους και του πρανούς. Θεωρώντας την απλή περίπτωση λείων σωμάτων, η απώλεια της ταχύτητας μπορεί να περιγραφεί σύμφωνα με την θεωρία Coulomb, από τον συντελεστή τριβής μ ως συνάρτηση της ορμής του τεμάχους.

$$\mu = -\frac{\delta p_T}{\delta p_N} \quad (3.13)$$

όπου

μ ο συντελεστής τριβής

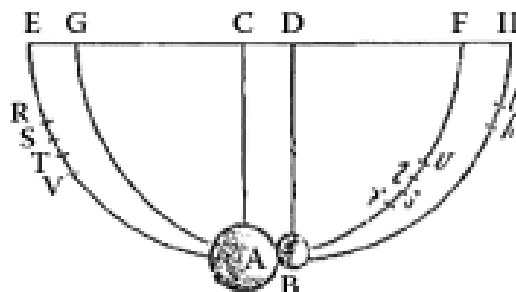
δp_N η ορμή κατά την κάθετη διεύθυνση

δp_T η ορμή κατά την επαπτομενική διεύθυνση

Θεωρώντας ότι η επαπτομενική ταχύτητα μετά την κρούση καθορίζεται από τις δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά την διάρκειά της, τότε εξισώνοντας τις ροπές ως προς το κέντρο βάρους του τεμάχους προκύπτουν δυο περιπτώσεις ανάλογα με την φορά της γωνιακής ταχύτητας (Wyllie, 2014a). Όταν το τέμαχος στρέφεται προς την διεύθυνση της κίνησης τότε αυξάνεται η γωνιακή και μειώνεται η επαπτομενική ταχύτητα μετά την κρούση. Στην περίπτωση όπου η γωνιακή ταχύτητα πριν την κρούση είναι αντίρροπη της επαπτομενικής, δύναται η επαπτομενική ταχύτητα μετά την κρούση να είναι μεγαλύτερη.

3.2.2 Η έννοια του συντελεστή αναπήδησης

Με σκοπό την πειραματική απόδειξη του τρίτου θεμελιώδους νόμου της κίνησης, ο Νεύτωνας τον 17^ο αιώνα ανήρτησε σφαίρες από ατσάλι και γυαλί σε εκκρεμή και μέτρησε το ύψος αναπήδησης μετά την κρούση (Σχήμα 3.5).



Σχήμα 3.5: Πειραματική διάταξη του Νεύτωνα (από Wyllie, 2014b)

Για να περιγράψει την απώλεια στη κίνηση εξαιτίας της κρούσης, εισήγαγε την έννοια του συντελεστή αναπήδησης (Coefficient of Restitution - COR) ως τον λόγο των σχετικών ταχυ-

τήτων μετά και πριν την κρούση των σφαιριδίων. Η μαθηματική σχέση που περιγράφει τον συντελεστή αναπήδησης (ή αποκατάστασης) στην περίπτωση της κεντρικής κρούσης δυο σωμάτων A και B, είναι:

$$COR = \frac{v_r^A - v_r^B}{v_i^A - v_i^B} \quad (3.14)$$

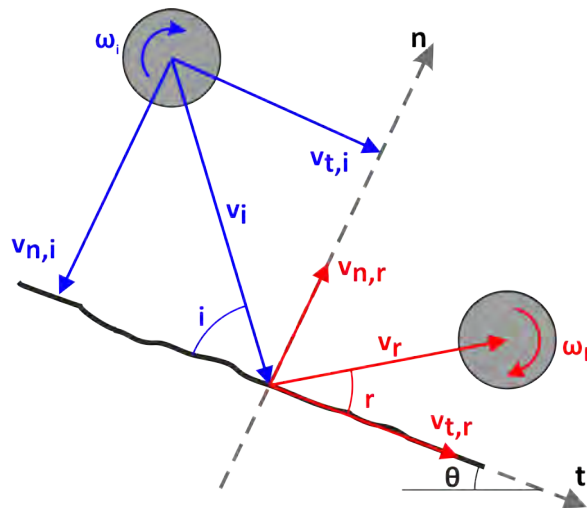
όπου:

$v_i^{A,B}$ η ταχύτητα του σώματος A ή B πριν την κρούση

$v_r^{A,B}$ η ταχύτητα του σώματος A ή B μετά την κρούση

Από την παραπάνω πειραματική διαδικασία (Σχήμα 3.5), προέκυψε συντελεστής αναπήδησης 0.56 για τις μεταλλικές σφαίρες και 0.94 για τις υάλινες. Επίσης, ο Νεύτωνας θεώρησε τον συντελεστή αναπήδησης ως ιδιότητα του υλικού.

Στις ενότητες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι διάφοροι ορισμοί για τους συντελεστές αναπήδησης που προτείνονται για την προσομοίωση των καταπτώσεων. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, συναντώνται αρκετές διαφορετικές παραλλαγές των ορισμών αυτών, χωρίς να υπάρχει συμφωνία μεταξύ των ερευνητών για το ποιος περιγράφει καλύτερα την αναπήδηση. Στο σχήμα 3.6 απεικονίζονται τα γεωμετρικά και κινηματικά στοιχεία μιας τυπικής κρούσης και τα μεγέθη που χρησιμοποιούνται στους ορισμούς των συντελεστών αναπήδησης.



Σχήμα 3.6: Μεγέθη που χρησιμοποιούνται στους ορισμούς των συντελεστών αναπήδησης

3.2.2.1 Κινηματικός συντελεστής αναπήδησης

Ο κινηματικός συντελεστής αναπήδησης (v_{COR}) αποτελεί τον απλούστερο ορισμό και προέρχεται από την σχέση 3.14. Στις καταπτώσεις βράχων η κρούση συμβαίνει μεταξύ του τεμάχους και του πρανούς, που έχει μηδενική ταχύτητα. Συνεπώς, μετά από απλοποίηση της

σχέσης 3.14, ο κινηματικός συντελεστής αναπήδησης ορίζεται ως:

$$v_{COR} = \frac{v_r}{v_i} \quad (3.15)$$

όπου:

v_i η ταχύτητα του τεμάχους πριν την κρούση

v_r η ταχύτητα του τεμάχους μετά την κρούση

Σε κάθε περίπτωση, η ταχύτητα κίνησης του τεμάχους μετά την κρούση θα πρέπει να είναι μικρότερη ή ίση με την ταχύτητα πρόσκρουσης, αφού στην αντίθετη περίπτωση θα υπήρχε προσθήκη ενέργειας στο σύστημα. Συνεπώς, ο κινηματικός συντελεστής αναπήδησης έχει πεδίο ορισμού το διάστημα 0 έως 1.

Συντελεστής αναπήδησης ίσος με τη μονάδα περιγράφει μια πλήρως ελαστική κρούση, δηλαδή χωρίς την απώλεια ενέργειας. Ένας συντελεστής μικρότερος από τη μονάδα ορίζει μια ανελαστική κρούση, όπου υπάρχει κάποιο ποσοστό απώλειας της κίνησης. Τέλος, μηδενικός συντελεστής αναπήδησης αντιστοιχεί σε μια πλήρως πλαστική συμπεριφορά, όπου τα δυο σώματα ενώνονται και συμπεριφέρονται ως ένα (Goldsmith, 1960). Ένα παράδειγμα πλαστικής κρούσης στις καταπτώσεις βράχων είναι η έμπηξη του τεμάχους στο πρανές, που μπορεί να συμβεί αν το πρανές δομείται από εδαφικό υλικό χαμηλής αντοχής.

Στην περίπτωση όπου το τέμαχος εκτελεί ελεύθερη πτώση, η σχέση 3.15 λαμβάνει την μορφή:

$$v_{COR} = \left(\frac{h_r}{h_i} \right)^2 \quad (3.16)$$

όπου:

h_i το ύψος απελευθέρωσης

h_r το μέγιστο ύψος μετά την κρούση

Η έκφραση αυτή είναι χρήσιμη στην ανάλυση των πειραματικών διερευνήσεων, καθώς ο προσδιορισμός του ύψους αναπήδησης είναι ευκολότερος συγκριτικά με τον προσδιορισμό των ταχυτήτων κίνησης του τεμάχους.

3.2.2.2 Κάθετος και εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης

Ο διαχωρισμός του κινηματικού συντελεστή αναπήδησης σε κάθετο και εφαπτομενικό έχει προταθεί για να περιγράψει τους διαφορετικούς μηχανισμούς που συμμετέχουν στον περιορισμό της κίνησης (ενότητες 3.2.1.2 και 3.2.1.3). Στην κάθετη σε σχέση με το πρανές διεύθυνση, η απώλεια της κίνησης οφείλεται στην παραμόρφωση των σωμάτων και στην διάδοση των ελαστικών κυμάτων. Στην εφαπτομενική διεύθυνση η απώλεια κίνησης αποδίδεται στην

αναπτυσσόμενη τριβή μεταξύ των σωμάτων. Οι ορισμοί τους έχουν ως εξής:

$$n_{COR} = -\frac{v_{n,r}}{v_{n,i}} \quad (3.17)$$

και

$$t_{COR} = \frac{v_{t,r}}{v_{t,i}} \quad (3.18)$$

όπου:

v_n η κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας σε σχέση με την επιφάνεια του πρανούς

v_t η εφαπτομενική συνιστώσα της ταχύτητας του τεμάχους σε σχέση με την επιφάνεια του πρανούς

i, r δείκτες, περιγράφουν την φάση πριν και μετά την κρούση αντίστοιχα

Ο κάθετος και ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης αποτελούν τον πιο διαδεδομένο τρόπο προσομοίωσης της αναπήδησης, τόσο σε ερευνητικό όσο και σε πρακτικό επίπεδο. Η πλειοψηφία των τιμών που προτείνονται για τους συντελεστές αναπήδησης (βλ. ενότητα 3.2.4) καθώς και των λογισμικών ανάλυσης καταπτώσεων (βλ. ενότητα 3.2.5) βασίζονται στους εν λόγω ορισμούς.

3.2.2.3 Ενεργειακός συντελεστής αναπήδησης

Ο ενεργειακός συντελεστής αναπήδησης (Total Energy - TE_{COR}) ορίζεται με βάση την κινητική ενέργεια του τεμάχους. Το βασικό πλεονέκτημα ότι συνεκτιμά και την γωνιακή ταχύτητα που αναπτύσσει το τέμαχος. Ο ορισμός έχει ως εξής:

$$TE_{COR} = \frac{KE_r}{KE_i} = \frac{0.5mv_r^2 + 0.5I\omega_r^2}{0.5mv_i^2 + 0.5I\omega_i^2} \quad (3.19)$$

όπου:

KE η κινητική ενέργεια του τεμάχους

m η μάζα του τεμάχους

v η μεταθετική ταχύτητα

ω η γωνιακή ταχύτητα

I η ροπή αδρανείας του τεμάχους

i, r δείκτες, περιγράφουν την φάση πριν και μετά την κρούση αντίστοιχα

Ωστόσο, στις περισσότερες δημοσιεύσεις που συναντώνται στην διεθνή βιβλιογραφία, το σκέλος της κινητικής ενέργειας που αφορά στην περιστροφική ενέργεια αμελείται, κυρίως λόγω της δυσκολίας προσδιορισμού της γωνιακής ταχύτητας. Έτσι, στην παρούσα εργασία,

όταν δεν λογίζεται η γωνιακή ταχύτητα ο ενεργειακός συντελεστής αναπήδησης συμβολίζεται ως (E_{COR}) και προσδιορίζεται βάσει μόνο της μεταθετικής ταχύτητας, ως εξής:

$$E_{COR} = \frac{KE_{trans,r}}{KE_{trans,i}} = \frac{0.5mv_r^2}{0.5mv_i^2} \quad (3.20)$$

Επειδή στην συνήθη περίπτωση δεν επέρχεται θραύση του τεμάχους κατά την κρούση, η μάζα του παραμένει αμετάβλητη. Έτσι, ο ενεργειακός συντελεστής αναπήδησης απλοποιείται λαμβάνοντας την μορφή:

$$E_{COR} = \frac{v_r^2}{v_i^2} \quad (3.21)$$

Επίσης, στην βιβλιογραφία συναντάται η σχέση 3.21 εκφρασμένη ως προς την κάθετη και την εφαπτομενική συνιστώσα της μεταθετικής ενέργειας σε σχέση με το πρηνές, κατ' αντιστοιχία με τον κάθετο και τον εφαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης.

$$E_{COR,n} = \frac{v_{r,n}^2}{v_{i,n}^2} \quad (3.22)$$

και

$$E_{COR,t} = \frac{v_{r,t}^2}{v_{i,t}^2} \quad (3.23)$$

3.2.2.4 Κινητικός συντελεστής αναπήδησης

Ο κινητικός συντελεστής αναπήδησης (I_{COR}) προτάθηκε από τον Poisson το 1811 για να περιγράψει την απόκριση του τεμάχους στην κρούση, ως ο λόγος του παραγόμενου έργου κατά την φάση της αποτόνωσης προς το έργο κατά την φάση της συμπίεσης (Σχήμα 3.4-β).

$$I_{COR} = \frac{\int_{t_2}^{t_3} F_n(t) dt}{\int_{t_1}^{t_2} F_n(t) dt} \quad (3.24)$$

Αν και ο ορισμός αυτός είναι ιδιαίτερα διαδεδομένος στην μηχανική των κρούσεων, έχει χρησιμοποιηθεί ελάχιστα στην προσομοίωση των καταπτώσεων και συγκεκριμένα μόνο από τους Descoeudres and Zimmermann (1987), Bozzolo et al. (1988) και προσφάτως από τον Wyllie (2014a)

3.2.3 Προσδιορισμός συντελεστών αναπήδησης

Οι συντελεστές αναπήδησης αποτελούν την πιο κρίσιμη παράμετρο για την προσομοίωση της τροχιάς. Καθορίζουν την ταχύτητα, την κινητική ενέργεια και το ύψος κίνησης του τεμάχους. Στα χαρακτηριστικά αυτά βασίζεται η εκτίμηση της επικινδυνότητας μια περιοχής και η διαστασιολόγηση των μέτρων αντιμετώπισης. Συνεπώς, η αξιοπιστία οποιασδήποτε ανά-

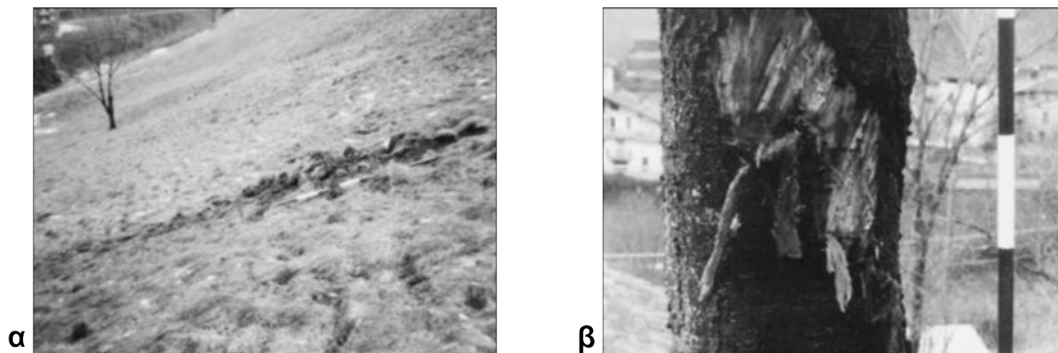
λυσης καταπτώσεων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την σωστή παραμετροποίηση αυτής, που συμπεριλαμβάνει και την ορθολογική εκτίμηση των συντελεστών αναπήδησης. Βάσει των ανωτέρω, είναι απαραίτητη η παρατήρηση και η μελέτη του φαινομένου με σκοπό τον προσδιορισμό των παραμέτρων που επιδρούν στους συντελεστές αναπήδησης. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την μελέτη του φαινομένου είναι:

- οι ανάδρομες αναλύσεις πραγματικών καταπτώσεων
- οι επιτόπου δοκιμές
- οι εργαστηριακές δοκιμές υπό κλίμακα

3.2.3.1 Ανάδρομες αναλύσεις πραγματικών καταπτώσεων

Μετά την πραγματοποίηση φυσικών καταπτώσεων, γίνεται εκτίμηση των τροχιών που διέγραψαν τα τεμάχια συλλέγοντας στοιχεία από επιτόπου έρευνα, όπως:

- τα ίχνη από τις κρούσεις στο πρηνές, σε κορμούς δένδρων ή σε κατασκευές (Σχήμα 3.7)
- την θέση έναρξης, δηλαδή του σημείου που έγινε η αποκόλληση του τεμαχίου
- την θέση κατάληξης, που μπορεί να είναι κατά μήκος του πρηνούς ή στον πόδα του
- το πλήθος, το μέγεθος και το σχήμα των τεμαχίων



Σχήμα 3.7: Στοιχεία από επιτόπου έρευνα για την διενέργεια ανάδρομων αναλύσεων: (α) ίχνη από κρούσεις στο πρηνές και (β) σε κορμό δένδρου (Paronuzzi, 2009)

Τα στοιχεία αυτά χρησιμοποιούνται για την ανακατασκευή της τροχιάς, βάσει της οποίας μπορούν να εκτιμηθούν η αναπτυσσόμενη ταχύτητα, το ύψος κίνησης σε σχέση με το πρηνές κ.α. Έτσι προσδιορίζονται οι συντελεστές αναπήδησης καθώς και άλλα στοιχεία που συμβάλλουν στην κατανόηση του φαινομένου όπως π.χ. η πλευρική εκτροπή (Lied, 1977; Evans and Hung, 1993; Paronuzzi, 2009; Vijayakumar et al., 2012, κ.α.).

Οι παρατηρήσεις αυτές είναι ιδιαίτερα χρήσιμες για τη ορθή βαθμονόμηση των λογισμικών ανάλυσης καταπτώσεων για την μελέτη της εν λόγω περιοχής ή άλλων με αντίστοιχα χαρακτηριστικά (Jaboyedoff et al., 2005). Η φυσική ανομοιογένεια κάθε θέσης, τόσο γεωλογικά

όσο και γεωμορφολογικά, καθορίζει σημαντικά την τροχιά. Έτσι, ως μέθοδος έρευνας υστερεί καθώς δεν επιτρέπει την παραμετρική διερεύνηση και κατ' επέκταση την εξαγωγή στατιστικώς σημαντικών συμπερασμάτων.

Ανάδρομες αναλύσεις περιστατικών που έχουν συμβεί στον Ελληνικό χώρο έχουν πραγματοποιηθεί για καταπτώσεις: στο Άργος (Sofianos et al., 1988), στην Σαντορίνη (Antonioni and Lekkas, 2010), στην Μονεμβάσια (Saroglou et al., 2012) και στη Δυτική Ελλάδα για το Σαντομέρι, την Κλόκοβα, την κατάπτωση από τον σεισμό του 2003 της Λευκάδας και για τα χωριά Πλατάνια και Μύλοι (Sabatakakis et al., 2015).

3.2.3.2 Επιτόπου δοκιμές καταπτώσεων

Οι επιτόπου δοκιμές ή δοκιμές πεδίου (*field tests*) παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για την μελέτη του φαινομένου και την αξιολόγηση των παραμέτρων που επιδρούν στην τροχιά. Στις δοκιμές αυτές, το τεμάχος απελευθερώνεται από την κορυφή ενός πρανούς και η κίνησή του καταγράφεται από φωτομηχανές. Στην συνέχεια αναλύονται τα καταγεγραμμένα στιγμιότυπα, προσδιορίζοντας την ταχύτητα του τεμάχους, το ύψος κίνησης και τέλος υπολογίζονται οι συντελεστές αναπήδησης.

Οι συντελεστές αναπήδησης που προκύπτουν από επιτόπου δοκιμές θεωρούνται ως οι πλέον αντιπροσωπευτικοί για την θέση που μελετάται, αφού πρόκειται για πιστή αναπαράσταση του φαινομένου. Ωστόσο, έχουν μεγάλο κόστος, είναι ιδιαίτερα χρονοβόρες και επικίνδυνες. Επίσης, δεν είναι κατάλληλες για τη στατιστική και παραμετρική ανάλυση, εξαιτίας της επίδρασης των επιτόπου χαρακτηριστικών (γεωμετρία πρανούς, σχήμα τεμαχών κ.α.).

Σύμφωνα με τον Ragnozzi (2009) οι περισσότερες διερευνήσεις που παρουσιάζονται στην βιβλιογραφία έχουν γίνει σε ανενεργά λατομεία, όπου τα πρανά είναι διαμορφωμένα με βαθμίδες και οι επιφάνειες τους είναι σχετικά λείες. Επίσης τα τεμάχη είναι σχετικά ομοιόμορφα καθώς προέρχονται από τις εργασίες εξόρυξης και είναι από το ίδιο υλικό που δομεί το πρανός. Συνεπώς οι συνθήκες των δοκιμών πεδίου αποκλίνουν από τις πραγματικές συνθήκες μιας κατάπτωσης, γεγονός που καθιστά προβληματική την γενίκευση των συμπερασμάτων τους.

Παρόλα αυτά, έχει εκτελεστεί πλήθος επιτόπου δοκιμών, από τις οποίες ενδεικτικά αναφέρονται κάποιες από τις σημαντικότερες: (Ritchie, 1963; Lied, 1977; Broili, 1977; Statham, 1976; Wu, 1985; Bozzolo et al., 1988; Pfeiffer and Bowen, 1989; Fornaro et al., 1990; Kobayashi et al., 1990; Azzoni et al., 1992; Evans and Hungr, 1993; Azzoni and De Freitas, 1995; Spadari et al., 2012; Ferrari et al., 2013).

Η πληρέστερη διερεύνηση καταπτώσεων βράχων με επιτόπου δοκιμές θεωρείται αυτή που εκπονήθηκε από την ISMES στην Ιταλία, μεταξύ του 1989 και 1991 (Azzoni et al., 1992). Μελετήθηκαν πρανά διαφόρων γεωλογικών και γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών, επιτρέποντας την ανάλυση της επιρροής των παραμέτρων του τεμάχους (μέγεθος, σχήμα, μηχανικά χαρακτηριστικά) και του πρανούς (γεωλογική σύσταση, μορφολογία) στην διαγραφείσα τροχιά. Οι δοκιμές έγιναν σε λατομεία χαλαζίτη, γνευσίου, ασβεστόλιθου καθώς και σε ένα φυσικό

πρανές που αποτελείτο από βραχώδες υπόβαθρο στο ανώτερα τμήμα του, αποσαθρωμένο βράχο στο μέσο και κορήματα στον πόδα του.

3.2.3.3 Εργαστηριακές δοκιμές καταπτώσεων

Οι δοκιμές που εκτελούνται κάτω από τις ελεγχόμενες συνθήκες του εργαστηρίου, προσφέρουν σημαντικές πληροφορίες για την κατανόηση των μηχανισμών που επηρεάζουν την κρούση και για τον προσδιορισμό των παραμέτρων που τους ελέγχουν. Ωστόσο επειδή γίνονται υπό κλίμακα, η αναγωγή των αποτελεσμάτων στις πραγματικές διαστάσεις δεν είναι απλή, λόγω της δυσκολίας συσχετισμού τους με τις παραμέτρους που υπεισέρχονται στην δυναμική διαδικασία (Labieuse and Descoedres, 1999).

Βασισμένος σε μικρής κλίμακας διερεύνηση, ο Campronuono (1977) τονίζει ότι ενώ είναι εφικτό να συσχετισθούν τα στατικά χαρακτηριστικά των υλικών (παραμορφωσιμότητα, αντοχή, πυκνότητα, στατική γωνία τριβής) με το ομοίωμα ανεξαρτήτως του μεγέθους του, ο συσχετισμός με τα δυναμικά χαρακτηριστικά (συντελεστής αναπήδησης, αντοχή στην κρούση, δυναμική γωνία τριβής) δεν είναι προφανής. Για παράδειγμα, αναφέρει ότι σε δοκιμή υπό κλίμακα, που επαληθεύει την γεωμετρική ομοιότητα, η αναπήδηση ήταν αρκετά μικρότερη από εκείνη που παρατηρήθηκε στην πλήρους κλίμακας δοκιμή.

Ενδεικτικά, διερευνήσεις στο εργαστήριο έχουν γίνει από τους: Campronuono (1977), Statham (1979), Murata and Shibuya (1997), Kawahara and Muro (1999), Wong et al. (1999), Ushiro et al. (2000), Kamijo et al. (2000), and Chau et al. (2002).

3.2.4 Τιμές συντελεστών αναπήδησης

Η συντριπτική πλειοψηφία των λογισμικών προσομοίωσης χρησιμοποιεί τους συντελεστές αναπήδησης για την περιγραφή της κρούσης. Έτσι ο μηχανικός, χρήστης του προγράμματος, καλείται να εκτιμήσει τις τιμές των συντελεστών βάσει των εκάστοτε δεδομένων. Στην πράξη έχει επικρατήσει η επιλογή των συντελεστών να γίνεται συναρτήσεως του είδους του υλικού που δομεί το πρανές από τις προτεινόμενες τιμές που παρέχονται από τους δημιουργούς των λογισμικών. Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται οι τιμές αυτές, όπως δίνονται από τα δυο πιο διαδεδομένα λογισμικά καταπτώσεων.

Πίνακας 3.3: Προτεινόμενες τιμές καθέτου και εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης (Hoek, 1987)

Υλικό πρανούς	Συντελεστής Αναπήδησης	
	$n_{COR}[-]$	$t_{COR}[-]$
Άσφαλτος	0.40	0.95
Βραχώδεις εμφανίσεις	0.35	0.85
Σκληρός βράχος	0.53	0.99
Έδαφος με βλάστηση	0.30	0.82
Κορήματα	0.32	0.82
Κορήματα με βλάστηση	0.32	0.80

Οι τιμές του πίνακα 3.3 έχουν προταθεί από τον Hoek (1987) και προέρχονται από την εμπειρία του σε έργα καταπτώσεων. Αυτούσιες, με τυπική απόκλιση ± 0.04 , έχουν υιοθετηθεί από το πλέον διαδεδομένο λογισμικό ανάλυσης καταπτώσεων: το RocFall της εταιρείας RocScience.

Αντίστοιχες τιμές προτείνονται στο λογισμικό CRSP (Colorado Rockfall Simulation Program) από τους Pfeiffer and Bowen (1989). Οι τιμές αυτές (Πίνακας 3.4) πρόεκυψαν από ανάδρομες αναλύσεις καταπτώσεων που συνέβησαν στο Glenwood Canyon των Η.Π.Α.

Πίνακας 3.4: Προτεινόμενες τιμές καθέτου και εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης (Pfeiffer and Bowen, 1989)

Υλικό πρανούς	Συντελεστής Αναπήδησης	
	$n_{COR}[-]$	$t_{COR}[-]$
Σκληρή επιφάνεια βράχου	0.37-0.42	0.87-0.92
Κροκάλες με λίγο έδαφος ή βλάστηση	0.33-0.37	0.83-0.87
Κορήματα με λίγη βλάστηση	0.30-0.33	0.83-0.87
Κορήματα με μερική βλάστηση	0.30-0.33	0.80-0.83
Μαλακό έδαφος με λίγη βλάστηση	0.28-0.32	0.80-0.83
Έδαφος με βλάστηση	0.28-0.32	0.78-0.82

Παρατηρείται ότι οι προτεινόμενες τιμές από τα δυο λογισμικά είναι παρόμοιες. Επίσης, η συσχέτιση των συντελεστών αναπήδησης με το είδος του υλικού είναι και στις δυο περιπτώσεις ιδιαίτερα γενική. Η συμπεριφορά που μπορεί να έχει ένας βραχώδης σχηματισμός εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τα μηχανικά του χαρακτηριστικά. Ενδεικτικά, ο χαρακτηρισμός «σκληρός βράχος» μπορεί να περιγράψει εξίσου μια σκληρή μάργα ή έναν γρανίτη. Παρόλα αυτά είναι γνωστό ότι η συμπεριφορά των δύο εμφανίζει σαφέστατη διαφοροποίηση, η οποία δεν αντικατοπτρίζεται στο εύρος των προτεινόμενων τιμών του καθέτου συντελεστή αναπήδησης. Επίσης, η διακύμανση του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης είναι ιδιαίτερα μικρή, ανεξαρτήτως του είδους του υλικού.

Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται, ταξινομημένες βάσει του εκάστοτε ορισμού, οι τιμές των συντελεστών αναπήδησης που συναντώνται στη βιβλιογραφία και αναφέρονται ορισμένα χαρακτηριστικά για το είδος της διερεύνησης από την οποία προέκυψαν.

3.2.4.1 Τιμές κινηματικού συντελεστή αναπήδησης

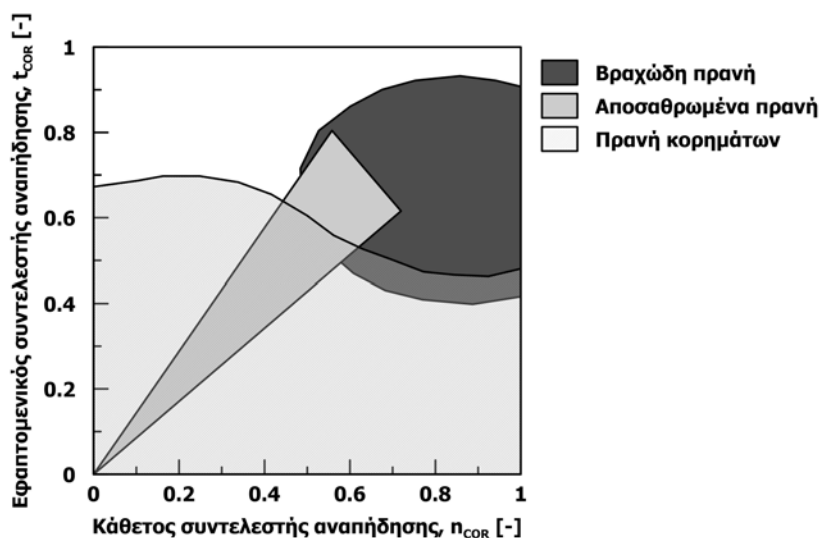
Οι τιμές του κινηματικού συντελεστή αναπήδησης που συναντώνται στην βιβλιογραφία παρουσιάζονται στον πίνακα 3.5. Από τις τιμές αυτές προκύπτει ότι τα συμπαγή βραχώδη υλικά έχουν σημαντικά μεγαλύτερες τιμές κινηματικού συντελεστή αναπήδησης σε σχέση με τα εδαφικά υλικά. Τα τελευταία εμφανίζουν αυξημένη παραμόρφωση συγκριτικά με έναν συμπαγή βράχο, αφού υπάρχει μερική διείσδυση του τεμάχους στο πρανές (σχηματισμός κρατήρα).

Πίνακας 3.5: Τιμές κινηματικού συντελεστή αναπήδησης

Τύπος υλικού	$v_{COR}[-]$	Παρατηρήσεις
Σκληρός βράχος	0.75-0.80	Habib (1977)
Σκληρός βράχος	0.50-0.60	από εμπειρία στην Ιταλία από εμπειρία στη Νορβηγία
Εδαφικό πρανές	0.20-0.35	Broili (1977)
Βραχώδες πρανές	0.75-0.80	δοκιμές πεδίου
Βράχος	0.95	
Χαλίκια (στρώση 35cm)	0.55	
Χαλίκια (στρώση 70cm)	0.45	Heierli (1985) δοκιμές πεδίου (από Heidenreich (2004))
Κορήματα	0.45	
Τέμαχος 800kg σε σκληρή επιφάνεια	0.1	
Εδαφικό πρανές	0.4	Descouedres and Zimmermann (1987)
Βραχώδες πρανές	0.85	ανάδρομες αναλύσεις
Πρανές με κορήματα	0.32-0.65	Azzoni and De Freitas (1995)
Βραχώδες πρανές	0.51-0.92	δοκιμές πεδίου
Μεταλλική σφαίρα σε βραχώδεις επιφάνειες	0.33-0.77	Rayudu (1997) εργαστηριακές δοκιμές
Σφαίρες γρανίτη $d = 1m$	0.77-0.89	Durda et al. (2011) πείραμα όπως του Νεύτωνα
Βασάλτης	0.33	
Γρανίτης	0.42	
Ψαμμίτης	0.29	Ansari et al. (2015)
Ασβεστόλιθος	0.41	εργαστηριακές δοκιμές
Μάρμαρο	0.43	

3.2.4.2 Τιμές καθέτου και εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης

Οι Fornaro et al. (1990) συγκέντρωσαν τις διαθέσιμες τιμές του καθέτου και εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης που προέρχονταν από δοκιμές πεδίου και από ανάδρομες αναλύσεις. Οι τιμές κατηγοριοποιήθηκαν ανάλογα με τον τύπο του υλικού που δομεί το πρανές και κατάρτισαν το νομογράφημα που παρουσιάζεται στο σχήμα 3.8. Ωστόσο, τα χωρία που αντιστοιχούν σε πρανή με παρόμοια σύσταση έχουν μεγάλο εύρος.



Σχήμα 3.8: Καθέτος και εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης βάσει της σύστασης του πρανούς (Fornaro et al., 1990)

Στον πίνακα 3.6 παρουσιάζονται τιμές των συντελεστών που συναντώνται στην βιβλιογραφία και έχουν προέλθει από πειραματικές διερευνήσεις (στο εργαστήριο ή στο πεδίο) και από ανάδρομες αναλύσεις.

Σε αρκετές δημοσιεύσεις τίθεται ως πεδίο ορισμού των τιμών του καθέτου συντελεστή αναπήδησης το διάστημα 0 έως 1 και έχει συμπεριληφθεί επίσης στα λογισμικά ανάλυσης καταπτώσεων, μη επιτρέποντας την χρήση τιμών μεγαλύτερων της μονάδας. Παρατηρείται όμως, ειδικά τα τελευταία χρόνια, ότι αναφέρονται τιμές που είναι μεγαλύτερες της μονάδας (Πίνακας 3.6). Οι τιμές αυτές προέρχονται τόσο από πειραματικές διερευνήσεις (Spadari et al., 2012; Giacomini et al., 2012; Ferrari et al., 2013) όσο και από ανάδρομες αναλύσεις (Paronuzzi, 2009).

Σε κάθε περίπτωση οφείλει να υπάρχει απώλεια ενέργειας κατά την κρούση. Τιμή του καθέτου συντελεστή αναπήδησης μεγαλύτερη της μονάδας δεν συνεπάγεται ότι η ενέργεια αυξάνεται. Σύμφωνα με τους Ferrari et al. (2013), μετά από επιτόπου δοκιμές σε πρανές κορημάτων στην βόρεια Ιταλία, ο κινηματικός συντελεστής αναπήδησης ήταν σε όλες τις δοκιμές που εκτέλεσαν μικρότερος της μονάδας, ωστόσο ο μέσος όρος του καθέτου συντελεστή αναπήδησης ήταν 1.78. Επίσης, παρατήρησαν ότι η διασπορά των τιμών του καθέτου συντελεστή αναπήδησης ήταν σημαντικά μεγαλύτερη από αυτήν που συναντάται στην βιβλιογραφία.

Οι τιμές που υπερβαίνουν την μονάδα, αποδίδονται στον συνδυασμό των ακόλουθων συνθηκών: η γωνία πρόσκρουσης να είναι μικρή ($> 20^\circ$), η κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας να είναι περιορισμένη ($> 10\text{ms}^{-1}$), το σχήμα του τεμάχους να είναι ακανόνιστο και να έχει γωνιακή ταχύτητα. Περισσότερες λεπτομέρειες για τον μηχανισμό που προκαλεί την συμπεριφορά αυτή δίνονται στην ενότητα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης.

Πίνακας 3.6: Τιμές καθέτου και εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης

Τύπος υλικού	$n_{COR}[-]$	$t_{COR}[-]$	Παρατηρήσεις
Συμπαγής βράχος	0.80-0.90	0.65-0.75	Piteau and Clayton (1977)
Κορήματα με μεγάλα τεμάχια	0.50-0.80	0.45-0.65	
Συμπαγή κορήματα με μικρά τεμάχια	0.40-0.50	0.35-0.45	
Πρανή με φυτοκάλυψη	0.20-0.40	0.20-0.30	
τέμαχος βράχου σε επιφάνεια βράχου και ξύλου	0.20-0.80	0.50-0.75	Wu (1985) δοκιμές μικρής κλίμακας στο πεδίο
Δολομιτικός ασβεστόλιθος	0.05-0.35	0.5-1.00	Urciuoli (1988) δοκιμές πεδίου
Κορήματα	0	0.24	
Βράχος	0.5	0.95	Giani (1992) δοκιμές πεδίου
Βράχος με ογκόλιθους	0.35	0.85	
Κορήματα	0.3	0.7	
Έδαφος με βλάστηση	0.25	0.55	
Χαλαζίτης	0.45	0.45	Azzoni et al. (1992) δοκιμές πεδίου
Αποσαθρωμένος χαλαζίτης	0.3	0.66	
Ασβεστόλιθος	0.62	0.66	
Κορήματα	1.22	0.8	
Μικρά τεμάχια σε καθαρό βράχο	0.9	0.9	Evans and Hungr (1993) δοκιμές πεδίου
Μεγάλα τεμάχια σε κορήματα	0.7	0.8	
Δολομίτης	0.2	0.53	Budetta and Santo (1994) ανάδρομες αναλύσεις
Πρανές ασβεστόλιθου	0.315	0.712	Robotham et al. (1995) δοκιμές πεδίου
Τεμάχια ασβεστόλιθου με μερική φυτοκάλυψη	0.303	0.613	
Κορήματα με φυτοκάλυψη πρανές	0.251	0.489	
Επιφάνεια βράχου	0.197	0.91	Chau et al. (1998) δοκιμές εργαστηρίου
Εδαφική επιφάνεια	0.29	0.567	
Επιφάνεια από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα	0.263	0.737	
Τέμαχος 220kg σε σκληρή επιφάνεια	0.10-0.35	-	Kamijo et al. (2000) δοκιμές ελ. πτώσης
Τέμαχος 800kg σε σκληρή επιφάνεια	0.1	-	
Λεία και στρωσιγενής επιφάνεια	0.60-1.00	0.9-1.00	C. Jones et al. (2000) ανάδρομες αναλύσεις με το λογισμικό CRSP v.4
Βράχος και ογκόλιθοι	0.15-0.30	0.75-0.95	
Κορήματα και πλαγιές με έδαφος	0.12-0.20	0.65-0.95	
Πλαγιές με χαλαρό έδαφος	0.10-0.20	0.50-0.80	

Συνεχίζεται στην επόμενη σελίδα

Πίνακας 3.6 - Συνέχεια από την προηγούμενη σελίδα

Τύπος υλικού	$n_{COR}[-]$	$t_{COR}[-]$	Παρατηρήσεις
Οφιόλιθος, $\vartheta = 27.5^\circ$	0.48	0.79	Giani et al. (2004)
Αποσαθρωμένος γρανίτης, $\vartheta = 36^\circ$	0.25	0.47	δοκιμές πεδίου
Ελαφρόπετρα, $\alpha_i = 25^\circ$	0.15	0.20-0.80	Cagnoli and Manga (2003)
Ελαφρόπετρα, $\alpha_i = 80^\circ$	0.8	0.60-0.95	δοκιμές εργαστηρίου
Πρανές $\vartheta = 38^\circ$ με δασοκάλυψη	0.77	0.36	Dorren et al. (2005)
Πρανές $\vartheta = 38^\circ$ χωρίς κάλυψη	0.7	0.26	δοκιμές πεδίου
Ανδειςίτες	0.46	0.71	Topal et al. (2006) ανάδρομες αναλύσεις
Έδαφος και κορήματα	0.6-2.77	0.69-0.86	Paronuzzi (2009) ανάδρομες αναλύσεις
Τσιμέντο	0.36-1.36	0.78-0.86	
Χάλικες	0.95	0.79	
Τεμάχη σκυροδέματος σε στρώσεις άμμου	0.01-0.26	0.07-1.00	Labiouse and Heidenreich (2009) δοκιμές εργαστηρίου
Ασβεστόλιθος	0.3-0.7	0.6-0.95	Σαρόγλου et al. (2010) ανάδρομες αναλύσεις
Αλκαλικός βασάλτης	1.06	0.74	Spadari et al. (2012) δοκιμές πεδίου
Χαλαζιακός ψαμμίτης	1.15	0.73	
Ψαμμίτης	1.18	0.78	
Ασβεστόλιθος	0.46	0.83	Saroglou et al. (2012) ανάδρομες αναλύσεις
Ψαμμίτης	0.61-1.14	0.40-0.83	Giacomini et al. (2012) δοκιμές πεδίου
Ιλυόλιθος	0.59-0.93	0.52-0.83	
Κορήματα	0.11-0.22	0.40-0.80	
Γαιάνθρακας	0.41	0.64	
Κορήματα	1.78	0.55-0.80	Ferrari et al. (2013) δοκιμές πεδίου
Βασάλτης	0.35	0.85	Ansari et al. (2014) ανάδρομες αναλύσεις
Ασβεστόλιθος	0.47-0.51	0.85-0.92	Sabatakakis et al. (2015) ανάδρομες αναλύσεις
Ασβεστόλιθος με εδαφική επικάλυψη	0.30-0.32	0.70-0.72	

3.2.4.3 Τιμές ενεργειακού συντελεστή αναπήδησης

Οι τιμές που συναντώνται στην βιβλιογραφία για τον ενεργειακό συντελεστή αναπήδησης παρουσιάζονται στον πίνακα 3.7. Γίνεται η διάκριση τους ανάλογα με το αν έχει ληφθεί υπόψη η γωνιακή ταχύτητα του τεμάχους ή όχι, που συμβολίζονται ως TE_{COR} και E_{COR} αντίστοιχα.

Πίνακας 3.7: Τιμές ενεργειακού συντελεστή αναπήδησης

Τύπος υλικού	$TE_{COR}[-]$	$E_{COR}[-]$	Παρατηρήσεις
Βράχος		0.9	
Χαλίκια (στρώση 35cm)		0.3	Heierli (1985) δοκιμές πεδίου
Χαλίκια (στρώση 70cm)		0.2	(από Heidenreich (2004))
Κορήματα		0.2	
Βράχος ($\vartheta = 44^\circ$)	0.7		Bozzolo et al. (1988)
Κορήματα ($\vartheta = 57^\circ$)	0.55		δοκιμές πεδίου
Ασβεστόλιθος		0.02-1.00	Urcioli (1988)
Ασβεστόλιθος	0.75-0.90		
Κορήματα και έδαφος συμπακνωμένο	0.55-0.60		
Κορήματα και έδαφος χαλαρό	0.35-0.40		
Μέτρια συμπακνωμένα κορήματα με τεμάχη βράχων	0.45-0.50		Azzoni and De Freitas (1995)
Μέτρια συμπακνωμένα κορήματα με κλαδιά δένδρων	0.40-0.50		ανάδρομες αναλύσεις
Κορήματα με θραύσματα βράχων	0.55-0.70		
Έδαφος με φυτοκάλυψη	0.50-0.60		
Τάφος με λάσπη	<0.20		
Τεχνητά συμπακνωμένο έδαφος	0.50-0.65		
Άσφαλτος	0.75		
Βράχος	0.51-0.92		Azzoni and De Freitas (1995)
Κορήματα	0.32-0.65		δοκιμές πεδίου
Επιφάνεια βράχου		0.487	
Εδαφική επιφάνεια		0.393	Wong et al. (1999)
Επιφάνεια από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα		0.263	εργαστηριακές δοκιμές

Σε κάθε περίπτωση, οι τιμές που λαμβάνουν οι ενεργειακοί συντελεστές αναπήδησης ανήκουν στο εύρος 0 έως 1.

3.2.5 Προσομοίωση καταπτώσεων με την χρήση λογισμικών

Η προσομοίωση των καταπτώσεων γίνεται στην πράξη αποκλειστικά με την χρήση λογισμικών Η/Υ. Υπάρχουν αρκετά διαθέσιμα προγράμματα για τον σκοπό αυτό, τα οποία διακρίνονται σε διδιάστατα και τριδιάστατα καθώς και σε αιτιοκρατικά (ντετερμινιστικά) ή πιθανοτικά.

Ένα διδιάστατο μοντέλο προσομοιώνει την τροχιά των βραχοτεμαχών σε ένα προκαθορισμένο, από τον χρήστη, επίπεδο κίνησης. Αντιθέτως, σε ένα τριδιάστατο πρόγραμμα ανάλυσης εισάγεται η πλήρης τοπογραφία της περιοχής, συνήθως με την χρήση ψηφιακών μοντέλων εδάφους (DEM raster), συνεκτιμώντας την επίδραση της τρίτης διάστασης και επιτρέποντας τον προσδιορισμό της πλευρικής εκτροπής των τεμαχών.

Τα ντετερμινιστικά προγράμματα προσδιορίζουν την τροχιά του τεμάχους σύμφωνα με συγκεκριμένες αρχικές συνθήκες. Αντιθέτως, στα πιθανοτικά προγράμματα οι αρχικές συνθήκες εισάγονται από τον χρήστη με ένα εύρος που σχετίζεται με την αβεβαιότητα ή την μεταβλητότητα των παραμέτρων. Έτσι γίνεται πλήθος μεμονωμένων αναλύσεων με διαφορετικές αρχικές συνθήκες, συνήθως με την τεχνική Monte Carlo, όποτε προσομοιώνεται εμμέσως η μεταβλητότητα που υπάρχει σε ένα φυσικό πρηνές.

Επίσης, μια σημαντική διαφοροποίηση των λογισμικών είναι η μέθοδος που προσομοιώνουν το τέμαχος, είτε ως σημείο είτε με τις πραγματικές του διαστάσεις. Με την θεώρηση της σημειακής μάζας το τέμαχος εκφυλίζεται σε σημείο και είναι δυνατός μόνο ο προσδιορισμός της μεταθετικής του ταχύτητας. Με την θεώρηση άκαμπτου σώματος, προσομοιώνεται η πραγματική γεωμετρία του τεμάχους, επιτρέποντας τον προσδιορισμό της περιστροφικής συνιστώσας της κίνησης. Οι παραπάνω μέθοδοι συνδυάζονται στα καλούμενα ως υβριδικά μοντέλα, όπου το τέμαχος προσομοιώνεται με το μοντέλο της σημειακής μάζας όταν βρίσκεται στον αέρα και ως άκαμπτο σώμα κατά την επαφή του με το πρηνές, τεχνική που απαιτεί μικρότερο υπολογιστικό κόστος.

Ορισμένα από τα πιο διαδεδομένα λογισμικά προσομοίωσης των καταπτώσεων παρουσιάζονται στους πίνακες 3.8 και 3.9, ταξινομημένα σε διδιάστατα και τριδιάστατα αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι η συντριπτική πλειοψηφία των λογισμικών λειτουργεί με το προσομοίωμα της σημειακής μάζας και η αναπήδηση προσεγγίζεται με τον κάθετο και τον εφαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης.

Πίνακας 3.8: Λογισμικά ανάλυσης καταπτώσεων στις 2 διαστάσεις

Λογισμικό	Μέθοδος ανάλυσης	προσομοίωση αναπήδησης	Πηγή/Σχόλια
CRSP	Σημειακής μάζας, ημι-πιθανοτική	n_{COR}, t_{COR}	Piteau and Clayton (1977)
ROCSIM	Σημειακής μάζας, Ντετερμινιστική	n_{COR}, t_{COR}	Wu (1985)
SASS	Υβριδική, Πιθανοτική	E_{COR}	Bozzolo and Pamini (1986) προσομοίωση των τεμαχών ως ελλειπτικούς δίσκους
Rockfall	Υβριδική, Πιθανοτική	n_{COR}, t_{COR}	Spang (1987)
CRSP	Υβριδική, Πιθανοτική	n_{COR}, t_{COR}	Pfeiffer and Bowen (1989)
RocFall	Σημειακής μάζας, Πιθανοτική	n_{COR}, t_{COR}	Stevens (1998) RocScience
MOBYROCK	Σημειακής μάζας, Πιθανοτική	v_{COR}	Paronuzzi and Artini (1999)
CRSP v.4	Υβριδική, Πιθανοτική	n_{COR}, t_{COR}	Jones et al (2000)

Πίνακας 3.9: Λογισμικά ανάλυσης καταπτώσεων στις 3 διαστάσεις

Λογισμικό	Μέθοδος ανάλυσης	Πηγή/Σχόλια
ROTOMAP	Σημειακής μάζας, Πιθανοτική	Scioldo (1991)
EBOULEMENT	Άκαμπτου σώματος, Πιθανοτική	Dudt and Heidenreich (2001)
STONE	Σημειακής μάζας, Πιθανοτική	Guzzetti et al. (2002)
Rockfall Analyst	Σημειακής μάζας, Πιθανοτική	Lan et al. (2007)
HY-STONE	Σημειακής μάζας, Πιθανοτική	Agliardi et al. (2009)
Rockyfor3D	Σημειακής μάζας, Πιθανοτική	Dorren et al. (2006)
CRSP-3D	Διακριτά στοιχεία, Πιθανοτική	Andrew et al. (2012)

Στην Ελλάδα έχει αναπτυχθεί η εφαρμογή Rockfall Analysis (Χαραλάμπους, 2006), στο υπολογιστικό περιβάλλον arcGIS (Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών). Το πρόγραμμα αυτό εκτελεί στοχαστικές - πιθανοτικές αναλύσεις και είναι υβριδικό. Στην κρούση, το τέμαχος προσομοιώνεται με την θεώρηση της σημειακής μάζας και η αναπήδηση προσεγγίζεται με τον κάθετο και τον εφαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης (Χαραλάμπους et al., 2008).

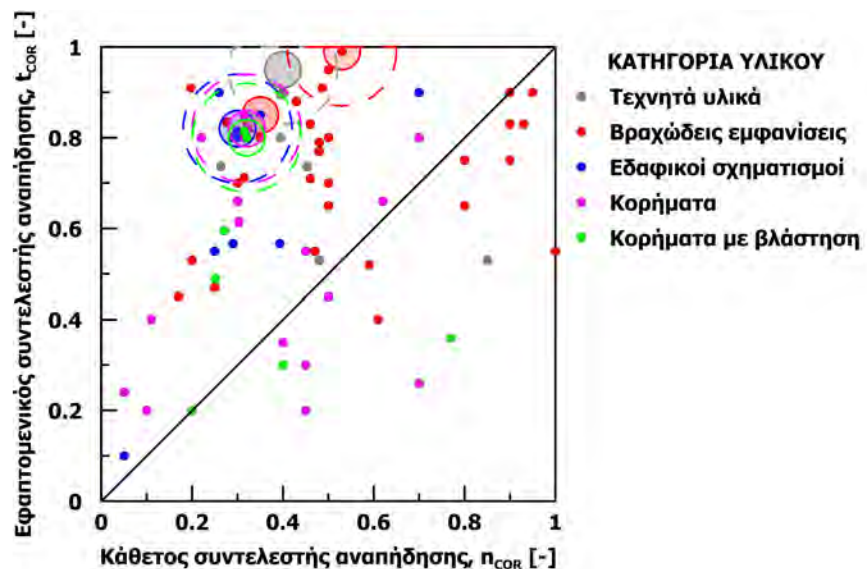
3.2.6 Αξιολόγηση των τιμών για τους συντελεστές αναπήδησης που συναντώνται στην βιβλιογραφία

Βάσει των πινάκων που παρατίθενται παραπάνω, γίνεται σαφές ότι ο επικρατέστερος τρόπος προσομοίωσης των καταπτώσεων βράχων είναι με την χρήση του καθέτου και του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης, αφού οι τιμές που συναντώνται στην βιβλιογραφία είναι σημαντικά περισσότερες.

Ωστόσο, ανεξάρτητα του χρησιμοποιούμενου ορισμού, οι συντελεστές εμφανίζουν σημαντική διακύμανση ακόμα και για αντίστοιχους σχηματισμούς. Συνεπώς, η εκτίμηση των συντελεστών βάσει του είδους του υλικού που δομεί το πρανές καθίσταται προβληματική. Παρόλα αυτά, ακολουθώντας την λογική που προτείνουν οι κατασκευαστές προγραμμάτων έγινε η ταξινόμηση των τιμών του καθέτου και του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης, διακρίνοντας τις εξής 5 κατηγορίες:

- Τεχνητά υλικά
- Βραχώδεις εμφανίσεις
- Κορήματα
- Κορήματα με φυτοκάλυψη
- Έδαφος με βλάστηση

Στο σχήμα 3.9 γίνεται η αποτύπωση του καθέτου συντελεστή αναπήδησης (στον οριζόντιο άξονα) και του εφαπτομενικού (στο κατακόρυφο) κατ' αντιστοιχία με το διάγραμμα των Fornaro et al. (1990) (Σχήμα 3.8). Επίσης, προβάλλονται οι τιμές που προτείνονται από το λογισμικό RocFall, δηλαδή οι εμπειρικές τιμές του Hoek (1987), με τυπική απόκλιση 0.04 (χωρίς με συνεχή γραμμή) και με τρεις τυπικές απόκλισεις (χωρίς με διακεκομμένη γραμμή), όπως προτείνονται στο λογισμικό RocFall. Οι κατηγορίες «επιφανειακές εμφανίσεις» και «σκληρός βράχος» που προτείνει ο Hoek θεωρήθηκαν ως μια, καθώς η διαφοροποίησή τους δεν ήταν πάντα προφανής στις προτεινόμενες τιμές.



Σχήμα 3.9: Σύγκριση των βιβλιογραφικών τιμών του καθέτου και του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης με τις προτεινόμενες στο λογισμικό RocFall ανάλογα με την σύσταση του πρανούς

Αρχικά, παρατηρείται ότι οι τιμές που προτείνονται από τους δημιουργούς των λογισμικών απέχουν σημαντικά από τις τιμές που έχουν προσδιοριστεί είτε από πειραματικές διερευνήσεις είτε από ανάδρομες αναλύσεις πραγματικών περιστατικών. Πιο συγκεκριμένα, για τις βραχώδεις εμφανίσεις οι τιμές του καθέτου συντελεστή αναπήδησης που αναφέρονται στην βιβλιογραφία κυμαίνονται από περίπου 0.2 έως 1.0 και του εφαπτομενικού από περίπου 0.4 έως 1.0. Το εύρος αυτό είναι σημαντικά μεγαλύτερο από αυτό που προτείνεται στα λογισμικά για τον αντίστοιχο σχηματισμό, δηλαδή από 0.3 έως 0.6 για τον κάθετο και από 0.8 έως 1.0 για τον εφαπτομενικό. Αντίστοιχες διαφοροποιήσεις εμφανίζονται και στους υπόλοιπους τύπους υλικών.

Επίσης, οι προτεινόμενες τιμές του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης στα λογισμικά είναι σε κάθε περίπτωση μεγαλύτερες από αυτές του καθέτου. Όμως, τα δεδομένα της βιβλιογραφίας δεν συνηγορούν σε αυτό. Στο 25% των τιμών που έχουν συγκεντρωθεί ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης είναι μεγαλύτερος του εφαπτομενικού.

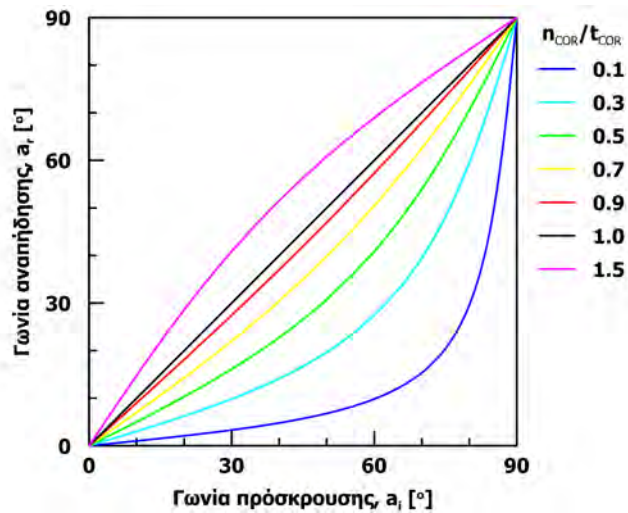
Η σχέση μεταξύ του καθέτου και του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης έχει άμεσο αντίκτυπο στην τροχιά του τεμάχους μετά την κρούση. Στην περίπτωση που ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης ισούται με τον εφαπτομενικό, η γωνία αναπήδησης θα ισούται με την γωνία πρόσκρουσης. Αυτό αποδεικνύεται εκφράζοντας την γωνία αναπήδησης συναρτήσει των αρχικών ταχυτήτων και των αντίστοιχών συντελεστών, ως εξής:

$$a_r = \arctan \frac{n_{COR} V_{n,i}}{t_{COR} V_{t,i}} \quad (3.25)$$

Όταν ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης είναι μεγαλύτερος από τον κάθετο, σύμφωνα δηλαδή με την τάση που υπάρχει στις προτεινόμενες τιμές, προκύπτει ότι η γωνία αναπήδησης είναι μικρότερη της γωνίας πρόσκρουσης. Έτσι, εάν στην σχέση 3.25 ο λόγος n_{COR}/t_{COR} είναι μικρότερος της μονάδας τότε προκύπτει ότι $a_i > a_r$.

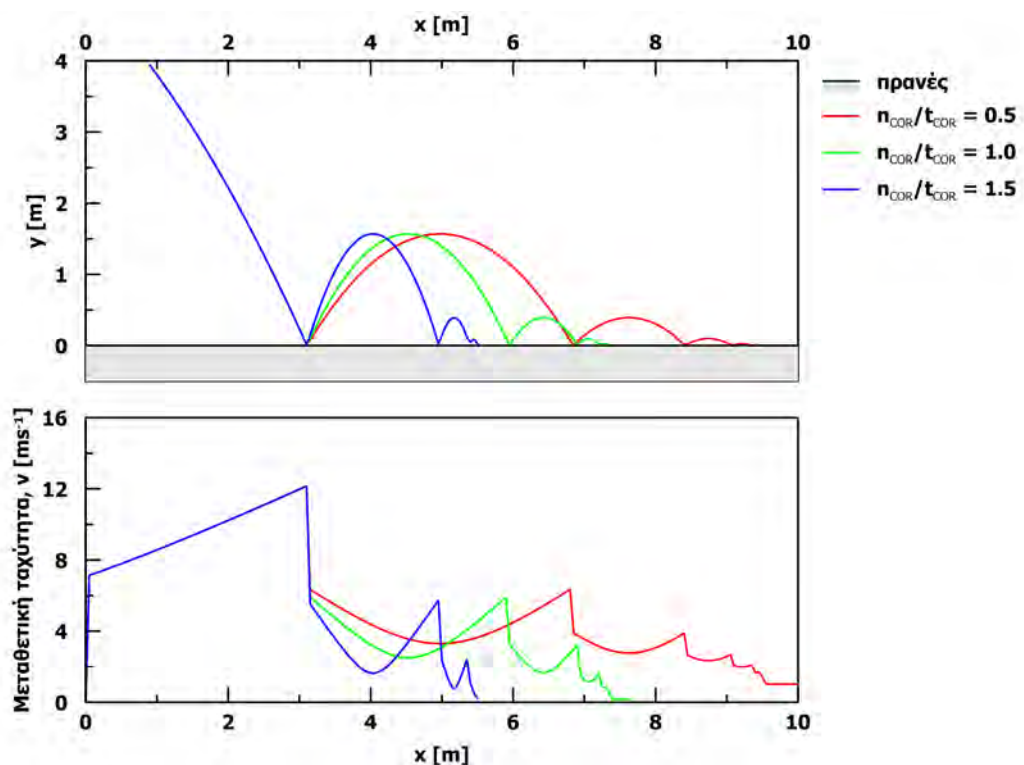
Στην αντίθετη περίπτωση, όπου ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης είναι μεγαλύτερος από τον εφαπτομενικό, η γωνία αναπήδησης προκύπτει μεγαλύτερη της γωνίας πρόσκρουσης. Συνέπεια τούτου είναι η τροχιά να εμφανίζει μικρότερο μήκος για ίδιο κάθετο συντελεστή αναπήδησης. Αν και η περίπτωση αυτή δεν φαίνεται εκ πρώτης να είναι ρεαλιστική, ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης είναι μεγαλύτερος του καθέτου περίπου στο 25% των τιμών που έχουν συγκεντρωθεί από την βιβλιογραφία.

Η σχέση μεταξύ της γωνίας πρόσκρουσης με την γωνία αναπήδησης συναρτήσει του λόγου του καθέτου προς τον εφαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης παρουσιάζεται στο σχήμα 3.10.



Σχήμα 3.10: Σχέση μεταξύ γωνιών πρόσκρουσης και αναπήδησης συναρτήσει του λόγου του καθέτου προς τον επαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης

Στο σχήμα 3.11 παρουσιάζεται μια απλή παραμετρική ανάλυση όπου ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης διατηρεί σταθερή τιμή ($n_{COR} = 0.5$) και ο επαπτομενικός λαμβάνεται τιμές 0.25, 0.50 και 0.75, ώστε ο λόγος n_{COR}/t_{COR} να είναι 0.5, 1 και 1.5 αντίστοιχα. Το μέτρο και η διεύθυνση της ταχύτητας πρόσκρουσης είναι ίδια σε κάθε ανάλυση.



Σχήμα 3.11: Εξάρτηση του ύψους αναπήδησης και της ταχύτητας κίνησης του τεμάχους από τον λόγο του καθέτου προς τον επαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης

Από το σχήμα 3.11 παρατηρείται ότι το ύψος αναπήδησης είναι σε κάθε περίπτωση ίδιο, κάτι αναμενόμενο αφού καθορίζεται από τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης που διατηρήθηκε σταθερός στις αναλύσεις. Όταν ο λόγος του καθέτου προς τον εφαπτομενικό συντελεστή είναι μονάδα, η γωνία πρόσκρουσης ισούται με την γωνία αναπήδησης. Στην περίπτωση που ο λόγος τους είναι μικρότερος της μονάδας, η γωνία αναπήδησης είναι μικρότερη και τροχιά εκτείνεται σε μεγαλύτερο μήκος. Τέλος στην περίπτωση που ο λόγος είναι μεγαλύτερος της μονάδας, η γωνία αναπήδησης είναι μεγαλύτερη της γωνίας πρόσκρουσης και το μήκος της τροχιάς περιορίζεται. Αναφορικά με την ταχύτητα κίνησης του τεμάχους παρατηρείται ότι αυξάνεται με την μείωση του λόγου του καθέτου προς τον εφαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης, αλλά όχι σημαντικά.

3.2.7 Επίδραση των συντελεστών αναπήδησης στον σχεδιασμό μέτρων αντιμετώπισης

Έχει ήδη αναφερθεί ότι οι συντελεστές αναπήδησης είναι η πιο κρίσιμη παράμετρος για τον προσδιορισμό της τροχιάς του τεμάχους και κατ' επέκταση για την εκτίμηση της επικινδυνότητας και την διαστασιολόγηση των μέτρων αντιμετώπισης.

Για τον σχεδιασμό των παθητικών μέτρων αντιμετώπισης (φράχτες ανάσχεσης, οπλισμένα επιχώματα, τάφροι περισυλλογής), εκτιμώνται τα χαρακτηριστικά της τροχιάς κατά μήκος του πρηνούς, βάσει των οποίων προσδιορίζεται η θέση εγκατάστασης. Εφόσον δεν υπάρχουν χωροταξικοί περιορισμοί, η βέλτιστη θέση εγκατάστασης είναι εκείνη που το ύψος και η ταχύτητα κίνησης των τεμαχών ελαχιστοποιούνται. Το ύψος κίνησης καθορίζει το ύψος της κατασκευής και η ταχύτητα σε συνδυασμό με την μάζα του τεμάχους καθορίζουν την ενέργεια που πρέπει να αναλάβει η κατασκευή, δηλαδή την φέρουσα ικανότητά της.

Η επίδραση των συντελεστών αναπήδησης στην τροχιά παρουσιάζεται παρακάτω, μέσω μιας παραμετρικής ανάλυσης. Χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό RocFall της εταιρείας RocScience, που αποτελεί το πιο διαδεδομένο λογισμικό ανάλυσης καταπτώσεων. Η προσομοίωση της αναπήδησης γίνεται με τον κάθετο και τον εφαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης, με το μοντέλο σημειακής μάζας.

Προσομοιώνεται η τροχιά ενός τεμάχους που καταπίπτει σε πρηνές ύψους $h = 10m$ και κλίσης $\vartheta = 45^\circ$. Εξετάζεται η εγκατάσταση φράχτη ανάσχεσης στον πόδα του πρηνούς για την προστασία γεινιάζουσας οδού. Το τεμάχος διέρχεται $5m$ ψηλότερα από την στέψη με οριζόντια και με κατακόρυφη ταχύτητα ίση με $10ms^{-1}$. Η μάζα του τεμάχους δεν επηρεάζει την τροχιά ή την αναπήδηση στις αναλύσεις με το μοντέλο της σημειακής μάζας αλλά χρησιμοποιείται αποκλειστικά για τον προσδιορισμό της κινητικής ενέργειας. Για την εφαρμογή αυτή λαμβάνεται ίση με $m = 1000kg$.

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία η διακύμανση του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης είναι μικρή, συνεπώς ο εφαπτομενικός συντελεστής θεωρήθηκε σταθερός και ίσος με $t_{COR} = 0.90$. Στην παραμετρική ανάλυση μεταβλήθηκε μόνο ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης, για τον οποίο χρησιμοποιούνται οι τιμές: 0.2, 0.4, 0.6 και 0.8. Βάσει των αναφερόμενων στην ενότητα 3.2.4.2 και τον πίνακα 3.6, οι τιμές αυτές μπορούν κάλλιστα να θεωρηθούν αντιπροσωπευτικές για ένα τυπικό ασβεστολιθικό πρανές.

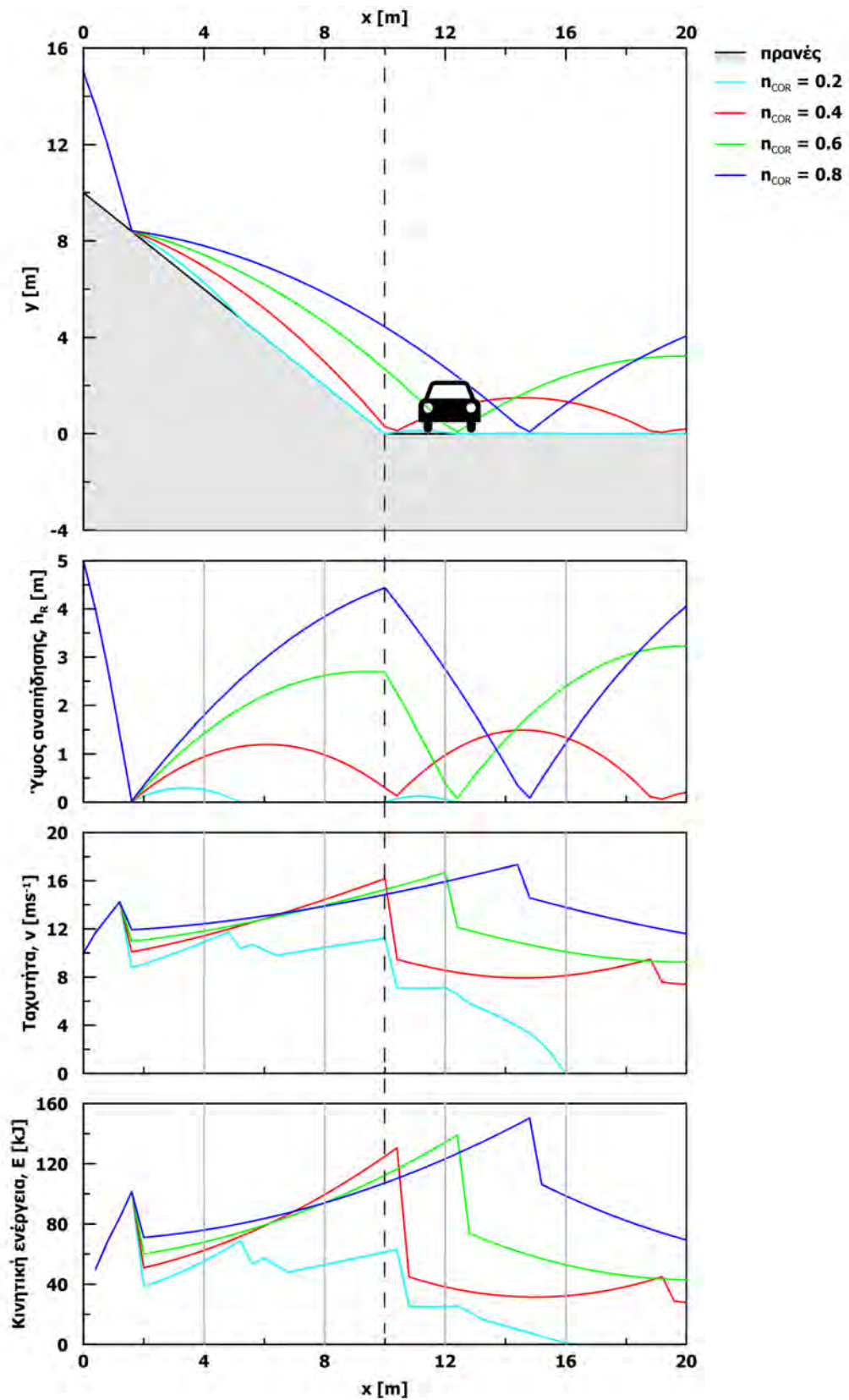
Στον πίνακα 3.10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την θέση ενδιαφέροντος ($x = 10m$). Στο σχήμα 3.12 παρουσιάζονται οι τροχιές που προκύπτουν για τις διάφορες τιμές του καθέτου συντελεστή αναπήδησης, τα ύψη κίνησης σε σχέση με την επιφάνεια του πρανούς, οι αναπτυσσόμενες ταχύτητες και ενέργειες κατά μήκος του πρανούς. Με την διακεκομμένη ευθεία φαίνεται η θέση εγκατάστασης του φράχτη ανάσχεσης.

Πίνακας 3.10: Χαρακτηριστικά τροχιάς συναρτήσει του καθέτου συντελεστή αναπήδησης

Κάθετος συντ. αναπήδησης $n_{COR}[-]$	Ύψος κίνησης $h_R[m]$	Ταχύτητα $v[ms^{-1}]$	Ενέργεια $E[kJ]$
0.2	0.00	11.2	61.3
0.4	0.29	16.2	124.9
0.6	2.68	15.3	112.4
0.8	4.43	14.8	107.2

Προκύπτει ότι η αύξηση του καθέτου συντελεστή αναπήδησης έχει σημαντική επίδραση στο ύψος κίνησης των τεμαχών. Στην θέση εγκατάστασης παρατηρείται ένα παράδοξο: οι αναπτυσσόμενες ταχύτητες και ενέργειες μειώνονται ελαφρώς με την αύξηση του καθέτου συντελεστή αναπήδησης. Αυτό οφείλεται στην διαγραφόμενη τροχιά και την γεωμετρία του πρανούς. Σε κάθε περίπτωση η μεγίστη ταχύτητα και ενέργεια αυξάνονται, αλλά εμφανίζονται σε άλλη θέση.

Γενικώς η επίδραση της επιλεγείσας τιμής του καθέτου συντελεστή αναπήδησης είναι ιδιαίτερος σημαντική για το ύψος κίνησης των τεμαχών και λιγότερο για την αναπτυσσόμενη ταχύτητα. Θεωρώντας ότι το πρανές δομείται από ασβεστόλιθο, μπορεί να τεκμηριωθεί η χρήση οποιασδήποτε τιμής του καθέτου συντελεστή αναπήδησης βάσει όσων παρουσιάζονται στην βιβλιογραφία (βλ. πίνακα 3.6). Έτσι για το συγκεκριμένο πρανές θα μπορούσε να προταθεί η κατασκευή ενός δύσκαμπτου φράχτη τύπου jersey με ύψος $h = 0.5m$, ή η κατασκευή ενός εύκαμπτου φράχτη ανάσχεσης ύψους $h = 5m$. Πέραν της αβεβαιότητας του μηχανικού για την ορθότητα της προτεινόμενης λύσης, η διαφορά στο κόστος μεταξύ των δυο λύσεων είναι σημαντική.



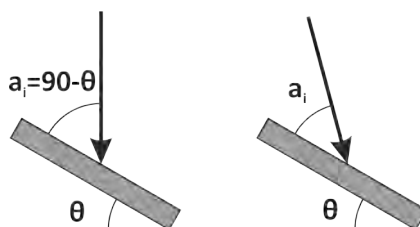
Σχήμα 3.12: Διαγραφόμενες τροχιές και τα χαρακτηριστικά τους για διάφορες τιμές του καθέτου συντελεστή αναπήδησης

3.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Στην ενότητα αυτή γίνεται μια ανασκόπηση των πειραματικών διερευνήσεων που έχουν διενεργηθεί. Παρουσιάζονται οι πειραματικές διατάξεις, τα βασικά συμπεράσματα και οι παρατηρήσεις που έχουν εξαχθεί από αυτές. Για να είναι ευχερής η περαιτέρω σύγκριση με τα αποτελέσματα των δοκιμών που εκπονήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσης διατριβής, τα στοιχεία αυτά έχουν ταξινομηθεί σύμφωνα με την βασικότερη παράμετρο που εξετάζεται.

3.3.1 Επίδραση κλίσης επιφάνειας πρόσκρουσης και γωνίας πρόσκρουσης

Στην περίπτωση που το τέμαχος εκτελεί ελεύθερη πτώση, η κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης (θ) είναι συμπληρωματική της γωνίας πρόσκρουσης (α_i). Όταν το τέμαχος εκτελεί παραβολική τροχιά τότε η γωνία πρόσκρουσης θα είναι μικρότερη από την προαναφερθείσα γωνία (Σχήμα 3.13).



Σχήμα 3.13: Γωνία πρόσκρουσης (α_i) και κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης (θ) στην ελεύθερη πτώση και στην παραβολική ρίψη των τεμαχίων

Ο Broili (1977), αξιολογώντας δοκιμές πεδίου, ανέφερε ότι όταν η εφαπτομενική συνιστώσα της ταχύτητας είναι περίπου 4 φορές μεγαλύτερη της κατακόρυφης, δηλαδή για γωνία πρόσκρουσης περί των $\alpha_i = 15^\circ$, τότε η κατακόρυφη ταχύτητα μετά την κρούση δύναται να είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα πρόσκρουσης. Συνεπώς, όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης μπορεί να είναι μεγαλύτερος της μονάδας. Παρόλα αυτά, στην βιβλιογραφία η αναφορά τιμών του καθέτου συντελεστή αναπήδησης μεγαλύτερες της μονάδας ήταν σπάνια μέχρι την δημοσίευση του Ragonezzi (2009), καθώς θεωρούνταν εσφαλμένες.

Ο Wu (1985) μελετώντας την επίδραση της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης στους συντελεστές αναπήδησης, εκτέλεσε δοκιμές ελεύθερης πτώσης σε επιφάνειες υπό κλίση. Απελευθέρωσε 13 τεμάχια βράχου, διαφορετικού σχήματος και μεγέθους 20 έως 45cm σε επιφάνειες πρόσκρουσης από ξύλο με κλίση 30, 40, 45 και 60° . Στην συνέχεια απελευθέρωσε από ύψος περίπου 10m τεμάχια βράχου σε τρία βραχώδη πρανή με κλίση 28, 40 και 75° .

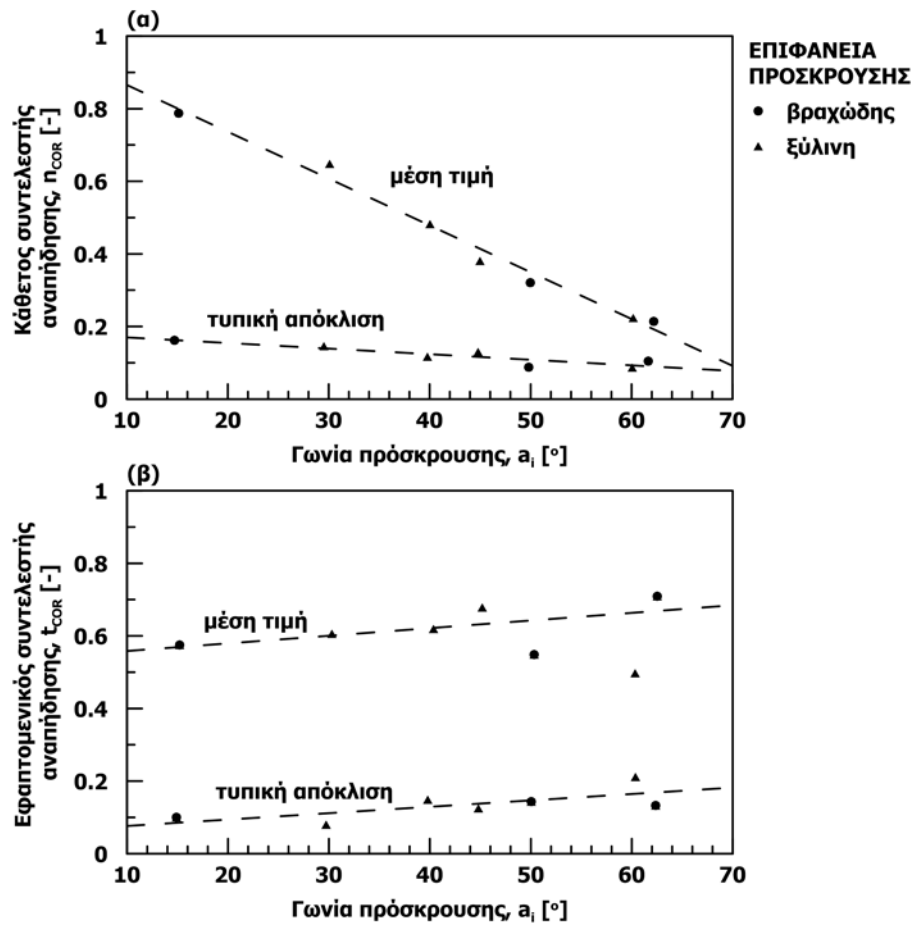
Παρά την μεγάλη διασπορά των αποτελεσμάτων, παρατήρησε ότι οι μέσες τιμές των συντελεστών εμφανίζουν γραμμική σχέση με την γωνία πρόσκρουσης ή αντίστοιχα την κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης. Πιο συγκεκριμένα, με την αύξηση της γωνίας πρόσκρουσης ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης μειώνεται και ο εφαπτομενικός αυξάνεται με πολύ μικρό ρυθμό

(Σχήμα 3.14). Οι τάσεις των συντελεστών αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης περιγράφονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$n_{COR} = -0.013\alpha_i + 0.995 \tag{3.26}$$

$$t_{COR} = 0.0028\alpha_i + 0.535 \tag{3.27}$$

Με συντελεστή συσχέτισης R^2 ίσο με 0.98 και 0.87 για τις σχέσεις 3.26 και 3.27, αντίστοιχα.

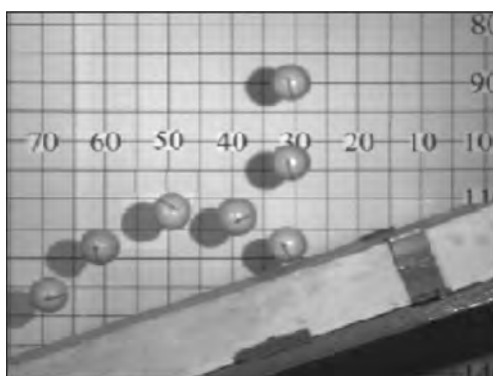


Σχήμα 3.14: Κάθετος (α) και εφαπτομενικός (β) συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης (Wu, 1985)

Η αυξημένη διακύμανση αποδόθηκε στο μη κανονικό σχήμα των τεμαχών και των επιφανειών πρόσκρουσης. Περαιτέρω, πρότεινε η διακύμανση αυτή να θεωρείται ως κανονικά κατανεμημένη και κατάρτισε ένα πιθανοτικό μοντέλο προσομοίωσης βασιζόμενο στην μέθοδο Monte Carlo. Με το μοντέλο αυτό, υπεισέρχεται στην προσομοίωση η τυχαιότητα της αναπήδησης, που οφείλεται στις επιφανειακές ανωμαλίες της επιφάνειας πρόσκρουσης και του τεμάχους.

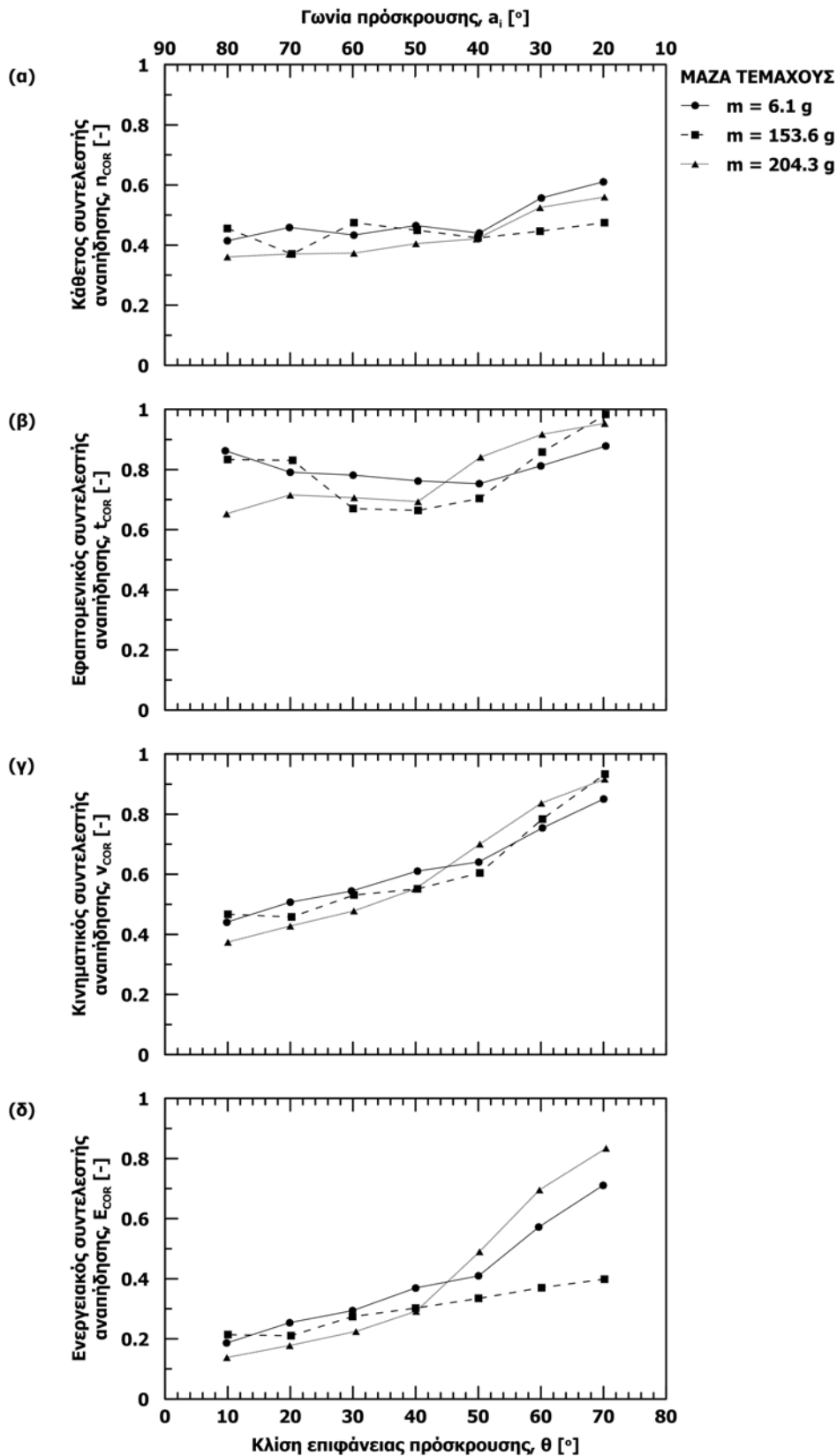
Όμως η επεξεργασία των εν λόγω δεδομένων από τον Wu (1985) υπονοεί δυο ζητήματα τα οποία αντικρούονται στα συμπεράσματα άλλων ερευνών. Πιο συγκεκριμένα, η γραμμή τάσης είναι ενιαία για τις δοκιμές που έγιναν σε επιφάνεια πρόσκρουσης από βράχο και από ξύλο, που σημαίνει ότι η επιφάνεια πρόσκρουσης δεν επιδρά στην αναπήδηση. Επίσης, οι συντελεστές αναπήδησης δεν διαφοροποιούνται παρά το γεγονός ότι οι δυο αυτές σειρές δοκιμών έχουν σημαντική διάφορα κλίμακας. Τα ζητήματα αυτά σχολιάζονται εκτενώς ακολούθως.

Οι Chau et al. (2002) για την διερεύνηση της επίδρασης που έχει η γωνία πρόσκρουσης στους συντελεστές αναπήδησης, πραγματοποίησαν δοκιμές ελεύθερης πτώσης σε κεκλιμένες επιφάνειες, χρησιμοποιώντας σφαιρικά δοκίμια από γύψο με διαφορετική μάζα. Η καταγραφή της τροχιάς έγινε από μια φωτομηχανή υψηλής ταχύτητας που ήταν εγκατεστημένη ώστε το επίπεδο απεικόνισης να είναι παράλληλο με την τροχιά που εκτελούν τα τεμάχια (Σχήμα 3.15).



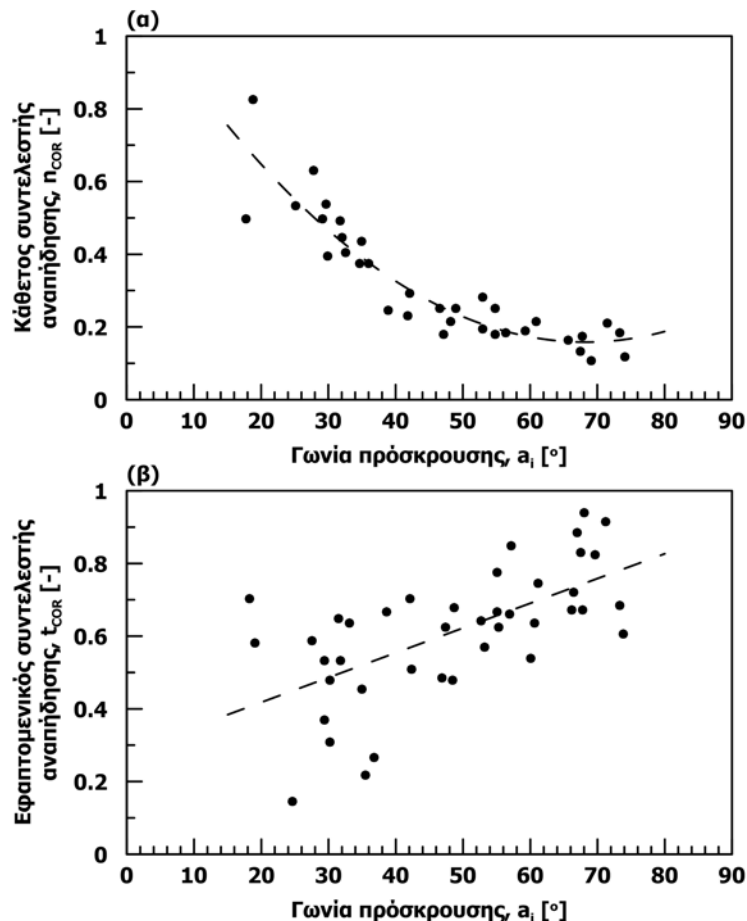
Σχήμα 3.15: Πειραματική διάταξη και καταγραφή δοκιμής (Chau et al., 2002)

Στην έρευνα αυτή μετρήθηκε η μεταθετική και η γωνιακή ταχύτητα του τεμάχους, επιτρέποντας την συγκριτική αξιολόγηση των διαφορετικών ορισμών που υπάρχουν για τους συντελεστές αναπήδησης (Σχήμα 3.16).



Σχήμα 3.16: Συντελεστές αναπήδησης συναρτήσεϊ της κλίσεϊ της επιφανείας πρόσκρουσεϊ (ή ισοδύναμα της γωνίαι πρόσκρουσεϊ) για τεμάχια διαφορετικέϊ μάζαι: (α) κάθετοι, (β) εφαπτομενικοί, (γ) κινηματικοί και (δ) ενεργειακοί (Chau et al., 2002)

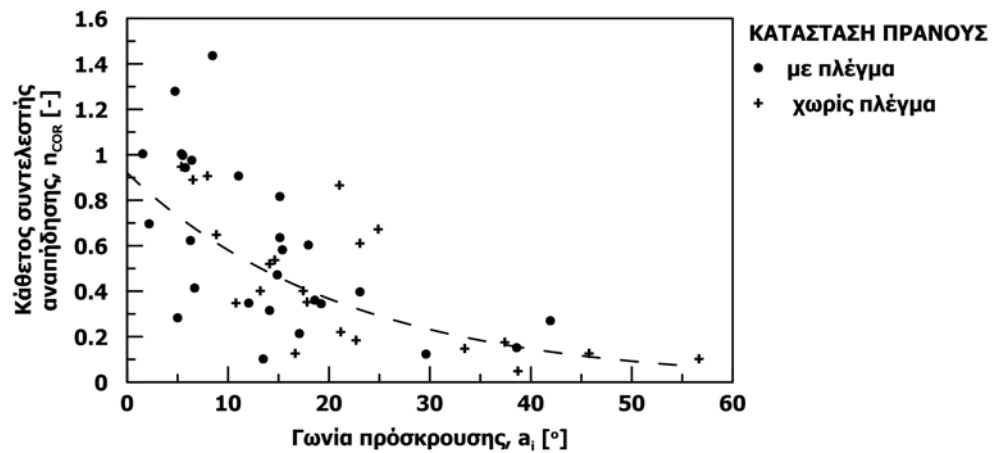
Οι Cagnoli and Manga (2003) χρησιμοποίησαν τεμάχια κυλινδρικού σχήματος από ελαφρόπετρα και λείες επιφάνειες πρόσκρουσης από το ίδιο υλικό. Τα τεμάχια είχαν μήκος 0.9cm , διάμετρο 0.55cm και βάλθηκαν στην επιφάνεια πρόσκρουσης από ένα πνευματικό σύστημα εκτόξευσης. Η ταχύτητα πρόσκρουσης ήταν σταθερή μεταξύ των επαναλήψεων, ίση με περίπου 25ms^{-1} . Διερευνήθηκαν γωνίες πρόσκρουσης από 18° έως 74° . Τα αποτελέσματα και οι τάσεις που περιγράφουν τους συντελεστές αναπήδησης παρουσιάζονται στο σχήμα 3.17.



Σχήμα 3.17: Κάθετος (α) και εφαπτομενικός (β) συντελεστής αναπήδησης συναρτήσεως της γωνίας πρόσκρουσης (Cagnoli and Manga, 2003)

Από την διερεύνηση αυτή εξάγεται παρόμοιο συμπέρασμα με αυτό των Chau et al. (2002) και του Wu (1985). Δηλαδή ότι η αύξηση της γωνίας πρόσκρουσης οδηγεί στην μείωση του καθέτου συντελεστή αναπήδησης και στην αύξηση του εφαπτομενικού.

Οι Giacomini et al. (2012) εκτέλεσαν επιτόπου δοκιμές σε ορυχείο ανοιχτής εξόρυξης στην Νέα Νότια Ουαλία της Αυστραλίας. Απελευθέρωσαν τεμάχια πολυεδρικού σχήματος, μέσης διάστασης 30cm , από την στέψη δύο πρανών. Στο ένα πρανές ήταν εγκατεστημένο μεταλλικό πλέγμα τύπου κουρτίνας για περισσότερα από έξι χρόνια και στο άλλο ήταν το φυσικό πέτρωμα. Το ύψος των πρανών κυμαινόταν από 40 έως 50m και η κλίση τους ήταν περίπου 70° .



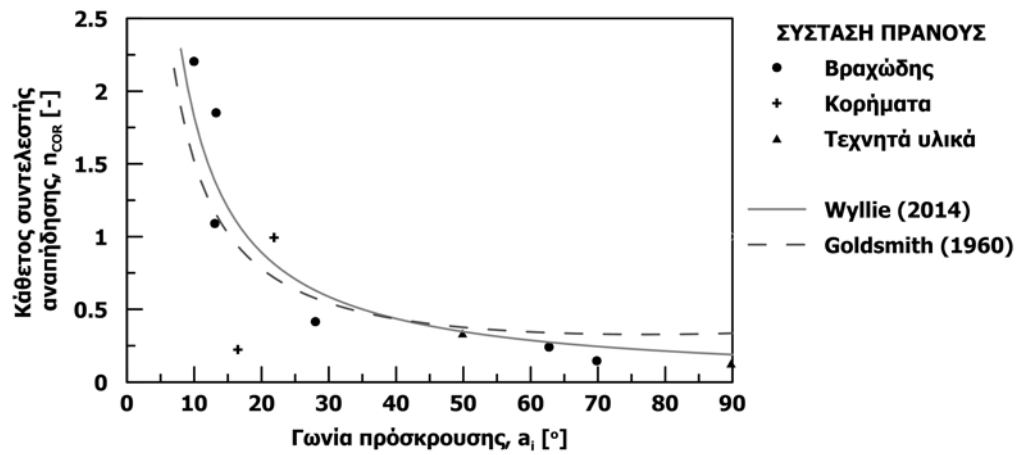
Σχήμα 3.18: Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσεως της γωνίας πρόσκρουσης (Giacomini et al., 2012)

Οι τροχιές των τεμαχίων καταγράφηκαν από σύστημα συγχρονισμένων φωτογραφικών μηχανών ταχείας λήψης, επιτρέποντας την τριδιάστατη ανάλυσή τους μέσω φωτογραμμετρικών μεθόδων. Αναφορικά με την γωνία πρόσκρουσης, οι παρατηρήσεις των τροχιών συνάδουν με τα συμπεράσματα από τις πειραματικές διερευνήσεις που αναφέρονται παραπάνω. Πιο συγκεκριμένα, η αύξηση της γωνίας πρόσκρουσης συνοδεύεται με μείωση του κάθετου συντελεστή αναπήδησης (Σχήμα 3.18) και προτείνουν μια εκθετική σχέση (σχέση 3.28) για την σύνδεση των δυο αυτών μεγεθών. Επίσης, για τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης προσδιορίστηκαν τιμές μεγαλύτερες της μονάδας σε μικρές γωνίες πρόσκρουσης ($\alpha_i < 15^\circ$).

$$n_{cor} = 0.92e^{-0.046\alpha_i} \quad (3.28)$$

Οι Ferrari et al. (2013) πραγματοποίησαν επιτόπου δοκιμές στο πλαίσιο απομάκρυνσης των επισφαλών όγκων που αποτέθηκαν στην στέψη κώνου κορημάτων μετά από φυσική κατάρπωση στην κοιλάδα Grosina των Ιταλικών Άλπεων. Για τις δοκιμές επιλέχθηκαν παραλληλεπίπεδα τεμάχια με όγκο περίπου $1m^3$, καθώς τεμάχια με αυτά τα χαρακτηριστικά έφτασαν ως παρακείμενη ορεινή οδό. Όσον αφορά στην επίδραση της κλίσης του πρανούς, παρατήρησαν ότι ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης αυξάνεται με την αύξηση της κλίσης του πρανούς, ενώ αντιθέτως ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης δεν σχετίζεται με αυτή.

Ο Wyllie (2014a) συγκέντρωσε αποτελέσματα από δοκιμές πεδίου που έγιναν στον Καναδά, στις Ηνωμένες Πολιτείες και στην Ιαπωνία. Μελέτησε την επίδραση της γωνίας πρόσκρουσης στον κάθετο συντελεστή αναπήδησης, ταξινομώντας τα αποτελέσματα βάσει του υλικού που δομεί το πρανές σε 3 κατηγορίες. Πιο συγκεκριμένα, σε επιφάνειες πρόσκρουσης από βράχο, κορημάτα και τεχνητά υλικά (άσφαλτο και τσιμέντο). Παρατήρησε ότι οι τιμές που λαμβάνει ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης εξαρτώνται αρκετά περισσότερο από την γεωμετρία του πρανούς παρά από τον τύπο του υλικού (Σχήμα 3.19).



Σχήμα 3.19: Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης (Wyllie, 2014a)

Στο σχήμα 3.19 είναι αποτυπωμένη η σχέση 3.29 που καταρτίστηκε από τον Wyllie (2014a) και αποτελεί την βέλτιστη προσαρμογή στα δεδομένα που συγκέντρωσε.

$$n_{COR} = 19.5\alpha_i^{-1.03} \quad (3.29)$$

Επίσης, στο ίδιο διάγραμμα ο (Wyllie, 2014a) προβάλλει την σχέση 3.30, που προέρχεται από την θεωρία των κρούσεων και έχει εκφραστεί από τον Goldsmith (1960). Η σχέση αυτή συνδέει τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του τεμάχους (ακτίνα, ροπή αδρανείας), τα κινηματικά χαρακτηριστικά (μεταθετική και γωνιακή ταχύτητα) καθώς και την γωνία αναπήδησης.

$$n_{COR} = -\frac{\tan \alpha_i}{\tan \alpha_r} \left[1 - \frac{1}{1 + r^2/k^2} \left(1 + \frac{r\omega_i}{v_i \cos \alpha_i} \right) \right] \quad (3.30)$$

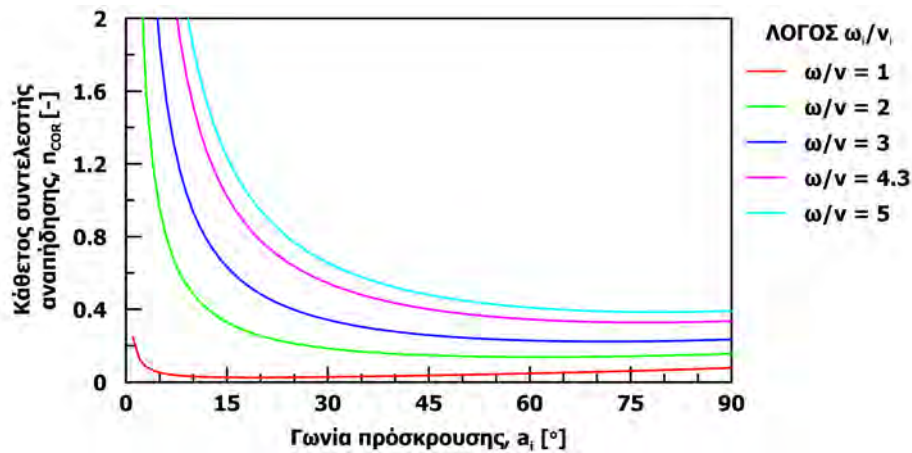
όπου:

r η ακτίνα του τεμάχους

k η ακτινα αδρανείας του τεμάχους ($= \sqrt{I/A}$)

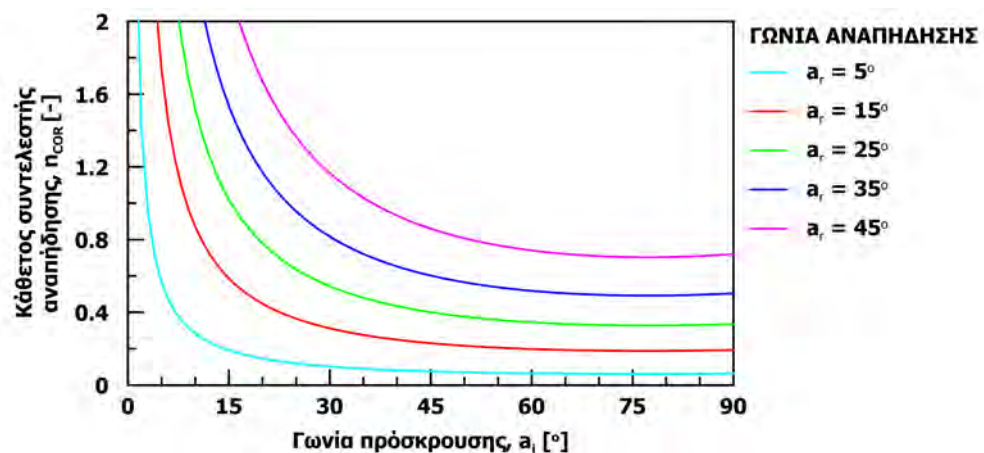
Ο (Wyllie, 2014a) βαθμονόμησε την εν λόγω σχέση, χρησιμοποιώντας τις τιμές: $r = 0.2m$, $k = 0.46$, $v_i = 7ms^{-1}$, $\omega_i = 30rs^{-1}$ και $\alpha_r = 25^\circ$. Αν και η προσαρμογή της σχέσης 3.30 είναι ικανοποιητική για να περιγράψει τα εν λόγω δεδομένα, η γενίκευση της είναι προβληματική. Αφενός χρησιμοποιείται πολύ μικρό πλήθος δεδομένων και αφετέρου η γωνία αναπήδησης λαμβάνεται ως σταθερή, χωρίς να εξαρτάται από την γωνία πρόσκρουσης.

Επίσης, η σχέση 3.30 είναι πολύ ευαίσθητη σε μικρές μεταβολές των παραμέτρων. Στο σχήμα 3.20 αποτυπώνεται η τιμή του καθέτου συντελεστή αναπήδησης που προκύπτει μεταβάλλοντας τον λόγο ω_i/v_i και διατηρώντας τις υπόλοιπες παραμέτρους σταθερές, με τις τιμές που έχει χρησιμοποιήσει ο Wyllie (2014a).



Σχήμα 3.20: Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσεως της γωνίας πρόσκρουσης, για διάφορες τιμές του λόγου ω_i/ν_i με την σχέση του Goldsmith (1960). Η τιμή του λόγου ω_i/ν_i που χρησιμοποιεί ο Wyllie (2014a) είναι 4.3

Στο σχήμα 3.21 παρουσιάζεται ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης από την σχέση 3.30 μεταβάλλοντας μόνο την γωνία αναπήδησης και διατηρώντας τον λόγο $\omega_i/\nu_i = 4.3$ που χρησιμοποιήθηκε από τον Wyllie (2014a).



Σχήμα 3.21: Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσεως της γωνίας πρόσκρουσης, για διάφορες τιμές της γωνίας αναπήδησης με την σχέση του Goldsmith (1960), με $\omega_i/\nu_i = 4.3$

3.3.2 Επίδραση του τύπου του πετρώματος

Γενικά στην βιβλιογραφία κυριαρχεί η άποψη ότι όσο πιο συμπαγές και με μεγαλύτερη αντοχή είναι το πέτρωμα τόσο μεγαλύτερος θα είναι ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης (Azzoni et al., 1992; Richards et al., 2001; RocScience, 2003; Heidenreich, 2004, κ.α.).

Η πρακτική που ισχύει μέχρι σήμερα είναι η επιλογή των συντελεστών αναπήδησης να γίνεται σύμφωνα με τις προτεινόμενες τιμές, βάσει του υλικού που δομεί το πρανές (βλ. ενότητα 3.2.4). Αυτό υπονοεί ότι οι συντελεστές αναπήδησης αποτελούν ιδιότητα του υλικού,

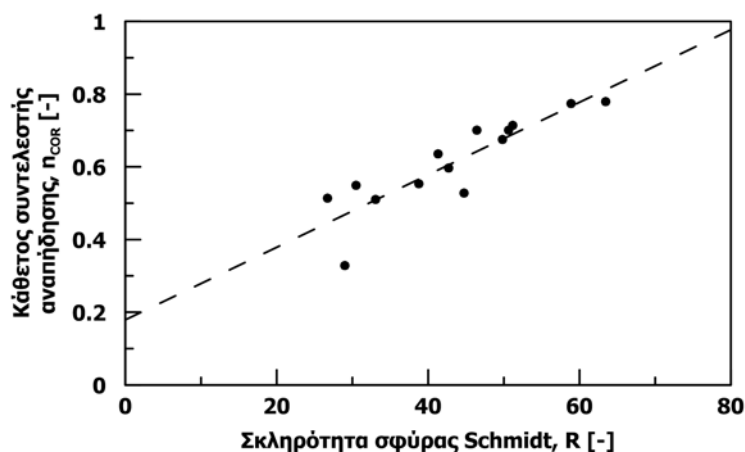
ενώ σε ορισμένες εργασίες αναφέρονται και ως σταθερές αυτού (Fornaro et al., 1990). Στην ενότητα 3.1.4 παρουσιάζονται οι παράμετροι που επηρεάζουν τον συντελεστή αναπήδησης, βάσει των οποίων καθίσταται προφανές ότι η θεώρηση αυτή είναι ιδιαιτέρως απλουστευτική.

Για τα βραχώδη υλικά δεν έχουν γίνει συστηματικές προσπάθειες για την ποσοτικοποίηση της σχέσης των μηχανικών χαρακτηριστικών με τους συντελεστές αναπήδησης. Εξάιρεση αποτελεί η έρευνα των Peng (2000) και Richards et al. (2001), οι οποίες όμως δεν έχουν τύχει της αποδοχής της επιστημονικής κοινότητας. Οι έρευνες αυτές είχαν έναυσμα την διερεύνηση του Rayudu (1997), που προσπάθησε να συσχετίσει την σκληρότητα της σφύρας Schmidt με τον συντελεστή αναπήδησης. Πραγματοποίησε ρίψεις με μεταλλική σφαίρα, διαμέτρου $d = 4\text{cm}$, σε 14 λείες βραχώδεις επιφάνειες διαφορετικού τύπου. Τα αποτελέσματα έδειξαν καλή γραμμική συσχέτιση μεταξύ των δυο αυτών μεγεθών (σχέση 3.31 και σχήμα 3.22). Όμως, σύμφωνα με τον Rayudu (1997), η σχέση αυτή δεν είναι εφαρμόσιμη για την προσομοίωση των καταπτώσεων καθώς η αναπήδηση εξαρτάται από τις ελαστικές ιδιοτήτων των υλικών που μετέχουν στην κρούση, οι οποίες διαφοροποιούνται σημαντικά στην περίπτωση του μετάλλου.

$$n_{COR} = 0.10R + 0.17 \quad (3.31)$$

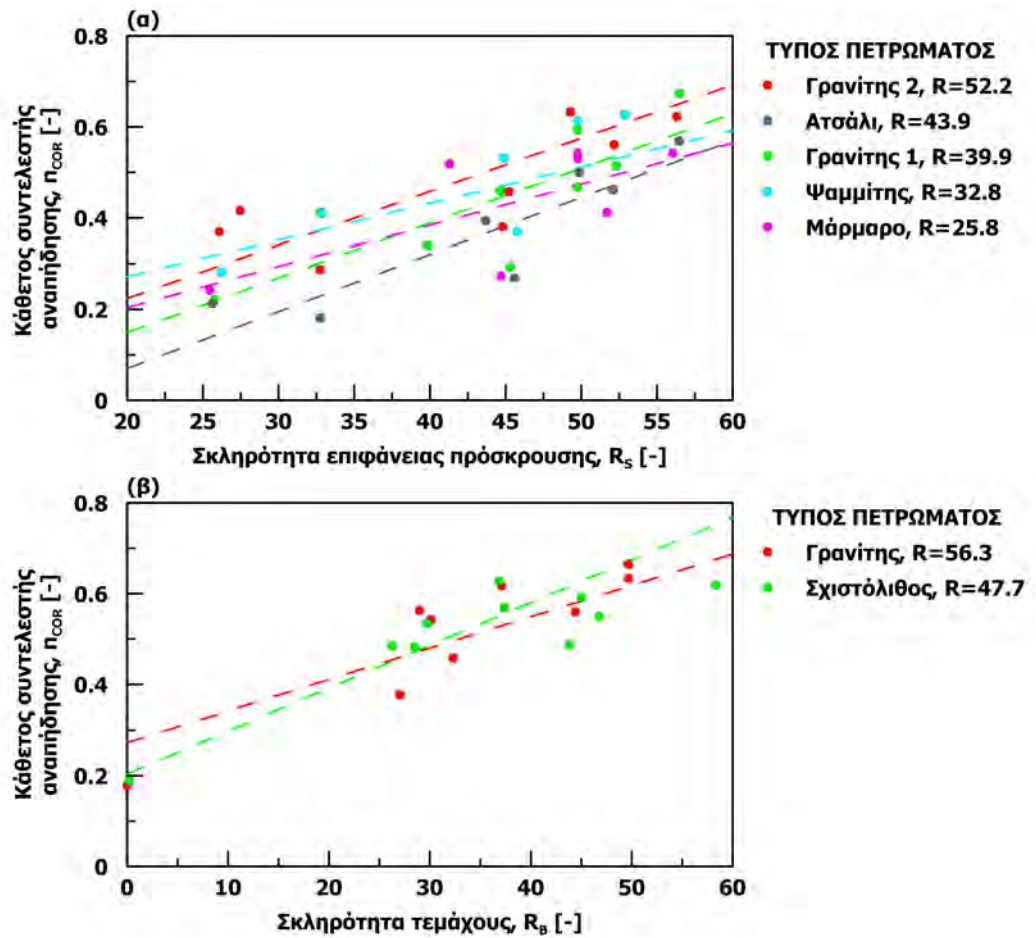
όπου:

R Η σκληρότητα που προσδιορίζεται με τη σφύρα Schmidt της επιφάνειας πρόσκρουσης



Σχήμα 3.22: Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσεως της σκληρότητας σφύρας Schmidt (Rayudu, 1997)

Ο Peng (2000) χρησιμοποίησε 23 φυσικά πετρώματα, τα οποία διαμόρφωσε σε σχεδόν σφαιρικά τεμάχια και κατασκεύασε λείες επιφάνειες πρόσκρουσης από πλάκες πάχους $t = 2.5$ έως 5cm . Εκτέλεσε πλήθος δοκιμών ελεύθερης πτώσης και παραβολικής ρίψης, εξετάζοντας κρούσεις τεμαχίων σε βάσεις είτε από το ίδιο υλικό με το τεμάχος είτε από διαφορετικό. Στο σχήμα 3.23 παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποια από τα αποτελέσματα της εν λόγω πειραματικής διερεύνησης.



Σχήμα 3.23: Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της σκληρότητας κατά την σφύρα Schmidt της επιφάνειας πρόσκρουσης (Peng, 2000)

Ο Peng (2000), βάσει των παραπάνω δεδομένων, αναφέρει ότι ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης αυξάνεται όσο η επιφάνεια πρόσκρουσης και το τεμάχος γίνονται σκληρότερα. Για την ποσοτικοποίηση της σχέσης αυτής κατήρτισε εμπειρικές συσχετίσεις του καθέτου συντελεστή αναπήδησης συναρτήσει της σκληρότητας του τεμάχους, της επιφάνειας πρόσκρουσης και της κλίσης της επιφάνειας.

Από τις δοκιμές ελεύθερης πτώσης, ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης εκτιμάται από την σχέση 3.32 ($R^2 = 0.76$), για τις δοκιμές παραβολικής ρίψης προτείνεται την σχέση 3.33 ($R^2 = 0.74$), ενώ το σύνολο των δοκιμών περιγράφεται από την σχέση 3.34 ($R^2 = 0.82$).

$$n_{COR} = -0.138 + 0.0099R_s + 0.0037R_b \tag{3.32}$$

$$n_{COR} = -0.188 + 0.0074R_s + 0.0031R_b + 0.0041\vartheta \tag{3.33}$$

$$n_{COR} = -0.110 + 0.0092R_s + 0.0039R_b + 0.0036\vartheta \tag{3.34}$$

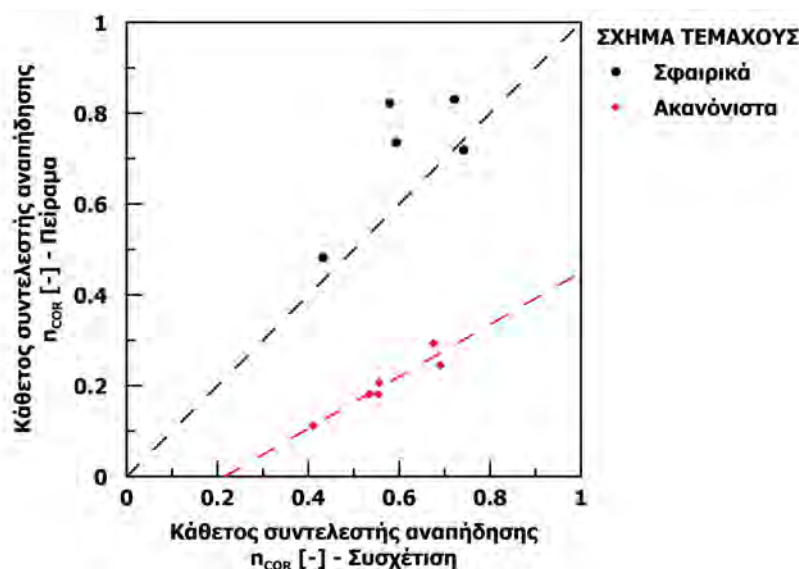
όπου:

R_s Η σκληρότητα κατά Schmidt της επιφάνειας πρόσκρουσης (slab)

R_b Η σκληρότητα κατά Schmidt του τεμάχου (block)

Στην συνέχεια της διερεύνησης χρησιμοποιήθηκαν τεμάχια ακανόνιστου σχήματος ώστε να προσδιοριστεί η δυνατότητα χρήσης των προτεινόμενων συσχετίσεων σε πραγματικές συνθήκες. Στο σχήμα 3.24 παρουσιάζεται ο συντελεστής αναπήδησης που προσδιορίστηκε πειραματικά με αυτόν που αποδίδεται από την προτεινόμενη συσχέτιση για τα σφαιρικά και τα ακανόνιστα τεμάχια.

Από το σχήμα 3.24 προκύπτει ότι ο συντελεστής αναπήδησης που αντιστοιχεί στα σφαιρικά τεμάχια είναι σημαντικά υψηλότερος, περίπου 3 φορές, από αυτόν για τα ακανόνιστα. Αυτό οφείλεται στην περιστροφή του τεμάχου κατά την επαφή του με την επιφάνεια πρόσκρουσης και στην θραύση των ακμών ή των γωνιών του. Αμφότερα οφείλονται στην ακανόνιστη γεωμετρία επαφής και έχουν ως συνέπεια την απώλεια περισσότερης ενέργειας, που οδηγεί σε μικρότερες τιμές του καθέτου συντελεστή αναπήδησης.



Σχήμα 3.24: Σύγκριση πειραματικών και εκτιμώμενων τιμών για σφαιρικά και ακανόνιστα τεμάχια (Peng, 2000)

Στην δημοσίευση των Richards et al. (2001), η σχέση του Peng (2000) για τα σχεδόν σφαιρικά τεμάχια είναι διατυπωμένη ως εξής:

$$n_{COR} = \frac{-110 + 9R_s + 4R_b + 4\vartheta}{1000} \quad (3.35)$$

και για ακανόνιστα τεμάχια:

$$n_{COR} = \frac{-145 + 4R_s + 2R_b + 2\vartheta}{1000} \quad (3.36)$$

Προσφάτως, οι Ansari et al. (2015) πραγματοποίησαν μια παρόμοια εργαστηριακή διερεύνηση, χρησιμοποιώντας επτά πετρώματα. Διαμόρφωσαν σχεδόν σφαιρικά τεμάχια με διάμετρο $d = 4$ έως 5cm και βάσεις πρόσκρουσης πάχους περίπου $t = 5\text{cm}$. Επίσης, χρησιμοποίησαν μεταλλικές σφαίρες και βάσεις για σύγκριση. Τα χαρακτηριστικά των υλικών που εξετάστηκαν παρατίθενται στον πίνακα 3.11.

Πίνακας 3.11: Χαρακτηριστικά της πειραματικής διερεύνησης των Ansari et al. (2015)

Υλικό	Σκληρότητα σφύρας Schmidt		Κάθετος συντ. αναπήδησης $n_{COR}[-]$
	Βάση $R_s[-]$	Τέμαχος $R_b[-]$	
Βασάλτης	50.5	48.5/49.5	0.33
Γρανίτης	54	49.0/50.0	0.42
Ψαμμίτης	38.5	24.5/25.0	0.29
Ασβεστόλιθος	42.5	27.5/33.5	0.41
Μάρμαρο	44.5	36.5/37.0	0.43
Φυλλίτης	-	21.0/40.0	-
Χαλαζίτης	-	39.5/40.0	-
Ατσάλι	47.5	43.5/51.0	0.34

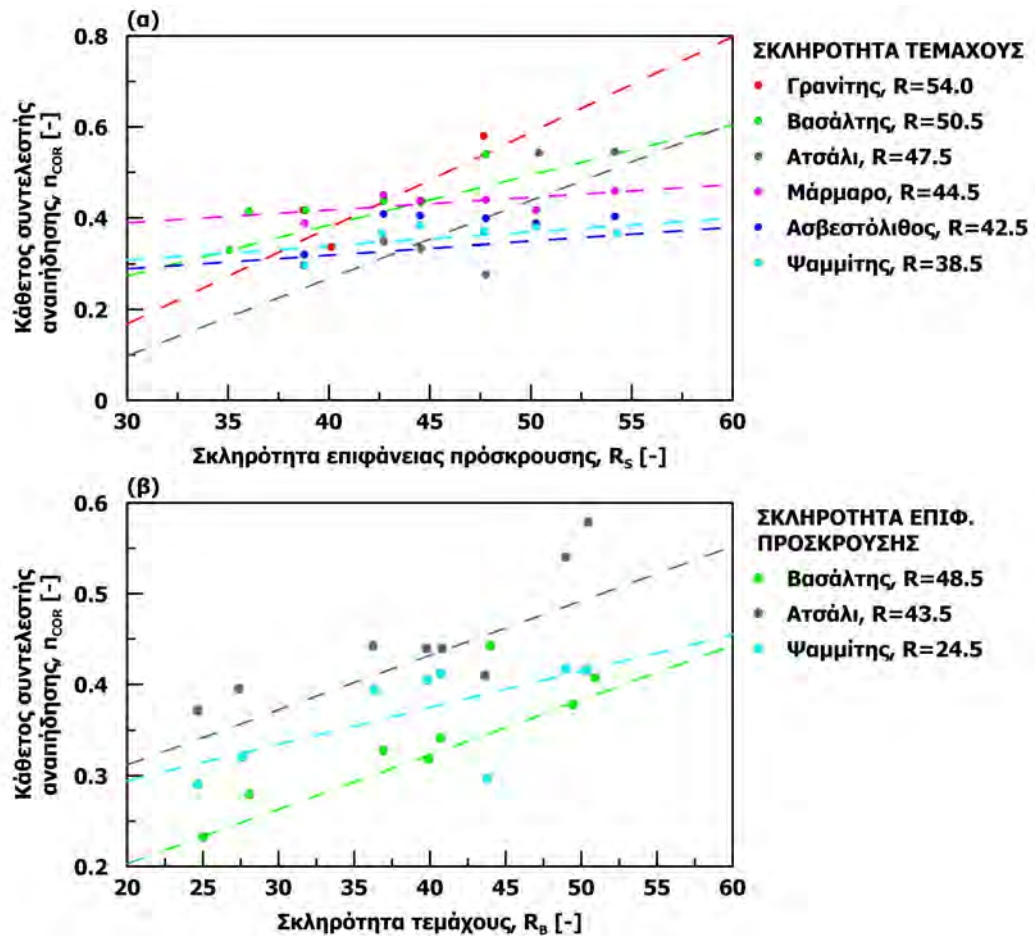
Στο σχήμα 3.25-α παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για κρούσεις τεμαχών σε βάσεις διαφορετικής σκληρότητας και στο σχήμα 3.25-β για κρούσεις τεμαχών διαφορετικής σκληρότητας στην ίδια βάση. Οι Ansari et al. (2015) συμπεραίνουν ότι η απόκριση στην κρούση καθορίζεται τόσο από το υλικό του τεμαχούς όσο και της βάσης. Επίσης, επιβεβαιώνουν ότι όσο σκληρότερο το υλικό τόσο μεγαλύτερος είναι ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης, ενώ ο εφαιπομενικός συντελεστής δεν παρουσιάζει κάποια εξάρτηση από την σκληρότητα.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.25 υπάρχει αυξημένη διασπορά στις τιμές του καθέτου συντελεστή αναπήδησης, η οποία αποδίδεται από τους συγγραφείς στην μη κανονικότητα του σχήματος των τεμαχών ή στην ατελή στήριξη της βάσης πρόσκρουσης.

Βάσει των αποτελεσμάτων της διερεύνησης προτείνουν μια σχέση, αντίστοιχη των Richards et al. (2001), από όπου προκύπτει ότι το υλικό της βάσης επιδρά 2.5 φορές περισσότερο στην αναπήδηση από ότι το υλικό του τεμαχούς.

$$n_{COR} = -0.215 + 0.0183R_s - 0.007R_b \quad (3.37)$$

Η σχέση 3.37, σε αντίθεση με την προτεινόμενη συσχέτιση 3.35 των Richards et al. (2001), έχει θετικό συντελεστή για την σκληρότητα της επιφάνειας πρόσκρουσης και αρνητικό για την σκληρότητα του τεμαχούς. Αυτό σημαίνει ότι για δεδομένη σκληρότητα βάσης, η αναπήδηση ενός σκληρότερου τεμαχούς θα είναι λιγότερη συγκριτικά με ένα μαλακότερο, γεγονός που είναι αντικρουόμενο με τις αρχές της μηχανικής που περιγράφουν την κρούση.



Σχήμα 3.25: Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσεως της σκληρότητας σφύρας Schmidt: (α) της επιφάνειας πρόσκρουσης και (β) του τεμάχου (Ansari et al., 2015)

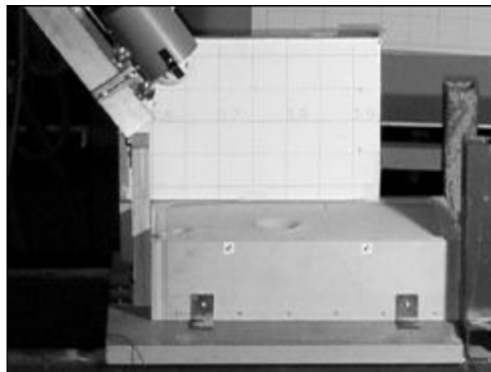
Σε κάθε περίπτωση πάντως, παρατηρείται κάποια μη συμβατότητα στα αποτελέσματα της παραπάνω έρευνας. Πιο συγκεκριμένα, στο σχήμα 3.25-β οι γραμμές τάσεις τριών υλικών (γρανίτης, μάρμαρο και ατσάλι) αποδίδουν αρνητικές τιμές για τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης για μικρή σκληρότητα. Επίσης, οι γραμμές τάσης δεν είναι μεταξύ τους συμβατές, αφού υλικό μικρότερης σκληρότητας (ψαμμίτης) εμφανίζει συστηματικά μεγαλύτερους συντελεστές αναπήδησης σε σχέση με τον ασβεστόλιθο (που είναι σκληρότερος με βάση τις τιμές κατά τη σφύρα Schmidt - πίνακας 3.11). Αντίστοιχο πρόβλημα παρουσιάζεται και στο σχήμα 3.25-β, με τα τεμάχια ψαμμίτη να εμφανίζουν μεγαλύτερες τιμές του καθέτου συντελεστή αναπήδησης από τον βασάλτη, ο οποίος όμως έχει σχεδόν την διπλάσια σκληρότητα.

Τα παράδοξα αυτά δύναται να ερμηνευθούν συνεκτιμώντας την γωνία πρόσκρουσης, που όπως παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.3.1 έχει σημαντική επίδραση. Ενώ οι ερευνητές έχουν τοποθετήσει τις επιφάνειες πρόσκρουσης με διαφορετική κλίση, δεν έχουν συμπεριλάβει την επίδραση της στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

3.3.3 Κρούση σε επιφάνεια με εδαφικό υλικό

Όταν η επιφάνεια πρόσκρουσης καλύπτεται από εδαφικό υλικό τότε αναμένεται διείσδυση του τεμάχους σε αυτό. Έτσι, η παραμόρφωση της επιφάνειας πρόσκρουσης είναι μόνιμη και εμφανίζει την μορφή κρατήρα. Στην περίπτωση αυτή, η απώλεια ενέργειας είναι μεγαλύτερη, συγκριτικά με μια πρόσκρουση ενός ίδιου τεμάχους με τις ίδιες συνθήκες πρόσκρουσης σε επιφάνεια βράχου.

Για την μελέτη της κρούσης σε εδαφικό υλικό, οι Heidenreich (2004) και Labiouse and Heidenreich (2009) προέβησαν σε μια πειραματική διερεύνηση στο εργαστήριο, που επαναλήφθηκε υπό ελεγχόμενες συνθήκες σε μεγαλύτερη κλίμακα (οιονεί δοκιμές πεδίου). Στο εργαστήριο, χρησιμοποίησαν ένα κιβώτιο που πληρωνόταν με αμμώδες υλικό (Σχήμα 3.26) και είχε την δυνατότητα να εγκατασταθεί σε οριζόντια ή κεκλιμένη θέση. Ως τεμάχια χρησιμοποιήθηκαν σφαιρικά δοκίμια διαμέτρου $d = 7.5\text{cm}$, από διαφορετικά υλικά ώστε η μάζες τους να είναι $m = 130, 380$ και 750g . Η απελευθέρωση των τεμαχίων έγινε με ελεύθερη πτώση ή με παραβολική ρίψη, χρησιμοποιώντας δυο κατάλληλους μηχανισμούς. Η ταχύτητα των τεμαχίων κατά την πρόσκρουση ήταν $v_i = 4.4\text{ms}^{-1}$ που ισοδυναμεί με την ελεύθερη πτώση από ύψος $h_D = 1\text{m}$.



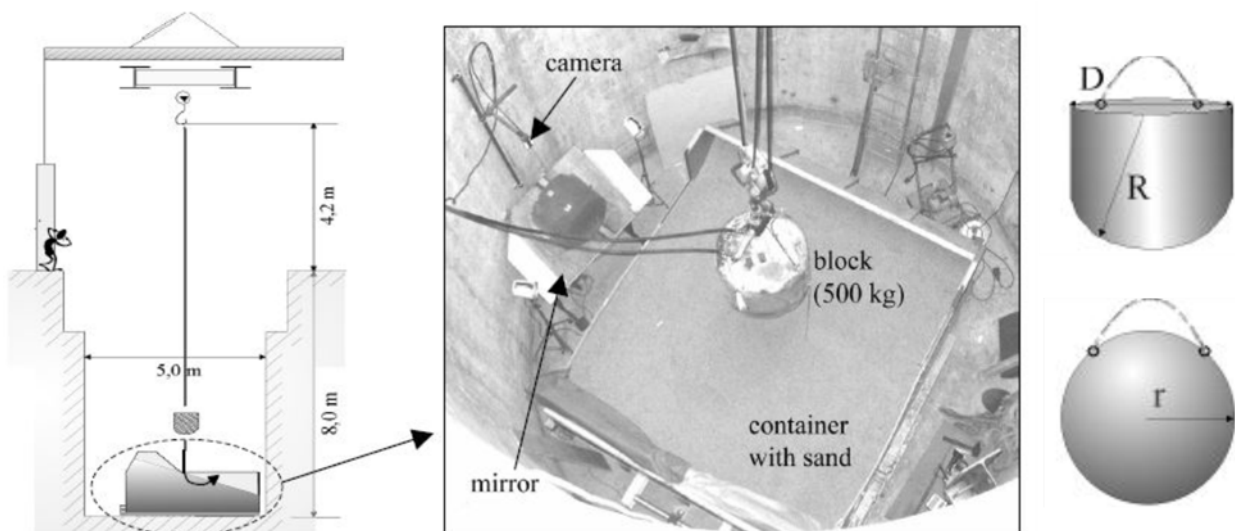
Σχήμα 3.26: Πειραματική διάταξη για την μελέτη κρούσης σε εδαφικό υλικό (Heidenreich, 2004), διακρίνεται το κιβώτιο πληρωμένο με αμμώδες υλικό και ο μηχανισμός απελευθέρωσης για παραβολική ρίψη

Η κίνηση των τεμαχίων καταγράφηκε από μια φωτομηχανή υψηλής ταχύτητας που ήταν εγκατεστημένη κάθετα στο επίπεδο της κίνησης των τεμαχίων. Στην συνέχεια έγινε η ανάλυση των καταγραφών με εξειδικευμένο λογισμικό ανάλυσης εικόνας, αποκομίζοντας τις συντεταγμένες του τεμάχους σε κάθε θέση, βάσει των οποίων έγινε η ανασύνθεση της τροχιάς, ο προσδιορισμός των ταχυτήτων (μεταθετική και περιστροφική) πριν και μετά την κρούση και τελικά ο υπολογισμός των αντίστοιχών συντελεστών αναπήδησης.

Εξετάσθηκε η επίδραση διαφόρων παραμέτρων στην αναπήδηση του τεμάχους, όπως: της γωνίας εσωτερικής τριβής, του βαθμού συμπίκνωσης του αμμώδους υλικού, της κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης, της μάζας του τεμάχους, της γωνίας πρόσκρουσης κ.α. Τα βασικότερα συμπεράσματα που εξήχθησαν από το εργαστηριακό σκέλος της διερεύνησης είναι:

- η απόκριση του τεμάχους στην κρούση και η μετέπειτα τροχιά του εξαρτώνται κυρίως από το βαθμό συμπύκνωσης του αμμώδους υλικού, που αποτελεί εν γένει ένα μέτρο παραμόρφωσης, και λιγότερο από τη γωνία εσωτερικής τριβής
- η αύξηση του μάζας του οδηγεί στην σημαντική μείωση της αναπήδησης, επομένως και του αντίστοιχου συντελεστή αναπήδησης
- η περιστροφική συνιστώσα της κίνησης μετά την κρούση αυξάνεται με την μείωση της γωνίας πρόσκρουσης, δηλαδή όσο πιο εφαπτομενική γίνεται η πρόσκρουση, ενώ όταν το τεμάχος προσκρούει κάθετα η αναπήδηση περιορίζεται.

Οι δοκιμές μέσης κλίμακας εκτελέστηκαν σε ένα φρέαρ βάθους 5m και διαμέτρου 8m. Χρησιμοποιήθηκαν σφαιρικά τεμάχη και κυλινδρικά με σφαιρική βάση (σχήμα 3.27), με μάζα από $m = 100$ έως 1000kg . Η απελευθέρωση των τεμαχών έγινε με γερανό, από ύψος έως 10m. Το υλικό στο οποίο γινόταν η πρόσκρουση είχε πάχος $t = 1\text{m}$ και ήταν εγκιβωτισμένο σε κατάλληλη βάση που είχε δυνατότητα εγκατάστασης υπό γωνία έως και $\vartheta = 30^\circ$.



Σχήμα 3.27: Πειραματική διάταξη για τις δοκιμές μέσης κλίμακας Heidenreich (2004), αριστερά φαίνεται η καθ' ύψος τομή του φρέατος, στο μέσο μια άποψη του εσωτερικού του λίγο πριν την εκτέλεση μιας δοκιμής και δεξιά παρουσιάζονται τα τεμάχη που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές

Η αύξηση της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης επηρεάζει τους συντελεστές αναπήδησης σε συνδυασμό με το σχήμα του τεμάχους. Πιο συγκεκριμένα, για τα κυλινδρικά τεμάχη ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης αυξάνεται απότομα για γωνίες κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης μεγαλύτερες των $\vartheta = 20^\circ$, ενώ ο εφαπτομενικός αυξάνεται για γωνίες έως $\vartheta = 20^\circ$ και στην συνέχεια σταθεροποιείται. Αντιθέτως, στα σφαιρικά τεμάχη, ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης, ενώ ο εφαπτομενικός διατηρείται σταθερός. Τέλος, ο ενεργειακός συντελεστής αναπήδησης αυξάνεται με την αύξηση της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης ανεξαρτήτως του σχήματος του τεμάχους.

Όσο μεγαλύτερη είναι η μάζα του τεμάχους, τόσο αυξάνει το βάθος διείσδυσης στο εδαφικό υλικό. Κατά συνέπεια, οι πλαστικές παραμορφώσεις εκτείνονται σε μεγαλύτερη επιφάνεια και η απώλεια ενέργειας είναι περισσότερη. Η αναπτυσσόμενη γωνιακή ταχύτητα μετά την κρούση είναι λιγότερη στα σφαιρικά δοκίμια από ότι στα κυλινδρικά, γεγονός που αποδίδεται στην μεγαλύτερη εκκεντρότητα που υπάρχει μεταξύ του σημείου επαφής και του κέντρου βάρους τους.

3.3.4 Προσαρμογή συντελεστών αναπήδησης στα κινηματικά χαρακτηριστικά της κρούσης

Η αναπήδηση του τεμάχους και κατ' επέκταση οι συντελεστές αναπήδησης εξαρτώνται από το πόσο ισχυρή είναι η πρόσκρουση. Στην βιβλιογραφία οι διαθέσιμες μεθοδολογίες προσαρμογής των συντελεστών αναπήδησης στα κινηματικά χαρακτηριστικά της κρούσης βασίζονται κυρίως σε εμπειρικές παρατηρήσεις. Παρακάτω παρατίθενται οι εν λόγω μέθοδοι.

3.3.4.1 Προσαρμογή με βάση της ταχύτητας πρόσκρουσης

Η πλέον διαδεδομένη μεθοδολογία έχει προταθεί από τους Pfeiffer and Bowen (1989), μέσω του λογισμικού CRSP. Η μεθοδολογία αυτή έχει τύχει ευρείας αποδοχής και συναντάται στο σύνολο σχεδόν των λογισμικών προσομοίωσης των καταπτώσεων (λ.χ. RocFall, RockyFor3d, Rockfall κ.α.).

Θεωρώντας ότι ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης που θα χρησιμοποιηθεί σε μια ανάλυση λαμβάνεται από τις προτεινόμενες στην βιβλιογραφία τιμές, οι Pfeiffer and Bowen (1989) όρισαν τον συντελεστή προσαρμογής B_v , με τον οποίο πολλαπλασιάζεται η προτεινόμενη τιμή του καθέτου συντελεστή αναπήδησης, ως:

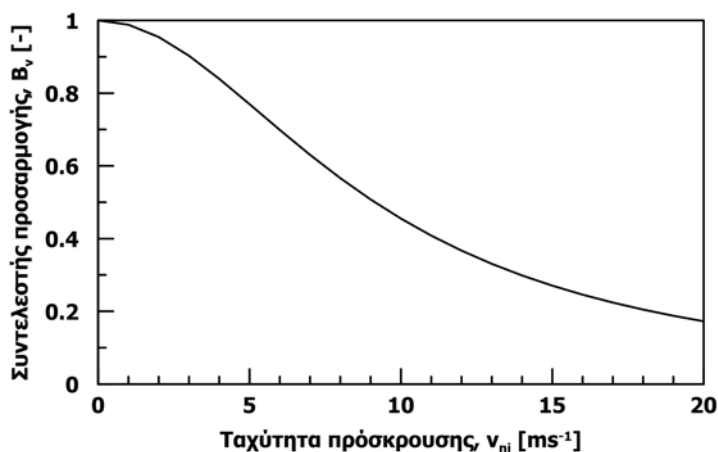
$$B_v = \frac{1}{1 + (v_{i,n}/v_{ref})^2} \quad (3.38)$$

όπου:

B_v συντελεστής προσαρμογής βάσει της ταχύτητας πρόσκρουσης

v_{ref} ταχύτητα αναφοράς, ίση με 9.14ms^{-1}

Η σχέση 3.38 αποδίδει μια σιγμοειδή καμπύλη που είναι ασυμπτωτική ως προς την ταχύτητα πρόσκρουσης. Ο συντελεστής προσαρμογής B_v λαμβάνει τιμή 0.5 όταν η ταχύτητα πρόσκρουσης ισούται με την ταχύτητα αναφοράς v_{ref} . Παρόλα αυτά, η τεκμηρίωση της τιμής που προτείνεται ταχύτητα αναφοράς είναι ανεπαρκής (Bourrier and Hungr, 2011).



Σχήμα 3.28: Συντελεστής προσαρμογής του καθέτου συντελεστή αναπήδησης συναρτήσει της ταχύτητας πρόσκρουσης (Pfeiffer and Bowen, 1989)

Στο λογισμικό CRSP γίνεται επίσης προσαρμογή του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης βάσει της κατακόρυφη συνιστώσας της ταχύτητας του τεμάχους, από την σχέση:

$$B_{vT} = \frac{1}{1 + (v_{i,n}/v_{T,ref})^2} \quad (3.39)$$

όπου:

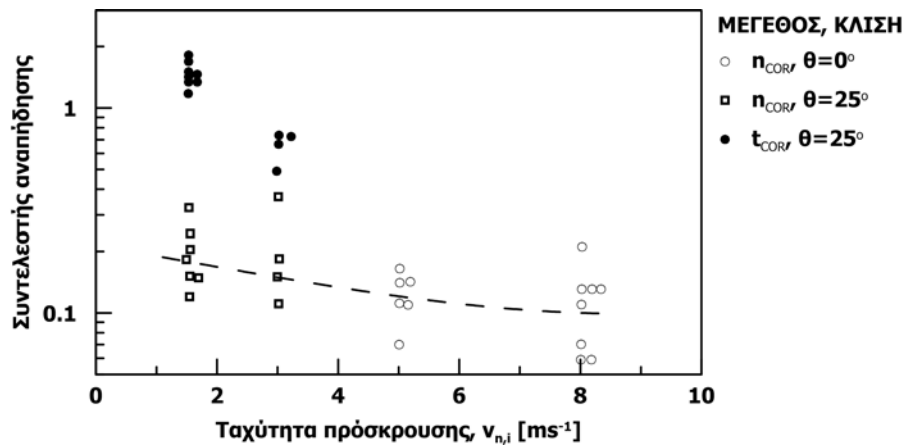
B_{vT} συντελεστής προσαρμογής του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης

$v_{T,ref}$ ταχύτητα αναφοράς, ίση με $15.2ms^{-1}$

Η λογική στην χρήση της κάθετης συνιστώσας της ταχύτητας για την προσαρμογή του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης έγκειται στην θεωρία του Coulomb. Πιο συγκεκριμένα, η αναπτυσσόμενη τριβή καθορίζεται από την κατακόρυφη δύναμη, η οποία αυξάνεται με την αύξηση της κατακόρυφης συνιστώσας της ταχύτητας. Συνεπώς, με την αύξηση της ταχύτητας πρόσκρουσης αυξάνεται η τριβή, που περιορίζει την εφαπτομενική ταχύτητα με αποτέλεσμα ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης να λαμβάνει μικρότερες τιμές. Παρόλα αυτά, η σχέση 3.3.4.1 στερείται τεκμηρίωσης, τόσο όσον αφορά στην μέθοδο εξαγωγής της όσο και στην τιμή που προτείνεται ως ταχύτητα αναφοράς.

Ο Urciuoli (1988) εκτέλεσε δοκιμές ελεύθερης πτώσης σε ασβεστολιθική επιφάνεια πρόσκρουσης χρησιμοποιώντας ασβεστολιθικά τεμάχια ακανόνιστου σχήματος. Παρατήρησε ότι οι συντελεστές αναπήδησης εξαρτώνται από την κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης, το ύψος απελευθέρωσης, το σχήμα του τεμάχους και τον προσανατολισμό του κατά την επαφή. Τόσο ο κάθετος όσο και εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης μειώνονται με την αύξηση της ταχύτητας πρόσκρουσης, με τον εφαπτομενικό να είναι πιο ευαίσθητος συγκριτικά με τον κάθετο. Επίσης παρατήρησε ότι μέρος της κάθετης ενέργεια πριν την κρούση ανακατανέμεται σε εφαπτομενική, γεγονός που οφείλεται στο σχήμα του τεμάχους και στον προσανατολισμό

του κατά την επαφή, με αποτέλεσμα να προκύπτουν συντελεστές αναπήδησης μεγαλύτεροι της μονάδος.



Σχήμα 3.29: Κάθετος και εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της ταχύτητας πρόσκρουσης και της κλίσης της επιφανείας (Urciuoli, 1988)

Οι Peng (2000) και Richards et al. (2001) συνεχίζοντας την διερεύνηση του τύπου του πετρώματος που διεξήγαγαν (βλ. ενότητα 3.3.2), απελευθέρωσαν τεμάχια από ύψη $h_D = 0.6$ έως $3m$ ώστε η ταχύτητα πρόσκρουσης να κυμαίνεται από $v_i = 3.4$ έως $7.7ms^{-1}$ και βαθμονόμησαν την σχέση 3.38 προτείνοντας ως αντιπροσωπευτικότερη τιμή της ταχύτητας αναφοράς την $v_{ref} = 5ms^{-1}$.

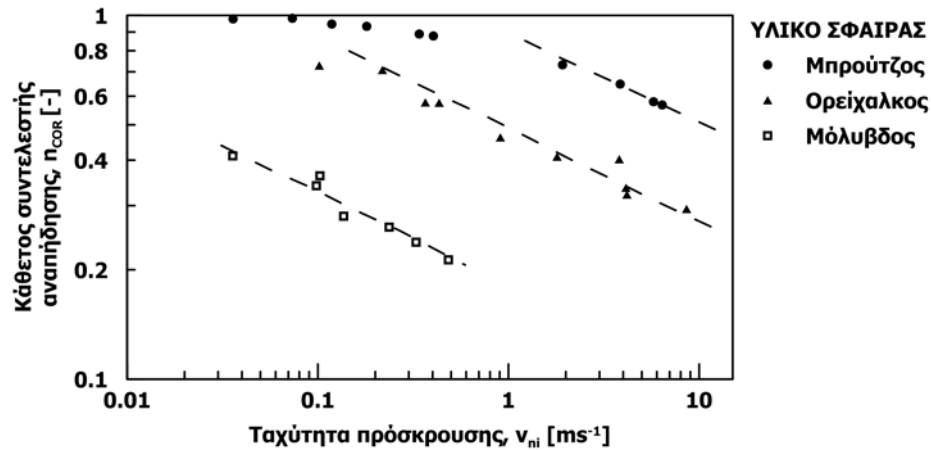
Οι Rammer et al. (2010) πρότειναν η προσαρμογή του καθέτου συντελεστή αναπήδησης να γίνεται με τον συντελεστή k (σχέση 3.40), εφόσον η ταχύτητα πρόσκρουσης είναι μεγαλύτερη των $v_{n,i} > 10ms^{-1}$.

$$k = \begin{cases} 1 & v_i \leq 10ms^{-1} \\ 10^{0.25} v_{n,i}^{-0.25} & v_i > 10ms^{-1} \end{cases} \quad (3.40)$$

Η λογική της σχέσης 3.40 είναι πως οι τιμές των συντελεστών αναπήδησης που προτείνονται στην βιβλιογραφία εμπεριέχουν την επίδραση της ταχύτητας πρόσκρουσης, αφού προέρχονται κυρίως από πειραματικές διερευνήσεις που έχουν εκτελεστεί με ταχύτητες πρόσκρουσης έως $v_{n,i} = 10ms^{-1}$. Η σχέση που προτείνουν, για ταχύτητες μεγαλύτερες των $10ms^{-1}$, αποτελεί παραλλαγή της σχέσης 3.41, που προέρχεται από την θεωρία κρούσεων Johnson (1985).

$$v_{COR} = v_i^{-0.25} \quad (3.41)$$

Η σχέση 3.41 εξήχθη από τον Johnson (1985), χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα πειραματικής διερεύνησης που διενεργήθηκε από τον Goldsmith (1960). Στις εν λόγω δοκιμές (Σχήμα 3.30) πραγματοποιήθηκαν ρίψεις με ελεύθερη πτώση σφαιρικών τεμαχίων από μέταλλο σε οριζόντια επιφάνεια πρόσκρουσης.



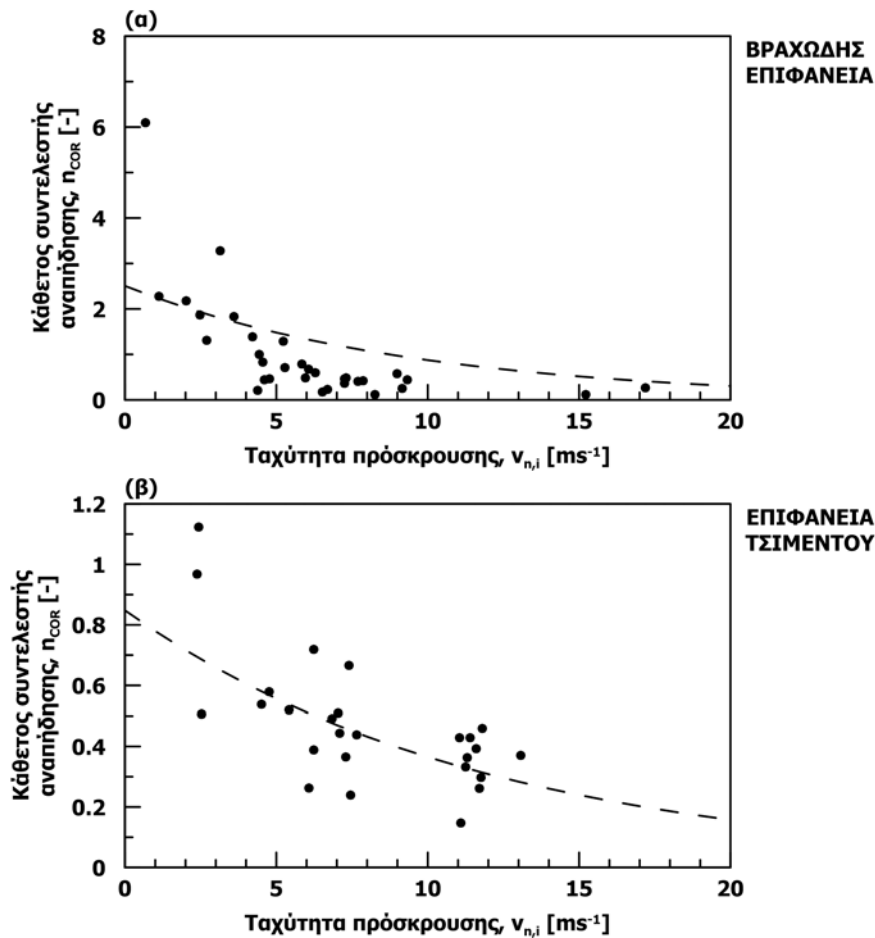
Σχήμα 3.30: Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της ταχύτητας πρόσκρουσης (Johnson, 1985). Οι σφαίρες από μπρούτζο είναι οι σκληρότερες και του μολύβδου οι μαλακότερες

Οι Ushiro et al. (2000) εκτέλεσαν εργαστηριακές δοκιμές σε επιφάνειες πρόσκρουσης από βραχώδες υλικό και τσιμέντο. Παρατήρησαν ότι ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης δεν επηρεάζεται από την ταχύτητα πρόσκρουσης. Αντιθέτως, ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης μειώνεται με την αύξηση της ταχύτητας πρόσκρουσης εκθετικά και εξαρτάται από το υλικό της επιφάνειας πρόσκρουσης. Επίσης, αναφέρουν ότι ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης μειώνεται με την αύξηση της μάζας του τεμάχου, ανεξαρτήτως της ταχύτητας πρόσκρουσης. Οι σχέσεις 3.42 και 3.43 περιγράφουν την σχέση ταχύτητας πρόσκρουσης με τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης για επιφάνειες πρόσκρουσης από βραχώδες υλικό και τσιμέντο αντίστοιχα.

$$n_{COR} = 2.506e^{-0.1053(-v_{n,i})} \quad (3.42)$$

$$n_{COR} = 0.847e^{-0.0842(-v_{n,i})} \quad (3.43)$$

Οι παραπάνω σχέσεις και τα σημεία από τα οποία έχουν προκύψει, παρουσιάζονται στο σχήμα 3.31. Οι προτεινόμενες συσχετίσεις δεν είναι ικανοποιητικές, αφού ο συντελεστής συσχέτισης R^2 είναι 0.41 και 0.47 αντίστοιχα. Επίσης έχουν προσδιοριστεί τιμές του καθέτου συντελεστή αναπήδησης μεγαλύτερες της μονάδας, οι οποίες συγκεντρώνονται στις χαμηλότερες ταχύτητες πρόσκρουσης που επιβλήθηκαν κατά την διερεύνηση. Ειδικότερα, για την βραχώδη επιφάνεια πρόσκρουσης οι τιμές που προσδιορίστηκαν ήταν ακόμα και μεγαλύτερες από $n_{COR} > 6$.



Σχήμα 3.31: Εξάρτηση του καθέτου συντελεστή αναπήδησης από την ταχύτητα πρόσκρουσης, για κρούση: (α) σε επιφάνεια βράχου και (β) σε επιφάνεια από τσιμέντο (Ushiro et al., 2000)

3.3.4.2 Προσαρμογή με βάση την μάζα του τεμάχους

Όταν η ταχύτητα πρόσκρουσης είναι σταθερή, η ένταση της κρούσης καθορίζεται από την μάζα του τεμάχους. Όπως έχει παρατηρηθεί από πολλούς ερευνητές (Ushiro et al., 2000; Bourrier and Hungr, 2011, κ.α.), η αύξηση της μάζας οδηγεί στην μείωση των συντελεστών αναπήδησης. Όμως, στην βιβλιογραφία η σχέση αυτή δεν έχει ποσοτικοποιηθεί, με αποτέλεσμα να μην εφαρμόζεται στην πράξη προσαρμογή των συντελεστών στην μάζα του τεμάχους.

Στο λογισμικό RocFall της εταιρείας RocScience συναντάται η σχέση 3.44, ως εναλλακτική της προσαρμογής του καθέτου συντελεστή αναπήδησης στην ταχύτητα πρόσκρουσης (Σχέση 3.38).

$$B_m = \frac{1}{1 + (m/m_{ref})^2} \tag{3.44}$$

όπου:

B_m συντελεστής προσαρμογής βάσει της μάζας του τεμάχους

m_{ref} μάζα αναφοράς

Ως μάζα αναφοράς ορίζεται εκείνη που προκαλεί μείωση της βιβλιογραφικά προτεινόμενης τιμής του συντελεστή αναπήδησης κατά 50%. Ωστόσο, δεν προτείνεται κάποια τιμή για την μάζα αναφοράς, ούτε δίνεται περαιτέρω τεκμηρίωση της μεθόδου εξαγωγής της σχέσης αυτής. Επίσης, επισημαίνεται από τους κατασκευαστές του λογισμικού, ότι η σύγχρονη εφαρμογή των δυο σχέσεων προσαρμογής, δηλαδή της ταχύτητας και της μάζας, πρέπει να αποφεύγεται καθώς οδηγεί στην υποεκτίμηση της αναπήδησης και στη μη ορθολογική προσομοίωση της τροχιάς του τεμάχους (RocScience, 2003).

Ωστόσο, οι Ferrari et al. (2013), πραγματοποιώντας δοκιμές πεδίου, δεν παρατήρησαν διαφοροποίηση του καθέτου συντελεστή αναπήδησης με την αύξηση της μάζας του τεμάχους.

3.3.4.3 Προσαρμογή με βάση την ορμή του τεμάχους

Οι Bourrier and Hungr (2011), βασιζόμενοι στην διαίσθηση, πρότειναν ότι η προσαρμογή του καθέτου συντελεστή αναπήδησης να γίνεται σύμφωνα με την ορμή που έχει το τέμαχος την στιγμή της κρούσης, σύμφωνα με μια σχέση της μορφής:

$$k = \frac{M_{0.5}}{M_{0.5} + M_i} \quad (3.45)$$

όπου:

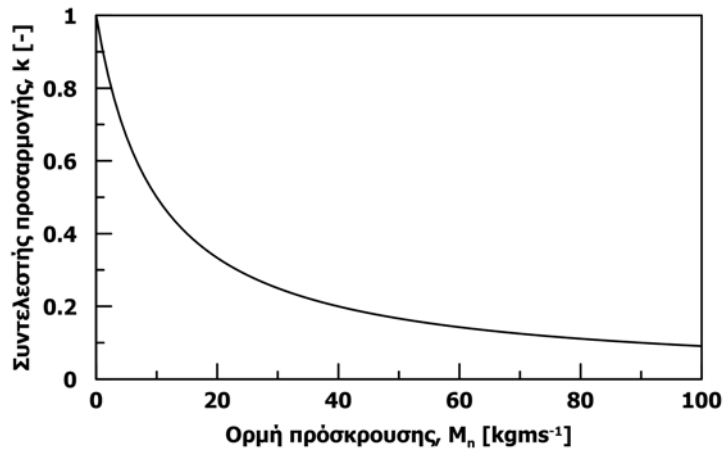
k συντελεστής προσαρμογής βάσει της ορμής πρόσκρουσης

$M_{0.5}$ ορμή αναφοράς

M_i ορμή τεμάχους κατά την κρούση

Η ορμή αναφοράς ορίζεται ως αυτή που οδηγεί σε 50% μείωση του καθέτου συντελεστή αναπήδησης, σε αντιστοιχία με την σχέση των Pfeiffer and Bowen (1989). Όμως, ούτε και σε αυτή την περίπτωση δίνεται προτεινόμενη τιμή για την ορμή αναφοράς. Η σχέση αυτή έχει μια υπερβολική μορφή και είναι σε συμφωνία με τις αρχές της μηχανικής των κρούσεων. Δηλαδή, ισούται με μονάδα σε κρούσεις πολύ μικρής έντασης και μηδέν σε έντονες κρούσεις, όπου το σύνολο της ενέργειας καταναλώνεται σε πλαστικές παραμορφώσεις.

Στο σχήμα 3.32 παρουσιάζεται η μορφή της καμπύλης προσαρμογής για εύρος από 0 έως $100kgms^{-1}$ θεωρώντας, αυθαίρετα, την ορμή αναφοράς να ισούται με $M_{0.5} = 10kgms^{-1}$.



Σχήμα 3.32: Προσαρμογή του κάθετου συντελεστή αναπήδησης συναρτήσει της ορμής πρόσκρουσης (Bourrier and Hungr, 2011)

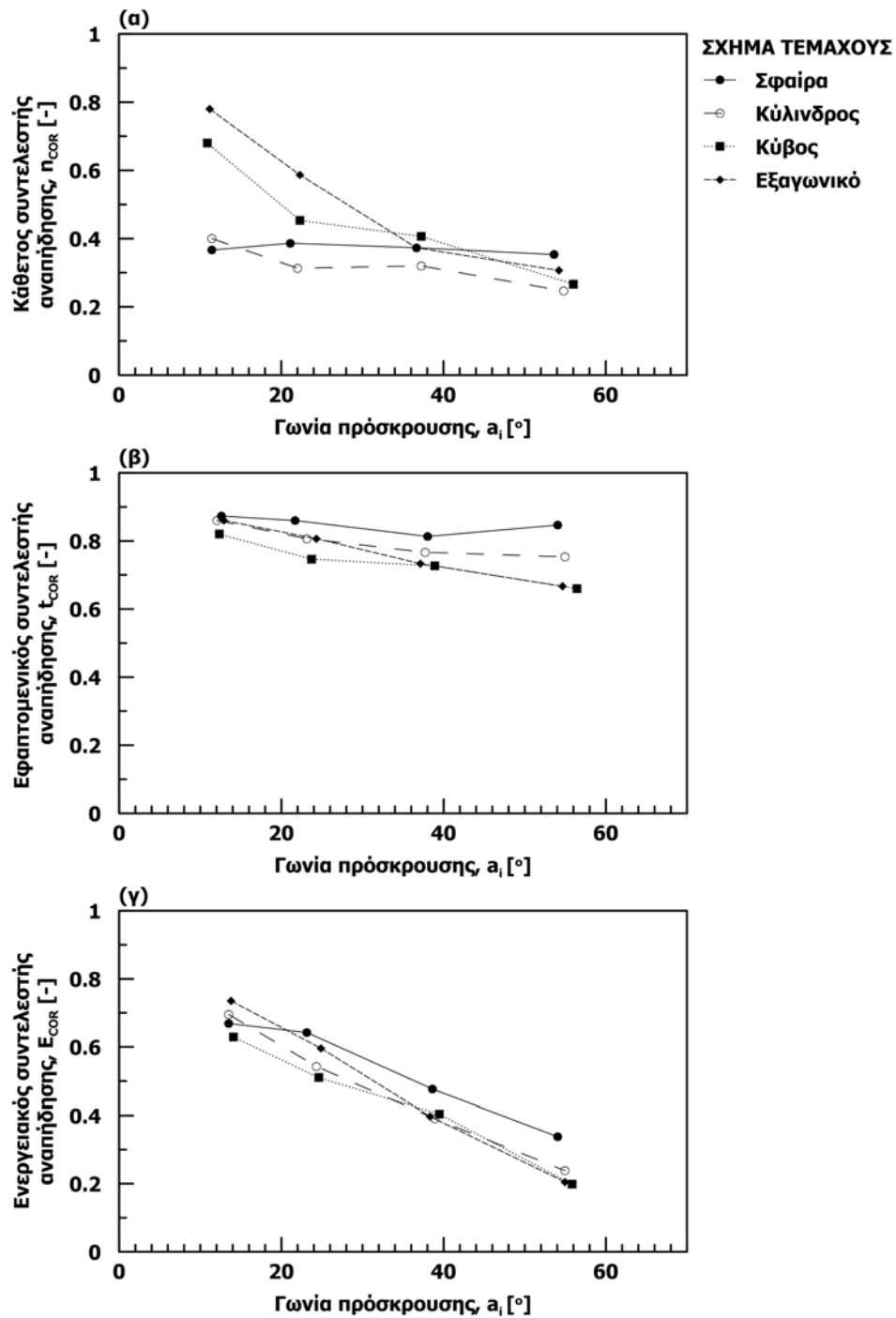
3.3.5 Επίδραση του σχήματος του τεμάχου

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως (ενότητα 3.3.2), στην έρευνα του Peng (2000) προέκυψε ότι τα τεμάχια ακανόνιστου σχήματος εμφανίζουν περίπου 3 φορές μικρότερο κάθετο συντελεστή αναπήδησης από ότι τα σφαιρικά για παρόμοιες συνθήκες κρούσης. Σύμφωνα με τον C. Jones et al. (2000) το σχήμα του τεμάχου είναι η βασική αιτία για την τυχαιότητα της αναπήδησης και την μετατροπή μέρους της κινητικής του ενέργειας σε περιστροφική, μέσω της τριβής που αναπτύσσεται με την επιφάνεια πρόσκρουσης.

Οι Chau et al. (1999) εκτέλεσαν δοκιμές με τεμάχια από γρανιτικό πέτρωμα και επιφάνειες πρόσκρουσης από βράχο, έδαφος και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα που βρίσκονταν υπό κλίση $\vartheta = 25$ έως 30° . Τα τεμάχια απελευθερώνονταν από ύψος περίπου $h_D = 1m$, είχαν μέση διάσταση 3 έως 5cm και ήταν διαμορφωμένα ως σφαιρικά, κυλινδρικά, κυβικά και εξαγωνικά.

Στο σχήμα 3.33 παρουσιάζεται η επίδραση του σχήματος του τεμάχου σε συνδυασμό με την γωνία πρόσκρουσης. Επισημαίνεται ότι στο διάγραμμα που παρουσιάζεται στην δημοσίευση των Chau et al. (1999), ως γωνία πρόσκρουσης λαμβάνεται η γωνία μεταξύ της διεύθυνσης της ταχύτητας και της κατακόρυφου. Αντιθέτως, στο σχήμα 3.33 που αναπαράγεται εδώ, έχει γίνει αναγωγή στην σύμβαση που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία (βλ. σχήμα 3.13).

Σύμφωνα με τους Chau et al. (1999), ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης είναι ανεξάρτητος της γωνίας πρόσκρουσης για τα σφαιρικά δοκίμια, κάτι που ισχύει επίσης ανεξαρτήτου σχήματος για γωνίες πρόσκρουσης μεταξύ $\alpha_i = 40$ και 60° . Για γωνίες πρόσκρουσης μικρότερες των $\alpha_i = 30^\circ$, ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές για τα εξαγωνικά δοκίμια που μειώνονται όσο το σχήμα τείνει στο σφαιρικό. Ο εφαιπτομενικός συντελεστής αναπήδησης δεν επηρεάζεται από την γωνία πρόσκρουσης ή από το σχήμα του τεμάχου. Επίσης, ο ενεργειακός συντελεστής αναπήδησης φαίνεται να μην επηρεάζεται από το σχήμα και μειώνεται με την αύξηση της γωνίας πρόσκρουσης.



Σχήμα 3.33: Επίδραση σχήματος στους συντελεστές αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης (Chau et al., 1999)

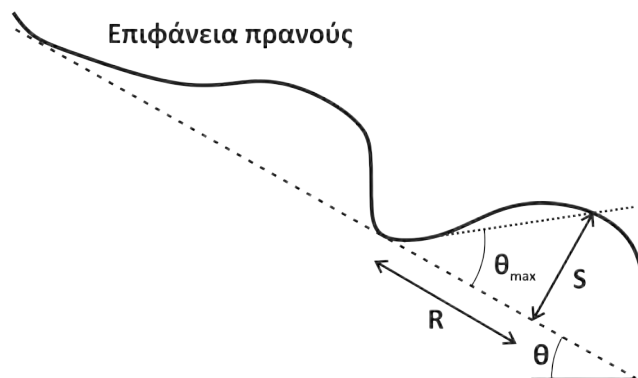
Ωστόσο, το γεγονός ότι ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης εμφανίζει διαφορετική συμπεριφορά από τον ενεργειακό είναι αντικρουόμενο. Δεδομένου ότι ο ενεργειακός ισούται με την ρίζα του καθέτου συντελεστή αναπήδησης, θα έπρεπε να παρατηρείται μεταξύ τους παρόμοια τάση καθώς δεν έχει συνεκτιμηθεί η γωνιακή ταχύτητα στην εν λόγω έρευνα.

3.3.6 Επίδραση του μεγέθους του τεμάχου

Το μέγεθος του τεμάχου, άρα η μάζα του, επηρεάζει την αναπήδηση καθώς καθορίζει την σφοδρότητα της κρούσης. Συνεπώς, για σταθερή ταχύτητα πρόσκρουσης όσο μεγαλύτερη είναι η μάζα τους τεμάχους, τόσο χαμηλότερη αναμένεται να είναι αναπήδηση.

Επίσης, όσο αυξάνει το μέγεθος του τεμάχου τόσο μεγαλύτερη απόσταση θα διανύσει όταν ο τύπος κίνησης είναι κύλιση ή ολίσθηση (Bozzolo and Pamini, 1986). Έτσι, τα μικρότερα τεμάχη ολοκληρώνουν την κίνησή τους πλησιέστερα στο σημείο που αποκολλήθηκαν σε σχέση με τα μεγαλύτερα (Evans and Hungr, 1993; Massey et al., 2015). Η συμπεριφορά αυτή αποδίδεται στην τραχύτητα του πρανούς σε σχέση με τις διαστάσεις του τεμάχου. Οι τοπικές ανωμαλίες έχουν μεγαλύτερη επίδραση στα μικρά τεμάχη, με αποτέλεσμα να περιορίζεται η δυνατότητα μετακίνησής τους. Αντιθέτως, τα μεγαλύτερα τεμάχη επηρεάζονται λιγότερο από την τραχύτητα και συνεπώς επιβραδύνονται και εκτρέπονται λιγότερο (Statham, 1979).

Στα λογισμικά CRSP και RocFall, η επίδραση της τραχύτητας υπεισέρχεται μέσω της μεταβολής της κλίσης του πρανούς. Πιο συγκεκριμένα, οι συντελεστές αναπήδησης εφαρμόζονται για επίπεδα πρόσκρουσης που ακολουθούν την κανονική κατανομή, με μέση τιμή την κλίση του πρανούς θ και κατάλληλη τυπική απόκλιση ώστε η μεγίστη/ελάχιστη κλίση να προσομοιώνει αυτήν που οφείλεται στις οδοντώσεις της τραχύτητας (θ_{max} στο σχήμα 3.34). Στο συμπέρασμα αυτό καταλήγουν και οι Ferrari et al. (2013), μετά από την εκτέλεση επιτόπου δοκιμών.



Σχήμα 3.34: Προσομοίωση της τραχύτητας στο λογισμικό CRSP (Pfeiffer et al., 1993)

Συμφωνά με τον Petje et al. (2005) σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να προκληθούν τα αντίθετα αποτελέσματα, δηλαδή τα μεγάλα τεμάχη να σταματήσουν την κίνησή τους σε μικρότερη απόσταση από τα μικρά. Αυτή η συμπεριφορά αποδίδεται στα εξής:

- στην βαθύτερη έμπηξη που μπορεί να υπάρχει στα εδαφικής σύστασης πρανή
- στην σημαντική απώλεια ενέργειας σε κρούσεις μεταξύ τεμαχών μεγάλων διαστάσεων
- στην θραύση των τεμαχών κατά την κρούση στο πρανές, η οποία συνοδεύεται από απώλεια ενέργειας και έχει ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό τεμαχών μικρότερων διαστάσεων που συνεχίζουν την προς κατάντη κίνηση

3.3.7 Επίδραση της περιστροφικής συνιστώσας της κίνησης

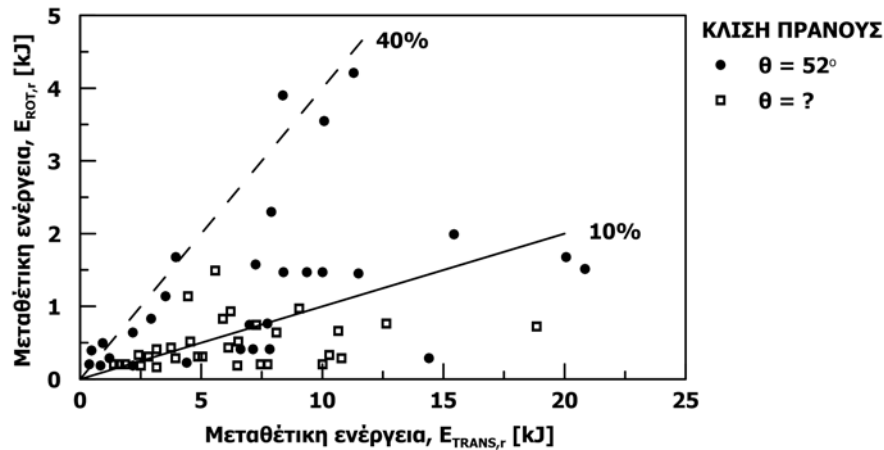
Γενικώς, η αναπτυσσόμενη τριβή μεταξύ ενός τεμάχους και μιας κεκλιμένης επιφάνειας πρόσκρουσης, έχει ως αποτέλεσμα την μετατροπή μέρους της μεταθετικής κίνησης σε περιστροφική (C. Jones et al., 2000). Όμως στην πλειοψηφία των ορισμών των συντελεστών αναπήδησης (Ενότητα 3.2.2) δεν λαμβάνεται υπόψη η περιστροφική συνιστώσα της κίνησης. Εξάιρεση αποτελεί ο ενεργειακός συντελεστής αναπήδησης TE_{COR} .

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στις περισσότερες δημοσιεύσεις που αναφέρονται στην διεθνή βιβλιογραφία, η περιστροφική συνιστώσα της κίνησης αμελείται, κυρίως λόγω της δυσκολίας προσδιορισμού της γωνιακής ταχύτητας. Η μεταθετική ταχύτητα ενός τεμάχους είναι εύκολο να προσδιορισθεί, αφού η τροχιά πραγματοποιείται σε ένα κατακόρυφο επίπεδο. Συνεπώς, για τον προσδιορισμό της απαιτείται η θέση του κέντρου βάρους του τεμάχους σε δυο διαδοχικές θέσεις. Αντιθέτως, όταν η περιστροφή ενός τεμάχους γίνεται στον χώρο, απαιτείται ο προσδιορισμός τριών στροφών, μια για κάθε κύριο άξονα. Συνεπώς, για τον προσδιορισμό της περιστροφικής ταχύτητας απαιτούνται οι συντεταγμένες στις τρεις διαστάσεις (x, y, z) τουλάχιστον τριών σημείων του τεμάχους σε δυο διαδοχικές θέσεις. Έτσι τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα για την περιστροφική κίνηση των τεμαχών είναι σαφώς λιγότερα και η αξιοπιστία τους περιορισμένη.

Παρόλα αυτά, εφόσον οι συνθήκες των δοκιμών ελεγχθούν καταλλήλως, ώστε η περιστροφή του τεμάχους να γίνεται μόνο περί του άξονα που είναι κάθετος στο επίπεδο της κίνησης, τότε μπορεί να επιτευχθεί ο ακριβής προσδιορισμός της γωνιακής ταχύτητας.

Σύμφωνα με τους Chau et al. (2002) τα μόνα διαθέσιμα δεδομένα που υπήρχαν έως τότε, όπου λογίζεται η επίδραση της γωνιακής ταχύτητας του τεμάχους, προέρχονται από την Ένωση Σιδηροδρόμων Ιαπωνίας (Japan Railroad Association – JRA). Τα δεδομένα αυτά αφορούν 60 επιτόπου δοκιμές που έγιναν σε τέσσερις τοποθεσίες της Ιαπωνίας. Λεπτομέρειες για τις συνθήκες των δοκιμών δεν είναι διαθέσιμες καθώς η έρευνα αυτή αποτελεί εσωτερική έκθεση της JRA και είναι στα Ιαπωνικά. Παρακάτω αναπαράγονται κάποια αποτελέσματα και συμπεράσματα όπως παρουσιάζονται από τους Chau et al. (2002).

Η σχέση μεταξύ της περιστροφικής και της μεταθετικής ενέργειας που αναπτύσσει το τεμάχος μετά την κρούση παρουσιάζεται στο σχήμα 3.35. Παρατηρείται ότι ο λόγος μεταξύ περιστροφικής και μεταθετικής ταχύτητας, που συμβολίζεται ως β , προκύπτει για το σύνολο των δεδομένων μικρότερος από 40%, ενώ για τα μισά από αυτά είναι μικρότερος από 10%. Έτσι, η JRA πρότεινε να λαμβάνεται $\beta = 0.1$, έτσι ώστε να συνεκτιμάται εμμέσως η επίδραση της περιστροφής του τεμάχους.



Σχήμα 3.35: Σχέση περιστροφικής προς μεταθετική ταχύτητα από την Japan Railroad Association (Chau et al., 2002) - δεν βρέθηκαν λεπτομέρειες για την κλίση των πρανών στις δοκιμές που συμβολίζονται με τετράγωνο

Οι Chau et al. (2002) απέδειξαν ότι η μεγίστη τιμή του λόγου β για ένα σφαιρικό δοκίμιο είναι 40%. Θεωρώντας ότι η περιστροφή στο τέμαχος δημιουργείται από την αναπτυσσόμενη τριβή στην περιφέρεια της σφαίρας, τότε το μέγεθος της γωνιακής ταχύτητας συνδέεται με την εφαπτομενική ως εξής:

$$\omega_r = \frac{v_{r,t}}{R} \tag{3.46}$$

η ροπή αδραειάς της σφαίρας είναι:

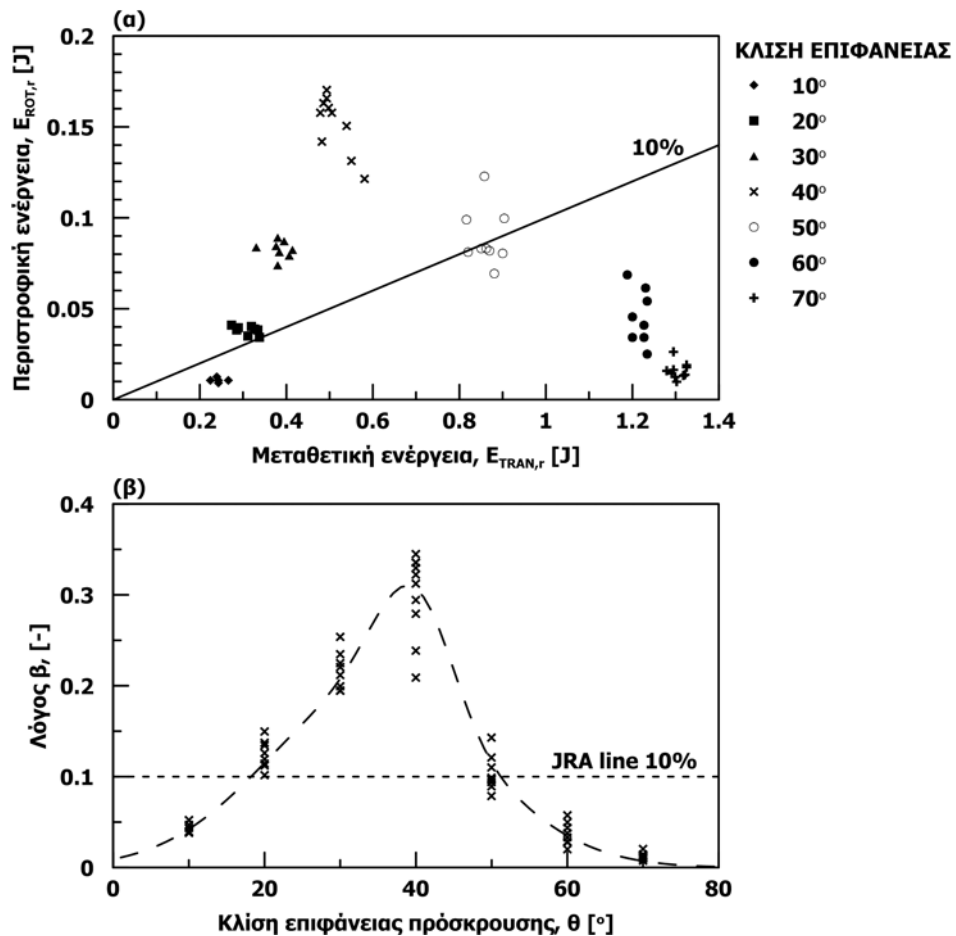
$$I = \frac{2}{5}mR^2 \tag{3.47}$$

Συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει:

$$\beta = \frac{E_r}{E_t} = \frac{0.5I\omega^2}{0.5mv_r^2} = \frac{0.4mR^2(v_{r,t}/R)^2}{mv_r^2} = \frac{04v_{r,t}^2}{v_r^2} \tag{3.48}$$

Το μέτρο της ταχύτητας είναι σε κάθε περίπτωση μεγαλύτερο ή ίσο με την εφαπτομενική συνιστώσα της κίνησης, συνεπώς ο λόγος $v_{r,t}^2/v_r^2$ θα είναι μικρότερος ή ίσος με την μονάδα. Έτσι, η μεγίστη τιμή που μπορεί να λάβει ο λόγος β είναι 0.4. Η ευθεία που αντιστοιχεί σε λόγο $\beta = 0.4$ είναι αποτυπωμένη στο σχήμα 3.35, όπου φαίνεται να είναι σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της πειραματικής διερεύνησης της Ένωσης Σιδηροδρόμων Ιαπωνίας (JRA).

Οι Chau et al. (2002) στην πειραματική διερεύνηση που διεξήγαγαν, προσδιόρισαν την γωνιακή ταχύτητα κάθετα στο επίπεδο κίνησης για σφαιρικά τεμάχια που προσέκρουαν σε κεκλιμένες επιφάνειες μετά από ελεύθερη πτώση (Σχήμα 3.15). Γενικώς, παρατήρησαν ότι η πλειοψηφία του λόγου β λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες από 10%, εν αντιθέσει με τις παρατηρήσεις της JRA. Επίσης, η τιμή του λόγου β προκύπτει περίπου σταθερή για δεδομένη κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης (σχήμα 3.36-α) και εξαρτάται σημαντικά από την κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης (σχήμα 3.36-β).



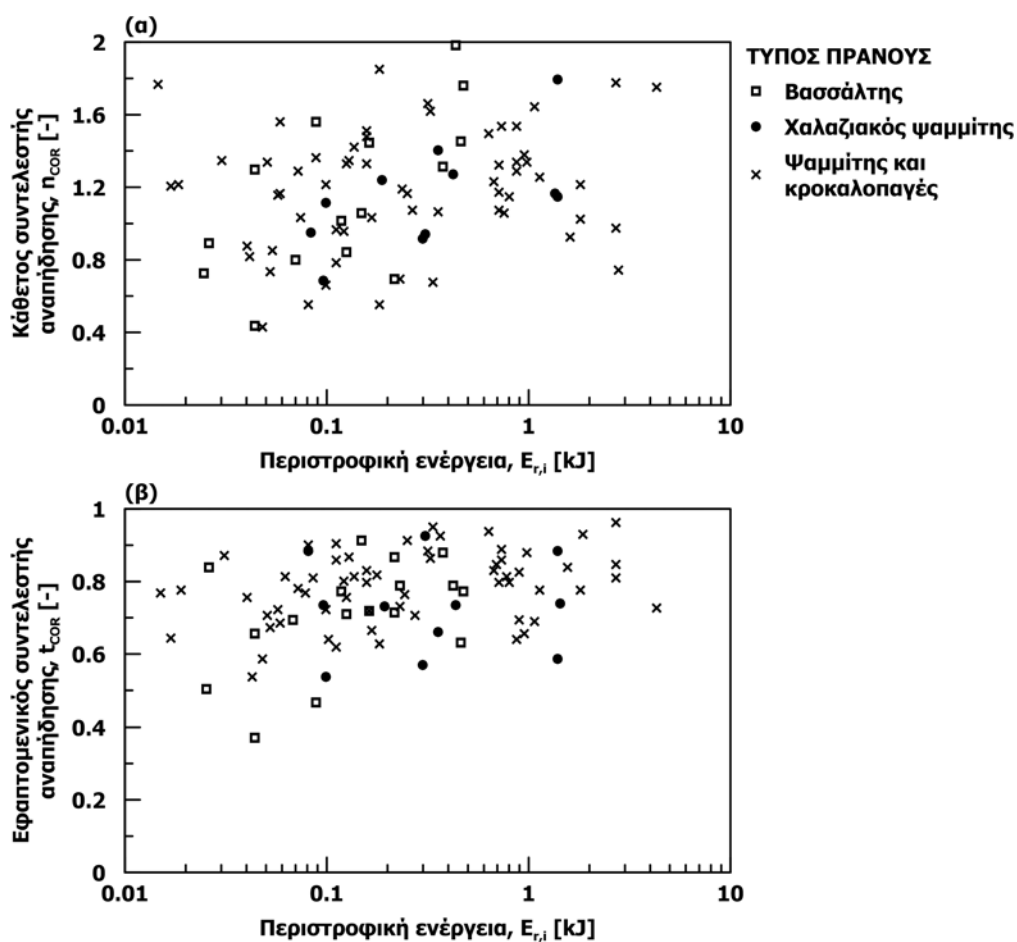
Σχήμα 3.36: (α) Σχέση περιστροφικής προς μεταθετική ταχύτητα και (β) λόγος β συναρτήσει της κλίσης του επιπέδου πρόσκρουσης (Chau et al., 2002)

Η περιστροφική συνιστώσα της κίνησης προσδιορίστηκε στην επιτόπου έρευνα των Spadari et al. (2012), που διενεργήθηκε στην Νέα Νότια Ουαλία της Αυστραλίας. Οι δοκιμές έλαβαν χώρα σε τέσσερα πρανή ήπιας σχετικής κλίσης ($\theta = 17$ έως 30°). Δύο από τα πρανή δομούνταν από βασσαλτικά πετρώματα, ένα από σκληρό χαλαζιακό ψαμμίτη και ένα από ψαμμίτη και κροκαλοπαγή. Έγιναν 93 ρίψεις τεμαχών με την μάζα τους να κυμαίνεται από 5 έως 375kg.

Η καταγραφή των δοκιμών έγινε από ένα σύστημα τριών φωτομηχανών που είχαν εγκατασταθεί σε σειρά κατά μήκος του πρανού, ώστε τα επίπεδα λήψης να είναι παράλληλα με το επίπεδο κίνησης. Κατά την επεξεργασία των εικόνων έγινε εκτίμηση της γωνιακής ταχύτητας των τεμαχών περί του καθέτου, στο επίπεδο κίνησης, άξονα και στην συνέχεια προσδιορίστηκε η περιστροφική ενέργεια. Για τον σκοπό αυτό σημάνθηκαν καταλλήλως τα τεμάχια (Σχήμα 3.37).



Σχήμα 3.37: Σήμανση τεμαχών για τον προσδιορισμό της γωνιακής ταχύτητας (Spadari et al., 2012)

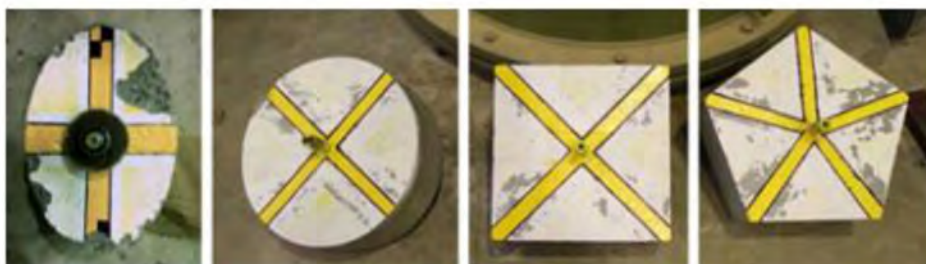


Σχήμα 3.38: Κάθετος και εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της περιστροφικής ενέργειας πριν την κρούση (Spadari et al., 2012)

Ο κάθετος και ο επαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της περιστροφικής συνιστώσας της ενέργειας πριν από την κρούση παρουσιάζονται στο σχήμα 3.38. Παρατηρείται ότι οι συντελεστές αναπήδησης εμφανίζουν σημαντική διακύμανση, χωρίς όμως να προκύπτει κάποια συσχέτιση με την περιστροφική ενέργεια.

Στην έρευνα αυτή, η ροπή αδρανείας των τεμαχίων εκτιμήθηκε βάσει του σχήματός τους, προσεγγίζοντας τα ως δίσκους, σφαίρες και παραλληλεπίπεδα. Συνεπώς, ο προσδιορισμός της περιστροφικής ενέργειας δεν ήταν ακριβής αφού αφενός η τριδιάστατη περιστροφή αντιμετωπίστηκε ως μονοδιάστατη και αφετέρου η ροπή αδρανείας των ακανόνιστων τεμαχίων προσεγγίστηκε με τις ροπές αδρανείας κανονικών σχημάτων.

Οι Buzzi et al. (2012) διενήργησαν μια εργαστηριακή διερεύνηση για την ερμηνεία των ιδιαίτερα υψηλών τιμών του καθέτου συντελεστή αναπήδησης που προέκυψαν στην προαναφερθείσα έρευνα των Spadari et al. (2012). Χρησιμοποίησαν τεμάχια διαμορφωμένα σε δίσκους με ελλειπτικό, κυκλικό, τετραγωνικό και πενταγωνικό σχήμα (Σχήμα 3.39) με μάζα από 39.1 έως 45.8kg. Τα τεμάχια είχαν προσαρμοσμένους οδηγούς περί του κέντρου βάρους τους, το οποίο αποτελεί και κέντρο συμμετρίας, ώστε να δίνεται με κατάλληλη διάταξη γωνιακή ταχύτητα έως $\omega_i = 300rpm$ (περιστροφές ανά λεπτό) και στην συνέχεια να κατευθύνονται ελεγχόμενα, μέσω ραγών, στην επιφάνεια πρόσκρουσης.

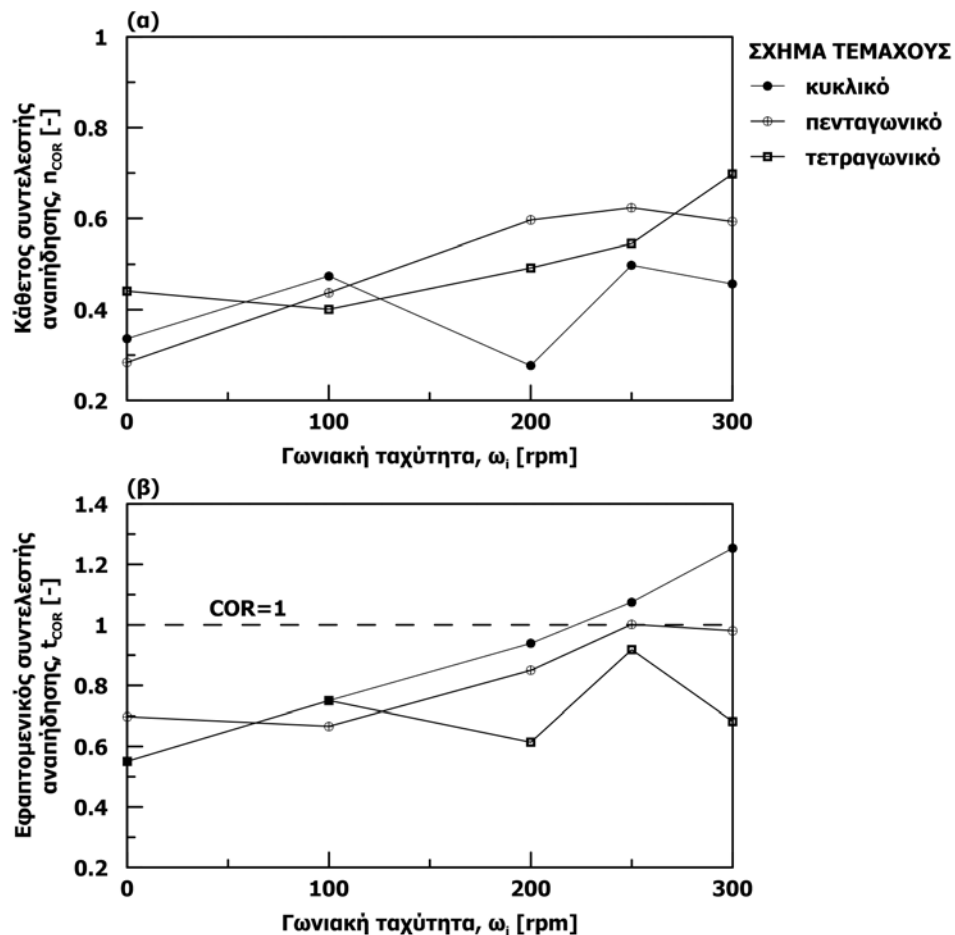


Σχήμα 3.39: Δοκίμια με ελλειπτικό, κυκλικό, τετραγωνικό και πενταγωνικό σχήμα (Buzzi et al., 2012)

Έγιναν τρεις σειρές δοκιμών στις οποίες διαφοροποιούνταν η γεωμετρία πρόσκρουσης. Στην πρώτη, η κρούση λάμβανε χώρα σε λεία και οριζόντια επιφάνεια, στην δεύτερη η επιφάνεια είχε ένα σκαλί ύψους 8.5cm και στην τρίτη σειρά η επιφάνεια πρόσκρουσης με το σκαλί ήταν εγκατεστημένη υπό κλίση για τον περιορισμό της γωνίας πρόσκρουσης. Οι ερευνητές επέλεξαν να παρουσιάσουν τα αποτελέσματα σε όρους γωνιακής ταχύτητας ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση της συμπεριφοράς μεταξύ των διαφορετικών σχημάτων, καθώς η περιστροφική ενέργεια εμπεριέχει την ροπή αδρανείας που διαφέρει ανάλογα με το σχήμα του τεμαχίου.

Στο σχήμα 3.40 παρουσιάζεται ο κάθετος και ο επαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης για τον κυκλικό, τον τετραγωνικό και τον πενταγωνικό δίσκο συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας πριν την κρούση, για κρούση υπό γωνία $\alpha_i = 40^\circ$. Παρατηρείται ότι ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές με την αύξηση της γωνιακής ταχύτητας για τους γωνιώδεις δίσκους (τετραγωνικό και πενταγωνικό σχήμα), σε αντίθεση με τον κυκλικό δίσκο όπου

φαίνεται να μην επηρεάζεται από την γωνιακή ταχύτητα. Η διαφοροποίηση αυτή αποδίδεται στην γεωμετρία πρόσκρουσης. Στον κυκλικό δίσκο η αναπήδηση γίνεται χωρίς να προηγηθεί ολίσθηση/αναδιάταξη του τεμάχους επί της επιφάνειας πρόσκρουσης ενώ στους γωνιώδεις δίσκους μετά την πρώτη επαφή το τέμαχος περιστρέφεται γύρω από το σημείο επαφής μέχρι να αναπηδήσει.



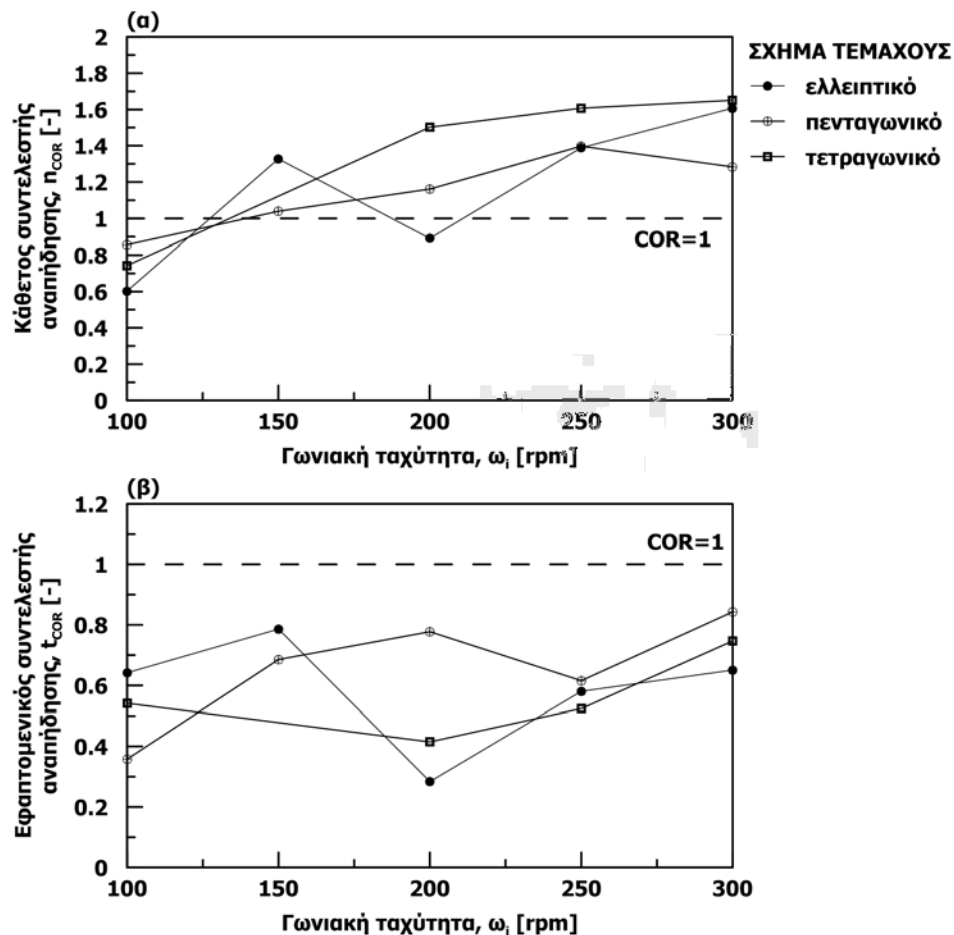
Σχήμα 3.40: Κάθετος και εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσεως της γωνιακής ταχύτητας για πρόσκρουση υπό γωνία $\theta = 40^\circ$ σε λεία επιφάνεια (Buzzi et al., 2012)

Ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης ήταν πάντα μικρότερος της μονάδας, συνεπώς για την επίτευξη τιμών μεγαλύτερων της μονάδας δεν αρκεί μονάχα η ύπαρξη γωνιακής ταχύτητας και το σχήμα του τεμάχους να είναι γωνιώδες.

Ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές με την αύξηση της γωνιακής ταχύτητας, καθώς μέρος της γωνιακής ταχύτητας πριν την κρούση μετατρέπεται σε μεταθετική μετά την κρούση και είναι σε συμφωνία με την ερμηνεία του Wyllie (2014a) (βλ. ενότητα 3.2.1.3). Αυτό είναι περισσότερο εμφανές στο κυκλικό δοκίμιο καθώς η γεωμετρία πρόσκρουσης είναι επαναλήψιμη και δεν υπεισέρχεται ο προσανατολισμός του τεμάχους κατά την επαφή. Η τάση αυτή εξασθενεί με την αύξηση της γωνιότητας του τεμάχους, δηλαδή κατά την μετάβαση από το πεντάγωνο στο τετράγωνο, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.40-β.

Στην δεύτερη σειρά δοκιμών εγκατέστησαν ένα σκαλί με ύψος 8.5cm δημιουργώντας έτσι μια ανισοσταθμία στην επιφάνεια πρόσκρουσης, με σκοπό να προσομοιώσουν την τραχύτητα που αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα μια βραχώδους επιφάνειας. Έτσι τα τεμάχια εμφάνιζαν εντονότερη αναδιάταξη κατά την διάρκεια της επαφής. Η σχέση του καθέτου συντελεστή αναπήδησης με την γωνιακή ταχύτητα παρέμεινε ίδια, δηλαδή υπήρχε αύξησή του με την αύξηση της γωνιακής ταχύτητας. Οι τιμές που προσδιορίστηκαν ήταν ελαφρώς μεγαλύτερες συγκριτικά με αυτές της πρώτης διερεύνησης αλλά μικρότερες της μονάδας.

Στην τρίτη σειρά δοκιμών (σχήμα 3.41) η επιφάνεια με την ανισοσταθμία εγκαταστάθηκε υπό κλίση, ώστε η γωνία πρόσκρουσης να ισούται με $\alpha_i = 15^\circ$. Οι τιμές του καθέτου συντελεστή αναπήδησης ήταν συστηματικά μεγαλύτερες της μονάδας, με την μέγιστη τιμή να ισούται με $n_{COR} = 1.6$. Ομοίως, και στην διάταξη αυτή, ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης αυξάνεται με την αύξηση της γωνιακής ταχύτητας. Αντιθέτως, δεν προκύπτει κάποια τάση για τον εφαπτομενικό συντελεστή και οι τιμές εμφανίζουν αυξημένη διακύμανση.

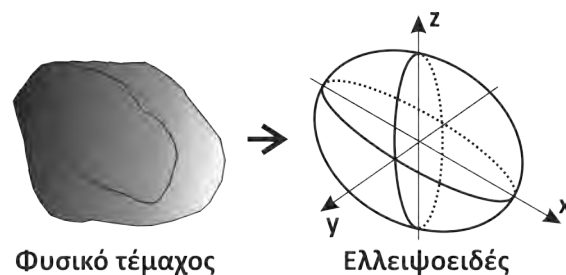


Σχήμα 3.41: Κάθετος και εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας για πρόσκρουση σε επιφάνεια με τεχνητή τραχύτητα υπό γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 15^\circ$ (Buzzi et al., 2012)

Βάσει των ανωτέρω, προκύπτει ότι για την επίτευξη τιμών του καθέτου συντελεστή αναπήδησης μεγαλύτερων της μονάδας θα πρέπει: το τέμαχος να είναι γωνιώδες, η επιφάνεια πρόσκρουσης να είναι τραχεία, να υπάρχει γωνιακή ταχύτητα πριν την κρούση και η γωνία πρόσκρουσης να είναι μικρή.

3.3.8 Θεωρητική προσέγγιση της επίδρασης του σχήματος

Μια ακόμη παράμετρος που επηρεάζει την απόκριση του τεμάχους στην κρούση είναι το σχήμα του τεμάχους. Με την χρήση των μοντέλων σημειακής μάζας, το σχήμα του τεμάχους εκφυλίζεται σε σημείο και έτσι δεν επηρεάζει την απόκριση του. Για την θεώρηση του σχήματος έχουν προταθεί κάποια μοντέλα όπου το τέμαχος θεωρείται ως ελλειψοειδές (Σχήμα 3.42), λόγω της δυσκολίας διατύπωσης μαθηματικών σχέσεων για τεμάχη ακανόνιστου σχήματος. Στον διδιάστατο χώρο το ελλειψοειδές μεταπίπτει σε ελλειπτικό δίσκο, σχήμα που περιγράφεται από αναλυτική εξίσωση. Οι προσεγγίσεις που είναι διαθέσιμες στην βιβλιογραφία παρουσιάζονται στις επόμενες υποενότητες.



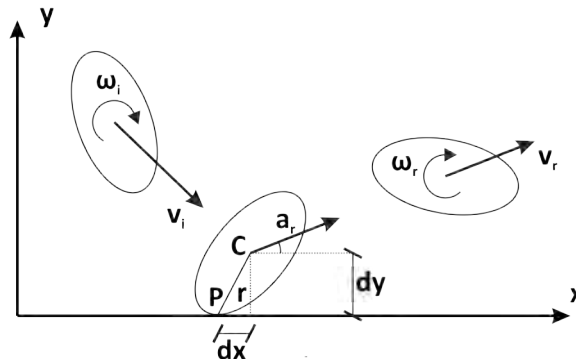
Σχήμα 3.42: Προσομοίωση φυσικού ακανόνιστου τεμάχους με ελλειψοειδές

3.3.8.1 Υπολογιστικό προσομοίωμα SASS (Bozzolo et al., 1988)

Το υπολογιστικό προσομοίωμα SASS αναπτύχθηκε από τους Bozzolo et al. (1988) για να περιγράψει την κίνηση ενός τεμάχους κατά την διάρκεια μια κατάπτωσης. Η κίνηση προσομοιώνεται με την κατάλληλη μεθοδολογία ανάλογα με τον τύπο της. Η ολίσθηση και η κύλιση αναλύονται σύμφωνα με τα αναφερόμενα στις ενότητες 3.1.2 και 3.1.3 αντίστοιχα, ενώ η παραβολική τροχιά περιγράφεται με τις γενικευμένες εξισώσεις κίνησης, αμελώντας την αντίσταση του αέρα. Η προσομοίωση της αναπήδησης γίνεται υιοθετώντας τις παρακάτω παραδοχές:

- το τέμαχος προσομοιώνεται με έναν απαραμόρφωτο ελλειπτικό δίσκο
- η κρούση γίνεται σημειακά, συνεπώς το προσομοίωμα SASS έχει εφαρμογή μόνο σε βραχώδεις επιφάνειες που εμφανίζουν αμελητέα παραμόρφωση
- ισχύει η αρχή διατήρησης της στροφορμής, σύμφωνα με την οποία εφόσον δεν ασκούνται εξωτερικές δυνάμεις η συνολική στροφορμή διατηρείται

- η τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ του τεμάχους και της επιφάνειας πρόσκρουσης είναι αρκούντως υψηλή ώστε να μην υπάρχει μετατόπιση του σημείου επαφής



Σχήμα 3.43: Χαρακτηριστικά της τροχιάς πριν και μετά την κρούση (Bozzolo et al., 1988; Azzoni et al., 1995)

Έτσι, για την περίπτωση που απεικονίζεται στο σχήμα 3.43, η αρχή διατήρησης της στροφορμής γράφεται ως:

$$I\omega_i + dyv_{i,x} - dxv_{i,y} = I\omega_r + dyv_{r,x} - dxv_{r,y} \quad (3.49)$$

όπου:

I η ροπή αδρανείας ως προς το κέντρο βάρους του τεμάχους ανά μονάδα μάζας

ω_i, ω_r η γωνιακή ταχύτητα πριν και μετά την κρούση αντίστοιχα

$v_{i,x}, v_{r,x}$ η οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας πριν και μετά την κρούση αντίστοιχα

$v_{i,y}, v_{r,y}$ η κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας πριν και μετά την κρούση αντίστοιχα

dx, dy η σχετική απόσταση μεταξύ του κέντρου μάζας και του σημείου επαφής κατά τον οριζόντιο και τον κατακόρυφο άξονα αντίστοιχα, που υπολογίζονται ως εξής:

$$dx = x_C - x_p \quad (3.50)$$

$$dy = y_C - y_p$$

Το σημείο επαφής αποτελεί στιγμιαίο κέντρο περιστροφής, οπότε οι ταχύτητες $v_{r,x}$ και $v_{r,y}$ μπορούν να γραφούν συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας:

$$v_{r,x} = dy\omega_r \quad (3.51)$$

$$v_{r,y} = -dx\omega_r$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις 3.49 και 3.51, η γωνιακή ταχύτητα μετά την κρούση μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει των μεγεθών πριν την κρούση:

$$\omega_r = \frac{l\omega_i + d_y v_{i,x} - d_x v_{i,y}}{I + d_x^2 + d_y^2} \quad (3.52)$$

Η κινητική ενέργεια του τεμάχους, ανά μονάδα μάζας είναι:

$$KE = \frac{1}{2}(l\omega^2 + v_x^2 + v_y^2) \quad (3.53)$$

Ο ενεργειακός συντελεστής αναπήδησης TE_{COR} ορίζεται από τον λόγο της κινητικής ενέργειας μετά την κρούση προς αυτήν πριν την κρούση (σχέση 3.19). Συνδυάζοντας τις σχέσεις 3.52 και 3.53, ο συντελεστής, μπορεί να προσδιοριστεί συναρτήσει μόνο των αρχικών κινηματικών χαρακτηριστικών

$$TE_{COR,min} = \frac{(l\omega_i + d_y v_{i,x} - d_x v_{i,y})^2}{(l\omega^2 + v_x^2 + v_y^2)(I + d_x^2 + d_y^2)} \quad (3.54)$$

Αν και η σχέση 3.54 περιγράφει ικανοποιητικά την απόκριση του τεμάχους στην κρούση σύμφωνα με τους Bozzolo et al. (1988), υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση της τροχιάς που προέκυψε από επιτόπου δοκιμές που εκτέλεσαν με αυτές που προσδιορίστηκαν από το υπολογιστικό προσομοίωμα SASS. Σύμφωνα με τους συγγραφείς η διαφοροποίηση αυτή οφείλεται στα εξής:

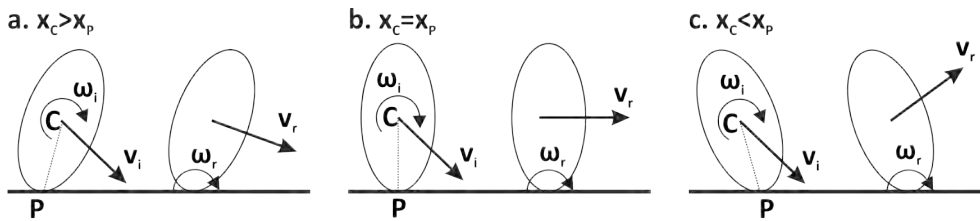
- η πραγματική κίνηση του τεμάχους γίνεται στον τριδιάστατο χώρο ενώ το μοντέλο είναι διδιάστατο. Έτσι με την πλευρική εκτροπή, το μήκος της τροχιάς είναι μεγαλύτερο από αυτό που προσδιορίζεται στο επίπεδο
- η απώλεια ενέργειας είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτή που προβλέπει το μοντέλο όταν υπάρχει θραύση του τεμάχους
- όταν η κρούση γίνεται σε μαλακή επιφάνεια (εδαφικό υλικό) η επαφή δεν είναι σημειακή, αλλά συμβαίνει σε μια εκτεταμένη περιοχή

Σε κάθε περίπτωση, η απώλεια ενέργειας στις δοκιμές πεδίου ήταν περιορισμένη συγκριτικά με αυτήν που αποδίδει η σχέση 3.54. Έτσι, πρότειναν η επιλογή του συντελεστή αναπήδησης να γίνεται από την ελάχιστη τιμή μεταξύ αυτής που προκύπτει από την σχέση 3.54 και της τιμής $TE_{COR,max}$, για την οποία όμως δεν παρουσιάζεται ικανοποιητική τεκμηρίωση. Η τιμή $TE_{COR,max}$ είναι εμπειρική και εξαρτάται από τον τύπο του γεωυλικού και την κλίση του πρανούς, αναφέρονται 2 τιμές στην εν λόγω εργασία: 0.7 για βραχώδες πρανές με κλίση $\vartheta = 40^\circ$ και 0.55 για πρανές επικαλυμμένο με κορήματα υπό κλίση $\vartheta = 57^\circ$.

3.3.8.2 Υπολογιστικό προσομοίωμα Azzoni et al. (1995)

Η μεθοδολογία που προτείνεται από τους Azzoni et al. (1995), εμπίπτει στην ίδια λογική με αυτήν του προσομοιώματος SASS. Η διαφοροποίηση έγκειται στην διάκριση των τριών δυνατών περιπτώσεων που μπορεί να έχει το τέμαχος την στιγμή της επαφής (Σχήμα 3.44).

- $d_x > 0 \Rightarrow v_y < 0$
- $d_x = 0 \Rightarrow v_y = 0$
- $d_x < 0 \Rightarrow v_y > 0$



Σχήμα 3.44: Περιπτώσεις επαφής τεμάχους στο υπολογιστικό προσομοίωμα των Azzoni et al. (1995)

Στην περίπτωση (a), είναι προφανές ότι δεν μπορεί να υπάρξει αναπήδηση του τεμάχους αφού η ταχύτητα κατά τον y άξονα είναι αρνητική. Έτσι, θεωρείται ότι το τέμαχος αναδιατάσσεται στην συμμετρική του θέση ώστε η v_y να γίνει θετική.

Η κινητική ενέργεια ανά μονάδα μάζας του τεμάχους μετά την κρούση, μπορεί να γραφεί ως:

$$KE_r = \frac{1}{2}(I\omega_r^2 + v_{r,x}^2 + v_{r,y}^2) = \frac{1}{2}\omega_r^2(I + d_x^2 + d_y^2) = \frac{1}{2}\omega_r^2(I + r^2) \quad (3.55)$$

όπου:

r η απόσταση μεταξύ του κέντρου μάζας του τεμάχους και του σημείου επαφής, που ισούται με:

$$r = \sqrt{(d_x^2 + d_y^2)} \quad (3.56)$$

Πλέον, ο ενεργειακός συντελεστής αναπήδησης TE_{COR} προσδιορίζεται από τον λόγο της σχέσης 3.55 με την κινητική ενέργεια πριν την κρούση ως εξής:

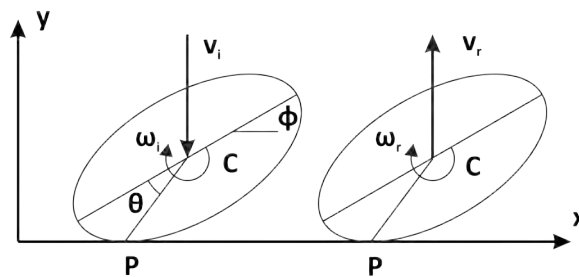
$$TE_{COR,min} = \frac{\omega_r^2}{2KE_i}(I + r^2) \quad (3.57)$$

Οι συγγραφείς αναφέρουν ότι ο συντελεστής που προκύπτει από την σχέση 3.57 δύναται να είναι μεγαλύτερος από αυτόν που προσδιορίζεται πειραματικά ($TE_{COR,exp}$). Στην περίπτωση αυτή, δεν ισχύει η αρχής διατήρησης της στροφορμής και η γωνιακή ταχύτητα μετά την κρούση μπορεί να προσδιοριστεί από την σχέση:

$$\omega_r = \left(\frac{2TE_{COR,exp}KE_i}{I + r^2} \right)^{0.5} \quad (3.58)$$

3.3.8.3 Υπολογιστική μέθοδος Vijayakumar et al. (2012)

Σκοπός της μεθοδολογίας αυτής είναι η επεξήγηση της αιτίας που προκαλεί την σημαντική διαφοροποίηση των συντελεστών αναπήδησης που προκύπτουν στις πειραματικές διερευνήσεις, ακόμη και υπό παρόμοιες συνθήκες δοκιμών. Έτσι, ορίζεται πρόσθετα του συντελεστή αναπήδησης που αντιστοιχεί στο κέντρο βάρους του τεμάχους, ο συντελεστής αναπήδησης του σημείου επαφής (n_{COR}^P), ο οποίος διαφοροποιείται εξαιτίας της γωνιακής ταχύτητας. Η βασική ιδέα είναι ότι ο συντελεστής αναπήδησης στο σημείο επαφής είναι σταθερός και η μεταβλητότητα που παρατηρείται στον συντελεστή αναπήδησης του κέντρου βάρους, οφείλεται στον υπολογισμό των συντελεστών χωρίς την συνεκτίμηση της γωνιακής ταχύτητας.



Σχήμα 3.45: Υπολογιστικό προσομοίωμα Vijayakumar et al. (2012)

Συνεκτιμώντας την περιστροφή του τεμάχους, η κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας στο σημείο επαφής πριν την κρούση είναι:

$$v_i^P = v_i + r\omega_i \cos(\vartheta + \phi) \tag{3.59}$$

όπου:

- r η απόσταση μεταξύ του κέντρου μάζας του τεμάχους και του σημείου επαφής
- ϕ η γωνία που σχηματίζει ο μεγάλος άξονας της έλλειψης με την οριζόντιο
- ϑ η γωνία μεταξύ του μεγάλου άξονα της έλλειψης και της ευθείας που ενώνει το σημείο επαφής με το κέντρο βάρους του τεμάχους

Βάσει του ορισμού του συντελεστή αναπήδησης, η ταχύτητα μετά την κρούση στο σημείο επαφής είναι:

$$v_r + r\omega_r \cos(\vartheta + \phi) = -n_{COR}^P [v_i + \omega_i \cos(\vartheta + \phi)] \tag{3.60}$$

Η ώθηση J εξαιτίας της κρούσης θα είναι:

$$J = m(v_r - v_i) \tag{3.61}$$

Θεωρώντας ότι το τεμάχος δεν περιστρέφεται κατά την απειροστή διάρκεια της κρούσης, το άθροισμα των ροπών ως προς το κέντρο βάρους του τεμάχους ισούται με μηδέν, έτσι:

$$\Sigma M_C = 0 \rightarrow r \cos(\vartheta + \varphi)J = -I(\omega_i + \omega_r) \quad (3.62)$$

Με αντικατάσταση της σχέσης 3.61 στην 3.62, προκύπτει:

$$mr \cos(\vartheta + \varphi)v_r + I\omega_r = mr \cos(\vartheta + \varphi)v_i - I\omega_i \quad (3.63)$$

Από την σχέση 3.61 η γωνιακή ταχύτητα μετά την κρούση γράφεται ως:

$$\omega_r = \frac{-[n_{COR}^P v_i + n_{COR}^P \omega_r \cos(\vartheta + \varphi) + v_r]}{r \cos(\vartheta + \varphi)} \quad (3.64)$$

Αντικαθιστώντας στην σχέση 3.63 την γωνιακή ταχύτητα μετά την κρούση (Σχέση 3.60), διαιρώντας κατά μέλη με $r \cos(\vartheta + \varphi)$ και ταξινομώντας τους όρους, προκύπτει:

$$\begin{aligned} & [mr^2 \cos^2(\vartheta + \varphi)] v_r = \\ & = [n_{COR}^P I + mr^2 \cos^2(\vartheta + \varphi)] v_i + [In_{COR}^P r \cos(\vartheta + \varphi) - Ir \cos(\vartheta + \varphi)] \omega_i \end{aligned} \quad (3.65)$$

Έτσι, διαιρώντας κατά μέλη με v_i , ο συντελεστής αναπήδησης στο κέντρο βάρους είναι:

$$-n_{COR} = \frac{v_r}{v_i} = \frac{n_{COR}^P I + mr^2 \cos^2(\vartheta + \varphi)}{mr^2 \cos^2(\vartheta + \varphi) - I} + \frac{[Ir \cos(\vartheta + \varphi)(n_{COR}^P - 1)] \frac{\omega_i}{v_i}}{mr^2 \cos^2(\vartheta + \varphi) - I} \quad (3.66)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι συγγραφείς χρησιμοποιούν τις ταχύτητες που χαρακτηρίζουν το κέντρο βάρους του τεμάχους στον υπολογισμό της ώθησης στο σημείο P (σχέση 3.62), αντί των ταχυτήτων στην εν λόγω θέση. Αυτή η επιλογή είναι αντίθετη στην φιλοσοφία του μοντέλου που προτείνουν. Επίσης, η σχέση 3.66 έχει παρουσιαστεί στην εν λόγω δημοσίευση διαφορετικά, με εμφανή αλγεβρικά λάθη.

Συνεχίζοντας την ανάλυση των Vijayakumar et al. (2012) και χρησιμοποιώντας την ροπή αδρανείας του ελλειπτικού δίσκου, που δίνεται από την σχέση:

$$I = \frac{1}{4}m(a^2 + b^2) \quad (3.67)$$

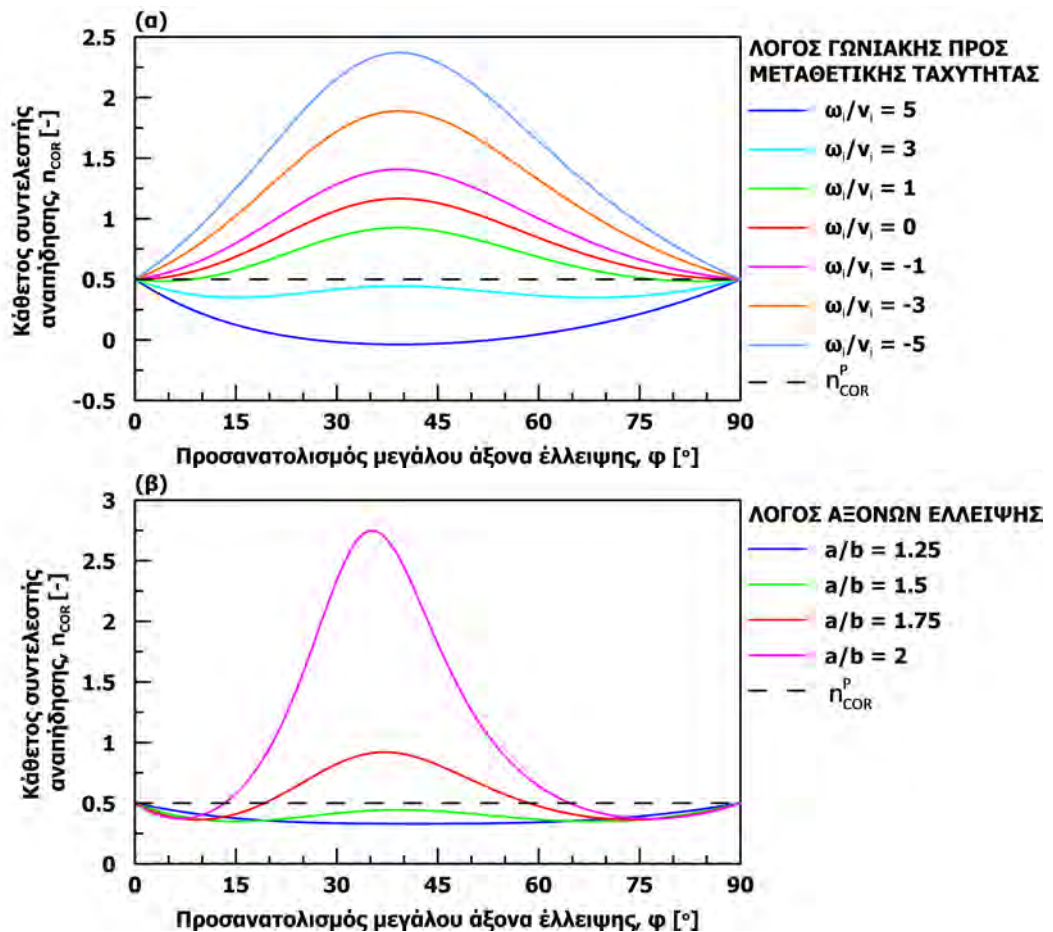
και θέτοντας ως s :

$$s = \frac{1}{4}(a^2 + b^2) \quad (3.68)$$

απαλείφεται η μάζα από την σχέση 3.66, λαμβάνοντας την ακόλουθη μορφή:

$$-n_{COR} = \frac{v_r}{v_i} = \frac{n_{COR}^P s + r^2 \cos^2(\vartheta + \varphi)}{r^2 \cos^2(\vartheta + \varphi) - s} + \frac{[sr \cos(\vartheta + \varphi)(n_{COR}^P - 1)] \frac{\omega_i}{v_i}}{r^2 \cos^2(\vartheta + \varphi) - s} \quad (3.69)$$

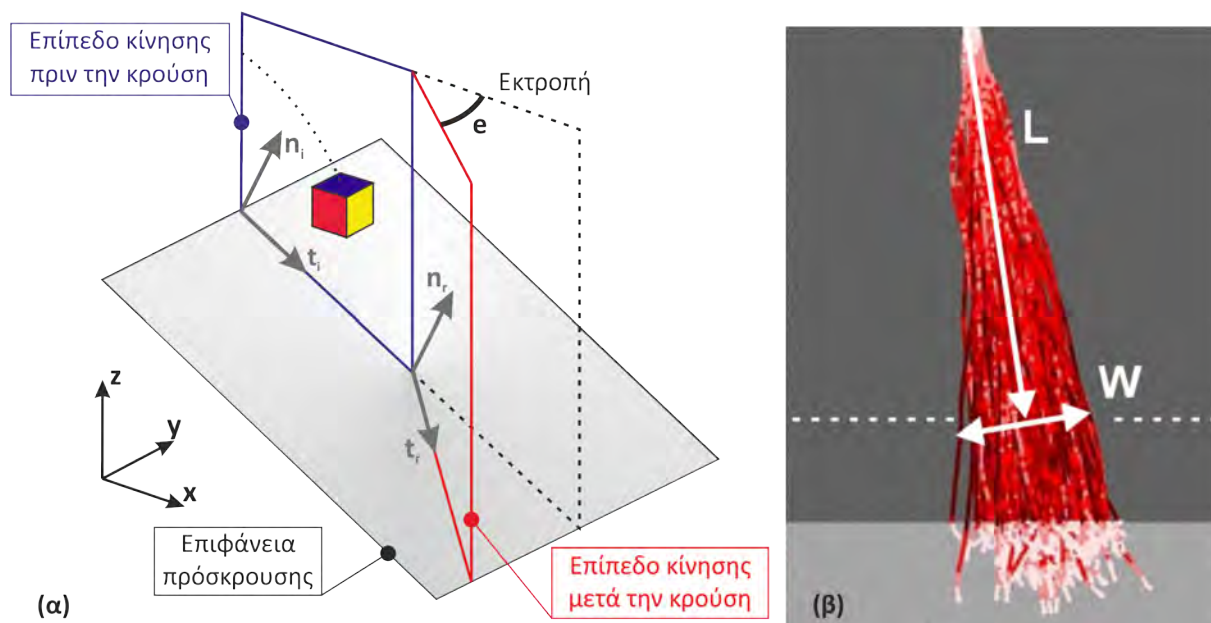
Από την σχέση 3.69 προκύπτει ότι ο συντελεστής αναπήδησης είναι ανεξάρτητος της μάζας του τεμάχους. Θεωρώντας τον συντελεστή αναπήδησης στο σημείο επαφής σταθερό, προκύπτει ότι ο συντελεστής αναπήδησης στο κέντρο βάρους εξαρτάται από τις διαστάσεις του τεμάχους, τον προσανατολισμό του κατά την επαφή καθώς και από τον λόγο της γωνιακής προς την μεταθετική ταχύτητα. Η σχέση αυτή απεικονίζεται στα παρακάτω σχήματα.



Σχήμα 3.46: Κάθετος συντελεστής αναπήδησης στο κέντρο βάρους από το υπολογιστικό προσομοίωμα (Vijayakumar et al., 2012): (α) συναρτήσεσι του προσανατολισμού έλλειψης με λόγο ημιαξόνων $a/b = 1.5$ και συντελεστή αναπήδησης στο σημείο επαφής ίσο με $n_{COR}^p = 0.5$ και (β) συναρτήσεσι του λόγου των αξόνων με λόγο γωνιακής προς μεταθετικής ταχύτητας $a/b = 3$ και συντελεστή αναπήδησης στο σημείο επαφής $n_{COR}^p = 0.5$

3.3.9 Εκτροπή από το κατακόρυφο επίπεδο κίνησης εξαιτίας της κρούσης

Η εκτροπή, e , ορίζεται ως η διεδρική γωνία που σχηματίζεται μεταξύ των κατακόρυφων επιπέδων που περιέχουν την τροχιά πριν και μετά την κρούση (Σχήμα 3.47-α). Εναλλακτικά, χρησιμοποιείται η πλευρική διασπορά, που ορίζεται ως ο λόγος της απόστασης μεταξύ των δυο ακραίων τροχιών προς το μήκος της τροχιάς (Σχήμα 3.47-β) και εκφράζεται ως ποσοστό (Azzoni and De Freitas, 1995).



Σχήμα 3.47: Σχηματική απεικόνιση (α) εκτροπής και (β) πλευρικής διασποράς (σχήμα (β) από: Crosta and Agliardi, 2004)

Σύμφωνα με τους Azzoni and De Freitas (1995), η εκτροπή ενός τεμάχους μετά από την κρούση με το πρηνές οφείλεται:

- στα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά του πρηνούς, όπως η κλίση και διεύθυνση του, η παρουσία μισγαγγειών, βυθισμάτων, ραχών κ.α.
- στις τοπικές ανωμαλίες της επιφάνειας πρόσκρουσης, που εν γένει περιγράφονται από την τραχύτητα και τον «κυματισμό» του πρηνούς
- στην γεωμετρία επαφής, που καθορίζεται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας πρόσκρουσης σε συνδυασμό με το σχήμα των τεμαχών και τα κινηματικά χαρακτηριστικά της κρούσης

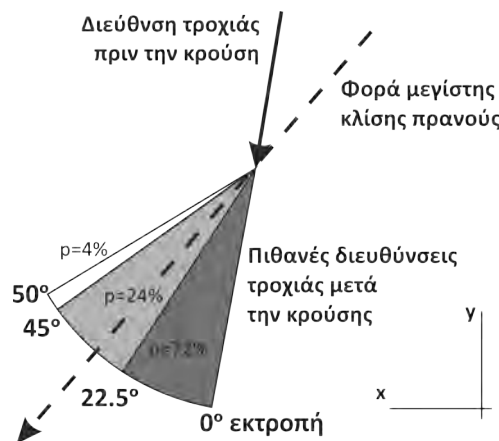
Από την επιτόπου διερεύνηση των Azzoni and De Freitas (1995), προέκυψε ότι η πλευρική διασπορά είναι ανεξάρτητη του μήκους του πρηνούς, μειώνεται με την αύξηση της κλίσης του πρηνούς και κυμαίνεται περίπου σε 10 με 20%. Επίσης, οι Agliardi and Crosta (2003) μέσω αριθμητικών αναλύσεων ευαισθησίας στο τριδιάστατο πρόγραμμα ανάλυσης καταπτώσεων STONE (Guzzetti et al., 2002) υπολόγισαν πλευρική εκτροπή έως και 34%.

Οι Dorren et al. (2005) διενήργησαν μια επιτόπου πειραματική έρευνα στο Foret Communale de Vaujany της Γαλλίας με σκοπό να προσδιορίσουν την επίδραση της παρουσίας δασικής κάλυψης στον περιορισμό της τροχιάς. Εκτέλεσαν δοκιμές απελευθερώνοντας 200 τεμάχια όγκου από 0.1 έως 1.5m³ με εκσκαφέα, σε δυο γεινιάζοντα πρηνή με κλίση περίπου $\theta = 38^\circ$, ένα με δασική κάλυψη και ένα χωρίς.

Υπολόγισαν την εκτροπή μετρώντας με ηλεκτρονικό αποστασιόμετρο την απόσταση και την γωνία μεταξύ των διαδοχικών κρούσεων από τα ίχνη που άφηναν τα τεμάχια στο πρηνές και τα δένδρα. Βάσει των δεδομένων που προέκυψαν από την διερεύνηση αυτή, οι Bourrier et al. (2009) κατήρτισαν μια εμπειρική μεθοδολογία προσδιορισμού της εκτροπής συναρτήσει της φοράς μεγίστης κλίσης του πρηνούς και της ταχύτητας του τεμάχους πριν την κρούση (Πίνακας 3.12 και σχήμα 3.48). Το μοντέλο αυτό έχει ενσωματωθεί στο λογισμικό Rockyfor3D (Dorren et al., 2006) και εκτιμά την εκτροπή που θα έχει ένα τέμαχος, μετρούμενη από την διεύθυνση της τροχιάς πριν την κρούση προς την πλευρά που κλίνει σύμφωνα με την φορά μεγίστης κλίσης του πρηνούς.

Πίνακας 3.12: Εύρος εκτροπής και πιθανότητα εμφάνισης συναρτήσει της ταχύτητας πρόσκρουσης (Dorren, 2015)

Ταχύτητα $v_i [ms^{-1}]$	Εύρος εκτροπής, $e [^\circ]$										
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50	50-55
$v_i < 10$	49	15	9	6	5	4	3	3	3	2	2
$10 < v_i < 15$	53	14	8	6	4	4	3	3	2	2	2
$v_i > 15$	46	16	10	7	5	4	4	3	3	2	0



Σχήμα 3.48: Πιθανοτική κατανομή τροχιών μετά την κρούση (Bourrier et al., 2009)

Κεφάλαιο 4

Στοιχεία Πειραματικής Διερεύνησης

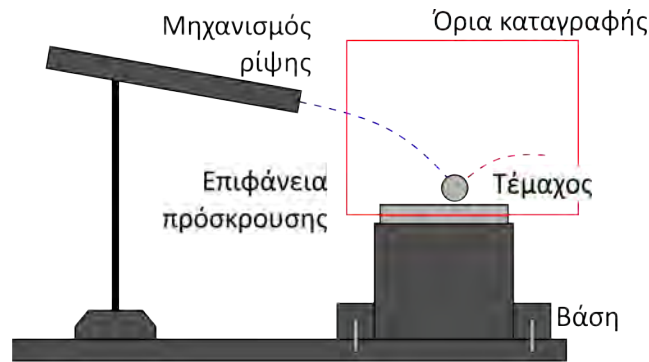
Το κεφάλαιο αυτό αφορά στο πειραματικό σκέλος της παρούσας διατριβής. Αρχικά, περιγράφονται οι πειραματικές διατάξεις που αναπτύχθηκαν για την μελέτη της αναπήδησης. Στην συνέχεια αναφέρονται τα υλικά, φυσικά και τεχνητά, που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές και παρουσιάζονται τα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά τους. Τέλος, περιγράφονται οι μέθοδοι καταγραφής των δοκιμών και οι μεθοδολογίες προσδιορισμού των χαρακτηριστικών της κίνησης.

4.1 Πειραματικές διατάξεις

Στην ενότητα αυτή περιγράφονται οι διατάξεις που αναπτύχθηκαν για την διενέργεια των εργαστηριακών δοκιμών στο Εργαστήριο Βραχομηχανικής και Τεχνικής Γεωλογίας του τομέα Γεωτεχνικής της σχολής Πολιτικών Μηχανικών. Για την εκτέλεση μιας δοκιμής αναπήδησης, αρκεί η ρίψη ενός τεμάχους σε μια επιφάνεια πρόσκρουσης και η κινηματογράφηση της τροχιάς. Με την επεξεργασία των στιγμιότυπων της καταγραφής, προκύπτουν οι συντεταγμένες του τεμάχους σε σταθερά χρονικά διαστήματα, υπολογίζονται οι ταχύτητες πριν και μετά την κρούση και στη συνέχεια οι συντελεστές αναπήδησης.

Συνεπώς, τα βασικά στοιχεία της πειραματικής διάταξης είναι: τα τεμάχη και ο μηχανισμός απελευθέρωσής τους, η επιφάνεια πρόσκρουσης και η βάση στην οποία εδράζεται (Σχήμα 4.1), καθώς και το σύστημα καταγραφής.

Η διάρκεια της κίνησης είναι ιδιαιτέρως σύντομη, συνεπώς απαιτείται η κινηματογράφησή της να γίνει με υψηλή ταχύτητα καταγραφής. Ενδεικτικά, ένα τέμαχος που αφήνεται σε ελεύθερη πτώση από ύψος $h = 1m$, θα προσκρούσει στο έδαφος με ταχύτητα $v_i = 4.4ms^{-1}$ μετά από χρόνο $t = 0.45s$.



Σχήμα 4.1: Τυπική διάταξη για την εκτέλεση δοκιμών στο εργαστήριο

4.1.1 Τεμάχη πρόσκρουσης

Για την εκτέλεση των δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν τεμάχη με ποικιλία σχημάτων ανάλογα με τις δυνατότητες διαμόρφωσης και τα ζητούμενα κάθε διερεύνησης. Γενικώς, το καλύτερο σχήμα για την μελέτη της αναπήδησης είναι η σφαίρα, αφού λόγω συμμετρίας εμφανίζει πάντα την ίδια γεωμετρία επαφής με αποτέλεσμα να υπάρχει επαναληψιμότητα των δοκιμών.

Επίσης, το σφαιρικό σχήμα είναι κοντύτερα στην παραδοχή της σημειακής μάζας, βάσει της οποίας είναι εκφρασμένοι οι συντελεστές αναπήδησης. Όμως, η διαμόρφωση σφαιρών από φυσικά υλικά είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα και δαπανηρή, περιορίζοντας σημαντικά τις δυνατότητες εκτέλεσης δοκιμών με σφαιρικά δοκίμια. Επιπρόσθετα, ως σχήμα απέχει σημαντικά από αυτό που συναντάται σε πραγματικές καταπτώσεις.

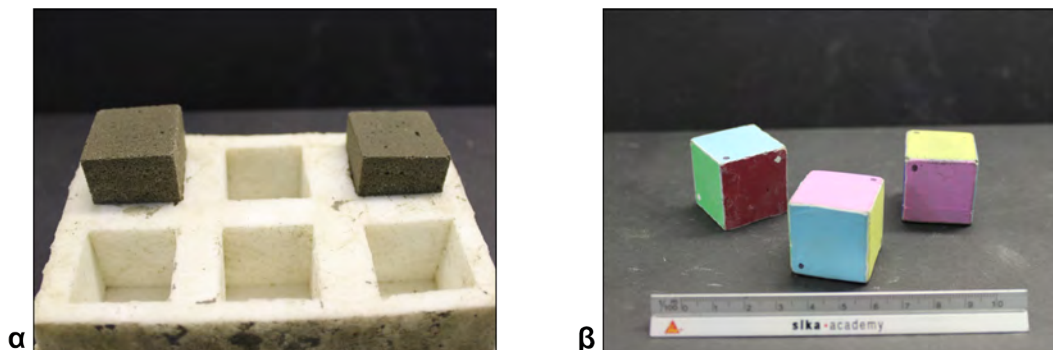
Στις ακόλουθες υποενοότητες παρουσιάζονται τα σχήματα των δοκιμών που χρησιμοποιήθηκαν και περιγράφεται, εν συντομία, η διαδικασία διαμόρφωσης – κατασκευής τους.

4.1.1.1 Κυβικά δοκίμια

Η κατασκευή κυβικών δοκιμών από φυσικό υλικό γίνεται με την ευκολότερη διαδικασία διαμόρφωσης σε σχέση με όλα τα άλλα σχήματα. Οι συμβατικές συσκευές κοπής, που βρίσκονται στα εργαστήρια βραχομηχανικής για την προετοιμασία των δοκιμών, έχουν την δυνατότητα κοπής παραλλήλων επιφανειών. Έτσι, με διαδοχικές κοπές, τα φυσικά τεμάχη διαμορφώνονται αρχικά σε επίπεδες πλάκες και στην συνέχεια σε κύβους.

Όμως, το κυβικό σχήμα έχει ένα σημαντικό μειονέκτημα: είναι επιρρεπές στην θραύση των γωνιών του, ακόμη και για κρούση με περιορισμένη ταχύτητα, εξαιτίας της συγκέντρωσης τάσεων. Επίσης, η απόκριση ενός κυβικού δοκιμίου εμφανίζει σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ επαναλήψεων με τις ίδιες αρχικές συνθήκες, κάτι που αποδίδεται στην πληθώρα πιθανών γεωμετριών επαφής, ανάλογα με τον προσανατολισμό που έχει το τέμαχος κατά την κρούση. Έτσι, απαιτείται μεγάλος αριθμός επαναλήψεων για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων, η οποία όμως απαιτεί αντίστοιχα μεγάλο πλήθος δοκιμών, εξαιτίας της θραύσης των ακμών τους κατά την εκτέλεση των δοκιμών.

Έτσι, κυβικά δοκίμια κατασκευαστήκαν μόνο με τεχνητά υλικά, με την έκχυσή τους σε κατάλληλα εκμαγεία σιλικόνης, επιτρέποντας την αναπαραγωγή μεγάλου πλήθους δοκιμίων με σταθερές διαστάσεις (Σχήμα 4.2).

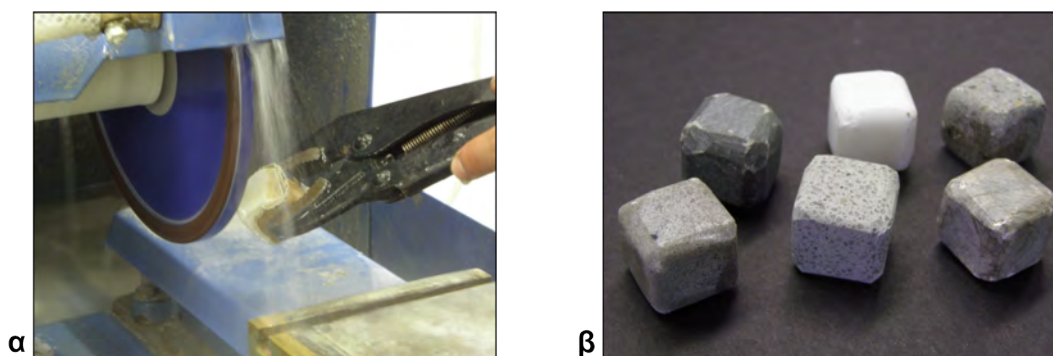


Σχήμα 4.2: (α) Εκμαγείο για την διαμόρφωση των κυβικών δοκιμίων και (β) κυβικά δοκίμια

4.1.1.2 Κυβικά δοκίμια με λειασμένες ακμές

Το σχήμα αυτό χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση δοκιμών με φυσικά υλικά, αφού η διαμόρφωση των δοκιμίων είναι σχετικά εύκολη ενώ συγχρόνως αντιμετωπίζεται το ζήτημα της θραύσης των γωνιών. Ωστόσο, η απόκριση του τεμάχους στην κρούση εξακολουθεί να εμφανίζει διαφοροποίηση εξαιτίας του προσανατολισμού που έχει κατά την επαφή, η οποία όμως είναι περιορισμένη συγκριτικά με τα κυβικά δοκίμια.

Για την διαμόρφωση των δοκιμίων σε κυβικά με λειασμένες ακμές, αρχικά το πέτρωμα λαμβάνει κυβικό σχήμα με την διαδικασία που αναφέρθηκε παραπάνω (Ενότητα 4.1.1.1). Στην συνέχεια, χρησιμοποιείται η συσκευή λείανσης (Σχήμα 4.3-α) ώστε να εξομαλυνθούν οι γωνίες, προσδίδοντάς τους μια καμπυλότητα. Έπειτα, λειαινόνται τα υπολειπόμενα τμήματα των ακμών (Σχήμα 4.3-β).

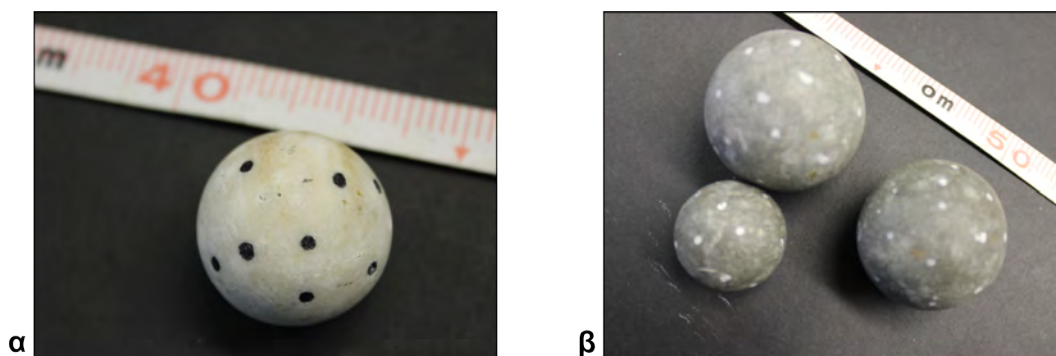


Σχήμα 4.3: (α) Διαδικασία διαμόρφωσης στην συσκευή λείανσης και (β) κυβικά δοκίμια με λειασμένες ακμές

Με την ίδια μεθοδολογία διαμορφώθηκαν και δοκίμια από τα τεχνητά υλικά, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση τους με τα φυσικά, χωρίς να υπεισέρχεται διαφοροποίηση στην συμπεριφορά εξαιτίας του σχήματος.

4.1.1.3 Σφαιρικά δοκίμια

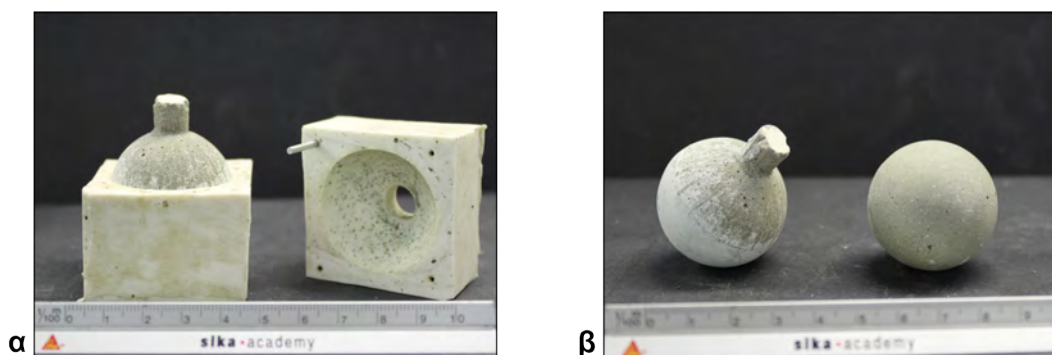
Η διαμόρφωση δοκιμίων από φυσικό πέτρωμα σε σφαίρες είναι ιδιαίτερα δύσκολη και απαιτεί εξοπλισμό που δεν είναι διαθέσιμος σε εργαστήρια βραχομηχανικής. Έτσι, τα σφαιρικά δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στην έρευνα αυτή, διαμορφώθηκαν από εξειδικευμένο τεχνίτη (μαρμαρογλύπτη). Η διαμόρφωση μιας σφαίρας διαμέτρου $d = 4\text{cm}$ απαιτεί περίπου 10 ώρες χειρωνακτικής εργασίας, με συνέπεια να έχει αυξημένο κόστος. Έτσι, η δυνατότητα εκτέλεσης δοκιμών με σφαιρικά δοκίμια από φυσικό υλικό ήταν περιορισμένη. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν έξι σφαίρες διαφορετικής διαμέτρου (Σχήμα 4.4), τρεις από χαλαζιακό ψαμμίτη και τρεις από μάρμαρο Διονύσου.



Σχήμα 4.4: Σφαιρικά τεμάχια από (α) μάρμαρο Πεντέλης και (β) χαλαζιακό ψαμμίτη

Ωστόσο, με σκοπό την αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων που έχει η σφαίρα στις δοκιμές αναπήδησης, διαμορφώθηκαν σφαιρικά δοκίμια από τεχνητά υλικά. Κατασκευάστηκαν εκμαγεία σιλικόνης με διαφορετικές διαμέτρους, ώστε να είναι δυνατή η αναπαραγωγή μεγάλου αριθμού σφαιρών με έκχυση. Η χρήση σιλικόνης για την κατασκευή των εκμαγείων αποσκοπεί στην εξαγωγή του δοκιμίου μετά την σκλήρυνση του, καθότι η σιλικόνη έχει την ικανότητα να αναπτύσσει σημαντική ελαστική παραμόρφωση.

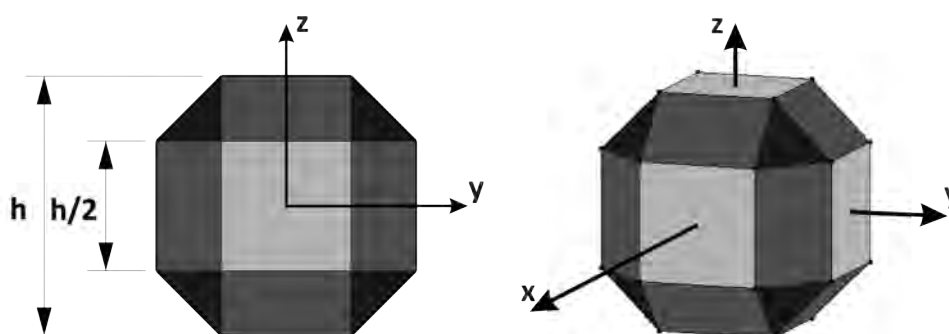
Στο σχήμα 4.5-α παρουσιάζεται ένα τέτοιο εκμαγείο. Αποτελείται από δυο τεμάχια συνδεδεμένα μεταξύ τους με μεταλλικούς πύρους, ώστε να είναι εύκολη η εξαγωγή των δοκιμίων. Η έκχυση του ενέματος γίνεται από μια οπή στο άνω μέρος. Έτσι μετά την σκλήρυνση του ενέματος το τέμαχος έχει μια απόληξη που αφαιρείται στην συσκευή λείανσης (Σχήμα 4.5-β).



Σχήμα 4.5: Διαμόρφωση σφαιρικών δοκιμών από τεχνητά υλικά: (α) εκμαγείο διαμόρφωσης σφαιρικών δοκιμών από σιλικόνη και (β) σφαιρικά δοκίμια από τσιμεντοειδές ένεμα, μετά την σκλήρυνση του ενέματος και στην τελική του μορφή

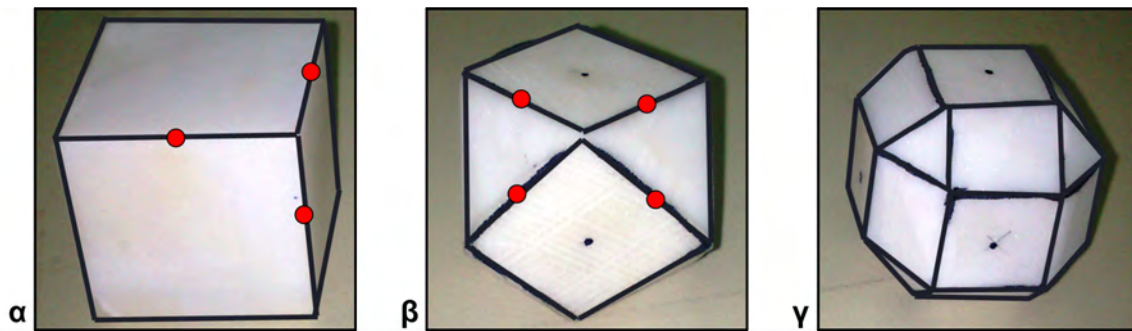
4.1.1.4 Πολυεδρικά δοκίμια

Το σχήμα αυτό έχει συνολικά 26 έδρες (Σχήμα 4.6) και προδιαγράφεται από τον Ελβετικό κανονισμό τυποποίησης (ETAG, 2008) για τις δοκιμές προσδιορισμού της φέρουσας ικανότητας των εύκαμπτων φραχτών ανάσχεσης.



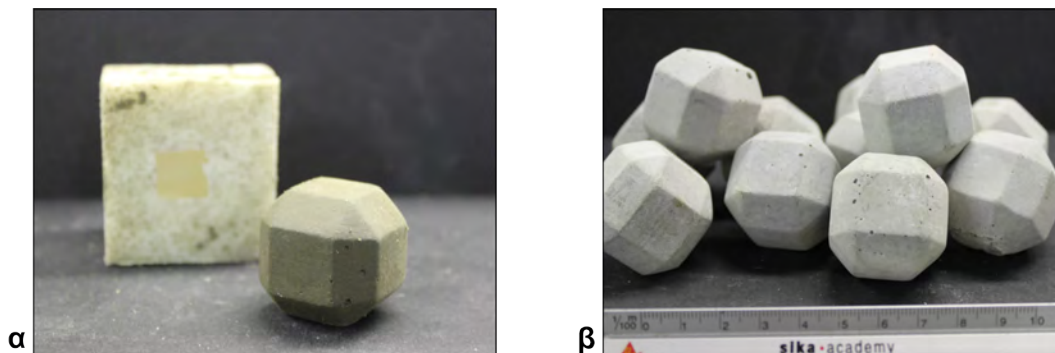
Σχήμα 4.6: Γεωμετρικά στοιχεία πολυεδρικού δοκίμιου

Η διαμόρφωση πολυεδρικών δοκιμών από φυσικό υλικό έγινε μόνο για το μάρμαρο Διονύσου. Η διαδικασία κοπής, τα στάδια της οποίας παρουσιάζονται στο σχήμα 4.7, ήταν πολύπλοκη και χρονοβόρα. Αρχικά, διαμορφώνεται ένα κυβικό δοκίμιο και στην συνέχεια γίνεται κοπή υπό γωνία 45° , στα επίπεδα που ορίζονται από τα μέσα τριών συντρεχουσών ακμών (κόκκινα σημεία στο σχήμα 4.7-α). Στην συνέχεια, κόβονται οι γωνίες που προέκυψαν από στο προηγούμενο στάδιο, στα επίπεδα που διέρχονται από τα μέσα των 4 πλευρών που τις ορίζουν (κόκκινα σημεία στο σχήμα 4.7-β). Έτσι, διαμορφώνεται το επιθυμητό σχήμα (Σχήμα 4.7-γ).



Σχήμα 4.7: Διαδικασία διαμόρφωσης πολυεδρικών δοκιμίων από φυσικό υλικό

Επίσης, κατασκευάστηκε εκμαγείο σιλικόνης για την αναπαραγωγή πολυεδρικών δοκιμίων από τεχνητά υλικά (Σχήμα 4.8).



Σχήμα 4.8: Διαμόρφωση πολυεδρικών δοκιμίων από τεχνητά υλικά: (α) εκμαγείο διαμόρφωσης πολυεδρικών δοκιμίων και (β) πολυεδρικά δοκίμια από τσιμεντοειδές ένεμα

4.1.1.5 Δοκίμια ελλειπτικών δίσκων

Τα δοκίμια ελλειπτικών δίσκων χρησιμοποιήθηκαν για την μελέτη της επίδρασης του σχήματος, της γεωμετρίας επαφής και της γωνιακής ταχύτητας. Για την διαμόρφωσή τους, αρχικά έγινε πυρηνοληψία σε φυσικό τέμαχος από μάρμαρο Διονύσου, αποδίδοντας κύλινδρο διαμέτρου NX ($d = 52mm$). Στην συνέχεια ο κύλινδρος κόπηκε κατά την γενέτειρα σε δίσκους πάχους $t = 8mm$ με την συσκευή κοπής. Έπειτα προσαρμόστηκε σε κάθε δίσκο κατάλληλος οδηγός και έγινε λείανση μέχρι τα όρια που υποδείκνυε, μορφώνοντας τους ελλειπτικούς δίσκους. Διαμορφώθηκαν ελλειπτικοί δίσκοι με τον μεγάλο άξονα να ισούται με $a = 52mm$ και λόγο ημιαξόνων a/b από 1.25 έως 2 (Σχήμα 4.9).



Σχήμα 4.9: Δοκίμια ελλειπτικών δίσκων με λόγους ημιαξόνων 1.25, 1.5, 1.75 και 2, από τα αριστερά προς τα δεξιά της εικόνας

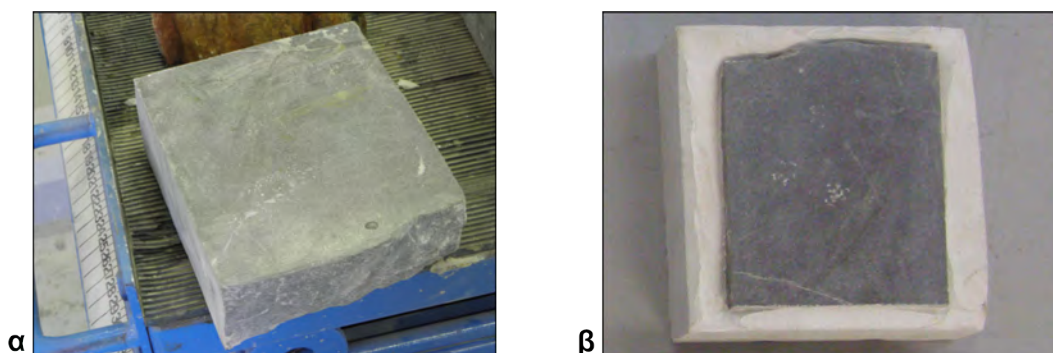
4.1.2 Επιφάνειες πρόσκρουσης

Η μορφή και το υλικό της επιφάνειας πρόσκρουσης επιλέχτηκε ανάλογα με τον σκοπό της εκάστοτε διερεύνησης. Ως επιφάνεια πρόσκρουσης χρησιμοποιήθηκε η πάνω πλευρά τετραγωνικής πλάκας πλευράς 15cm και πάχους 5cm. Στην συνέχεια, οι τετραγωνικές πλάκες τοποθετήθηκαν σε κατάλληλα διαμορφωμένες βάσεις ώστε να μην επιτρέπεται η μετακίνησή τους εξαιτίας της κρούσης, κάτι που θα είχε ως αποτέλεσμα την πρόσθετη απώλεια ενέργειας.

Οι βάσεις χρησιμοποιήθηκαν τροποποιημένες μήτρες σκυροδέματος που ήταν πληρωμένες με τσιμεντό έως ύψους 11cm και πακτωμένες στο δάπεδο. Με την διάταξη αυτή, η επιφάνεια πρόσκρουσης βρίσκεται 1cm ψηλότερα από το όριο της μήτρας.

4.1.2.1 Επιφάνειες πρόσκρουσης από βραχώδη υλικά

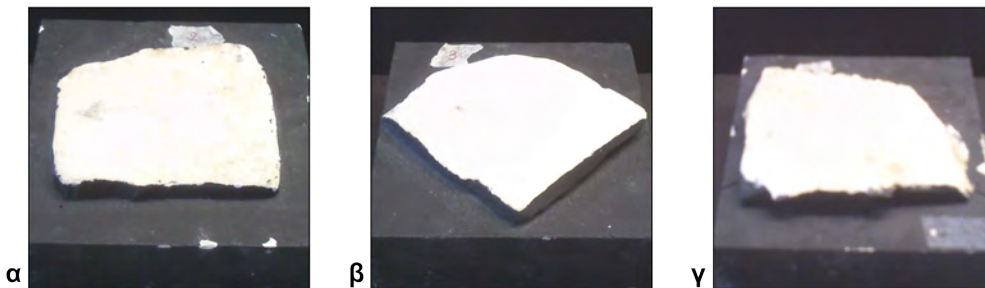
Οι επιφάνειες πρόσκρουσης από φυσικό υλικό, αρχικά μορφώνονται με κοπή σε περίπου τετραγωνικές πλάκες, με μεγίστη διάσταση 15cm και πάχος 4cm (Σχήμα 4.10-α). Στη συνέχεια, εγκιβωτίζονται με συνδετική κονία χρησιμοποιώντας ως καλούπι μια πρότυπη μήτρα σκυροδέματος. Έτσι, αποκτούν τετραγωνική κάτοψη πλευράς 15cm και πάχους 5cm (Σχήμα 4.10-β).



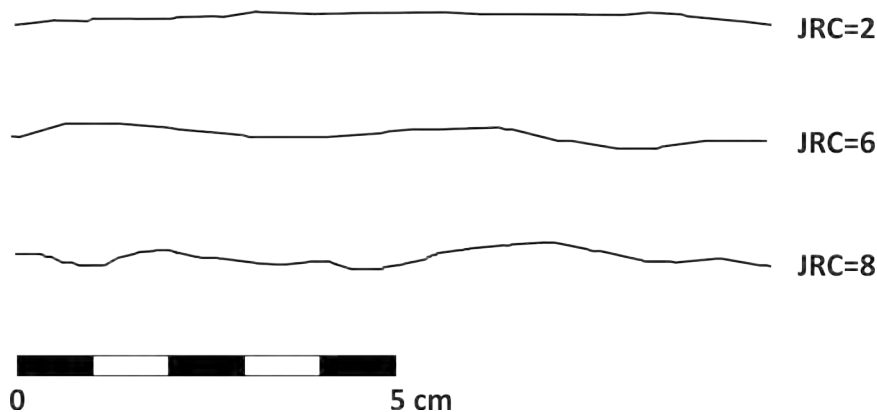
Σχήμα 4.10: Επιφάνεια πρόσκρουσης από χαλαζιακό ψαμμίτη: (α) διαμορφωμένη πλάκα με κοπή από το φυσικό τέμαχος και (β) εγκιβωτισμένη πλάκα με συνδετική κονία

Με την διαδικασία αυτή διαμορφώθηκαν λείες βάσεις για όλα τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν. Για την απλή περίπτωση των τεχνητών υλικών, η κατασκευή των βάσεων έγινε με έκχυση του υλικού. Ως εκμαγείο χρησιμοποιήθηκε η πρότυπη μήτρα σκυροδέματος, αποδίδοντας πλάκες με τις επιθυμητές διαστάσεις.

Επίσης, κατασκευάστηκαν βάσεις από μάρμαρο Πεντέλης με διαφορετική τραχύτητα, ώστε να μελετηθεί και η επίδραση της τραχύτητας στην αναπήδηση (Σχήμα 4.11). Τα προφίλ των ασυνεχείων παρουσιάζονται στο σχήμα 4.12.



Σχήμα 4.11: Βάσεις μαρμάρου με τραχύτητα $JRC = 2, 6$ και 8 αντίστοιχα



Σχήμα 4.12: Προφίλ τραχύτητας επιφανειών πρόσκρουσης

4.1.2.2 Επιφάνειες πρόσκρουσης με εδαφική επικάλυψη

Για την διαμόρφωση των επιφανειών πρόσκρουσης με εδαφική επικάλυψη κατασκευάστηκαν τετραγωνικές πλάκες πλευράς 15cm και ύψους 5cm με το ένεμα τσιμεντοειδούς βάσης. Στο κέντρο της βάσης διαμορφώθηκε τετραγωνική εσοχή πλευράς 10cm , η οποία πληρώνεται με το εδαφικό υλικό. Κατασκευάστηκαν βάσεις με εσοχές βάθους $d = 1, 2, 4$ και 8mm , ώστε να γίνεται με ευκολία η διάστρωση του εδαφικού υλικού στο επιθυμητό πάχος.

Η κατασκευή έγινε με έκχυση τσιμεντοειδούς ενέματος υψηλής αντοχής σε πρότυπη μήτρα σκυροδέματος, στον πυθμένα της οποίας είχε τοποθετηθεί ειδικό ξύλο μακέτας (μπάλσα) διαστάσεων $10 \times 10\text{cm}$ με το επιθυμητό κάθε φορά πάχος. Μετά την σκλήρυνση του ενέματος και την αφαίρεση του ξύλου η βάση είχε την τελική της μορφή, ικανή να φέρει εδαφική επικάλυψη με ελεγχόμενο πάχος (Σχήμα 4.13).



Σχήμα 4.13: Βάση πρόσκρουσης για δοκιμές με εδαφική επικάλυψη πάχους $t = 2mm$

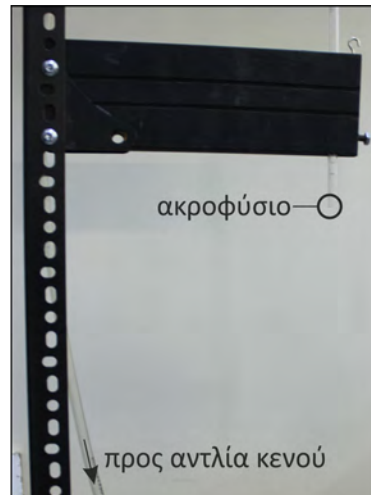
4.1.3 Διατάξεις ρίψης

Με τις διατάξεις ρίψης γίνεται η απελευθέρωση των τεμαχών υπό ελεγχόμενες και επαλαμβανόμενες συνθήκες. Αναπτύχθηκε ένας μηχανισμός για την εκτέλεση δοκιμών με ελεύθερη πτώση και μια διάταξη για τις δοκιμές παραβολικής ρίψης.

4.1.3.1 Διάταξη ελεύθερης πτώσης

Για τις δοκιμές ελεύθερης πτώσης, αναπτύχθηκε ένας μηχανισμός απελευθέρωσης αποτελούμενος από έναν βραχίονα που φέρει ακροφύσιο συνδεδεμένο μέσω σωλήνα σε αντλία κενού (Σχήμα 4.14). Θέτοντας την αντλία σε λειτουργία αναπτύσσεται υποπίεση (αναρρόφηση) στον σωλήνα που συγκρατεί το τέμαχος. Διακόπτοντας την λειτουργία της αντλίας, η πίεση στον σωλήνα επανέρχεται σταδιακά στην ατμοσφαιρική, απελευθερώνοντας το δοκίμιο κατακόρυφα, χωρίς αρχική ταχύτητα. Ο βραχίονας προσαρμόζεται σε μεταλλικό ορθοστάτη (τύπου dexion), σε οποιοδήποτε ύψος μέχρι 2m.

Ωστόσο, εκτελέστηκαν δοκιμές ελεύθερης πτώσης και από μεγαλύτερα ύψη (έως 6m), τοποθετώντας τον μηχανισμό ψηλότερα από την βάση πρόσκρουσης. Οι δοκιμές αυτές εκτελέστηκαν στο κλιμακοστάσιο του κτηρίου διδασκαλίας της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π, εκμεταλλευόμενοι τις ανισοσταθμίες που δημιουργούν οι σκάλες.



Σχήμα 4.14: Μηχανισμός ελεύθερης πτώσης

4.1.3.2 Διάταξη παραβολικής ρίψης

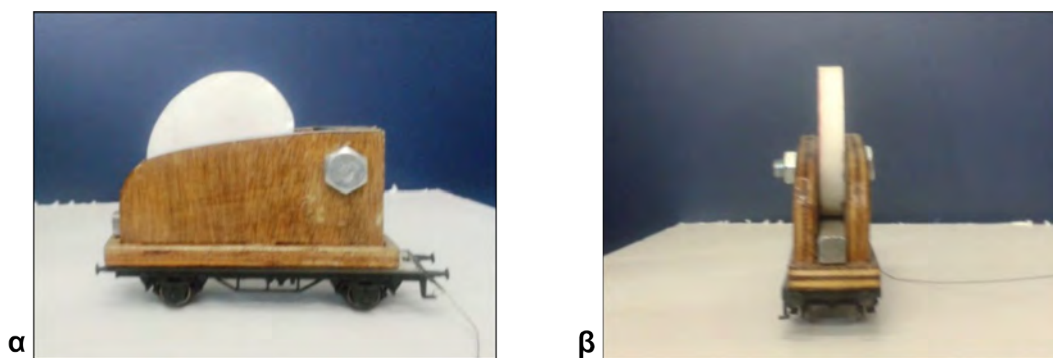
Η διάταξη για την απελευθέρωση των τεμαχίων σε παραβολική ρίψη αποτελείται από ένα σωλήνα που συγκρατείται με άρθρωση σε κατακόρυφο ορθοστάτη. Το ύψος της άρθρωσης, το μήκος και η κλίση του σωλήνα είναι προσαρμόσιμα, επιτρέποντας τον έλεγχο της ταχύτητας και της γωνίας με τα οποία γίνεται η πρόσκρουση. Το τέμαχος εισάγεται στον σωλήνα από την μια πλευρά, αναπτύσσει ταχύτητα κατά την κύλιση ή και την ολίσθηση του μέσα στον σωλήνα, έως ότου απελευθερωθεί από την άλλη πλευρά.

Έτσι, η αύξηση του μήκους του σωλήνα οδηγεί στην αύξηση της ταχύτητας πρόσκρουσης. Επίσης, για δεδομένο μήκος σωλήνα, η αύξηση της κλίσης του σωλήνα έχει σαν αποτέλεσμα την κρούση υπό μεγαλύτερη ταχύτητα και γωνία. Δοκιμές με αυξημένες ταχύτητες εκτελέστηκαν στο κλιμακόστασιο του κτηρίου Γεωτεχνικής, αναπτύσσοντας σωλήνα μήκους έως 4m.

4.1.3.3 Διάταξη παραβολικής ρίψης ελλειπτικών δίσκων

Η διάταξη που αναπτύχθηκε για την παραβολική ρίψη των ελλειπτικών δοκιμίων είναι μια ευφάνταστη ιδιοκατασκευή που βασίζεται στην αρχή διατήρησης της ορμής. Κατασκευάστηκε ένα ξύλινο φορείο-υποδοχέας με δυο κάθετα τοιχώματα μεταξύ των οποίων συγκρατείται το δοκίμιο. Η απόσταση μεταξύ των τοιχωμάτων είναι προσαρμόσιμη με κοχλία, ώστε το τέμαχος να συγκρατείται οριακά (Σχήμα 4.15). Το φορείο προσαρμόστηκε στο σύστημα κίνησης ενός βαγονιού από τραίνο μοντελισμού.

Για την εκτέλεση της δοκιμής, τοποθετείτο το βαγονέτο σε μεταλλικές ράγες που ήταν εγκατεστημένες σε μια κεκλιμένη επιφάνεια (Σχήμα 4.16). Η κίνηση του φορείου γινόταν υπό την επίδραση της βαρύτητας μέχρι το τέλος της διαδρομής, όπου και σταματούσε ακαριαία από ένα άκαμπτο εμπόδιο τοποθετημένο κάθετα στις ράγες. Έτσι, απελευθερωνόταν το δοκίμιο με αρχική μεταθετική ταχύτητα.



Σχήμα 4.15: Βαγονέτο μεταφοράς ελλειπτικών δίσκων

Επιπρόσθετα, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.16, κατασκευάστηκε ένα πλαίσιο από μεταλλικούς ορθοστάτες τύπου dexion και ξύλινες επιφάνειες. Οι μηχανισμοί ρίψης προσαρμόζονται στο πλαίσιο με κοχλίες υπό διαφορετικούς συνδυασμούς ύψους και κλίσης, ώστε να επιτυγχάνεται κάθε φορά η επιθυμητή ταχύτητα και γωνία πρόσκρουσης. Η πλάκα, που αποτελεί την επιφάνεια πρόσκρουσης, τοποθετείται σε ειδική εσοχή επί επιφάνειας που είναι αρθρωμένη στην βάση του πλαισίου. Η άρθρωση αποτελεί το κέντρο στροφής της επιφάνειας, ώστε να είναι δυνατή η προσομοίωση κεκλιμένων επιφανειών. Το σύστημα καταγραφής είναι συνδεδεμένο με μεταλλικά στοιχεία στην επιφάνεια πρόσκρουσης. Έτσι το επίπεδο απεικόνισης ακολουθεί την κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης, με αποτέλεσμα η επεξεργασία της κίνησης να γίνεται απευθείας στην κάθετη και εφαιπτομενική συνιστώσα σε σχέση με την επιφάνεια πρόσκρουσης, όπως είναι εκφρασμένοι οι συντελεστές αναπήδησης.



Σχήμα 4.16: Πειραματική διάταξη εκτέλεσης δοκιμών με δοκίμια ελλειπτικών δίσκων

4.2 Υλικά

Για την έρευνα στο εργαστήριο χρησιμοποιήθηκαν βραχώδη και τεχνητά υλικά, οι ιδιότητες των οποίων προσδιορίστηκαν σύμφωνα με τις προδιαγραφές της Διεθνούς Ένωσης Βραχυμηχανικής (ISRM - Ulusay and Hudson, 2007).

Επίσης, εκτελέστηκε μικρό πλήθος δοκιμών σε επιφάνειες πρόσκρουσης που καλύπτονταν από εδαφικό υλικό, με στόχο την προσομοίωση της ζώνης αποσάθρωσης του μητρικού βραχώδους σχηματισμού ή των πλευρικών κορημάτων που συχνά καλύπτουν τα φυσικά πρηνή. Έτσι, χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι αργιλικού και δύο τύποι αμμώδους υλικού, οι ιδιότητες των οποίων προσδιορίστηκαν σύμφωνα με τις Ελληνικές προδιαγραφές δοκιμών εδαφομηχανικής (ΚΕΔΕ, 1986).

4.2.1 Βραχώδη υλικά

Για τα φυσικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν, έγινε δειγματοληψία από την φυσική τους θέση. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν: λεπτοκρυσταλλικό μάρμαρο Πεντέλης, μάρμαρο Διονύσου, ασβεστόλιθος Τουρκοβουνίων, ασβεστόλιθος Κερατέας, χαλαζιακός ψαμμίτης, σχιστόλιθος Καισαριανής, πρασινοσχιστόλιθος Αμπελακίων και μάργα Δερβένιου.

Επίσης, κατασκευάστηκαν δοκίμια από τεχνητά υλικά, πιο συγκεκριμένα: εποξειδική ρητίνη τριών συστατικών, τσιμεντοειδές ένεμα υψηλής αντοχής και μείγμα πολυεστέρα με χαλαζιακή άμμο. Η σκοπιμότητα χρησιμοποίησης των υλικών αυτών, έγκειται στην δυνατότητα διαμόρφωσης τεμαχών οποιουδήποτε σχήματος, μέσω έκχυσης σε κατάλληλες μήτρες αναπαραγωγής ομοιωμάτων. Έτσι, καθίσταται δυνατή η κατασκευή πλήθος δοκιμίων με σταθερές φυσικές και μηχανικές ιδιότητες καθώς και με προκαθορισμένες διαστάσεις. Το πλεονέκτημα αυτό προσφέρει την δυνατότητα εκτέλεσης σημαντικού πλήθους δοκιμών, χωρίς να υπάρχει κόπωση των δοκιμίων.

Τα βραχώδη τεμάχια από τα οποία διαμορφώθηκαν τα δοκίμια για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων, ήταν τα ίδια με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν για την διαμόρφωση των δοκιμίων και των βάσεων στις δοκιμές αναπήδησης. Στα τεχνητά υλικά, τα δοκίμια κατασκευάστηκαν με έκχυση στην μεμβράνη του κελιού Hoek της τριαξονικής δοκιμής που χρησιμοποιήθηκε ως εκμαγείο.

4.2.1.1 Θλιπτική αντοχή άρρηκτου πετρώματος

Η αντοχή σε θλίψη του άρρηκτου πετρώματος προσδιορίζεται με την δοκιμή μονοαξονικής θλίψης, (Bieniawski and Bernede, 1979; Fairhurst and Hudson, 1999). Κατά την εκτέλεση της δοκιμής, ένα κυλινδρικό δοκίμιο άρρηκτου πετρώματος με λόγο ύψους προς διάμετρο (h/d) από 2 έως 3, φορτίζεται θλιπτικά με σταθερό ρυθμό επιβολής φορτίου μέχρι την αστοχία του (Σχήμα 4.17). Ο ρυθμός φόρτισης εξαρτάται από την αντοχή του δοκιμίου και καθορίζεται έτσι ώστε η αστοχία να επέλθει μεταξύ του 10^{ου} και του 20^{ου} λεπτού της δοκιμής.



Σχήμα 4.17: Συσκευή προσδιορισμού της αντοχής του άρρηκτου πετρώματος (αριστερά) και σερβομηχανή για την επιβολή του φορτίου με σταθερό ρυθμό (δεξιά)

Η θλιπτική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος (σ_{ci}) υπολογίζεται από την σχέση:

$$\sigma_{ci} = \frac{P_f}{A} \quad (4.1)$$

όπου:

P_f το φορτίο κατά την αστοχία

A το εμβαδόν της διατομής του δοκιμίου

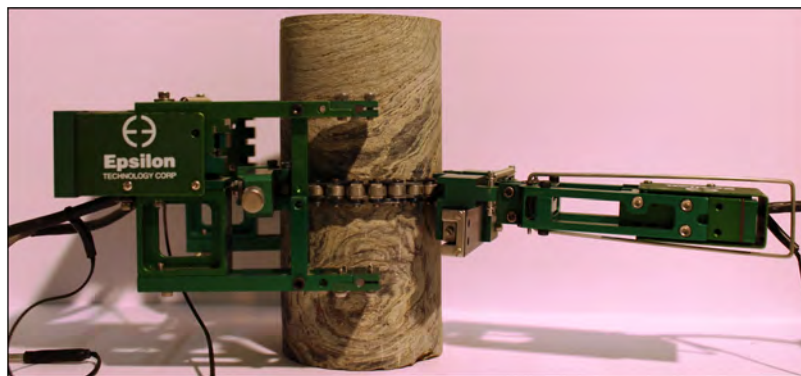
Αν και η αντοχή αποτελεί εγγενή ιδιότητα του υλικού, εξαρτάται από το μέγεθος του δοκιμίου. Όσο μεγαλύτερο είναι το δοκίμιο τόσο αυξάνει η πιθανότητα να υπάρχουν ενδογενείς ατέλειες στην μάζα του, από τις οποίες θα εκκινήσει η διάδοση των μικρορωγμών που θα έχει ως αποτέλεσμα την αστοχία. Έτσι, έχει επικρατήσει η αναφορά στην αντοχή του άρρηκτου πετρώματος να γίνεται για διάμετρο $50mm$. Η αναγωγή της αντοχής από την διάμετρο του δοκιμίου σε αυτήν των $50mm$, γίνεται με την παρακάτω σχέση:

$$\sigma_{ci,50} = \frac{\sigma_{ci}}{\left(\frac{d}{50}\right)^{0.18}} \quad (4.2)$$

όπου:

d η διάμετρος του δοκιμίου σε mm

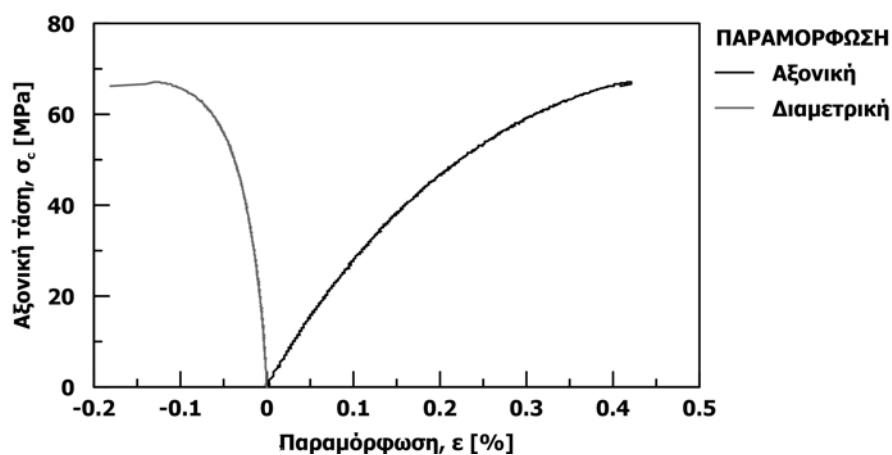
Στο δοκίμιο προσαρμόζονται ειδικά ηλεκτρονικά μηκυσιόμετρα (Σχήμα 4.18) που καταγράφουν την αξονική και περιφερειακή μεταβολή των διαστάσεών του. Στην συνέχεια, κατασκευάζονται οι καμπύλες τάσης – αξονικής παραμόρφωσης και τάσης – διαμετρικής παραμόρφωσης (Σχήμα 4.19) από όπου προσδιορίζονται το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας (E_t) και ο λόγος Poisson (ν).



Σχήμα 4.18: Ηλεκτρονικά μηχανισιόμετρα για τον προσδιορισμό της αξονικής και περιμετρικής παραμόρφωσης

Το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας (E_t) προσδιορίζεται από την κλίση της εφαπτομένης στην καμπύλη τάσης – αξονικής παραμόρφωσης που αντιστοιχεί σε τάση ίση με το 50% της τάσης αστοχίας.

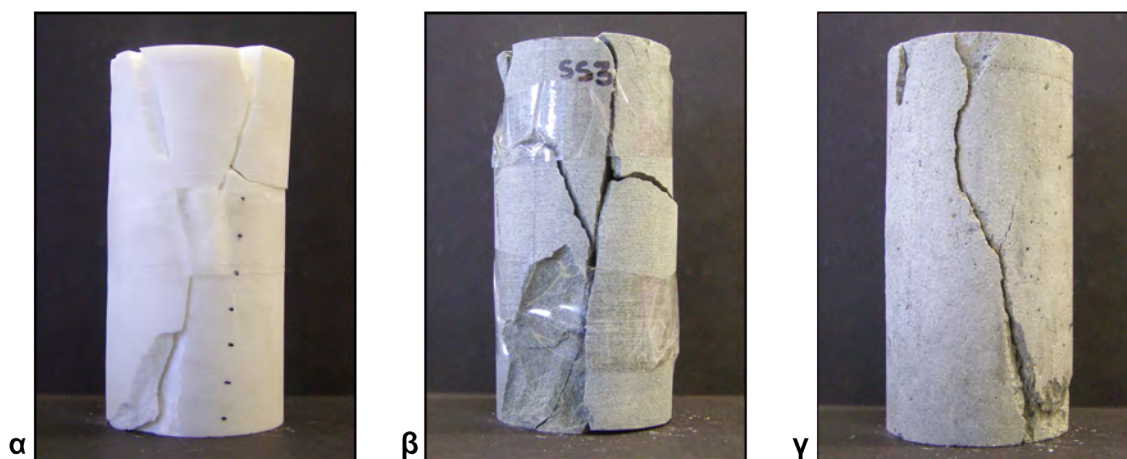
$$E_t = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_\alpha} \quad (4.3)$$



Σχήμα 4.19: Τυπική καμπύλης τάσης - παραμόρφωσης

Ο λόγος Poisson (ν) εκφράζει τον λόγο της διαμετρικής προς την αξονική παραμόρφωση και υπολογίζεται από την σχέση:

$$\nu = -\frac{\Delta\varepsilon_\alpha}{\Delta\varepsilon_\delta} \quad (4.4)$$



Σχήμα 4.20: Δοκίμια μετά την εκτέλεση της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης: (α) μάρμαρο, (β) χαλαζιακός ψαμμίτης και (γ) τσιμεντοειδές ένεμα

4.2.1.2 Εφελκυστική αντοχή άρρηκτου πετρώματος

Η αντοχή σε εφελκυσμό προσδιορίζεται έμμεσα με την δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης, γνωστή ως Brazil Test (δοκιμή κατά γενέτειρα). Στην δοκιμή αυτή, ένας δίσκος με πάχος ίσο με τη μισή του διάμετρο, φορτίζεται θλιπτικά με ρυθμό 0.2 kN/s μέχρι να επέλθει αστοχία (Bieniawski and Hawkes, 1978). Το δοκίμιο συγκρατείται από μια ειδική μεταλλική διάταξη - υποδοχή (Σχήμα 4.21), που τοποθετείται στην συσκευή θλίψης (πρέσα).



Σχήμα 4.21: Διάταξη της δοκιμής Brazil για τον έμμεσο προσδιορισμό της εφελκυστικής αντοχής

Υπό τις συγκεκριμένες συνθήκες φόρτισης, το δοκίμιο αστοχεί κατά τη διεύθυνση φόρτισης σε εφελκυσμό (Σχήμα 4.22) και η εφελκυστική αντοχή θεωρείται ίση με την τάση που προκαλεί την αστοχία. Η δοκιμή βασίζεται στο γεγονός ότι τα περισσότερα πετρώματα αστοχούν σε εφελκυσμό, όταν βρεθούν σε διαξονικό εντατικό πεδίο και η μια κύρια τάση είναι θλιπτική και η άλλη εφελκυστική, εφόσον το μέγεθος της θλιπτικής τάσης δεν υπερβαίνει το τριπλάσιο της αντίστοιχης εφελκυστικής (Σοφιανός and Νομικός, 2009).

Η αντοχή σε εφελκυσμό (σ_t) προσδιορίζεται από την σχέση:

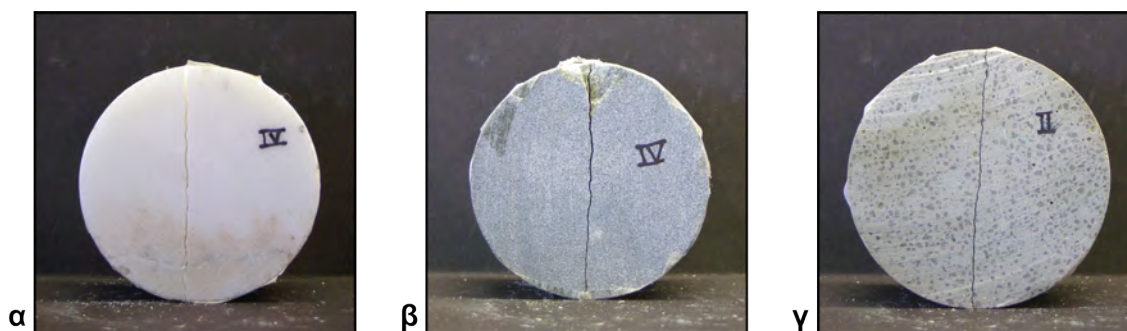
$$\sigma_t = 0.636 \frac{P_f}{dt} \quad (4.5)$$

όπου:

P_f το φορτίο θραύσης

d η διάμετρος του δίσκου

t το πάχος του δίσκου

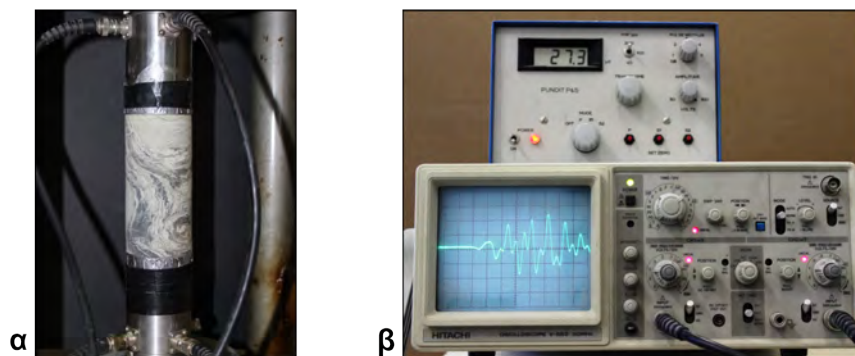


Σχήμα 4.22: Δοκίμια μετά την εκτέλεση της δοκιμής Brazil: (α) μάρμαρο, (β) χαλαζιακός ψαμμίτης και (γ) εποξειδική ρητίνη

4.2.1.3 Ταχύτητα διάδοσης υπερήχων

Με τη μέθοδο των υπερήχων προσδιορίζεται η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων δια μέσου του δοκιμίου, η οποία συνδέεται με τις δυναμικές μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος, όπως το μέτρο ελαστικότητας E , ο λόγος Poisson ν και το μέτρο διάτμησης G . Η δοκιμή είναι μη καταστροφική, δηλαδή δεν επέρχεται θραύση του δοκιμίου, συνεπώς προηγείται της δοκιμής προσδιορισμού της αντοχής του άρρηκτου πετρώματος. Η ταχύτητα διάδοσης ενός παλμού μέσω της μάζας ενός δοκιμίου εξαρτάται από τη φύση του υλικού, δηλαδή από τις ελαστικές ιδιότητές του. Συνεπώς, οι ταχύτητες των διαμηκών V_p και των εγκάρσιων V_s κυμάτων αποτελούν σταθερές του υλικού.

Η δοκιμή εκτελείται σε κυλινδρικό δοκίμιο, στα άκρα του οποίου εγκαθίστανται πιεζοηλεκτρικοί ακροδέκτες, ο πομπός στην κορυφή και ο δέκτης στην βάση (Σχήμα 4.23-α). Στην συνέχεια, τοποθετείται στην συσκευή θλίψης όπου επιβάλλεται μικρό θλιπτικό φορτίο, ώστε να εξασφαλίζεται καλή επαφή μεταξύ του δοκιμίου και των ακροδεκτών (Rummel and Vanheerden, 1978). Ο χρόνος που απαιτείται να διέλθει ο παλμός από το δοκίμιο προσδιορίζεται από την συσκευή Pundit (Σχήμα 4.23-β).



Σχήμα 4.23: Δοκιμή προσδιορισμού ταχύτητας διάδοσης κυμάτων: (α) διάταξη δοκιμίου - ακροδεκτών και (β) καταγραφή του χρόνου άφιξης των διαμηκών κυμάτων

Η ταχύτητα διάδοσης των διαμηκών (V_p) και των εγκάρσιων (V_s) κυμάτων προσδιορίζεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$V_p = \frac{L}{T_p} \text{ και } V_s = \frac{L}{T_s} \quad (4.6)$$

όπου:

L το μήκος του δοκιμίου

T_p ο χρόνος διάδοσης των διαμηκών κυμάτων

T_s ο χρόνος διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων

Το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας (E_d), ο λόγος Poisson (ν) και το μέτρο διάτμησης (G) προσδιορίζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$E_d = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2} \quad (4.7)$$

$$\nu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (4.8)$$

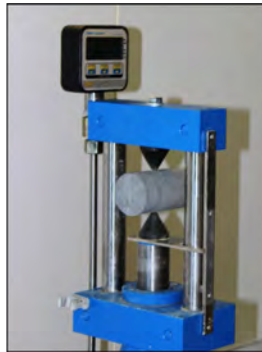
$$G = \rho V_s^2 \quad (4.9)$$

4.2.1.4 Δείκτης σημειακής φόρτισης

Η δοκιμή σημειακής φόρτισης έχει σκοπό την κατάταξη των πετρωμάτων και τον έμμεσο προσδιορισμό της αντοχής τους μέσω συσχετίσεων. Σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι τα δοκίμια δύνανται να είναι ακανόνιστου σχήματος, δηλαδή δεν απαιτείται η διαμόρφωσή τους (Franklin, 1985). Επίσης, η διάταξη είναι φορητή που σημαίνει ότι οι δοκιμές μπορούν να εκτελεστούν επιτόπου.

Το δοκίμιο τοποθετείται μεταξύ δυο μεταλλικών ακίδων (Σχήμα 4.24) και φορτίζεται ώστε να αστοχήσει σε χρόνο από $t = 10$ έως 60s. Στα κυλινδρικά δοκίμια η δοκιμή μπορεί να γίνει είτε κατά την διάμετρο είτε αξονικά, προσδιορίζοντας συγχρόνως και τον δείκτη ανισοτροπίας

του πετρώματος. Σε κάθε περίπτωση, η επιφάνεια αστοχίας πρέπει να διέρχεται και από τις δυο ακίδες επιβολής του φορτίου, αλλιώς η δοκιμή θεωρείται άκυρη.



Σχήμα 4.24: Συσκευή σημειακής φόρτισης με κυλινδρικό δοκίμιο για την εκτέλεση διαμετρικής δοκιμής

Ο δείκτης σημειακής φόρτισης (I_s) προσδιορίζεται από την σχέση:

$$I_s = \frac{P_f}{D_e^2} \quad (4.10)$$

όπου:

P_f το φορτίο θραύσης του δοκιμίου

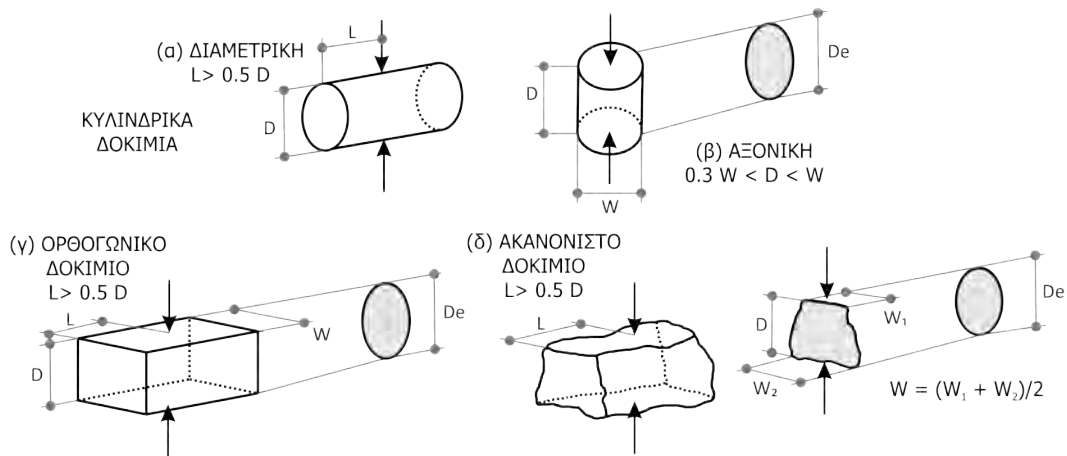
D_e η ισοδύναμη διάμετρος του δοκιμίου

Η ισοδύναμη διάμετρος εξαρτάται από το σχήμα του δοκιμίου. Στην περίπτωση που είναι κυλινδρικό και η δοκιμή γίνεται κατά την διάμετρο, η ισοδύναμη διάμετρος ταυτίζεται με την πραγματική. Σε κάθε άλλη περίπτωση, προκύπτει από την σχέση:

$$D_e^2 = \frac{4A}{\pi} \quad (4.11)$$

όπου:

A η επιφάνεια του επιπέδου που διέρχεται από τα σημεία φόρτισης ($A = wd$), όπως ορίζεται στο σχήμα 4.25



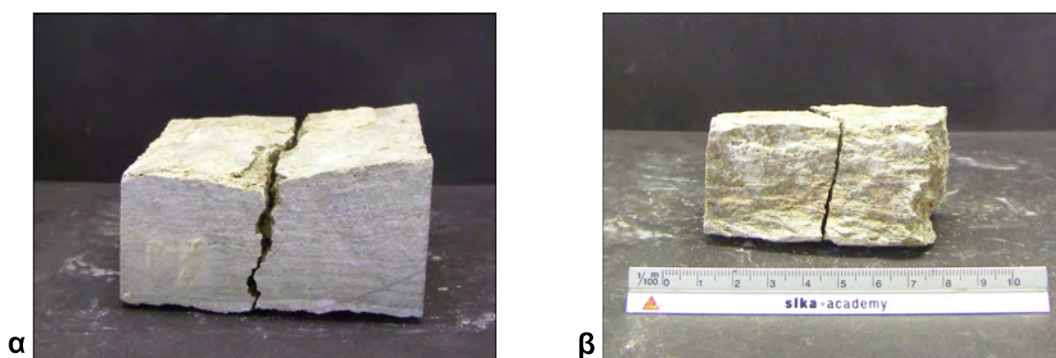
Σχήμα 4.25: Τύποι δοκιμής σημειακής φόρτισης και προσδιορισμός της ισοδύναμης διαμέτρου

Όπως και η αντοχή του άρρηκτου πετρώματος, έτσι και ο δείκτης σημειακής φόρτισης χρήζει αναγωγής σε μια διάσταση αναφοράς, ώστε να είναι απαλλαγμένα τα αποτελέσματα από την επίδραση του μεγέθους του δοκιμίου. Ο διορθωμένος δείκτης σημειακής φόρτισης $I_{s(50)}$ προσδιορίζεται πολλαπλασιάζοντας τον δείκτη σημειακής φόρτισης I_s με τον συντελεστή διόρθωσης F (Σχέση 4.12).

$$F = \left(\frac{D_e}{50} \right)^{0.45} \quad (4.12)$$

όπου η ισοδύναμη διάμετρος D_e εισάγεται σε mm

Δεδομένου ότι η δοκιμή προσδιορίζει εμπειρικά την αντοχή, συνεπώς με περιορισμένη αξιοπιστία, χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία μόνο για τον προσδιορισμό της αντοχής-κατάταξη των αποσαθρωμένων εμφανίσεων του σχιστόλιθου Καισαριανής. Ο λόγος ήταν καθαρά πρακτικός, καθώς η σχιστότητα του σχηματισμού σε συνδυασμό με τα φτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά δεν επέτρεψαν την πυρηνοληψία και κατ' επέκταση την εκτέλεση δοκιμών προσδιορισμού της αντοχής του άρρηκτου πετρώματος.

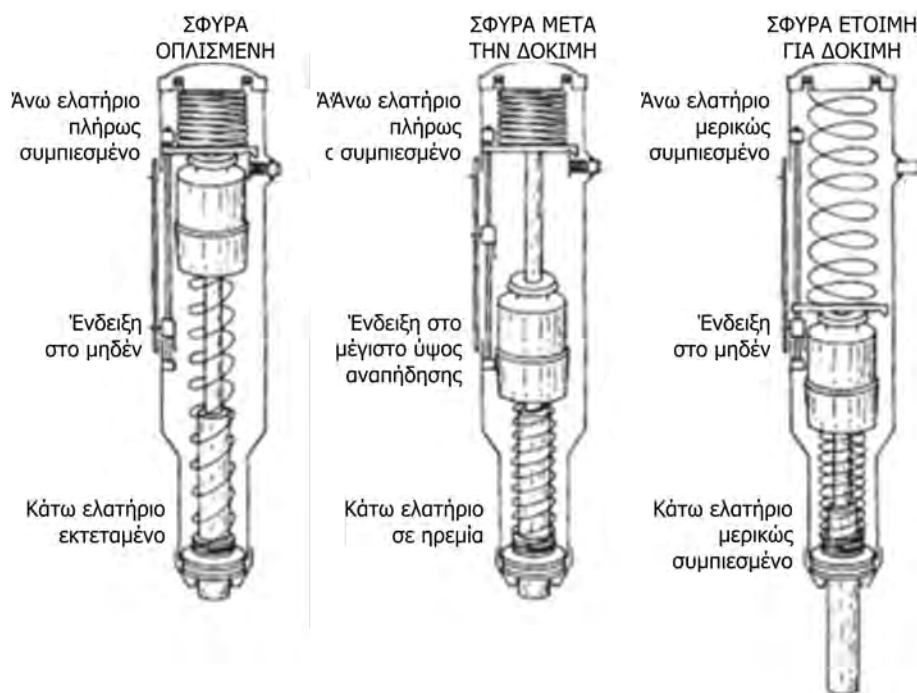


Σχήμα 4.26: Δοκίμια ακανόνιστου σχήματος από αποσαθρωμένο σχιστόλιθο μετά την εκτέλεση δοκιμής σημειακής φόρτισης

4.2.1.5 Σκληρότητα κατά τη σφύρα Schmidt

Με την σφύρα Schmidt γίνεται εκτίμηση της επιφανειακής σκληρότητας του πετρώματος. Η συσκευή αποτελείται από ένα έμβολο, στην άκρη του οποίου προσκρούει μια μάζα που ωθείται από ένα ελατήριο και αναπήδα (σχήμα 4.27). Μετράται το ύψος αναπήδησης της μάζας σε κατάλληλα βαθμονομημένη κλίμακα (Aydin, 2008). Στην σχετική βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές συσχετίσεις της σκληρότητας της σφύρας Schmidt (R) με την αντοχή και την ελαστικότητα του πετρώματος (ενδεικτικά: Aydin and Basu, 2005). Γενικώς, η αναπήδηση εξαρτάται από την πυκνότητα, τον τύπο και την ποιότητά του πετρώματος, από την γεωμετρία της επιφάνειας που γίνεται η μέτρηση καθώς και από την διεύθυνση της σφύρας.

Η δοκιμή κρουσιμέτρησης εμφανίζει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως είναι η εύκολη και γρήγορη εκτέλεση, οι μικρές απαιτήσεις σε εξοπλισμό, το περιορισμένο κόστος και η άμεση διαθεσιμότητα των αποτελεσμάτων. Όμως η εκτίμηση αφορά μονάχα την επιφανειακή ζώνη του υλικού, με περιορισμένο βάθος επιρροής (2 έως 3cm) και εμφανίζει σχετικά υψηλό συντελεστή μεταβλητότητας των αποτελεσμάτων, περίπου $\pm 10\%$ (Σοφιανός and Νομικός, 2009).



Σχήμα 4.27: Μηχανισμός και αρχή λειτουργίας της σφύρας Schmidt

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε σφύρα Schmidt τύπου L και οι μετρήσεις έγιναν στις βάσεις πρόσκρουσης με την σφύρα κάθετη στην επιφάνεια των δοκιμίων. Επιπρόσθετα, στα δοκίμια του σχιστόλιθου η διεύθυνση της σφύρας Schmidt ήταν κάθετη και στη σχιστότητα.

4.2.1.6 Συγκεντρωτική παρουσίαση ιδιοτήτων βραχωδών υλικών

Στον πίνακα 4.1 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι μέσες τιμές των φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών των άρρηκτων πετρωμάτων και των τεχνητών υλικών που έχουν χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία.

Με την συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων μεταξύ των φυσικών και τεχνητών δοκιμίων, όσων αφορά στις μηχανικές και φυσικές ιδιότητες, γίνεται η απόπειρα να γενικευθούν τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την χρήση των τεχνητών δοκιμίων στα φυσικά.

Πίνακας 4.1: Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες υλικών

Τύπος πετρώματος	ρ [kN/m ³]	σ_c [MPa]	E_t [GPa]	σ_t [MPa]	ν [-]	V_p [ms ⁻¹]	V_s [ms ⁻¹]	R [-]
Λεπτοκρυσταλλικό μάρμαρο	27.6	143.0	83.7	13.7	0.217	4130	2822	50.8
Χαλαζιακός ψαμμίτης	25.2	107.5	35.4	11.4	0.252	4606	2981	44.7
Μάρμαρο	25.2	66.1	40.2	6.2	0.261	4954	2861	38.2
Κρυσταλλικός ασβεστόλιθος	25.6	52.9	40.8	6.6	0.124	6013	3322	36.7
Ασβεστόλιθος	26.2	67.0	44.2	5.0	0.221	5828	3240	36.1
Πρασινοσχιστόλιθος	26.1	23.1	15.1	4.6	0.109	4439	2914	30.7
Σχιστόλιθος	23.6	17.5	2.4	4.7	0.157	2208	1348	22.3
Μάργα	22.1	2.6	1.8	0.5	0.123	1733	1188	18.2
Εποξειδική ρητίνη	20.4	86.5	11.0	15.6	0.377	4125	2429	42.3
Τσιμεντοειδούς βάσης ένεμα	21.9	37.4	15.7	7.5	0.113	4335	2574	33.4
Πολυεστέρας	16.9	90.2	5.2	20.5	0.451	3295	1675	41.8

Στον πίνακα 4.2 παρατίθενται τα αποτελέσματα των δοκιμών σημειακής φόρτισης που αφορούν στο υλικό του σχιστόλιθου για τους διαφορετικούς βαθμούς αποσάθρωσης. Η δειγματοληψία των υλικών έγινε με βάση την ποιοτική ταξινόμηση της αποσάθρωσης, βάσει του αποχρωματισμού και της αποδόμησης των επιφανειών (Barton, 1978).

Πίνακας 4.2: Ιδιότητες αποσαθρωμένων επιφανειών σχιστολίθου

Ποιοτικός χαρακτηρισμός (Barton, 1978)	Δείκτης σημειακής φόρτισης $I_{s(50)}$ [MPa]	Σκληρότητα σφύρας Schmidt R [MPa]
Υγιής επιφάνεια (I)	2.18	36.2
Μέτρια αποσάθρωση (II)	1.63	20.0
Υψηλή αποσάθρωση (IV)	0.48	16.3

4.2.2 Εδαφικά υλικά

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται οι ιδιότητες των αργιλικών και των αμμωδών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της εδαφικής επικάλυψης. Επισημαίνεται ότι στην παρούσα διατριβή δεν έγινε ιδιαίτερη εμβάθυνση στην κατεύθυνση αυτή. Η πρόσκρουση τεμάχους σε παραμορφώσιμη επιφάνεια, όπως οι εδαφικές, εμφανίζει σημαντικές διαφοροποιήσεις σε σχέση με τις βραχώδεις στον μηχανισμό απόσβεσης της ενέργειας.

Ωστόσο, θεωρήθηκε σκόπιμο να γίνει μια ποιοτική διερεύνηση της περίπτωσης αυτής, ώστε μέσω της συγκριτικής αξιολόγησης των αποτελεσμάτων, να σχολιασθεί η εν λόγω κατάσταση σε αντίστοιχες συνθήκες με αυτές στις κρούσεις μεταξύ βραχωδών υλικών. Έτσι, η διερεύνηση των ιδιοτήτων των εδαφικών υλικών έγινε μόνο για την κατάταξή τους.

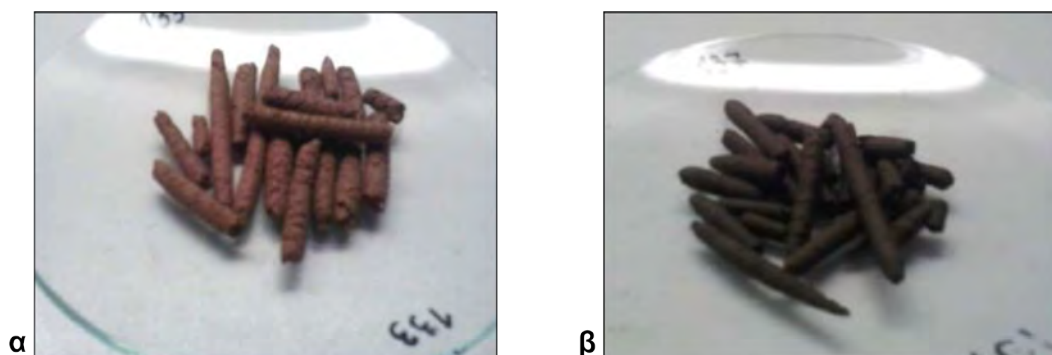
4.2.2.1 Αργιλικά υλικά

Για την προσομοίωση της εδαφικής επικάλυψης χρησιμοποιήθηκαν δυο τύποι αργιλικών υλικών, που εμφανίζουν διαφοροποίηση ως προς την πλαστικότητα τους. Τα υλικά συλλέχθηκαν από την φυσική τους θέση και μετά από κατάλληλη επεξεργασία, διατηρήθηκε μόνο το κλάσμα που διερχόταν από το κόσκινο Νο 40, δηλαδή με μεγίστη διάσταση διερχόμενου κόκκου ίση με $d_{max} = 0.425mm$. Προσδιορίστηκαν τα όρια Atterberg και έγινε η κατάταξή τους έγινε με το σύστημα USCS (Unified Soil Classification System). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 4.3.

Πίνακας 4.3: Όρια Atterberg αργιλικών υλικών

Κατάταξη USCS	Άργιλος χαμηλής πλαστικότητας	Άργιλος μέσης πλαστικότητας
Όριο υδαρότητας (LL)	25	32
Όριο πλαστικότητας (PL)	15	18
Δείκτης πλαστικότητας (PI)	10	14

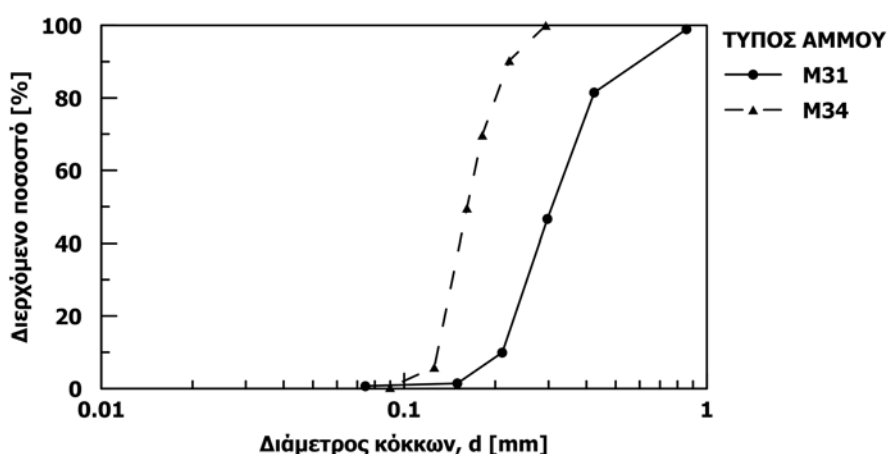
Η άργιλος χαμηλής πλαστικότητας είναι κόκκινου χρώματος (σχήμα 4.28-α) και προέρχεται από την Ερμιόνη. Η άργιλος μέσης πλαστικότητας (σχήμα 4.28-β) είναι σκούρου καφέ χρώματος και προέρχεται από την περιοχή της Φθιώτιδας.



Σχήμα 4.28: Τα αργιλικά υλικά κατά την δοκιμή προσδιορισμού των ορίων υδαρότητας, για την άργιλο (α) χαμηλής και (β) μέσης πλαστικότητας

4.2.2.2 Αμμώδη υλικά

Χρησιμοποιήθηκαν δυο τύποι πρότυπης άμμου που εμφανίζουν διαφοροποίηση ως προς την κοκκομετρική τους διαβάθμιση. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε η άμμος M31 και η άμμος M34, που είναι γνωστή και ως άμμος Longstone. Στο σχήμα 4.29 παρατίθενται οι καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης των δύο άμμων.



Σχήμα 4.29: Καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης άμμου M31 και M34 (Κωνσταντίνου, 2013)

Η άμμος M31 είναι μια υπόλευκη φυσική χαλαζιακή άμμος, από την έρημο της Αιγύπτου. Οι κόκκοι εμφανίζουν αρκετά καλή σφαιρικότητα, είναι διαυγείς και άχρωμοι. Ο δείκτης πόρων, e , κυμαίνεται μεταξύ 0.5 και 0.8, η μέση διάμετρος κόκκων είναι $d_{50} = 0.3mm$ και το ειδικό βάρος των στερεών κόκκων είναι $G_s = 2.65g/cm^3$. Η άμμος M34 είναι ιδιαίτερα λεπτόκοκκη χαλαζιακή άμμος, βιομηχανικής προέλευσης, με γωνιώδες σχήμα κόκκων. Ο δείκτης πόρων (e) κυμαίνεται μεταξύ 0.51 και 0.99, η μέση διάμετρος είναι $d_{50} = 0.16mm$ και το ειδικό βάρος των στερεών κόκκων ισούται με $G_s = 2.63g/cm^3$ (Κωνσταντίνου, 2013).

4.3 Μέθοδοι καταγραφής και επεξεργασίας της κίνησης

Η καταγραφή της κίνησης των τεμαχών έγινε με την χρήση φωτομηχανών υψηλής ταχύτητας. Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις φωτομηχανές με διαφορετικά χαρακτηριστικά, ανάλογα με τις συνθήκες του πειράματος και τις απαιτήσεις κάθε ανάλυσης.

Το ζητούμενο από την επεξεργασία των καταγραφών είναι ο προσδιορισμός της θέσης που βρίσκεται το τέμαχος σε κάθε καταγεγραμμένη εικόνα, ώστε να γίνει η ανασύνθεση της κίνησης και ο προσδιορισμός των κινηματικών χαρακτηριστικών της. Ο προσδιορισμός της θέσης του τεμάχους επιτεύχθηκε με την ανάπτυξη και σύνθεση αλγορίθμων στο υπολογιστικό περιβάλλον της MatLab χρησιμοποιώντας τεχνικές μηχανικής όρασης.

Οι μέθοδοι καταγραφής και ανάλυσης που χρησιμοποιήθηκαν διακρίνονται σε δυο βασικές κατηγορίες: στην διδιάστατη και στην τριδιάστατη ανάλυση, που αναπτύσσονται λεπτομερώς στις ενότητες 4.3.3 και 4.3.4 αντίστοιχα.

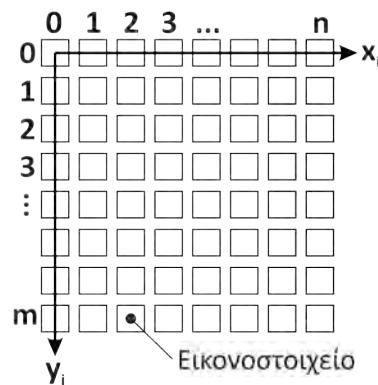
4.3.1 Γενικά περί των ψηφιακών εικόνων

Η καταγραφή της κίνησης γίνεται μέσω της ψηφιακής εικονοσκόπησης της δοκιμής, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ενός αρχείου μορφής *.avi* - (*Audio Video Interleaved*). Το αρχείο αυτό αποτελείται από μια αλληλουχία ψηφιακών εικόνων, που έχουν μεταξύ τους σταθερή χρονική απόσταση. Η ταχύτητα καταγραφής καθορίζεται από τις δυνατότητες της φωτομηχανής και εκφράζεται σε εικόνες ανά δευτερόλεπτο (*fps – frames per second*).

Η εικόνα προσεγγίζεται γεωμετρικά με το μοντέλο της κεντρικής προβολής. Είναι η απεικόνιση του τριδιάστατου χώρου στο επίπεδο καταγραφής μέσω μιας δέσμης ακτίνων που συντρέχουν στο κέντρο προβολής, το οποίο είναι το κέντρο των φακών της φωτομηχανής. Έτσι, η εικόνα συγκροτεί μια προοπτικά παραμορφωμένη άποψη του χώρου.

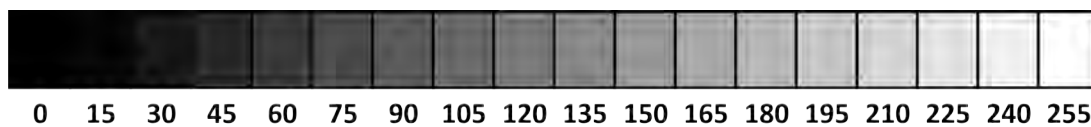
Μια ψηφιακή εικόνα αναπτύσσεται σε έναν διακριτό χώρο δυο διαστάσεων και προσεγγίζεται μαθηματικά από έναν πίνακα. Τα στοιχεία που αποτελούν τον πίνακα καλούνται εικονοστοιχεία (*pixel*). Το πλήθος τους καθορίζει την ανάλυση της εικόνας και εξαρτάται από τις ιδιότητες της φωτομηχανής. Η θέση κάθε στοιχείου στον πίνακα ορίζεται από το σύστημα αξόνων της εικόνας (Σχήμα 4.30). Η αρχή των αξόνων είναι στην πάνω αριστερή γωνία, με τον άξονα *x* να κατευθύνεται προς τα δεξιά και τον άξονα *y* προς τα κάτω, όπως ακριβώς συμβαίνει με το σύστημα αρίθμησης των στοιχείων ενός αλγεβρικού πίνακα.

Η τιμή που λαμβάνει κάθε εικονοστοιχείο εξαρτάται από την μορφή του πρωτοκόλλου απεικόνισης και το χρώμα που θα απεικονίσει. Στις μεθόδους που εφαρμόστηκαν στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκαν εικόνες φωτεινότητας τόνων γκριζου (*grayscale image*) και έγχρωμες εικόνες τύπου RGB.



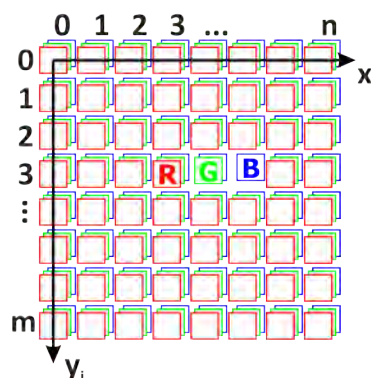
Σχήμα 4.30: Σύστημα συντεταγμένων της εικόνας

Οι εικόνες φωτεινότητας γκριζου τόνου αποτελούνται από εικονοστοιχεία που λαμβάνουν ακέραιες τιμές στο διάστημα 0 έως 255. Το μηδέν, δηλαδή η απουσία φωτεινότητας, αντιστοιχεί στο μαύρο και το 255 στο απόλυτο λευκό. Οι ενδιάμεσες τιμές περιγράφουν αναλογικά τις ενδιάμεσες τονικότητες του γκριζου (Σχήμα 4.31).



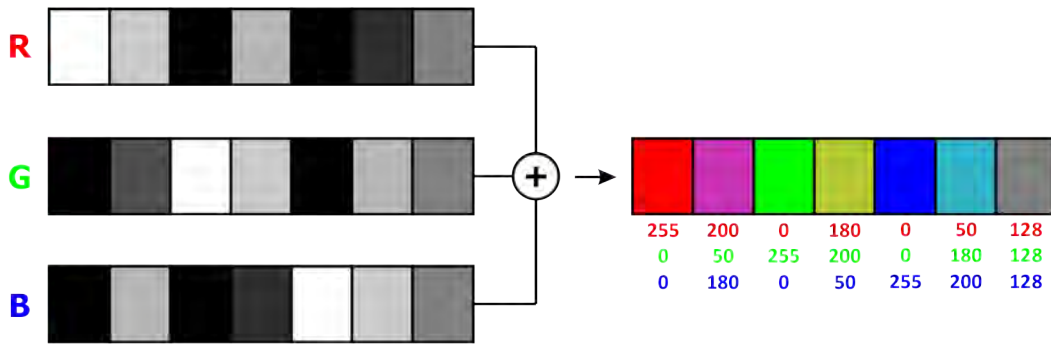
Σχήμα 4.31: Διαβάθμιση εικόνας φωτεινότητας γκριζου τόνου

Οι έγχρωμες εικόνες τύπου RGB (*Red Green Blue*) αποτελούνται από τρία κανάλια, που αντιστοιχούν στα τρία βασικά χρώματα: κόκκινο (R), πράσινο (G) και μπλε (B). Κάθε εικονοστοιχείο λαμβάνει τρεις τιμές φωτεινότητας, μια για κάθε χρώμα. Έτσι, ο αλγεβρικός πίνακας που περιγράφει μια έγχρωμη εικόνα γίνεται τριδιάστατος, όπου στην τρίτη διάσταση αποτυπώνονται τα χρωματικά κανάλια (Σχήμα 4.32)



Σχήμα 4.32: Σύστημα απεικόνισης και συντεταγμένων έγχρωμων εικόνων

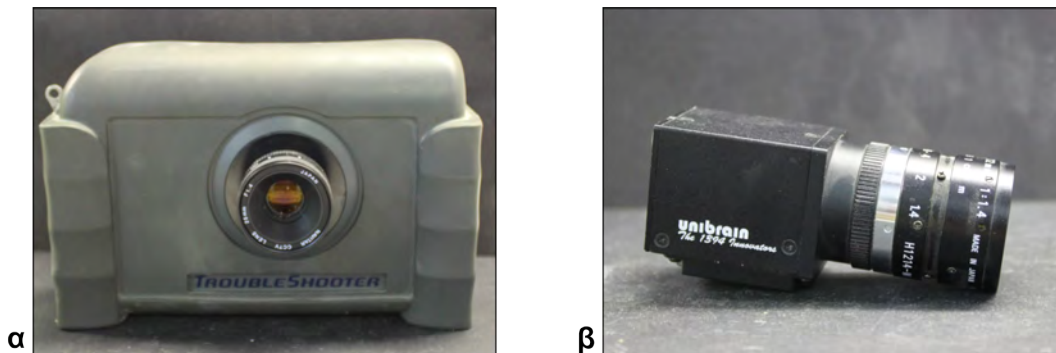
Οι τιμές φωτεινότητας για κάθε κανάλι εκφράζονται μέσω των αντίστοιχων πινάκων και οι αλγόριθμοι επεξεργασίας μεταχειρίζονται κάθε πίνακα ξεχωριστά ως εικόνα τόνων γκριζου και εν συνεχεία συνθέτουν την τελική έγχρωμη εικόνα με επαλληλία (Σχήμα 4.33).



Σχήμα 4.33: Σύνθεση φωτεινότητας γκριζων τόνων για την απεικόνιση χρωμάτων

4.3.2 Εξοπλισμός καταγραφής

Για την καταγραφή των δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις φωτομηχανές, ανάλογα με τις απαιτήσεις κάθε ανάλυσης. Στην διδιάστατη ανάλυση χρησιμοποιήθηκε κυρίως η φωτομηχανή ταχείας λήψης TroubleShooter LE της εταιρείας Fastec Imaging (Σχήμα 4.34-α), οποία φέρει φακό 16mm τύπου C-mount και έχει την δυνατότητα καταγραφής 500 στιγμιοτυπών το δευτερόλεπτο με ανάλυση 440 × 330 εικονοστοιχείων ή 250 στιγμιότυπα το δευτερόλεπτο με ανάλυση 640 × 480 εικονοστοιχείων. Επικουρικά χρησιμοποιήθηκε η φωτομηχανή Fire-i 530b της εταιρείας Unibrain (Σχήμα 4.34-β), με φακό 12 mm τύπου C-mount και δυνατότητα καταγραφής 120 στιγμιοτύπων το δευτερόλεπτο σε ανάλυση 640 × 480 εικονοστοιχείων. Οι μηχανές αυτές καταγράφουν εικόνες φωτεινότητας γκριζου τόνου και ο χειρισμός τους γίνεται μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή.



Σχήμα 4.34: Φωτομηχανές ταχείας λήψης: (α) Troubleshooter-LE και (β) Fire-i 530b

Στην τριδιάστατη ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν δυο όμοιες φωτομηχανές Canon EOS 600D (Σχήμα 4.35) με φακό 50mm και δυνατότητα λήψης 60 εικόνων το δευτερόλεπτο με ανάλυση 1280 × 720 εικονοστοιχεία, καταγράφοντας έγχρωμες εικόνες κωδικοποιημένες με το πρωτόκολλο RGB. Η ρύθμιση των χαρακτηριστικών λήψης γίνεται όπως σε οποιαδήποτε συμβατική φωτογραφική μηχανή, αλλά η έναρξη και η λήξη των καταγραφών γίνεται με τηλεχειρισμό, ώστε να είναι σύγχρονες οι καταγραφές και να παραμένουν σταθερές οι φωτομηχανές.



Σχήμα 4.35: Ζεύγος φωτομηχανών Canon EOS 600d, εγκατεστημένες σε τρίποδα κατά την εκτέλεση δοκιμών πεδίου

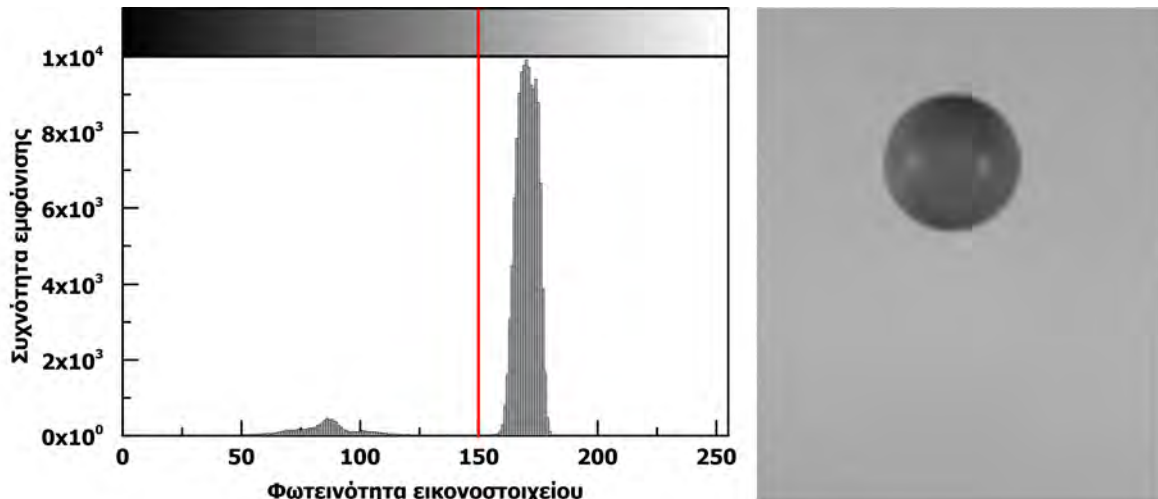
4.3.3 Διδιάστατη ανάλυση

Στις δοκιμές που χρησιμοποιείται μια φωτομηχανή, η καταγραφή είναι διδιάστατη. Ο άξονας της φωτομηχανής τοποθετείται ώστε να είναι κάθετος στο επίπεδο που περιέχει την κίνηση. Συνεπώς, τα επίπεδα της κίνησης και της εικόνας είναι μεταξύ τους παράλληλα. Οι φωτομηχανές που χρησιμοποιήθηκαν για τις διδιάστατες αναλύσεις κατέγραφαν εικόνες φωτεινότητας γκριζου τόνου.

Η χρήση μεθόδων διδιάστατης ανάλυσης μειονεκτεί στην περίπτωση που μετά την κρούση του τεμάχους στην επιφάνεια πρόσκρουσης συμβαίνει εκτροπή από το επίπεδο κίνησης, καθώς υπεισέρχονται σφάλματα στις συντεταγμένες του τεμάχους και κατ' επέκταση στα χαρακτηριστικά της κίνησης που υπολογίζονται. Σημαντικό πλεονέκτημα της διδιάστατης ανάλυσης είναι ότι, με τις μεθόδους που αναπτύχθηκαν και παρουσιάζονται ακολούθως, η ανίχνευση του τεμάχους είναι ακριβής, τάχιστη και πλήρως αυτοματοποιημένη, επιτρέποντας την επεξεργασία μεγάλου πλήθους δοκιμών σε σύντομο χρονικό διάστημα.

Για την ανίχνευση του αντικείμενου πρέπει αρχικά να γίνει η διακριτοποίησή του σε σχέση με τα υπόλοιπα στοιχεία που απεικονίζονται στην εικόνα. Για να επιτευχθεί αυτό, χρησιμοποιείται φόντο με έντονη χρωματική αντίθεση σε σχέση με το τέμαχος που εκτελεί την κίνηση.

Η διακριτοποίηση του αντικείμενου επιτυγχάνεται με την βοήθεια του ιστογράμματος κατανομής της φωτεινότητας. Το ιστόγραμμα αυτό έχει στον οριζόντιο άξονα την φωτεινότητα, η οποία λαμβάνει τιμές από 0 έως 255, και στον κατακόρυφο άξονα τον αριθμό των στοιχείων που εμφανίζουν την εκάστοτε φωτεινότητα. Έτσι, εντοπίζονται τα εικονοστοιχεία των οποίων η φωτεινότητα αντιστοιχεί στο τέμαχος. Εξαιτίας της ύπαρξης σκιάσεων ή χρωματικής διαφοράς επί του τεμάχους, η φωτεινότητα κυμαίνεται σε κάποιο εύρος. Στο σχήμα 4.36 παρουσιάζεται ένα ενδεικτικό ιστόγραμμα, όπου καθίσταται σαφές ότι το τέμαχος περιγράφεται από τιμές φωτεινότητας μικρότερες του 150, εν αντιθέσει με το φόντο.



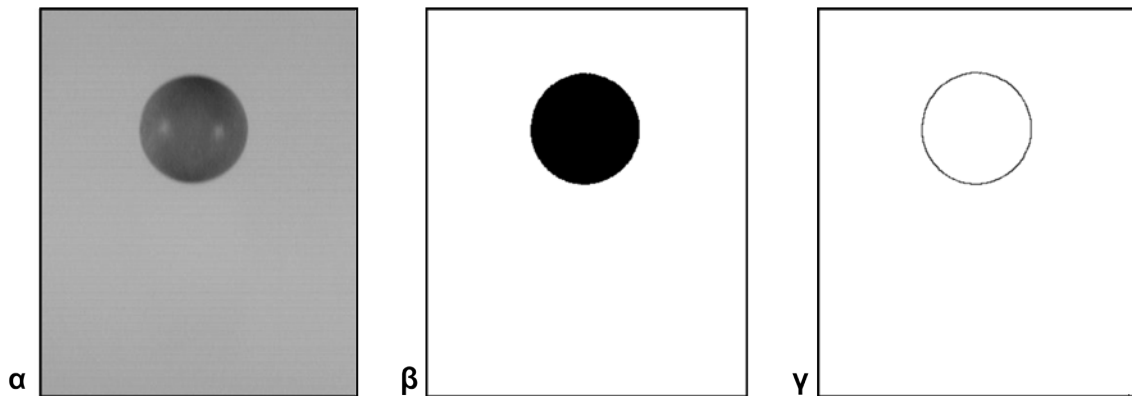
Σχήμα 4.36: Ιστογράμμα φωτεινότητας για την διακριτοποίηση της εικόνας

Η διακριτοποίηση ολοκληρώνεται με την μετατροπή της εικόνας σε δυαδική (binary image), δηλαδή σε εικόνα με δυο μόνο τιμές φωτεινότητας 0 ή 1, το μηδέν αντιστοιχεί στο μαύρο και η μονάδα στο λευκό (σχήμα 4.37–β). Εφόσον το εικονοστοιχείο έχει τιμή φωτεινότητας εντός του εύρους που αντιστοιχεί στο τέμαχος λαμβάνει στην νέα δυαδική εικόνα τιμή 0 (ή 1), αλλιώς παίρνει τιμή 1 (ή 0 αντίστοιχα).

Ένα πρόβλημα που εμφανίζεται κατά την μετατροπή της εικόνας σε δυαδική είναι απεικόνιση θορύβου που οφείλεται στον φωτισμό της σκηνής. Γενικά, οι προβολείς δεν αποδίδουν συνεχές φως ούτε σταθερή θερμοκρασία χρώματος. Αντίθετα εκπέμπουν με μεταβαλλόμενη συχνότητα περί των 100 με 120Hz που είναι μικρότερη της συχνότητας καταγραφής. Κατ' επέκταση τα ιστογράμματα των εικόνων μιας καταγραφής είναι μεταξύ τους ελαφρά μετατοπισμένα με τυχαίο τρόπο, προκαλώντας έτσι μη συστηματικό θόρυβο.

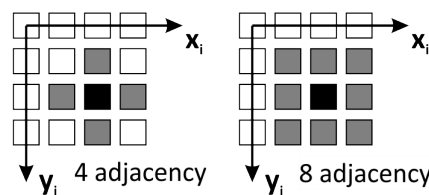
Έτσι, τα όρια φωτεινότητας που αντιστοιχούν στο τέμαχος δεν είναι σταθερά σε όλες τις εικόνες που απαρτίζουν την καταγραφή. Η αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος γίνεται με την εφαρμογή φίλτρων «καθαρισμού» της εικόνας στα επόμενα στάδια επεξεργασίας. Η κατασκευή του ιστογράμματος και ο προσδιορισμός των ορίων φωτεινότητας για κάθε εικόνα ξεχωριστά θα αποτελούσε λύση, όμως ο απαιτούμενος χρόνος επεξεργασίας αυξάνεται σημαντικά.

Στην συνέχεια, εντοπίζεται το περίγραμμα του τεμάχους στην δυαδική εικόνα χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο εντοπισμού της μεταβολής της φωτεινότητας. Ο αλγόριθμος αυτός (Canny, 1986) αποδίδει τα όρια των χωρίων στην εικόνα που εμφανίζουν ίση φωτεινότητα. Έτσι, η εφαρμογή του εν λόγω αλγόριθμου σε δυαδική εικόνα έχει ως αποτέλεσμα την απόδοση του περιγράμματος του τεμάχους. Αυτό γίνεται μέσω ενός λογικού πίνακα ίσης διάστασης με την αρχική εικόνα, τα στοιχεία του οποίου είναι είτε 0 είτε 1. Η μονάδα αντιστοιχεί στα στοιχεία που ανήκουν στα όρια των χωρίων μεταβολής της φωτεινότητας, δηλαδή στο περίγραμμα του τεμάχους (Σχήμα 4.37–γ).



Σχήμα 4.37: Στάδια διακριτοποίησης της καταγραφής: (α) αρχική εικόνα, (β) μετατροπή σε δυαδική και (γ) προσδιορισμός του περιγράμματος του τεμάχου

Έπεται η εφαρμογή φίλτρου καθαρισμού της εικόνα έναντι τυχόν θορύβου που έχει προκύψει από την μετατροπή της εικόνας φωτεινότητας γκριζου σε δυαδική. Επιτυγχάνεται μέσω αλγορίθμου που εφαρμόζεται στον πίνακα περιγράμματος και εξετάζει την γειτνίαση των στοιχείων του, μέσω των μεθόδων 4 ή 8 – adjacency. Στις μεθόδους αυτές εξετάζεται εάν για ένα στοιχείο υπάρχει ένα άλλο το οποίο είτε εφάπτεται σε κάποια από τις πλευρές του (4-adjacency), είτε επιπρόσθετα ταυτίζεται μια γωνία τους (8-adjacency).



Σχήμα 4.38: Προσδιορισμός γειτνιαζόντων εικονοστοιχείων με τις μεθόδους: (α) 4-adjacency και (β) 8-adjacency

Έστω ένα στοιχείο του περιγράμματος του τεμάχου με συντεταγμένες (x, y) στο σύστημα αναφοράς της εικόνας. Για να ικανοποιείται η γειτνίαση με την μέθοδο 4-adjacency, θα πρέπει να υπάρχει τουλάχιστον ένα σημείο στον πίνακα με συντεταγμένες $(x \pm 1, y)$ ή $(x, y \pm 1)$ που να ανήκει στο περίγραμμα. Για την μέθοδο 8-adjacency, οι συντεταγμένες των σημείων, όπου ένα τουλάχιστον εξ αυτών θα πρέπει να ανήκει στο περίγραμμα, είναι: $(x \pm 1, y)$, $(x, y \pm 1)$ και $(x \pm 1, y \mp 1)$.

Δεδομένου ότι το περίγραμμα του τεμάχου περιγράφεται από μια συνεχή καμπύλη, τα στοιχεία που ανήκουν σε αυτό θα πρέπει μεταξύ τους να γειτνιάζουν. Το μέγεθος που προβάλλεται το τέμαχος στην εικόνα καθορίζει το πλήθος των στοιχείων που αποτελούν το περίγραμμα. Έτσι, η εφαρμογή του φίλτρου καθαρισμού γίνεται διατηρώντας μόνο τα στοιχεία που συγκροτούν μια αλυσίδα γειτνιαζόντων στοιχείων με πλήθος που επιλέγεται συναρτήσει των συνολικών στοιχείων του περιγράμματος. Μετά από δοκιμές, προέκυψε ότι για πλήθος στοιχείων ίσο με το μισό του περιγράμματος του τεμάχου, ο θόρυβος εξαλείφεται πλήρως.

Έχοντας τον πίνακα του περιγράμματος, απαλλαγμένο από θόρυβο, λαμβάνονται οι συντεταγμένες όλων των εικονοστοιχείων που ανήκουν στο περίγραμμα. Η ανίχνευση της θέσης του τεμάχους γίνεται πλέον ανάλογα με το σχήμα του.

Για τεμάχη που αποτυπώνονται στο επίπεδο προβολής με σχήμα που περιγράφεται από αναλυτική σχέση, τα σημεία του περιγράμματος χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισαγωγής σε κατάλληλη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων, από την οποία και προκύπτουν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του τεμάχους και η θέση του στο σύστημα αναφοράς της εικόνας. Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται οι μέθοδοι προσδιορισμού του κέντρου βάρους και των διαστάσεων των τεμαχών ανάλογα με το σχήμα τους.

4.3.3.1 Δοκίμια τυχαίου σχήματος

Για τεμάχη τυχαίου σχήματος ή τεμάχη των οποίων η προβολή στο επίπεδο απεικόνισης δεν περιγράφεται από κάποια αναλυτική σχέση, γίνεται η παραδοχή ότι το κέντρο βάρους τους ταυτίζεται με το κέντρο βάρους της προβολής τους στο επίπεδο απεικόνισης. Έτσι, προσδιορίζεται σύμφωνα με τις σχέσεις:

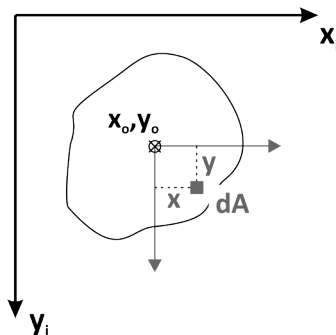
$$x_o = \frac{\int_A x dA}{\int_A dA} \text{ και } y_o = \frac{\int_A y dA}{\int_A dA} \tag{4.13}$$

όπου:

x_o, y_o οι συντεταγμένες του κέντρου βάρους

A η επιφάνεια του τεμάχους

dA η στοιχειώδης επιφάνεια, που ισούται με τις διαστάσεις του εικονοστοιχείου



Σχήμα 4.39: Προσδιορισμός κέντρου βάρους δοκιμίου τυχαίου σχήματος

Για την αναγωγή της κλίμακας, δηλαδή για την μετατροπή από διαστάσεις εικονοστοιχείων σε μονάδες μήκους, χρησιμοποιήθηκε μια κατασκευή η οποία τοποθετούταν επί της επιφάνειας πρόσκρουσης και έφερε ένα παραλληλόγραμμο γνωστών διαστάσεων. Για λόγους τυποποίησης, η κατασκευή αυτή έγινε χρησιμοποιώντας άσπρα και μαύρα στοιχεία, ώστε να γίνεται αυτόματη διακριτοποίηση του παραλληλόγραμμου με κατάλληλο αλγόριθμο που αναπτύχθηκε για τον σκοπό αυτό, σύμφωνα με τις τεχνικές που περιγράφηκαν παραπάνω.

4.3.3.2 Σφαιρικά δοκίμια

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η σφαίρα λόγω της κανονικότητας και της συμμετρίας της εμφανίζει αρκετά πλεονεκτήματα, τόσο όσον αφορά στο τρόπο εκτέλεσης και επεξεργασίας των δοκιμών, όσο και στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Συνεπώς, στην παρούσα εργασία οι δοκιμές με σφαιρικά τεμάχια ήταν αισθητά περισσότερες σε σχέση με τα υπόλοιπα σχήματα που εξετάστηκαν.

Ο προσδιορισμός του κέντρου βάρους της σφαίρας γίνεται με την παραδοχή ότι η προβολή του σχήματος στο επίπεδο απεικόνισης είναι κυκλική. Στην γενική περίπτωση η κεντρική προβολή μιας σφαίρας σε ένα επίπεδο αποδίδει μια έλλειψη. Όμως, όπως σχολιάζεται εκτενώς παρακάτω, περιγράφεται ικανοποιητικά από έναν κύκλο επιτρέποντας την εν λόγω παραδοχή, καθώς υπεισέρχεται αμελητέο σφάλμα.

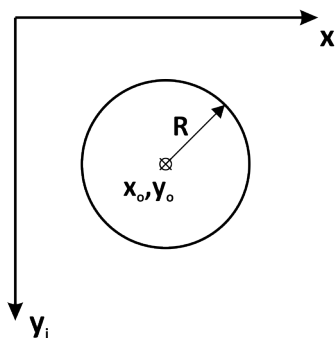
Ως γνωστόν, η γενικευμένη εξίσωση του κύκλου είναι:

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2 \quad (4.14)$$

όπου:

x_0, y_0 οι συντεταγμένες του κέντρου βάρους

R η ακτίνα του κύκλου



Σχήμα 4.40: Προσδιορισμός κέντρου βάρους σφαιρικού δοκιμίου

Με γνωστά 3 τουλάχιστον σημεία που ανήκουν στην περιφέρεια του κύκλου, μπορούν να προσδιοριστούν τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά (συντεταγμένες κέντρου και ακτίνα), εφαρμόζοντας την μέθοδο ελάχιστων τετραγώνων (Σχέση 4.15) που έχει προταθεί από τους Umbach and K. Jones (2003).

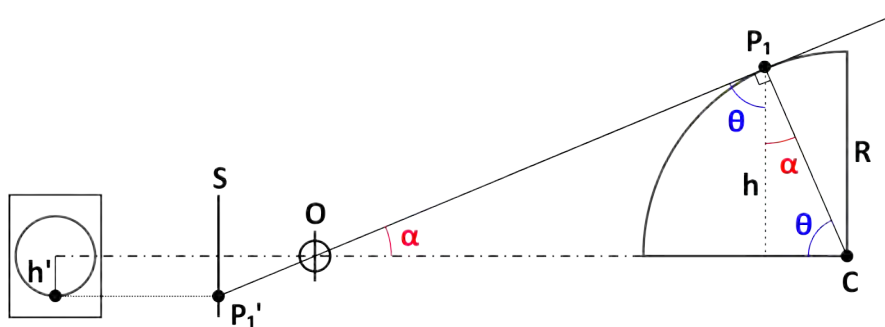
$$SS(x_0, y_0, R) = \min \sum_{i=1}^n \left(R - \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \right)^2 \quad (4.15)$$

Έτσι, στη σχέση 4.15 χρησιμοποιούνται τα σημεία που ανήκουν στο περίγραμμα της σφαίρας, όπως προσδιορίστηκαν από την ανίχνευση του αντικείμενου. Στην συνέχεια, υπολογίζονται για κάθε καταγεγραμμένη εικόνα οι συντεταγμένες και η ακτίνα του βέλτιστου κύκλου. Η

αναγωγή της κλίμακας από μονάδες εικονοστοιχείων σε μονάδες μήκους γίνεται με βάση την ακτίνα που προσδιορίζεται από την παραπάνω μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων σύμφωνα με την πραγματική ακτίνα της σφαίρας.

4.3.3.2.1 Γεωμετρία κεντρικής προβολής σφαίρας

Έστω ότι το κέντρο της σφαίρας (C) βρίσκεται στην ίδια ευθεία που συνδέει το κέντρο προβολής (O) με το κέντρο του αισθητήρα (S), όπου γίνεται η καταγραφή της εικόνας. Τότε η ευθεία αυτή αποτελεί άξονα συμμετρίας και η σφαίρα προβάλλεται ως κύκλος. Όμως η σφαίρα δεν είναι εξ ολοκλήρου ορατή από κέντρο προβολής, συνεπώς προβάλλεται με ακτίνα (h) που είναι μικρότερη από την πραγματική ακτίνα (R) (Σχήμα 4.41).



Σχήμα 4.41: Γεωμετρία κεντρικής προβολής σφαίρας

Από το σχήμα 4.41 προκύπτουν:

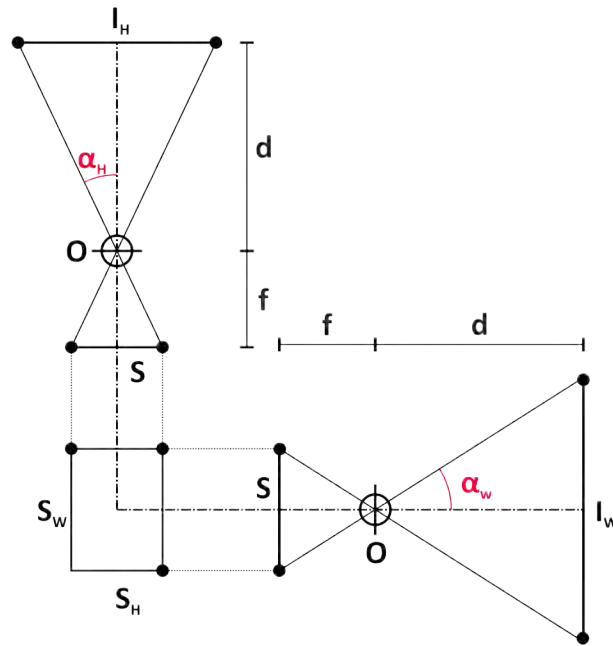
$$\cos \vartheta = h/OP_1 \text{ και } \cos \vartheta = R/OC \tag{4.16}$$

Συνεπώς, η ορατή ακτίνα, h, είναι:

$$h = OP_1 \frac{R}{OC} \tag{4.17}$$

Από την σχέση 4.17 προκύπτει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση της σφαίρας από το κέντρο προβολής, τόσο αυτή προσεγγίζει την πραγματική της διάσταση. Για παράδειγμα, αν η απόσταση είναι $OC = 3R$ τότε η σφαίρα προβάλλεται με ακτίνα $h = 0.93R$, ενώ για απόσταση $OC = 20R$ η φαινόμενη ακτίνα είναι $h = 0.999R$. Έτσι, εφόσον η σφαίρα απέχει σημαντικά από το κέντρο προβολής, τότε η διάμετρος του προβαλλόμενου κύκλου ταυτίζεται πρακτικώς με την διάμετρο της σφαίρας.

Η φωτομηχανή είναι εγκατεστημένη ώστε το επίπεδο της εικόνας να είναι παράλληλο με το επίπεδο που εκτελείται η κίνηση του τεμάχους. Έτσι, το εύρος του επιπέδου που απεικονίζεται εξαρτάται από το εστιακό βάθος του φακού (f) και από την απόσταση (d) της σφαίρας από το κέντρο προβολής. Στο σχήμα 4.42 παρουσιάζεται σχηματικά η γεωμετρία απεικόνισης μιας φωτομηχανής.



Σχήμα 4.42: Προσδιορισμός εύρους απεικόνισης

Από όμοια τρίγωνα προκύπτουν:

$$I_w = \frac{dS_w}{f} \text{ και } I_H = \frac{dS_H}{f} \quad (4.18)$$

όπου:

I_w, I_H οι διαστάσεις της σκηνής που αποτυπώνεται

S_w, S_H οι διαστάσεις του αισθητήρα

Στις δοκιμές που εκτελέστηκαν στην παρούσα έρευνα, η απόσταση της φωτομηχανής ήταν περίπου $d = 1m$ και η μέγιστη ακτίνα σφαίρας $R = 3cm$. Έτσι, με εφαρμογή της σχέσης 4.17 προκύπτει ότι η φαινόμενη ακτίνα της σφαίρας από το σημείο προβολής είναι $h = 2.998cm$, δηλαδή μόλις $0.02mm$ μικρότερη από την πραγματική.

Η ανάλυση της φωτομηχανής που χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές ήταν 440×330 εικονοστοιχεία και έφερε φακό εστιακού βάρους $f = 16mm$. Η πληροφορία αποτυπώνεται σε έναν αισθητήρα πλάτους $S_w = 6.32mm$ και ύψους $S_H = 4.74mm$. Έτσι, με εφαρμογή των σχέσεων 4.18, οι διαστάσεις του επιπέδου καταγραφής ισούνται με $395 \times 296mm$. Συνεπώς σε ένα εικονοστοιχείο απεικονίζεται πληροφορία που αντιστοιχεί σε τετράγωνο πλευράς $0.89mm$. Συνεπώς, η παραμόρφωση της σφαίρας εξαιτίας της μεθόδου προβολής ($0.02mm$) είναι πολύ μικρότερη από την διακριτική ικανότητα της φωτομηχανής ($0.89mm$), κατ' επέκταση δεν έχει κάποια επίδραση στις μετρήσεις.

Ωστόσο, στην γενική περίπτωση το κέντρο της σφαίρας δεν ταυτίζεται με το κέντρο της προβολής, με αποτέλεσμα η σφαίρα να προβάλλεται ως έλλειψη αντί για κύκλος. Η παρα-

μόρφωση αυτή αυξάνει όσο η σφαίρα απομακρύνεται από το κέντρο της εικόνας και γίνεται μεγίστη στις άκρες της.

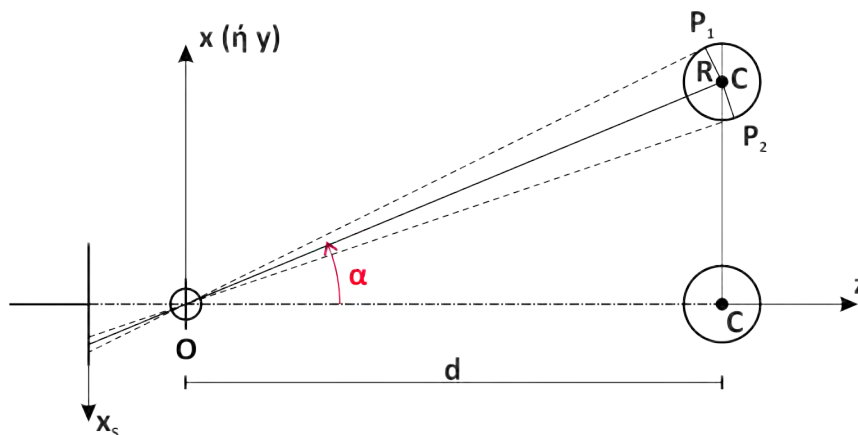
Έστω ότι η σφαίρα βρίσκεται σε τέτοια θέση ώστε να προβάλλεται στο πρωτεύον σημείο και κινείται κατά την οριζόντια διεύθυνση. Η σφαίρα θα είναι ορατή για όσο διάστημα βρίσκεται εντός των ορίων της εικόνας, μέχρις ότου η επίκεντρη γωνία α , φτάσει στα όρια της εικόνας, δηλαδή:

$$\max \alpha = \arctan \left(\frac{S_w/2}{f} \right) \quad (4.19)$$

Σε σύστημα συντεταγμένων (x, z) που έχει αρχή το σημείο προβολής (Σχήμα 4.43), οι συντεταγμένες του κέντρου της σφαίρας συναρτήσει της επίκεντρης γωνίας θα είναι $C(x, z) = (d \tan \alpha, d)$. Έτσι, η απόσταση από το σημείο προβολής, σύμφωνα με το πυθαγόρειο θεώρημα, ισούται με:

$$OC = \sqrt{d^2 + (d \tan \alpha)^2} \quad (4.20)$$

Από το πυθαγόρειο θεώρημα προκύπτει επίσης ότι $OP_1 = OP_2$. Συνεπώς, τα οριακά σημεία του ισημερινού της σφαίρας που φαίνονται από το κέντρο της προβολής O , ανήκουν σε έναν κύκλο με κέντρο $O(x, z) = (0, 0)$ και ακτίνας OP .



Σχήμα 4.43: Γενική περίπτωση κεντρικής προβολής σφαίρας

Για τον προσδιορισμό των συντεταγμένων των σημείων P_1 και P_2 , αρκεί ο προσδιορισμός των σημείων τομής των δυο κύκλων. Διατυπώνοντας τις γενικευμένες εξισώσεις για κάθε κύκλο (σχέση 4.15), βάσει του σχήματος 4.43, οι συντεταγμένες (x, z) των σημείων P_1 και P_2 προκύπτουν από την επίλυση του συστήματος:

$$\begin{aligned} (x - d \tan \alpha)^2 + (z - d)^2 &= R^2 \\ x^2 + z^2 &= \sqrt{d^2 + d \tan^2 \alpha} - R^2 \end{aligned} \quad (4.21)$$

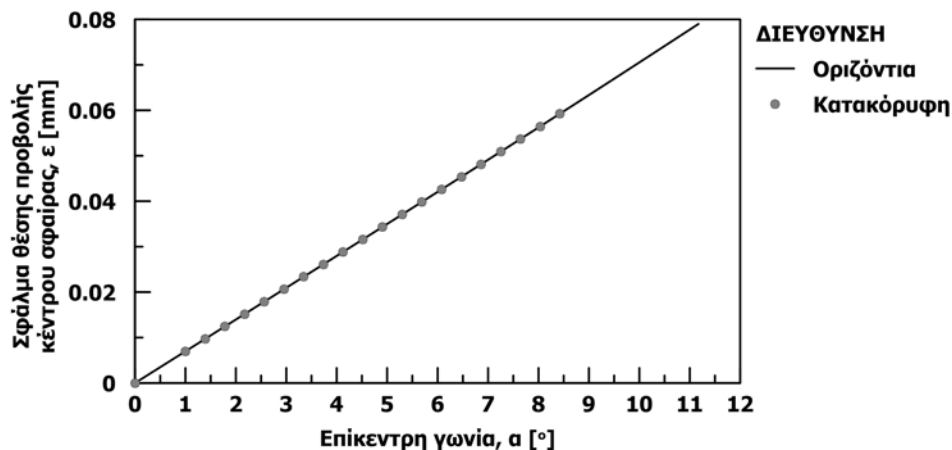
Με γνωστές πλέον τις συντεταγμένες των δυο σημείων, προσδιορίζονται οι αντίστοιχες επίκεντρες γωνίες α_1 και α_2 . Έτσι τα σημεία αυτά, προβάλλονται στο επίπεδο του αισθητήρα ως εξής:

$$x_s = f \tan \alpha_i \quad (4.22)$$

Από την σχέση 4.22 προκύπτει ότι οι προβολές των σημείων P_1 και P_2 δεν ισαπέχουν από την προβολή του κέντρου της σφαίρας, συνεπώς προβάλλοντας όλα τα σημεία της περιφέρειας λαμβάνεται μια έλλειψη.

Με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων (Σχέση 4.15) που εφαρμόζεται για τον προσδιορισμό του κέντρου βάρους, τα στοιχεία του κύκλου προκύπτουν από την προβαλλόμενη έλλειψη. Συνεπώς το πραγματικό κέντρο της σφαίρας x_{sc} δεν ταυτίζεται με αυτό της προβολής, που είναι το κέντρο των x_{SP_1} και x_{SP_2} .

Εφαρμόζοντας την παραπάνω μεθοδολογία για τις συνθήκες των δοκιμών που εκτελέστηκαν, προσδιορίζεται το απόλυτο σφάλμα μεταξύ του πραγματικού και του μετρούμενου κέντρου της σφαίρας συναρτήσει της επίκεντρης γωνίας. Στο σχήμα 4.44 παρουσιάζεται το σφάλμα αυτό, για την περίπτωση όπου η σφαίρα κινείται από το πρωτεύον σημείο προς τα όρια της εικόνας, κατά τον οριζόντιο και τον κατακόρυφο άξονα.



Σχήμα 4.44: Σφάλμα προσδιορισμού του κέντρου της σφαίρας συναρτήσει της επίκεντρης γωνίας

Λόγω συμμετρίας το σφάλμα ταυτίζεται στις δυο περιπτώσεις, όμως κατά την κατακόρυφη διεύθυνση είναι λιγότερο αφού οι διαστάσεις της εικόνας (πλάτος \times ύψος) διαφέρουν. Η δυσμενέστερη περίπτωση είναι όταν η σφαίρα προβάλλεται στην άκρη του αισθητήρα. Με επαλληλία των δύο αξόνων, προκύπτει ότι το σφάλμα στην περίπτωση αυτή θα είναι 0.099mm . Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η διακριτική ικανότητα της φωτομηχανής είναι 0.89mm , μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από το σφάλμα, συνεπώς δεν έχει επίδραση στις μετρήσεις και δεν λαμβάνεται περαιτέρω υπόψη.

4.3.3.3 Δοκίμιο ελλειπτικού δίσκου

Τα δοκίμια ελλειπτικού δίσκου χρησιμοποιήθηκαν με αφορμή τις θεωρητικές μεθόδους εκτίμησης των συντελεστών αναπήδησης όπου λαμβάνεται υπόψη το σχήμα, η γωνιακή ταχύτητα και ο προσανατολισμός του δοκιμίου κατά την κρούση (βλ. ενότητα 3.3.8).

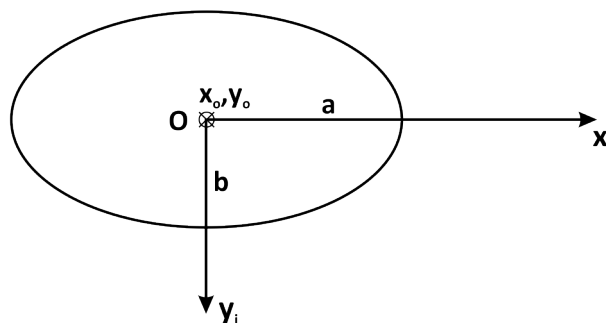
Ένα σημαντικό πλεονέκτημα που έχει το ελλειπτικό δοκίμιο είναι ότι εφόσον ανιχνευτεί το περίγραμμα του και προσδιοριστεί η εξίσωση της έλλειψης που του αντιστοιχεί, τότε είναι εφικτός ο προσδιορισμός της γωνιακής ταχύτητας από την μεταβολή του προσανατολισμού των αξόνων της έλλειψης σε δύο διαδοχικές εικόνες. Προφανώς αυτό δεν μπορεί να επιτευχθεί σε ένα σφαιρικό δοκίμιο εξαιτίας της συμμετρίας του.

Γενικά, μια έλλειψη θεωρείται κανονική εάν το κέντρο της βρίσκεται στην αρχή των αξόνων $O(0, 0)$ και οι άξονες της ταυτίζονται με τους άξονες του συστήματος συντεταγμένων (Σχήμα 4.45). Η εξίσωση της κανονικής έλλειψης σε ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων είναι:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (4.23)$$

όπου:

a, b ο μεγάλος και ο μικρός άξονας της έλλειψης αντίστοιχα



Σχήμα 4.45: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κανονικής έλλειψης

Ορίζοντας τις παραμέτρους f και g ως:

$$f^2 = \frac{1}{a^2} \text{ και } g^2 = \frac{1}{b^2} = 1 \quad (4.24)$$

και αντικαθιστώντας τις στην σχέση 4.23, η εξίσωση της έλλειψης λαμβάνει την μορφή:

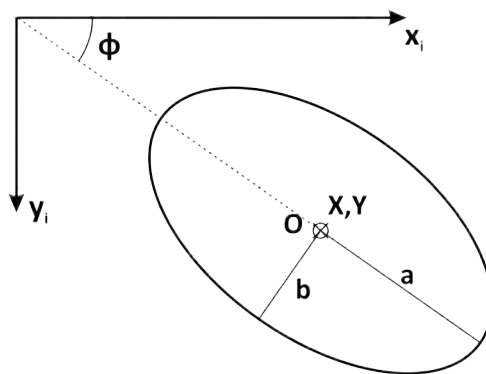
$$f^2 x^2 + g^2 y^2 - 1 = 0 \quad (4.25)$$

Για την έκφραση της γενικευμένης εξίσωσης της έλλειψης, κάθε σημείο (x, y) της περιφέρειάς της προσδιορίζεται συναρτήσει μιας μετάθεσης του κέντρου της έλλειψης κατά X_0 και Y_0 , καθώς και μιας στροφής κατά φ , σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} x &= (X - X_0) \cos \varphi + (Y - Y_0) \sin \varphi \\ y &= (Y - Y_0) \cos \varphi - (X - X_0) \sin \varphi \end{aligned} \quad (4.26)$$

όπου:

X, Y οι συντεταγμένες του κέντρου της έλλειψης



Σχήμα 4.46: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της γενικευμένης εξίσωσης της έλλειψης

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις 4.25 και 4.26 προκύπτει η γενικευμένη εξίσωση της έλλειψης ως εξής:

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0 \quad (4.27)$$

όπου A, B, C, D, E και F οι συντελεστές της έλλειψης που ισούνται με:

$$\begin{aligned} A &= f^2 \cos^2 \varphi + g^2 \sin^2 \varphi \\ B &= 2(f^2 - g^2) \cos \varphi \sin \varphi \\ C &= f^2 \sin^2 \varphi + g^2 \cos^2 \varphi \\ D &= -2(f^2 \cos^2 \varphi + g^2 \sin^2 \varphi)X_0 - 2(f^2 - g^2) \cos \varphi \sin \varphi Y_0 \\ E &= -2(f^2 - g^2) \cos \varphi \sin \varphi X_0 - 2(f^2 \cos^2 \varphi + g^2 \sin^2 \varphi)Y_0 \\ F &= (f^2 \cos^2 \varphi + g^2 \sin^2 \varphi)X_0^2 + 2(f^2 - g^2) \cos \varphi \sin \varphi X_0 Y_0 + (f^2 \sin^2 \varphi + g^2 \cos^2 \varphi)Y_0^2 \end{aligned} \quad (4.28)$$

Ο προσδιορισμός των παραπάνω συντελεστών μπορεί να γίνει από ένα σύνολο σημείων που ανήκουν στην περιφέρεια της έλλειψης με την μέθοδο “Direct Least Squares Fitting of Ellipses” που έχει αναπτυχθεί από τους Fitzgibbon et al. (1999). Πρόκειται για μια μέθοδο ελάχιστων τετραγώνων που εφαρμόζεται στην γενικευμένη εξίσωση της έλλειψης (Σχέση 4.27), η οποία αρχικά κανονικοποιείται ως προς τον συντελεστή F , ώστε ο ελάχιστος αριθμός σημείων της περιφέρειας που απαιτούνται να είναι 5. Η μέθοδος, στην γενική της μορφή, διατυπώνεται ως:

$$SS(A, B, C, D, E, F) = \min \sum_{i=1}^n (Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0)^2 \quad (4.29)$$

Έχοντας προσδιορίσει τους συντελεστές της εξίσωσης 4.27, τα γεωμετρικά στοιχεία της έλλειψης (συντεταγμένες κέντρου, διαστάσεις ημιάξονων και προσανατολισμός) υπολογίζονται από κλειστές αναλυτικές σχέσεις.

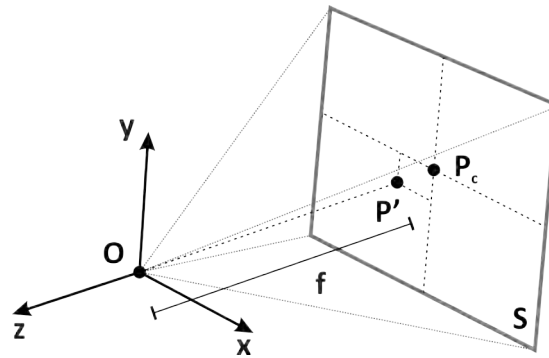
Η αναγωγή της κλίμακας από μονάδες εικονοστοιχείων σε μονάδες μήκους γίνεται με βάση τους ημιάξονες που προσδιορίζονται από την παραπάνω μέθοδο ελάχιστων τετραγώνων και τα πραγματικά τους μήκη όπως μετρήθηκαν στο εργαστήριο.

4.3.4 Τριδιάστατη ανάλυση

Η τριδιάστατη ανάλυση της τροχιάς προϋποθέτει την καταγραφή της κίνησης στον χώρο, η οποία μπορεί να επιτευχθεί με την χρήση δυο φωτομηχανών και την εφαρμογή φωτογραμμετρικών μεθόδων. Γενικά, μέσω της φωτογραμμετρικής επεξεργασίας είναι δυνατός ο προσδιορισμός της θέσης ενός σημείου στον χώρο, εφόσον αυτό προβάλλεται σε δυο εικόνες. Προϋπόθεση είναι η βαθμονόμηση του συστήματος καταγραφής, ώστε να είναι γνωστές οι παράμετροι του εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού των φωτομηχανών, βάσει των οποίων γίνονται οι υπολογισμοί.

4.3.4.1 Βαθμονόμηση φωτομηχανών

Η βαθμονόμηση της φωτομηχανής είναι η διαδικασία προσδιορισμού του εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού της εικόνας. Ο εσωτερικός προσανατολισμός (Σχήμα 4.47) περιγράφει την διαδικασία μαθηματικής ανάπλασης της δέσμης των προβολικών ακτινών που δημιουργήσαν την εικόνα, προερχόμενες από τα σημεία του χώρου. Πραγματοποιείται με τον υπολογισμό της θέσης του σημείου προβολής O ως προς το επίπεδο προβολής S , δηλαδή του σημείου $P(x_o, y_o)$ στο επίπεδο προβολής, που καλείται πρωτεύον σημείο, καθώς και της απόστασης f από αυτό, που καλείται εστιακό βάθος.

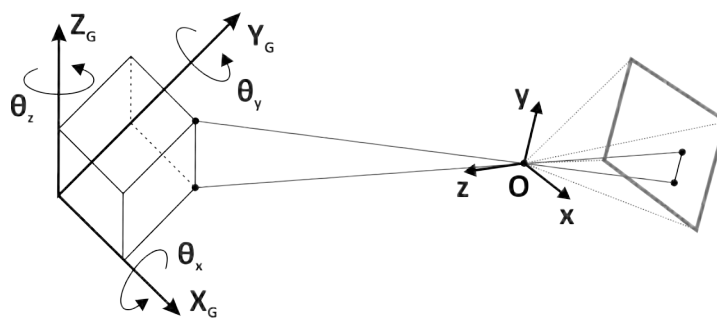


Σχήμα 4.47: Εσωτερικός προσανατολισμός φωτομηχανής

Επιπρόσθετα, στην απεικόνιση υπεισέρχονται σφάλματα, προερχόμενα από το σύστημα φακών της φωτομηχανής, με αποτέλεσμα οι ευθείες στον χώρο να προβάλλονται καμπυλωμένες στο επίπεδο της εικόνας.

Οι παράμετροι του εσωτερικού προσανατολισμού προσδιορίζονται μέσω της βαθμονόμησης της φωτομηχανής (*camera calibration*). Με την βαθμονόμηση, πραγματοποιείται συγχρόνως εκτίμηση των αποκλίσεων της πραγματικής απεικόνισης από το μαθηματικό μοντέλο με την μορφή σφαλμάτων σ_x, σ_y των εικονοσυντεταγμένων, που εκφράζουν την ακρίβεια των μετρήσεων και τα αδιόρθωτα συστηματικά σφάλματα.

Ο εξωτερικός προσανατολισμός της φωτομηχανής περιγράφει την θέση και τον προσανατολισμό του επιπέδου στον χώρο (Σχήμα 4.48), δηλαδή εξαρτάται από την θέση που έχει εγκατασταθεί η φωτομηχανή. Ορίζεται με έξι παραμέτρους: τρεις μεταθέσεις κατά την διεύθυνση των τριών αξόνων x, y και z καθώς και τις τρεις στροφές θ_x, θ_y και θ_z περί των αξόνων αυτών.



Σχήμα 4.48: Εξωτερικός προσανατολισμός φωτομηχανής

Για ένα ζεύγος φωτομηχανών, ο εξωτερικός προσανατολισμός του στερεοζεύγους περιγράφεται πλήρως από 12 παραμέτρους, δηλαδή, από το σύνολο των παραμέτρων του εξωτερικού προσανατολισμού των δύο φωτομηχανών. Ο κοινός προσανατολισμός δύο εικόνων ενός στερεοζεύγους πραγματοποιείται σε δύο στάδια. Αρχικά με την αποκατάσταση του σχετικού προσανατολισμού του ζεύγους των εικόνων και στην συνέχεια με τον καθορισμό του απόλυτου προσανατολισμού.

Με την γνώση του σχετικού προσανατολισμού διατίθενται τα στοιχεία που επιτρέπουν τον αναλυτικό προσδιορισμό των συντεταγμένων στον χώρο όσων σημείων προβάλλονται και στις 2 εικόνες, μέσω της εμπροσθοτομίας. Έτσι προσδιορίζεται ένα σύνολο σημείων που είναι όμοιο προς εκείνο που απεικονίζει, αλλά βρίσκεται σε τυχαία θέση και έχει τυχαίο προσανατολισμό, αφού είναι εκφρασμένο στο σύστημα αναφοράς της μιας εκ των δυο φωτομηχανών. Ωστόσο, το τοπικό αυτό σύστημα αναφοράς είναι επαρκές για την εκτέλεση όλων των απαραίτητων υπολογισμών της κίνησης των τεμαχών, επομένως δεν απαιτείται ο προσδιορισμός του απόλυτου προσανατολισμού.

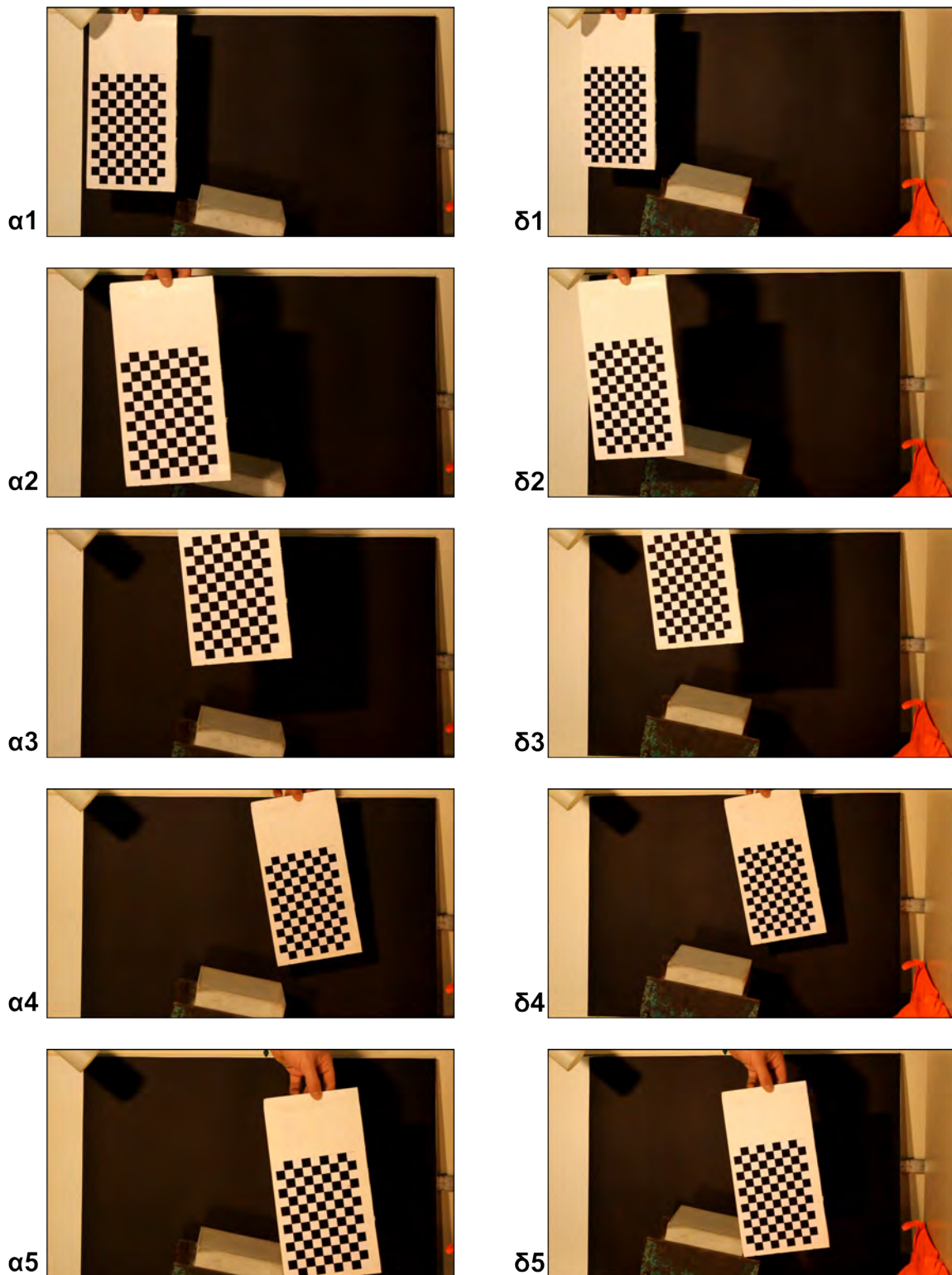
Η βαθμονόμηση κάθε φωτομηχανής πραγματοποιήθηκε στο υπολογιστικό περιβάλλον της MatLab, χρησιμοποιώντας το Camera Calibration Toolbox (Bouguet, 2004) που αποτελεί ανοιχτό κώδικα (*open source*) και είναι ελεύθερα διαθέσιμο στο διαδίκτυο.

Για την πραγματοποίηση της βαθμονόμησης απαιτούνται τουλάχιστον 3 εικόνες ενός καννάβου με πλευρά γνωστής διάστασης σε διαφορετικές θέσεις του χώρου. Όμως η αξιοπιστία των παραμέτρων αυξάνεται όσο χρησιμοποιούνται περισσότερες εικόνες βαθμονόμησης, αφού μειώνεται το σφάλμα στον προσδιορισμό τους. Έτσι, μετά από αναλύσεις ευαισθησίας, κάθε βαθμονόμηση έγινε με την χρήση τουλάχιστον 15 εικόνων.

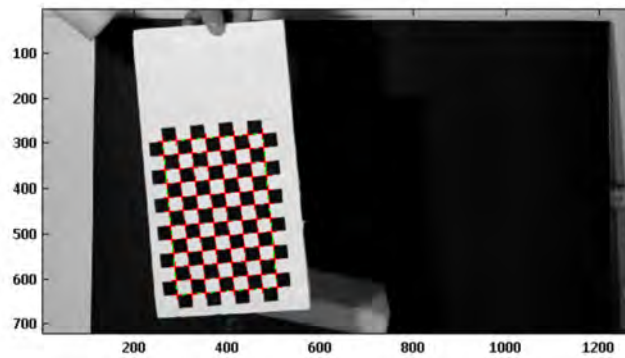
Αρχικά η βαθμονόμηση γίνεται για κάθε φωτομηχανή ξεχωριστά και στην συνέχεια συσχετίζονται οι θέσεις των καννάβων, ώστε να υπολογιστεί ο σχετικός προσανατολισμός της μιας μηχανής σε σχέση με την άλλη. Συνεπώς, οι εικόνες βαθμονόμησης θα πρέπει να είναι συγχρονισμένες. Αυτό επιτυγχάνεται κινηματογραφώντας τον κάνναβο όσο μετακινείται στην σκηνή και ανακτώντας εικόνες που αντιστοιχούν στην ίδια χρονική στιγμή. Στο σχήμα 4.49 παρουσιάζονται ενδεικτικά πέντε ζεύγη εικόνων βαθμονόμησης, βάσει των οποίων γίνεται η οπτικοποίηση της μεθόδου βαθμονόμησης.

Αρχικά, για τις εικόνες κάθε φωτομηχανής προσδιορίζονται τα όρια του καννάβου από το χρήστη, επιλέγοντας τα σημεία που αντιστοιχούν στις γωνίες του, καθορίζοντας έτσι το εξωτερικό του όριο. Στην συνέχεια, η εικόνα σαρώνεται από έναν αλγόριθμο εντοπισμού της διαφοροποίησης στην φωτεινότητα, προσδιορίζοντας κάθε εσωτερική γωνία του καννάβου (Σχήμα 4.50).

Έτσι, είναι διαθέσιμο ένα πλήθος σημείων για κάθε εικόνα, που έχουν μεταξύ τους σαφή γεωμετρική εξάρτηση. Στην συνέχεια, πραγματοποιείται η βαθμονόμηση κάθε φωτομηχανής σε δύο στάδια. Αρχικά, υπολογίζονται οι παράμετροι της βαθμονόμησης χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η διαστρόφη του φακού, χρησιμοποιώντας εξισώσεις κλειστής λύσης (διαδοχικών προσεγγίσεων). Στην συνέχεια, πραγματοποιείται μη-γραμμική βελτιστοποίηση, στην οποία ελαχιστοποιείται το συνολικό σφάλμα ανακατασκευής σε όλες τις παραμέτρους συγχρόνως.



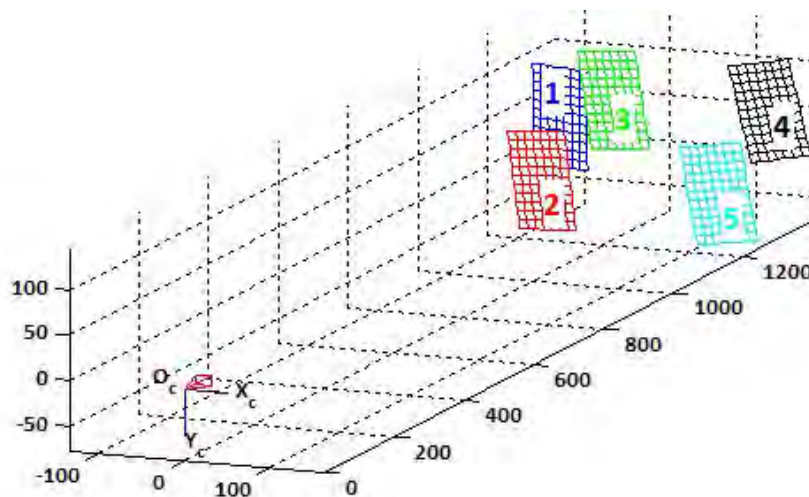
Σχήμα 4.49: Συγχρονισμένες εικόνες για την βαθμονόμηση των φωτομηχανών: (α) αριστερή και (δ) δεξιά φωτομηχανή



Σχήμα 4.50: Προσδιορισμός των εσωτερικών σημείων του καννάβου (Εικόνα α2 από το σχήμα 4.49)

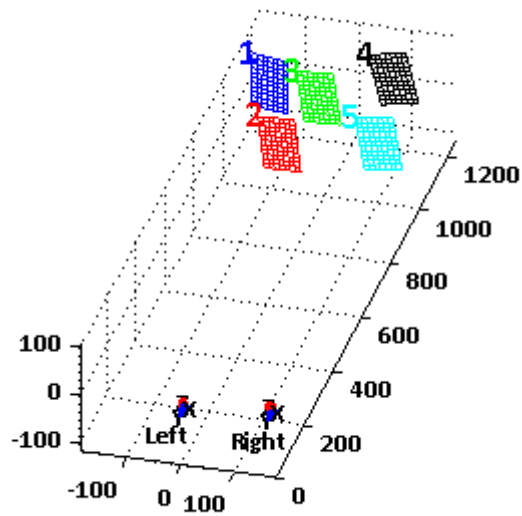
Τα στοιχεία που προκύπτουν από τη βαθμονόμηση κάθε φωτομηχανής είναι: το εστιακό βάθος (f_c), το πρωτεύον σημείο (c_c) και ο συντελεστής διαστροφής (k_c). Ο συντελεστής διαστροφής εκφράζεται με ένα πολυώνυμο 5^{ου} βαθμού που περιλαμβάνει την ακτινική και εφαπτομενική διαστροφή. Συνεπώς, οι παράμετροι του εσωτερικού προσανατολισμού κάθε φωτομηχανής είναι 9 (2 για το εστιακό βάθος, 2 για το πρωτεύον σημείο και 5 για την διαστροφή του φακού).

Επιπλέον, προσδιορίζεται η θέση των καννάβων σε σχέση με την φωτομηχανή, δηλαδή ο υπολογισμός του εξωτερικού προσανατολισμού των εικόνων (Σχήμα 4.51). Τα στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού για κάθε εικόνα είναι ο πίνακας στροφής (R_c) και ο πίνακας μετάθεσης (T_c).



Σχήμα 4.51: Προσδιορισμός του εξωτερικού προσανατολισμού της αριστερής φωτομηχανής, χρησιμοποιούνται οι πέντε εικόνες ($\alpha 1 \div \alpha 5$) που παρουσιάζονται στο σχήμα 4.49

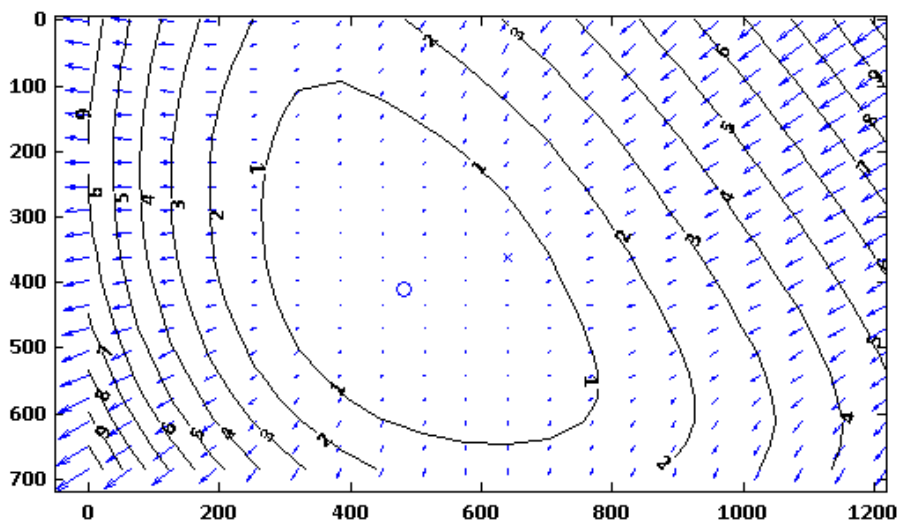
Κάθε εικόνα βαθμονόμησης υπάρχει και για τις δυο φωτομηχανές, συνεπώς ο σχετικός προσανατολισμός του στερεοζεύγους προκύπτει από τον απαιτούμενο μετασχηματισμό ώστε να ταυτιστούν οι καννάβου από τις δυο φωτομηχανές. Ως αρχή του συστήματος αναφοράς θεωρείται, αυθαίρετα, αυτό της αριστερής φωτομηχανής (Σχήμα 4.52).



Σχήμα 4.52: Προσδιορισμός εξωτερικού προσανατολισμού στερεοζεύγους, για τις εικόνες βαθμονόμησης που παρουσιάζονται στο σχήμα 4.49

4.3.4.2 Διόρθωση σφάλματος φακών

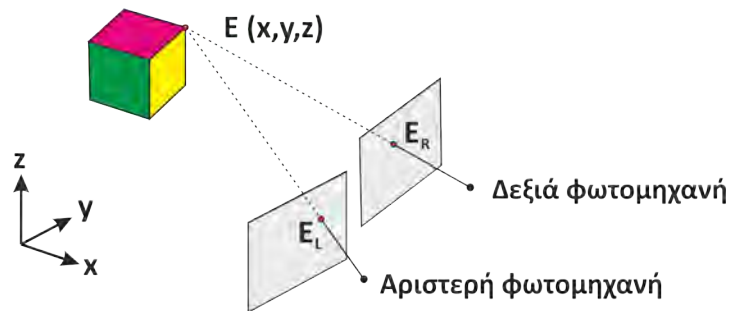
Η διαστροφή των φακών προκαλεί μια στρέβλωση στον τρόπο που απεικονίζονται τα αντικείμενα στην εικόνα (Σχήμα 4.53), η οποία εντείνεται όσο η θέση του αντικείμενου απομακρύνεται από το πρωτεύον σημείο. Έτσι κάθε εικόνα διορθώνεται σύμφωνα με την μέθοδο που προτείνει ο Brown (1966), απαλείφοντας το σφάλμα των φακών και βελτιώνοντας την ποιότητα των μετρήσεων που λαμβάνονται από αυτές.



Σχήμα 4.53: Ενδεικτική απεικόνιση της παραμόρφωσης της εικόνας εξαιτίας της διαστροφής των φακών

4.3.4.3 Προσδιορισμός της θέσης των σημείων στον χώρο

Ο υπολογισμός της θέσης ενός σημείου στον χώρο πραγματοποιείται με την μέθοδο της στερεοφωτογραμμετρικής εμπροσθοτομίας. Δηλαδή, με τον προσδιορισμό του σημείου τομής στο χώρο των ομόλογων ακτινών από τις δύο εικόνες (Σχήμα 4.54).



Σχήμα 4.54: Στερεοφωτογραμμετρική εμπροσθοτομία

Με γνωστό τον εσωτερικό προσανατολισμό των μηχανών και τον εξωτερικό προσανατολισμό των εικόνων, μετρώνται οι εικονοσυντεταγμένες των ομόλογων σημείων σε κάθε εικόνα. Η σχέση μεταξύ των συντεταγμένων (x, y) ενός εικονοστοιχείου και των συντεταγμένων (X, Y, Z) του σημείου στον χώρο δίνεται από την συνθήκη συγγραμμικότητας ως εξής:

$$\begin{bmatrix} x - x_o \\ y - y_o \\ -f \end{bmatrix} = \frac{1}{k} R \begin{bmatrix} X - X_o \\ Y - Y_o \\ Z - Z_o \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

όπου:

k ο συντελεστής κλίμακας

x_o, y_o οι συντεταγμένες του πρωτεύοντος σημείου P

f το εστιακό βάθος

R ο πίνακας στροφής

Η σχέση 4.30 γράφεται στην αναπτυγμένη της μορφή για τις συντεταγμένες που προσδιορίζονται από την εικόνα της φωτομηχανής 1 (με εκθέτη $c1$), ως:

$$\begin{aligned} x^{c1} - x_o^{c1} &= -f^{c1} \frac{r_{11}^{c1}(X - X_o^{c1}) + r_{12}^{c1}(Y - Y_o^{c1}) + r_{13}^{c1}(Z - Z_o^{c1})}{r_{31}^{c1}(X - X_o^{c1}) + r_{32}^{c1}(Y - Y_o^{c1}) + r_{33}^{c1}(Z - Z_o^{c1})} \\ y^{c1} - y_o^{c1} &= -f^{c1} \frac{r_{21}^{c1}(X - X_o^{c1}) + r_{22}^{c1}(Y - Y_o^{c1}) + r_{23}^{c1}(Z - Z_o^{c1})}{r_{31}^{c1}(X - X_o^{c1}) + r_{32}^{c1}(Y - Y_o^{c1}) + r_{33}^{c1}(Z - Z_o^{c1})} \end{aligned} \quad (4.31)$$

όπου:

r_{ij} τα στοιχεία του πίνακα στροφής R , που ορίζεται ως εξής:

$$R = \begin{bmatrix} \cos \vartheta_y \cos \vartheta_z & \cos \vartheta_x \sin \vartheta_z + \sin \vartheta_x \sin \vartheta_y \cos \vartheta_z & \sin \vartheta_x \sin \vartheta_z - \cos \vartheta_x \sin \vartheta_y \cos \vartheta_z \\ -\cos \vartheta_y \sin \vartheta_z & \cos \vartheta_x \cos \vartheta_z - \sin \vartheta_x \sin \vartheta_y \sin \vartheta_z & \sin \vartheta_x \cos \vartheta_z + \cos \vartheta_x \sin \vartheta_y \sin \vartheta_z \\ \sin \vartheta_y & -\sin \vartheta_x \cos \vartheta_y & \cos \vartheta_x \cos \vartheta_y \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

Για κάθε σημείο που μετράται στην εικόνα προκύπτουν δύο εξισώσεις από την συνθήκη συγγραμμικότητας. Συνεπώς, αφού κάθε σημείο μετράται και στις δυο εικόνες, προκύπτουν τέσσερις συνολικά εξισώσεις (οι 2 εξισώσεις (4.31) ως έχουν, καθώς και άλλες δυο που αφορούν στην δεύτερη φωτομηχανή, δηλαδή με εκθέτη c_2). Από τις εξισώσεις αυτές προσδιορίζονται οι τρεις άγνωστες συντεταγμένες στο χώρο (X, Y, Z) , δηλαδή υπάρχει ένας βαθμός ελευθερίας.

Για την πλήρη εκμετάλλευση της επιπλέον διαθέσιμης πληροφορίας πραγματοποιείται συνόρθωση των παρατηρήσεων, που επιτυγχάνεται επιλύοντας με τη μέθοδο των εμμέσων παρατηρήσεων. Έτσι, επιλύεται ένα γραμμικό σύστημα της μορφής:

$$I - v = A\Delta \quad (4.33)$$

I διάνυσμα παρατηρήσεων (4×1)

v διάνυσμα διορθώσεως των παρατηρήσεων (4×1)

A πίνακας σχεδιασμού (4×3)

Δ διάνυσμα παρατηρήσεων (3×1)

Με την προϋπόθεση ότι ικανοποιείται η αρχή των ελαχίστων τετραγώνων, δηλαδή ότι ελαχιστοποιείται το άθροισμα των τετραγώνων των διορθώσεων επί των παρατηρήσεων, η λύση του παραπάνω συστήματος (Σχέση 4.33), προκύπτει από την επίλυση της σχέσης:

$$\Delta = (A^T A)^{-1} A^T I \quad (4.34)$$

Για την επίλυση της σχέσης 4.34 απαιτείται η γραμμικοποίηση της εξίσωσης συγγραμμικότητας ως προς του αγνώστους της. Αυτό επιτυγχάνεται με ανάπτυξη των εξισώσεων σε σειρά Taylor, χρησιμοποιώντας προσεγγιστικές τιμές για τους αγνώστους και μόνο τους γραμμικούς όρους της σειράς. Έτσι, η γραμμικοποίηση της σχέσης 4.31 λαμβάνει την μορφή:

$$\begin{aligned} I_x^{c1} = x^{c1} - x_o^{c1} &= \frac{dx^{c1}}{dX} dX + \frac{dx^{c1}}{dY} dY + \frac{dx^{c1}}{dZ} dZ + v_x^{c1} \\ I_y^{c1} = y^{c1} - y_o^{c1} &= \frac{dy^{c1}}{dX} dX + \frac{dy^{c1}}{dY} dY + \frac{dy^{c1}}{dZ} dZ + v_y^{c1} \end{aligned} \quad (4.35)$$

Για την επίλυση της σχέσης 4.35 απαιτούνται προσεγγιστικές τιμές (x_o, y_o) , που υπολογίζονται με βάση τις προσωρινές τιμές των συντεταγμένων (X_o, Y_o, Z_o) χρησιμοποιώντας 3 από τις 4 διαθέσιμες εξισώσεις, επιλύοντας δηλαδή ένα σύστημα 3 εξισώσεων με 3 αγνώστους.

4.4 Ανάλυση κίνησης

Έχοντας προσδιορίσει τις συντεταγμένες του κέντρου βάρους του τεμάχους από τις καταγεγραμμένες εικόνες, σύμφωνα με τις μεθόδους που περιγράφηκαν στις προηγούμενες ενότητες, προκύπτει μια χρονοσειρά συντεταγμένων που περιγράφουν την κίνηση. Ο χρόνος μεταξύ των σημείων ισούται με την ταχύτητα καταγραφής της φωτομηχανής.

Όμως, οι συντεταγμένες αυτές έχουν προσδιοριστεί πειραματικά, συνεπώς αναπόφευκτα εμπεριέχουν κάποιο σφάλμα. Η απεικόνιση της σκηνής μέσω των εικονοστοιχείων αποτελεί πηγή σφάλματος, αφού αναπαριστάται σε πεπερασμένο αριθμό ψηφίδων. Επίσης, σφάλμα μπορεί να προκαλείται από την ανίχνευση του κέντρου βάρους, είτε εξ αιτίας των παραδοχών που έχουν υιοθετηθεί, είτε εξαιτίας τυχόν θορύβου στις εικόνες. Έτσι, γίνεται διόρθωση των συντεταγμένων ώστε να ικανοποιούνται οι φυσικοί νόμοι της κίνησης.

Σύμφωνα με τις αρχές της βαλλιστικής, ένα τέμαχος που κινείται στο αέρα επί του οποίου δεν επενεργούν εξωτερικές δυνάμεις (η αντίσταση του αέρα θεωρείται αμελητέα) εκτελεί ομαλά επιταχυνόμενη κίνηση κατά τον κατακόρυφο άξονα εξαιτίας της βαρύτητας και ευθύγραμμη ομαλή κατά τον οριζόντιο άξονα. Συνεπώς, σε κάθε περίπτωση, η κίνηση διαχωρίζεται στα σκέλη πριν και μετά την κρούση, ώστε να εξετασθούν ξεχωριστά βάσει των ανωτέρω αρχών. Στις παρακάτω ενότητες περιγράφεται η μεθοδολογία ανασύνθεσης της κίνησης για την διδιάστατη και την τριδιάστατη ανάλυση.

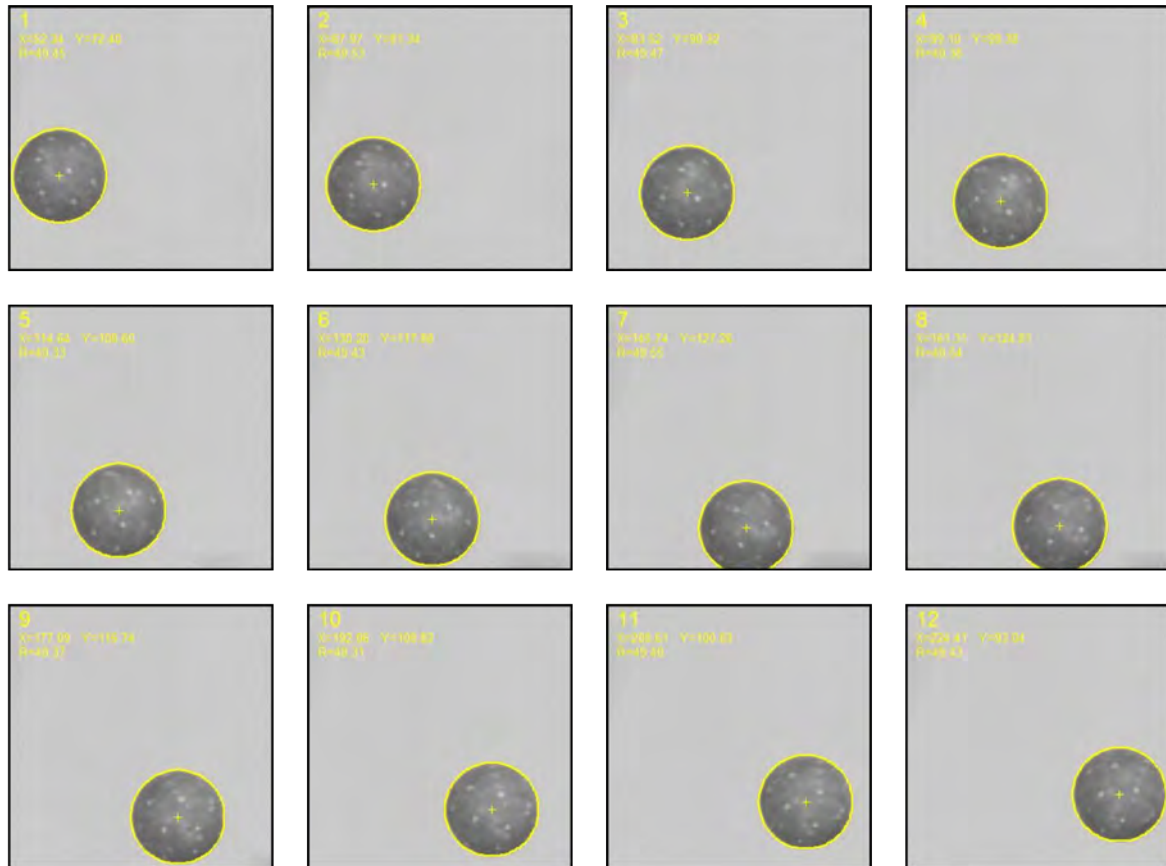
4.4.1 Διδιάστατη ανάλυση κίνησης

Στις καταγραφές που έγιναν με μια φωτομηχανή η ανάλυση είναι διδιάστατη. Αρχικά, γίνεται μετασχηματισμός του συστήματος συντεταγμένων της εικόνας $S(x_i, y_i)$ σε αυτό της ανάλυσης $O(x, z)$. Ο άξονας x_i του συστήματος αναφοράς της εικόνας ταυτίζεται με τον άξονα X της ανάλυσης και ο άξονας y_i είναι αντίρροπος του άξονα Z .

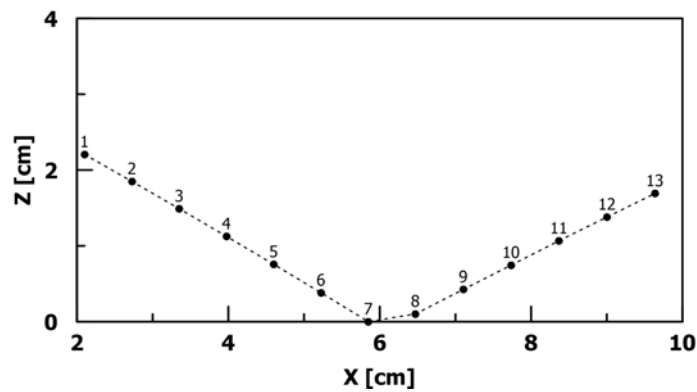
Ειδική περίπτωση στην διδιάστατη κίνηση αποτελούν οι δοκιμές ελεύθερης πτώσης, όπου τουλάχιστον για το σκέλος πριν την κρούση η κίνηση γίνεται μόνο κατά τον άξονα Z . Πριν την κρούση οι συντεταγμένες κατά x_i οφείλουν να ταυτίζονται. Ο προσδιορισμός των μεγεθών ενδιαφέροντος γίνεται σε αντίστοιχα στάδια με αυτά που αφορούν στην παραβολική ρίψη αλλά με κάποιες απλοποιήσεις.

4.4.1.1 Μεταθετική κίνηση

Για την καλύτερη εποπτεία της αλληλουχίας μιας ανάλυσης, χρησιμοποιείται μια τυπική δοκιμή παραβολικής ρίψης ενός σφαιρικού δοκιμίου, βάσει της οποίας περιγράφονται αναλυτικά τα στάδια επεξεργασίας. Τα διαδοχικά στιγμιότυπα μιας τέτοιας δοκιμής παρουσιάζονται στο σχήμα 4.55. Όσα αναφέρονται παρακάτω αφορούν στο κέντρο βάρους του τεμάχους. Συνεπώς είναι ανεξάρτητα του σχήματος και έχουν πανομοιότυπη εφαρμογή για όλα τα σχήματα δοκιμίων που εξετάστηκαν.



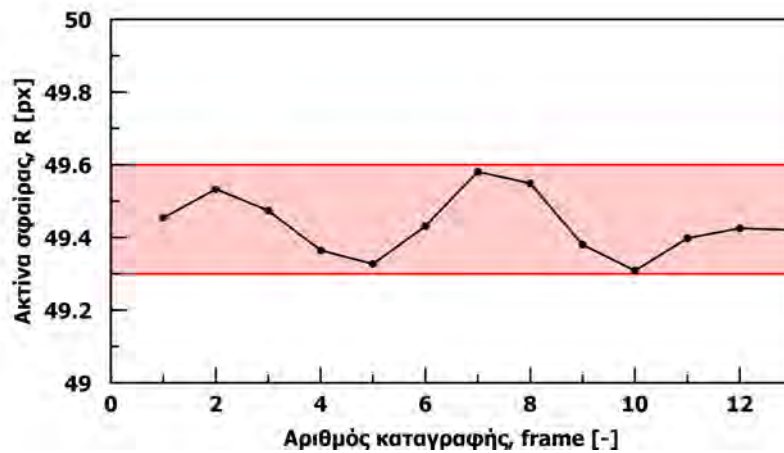
Σχήμα 4.55: Ανάλυση καταγραφών σε μια τυπική δοκιμή με σφαιρικό τεμάχος



Σχήμα 4.56: Συντεταγμένες κέντρου βάρους τεμάχους στο σύστημα αναφοράς της ανάλυσης

Στο σχήμα 4.56 παρουσιάζονται οι συντεταγμένες του κέντρου βάρους στο σύστημα αναφοράς της ανάλυσης, αφού δηλαδή έχει γίνει αναγωγή της κλίμακας από μονάδες εικονοστοιχείων σε μονάδες μήκους.

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 4.3.3.2, στις δοκιμές με σφαιρικά δοκίμια η αναγωγή της κλίμακας γίνεται σύμφωνα με την ακτίνα που υπολογίζεται από την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων (σχέση 4.15). Στο σχήμα 4.57 είναι αποτυπωμένη η ακτίνα του τεμάχους, σε μονάδες εικονοστοιχείων, όπως προσδιορίστηκε σε κάθε καταγραφή. Προκύπτει ότι η ποιότητα της ανίχνευσης είναι εξαιρετική, αφού η διαφοροποίηση στην ακτίνα μεταξύ των καταγραφών είναι αρκετά μικρότερη από το μέγεθος του εικονοστοιχείου, δηλαδή από την διακριτική ικανότητα του συστήματος μέτρησης.

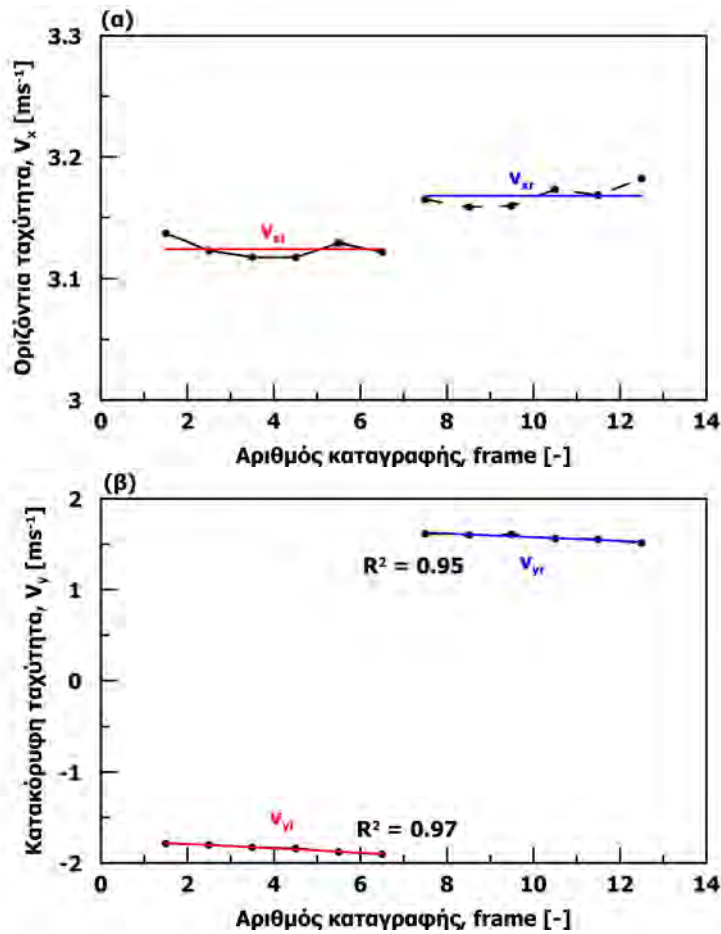


Σχήμα 4.57: Μέτρηση ακτίνας σφαίρας στο σύστημα αξόνων της εικόνας

Για την διόρθωση των σφαλμάτων εξετάζεται κάθε άξονας ξεχωριστά σαν συνάρτηση με τον χρόνο. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η ταχύτητα κατά τον άξονα x είναι σταθερή και ισούται με την αρχική ($v_x = v_o$). Έτσι προσδιορίζεται για κάθε σκέλος της κίνησης η ταχύτητα μεταξύ των διαδοχικών σημείων και λαμβάνεται ο μέσος όρος των τιμών που προκύπτουν (4.58-α).

Στον κατακόρυφο άξονα η κίνηση είναι ομαλά επιταχυνόμενη, έχει δηλαδή σταθερή επιτάχυνση που ισούται με την σταθερά της βαρύτητας (g). Η επιτάχυνση είναι η πρώτη παράγωγος της ταχύτητας ως προς τον χρόνο. Έτσι, υπολογίζεται η ταχύτητα κατά τον άξονα Z μεταξύ των διαδοχικών σημείων και στην συνέχεια προσδιορίζεται η βέλτιστη ευθεία που διέρχεται από τα σημεία αυτά, με κλίση ίση με την επιτάχυνση της βαρύτητας.

Η ταχύτητα του τεμάχους την στιγμή της πρόσκρουσης και της αναπήδησης κατά τον άξονα Z , προσδιορίζεται από τις αντίστοιχες εξισώσεις των βέλτιστων ευθειών, αντικαθιστώντας με τον χρόνο που αντιστοιχεί στο μεσοδιάστημα μεταξύ των σημείων που ορίζουν τα δυο σκέλη της κίνησης (πριν και μετά την κρούση).



Σχήμα 4.58: Υπολογισμός ταχύτητας κίνησης: (α) οριζόντια και (β) κατακόρυφη

Από τις ταχύτητες αυτές προσδιορίζονται οι γωνίες πρόσκρουσης, α_i και αναπήδησης α_r . Στην περίπτωση που η επιφάνεια πρόσκρουσης είναι οριζόντια (Σχήμα 4.59-α), οι γωνίες αυτές υπολογίζονται ως εξής:

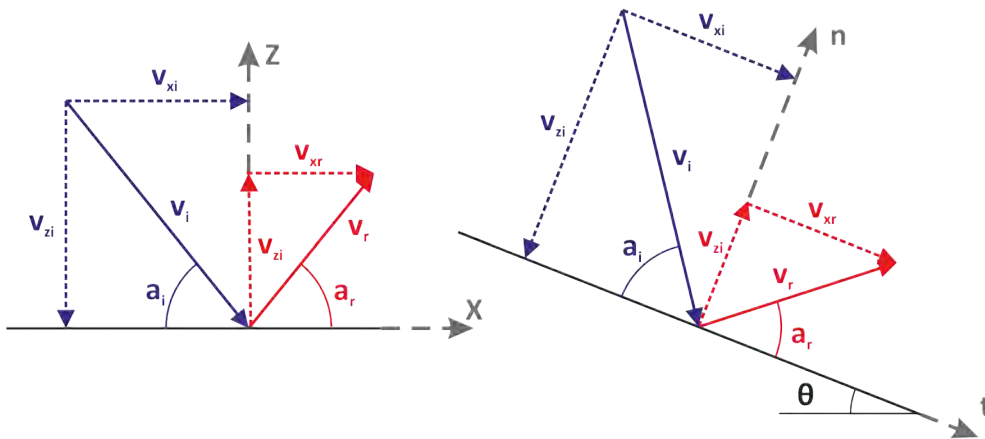
$$\alpha_i = \arctan \frac{|v_{yi}|}{v_{xi}} \quad (4.36)$$

$$\alpha_r = \arctan \frac{|v_{yr}|}{v_{xr}}$$

Ενώ εάν η επιφάνεια πρόσκρουσης έχει κλίση ϑ (Σχήμα 4.59-β), τότε ο υπολογισμός των γωνιών γίνεται από την σχέση:

$$\alpha_i = \arctan \frac{|v_{yi}|}{v_{xi}} - \vartheta \quad (4.37)$$

$$\alpha_r = \arctan \frac{|v_{yr}|}{v_{xr}} + \vartheta$$



Σχήμα 4.59: Προσδιορισμός γωνιών πρόσκρουσης και αναπήδησης και στροφή συστήματος αξόνων

Επίσης, προσδιορίζονται και οι συντελεστές αναπήδησης σύμφωνα με τους ορισμούς που παρουσιάζονται στην ενότητα 3.2.2. Στην περίπτωση όπου η επιφάνεια πρόσκρουσης έχει κλίση ϑ , ο κάθετος και ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης υπολογίζονται στρέφοντας τις ταχύτητες από το σύστημα ανάλυσης κατά ϑ στο σύστημα αξόνων n, t (Σχήμα 4.59), σύμφωνα με την σχέση 4.38.

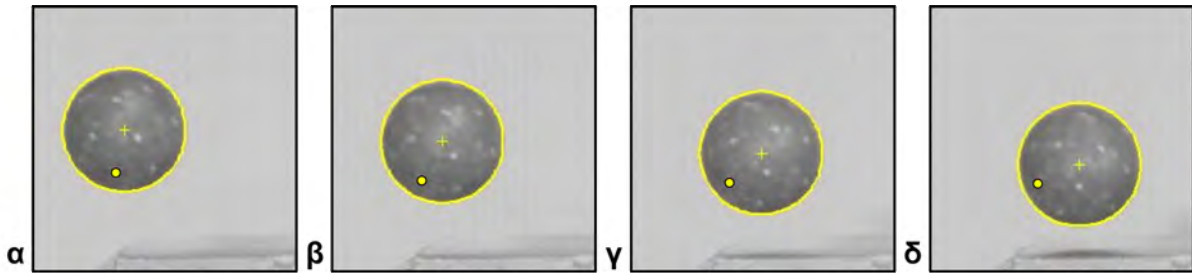
$$\begin{bmatrix} v_t \\ v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \vartheta & \sin \vartheta \\ -\sin \vartheta & \cos \vartheta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

4.4.1.2 Περιστροφική κίνηση

Στην διδιάστατη ανάλυση ο προσδιορισμός της περιστροφής είναι εν γένει προβληματικός, καθώς η γωνιακή ταχύτητα αποτελείται από τρεις στροφές, μία σε κάθε άξονα. Συνεπώς δεν μπορούν να προσδιοριστούν από τα στοιχεία που εξάγονται από μια διδιάστατη εικόνα. Παρόλα αυτά υπό συγκεκριμένες συνθήκες και παραδοχές είναι εφικτός ο προσδιορισμός της.

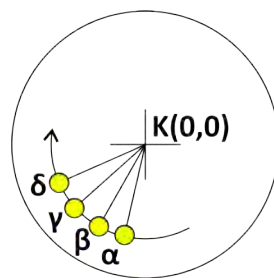
4.4.1.2.1 Προσδιορισμός γωνιακής ταχύτητας σφαιρικών δοκιμών

Σε κάποιες από τις δοκιμές που εκτελέστηκαν με σφαιρικά δοκίμια μετρήθηκε η περιστροφή, παρακολουθώντας την σχετική θέση ενός σημείου της περιφέρειας της σφαίρας ως προς το κέντρο της. Η ανίχνευση των σημείων έγινε δια χειρός επιλέγοντας το καταλληλότερο από ένα σύνολο μαρτύρων που είχαν εκ των προτέρων σημειωθεί στην περιφέρεια της σφαίρας. Η διαδικασία φαίνεται στο σχήμα 4.60 (που είναι οι καταγραφές 3 έως 6 της δοκιμής που παρουσιάζεται στο σχήμα 4.55)



Σχήμα 4.60: Επιλογή σημείων για τον προσδιορισμό της γωνιακής ταχύτητας σε σφαιρικά τεμάχια

Για τις ανάγκες της ανάλυσης, οι συντεταγμένες των σημείων προσδιορίζονται ως προς το εκάστοτε κέντρο του κύκλου, που θεωρείται ότι βρίσκεται στην αρχή των αξόνων. Έτσι, για κάθε δύο διαδοχικές εικόνες σχηματίζεται μια επίκεντρη γωνία, που περιγράφει την στροφή της σφαίρας μεταξύ των καταγραφών. Συνεπώς, η γωνιακή ταχύτητα υπολογίζεται από την γωνία αυτή και τον χρόνο μεταξύ των καταγραφών. Για τον περιορισμό του σφάλματος η διαδικασία επαναλαμβάνεται σε τέσσερις διαδοχικές εικόνες, προσδιορίζοντας έτσι τρεις επίκεντρες γωνίες (Σχήμα 4.61), άρα τρεις γωνιακές ταχύτητες εκ των οποίων χρησιμοποιείται τελικά ο μέσος όρος τους.



Σχήμα 4.61: Προσδιορισμός της γωνιακής ταχύτητας σε σφαιρικά τεμάχια

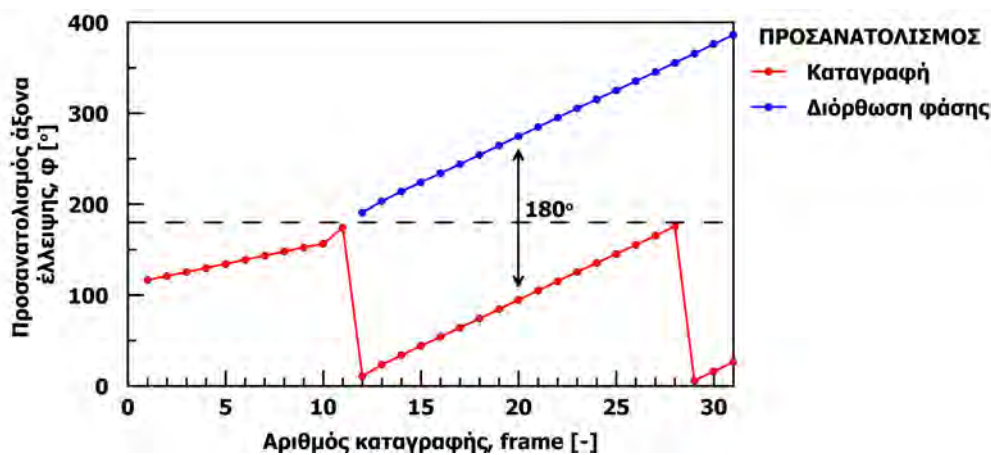
Το καταλληλότερο σημείο για την μέτρηση της γωνιακής ταχύτητας είναι αυτό που απέχει περισσότερο από κέντρο βάρους της σφαίρας και είναι ορατό σε όλες τις διαδοχικές λήψεις. Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση από το κέντρο βάρους, τόσο αυξάνεται η ακρίβεια προσδιορισμού της γωνιακής ταχύτητας. Έστω ότι παρακολουθείται ένα σημείο που απέχει μόλις ένα εικονοστοιχείο από το κέντρο βάρους, τότε ένας πλήρης κύκλος περιγράφεται από 8 εικονοστοιχεία. Συνεπώς εξαιτίας της διακριτοποίησης των εικονοστοιχείων, η στροφή μεταξύ δυο διαδοχικών λήψεων προσδιορίζεται με ακρίβεια 45° . Αντιθέτως, εάν το σημείο βρίσκεται σε απόσταση R από το κέντρο, το πλήθος των εικονοστοιχείων που απεικονίζει την περιφέρεια είναι σημαντικά μεγαλύτερο. Ενδεικτικά, για την μικρότερη σφαίρα που χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές, αυτήν του μαρμάρου με διάμετρο $d = 2.7\text{cm}$, η περιφέρεια απεικονίζεται σε περισσότερα από 200 εικονοστοιχεία, έτσι το σφάλμα στην γωνία είναι λιγότερο από $1.8^\circ (= 360/200)$. Για την εξασφάλιση ικανοποιητικής ακρίβειας, χρησιμοποιήθηκε ένας λογικός αλγόριθμος που αποτρέπει την χρήση σημείων, εφόσον το σφάλμα στον προσδιορισμό της επίκεντρης γωνίας είναι περισσότερο από 2.5° .

Για τον προσδιορισμό της γωνιακής ταχύτητας με τον τρόπο αυτό, γίνεται η παραδοχή ότι η περιστροφή του τεμάχους συμβαίνει μόνο ως προς τον άξονα Y , που είναι κάθετος στο επίπεδο που ορίζεται από τους άξονες του επιπέδου ανάλυσης (X, Z). Η παραδοχή αυτή δεν απέχει σημαντικά από την πραγματικότητα για τις δοκιμές που εκτελέστηκαν με σφαιρικά τεμάχια, καθώς η γωνιακή ταχύτητα αναπτύσσεται κατά την κύλιση του τεμάχους μέσα στον σωλήνα του μηχανισμού απελευθέρωσης, που γίνεται σε μια διάσταση, με αποτέλεσμα η συνιστώσα της ως προς τον άξονα Y να είναι σημαντικά μεγαλύτερη αυτών κατά X ή Z .

4.4.1.2.2 Προσδιορισμός γωνιακής ταχύτητας ελλειπτικών δίσκων

Με την χρήση του μηχανισμού απελευθέρωσης που παρουσιάστηκε στην ενότητα 4.1.3.3, η κίνηση που εκτελούν οι ελλειπτικοί δίσκοι είναι αμιγώς διδιάστατη και το τέμαχος περιστρέφεται μόνο κατά τον άξονα Y . Ο προσδιορισμός της γωνιακής ταχύτητας στις δοκιμές που εκτελέστηκαν με ελλειπτικούς δίσκους είναι σαφώς ακριβέστερος, ευκολότερος και ταχύτερος συγκριτικά με τα σφαιρικά δοκίμια. Αυτό οφείλεται στην μέθοδο προσδιορισμού των χαρακτηριστικών της έλλειψης (ενότητα 4.3.3.3) η οποία αποδίδει, πλέον των συντεταγμένων του κέντρου της, τον προσανατολισμό του μεγάλου άξονα της.

Η μόνη διόρθωση που απαιτείται είναι η αναγωγή του προσανατολισμού σε διάστημα τιμών 0 έως π , αφού οι τιμές αποδίδονται στο διάστημα 0 έως π . Για την διόρθωση της φάσης αναπτύχθηκε ένας απλός αλγόριθμος που εντοπίζει τις όποιες ασυνέχειες στην καμπύλη της καταγραφής και προβαίνει στην κατάλληλη διόρθωση (Σχήμα 4.62).



Σχήμα 4.62: Διόρθωση φάσης στον προσανατολισμό της έλλειψης

Όσο το τέμαχος βρίσκεται στον αέρα δεν επενεργούν σε αυτό εξωτερικές δυνάμεις ως προς τον άξονα Y , συνεπώς η γωνιακή ταχύτητα είναι σταθερή. Έτσι, ο προσδιορισμός της γίνεται από την κλίση της βέλτιστης ευθείας που αντιστοιχεί στα σημεία που ορίζονται από τον προσανατολισμό του μεγάλου άξονα συναρτήσει του χρόνου (Σχήμα 4.62).

4.4.2 Τριδιάστατη ανάλυση κίνησης

Μετά την βαθμονόμηση του στερεοζεύγους (Ενότητα 4.3.4.1) είναι δυνατός ο προσδιορισμός στον χώρο οποιουδήποτε σημείου προβάλλεται και στις δυο εικόνες. Τα σημεία αυτά ορίζονται στο σύστημα αναφοράς της μιας φωτομηχανής. Δηλαδή, ο άξονας Z είναι κάθετος στο επίπεδο της εικόνας και κατευθύνεται προς την σκηνή. Συνεπώς, το σύστημα αναφοράς εξαρτάται από την θέση που έχει εγκατασταθεί η φωτομηχανή.

Όμως, οι εξισώσεις του προβλήματος είναι διατυπωμένες σε ένα χωρικό σύστημα αναφοράς, όπου ο άξονας Z ταυτίζεται με την διεύθυνση της βαρύτητας. Έτσι η μαθηματική προσέγγιση της κίνησης απλοποιείται, καθώς η ταχύτητα ενός σώματος που εκτελεί παραβολική κίνηση στον χώρο μεταβάλλεται μόνο κατά τον άξονα Z , όταν δεν επενεργούν σε αυτό εξωτερικές δυνάμεις πέραν της βαρύτητας.

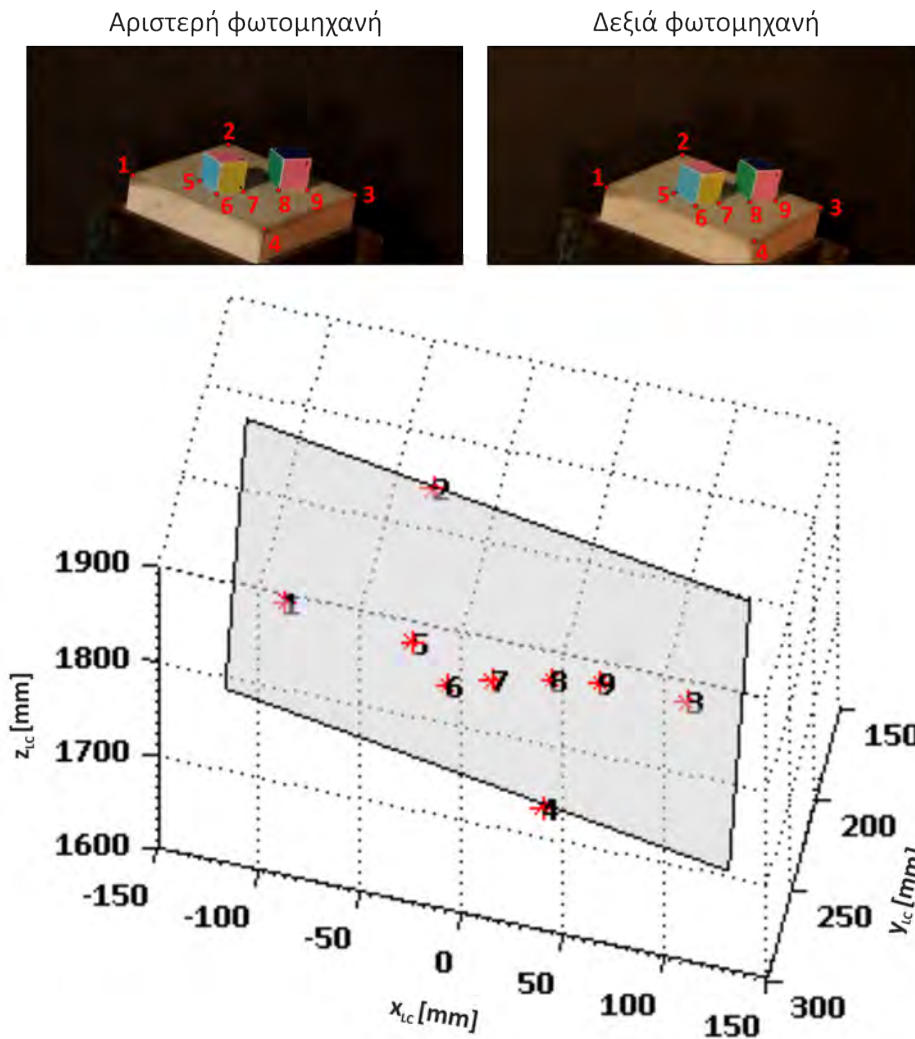
Η εποπτεία των δοκιμών είναι σαφώς ευκολότερη από μαθηματικής σκοπιάς, όταν ο ένας άξονας του συστήματος αναφοράς των αναλύσεων ταυτίζεται με την κατακόρυφο και οι άξονες X και Y βρίσκονται στο οριζόντιο επίπεδο. Για την καλύτερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων και την συστηματοποίηση των διαφορετικών διερευνήσεων που εκπονήθηκαν, επιλέχτηκε ο άξονας Y να ταυτίζεται με την διεύθυνση της επιφάνειας πρόσκρουσης και ο άξονας X να συμπίπτει με την διεύθυνση της φοράς μεγίστης κλίσης της επιφάνειας, ορίζοντας έτσι ένα δεξιόστροφο χωρικό σύστημα συντεταγμένων. Για την υλοποίηση του μετασχηματισμού αυτού, χρειάζονται αφενός η διεύθυνση του κατακόρυφου άξονα και αφετέρου η αποτύπωση της επιφάνειας του πρανούς.

Για κάθε ζεύγος εικόνων, λαμβάνεται πλήθος σημείων ώστε να αποκομισθεί η απαραίτητη πληροφορία. Έπεται η σύνθεση των σημείων για την ανακατασκευή της σκηνής και στην συνέχεια ο συνδυασμός των διαδοχικών εικόνων για την ανακατασκευή της τροχιάς. Τελικά, γίνεται η επεξεργασία και η τριδιάστατη ανάλυση της κίνησης των δοκιμών και ο προσδιορισμός των μεγεθών (συντελεστές αναπήδησης, γωνιακή ταχύτητα, προσανατολισμός κ.α.).

4.4.2.1 Αποτύπωση επιφάνειας πρόσκρουσης

Για την αποτύπωση της επιφάνειας πρόσκρουσης ακολουθείται διαφορετική μεθοδολογία, ανάλογα με το αν πρόκειται για φυσική ή τεχνητή επιφάνεια. Γενικά, για τον προσδιορισμό ενός επίπεδου απαιτούνται τουλάχιστον τρία μη συνευθειακά σημεία. Οι τεχνητές επιφάνειες πρόσκρουσης είναι εκ κατασκευής επίπεδες και έχουν τετραγωνική κάτοψη, συνεπώς μπορούν εύκολα να προσδιοριστούν σημεία που να ανήκουν σε αυτήν. Σε αντίθεση, οι φυσικές επιφάνειες πρόσκρουσης έχουν ακανόνιστη κάτοψη και εμφανίζουν κάποια τραχύτητα-κυματισμό, καθιστώντας δυσχερέστερο τον προσδιορισμό τους.

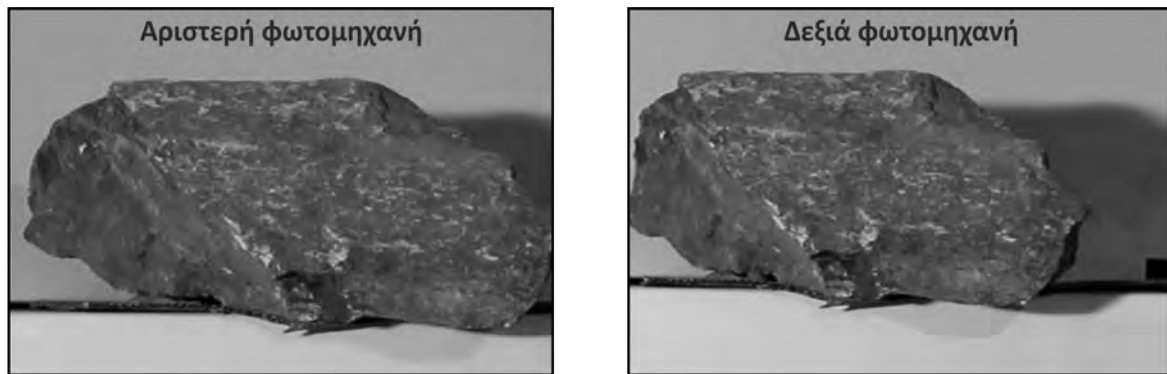
Στις τεχνητές επιφάνειες τα ομολόγα σημεία επιλέχτηκαν χειροκίνητα καθώς λόγω της απλής μορφής των επιφανειών αρκούν λίγα σημεία. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν οι τέσσερις γωνίες της βάσης και υλοποιήθηκαν πρόσθετα σημεία για την αύξηση της ακρίβειας (Σχήμα 4.63). Ο υπολογισμός των συντεταγμένων στον χώρο γίνεται με την μέθοδο της εμπροσθοτομίας και στην συνέχεια προσδιορίζεται το βέλτιστο επίπεδο χρησιμοποιώντας κατάλληλη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων. Έτσι, το επίπεδο και τα όρια του (επιφάνεια πρόσκρουσης) είναι πλήρως ορισμένα στο σύστημα αναφοράς της φωτομηχανής.



Σχήμα 4.63: Αποτύπωση επιπέδου πρόσκρουσης λείας τεχνητής επιφάνειας

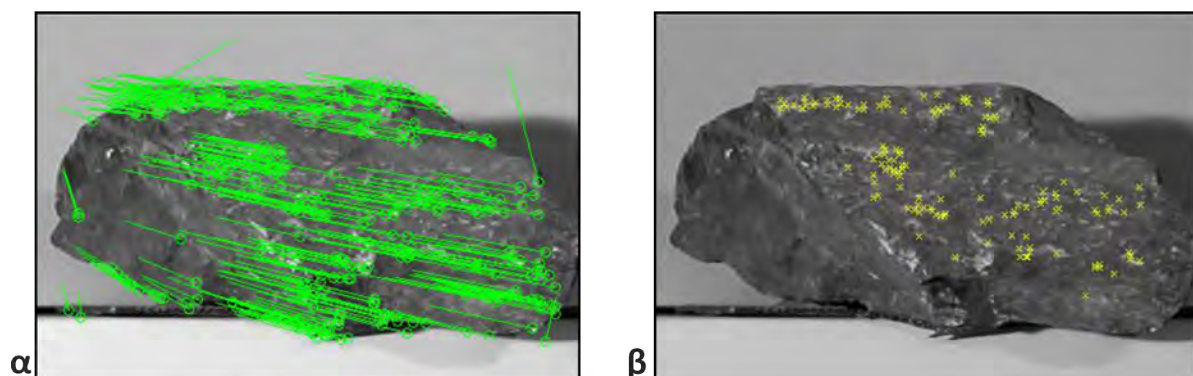
Για τις φυσικές επιφάνειες έγινε η παραδοχή ότι είναι επίπεδες. Έτσι η επιλογή τους έγινε ώστε να εμφανίζουν περιορισμένη τραχύτητα και κυματισμό. Ο προσδιορισμός των ομολόγων σημείων έγινε χρησιμοποιώντας τεχνικές συσχέτισης εικόνων μηχανικής όρασης (*image correlation*). Στις τεχνικές συσχέτισης (ή συνταύτισης εικόνων) χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι που σαρώνουν τις δυο εικόνες με σκοπό να εντοπίσουν κοινές αλληλουχίες τονικότητας μεταξύ αυτών. Οι θέσεις που ταυτίζεται η πληροφορία μεταξύ των εικόνων αντιστοιχούν στο

ίδιο σημείο, συνεπώς αποτελούν ομόλογα σημεία. Η μέθοδος αυτή έχει πολλά πλεονεκτήματα έναντι της χειροκίνητης σήμανσης των ομολογιών αφού η διαδικασία είναι αντικειμενική και αποδίδει μεγάλο πλήθος σημείων σε σύντομο σχετικά χρόνο. Ενδεικτικά, στο σχήμα 4.64 παρουσιάζονται αποσπάσματα από δυο ομόλογες εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν για την αποτύπωση της επιφάνειας πρόσκρουσης σε δοκιμή εργαστηρίου.



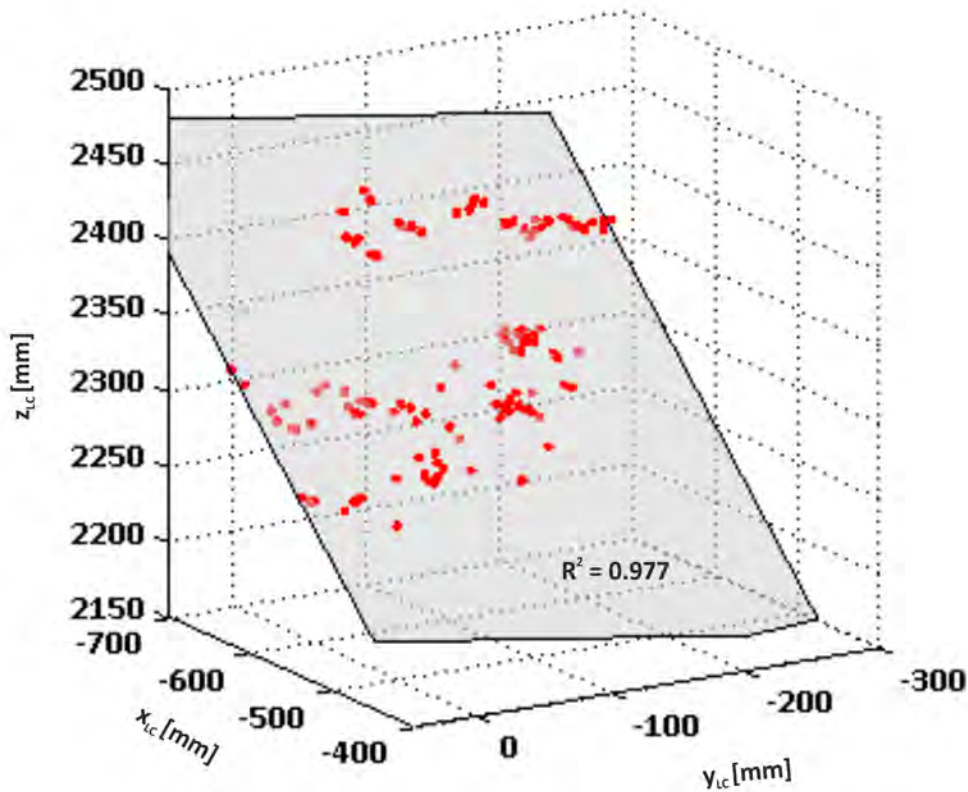
Σχήμα 4.64: Ομόλογες εικόνες για τον προσδιορισμό φυσικής επιφάνειας πρόσκρουσης

Τα ομόλογα σημεία που αποδίδει ο χρησιμοποιούμενος αλγόριθμος μεταξύ των εικόνων αυτών είναι περίπου 300, τα οποία παρουσιάζονται στο σχήμα 4.65-α. Με κύκλο σημαίνεται το σημείο στην εικόνα που παρουσιάζεται και η γραμμή το συνδέει με την θέση του σημείου στην άλλη εικόνα. Συνεπώς, η ευθεία αυτή περιγράφει την πορεία που πρέπει να διαγραφεί ώστε να ταυτιστούν οι δυο εικόνες. Ένα ποιοτικό μέτρο αξιολόγησης της ορθότητας των ομολογιών που εντοπίζονται από τον αλγόριθμο, είναι οι γραμμές που απεικονίζονται να είναι μεταξύ τους παράλληλες και το μήκος τους να είναι ίδιο για τα σημεία που βρίσκονται στην ίδια απόσταση από τις φωτομηχανές. Όπως παρατηρείται από το σχήμα 4.65-α, η διαδικασία της συσχέτισης αποδίδει εξαιρετικά αποτελέσματα. Στο σχήμα 4.65-β, παρουσιάζονται τα σημεία που προκύπτουν μετά την απόρριψη όσων δεν αντιστοιχούν στην επιφάνεια πρόσκρουσης ή δεν ικανοποιούν την παραπάνω συνθήκη.



Σχήμα 4.65: Διαδικασία για τον προσδιορισμό φυσικής επιφάνειας πρόσκρουσης: (α) εντοπισμός ομολογων σημείων και (β) επιλογή αυτών που ανήκουν στην επιφάνεια πρόσκρουσης (Για την εικόνα από την αριστερή φωτομηχανή του σχήματος 4.64)

Εφαρμόζοντας την διαδικασία της φωτογραμμετρικής εμπροσθοτομίας, υπολογίζονται οι συντεταγμένες των σημείων στον χώρο. Τέλος, η επιφάνεια πρόσκρουσης προσδιορίζεται ως το βέλτιστο επίπεδο που διέρχεται από αυτά (Σχήμα 4.66).

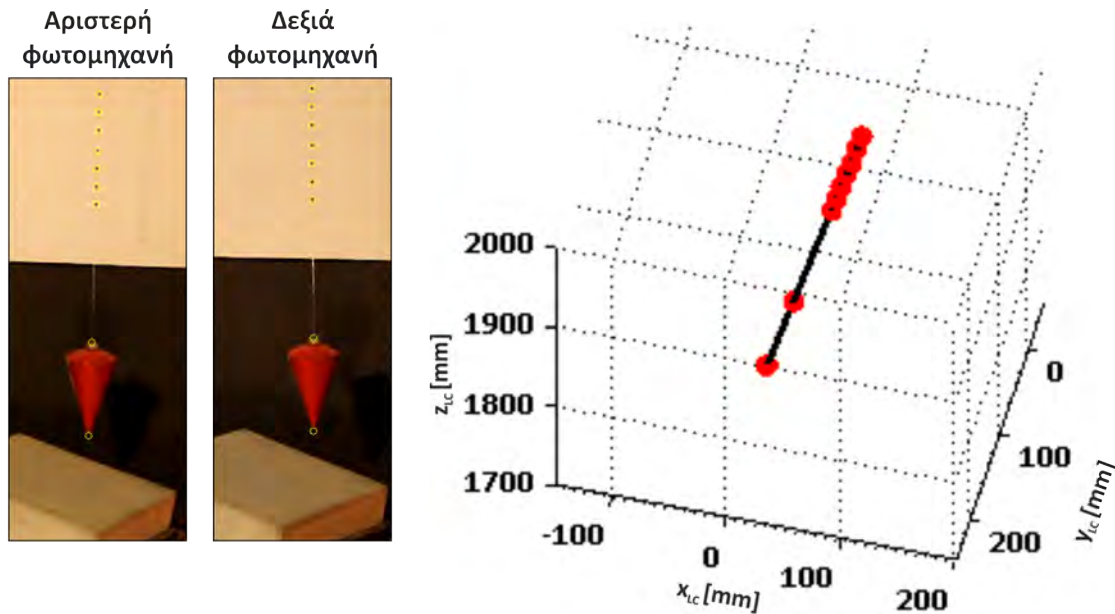


Σχήμα 4.66: Προσδιορισμός βέλτιστου επιπέδου για την προσομοίωση φυσικής επιφάνειας πρόσκρουσης

4.4.2.2 Προσδιορισμός κατακόρυφου άξονα

Ο κατακόρυφος άξονας προσδιορίστηκε στις εργαστηριακές δοκιμές με χρήση νήματος της στάθμης και στις δοκιμές πεδίου με τοπογραφική σταδία που έφερε διάταξη καθετότητας. Στο νήμα της στάθμης προσαρμόστηκαν χρωματιστές χάντρες, καθορίζοντας σημεία επί του φορέα της διεύθυνσης του κατακόρυφου άξονα (Σχήμα 4.67). Στην τοπογραφική σταδία διατίθενται πλήθος σημείων εκ κατασκευής της.

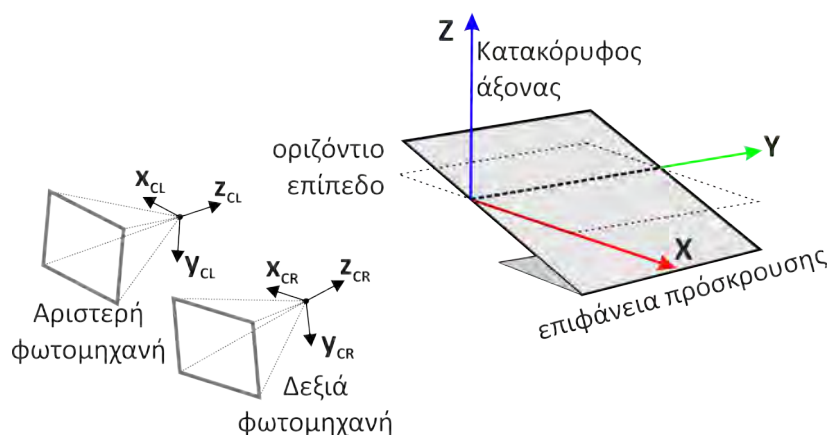
Τα σημεία αυτά αποτυπώνονται και από τις δυο φωτομηχανές και επιλέγονται χειροκίνητα, αποτελώντας τα ομόλογα σημεία που χρησιμοποιούνται στην φωτογραμμετρική εμπροσθοτομία. Έτσι, στο σύστημα αναφοράς της αριστερής φωτομηχανής, προσδιορίζεται η διεύθυνση της κατακόρυφου από την βέλτιστη ευθεία που διέρχεται από αυτά.



Σχήμα 4.67: Προσδιορισμός κατακόρυφου άξονα με το νήμα της στάθμης

4.4.2.3 Ορισμός συστήματος αναφοράς ανάλυσης

Με γνωστή την διεύθυνση του άξονα της βαρύτητας, προσδιορίζεται το κάθετο σε αυτήν επίπεδο, το οποίο είναι προφανώς οριζόντιο. Η τομή του επιπέδου που περιγράφει την επιφάνεια πρόσκρουσης με το οριζόντιο επίπεδο αποτελεί την παράταξη της επιφάνειας πρόσκρουσης και καθορίζει τον φορέα του άξονα Y . Χρησιμοποιώντας τις δυο αυτές διευθύνσεις κατασκευάζονται δυο μοναδιαία διανύσματα με κοινή αρχή ένα τυχαίο σημείο επί της επιφάνειας πρόσκρουσης. Πλέον, το διάνυσμα που περιγράφει τον άξονα X προσδιορίζεται από το εξωτερικό γινόμενο των δυο αυτών διανυσμάτων. Η κοινή αρχή των διανυσμάτων και η διεύθυνση τους αποτελούν το σύστημα αναφοράς της ανάλυσης (Σχήμα 4.68).



Σχήμα 4.68: Κατασκευή συστήματος αναφοράς της ανάλυσης

Ο μετασχηματισμός μεταξύ του συστήματος αναφοράς της φωτομηχανής και του συστήματος αναφοράς της ανάλυσης γίνεται σύμφωνα με την σχέση που περιγράφει την μετάθεση και στροφή ενός σημείου στον χώρο.

$$\mathbf{p}_1 = [\mathbf{R}]\mathbf{p}_2 + \mathbf{v} \quad (4.39)$$

όπου:

$\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2$ διάνυσμα με τις συντεταγμένες (x, y, z) n σημείων $(n \times 1)$ στην θέση 1 ή 2

\mathbf{v} το διάνυσμα μετάθεσης (4×1)

\mathbf{R} ο πίνακας στροφής (Σχέση 4.32)

Οι παράμετροι του μετασχηματισμού προσδιορίζονται με την μέθοδο Challis (1995), η οποία αναπτύσσεται στην επόμενη ενότητα. Για την εφαρμογή της μεθόδου απαιτούνται τέσσερα σημεία, τα οποία λαμβάνονται από την κοινή αρχή και το πέρας των τριών μοναδιαίων διανυσμάτων που κατασκευάζονται στην αρχή των αξόνων του συστήματος αναφοράς της φωτομηχανής και είναι ομόρροπα προς άξονες. Έτσι από την σχέση 4.39 κάθε σημείο που προσδιορίζεται στον χώρο με την μέθοδο της φωτογραμμετρικής εμπροσθοτόμιας, μετασχηματίζεται στο σύστημα αναφοράς της ανάλυσης.

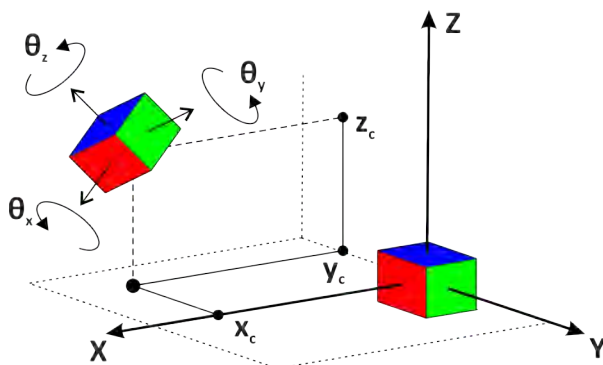
4.4.2.4 Ανακατασκευή του σχήματος του δοκιμίου

Στις αρχικές δοκιμές που εκτελέστηκαν χρησιμοποιώντας την τριδιάστατη καταγραφή, δεν έγινε ανακατασκευή του δοκιμίου, καθώς είχαν ως σκοπό την αξιολόγηση της μεθοδολογίας και δεν είχαν αναπτυχθεί πλήρως οι κώδικες επεξεργασίας. Έτσι, παρά το γεγονός ότι εξήχθησαν σημαντικά συμπεράσματα για την πλευρική διασπορά, την επίδραση του σχήματος, την επίδραση της κλίμακας εκτέλεσης των δοκιμών κ.α., δεν έγινε μέτρηση της γωνιακής ταχύτητας του τεμάχους.

Στις εν λόγω δοκιμές, προσδιορίστηκε μόνο η θέση του κέντρου βάρους των τεμαχών στον χώρο. Για τα κυβικά δοκίμια η θέση του κέντρου βάρους υπολογίστηκε ως το μέσον του ευθύγραμμου τμήματος που ορίζεται από όποιες δύο αντιδιαμετρικές γωνίες του κύβου. Για τα σφαιρικά και τα πολυεδρικά δοκίμια η θέση του κέντρου βάρους προσδιορίστηκε από το κέντρο της προβολής τους στο επίπεδο απεικόνισης με την μέθοδο που περιγράφεται στην ενότητα 4.3.3.2 και για τα δοκίμια τυχαίου σχήματος προσδιορίστηκε σύμφωνα με την μέθοδο που αναφέρεται στην ενότητα 4.3.3.1.

Προκειμένου να είναι δυνατός ο υπολογισμός της γωνιακής ταχύτητας, το τεμάχος πρέπει να ανακατασκευαστεί σε κάθε ζεύγος εικόνων στον χώρο. Έτσι, είναι δυνατός ο προσδιορισμός της στροφής του τεμάχους μεταξύ δυο διαδοχικών καταγραφών και κατ' επέκταση της γωνιακής ταχύτητας.

Η ανακατασκευή έγινε με την μέθοδο που έχει αναπτυχθεί από τον Challis (1995), μεταξύ των σημείων που προσδιορίζονται από τις εικόνες και των αντιστοιχών σημείων που ανήκουν σε ένα ιδεατό και όμοιο δοκίμιο που βρίσκεται στην αρχή του συστήματος αναφοράς της ανάλυσης. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην αρχή των ελαχίστων τετραγώνων και προσδιορίζει την μετάθεση και την στροφή ενός στερεού σώματος από τη μία θέση στην άλλη. Δεδομένου ότι το ιδεατό δοκίμιο είναι τοποθετημένο στην αρχή των αξόνων, συνεπάγεται ότι η μετάθεση του δοκιμίου ταυτίζεται με την θέση του στον χώρο ενώ η στροφή του με τον προσανατολισμό του.



Σχήμα 4.69: Ανακατασκευή σχήματος με σύγχρονο προσδιορισμό των συντεταγμένων και του προσανατολισμού

Σύμφωνα με την μέθοδο Challis (1995) η κίνηση ενός στερεού σώματος από την θέση 1 στην θέση 2, με γνωστά $n \geq 3$ ίδια σημεία στην επιφάνεια του και στις δυο θέσεις, προκύπτει με την ελαχιστοποίηση της σχέσης:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ([\mathbf{R}]\mathbf{p}_1 + \mathbf{v} - \mathbf{p}_2)^T ([\mathbf{R}]\mathbf{p}_1 + \mathbf{v} - \mathbf{p}_2) \quad (4.40)$$

ή ισοδύναμα από την μεγιστοποίηση της:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\mathbf{p}'_2{}^T [\mathbf{R}] \mathbf{p}'_1) = \text{tr}([\mathbf{R}]^T [\mathbf{C}]) \quad (4.41)$$

όπου:

$$\mathbf{p}'_i = \mathbf{p}_i - \bar{\mathbf{p}}$$

\mathbf{C} πίνακας συσχέτισης (Σχέση 4.42)

$$[\mathbf{C}] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{p}'_2 \mathbf{p}'_1{}^T \quad (4.42)$$

Λόγω της μη γραμμικότητας των σχέσεων, εφαρμόζεται η μέθοδος SVD (*Singular Value Decomposition*). Σύμφωνα με την οποία ένας πίνακας διαστάσεων $m \times n$ μπορεί εκφράζεται ως γινόμενο τριών πινάκων (παραγοντοποίηση ιδιοζουσών τιμών). Επομένως, στην προκειμένη περίπτωση ο πίνακας **C** της σχέσης 4.42 παραγοντοποιείται ως εξής:

$$[C] = [U][W][V]^T \tag{4.43}$$

οπότε η σχέση 4.41 μεγιστοποιείται όταν:

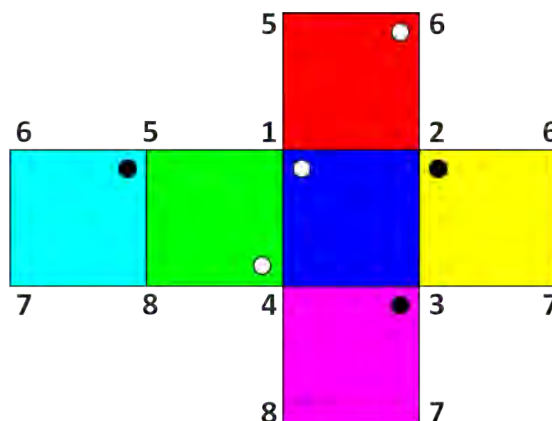
$$[V]^T[R]^T[U] = [I] \Rightarrow [R] = [U][V]^T \tag{4.44}$$

Έτσι, η στροφή και η μετάθεση προσδιορίζονται ως εξής:

$$v = \overline{p_2} - [R]\overline{p_1} \tag{4.45}$$

Θεωρώντας λοιπόν ότι στην θέση 1 είναι το ιδεατό δοκίμιο, τοποθετημένο στην αρχή των αξόνων και στην θέση 2 το δοκίμιο του οποίου την θέση θέλουμε να προσδιορίσουμε, η μέθοδος αποδίδει το διάνυσμα μετάθεσης **v**, τον πίνακα στροφής **R** καθώς και το σφάλμα ανακατασκευής.

Η μεθοδολογία αυτή είναι εφαρμόσιμη για οποιοδήποτε σχήμα δοκιμίου αρκεί να υπάρχουν διακριτά σημεία στην επιφάνεια του. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε μόνο με κυβικά δοκίμια. Η διακριτοποίηση των γωνιών των κυβικών δοκιμίων έγινε με χρωματική κωδικοποίηση. Κάθε πλευρά του δοκιμίου σημάνθηκε με διαφορετικό χρώμα, το οποίο παρουσίαζε έντονη αντίθεση με τις γειτονικές πλευρές (Σχήμα 4.70). Έτσι, κάθε γωνία αντιστοιχεί σε διαφορετικό χρωματικό μοτίβο και λαμβάνει βάσει αυτού ένα συγκεκριμένο αριθμό. Στην συνέχεια, αναγνωρίζονται οι ορατές γωνίες και λαμβάνονται οι συντεταγμένες τους για κάθε στιγμιότυπο, αρχικά σε κάθε εικόνα του στερεοζεύγους και στην συνέχεια, μέσω της φωτογραμμετρικής εμπροσθοτομίας, στον χώρο.



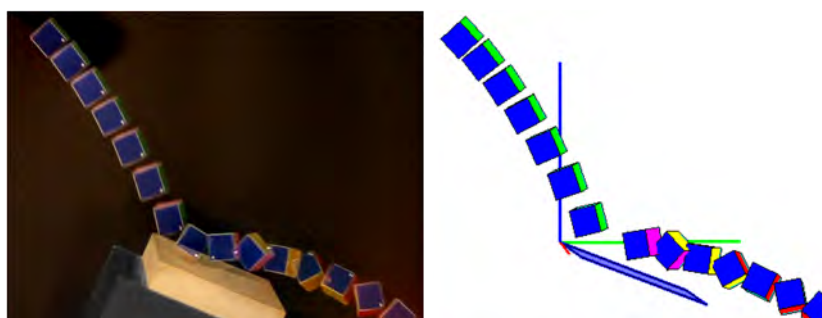
Σχήμα 4.70: Χρωματική κωδικοποίηση κυβικών δοκιμίων

Η επιλογή των γωνιών του κύβου στις εικόνες επιτυγχάνεται με μια ημι-αυτόματη επαναληπτική διαδικασία. Αρχικά, γίνεται περιορισμός του μεγέθους της εικόνας, αποκόπτοντας τα τμήματα που δεν προσφέρουν κάποια πληροφορία. Στην συνέχεια, εφαρμόζεται ένας αλγόριθμος ανίχνευσης χρώματος, ώστε να γίνει αυτόματη αναγνώριση της πλευράς που διακρίνεται. Ο αλγόριθμος ελέγχει το χρώμα κάθε εικονοστοίχειου μέσω των τιμών φωτεινότητας που έχουν στο σύστημα RGB και το αντιστοιχίζει στην κατάλληλη πλευρά. Στην συνέχεια η εικόνα μετατρέπεται σε δυαδική, ώστε να διαχωριστεί το εν λόγω χρώμα από τα υπόλοιπα και προσδιορίζονται τα σημεία με τις μέγιστες και ελάχιστες συντεταγμένες κατά τους άξονες x και y , που αντιστοιχούν στις γωνίες της πλευράς.

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε χρώμα, δηλαδή έξι φορές, και στην συνέχεια το αποτέλεσμα προβάλλεται στην οθόνη, ώστε να ελεγχθεί και εφόσον απαιτείται να γίνουν τροποποιήσεις από τον χρήστη. Για την περίπτωση αυτή σημάνθηκε σε κάθε πλευρά μια γωνία (Σχήμα 4.70), ώστε να είναι γνωστή η δεξιόστροφη αλληλουχία των υπολοίπων γωνιών της πλευράς, έτσι τυποποιείται η διαδικασία χειροκίνητης επιλογής των γωνιών καθώς και η διαδικασία ελέγχου.

4.4.2.5 Ανασύνθεση κίνησης τεμάχου

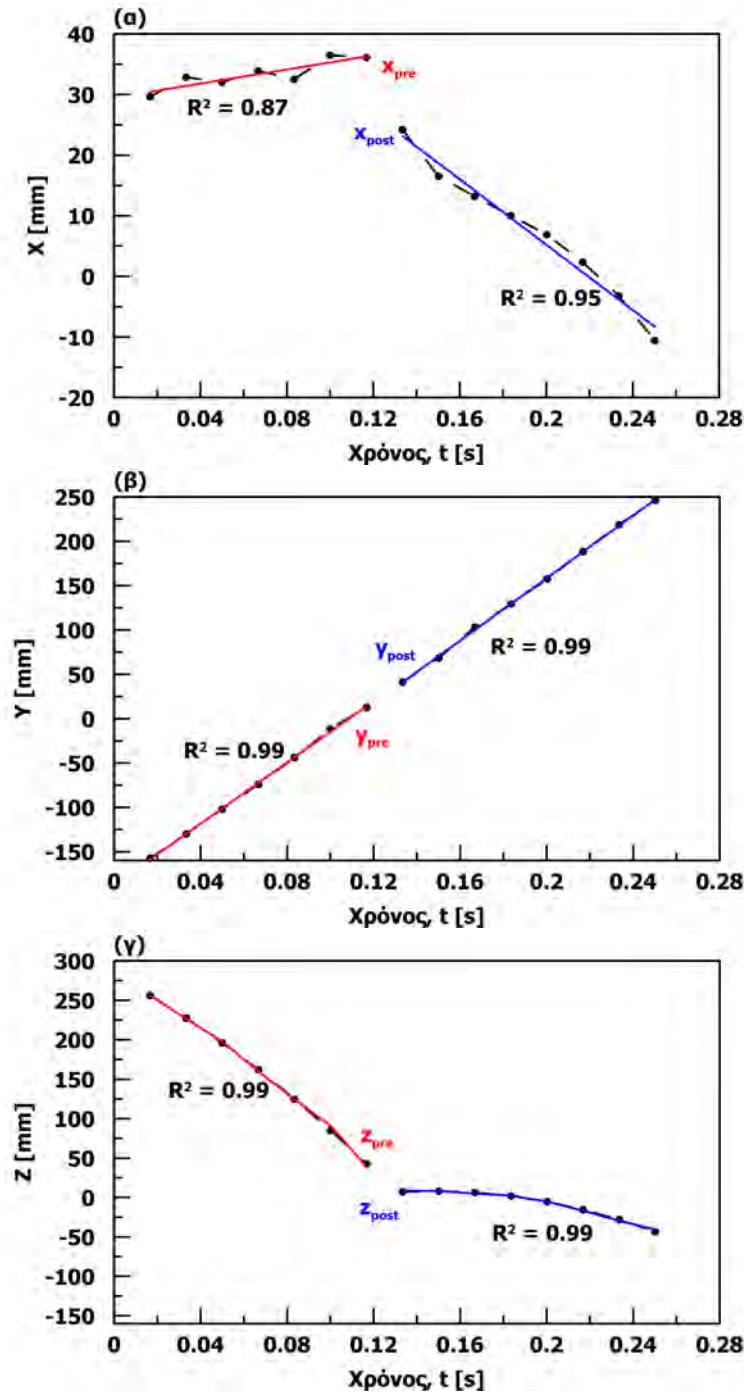
Οι εικόνες που αποτελούν την δοκιμή καταγράφονται με σταθερή χρονική απόσταση. Συνεπώς, έχοντας προσδιορίσει την θέση του τεμάχου σε κάθε στιγμιότυπο, η κίνηση που εκτελεί καθίσταται πλήρως ορισμένη. Η τροχιά προκύπτει με την σύνθεση της πληροφορίας που έχει αποκτηθεί από τα προηγούμενα στάδια, δηλαδή του επιπέδου πρόσκρουσης και της τριδιάστατης θέσης του τεμάχου σε κάθε καταγεγραμμένη εικόνα (Σχήμα 4.71).



Σχήμα 4.71: Ανακατασκευή τροχιάς με την υπέρθεση των καταγεγραμμένων εικόνων και σύνθεση της πληροφορίας από την επεξεργασία τους σε ψηφιακό περιβάλλον

Για τον προσδιορισμό των κινηματικών χαρακτηριστικών, αρχικά γίνεται διαχωρισμός της τροχιάς σε δυο σκέλη, πριν και μετά την κρούση. Αμελώντας την απώλειες λόγω του ατμοσφαιρικού αέρα, τότε στο τέμαχος επιδρά μόνο η δύναμη της βαρύτητας. Συνεπώς η τροχιά του τεμάχου όσο αυτό βρίσκεται στον αέρα, ανήκει σε ένα κατακόρυφο επίπεδο και η μετατόπιση του είναι γραμμική κατά τους άξονες X και Y , ενώ στον άξονα Z είναι παραβολική. Έτσι, οι συντεταγμένες του κέντρου βάρους προκύπτουν από την βέλτιστη ευθεία για τους άξονες X

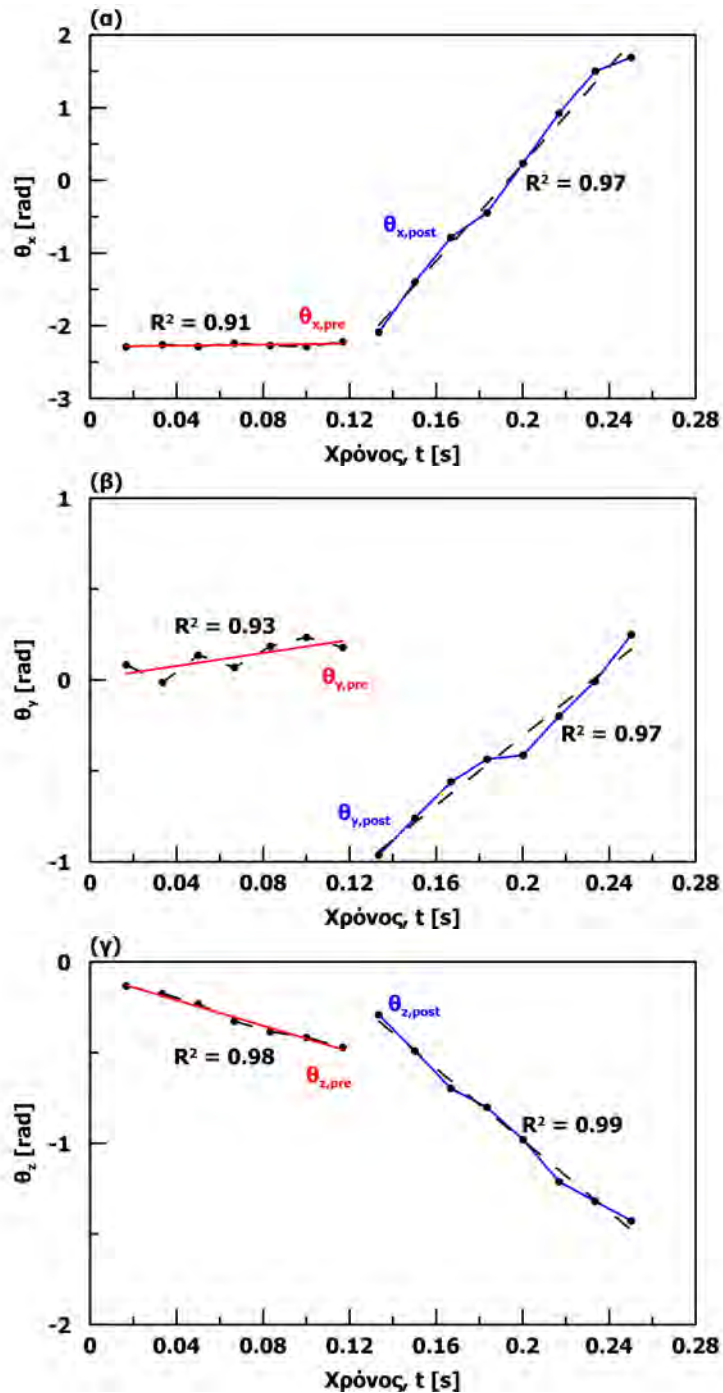
και Y και της παραβολής για τον άξονα Z (Σχήμα 4.72), χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων ως προς τον χρόνο και η ταχύτητα του τεμάχους προσδιορίζεται από την πρώτη παράγωγο.



Σχήμα 4.72: Προσδιορισμός συντεταγμένων του κέντρου βάρους: κατα τον άξονα (α) X, (β) Y και (γ) Z

Αντίστοιχα, η γωνιακή ταχύτητα του τεμάχους είναι σταθερή. Συνεπώς, προσδιορίζεται ως η πρώτη παράγωγος του προσανατολισμού σε κάθε άξονα συναρτήσει του χρόνου. Ο προσανατολισμός του τεμάχους περιγράφεται στον πίνακα στροφής σε σχέση με τον ιδεατό κύβο

που βρίσκεται στην αρχή των αξόνων, από τον οποίον προσδιορίζονται οι γωνίες στροφής ϑ_x , ϑ_y , και ϑ_z . Όμως εξ ορισμού του πίνακα στροφής οι γωνίες έχουν πεδίο ορισμού. Πιο συγκεκριμένα, οι ϑ_x και ϑ_z ανήκουν στο πεδίο τιμών $[-\pi, \pi]$ και η ϑ_y στο πεδίο $[-\pi/2, \pi/2]$. Συνεπώς η ϑ_x και ϑ_z δύνανται να εμφανίζουν αντιστροφή της κλίσης και η ϑ_z ασυνέχεια.



Σχήμα 4.73: Προσανατολισμός τεμάχους και προσδιορισμός γωνιακής ταχύτητας: κατά τον άξονα (α) X, (β) Y και (γ) Z

Για την απαλοιφή του πεδίου ορισμού που προκύπτει από τον υπολογισμό των γωνιών μέσω του πίνακα στροφής, αναπτύχθηκε αλγόριθμος όπου εισάγονται τα τμήματα της τροχιάς που χρήζουν μετατροπής με το πρόσημο αυτής να προκύπτει από την παρατήρηση των καταγραφών. Στην συνέχεια, η γωνιακή ταχύτητα σε κάθε άξονα προσδιορίζεται από την κλίση της βέλτιστης ευθείας που αντιστοιχεί στην γωνία συναρτήσεως του χρόνου (Σχήμα 4.73).

Κεφάλαιο 5

Εργαστηριακή Διερεύνηση στις Δύο Διαστάσεις

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι δοκιμές που εκτελέστηκαν στο εργαστήριο, χρησιμοποιώντας διδιάστατη ανάλυση, η οποία αποτέλεσε το αρχικό εργαλείο για την μελέτη της αναπήδησης. Συνολικά εκτελέστηκαν περισσότερες από 2000 δοκιμές, που παρουσιάζονται όχι απαραίτητα με χρονολογική σειρά. Οι δοκιμές αυτές οργανώθηκαν σε επιμέρους σειρές, με τις οποίες εξετάζεται η επίδραση στους συντελεστές αναπήδησης των φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών των πετρωμάτων, των χαρακτηριστικών πρόσκρουσης, του σχήματος του τεμάχους καθώς και της κατάστασης της επιφάνειας πρόσκρουσης (αποσάθρωση, τραχύτητα και επικάλυψη με εδαφικό υλικό).

Μετά την ολοκλήρωση κάθε ομάδας δοκιμών-διερεύνησης πραγματοποιούνται οι απαραίτητες τροποποιήσεις και βελτιώσεις, τόσο στην πειραματική διάταξη όσο και στις μεθόδους ανάλυσης και επεξεργασίας των αποτελεσμάτων. Βάσει των πρόσθετων δυνατοτήτων και των συμπερασμάτων κάθε διερεύνησης, σχεδιάζονται και υλοποιούνται η επόμενη ομάδα δοκιμών. Έτσι, η πειραματική διαδικασία διαρκώς εξελισσόταν, με συνέπεια να υπάρχουν μεταξύ των διερευνήσεων διαφοροποιήσεις ως προς τα στα στοιχεία της διάταξης και τα μετρούμενα μεγέθη. Ενδεικτικά, τα τεμάχια σφαιρικού σχήματος από φυσικό υλικό δεν ήταν διαθέσιμα στην αρχή της έρευνας, ενώ η μέτρηση της περιστροφής τους επιτεύχθηκε σε μεταγενέστερο στάδιο.

Αρχικά, διερευνήθηκε η κρούση μεταξύ τεμάχους και επιφάνειας πρόσκρουσης που αποτελούντο από όμοιας σύστασης βραχώδες υλικό και εξετάστηκε η δυνατότητα έκφρασης συσχετίσεων των συντελεστών αναπήδησης με τις συνήθεις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων. Στην διερεύνηση αυτή, χρησιμοποιήθηκαν κυβικά δοκίμια με λειασμένες ακμές από συνήθη πετρώματα του Ελλαδικού χώρου. Επίσης, εξετάστηκαν επιπρόσθετα τρία τεχνητά υλικά, ώστε να συσχετισθούν με τα φυσικά υλικά για να χρησιμοποιηθούν σε επόμενες διερευνήσεις αξιοποιώντας τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν στην κατασκευή δοκιμίων με ελεγχόμενες διαστάσεις και σχήμα. Αρχικά, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές ελεύθερης πτώ-

σης και στη συνέχεια χρησιμοποιώντας τα φυσικά υλικά έγιναν δοκιμές παραβολικής ρίψης, συνεκτιμώντας την επίδραση της γωνίας πρόσκρουσης.

Επιπρόσθετα, εξετάστηκε η επίδραση που ασκεί η ταχύτητα πρόσκρουσης και η μάζα του τεμάχους στους συντελεστές αναπήδησης. Στην διερεύνηση αυτή χρησιμοποιήθηκαν σφαιρικά δοκίμια από φυσικά και τεχνητά υλικά, πραγματοποιώντας δοκιμές ελεύθερης πτώσης και παραβολικής ρίψης. Ακολούθως, διερευνήθηκε η επίδραση στους συντελεστές αναπήδησης εξαιτίας της διαφοροποίησης των ιδιοτήτων του τεμάχους και της επιφάνειας πρόσκρουσης, πραγματοποιώντας δοκιμές ελεύθερης πτώσης μεταξύ ανόμοιων υλικών.

Αντικείμενο της διερεύνησης απετέλεσε επίσης η επίδραση του σχήματος του τεμάχους σε συνδυασμό με την γεωμετρία επαφής στους συντελεστές αναπήδησης. Η διερεύνηση πραγματοποιήθηκε με την παραβολική ρίψη τεμαχών σχήματος ελλειπτικού δίσκου με μεταβλητό λόγο αξόνων, σε μια προσπάθεια αναπαραγωγής των συνθηκών που υιοθετούνται στις θεωρητικές προσεγγίσεις των Bozzolo and Pamini (1986), Azzoni et al. (1995) και Vijayakumar et al. (2012).

Στην συνέχεια μελετήθηκε η επίδραση της αποσάθρωσης της επιφάνειας πρόσκρουσης στους συντελεστές αναπήδησης, καθώς είναι σύνηθες η επιφάνεια ενός βραχώδους πρανούς να είναι αποσαθρωμένη. Αρχικά, συνδέθηκε ο ποιοτικός χαρακτηρισμός της αποσάθρωσης με τις μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος και έπειτα συσχέτισθηκε με τους συντελεστές αναπήδησης με την διενέργεια δοκιμών ελεύθερης πτώσης.

Αντίστοιχα, εξετάστηκε η επίδραση της τραχύτητας στους συντελεστές αναπήδησης, μέσω δοκιμών παραβολικής ρίψης. Χρησιμοποιήθηκαν επιφάνειες πρόσκρουσης από το ίδιο πέτρωμα με διαφορετική τραχύτητα και οι δοκιμές εκτελέστηκαν με σφαιρικά και πολυεδρικά δοκίμια, ώστε να εξετασθεί επιπρόσθετα η επίδραση του σχήματος του τεμάχους.

Τέλος, πραγματοποιήθηκε μια ποιοτική διερεύνηση για τον προσδιορισμό της επίδρασης που έχει στους συντελεστές αναπήδησης η επικάλυψη της επιφάνειας πρόσκρουσης με εδαφικό υλικό, καθώς το βραχώδες υπόβαθρο συνήθως καλύπτεται επιφανειακά από εδαφικής φύσεως κορηματικά υλικά. Έτσι, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές ελεύθερης πτώσης σε επιφάνειες επικαλυμμένες με αμμώδες ή αργιλικό υλικό καθώς και μείγματα αυτών, σε διάφορες καταστάσεις αναφορικά με την υγρασία και τον τρόπο διάστρωσης.

5.1 Επίδραση των φυσικών και μηχανικών παραμέτρων του πετρώματος

Όπως έχει αναφερθεί στην ενότητα 3.2.4 οι προτεινόμενες τιμές των συντελεστών αναπήδησης, που χρησιμοποιούνται στην πράξη, συνδέονται με τον τύπο του πετρώματος. Γενικώς, όσο πιο σκληρό είναι ένα υλικό τόσο μεγαλύτερος είναι ο κάθετος και ο κινηματικός συντελεστής αναπήδησης. Όμως η μεταξύ τους σχέση είναι ποιοτικά καθορισμένη βάσει μιας αδρομερούς περιγραφής του γεωυλικού, καθιστώντας υποκειμενική την διαδικασία επιλογής της αντιπροσωπευτικής τιμής. Εξάιρεση αποτελεί η σχέση των Richards et al. (2001), που συνδέει τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης με την σκληρότητα της επιφάνειας πρόσκρουσης και του πίπτοντος τεμάχους, όπως προσδιορίζονται με την σφύρα Schmidt.

Για την ποσοτικοποίηση της σχέσης που έχει ο συντελεστής αναπήδησης με το είδος του πετρώματος, έγιναν δοκιμές ελεύθερης πτώσης στο εργαστήριο χρησιμοποιώντας διαφορετικά πετρώματα που συναντώνται στον Ελλαδικό χώρο, καθώς και τρία τεχνητά υλικά. Κάθε υλικό υποβλήθηκε στις τυπικές εργαστηριακές δοκιμές βραχομηχανικής για τον προσδιορισμό των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων του (πίνακας 4.1 στην ενότητα 4.2.1.6).

Τα τεχνητά υλικά χρησιμοποιήθηκαν με σκοπό την βαθμονόμησή τους σε σχέση με τα φυσικά, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε επακόλουθες διερευνήσεις, αξιοποιώντας τα σημαντικά πλεονεκτήματα που εμφανίζουν.

Στην συνέχεια, εκτελέστηκαν δοκιμές παραβολικής ρίψης, χρησιμοποιώντας πέντε από τα φυσικά υλικά, με σκοπό να εξετασθεί επιπρόσθετα η επίδραση που έχει η γωνία πρόσκρουσης, που σύμφωνα με τα αναφερόμενα στην σχετική βιβλιογραφία επηρεάζει σημαντικά την τιμή του κάθετου συντελεστή αναπήδησης.

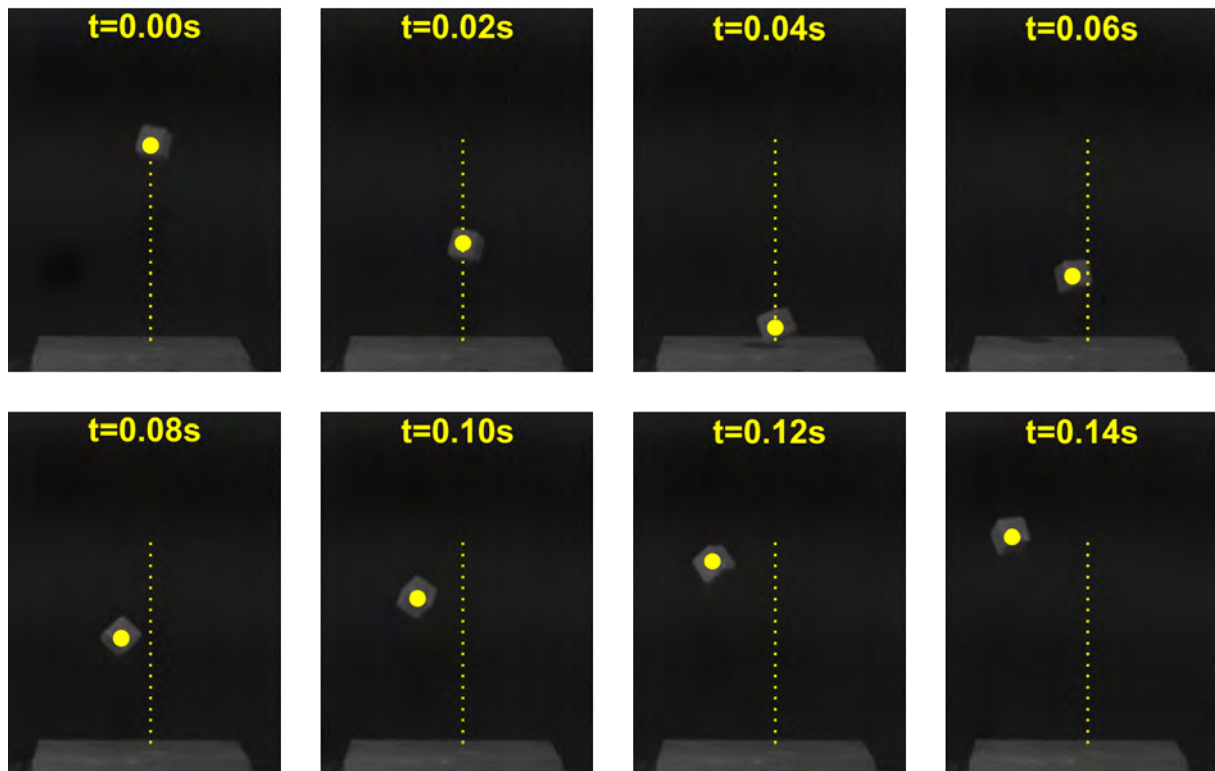
Στην διερεύνηση αυτή, οι δοκιμές αφορούν στην κρούση μεταξύ όμοιων υλικών, δηλαδή το υλικό της βάσης πρόσκρουσης είναι το ίδιο με το υλικό από το οποίο έχει διαμορφωθεί το τέμαχος. Σε επόμενη ενότητα μελετάται η περίπτωση όπου η κρούση γίνεται μεταξύ ανόμοιων υλικών σε συνδυασμό με την επίδραση των χαρακτηριστικών της κρούσης.

5.1.1 Διερεύνηση με δοκιμές ελεύθερης πτώσης

Χρησιμοποιήθηκε η διάταξη της ελεύθερης πτώσης (Ενότητα 4.1.3.1) και πραγματοποιήθηκαν συνολικά 440 ρίψεις δοκιμίων κυβικού σχήματος με πλευρά 2cm, εκ των οποίων αξιοποιήθηκαν οι 110. Το ύψος ρίψης ήταν $h_d = 80cm$, με αποτέλεσμα η ταχύτητα πρόσκρουσης να ισούται με περίπου $v_i = 4ms^{-1}$. Τα δοκίμια διαμορφώθηκαν ως κυβικά με λειασμένες ακμές (Ενότητα 4.1.1.2) αντί για σφαιρικά, επειδή αφενός ήταν δύσκολη, δαπανηρή και χρονοβόρα η διαμόρφωση σφαιρών και αφετέρου επειδή το κυβικό σχήμα προσεγγίζει καλύτερα, συγκριτικά με το σφαιρικό, την γεωμετρία των τεμαχών σε μια πραγματική κατάπτωση. Όμως, με την χρήση δοκιμίων κυβικού σχήματος, η απόκριση του τεμάχους στην κρούση επηρεάζεται από γεωμετρία επαφής που διαμορφώνεται μεταξύ αυτού και της επιφάνειας πρόσκρουσης.

Έτσι, η διασπορά που εμφανίζουν οι τιμές των συντελεστών αναπήδησης είναι αυξημένη σε σχέση με την χρήση σφαιρικών δοκιμίων, συμπεριφορά που σχολιάζεται παρακάτω.

Πριν την κρούση το τέμαχος εκτελεί ελεύθερη πτώση, κατά συνέπεια η ταχύτητα κατά την οριζόντια διεύθυνση είναι μηδενική. Μετά την κρούση η τροχιά αποκλίνει από την κατακόρυφο και το τέμαχος αναπτύσσει οριζόντια και γωνιακή ταχύτητα ($v_{x,r} \neq 0$), όπως παρατηρείται στο σχήμα 5.1.



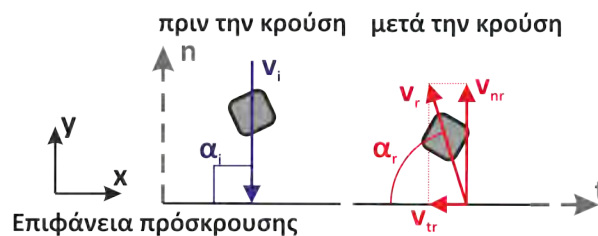
Σχήμα 5.1: Τυπική αλληλουχία στιγμιότυπων, ανά 10 λήψεις, δοκιμής ελεύθερης πτώσης κυβικού δοκιμίου με λειασμένες ακμές από τσιμεντοειδούς βάσης ένεμα υψηλής αντοχής. Η κρούση γίνεται πριν την χρονική στιγμή $t=0.04s$

Στις δοκιμές αυτές ο επαφτομενικός συντελεστής αναπήδησης δεν ορίζεται, καθώς η οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας πριν την κρούση είναι μηδενική ($v_{x,i} = 0$). Ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης δεν λαμβάνει υπόψη την κίνηση κατά την οριζόντια διεύθυνση. Συνεπώς, η χρήση των ορισμών αυτών υποεκτιμά την απόκριση του τεμάχους, καθώς όσο μεγαλώνει η απόκλιση από την κατακόρυφο γίνεται σημαντική η οριζόντια συνιστώσα της κίνησης.

Για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε ο κινηματικός συντελεστής αναπήδησης (Ενότητα 3.2.2.1), που ορίζεται από τα μέτρα των ταχυτήτων πριν και μετά την κρούση, έτσι συνυπολογίζεται και η οριζόντια συνιστώσα της κίνησης. Για να είναι δυνατή η προβολή των αποτελεσμάτων από τον κινηματικό συντελεστή αναπήδησης στον κάθετο, που η χρήση του είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη, αξιοποιήθηκαν οι δοκιμές που εμφάνιζαν την μικρότερη απόκλιση από την κατακόρυφο.

Πιο συγκεκριμένα, διαιρώντας κατά μέλη τις σχέσεις 3.15 και 3.17 προκύπτει ότι ο λόγος του καθέτου συντελεστή αναπήδησης προς τον κινηματικό ισούται με το ημίτονο της γωνίας αναπήδησης. Υπενθυμίζεται ότι ως γωνία αναπήδησης (α_r) ορίζεται η γωνία που σχηματίζει η τροχιά του τεμάχου μετά την κρούση με την επιφάνεια πρόσκρουσης (βλ. Σχήμα 5.2). Συνεπώς, για μεγάλες γωνίες αναπήδησης ο λόγος αυτός τείνει στην μονάδα, επιτρέποντας την σύγκριση μεταξύ του καθέτου και του κινηματικού συντελεστή αναπήδησης.

Έγιναν 40 επαναλήψεις της δοκιμής για κάθε υλικό και αξιοποιήθηκε για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων το 25% αυτών που εμφάνιζαν την μικρότερη απόκλιση από την κατακόρυφο, ή ισοδύναμα την μεγαλύτερη γωνία αναπήδησης. Οι μέσες τιμές της γωνίας αναπήδησης, του κινηματικού και του καθέτου συντελεστή αναπήδησης από τις δοκιμές που χρησιμοποιήθηκαν για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 5.1 και αναλυτικότερα τα αποτελέσματα κάθε σειράς δοκιμών παρατίθενται στο παράρτημα 1.



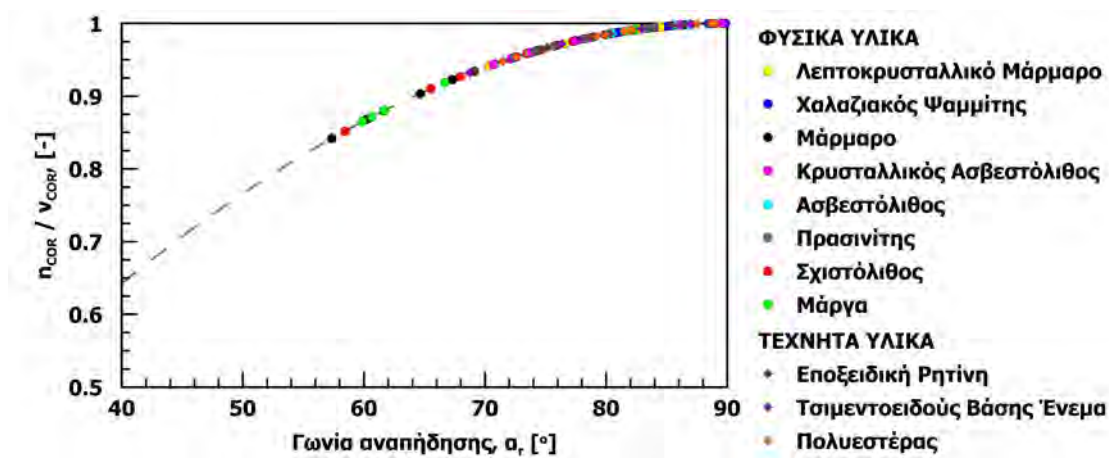
Σχήμα 5.2: Σχηματική απεικόνιση δοκιμής ελεύθερης πτώσης κυβικών δοκιμίων με λειασμένες ακμές – μετρούμενα μεγέθη

Πίνακας 5.1: Δοκιμές ελεύθερης πτώσης κυβικών τεμαχών με λειασμένες ακμές

Σειρά δοκιμών	Υλικό	Αριθμός επαν.	Γωνία αναπήδησης α_r [°]	Συντελεστές αναπήδησης	
				ν_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1.1	Λεπτοκρυσταλλικό μάρμαρο	10	78.8	0.64	0.63
1.2	Χαλαζιακός ψαμμίτης	10	84.5	0.66	0.66
1.3	Μάρμαρο	10	71.2	0.51	0.48
1.4	Κρυσταλλικός ασβεστόλιθος	10	79.6	0.52	0.51
1.5	Ασβεστόλιθος	10	82.3	0.50	0.50
1.6	Πρασινίτης	10	77.4	0.47	0.46
1.7	Σχιστόλιθος	10	70.6	0.36	0.34
1.8	Μάργα	10	70.0	0.36	0.34
1.9	Εποξειδική ρητίνη	10	78.2	0.56	0.54
1.10	Τσιμεντοειδούς βάσης ένεμα	10	80.4	0.52	0.51
1.11	Πολυεστέρας	10	81.4	0.57	0.56

Στο σχήμα 5.3 παρουσιάζεται ο λόγος του καθέτου συντελεστή αναπήδησης προς τον κινηματικό συναρτήσει της γωνίας αναπήδησης, για τις δοκιμές που χρησιμοποιήθηκαν στην εξέταση των συσχετίσεων μεταξύ των συντελεστών αναπήδησης και των φυσικών και μηχα-

νικών ιδιοτήτων. Επίσης, με διακεκομμένη γραμμή είναι σχεδιασμένη η θεωρητική σχέση του λόγου των συντελεστών με την γωνία αναπήδησης.

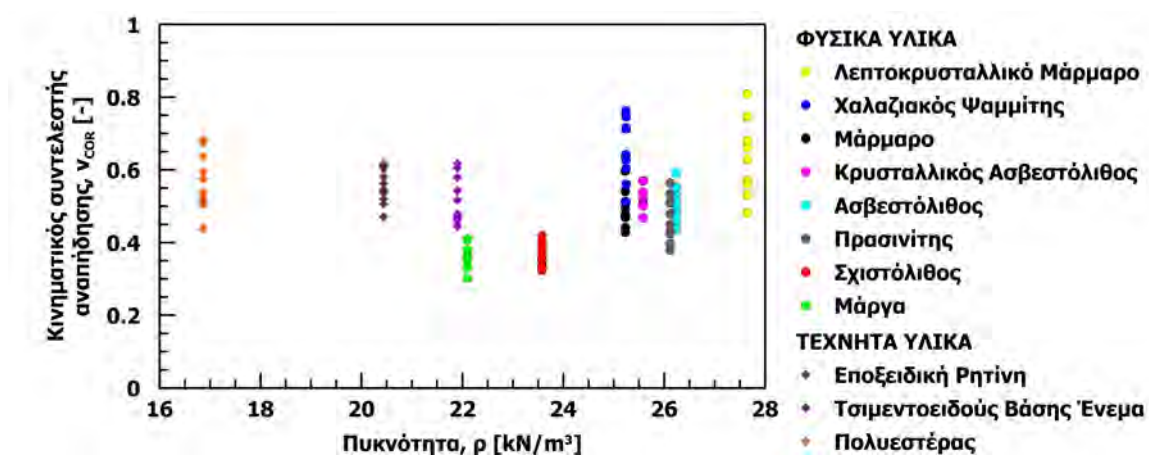


Σχήμα 5.3: Λόγος του καθέτου συντελεστή αναπήδησης προς τον κινηματικό συναρτήσει της γωνίας αναπήδησης από τις δοκιμές με κυβικά τεμάχια με λειασμένες ακμές

Με βάση το σχήμα 5.3, προκύπτει ότι τα συμπεράσματα για τον κινηματικό συντελεστή αναπήδησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης, καθώς η μεταξύ τους διαφορά δεν υπερβαίνει το 10% στην συντριπτική πλειοψηφία των δοκιμών.

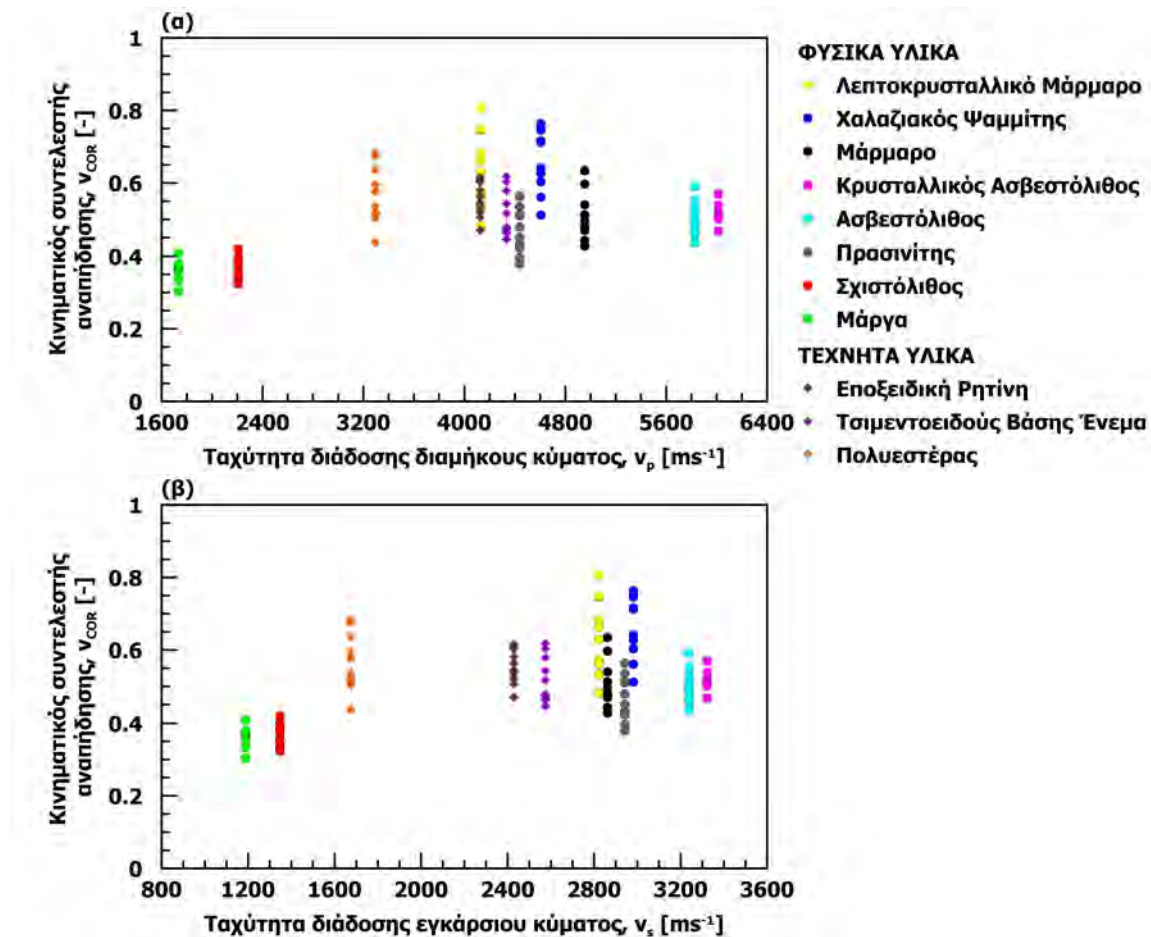
5.1.1.1 Εξέταση δυναμικών συσχετίσεων με τις ιδιότητες των υλικών

Με την βοήθεια των ακόλουθων σχημάτων (Σχήμα 5.4 έως 5.8), διερευνάται η ύπαρξη συσχετίσεων μεταξύ των ιδιοτήτων των υλικών και του κινηματικού συντελεστή αναπήδησης. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζονται η πυκνότητα, η θλιπτική και εφελκυστική αντοχή, το μέτρο ελαστικότητας, ο λόγος Poisson, η ταχύτητα διάδοσης των εγκάρσιων και διαμήκων κυμάτων καθώς επίσης και η σκληρότητα κατά την σφύρα Schmidt.



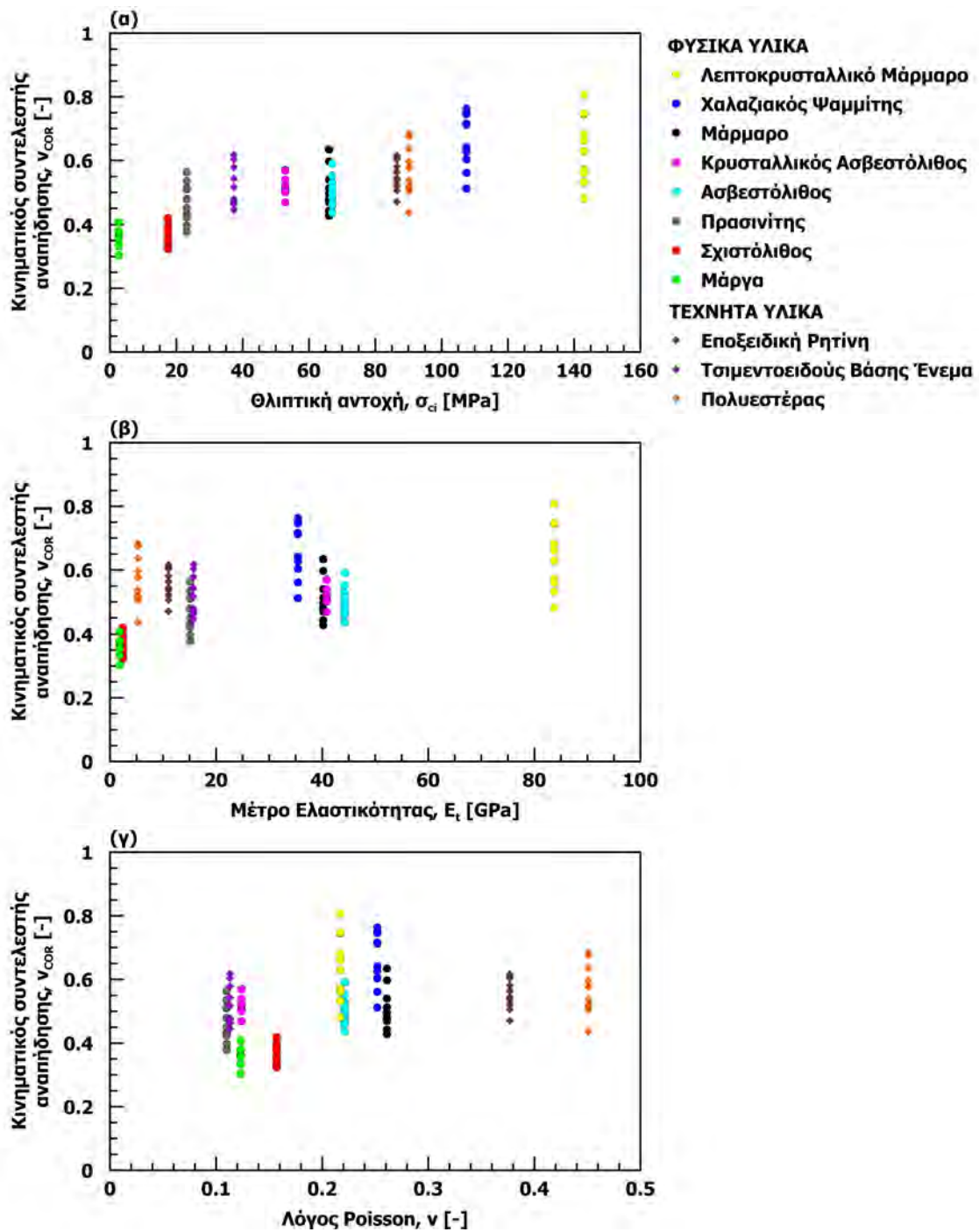
Σχήμα 5.4: Κινηματικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της πυκνότητας

Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.4, δεν προκύπτει κάποια συσχέτιση του κινηματικού συντελεστή αναπήδησης με την πυκνότητα του υλικού. Παρομοίως, δεν προκύπτει συσχέτιση ούτε με τις ταχύτητες διάδοσης των διαμήκων (v_p) και των εγκάρσιων (v_s) κυμάτων, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.5-α και β αντίστοιχα.



Σχήμα 5.5: Κινηματικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της ταχύτητας διάδοσης κύματος, (α) διαμήκες και (β) εγκάρσιο

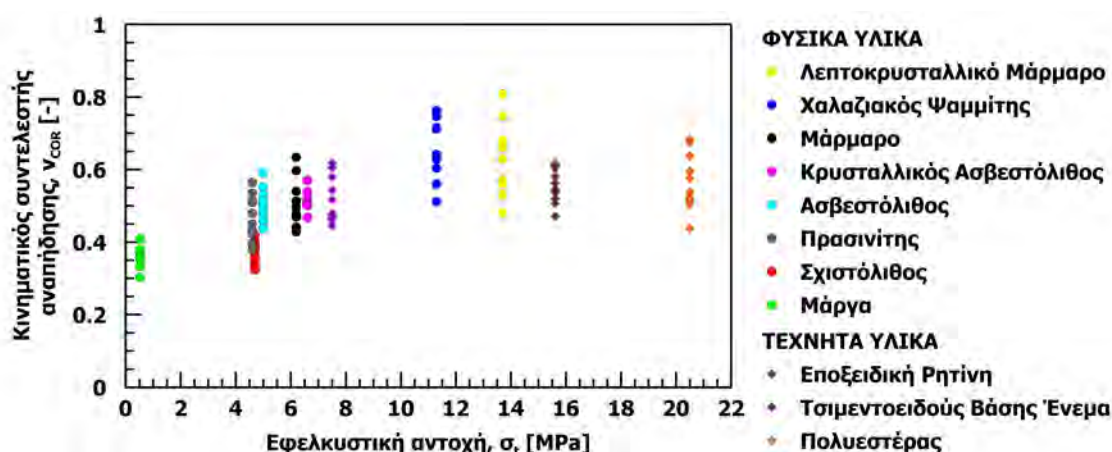
Στην συνέχεια εξετάζονται τα χαρακτηριστικά που προσδιορίζονται από την δοκιμή μονο-αξονικής θλίψης, δηλαδή της θλιπτικής αντοχής του άρρηκτου πετρώματος (σ_c), του εφαπτομενικού μέτρου ελαστικότητας (E_t) και του λόγου Poisson (ν). Προκύπτει ικανοποιητική συσχέτιση του κινηματικού συντελεστή αναπήδησης με την θλιπτική αντοχή (Σχήμα 5.6-α). Πιο συγκεκριμένα, αύξηση της θλιπτικής αντοχής συνεπάγεται με αύξηση του κινηματικού συντελεστή αναπήδησης, ενώ παρατηρείται και ταυτόχρονη αύξηση της διασποράς των τιμών του συντελεστή. Αντιθέτως, δεν προκύπτει συσχέτιση με το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας (Σχήμα 5.6-β) ή τον λόγο Poisson (Σχήμα 5.6-γ)



Σχήμα 5.6: Κινηματικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει των ιδιοτήτων που προσδιορίζονται από την δοκιμή μονοαξονικής θλίψης: (α) της θλιπτικής αντοχής του άρρηκτου πετρώματος (σ_c), (β) του εφαπτομενικού μέτρου ελαστικότητας (E_t) και (γ) του λόγου Poisson (ν)

Η εφελκυστική αντοχή συσχετίζεται ικανοποιητικά με τον κινηματικό συντελεστή αναπήδησης, εφόσον εξαιρεθούν τα δυο τεχνητά υλικά (η εποξειδική ρητίνη και ο πολυεστέρας), όπως προκύπτει από το σχήμα 5.7. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς υπάρχει σύνδεση της εφελκυστικής με την θλιπτική αντοχή (Hobbs, 1964), για την οποία η συσχέτιση είναι ικανοποιητική (βλ. σχήμα 5.6-α). Πιο συγκεκριμένα, η εφελκυστική αντοχή κυμαίνεται μεταξύ 5 και 10% της θλιπτικής (Τσιαμπάος, 2015). Ωστόσο, η συσχέτιση του κινηματικού συντελεστή αναπήδησης με την εφελκυστική αντοχή είναι ασθενέστερη από αυτήν που επιτυγχάνεται με την θλιπτική αντοχή.

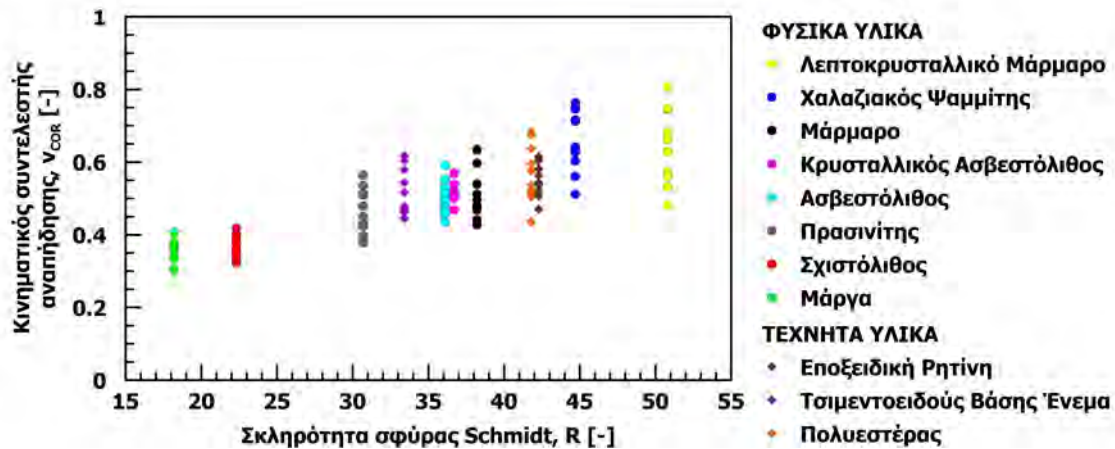
Τα δοκίμια από εποξειδική ρητίνη και πολυεστέρα δεν ακολουθούν την τάση που προκύπτει από τα υπόλοιπα υλικά. Η βασική διαφοροποίηση που εμφανίζουν τα δυο αυτά υλικά είναι ο ιδιαίτερα μικρός λόγος της θλιπτικής προς την εφελκυστική αντοχή (αρκετά μικρότερος αυτού που περιγράφει τα συνήθη βραχώδη υλικά) και ο αρκετά μεγαλύτερος λόγος Poisson (σε σχέση με τις συνήθεις τιμές που χαρακτηρίζουν τα βραχώδη υλικά). Αντιθέτως, η συμπεριφορά του ενέματος τσιμεντοειδούς βάσης δεν διαφοροποιείται από αυτήν των φυσικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν.



Σχήμα 5.7: Κινηματικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της εφελκυστικής αντοχής

Στο σχήμα 5.8 παρουσιάζεται η σχέση του κινηματικού συντελεστή αναπήδησης με την σκληρότητα κατά την σφύρα Schmidt, όπου παρατηρείται πολύ καλή γραμμική συσχέτιση μεταξύ τους. Με την αύξηση της σκληρότητας ο κινηματικός συντελεστής αναπήδησης λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές.

Η συσχέτιση του κινηματικού συντελεστή αναπήδησης με την σκληρότητα που προσδιορίζεται με τη σφύρα Schmidt είναι ποιοτικά η καλύτερη σε σχέση με τις υπόλοιπες ιδιότητες του υλικού που διερευνήθηκαν. Αυτό είναι εύλογο, καθώς το μηχανικό ανάλογο της δοκιμής κρουσιμέτρησης ομοιάζει με αυτό της δοκιμής ελεύθερης πτώσης. Πιο συγκεκριμένα, με την σφύρα Schmidt προσδιορίζεται το ποσοστό της ενέργειας που ανακτάται μετά την κρούση ενός εμβόλου σε μια επιφάνεια (Aydin, 2008). Αντίστοιχα, ο συντελεστής αναπήδησης περιγράφει το ποσοστό της ταχύτητας που διατηρείται μετά την κρούση.



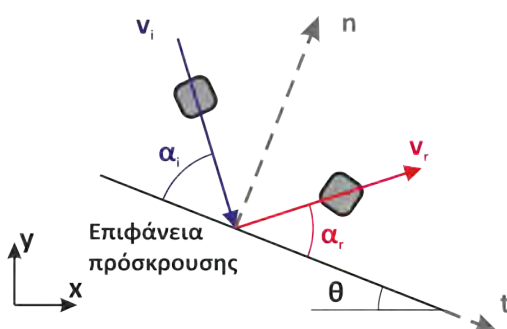
Σχήμα 5.8: Κινηματικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της σκληρότητας κατά την σφύρα Schmidt

5.1.2 Διερεύνηση με δοκιμές παραβολικής ρίψης

Δοκιμές παραβολικής ρίψης πραγματοποιήθηκαν με πέντε από τα φυσικά υλικά που εξετάστηκαν στην προηγούμενη διερεύνηση, πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν: ο χαλαζιακός ψαμμίτης, το μάρμαρο, ο ασβεστόλιθος, ο σχιστόλιθος και η μάργα. Η επιλογή τους έγινε βάσει της σκληρότητάς τους, καλύπτοντας το εύρος σκληροτήτων από τα διαθέσιμα υλικά, καθώς από την προηγούμενη διερεύνηση προέκυψε ότι αποτελεί την ιδιότητα που περιγράφει καλύτερα την απόκριση του τεμάχους. Έτσι, με την παραβολική ρίψη των τεμαχών συνεκτιμάται η επίδραση της γωνίας πρόσκρουσης και της σκληρότητας του υλικού.

Κατά τις δοκιμαστικές ρίψεις που πραγματοποιήθηκαν, παρατηρήθηκε σε ορισμένες δοκιμές πλευρική εκτροπή από το κατακόρυφο επίπεδο, που εμπειρείχε την τροχιά πριν από την κρούση. Ως αποτέλεσμα, εισάγεται σφάλμα στον υπολογισμό της ταχύτητας μετά την κρούση, καθώς το τέμαχος προβάλλεται υπό γωνία στο επίπεδο καταγραφής. Έτσι, παρά το γεγονός ότι έγιναν πολλές επαναλήψεις, αρκετές απορρίφθηκαν ώστε να περιοριστεί το σφάλμα. Το κριτήριο για την απόρριψη μιας δοκιμής ήταν πλευρική η εκτροπή να υπερβαίνει τις 10° . Ο έλεγχος γινόταν κατά την εκτέλεση των δοκιμών με βάση την κάθετη απόσταση της τροχιάς μετά την κρούση από το επίπεδο κίνησης σε συγκεκριμένη θέση από την βάση, ώστε να μην γίνεται περαιτέρω καταγραφή και ανάλυση της δοκιμής.

Στη διερεύνηση αυτή, οι διαστάσεις των δοκιμίων και οι συνθήκες ρίψης των τεμαχών είναι παρόμοιες, καθιστώντας τα αποτελέσματα συγκρίσιμα μεταξύ τους. Οι δοκιμές έγιναν για διάφορους συνδυασμούς κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης και γωνίας απελευθέρωσης του τεμαχούς, ώστε να καλυφθεί το εύρος των δυνατών καταστάσεων που μπορεί να συμβεί σε μια κατάπτωση. Στους πίνακες 5.2 έως 5.6 παρουσιάζονται για κάθε σειρά δοκιμών, ο μέσος όρος των χαρακτηριστικών πρόσκρουσης και αναπήδησης (ταχύτητα και γωνία – βλ. σχήμα 5.9), καθώς επίσης και οι συντελεστές αναπήδησης (κινηματικός, κάθετος και εφαπτομενικός). Τα στοιχεία αυτά προκύπτουν από τις δοκιμές που παρατίθενται αναλυτικά στα παράρτημα 2 έως 6, για κάθε υλικό αντίστοιχα.



Σχήμα 5.9: Σχηματική απεικόνιση δοκιμής παραβολικής ρίψης κυβικών δοκιμίων με λειασμένες ακμές – μετρούμενα μεγέθη

Πίνακας 5.2: Δοκιμές παραβολικής ρίψης κυβικών τεμαχών ψαμμίτη με λειασμένες ακμές

Σειρά δοκιμών	Αριθμός επαν.	Πρόσκρουση		Αναπήδηση		Συντελεστές αναπήδησης		
		$v_i [ms^{-1}]$	$\alpha_i [^\circ]$	$v_r [ms^{-1}]$	$\alpha_r [^\circ]$	$v_{COR} [-]$	$n_{COR} [-]$	$t_{COR} [-]$
2.1	7	2.76	72.4	1.89	60.3	0.68	0.62	1.12
2.2	7	2.70	58.4	1.87	46.6	0.69	0.59	0.90
2.3	7	2.56	42.2	2.08	39.8	0.81	0.77	0.84
2.4	7	2.59	26.8	2.24	25.1	0.87	0.81	0.87
2.5	7	2.60	66.4	1.93	56.5	0.74	0.65	1.00
2.6	7	2.59	50.3	2.03	43.9	0.78	0.71	0.86
2.7	7	2.39	34.8	1.92	30.6	0.80	0.72	0.84
2.8	7	2.36	20.1	2.22	20.3	0.94	0.96	0.94

Πίνακας 5.3: Δοκιμές παραβολικής ρίψης κυβικών τεμαχών μαρμάρου με λειασμένες ακμές

Σειρά δοκιμών	Αριθμός επαν.	Πρόσκρουση		Αναπήδηση		Συντελεστές αναπήδησης		
		$v_i[ms^{-1}]$	$\alpha_i[^\circ]$	$v_r[ms^{-1}]$	$\alpha_r[^\circ]$	$v_{COR}[-]$	$\eta_{COR}[-]$	$t_{COR}[-]$
3.1	5	2.98	74.7	1.82	51.8	0.61	0.49	1.39
3.2	5	2.81	58.4	1.52	44.2	0.54	0.43	0.73
3.3	5	2.92	39.0	1.89	33.8	0.65	0.57	0.69
3.4	5	2.90	23.3	2.38	24.5	0.83	0.85	0.82
3.5	5	2.72	66.7	1.86	42.2	0.69	0.49	1.27
3.6	5	2.56	46.2	1.77	38.5	0.69	0.58	0.77
3.7	5	2.40	31.1	1.91	33.7	0.79	0.86	0.77
3.8	5	2.80	15.4	2.31	18.2	0.83	0.97	0.81

Πίνακας 5.4: Δοκιμές παραβολικής ρίψης κυβικών τεμαχών ασβεστολίθου με λειασμένες ακμές

Σειρά δοκιμών	Αριθμός επαν.	Πρόσκρουση		Αναπήδηση		Συντελεστές αναπήδησης		
		$v_i[ms^{-1}]$	$\alpha_i[^\circ]$	$v_r[ms^{-1}]$	$\alpha_r[^\circ]$	$v_{COR}[-]$	$\eta_{COR}[-]$	$t_{COR}[-]$
4.1	7	3.77	76.0	1.93	52.1	0.51	0.41	1.29
4.2	7	3.65	60.4	2.31	41.1	0.63	0.47	0.94
4.3	7	3.59	44.2	2.50	32.7	0.70	0.54	0.81
4.4	7	3.40	31.3	2.75	27.9	0.81	0.73	0.84
4.5	7	2.64	19.9	2.22	21.4	0.84	0.91	0.83

Πίνακας 5.5: Δοκιμές παραβολικής ρίψης κυβικών τεμαχών σχιστολίθου με λειασμένες ακμές

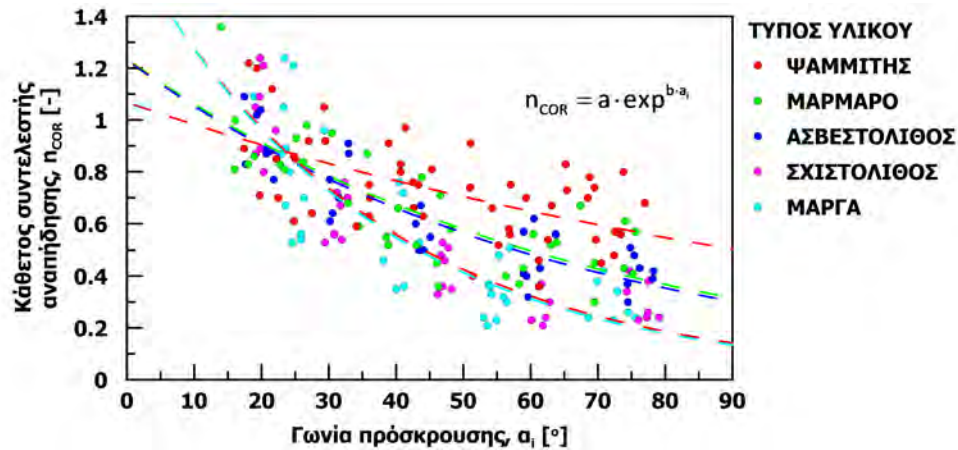
Σειρά δοκιμών	Αριθμός επαν.	Πρόσκρουση		Αναπήδηση		Συντελεστές αναπήδησης		
		$v_i[ms^{-1}]$	$\alpha_i[^\circ]$	$v_r[ms^{-1}]$	$\alpha_r[^\circ]$	$v_{COR}[-]$	$\eta_{COR}[-]$	$t_{COR}[-]$
5.1	7	3.67	76.6	2.05	34.1	0.56	0.30	2.04
5.2	7	3.64	61.4	1.84	33.1	0.50	0.29	0.88
5.3	7	3.71	47.1	2.21	34.3	0.60	0.43	0.72
5.4	7	3.57	31.5	2.47	28.7	0.70	0.64	0.71
5.5	7	2.62	20.2	2.25	24.7	0.86	1.03	0.83

Πίνακας 5.6: Δοκιμές παραβολικής ρίψης κυβικών τεμαχών μάργας με λειασμένες ακμές

Σειρά δοκιμών	Αριθμός επαν.	Πρόσκρουση		Αναπήδηση		Συντελεστές αναπήδησης		
		$v_i[ms^{-1}]$	$\alpha_i[^\circ]$	$v_r[ms^{-1}]$	$\alpha_r[^\circ]$	$v_{COR}[-]$	$\eta_{COR}[-]$	$t_{COR}[-]$
6.1	7	2.88	72.1	1.57	24.5	0.55	0.24	1.63
6.2	7	2.77	55.1	1.67	29.8	0.60	0.36	0.91
6.3	7	2.61	40.5	1.64	35.0	0.63	0.54	0.67
6.4	7	2.58	25.5	1.80	27.3	0.70	0.74	0.69
6.5	7	2.69	22.7	2.23	26.2	0.83	0.94	0.81

5.1.2.1 Σχολιασμός συντελεστών αναπήδησης ως προς την γωνία πρόσκρουσης

Στο σχήμα 5.10 παρουσιάζονται οι τιμές του κάθετου συντελεστή αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης για τα πέντε υλικά που εξετάστηκαν.



Σχήμα 5.10: Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης από τις δοκιμές παραβολικής ρίψης κυβικών τεμαχών με λειασμένες ακμές από φυσικά υλικά

Παρατηρείται ότι ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης (n_{COR}) αυξάνεται με την μείωση της γωνίας πρόσκρουσης (α_i). Επίσης, σε μικρές γωνίες πρόσκρουσης μετρήθηκαν τιμές του κάθετου συντελεστή αναπήδησης μεγαλύτερες της μονάδας (έως και 1.4). Για γωνίες πρόσκρουσης μεγαλύτερες από περίπου $\alpha_i \geq 25^\circ$, παρατηρείται ότι όσο αυξάνει η σκληρότητα του υλικού τόσο μεγαλύτερες είναι οι τιμές του κάθετου συντελεστή αναπήδησης, ωστόσο σε μικρότερες γωνίες η διασπορά των τιμών είναι αυξημένη με αποτέλεσμα να μην διακρίνεται διαφοροποίηση εξαιτίας της σκληρότητας.

Αν και η διακύμανση των τιμών είναι σημαντική, υπάρχει μια συστηματικότητα στις τιμές του κάθετου συντελεστή αναπήδησης, που χαρακτηρίζεται από την γωνία πρόσκρουσης και από την φύση του υλικού. Εξετάζοντας μεμονωμένα κάθε υλικό, η μεταβολή του κάθετου συντελεστή αναπήδησης μπορεί να περιγραφεί σε συνάρτηση με την γωνία πρόσκρουσης από μια εκθετική σχέση της μορφής:

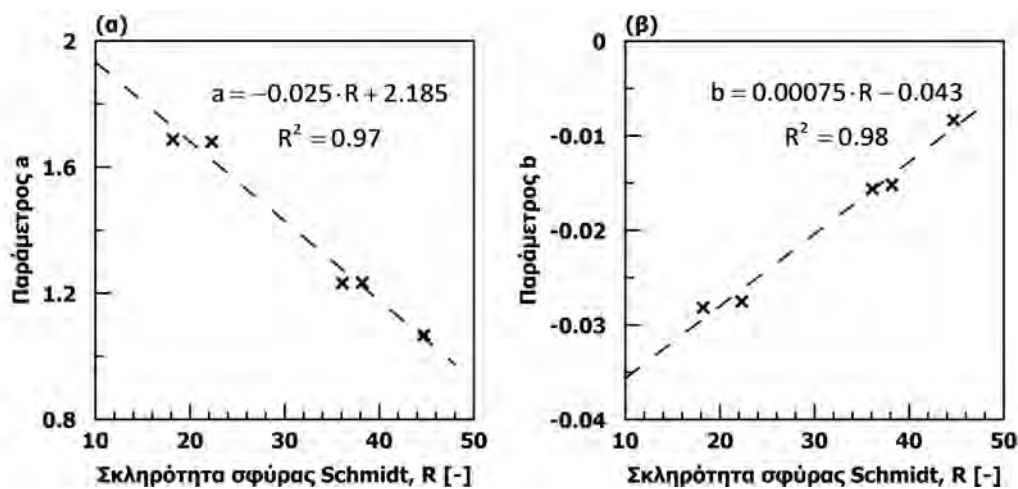
$$n_{COR} = a \exp^{-b\alpha_i} \quad (5.1)$$

Οι τιμές των παραμέτρων a και b προσδιορίστηκαν με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Παρουσιάζονται στον πίνακα 5.7 μαζί με τους αντίστοιχους συντελεστές συσχέτισης R^2 και την σκληρότητα σφύρας Schmidt R . Οι βέλτιστες καμπύλες είναι σχεδιασμένες με διακεκομμένες καμπύλες στο σχήμα 5.10.

Πίνακας 5.7: Παράμετροι συσχέτισης του καθέτου συντελεστή αναπήδησης με την γωνία πρόσκρουσης

Τύπος υλικού	R[-]	a	b	R ²
Μάργα	18.2	1.688	-0.0281	0.83
Σχιστόλιθος	22.3	1.681	-0.0275	0.85
Ασβεστόλιθος	36.1	1.232	-0.0156	0.79
Μάρμαρο	38.2	1.235	-0.0151	0.64
Χαλαζιακός Ψαμμίτης	44.7	1.068	-0.0083	0.35

Αρχικά, παρατηρείται ότι η ποιότητα της συσχέτισης είναι καλύτερη για τα μαλακά υλικά, αφού ο συντελεστής R² λαμβάνει υψηλότερες τιμές. Επίσης, η παράμετρος a είναι αντιστρόφως ανάλογη της σκληρότητας και η παράμετρος b ανάλογη. Έτσι, οι παράμετροι αυτοί δύναται να συσχετισθούν περαιτέρω με την σκληρότητα (Σχήμα 5.11).

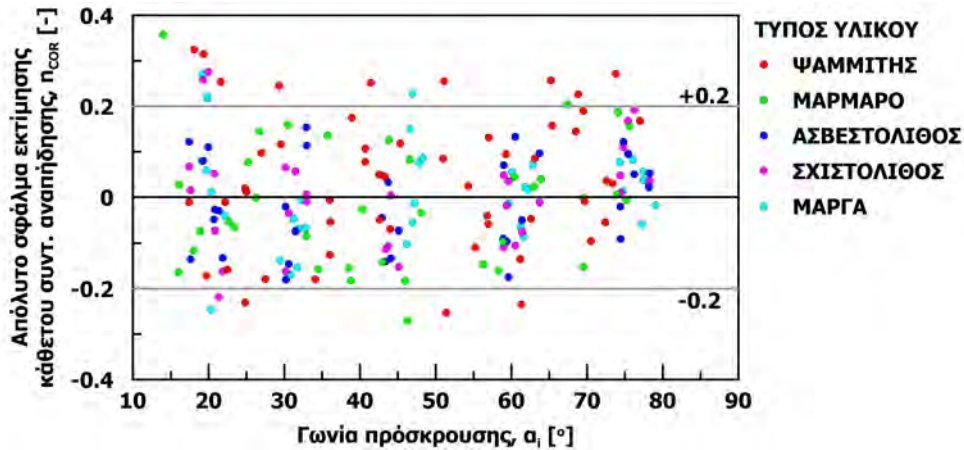


Σχήμα 5.11: Προσδιορισμός παραμέτρων για την συσχέτιση του καθέτου συντελεστή αναπήδησης με την γωνία πρόσκρουσης και την σκληρότητα του υλικού

Αντικαθιστώντας τις εκφράσεις των παραμέτρων a και b στην σχέση 5.1, λαμβάνεται η παρακάτω εμπειρική σχέση εκτίμησης του καθέτου συντελεστή αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης και της σκληρότητας του υλικού.

$$n_{cor} = (-0.025R + 2.2) \exp^{(0.00075R+0.043)\alpha_i} \tag{5.2}$$

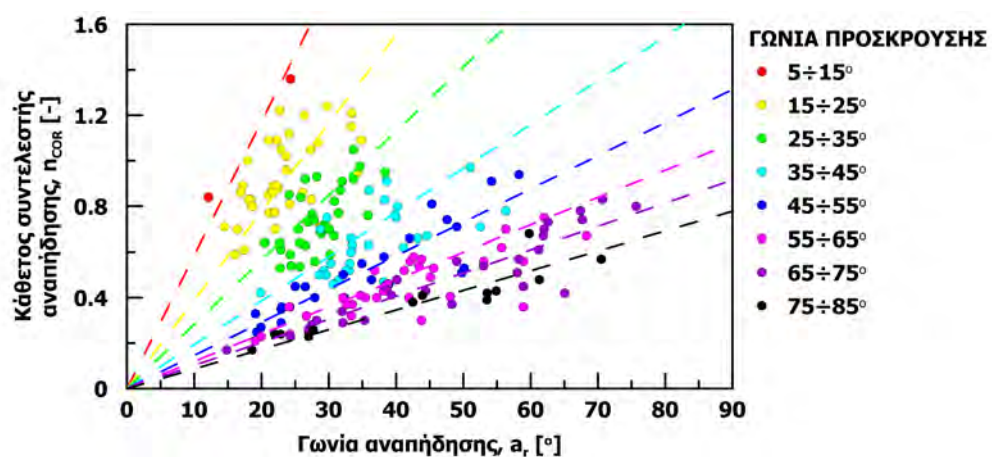
Η σχέση αυτή προσαρμόζεται στο σύνολο των δεδομένων με ένα συντελεστή συσχέτισης R² = 0.74. Στο σχήμα 5.12 παρουσιάζεται το απόλυτο σφάλμα, συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης, που προκύπτει στην εκτίμηση του καθέτου συντελεστή αναπήδησης εφαρμόζοντας την παραπάνω εμπειρική σχέση.



Σχήμα 5.12: Απόλυτο σφάλμα στην εκτίμηση του κάθετου συντελεστή αναπήδησης από την σχέση 5.2

Με εξαίρεση τις τιμές που αντιστοιχούν σε μικρές γωνίες πρόσκρουσης, το απόλυτο σφάλμα στην εκτίμηση του κάθετου συντελεστή αναπήδησης κυμαίνεται σε ± 0.2 . Η διακύμανση αυτή είναι σημαντική, αλλά σαφώς μικρότερη της αντίστοιχης που συναντάται στις προτεινόμενες τιμές της βιβλιογραφίας (βλ. ενότητα 3.2.4). Έτσι, δύναται να δικαιολογηθεί η μεγάλη διακύμανση που εμφανίζουν οι τιμές της βιβλιογραφίας καθώς δεν συνοδεύονται από την γωνία πρόσκρουσης για την οποία προσδιορίστηκαν.

Στο σχήμα 5.13 προβάλλεται ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας αναπήδησης. Η ομαδοποίηση των σημείων έχει γίνει σύμφωνα με την γωνία πρόσκρουσης (α_i) σε κλάσεις των 10° . Παρατηρείται ότι σε κάθε κλάση, ανεξαρτήτως της φύσης του υλικού, ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης, συνδέεται με την γωνία αναπήδησης μέσω ευθείας που διέρχεται από την αρχή των αξόνων. Η κλίση της ευθείας αυτής μειώνεται με την αύξηση της γωνίας πρόσκρουσης.

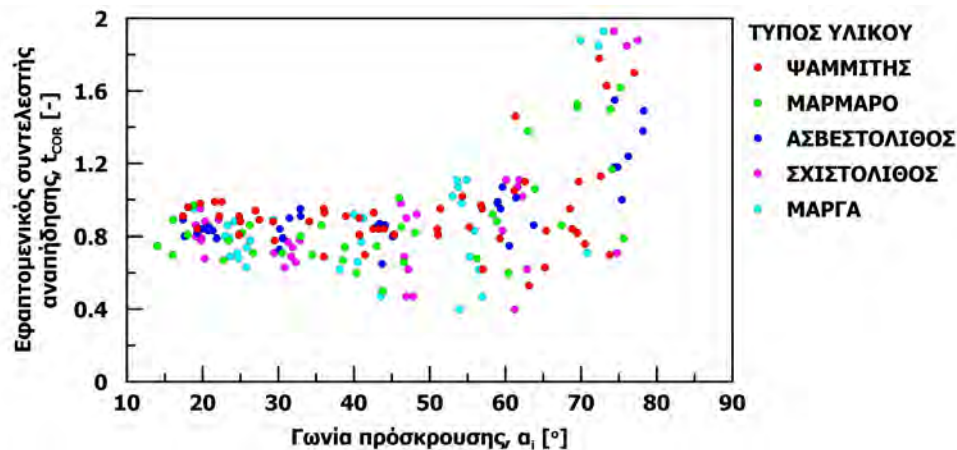


Σχήμα 5.13: Σχέση κάθετου συντελεστή με την γωνία αναπήδησης βάσει της γωνίας πρόσκρουσης

Έτσι, εφόσον εκτιμηθεί η γωνία πρόσκρουσης, δύναται να προσδιορισθεί το εύρος τιμών του καθέτου συντελεστή αναπήδησης από την παραπάνω σχέση. Η εκτίμηση της γωνίας πρόσκρουσης είναι σαφώς ευκολότερη από ότι του συντελεστή αναπήδησης, καθώς εξαρτάται μόνο από τις αρχικές συνθήκες του προβλήματος (γωνία και ταχύτητα ρίψης, κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης).

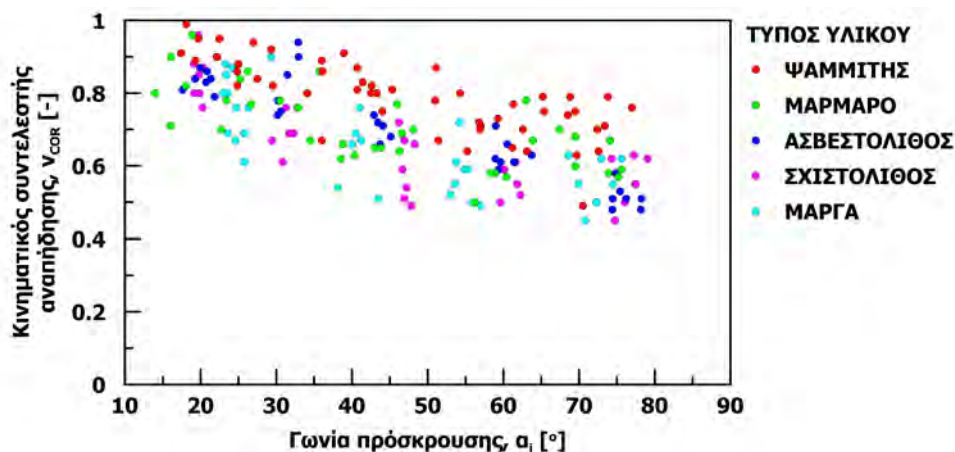
Ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης (t_{COR}) παρουσιάζεται στο σχήμα 5.14, συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης. Οι τιμές που λαμβάνει ταυτίζονται ανεξαρτήτως του υλικού, συνεπώς η σκληρότητα του υλικού δεν φαίνεται να επηρεάζει τον εφαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης. Επίσης, για γωνίες πρόσκρουσης (α_i) έως περίπου 65° , οι τιμές του εφαπτομενικού συντελεστή είναι παρόμοιες, έτσι μπορεί να θεωρηθεί ανεξάρτητος και της γωνίας πρόσκρουσης.

Για γωνίες πρόσκρουσης μεγαλύτερες από 65° , παρουσιάζονται τιμές σημαντικά μεγαλύτερες της μονάδας. Στην προηγούμενη ενότητα (5.1.1) εξετάστηκε το ίδιο σχήμα τεμάχους σε ελεύθερη πτώση, όπου γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στην απόκλιση που έχει το τέμαχος από την κατακόρυφο μετά την κρούση. Στην περίπτωση αυτή, ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης δεν ορίζεται αφού δεν υπάρχει εφαπτομενική ταχύτητα πριν την κρούση. Στο σχήμα 5.14 διακρίνεται ασυμπτωτική τάση των σημείων ως προς τον κατακόρυφο άξονα για γωνία πρόσκρουσης 90° , που είναι σε συμφωνία με την συμπεριφορά που υπάρχει στις δοκιμές ελεύθερης πτώσης.



Σχήμα 5.14: Εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης από τις δοκιμές παραβολικής ρίψης κυβικών τεμαχών με λειασμένες ακμές (για γωνίες $\alpha_i > 70^\circ$ έχουν προσδιοριστεί τιμές έως και 4 που δεν προβάλλονται στο διάγραμμα)

Ο κινηματικός συντελεστής αναπήδησης (v_{COR}) εμφανίζει αντίστοιχη τάση με τον κάθετο, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 5.15. Πιο συγκεκριμένα, η αύξηση της γωνίας πρόσκρουσης έχει ως αποτέλεσμα την μείωσή του και το μέγεθός του εξαρτάται από την σκληρότητα του υλικού, καθώς στο σκληρότερο υλικό λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές σε όλο το φάσμα γωνιών πρόσκρουσης που μελετήθηκε. Αυτά είναι σε πλήρη συμφωνία με τα συμπεράσματα των δοκιμών ελεύθερης πτώσης.



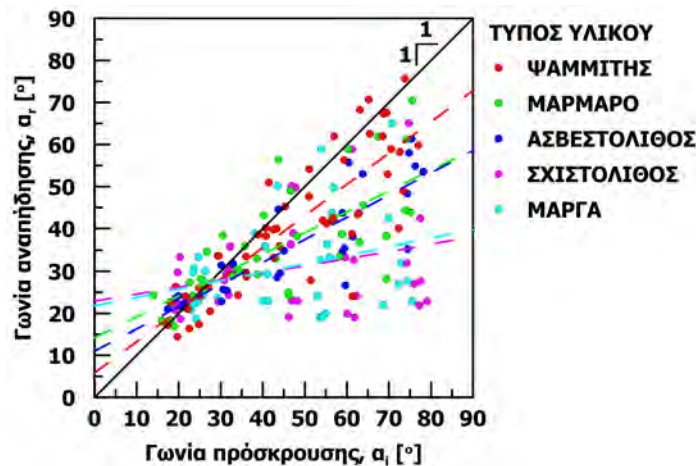
Σχήμα 5.15: Κινηματικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης από τις δοκιμές παραβολικής ρίψης κυβικών τεμαχίων με λειασμένες ακμές από φυσικά υλικά

Συγκριτικά με τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης (Σχήμα 5.10) η διασπορά των τιμών είναι περιορισμένη σε όλο το εύρος των γωνιών πρόσκρουσης. Ειδικά στις περιπτώσεις των ακραίων τιμών, δηλαδή σε γωνίες πρόσκρουσης μικρότερες των 25° και μεγαλύτερες των 65° , δεν προκύπτουν τιμές μεγαλύτερες της μονάδας όπως συμβαίνει για τον κάθετο και τον εφαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης αντίστοιχα. Συνεπώς, βάσει των στοιχείων αυτών, ο κινηματικός συντελεστής αναπήδησης είναι προτιμότερος από τον κάθετο για την έκφραση συσχετίσεων.

5.1.2.2 Σχολιασμός χαρακτηριστικών τροχιάς

Στην θεωρητική περίπτωση της πλήρως ελαστικής κρούσης ο συντελεστής αναπήδησης ισούται με την μονάδα. Έτσι, στην περίπτωση ελαστικής κρούσης σφαιρικού τεμάχους σε λεία επιφάνεια, η γωνία πρόσκρουσης θα ισούται με την γωνία αναπήδησης. Δηλαδή τα σημεία θα προβάλλονταν επί της ευθείας 1 προς 1 στο σχήμα 5.16, όπου αναπαρίσταται η σχέση της γωνίας αναπήδησης με την γωνία πρόσκρουσης.

Στην ενότητα 5.1.2.1 προέκυψε ότι ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης εμφανίζει περιορισμένο εύρος και προσεγγίζει την μονάδα. Αυτό συνεπάγεται ότι η εφαπτομενική συνιστώσα της ταχύτητας δεν μεταβάλλεται σημαντικά εξαιτίας της κρούσης. Συνεπώς, η γωνία αναπήδησης καθορίζεται από την κατακόρυφη συνιστώσα της κίνησης. Έτσι, μικρότερος συντελεστής αναπήδησης συνεπάγεται με μικρότερη γωνία αναπήδησης.



Σχήμα 5.16: Σχέση της γωνίας πρόσκρουσης με την γωνία αναπήδησης στις δοκιμές παραβολικής ρίψης κυβικών τεμαχίων με λειασμένες ακμές από φυσικά υλικά

Όσο αυξάνει η σκληρότητα κατά την σφύρα Schmidt ενός υλικού, τόσο μεγαλύτερη είναι η αντοχή και το μέτρο ελαστικότητάς του. Έτσι, οι αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις κατά την επαφή είναι περιορισμένες συγκριτικά με ένα μαλακότερο υλικό. Συνεπώς, υπό ίδιες συνθήκες κρούσης, ένα σκληρότερο υλικό προσεγγίζει περισσότερο την ελαστική συμπεριφορά από ότι ένα μαλακότερο. Τούτο παρατηρείται στο σχήμα 5.16, καθώς το σκληρότερο υλικό που εξετάσθηκε (ψαμμίτης) προσεγγίζει την ευθεία 1:1, ενώ το μαλακότερο υλικό εμφανίζει ήπια κλίση και τα υλικά ενδιάμεσης σκληρότητας προβάλλονται αναλογικά.

Γενικώς, οι δοκιμές που παρουσιάστηκαν στην ενότητα αυτή χαρακτηρίζονται από σημαντική διακύμανση. Ειδικότερα, η διακύμανση είναι σημαντική ακόμη και σε επίπεδο σειράς δοκιμών, παρά το γεγονός ότι ομοιάζουν οι συνθήκες απελευθέρωσης και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των τεμαχίων μεταξύ των επαναλήψεων. Αυτή αποδίδεται στην γεωμετρία επαφής, καθώς αποτελεί το μόνο στοιχείο που μεταβάλλεται σε κάθε δοκιμή. Η γεωμετρία επαφής καθορίζεται από τον προσανατολισμό του τεμαχίου κατά την επαφή με την επιφάνεια πρόσκρουσης και παρουσιάζει πλήθος διαφορετικών περιπτώσεων εξαιτίας της μη συμμετρίας των δοκιμών.

Ωστόσο, η διάρκεια της επαφής είναι ιδιαιτέρως σύντομη, τάξεις μεγέθους μικρότερη από την ταχύτητα καταγραφής της φωτομηχανής. Συνεπώς, δεν δύναται να αξιολογηθεί ο τρόπος που επιδρά καθώς δεν μπορεί να προσδιοριστεί από τις μετρήσεις.

5.2 Επίδραση των χαρακτηριστικών πρόσκρουσης

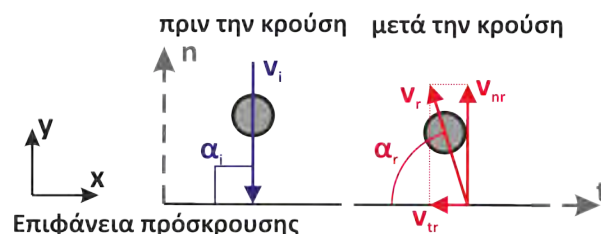
Γενικά η αναπήδηση είναι μικρότερη όσο αυξάνει η ταχύτητα πρόσκρουσης, καθώς η αναπτυσσόμενη δύναμη κατά την κρούση αυξάνεται με συνέπεια οι πλαστικές παραμορφώσεις να έχουν μεγαλύτερη έκταση και να καταναλώνεται περισσότερη ενέργεια. Στην ενότητα 3.2.1, αναφέρονται οι σχέσεις από την θεωρία των κρούσεων που συνδέουν τα δυο αυτά μεγέθη. Επίσης, στην ενότητα 3.3.4 παρουσιάζονται οι διαθέσιμες μεθοδολογίες προσαρμογής των συντελεστών αναπήδησης βάσει της ταχύτητας πρόσκρουσης, που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση των καταπτώσεων.

Η διερεύνηση της σχέσης μεταξύ της ταχύτητας πρόσκρουσης και του συντελεστή αναπήδησης έγινε με δοκιμές ελεύθερης πτώσης και παραβολικής ρίψης. Στις δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν σφαιρικά τεμάχια ώστε να εξαιρεθεί η αυξημένη διακύμανση των συντελεστών αναπήδησης, που παρατηρήθηκε στις δοκιμές της ενότητας 5.1 και οφείλεται στο σχήμα του τεμάχους. Αρχικά κατασκευάστηκαν δοκίμια από τσιμεντοειδές ένεμα και εποξειδική ρητίνη με έκχυση σε ειδικά καλούπια και στην συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια μαρμάρου και ψαμμίτη, διαμορφωμένα από εξειδικευμένο τεχνίτη-μαρμαρογλύπτη. Επιπρόσθετα, για κάθε υλικό οι δοκιμές έγιναν με σφαίρες διαφορετικής διαμέτρου, ώστε να μπορεί να διερευνηθεί συγχρόνως και η επίδραση της μάζας τους.

5.2.1 Διερεύνηση με δοκιμές ελεύθερης πτώσης

Στις δοκιμές ελεύθερης πτώσης, η ταχύτητα πρόσκρουσης των δοκιμών κυμάνθηκε από 1.3 έως 9.3m s^{-1} . Αυτό επιτεύχθηκε μεταβαλλόντας σε κάθε σειρά δοκιμών το ύψος απελευθέρωσης των τεμαχίων, από 10cm έως 4.5m .

Εκτελέστηκαν 73 σειρές δοκιμών, απαρτιζόμενες από πέντε επαναλήψεις, με διαφορετικούς συνδυασμούς ύψους απελευθέρωσης και διάστασης τεμάχους, δηλαδή συνολικά έγιναν 365 δοκιμές. Για κάθε σειρά δοκιμών παρουσιάζονται συνοπτικά στους ακόλουθους πίνακες το ύψος απελευθέρωσης, οι μέσοι όροι των ταχυτήτων πρόσκρουσης και αναπήδησης (βλ. σχήμα 5.17) καθώς και των συντελεστών αναπήδησης (κάθετος και κινηματικός), οργανωμένα κατά είδος υλικού και διάσταση τεμάχους.

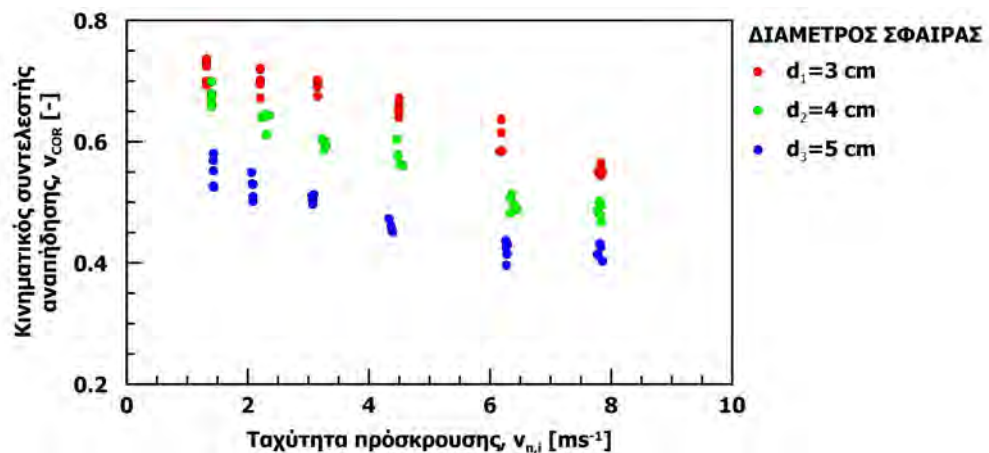


Σχήμα 5.17: Σχηματική απεικόνιση δοκιμής ελεύθερης σφαιρικών τεμαχίων – μετρούμενα μεγέθη

Αρχικά παρατίθενται τα αποτελέσματα των δοκιμών με τεμάχια από τσιμεντοειδές ένεμα (Πίνακας 5.8) έπονται οι δοκιμές με τεμάχια από εποξειδική ρητίνη (Πίνακας 5.9), μάρμαρο (Πίνακας 5.10) και τέλος, από χαλαζιακό ψαμμίτη (Πίνακας 5.11). Μεταξύ αυτών, παρεμβάλλονται τα αντίστοιχα διαγράμματα που αναπαριστούν την σχέση της ταχύτητας πρόσκρουσης με τον κινηματικό συντελεστή αναπήδησης (Σχήμα 5.18 έως 5.21). Αναλυτικότερα, τα στοιχεία των δοκιμών βρίσκονται στα παραρτήματα 7 έως 10, αντίστοιχα.

Πίνακας 5.8: Δοκιμές ελεύθερης πτώσης σφαιρικών τεμαχίων από τσιμεντοειδές ένεμα

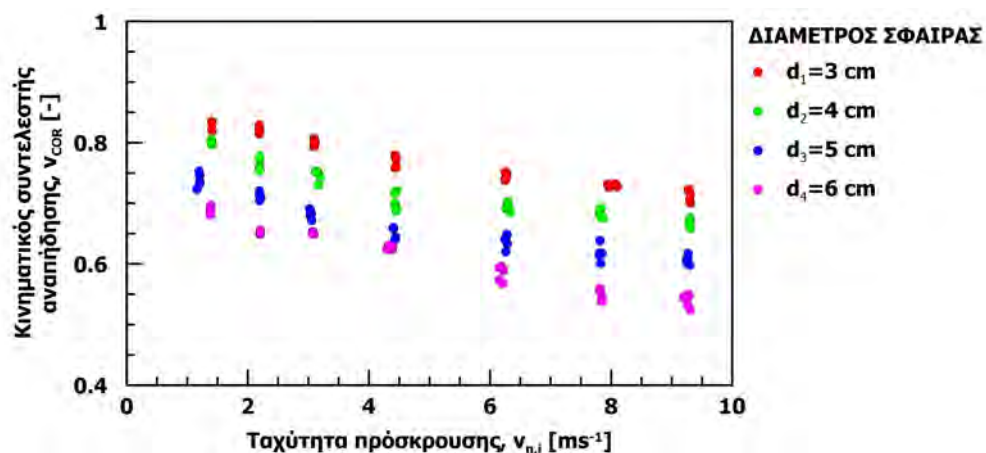
Σειρά δοκιμών	Αριθμός επαν.	Διάμετρος $d[cm]$	Ύψος $h_d[cm]$	Ταχύτητα		Συντ. αναπήδησης	
				$v_i[ms^{-1}]$	$v_r[ms^{-1}]$	$v_{COR}[-]$	$\eta_{COR}[-]$
7.1	5	3	10	1.32	0.94	0.72	0.72
7.2	5		25	2.20	1.55	0.70	0.70
7.3	5		50	3.15	2.18	0.69	0.69
7.4	5		100	4.49	2.95	0.66	0.66
7.5	5		200	6.18	3.74	0.60	0.60
7.6	5		300	7.83	4.32	0.55	0.55
7.7	5	4	10	1.40	0.94	0.68	0.67
7.8	5		25	2.30	1.48	0.64	0.64
7.9	5		50	3.26	1.95	0.60	0.60
7.10	5		100	4.50	2.59	0.58	0.58
7.11	5		200	6.38	3.17	0.50	0.50
7.12	5		300	7.81	3.80	0.49	0.49
7.13	5	5	10	1.43	0.79	0.55	0.55
7.14	5		25	2.08	1.09	0.52	0.52
7.15	5		50	3.07	1.56	0.51	0.51
7.16	5		100	4.37	2.01	0.46	0.46
7.17	5		200	6.27	2.64	0.42	0.42
7.18	5		300	7.81	3.26	0.42	0.41



Σχήμα 5.18: Κινηματικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της ταχύτητας πρόσκρουσης για τεμάχια από τσιμεντοειδές ένεμα με διαφορετική μάζα

Πίνακας 5.9: Δοκιμές ελεύθερης πτώσης σφαιρικών τεμαχών από εποξειδική ρητίνη

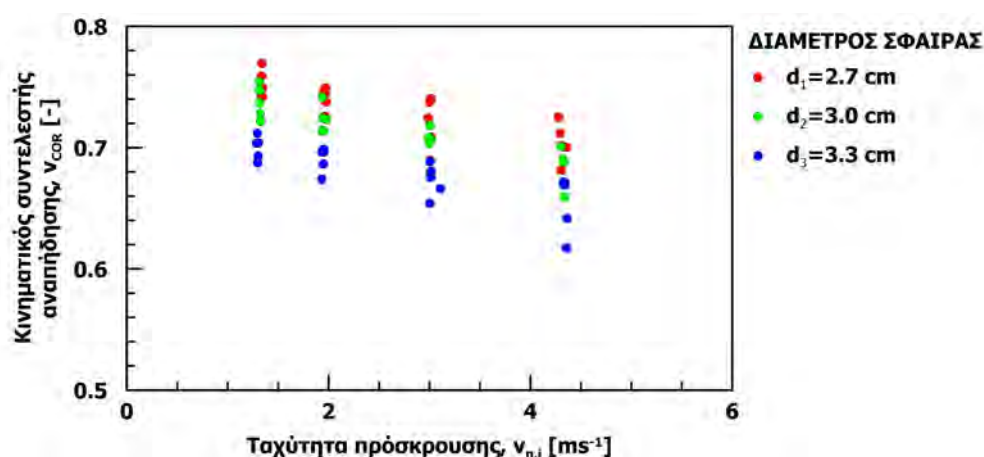
Σειρά δοκιμών	Αριθμός επαν.	Διάμετρος $d[cm]$	Ύψος $h_d[cm]$	Ταχύτητα		Συντ. αναπήδησης	
				$v_i[ms^{-1}]$	$v_r[ms^{-1}]$	$v_{COR}[-]$	$\eta_{COR}[-]$
8.1	5	3	10	1.40	1.16	0.83	0.83
8.2	5		25	2.19	1.80	0.82	0.82
8.3	5		50	3.10	2.48	0.80	0.80
8.4	5		100	4.44	3.42	0.77	0.77
8.5	5		200	6.26	4.66	0.74	0.74
8.6	5		300	8.01	5.84	0.73	0.73
8.7	5		450	9.29	6.63	0.71	0.71
8.8	5	4	10	1.40	1.12	0.80	0.80
8.9	5		25	2.20	1.68	0.76	0.76
8.10	5		50	3.15	2.35	0.75	0.75
8.11	5		100	4.44	3.13	0.70	0.70
8.12	5		200	6.30	4.38	0.69	0.69
8.13	5		300	7.83	5.35	0.68	0.68
8.14	5		450	9.30	6.22	0.67	0.67
8.15	5	5	10	1.19	0.88	0.74	0.71
8.16	5		25	2.20	1.57	0.71	0.71
8.17	5		50	3.04	2.07	0.68	0.68
8.18	5		100	4.42	2.88	0.65	0.65
8.19	5		200	6.27	3.99	0.64	0.64
8.20	5		300	7.82	4.83	0.62	0.62
8.21	5		450	9.26	5.62	0.61	0.61
8.22	5	6	10	1.38	0.95	0.69	0.69
8.23	5		25	2.20	1.44	0.65	0.65
8.24	5		50	3.08	2.00	0.65	0.65
8.25	5		100	4.35	2.72	0.63	0.63
8.26	5		200	6.18	3.61	0.58	0.58
8.27	5		300	7.83	4.29	0.55	0.55
8.28	5		450	9.26	4.99	0.54	0.54



Σχήμα 5.19: Κινηματικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της ταχύτητας πρόσκρουσης για τεμάχια από εποξειδική ρητίνη με διαφορετική μάζα

Πίνακας 5.10: Δοκιμές ελεύθερης πτώσης σφαιρικών τεμαχών από μάρμαρο

Σειρά δοκιμών	Αριθμός επαν.	Διάμετρος $d[cm]$	Ύψος $h_d[cm]$	Ταχύτητα		Συντ. αναπήδησης	
				$v_i[ms^{-1}]$	$v_r[ms^{-1}]$	$v_{COR}[-]$	$n_{COR}[-]$
9.1	5	2.7	12.5	1.34	1.01	0.75	0.75
9.2	5		25	1.97	1.46	0.74	0.74
9.3	5		50	3.00	2.16	0.72	0.72
9.4	5		100	4.31	3.03	0.70	0.70
9.5	5	3	12.5	1.32	0.97	0.74	0.74
9.6	5		25	1.95	1.41	0.72	0.72
9.7	5		50	3.00	2.11	0.70	0.70
9.8	5		100	4.32	2.95	0.68	0.68
9.9	5	3.4	12.5	1.30	0.91	0.70	0.70
9.10	5		25	1.94	1.34	0.69	0.69
9.11	5		50	3.03	2.04	0.67	0.67
9.12	5		100	4.35	2.84	0.65	0.65

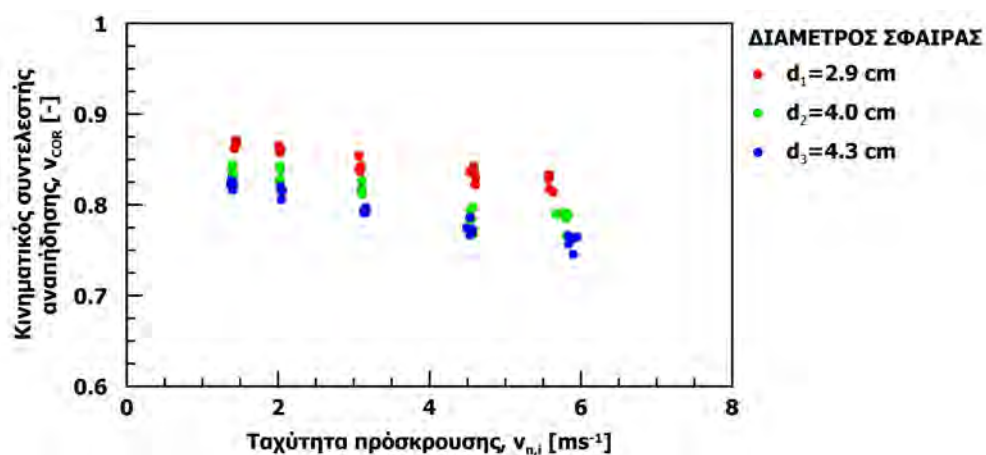


Σχήμα 5.20: Κινηματικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της ταχύτητας πρόσκρουσης, για τεμάχια από μάρμαρο με διαφορετική μάζα

Οι δοκιμές με τα σφαιρικά τεμάχια μαρμάρου ολοκληρώθηκαν σε περιορισμένο ύψος συγκριτικά με τα υπόλοιπα υλικά. Στις δοκιμές που έγιναν από το επόμενο ύψος απελευθέρωσης ($h_d = 180cm$), τα δοκίμια εμφάνιζαν μια σταδιακή κόπωση, που εκφραζόταν μέσω της ολοένα και μειούμενης αναπήδησής τους, μέχρι της θραύσης τους. Ίδιο ζήτημα υπήρξε και με τα τεμάχια από τσιμεντοειδές ένεμα, ωστόσο υπήρχε η δυνατότητα παραγωγής μεγάλου πλήθους δοκιμών για την ολοκλήρωση των δοκιμών. Περισσότερα για την μορφή της θραύσης παρατίθενται στο κεφάλαιο 8.

Πίνακας 5.11: Δοκιμές ελεύθερης πτώσης σφαιρικών τεμαχών από ψαμμίτη

Σειρά δοκιμών	Αριθμός επαν.	Διάμετρος $d[cm]$	Ύψος $h_d[cm]$	Ταχύτητα		Συντ. αναπήδησης	
				$v_i[ms^{-1}]$	$v_r[ms^{-1}]$	$v_{COR}[-]$	$n_{COR}[-]$
10.1	5	2.9	12.5	1.44	1.25	0.87	0.86
10.2	5		25	2.03	1.74	0.86	0.86
10.3	5		50	3.08	2.60	0.84	0.84
10.4	5		100	4.58	3.82	0.83	0.83
10.5	5		180	5.59	4.61	0.83	0.82
10.6	5	4	12.5	1.40	1.17	0.84	0.84
10.7	5		25	2.03	1.68	0.83	0.83
10.8	5		50	3.11	2.54	0.82	0.82
10.9	5		100	4.56	3.58	0.79	0.79
10.10	5		180	5.78	4.54	0.78	0.78
10.11	5	4.3	12.5	1.39	1.15	0.82	0.82
10.12	5		25	2.04	1.66	0.82	0.81
10.13	5		50	3.14	2.50	0.79	0.79
10.14	5		100	4.54	3.51	0.77	0.77
10.15	5		180	5.88	4.47	0.76	0.76



Σχήμα 5.21: Κινηματικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της ταχύτητας πρόσκρουσης, για τεμάχια από ψαμμίτη με διαφορετική μάζα

Η χρήση δοκιμών σφαιρικού σχήματος έχει ως αποτέλεσμα οι τιμές των συντελεστών αναπήδησης που προσδιορίζονται να έχουν σαφώς μικρότερη διακύμανση από αυτήν των κυβικών δοκιμών με λειασμένες ακμές. Αυτό οφείλεται στην γεωμετρία της επαφής μεταξύ του σφαιρικού τεμάχους και της επιφάνεια πρόσκρουσης, που δεν διαφοροποιείται μεταξύ των επαναλήψεων, αφού κάθε άξονας που διέρχεται από το κέντρο της σφαίρας αποτελεί και άξονα συμμετρίας.

Έτσι, για τις δοκιμές ελεύθερης πτώσης η εκτροπή του τεμάχους από την κατακόρυφο είναι περιορισμένη, με αποτέλεσμα ο κάθετος και ο κινηματικός συντελεστής αναπήδησης πρακτικά να ταυτίζονται. Από το σύνολο των δοκιμών της διερεύνησης αυτής, η ελάχιστη γωνία αναπήδησης είναι $\alpha_r = 78.1^\circ$, που ισοδυναμεί με μεγίστη απόκλιση από την κατακόρυφο 11.9° , και παράλληλα η αντίστοιχη διαφοροποίηση του καθέτου με τον κινηματικό συντελεστή αναπήδησης ανέρχεται σε 2.5%. Συγκρίνοντας τα παραπάνω με τα αντίστοιχα στοιχεία της προηγούμενης διερεύνησης (βλ. ενότητα 5.1.1), καταδεικνύεται η σημαντικότερη επίδραση που έχει το σχήμα του τεμάχους στην επαναληψιμότητα των δοκιμών και άρα στην διακύμανση των συντελεστών αναπήδησης.

5.2.1.1 Επίδραση ταχύτητας και μάζας τεμάχους στους συντελεστές αναπήδησης

Από τα παραπάνω σχήματα καθίσταται προφανές ότι η αύξηση της ταχύτητας πρόσκρουσης προκαλεί μείωση του συντελεστή αναπήδησης ανεξάρτητα της μάζας του τεμάχους ή του είδους του υλικού. Με σκοπό να γίνει ευχερέστερη η σύγκριση των συντελεστών αναπήδησης βάσει του υλικού, παρατίθενται εκ νέου τα ανωτέρω αποτελέσματα στο σχήμα 5.22, χρησιμοποιώντας ίσους άξονες.

Παρατηρείται ότι η επίδραση της μάζας είναι εξίσου σημαντική, γεγονός που δεν λαμβάνεται υπόψη στις διαθέσιμες μεθοδολογίες προσαρμογής των συντελεστών αναπήδησης (Ενότητα 3.3.4). Πιο συγκεκριμένα, η αύξηση της μάζας του τεμάχους προκαλεί μείωση του κινηματικού, ή ισοδύναμα του καθέτου, συντελεστή αναπήδησης. Στο σχήμα 5.23 παρουσιάζεται η μέση τιμή του συντελεστή αναπήδησης από κάθε σειρά δοκιμών καθώς και οι βέλτιστες προσαρμογές για κάθε μάζα τεμάχους.

Η συσχέτιση έγινε με την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων, όπου τις ανεξάρτητες μεταβλητές αποτελούν η ταχύτητα πρόσκρουσης και η μάζα του τεμάχους και την εξαρτημένη ο κινηματικός συντελεστής αναπήδησης. Η μορφή της σχέσης είναι:

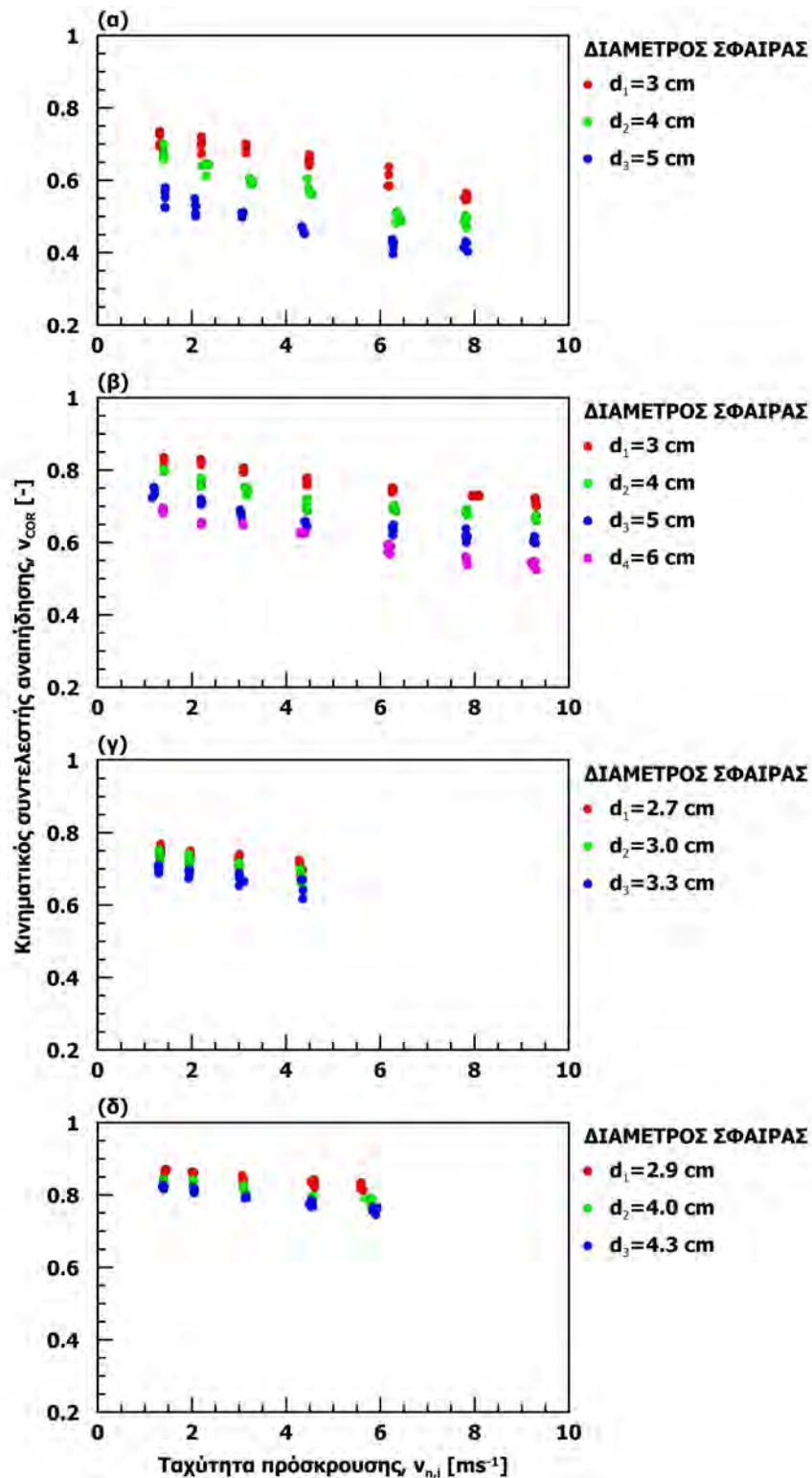
$$v_{COR} = a + bv_i + cm \quad (5.3)$$

όπου:

m η μάζα του τεμάχους [g]

v_i η ταχύτητα πρόσκρουσης [ms^{-1}]

a, b, c παράμετροι συσχέτισης



Σχήμα 5.22: Κινηματικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της ταχύτητας πρόσκρουσης για σφαιρικά δοκίμια από: (α) τσιμεντοειδές ένεμα, (β) εποξειδική ρητίνη, (γ) μάρμαρο και (δ) χαλαζιακό ψαμμίτη

Οι τιμές των παραμέτρων a , b και c της σχέσης 5.3, ο συντελεστής συσχέτισης (R^2) και η σκληρότητα κατά την σφύρα Schmidt (R), παρουσιάζονται στον πίνακα 5.12.

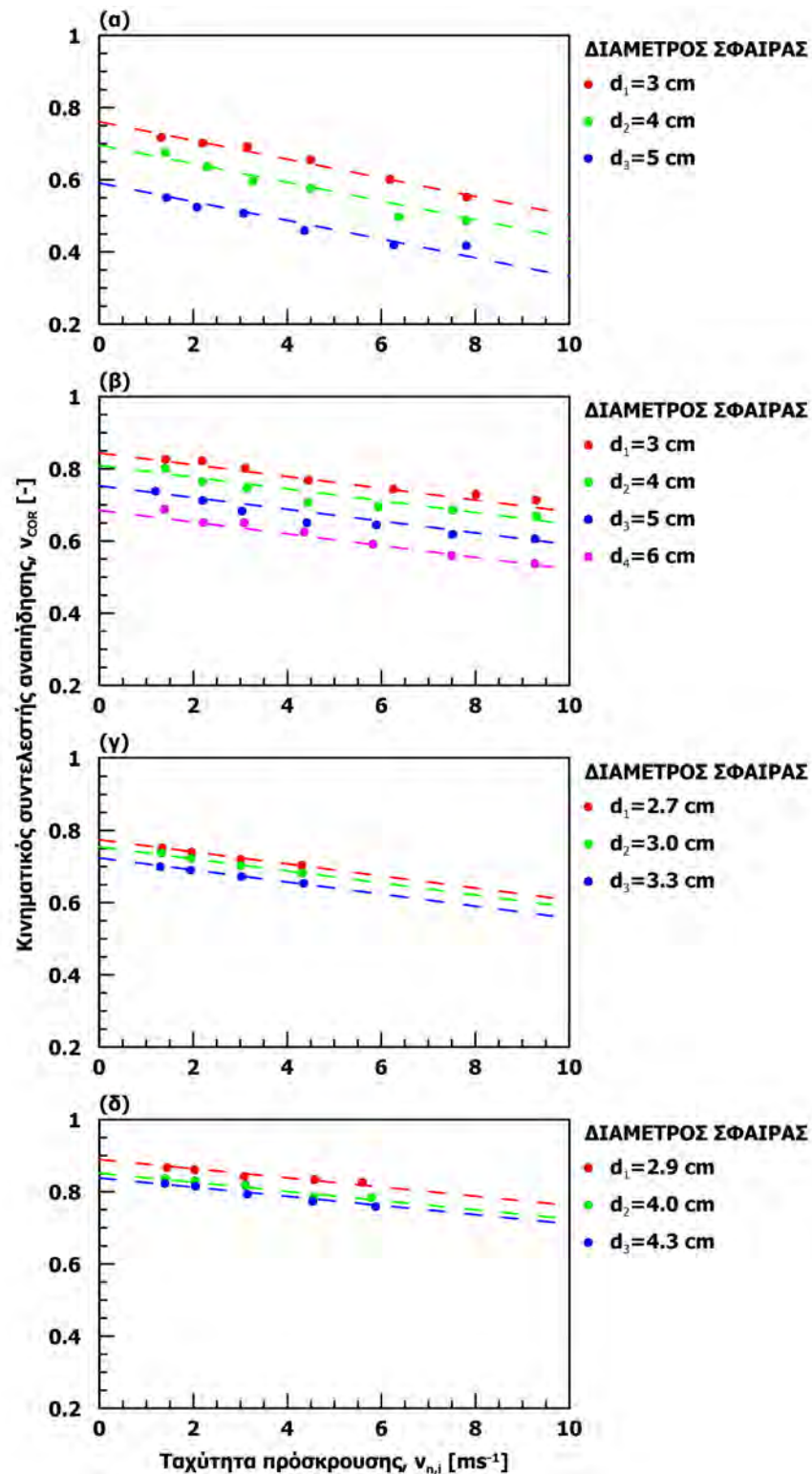
Πίνακας 5.12: Παράμετροι και συντελεστές της συσχέτισης μάζας - ταχύτητας

Τύπος υλικού	$R[-]$	a	b	c	R^2
Τσιμεντοειδές ένεμα	33.4	0.806	-0.026	-0.0016	0.96
Μάρμαρο	38.2	0.822	-0.017	-0.0017	0.81
Εποξειδική ρητίνη	42.3	0.867	-0.016	-0.0008	0.96
Χαλαζιακός Ψαμμίτης	44.7	0.913	-0.013	-0.0007	0.93

Οι ανωτέρω συσχετίσεις είναι στατιστικά σημαντικές, καθώς ο συντελεστής συσχέτισης R^2 είναι υψηλός για όλα τα υλικά. Συνεπώς, περιγράφει ικανοποιητικά το φαινόμενο στην κλίμακα που εξετάστηκε. Όμως η γενίκευση της σχέσης 5.3 σε καταπτώσεις φυσικής κλίμακας είναι προβληματική. Χρησιμοποιώντας μεγαλύτερες τιμές για την μάζα και την ταχύτητα πρόσκρουσης, αλλά μικρές συγκριτικά με τις αναμενόμενες σε πραγματικά περιστατικά καταπτώσεων, η σχέση αποδίδει αρνητικές τιμές που είναι μη αποδεκτές από την θεωρία και αντίθετες από τις παρατηρήσεις πραγματικών συμβάντων.

Συνεπώς, η σχέση 5.3 έχει αξία να ερμηνευτεί ποιοτικά. Αρχικά παρατηρείται ότι ο σταθερός όρος, a , είναι ανάλογος της σκληρότητας κατά την σφύρα Schmidt. Όσο σκληρότερο το υλικό τόσο μεγαλύτερη η αναπήδηση, γεγονός που είναι σε πλήρη συμφωνία με τα συμπεράσματα της διερεύνησης των ιδιοτήτων των υλικών στους συντελεστές αναπήδησης (Ενότητα 5.1.1). Επίσης, παρατηρείται ότι οι συντελεστές που εφαρμόζονται στην ταχύτητα πρόσκρουσης και στην μάζα (b και c αντίστοιχα) έχουν αρνητικό πρόσημο. Τούτο σημαίνει ότι η αύξηση τους προκαλεί μείωση του συντελεστή αναπήδησης. Επίσης, δεδομένου ότι οι τιμές που λαμβάνουν οι συντελεστές αυτοί, είναι αντιστρόφως ανάλογες της σκληρότητας του υλικού, συμπεραίνεται ότι ο ρυθμός μεταβολής του κινηματικού συντελεστή αναπήδησης μειώνεται με την αύξηση της σκληρότητας του υλικού.

Βάσει των ανωτέρω, καθίσταται προφανές ότι ο συντελεστής αναπήδησης επηρεάζεται σημαντικά από την ταχύτητα και την μάζα του τεμάχους. Έτσι, οι μεθοδολογίες προσαρμογής που βασίζονται αποκλειστικά στην ταχύτητα πρόσκρουσης του τεμάχους είναι ελλιπείς και δεν επαρκούν για την περιγραφή του μηχανισμού απώλειας της κίνησης. Στην επόμενη ενότητα εξετάζεται η επίδραση της ταχύτητας πρόσκρουσης και της μάζας του τεμάχους με δοκιμές παραβολικής ρίψης. Στο κεφάλαιο 9 παρουσιάζεται η συσχέτιση των ανωτέρω δεδομένων βάσει της ορμής του τεμάχους κατά την κρούση, συνδυάζοντας έτσι τις δυο παραμέτρους που φαίνεται ότι ελέγχουν την προσαρμογή του συντελεστή αναπήδησης στην σφοδρότητα της κρούσης.



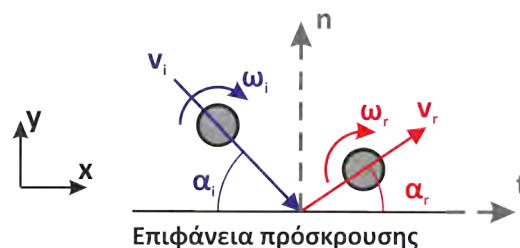
Σχήμα 5.23: Μέσες τιμές κινηματικού συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της ταχύτητας πρόσκρουσης για σφαιρικά δοκίμια από: (α) τσιμεντοειδές ένεμα, (β) εποξειδική ρητίνη, (γ) μάρμαρο και (δ) χαλαζιακό ψαμμίτη. Με διακεκομμένες γραμμές προβάλλεται η εκτίμηση των τιμών βάσει της σχέσης 5.3

5.2.2 Διερεύνηση με δοκιμές παραβολικής ρίψης

Στις δοκιμές παραβολικής ρίψης χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια υλικά με αυτά στις δοκιμές ελεύθερης πτώσης, εκτός από την εποξειδική ρητίνη. Σε κάθε σειρά δοκιμών μεταβαλλόταν το μήκος και η κλίση του σωλήνα απελευθέρωσης της διάταξης ρίψης (4.1.3.2), ώστε να διαφοροποιούνται οι συνθήκες πρόσκρουσης. Πιο συγκεκριμένα, το μέτρο της ταχύτητας πρόσκρουσης κυμάνθηκε από 1.9 έως 6.6ms^{-1} και η γωνία πρόσκρουσης από 20 έως 65° . Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν σφαίρες διαφορετικής διαμέτρου, όπως και στις δοκιμές ελεύθερης πτώσης, ώστε να μπορεί να μελετηθεί συγχρόνως και η επίδραση της μάζας.

Από τα τρία υλικά που χρησιμοποιήθηκαν, διαμορφώθηκαν 8 συνολικά σφαίρες και πραγματοποιήθηκαν 15 σειρές δοκιμών για κάθε σφαίρα με πέντε επαναλήψεις σε κάθε σειρά. Έτσι, η παρούσα διερεύνηση αποτελείται συνολικά από 600 δοκιμές. Επιπρόσθετα, σε 60 σειρές δοκιμών, με τεμάχια μαρμάρου και χαλαζιακού ψαμμίτη, προσδιορίστηκε και η γωνιακή ταχύτητα χρησιμοποιώντας την μεθοδολογία καταγραφής που περιγράφεται στην ενότητα 4.4.1.2.1.

Στο σχήμα 5.24 παρουσιάζονται τα μετρούμενα μεγέθη σε κάθε δοκιμή. Ο μέσος όρος των ταχυτήτων και γωνιών πρόσκρουσης και αναπήδησης καθώς και των συντελεστών αναπήδησης παρατίθενται συνοπτικά στους ακόλουθους πίνακες. Τα αποτελέσματα των δοκιμών που έγιναν με δοκίμια από τσιμεντοειδές ένεμα παρατίθενται συγκεντρωτικά στον πίνακα 5.13 και αναλυτικότερα στο παράρτημα 11. Ακολουθούν τα αποτελέσματα του μαρμάρου και του ψαμμίτη, στις δοκιμές όπου δεν μετρήθηκε η γωνιακή ταχύτητα (Πίνακας 5.14 και 5.15 αντίστοιχα), τα οποία βρίσκονται αναλυτικότερα στα παραρτήματα 12 και 13. Στους πίνακες 5.16 και 5.17 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών με τα δυο φυσικά υλικά, στις οποίες μετρήθηκε και η περιστροφική ταχύτητα (Παράρτημα 14 και 15, για το μάρμαρο και τον ψαμμίτη αντίστοιχα).



Σχήμα 5.24: Σχηματική απεικόνιση δοκιμής παραβολικής ρίψης σφαιρικών τεμαχών – μετρούμενα μεγέθη

Επισημαίνεται ότι στις δοκιμές παραβολικής ρίψης ο κινηματικός συντελεστής αναπήδησης δεν ταυτίζεται με τον κάθετο και ο επαπτομενικός συντελεστής ορίζεται κανονικά, σε αντίθεση με τις δοκιμές ελεύθερης πτώσης.

Πίνακας 5.13: Δοκιμές παραβολικής ρίψης σφαιρικών τεμαχών από τσιμεντοειδές ένεμα

Σειρά δοκιμών	Αριθμός επαν.	Διάμετρος d[cm]	Πρόσκρουση		Αναπήδηση		Συντ. αναπήδησης		
			$v_i[ms^{-1}]$	$\alpha_i[^\circ]$	$v_r[ms^{-1}]$	$\alpha_r[^\circ]$	$n_{COR}[-]$	$t_{COR}[-]$	$v_{COR}[-]$
11.1	5	3	2.95	55.7	2.19	40.4	0.58	1.01	0.74
11.2	5		3.57	50.6	2.71	34.2	0.55	0.99	0.76
11.3	5		3.71	47.4	3.23	37.2	0.71	1.02	0.87
11.4	5		2.61	41.7	2.24	31.3	0.67	0.98	0.86
11.5	5		2.10	26.3	1.97	19.7	0.71	0.98	0.94
11.6	5		3.86	32.2	3.63	23.8	0.71	1.02	0.94
11.7	5		4.65	32.7	4.39	23.1	0.69	1.04	0.95
11.8	5		5.13	30.5	4.94	21.4	0.70	1.04	0.96
11.9	5		4.55	44.7	4.10	32.0	0.68	1.08	0.90
11.10	5		5.24	42.6	4.75	29.9	0.67	1.07	0.91
11.11	5		6.04	41.9	5.35	28.7	0.64	1.05	0.89
11.12	5		4.96	47.8	4.29	32.1	0.62	1.09	0.87
11.13	5		5.96	47.6	4.94	31.3	0.59	1.05	0.83
11.14	5		6.63	47.9	5.43	30.4	0.56	1.05	0.82
11.15	5		4.67	65.3	3.58	50.5	0.65	1.17	0.77
11.16	5	4	3.02	55.3	2.16	37.7	0.53	0.99	0.72
11.17	5		3.46	50.8	2.59	31.2	0.50	1.01	0.75
11.18	5		3.40	46.6	2.91	30.8	0.61	1.07	0.86
11.19	5		2.62	41.1	2.21	29.2	0.63	0.98	0.84
11.20	5		2.18	28.1	2.13	17.9	0.64	1.06	0.98
11.21	5		3.79	33.7	3.46	20.8	0.58	1.03	0.91
11.22	5		4.48	32.8	4.12	21.2	0.61	1.02	0.92
11.23	5		5.12	32.4	4.70	18.7	0.55	1.03	0.92
11.24	5		4.42	44.4	3.88	25.0	0.53	1.12	0.88
11.25	5		5.16	43.0	4.50	26.0	0.56	1.07	0.87
11.26	5		5.78	41.5	5.25	25.2	0.58	1.10	0.91
11.27	5		5.11	47.0	3.87	30.5	0.53	0.96	0.76
11.28	5		5.51	50.1	4.57	26.1	0.48	1.16	0.83
11.29	5		6.36	45.7	5.19	27.9	0.53	1.03	0.82
11.30	5		4.76	67.3	3.00	45.1	0.48	1.16	0.63

Πίνακας 5.14: Δοκιμές παραβολικής ρίψης σφαιρικών τεμαχών μαρμάρου

Σειρά δοκιμών	Αριθμός επαν.	Διάμετρος d[cm]	Πρόσκρουση		Αναπήδηση		Συντ. αναπήδησης		
			$v_i[ms^{-1}]$	$\alpha_i[^\circ]$	$v_r[ms^{-1}]$	$\alpha_r[^\circ]$	$n_{COR}[-]$	$t_{COR}[-]$	$v_{COR}[-]$
12.1	5	2.7	2.67	54.5	2.23	43.9	0.71	1.04	0.84
12.2	5		3.15	48.7	2.81	40.5	0.77	1.03	0.89
12.3	5		3.27	45.0	3.00	33.8	0.72	1.08	0.92
12.4	5		2.37	37.3	2.18	30.8	0.78	0.99	0.92
12.5	5		1.92	21.5	1.83	17.3	0.78	0.98	0.95
12.6	5	3	2.69	54.8	2.24	44.4	0.71	1.03	0.83
12.7	5		3.11	50.0	2.70	39.3	0.72	1.04	0.87
12.8	5		3.27	44.0	3.02	32.9	0.72	1.08	0.92
12.9	5		2.36	36.3	2.17	28.0	0.73	1.01	0.92
12.10	5		1.90	19.5	1.86	15.9	0.80	1.00	0.98
12.11	5	3.3	2.72	54.7	2.20	44.5	0.69	1.00	0.81
12.12	5		3.15	50.0	2.69	38.0	0.68	1.04	0.85
12.13	5		3.27	44.3	3.01	31.4	0.69	1.10	0.92
12.14	5		2.38	36.7	2.19	27.8	0.72	1.01	0.92
12.15	5		1.95	20.3	1.87	16.6	0.80	0.98	0.96

Πίνακας 5.15: Δοκιμές παραβολικής ρίψης σφαιρικών τεμαχών ψαμμίτη

Σειρά δοκιμών	Αριθμός επαν.	Διάμετρος d[cm]	Πρόσκρουση		Αναπήδηση		Συντ. αναπήδησης		
			$v_i[ms^{-1}]$	$\alpha_i[^\circ]$	$v_r[ms^{-1}]$	$\alpha_r[^\circ]$	$n_{COR}[-]$	$t_{COR}[-]$	$v_{COR}[-]$
13.1	5	2.9	2.65	51.3	2.41	45.2	0.83	1.03	0.91
13.2	5		3.08	46.8	2.79	43.9	0.86	0.95	0.90
13.3	5		3.86	48.2	3.45	41.0	0.79	1.01	0.89
13.4	5		2.42	36.5	2.30	33.8	0.89	0.98	0.95
13.5	5		1.91	18.2	1.92	15.7	0.87	1.02	1.01
13.6	5	4	2.67	50.8	2.41	43.5	0.80	1.05	0.90
13.7	5		3.35	47.7	2.93	38.7	0.74	1.02	0.88
13.8	5		3.49	45.1	3.25	36.0	0.77	1.07	0.93
13.9	5		2.46	36.5	2.28	31.5	0.82	0.98	0.93
13.10	5		1.92	19.4	1.92	16.0	0.83	1.02	1.00
13.11	5	4.3	2.79	50.3	2.34	40.6	0.71	1.00	0.84
13.12	5		3.28	44.9	2.93	35.0	0.73	1.04	0.90
13.13	5		3.73	44.9	3.39	36.1	0.76	1.04	0.91
13.14	5		2.48	36.4	2.31	30.9	0.80	0.99	0.93
13.15	5		1.98	20.1	1.94	17.6	0.86	0.99	0.98

Πίνακας 5.16: Δοκιμές παραβολικής ρίψης σφαιρικών τεμαχών μαρμάρου, με μέτρηση της γωνιακής ταχύτητας

Σειρά δοκ.	Αρ. επαν.	Διάμ. d [cm]	Πρόσκρουση			Αναπήδηση			Συντ. αναπήδησης		
			v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	η_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
14.1	5	2.7	4.16	65.0	169.3	3.32	50.5	139.9	0.68	1.20	0.80
14.2	5		3.48	31.8	246.0	3.31	23.2	229.5	0.71	1.03	0.95
14.3	5		4.23	31.3	309.8	4.03	21.6	290.7	0.68	1.04	0.95
14.4	5		4.86	29.8	347.0	4.70	20.8	317.8	0.69	1.04	0.97
14.5	5		4.25	41.1	269.9	3.90	30.3	214.7	0.70	1.05	0.92
14.6	5		5.00	40.0	343.6	4.70	29.4	284.3	0.72	1.07	0.94
14.7	5		5.63	40.4	430.0	5.34	27.6	332.5	0.68	1.10	0.95
14.8	5		4.38	47.7	296.4	4.09	34.6	238.1	0.72	1.14	0.93
14.9	5		5.12	46.2	387.3	4.85	32.1	286.8	0.70	1.16	0.95
14.10	5		5.89	45.2	424.9	5.64	32.7	314.3	0.73	1.14	0.96
14.11	5	3	4.19	65.4	169.3	3.26	49.9	139.9	0.65	1.20	0.78
14.12	5		3.48	31.2	246.0	3.32	20.9	229.5	0.66	1.04	0.96
14.13	5		4.30	30.7	309.8	4.11	21.6	290.7	0.69	1.03	0.95
14.14	5		4.80	29.8	347.0	4.68	20.2	317.8	0.68	1.05	0.97
14.15	5		4.23	41.2	269.9	3.89	28.4	214.7	0.66	1.07	0.92
14.16	5		4.94	40.8	342.8	4.72	28.5	278.9	0.70	1.11	0.95
14.17	5		5.69	42.2	364.7	5.28	28.0	298.7	0.65	1.10	0.93
14.18	5		4.40	47.4	274.9	4.05	32.8	201.4	0.68	1.14	0.92
14.19	5		5.13	46.7	333.3	4.76	32.0	246.2	0.68	1.15	0.93
14.20	5		5.92	45.6	380.2	5.37	30.5	286.6	0.65	1.12	0.91
14.21	5	3.3	4.19	65.3	150.5	3.12	48.1	110.0	0.61	1.19	0.74
14.22	5		3.49	32.2	215.8	3.32	21.9	172.5	0.67	1.04	0.95
14.23	5		4.33	31.1	241.5	4.11	21.9	218.7	0.68	1.03	0.95
14.24	5		4.85	32.2	299.9	4.68	22.3	254.8	0.69	1.06	0.97
14.25	5		4.18	40.2	222.7	3.88	27.9	181.7	0.67	1.07	0.93
14.26	5		5.08	39.8	272.8	4.70	27.1	236.2	0.66	1.07	0.93
14.27	5		5.67	41.5	326.4	5.27	26.8	254.0	0.63	1.11	0.93
14.28	5		4.41	47.2	235.2	4.02	32.5	186.1	0.67	1.13	0.91
14.29	5		5.18	45.8	293.8	4.75	31.1	207.5	0.66	1.13	0.92
14.30	5		5.92	45.4	342.9	5.37	30.8	250.8	0.65	1.11	0.91

Πίνακας 5.17: Δοκιμές παραβολικής ρίψης σφαιρικών τεμαχών ψαμμίτη, με μέτρηση της γωνιακής ταχύτητας

Σειρά δοκ.	Αρ. επαν.	Διάμ. d [cm]	Πρόσκρουση			Αναπήδηση			Συντ. αναπήδησης		
			v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	η_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
15.1	5	2.9	4.45	65.7	180.3	4.02	56.8	138.0	0.83	1.20	0.90
15.2	5		3.67	31.2	240.1	3.60	26.6	216.5	0.85	1.02	0.98
15.3	5		4.53	30.8	290.6	4.50	25.2	273.0	0.82	1.04	0.99
15.4	5		5.07	30.9	336.5	5.09	24.9	295.1	0.82	1.06	1.00
15.5	5		4.42	42.1	261.8	4.28	33.2	227.4	0.79	1.09	0.97
15.6	5		5.14	40.4	343.0	5.08	32.2	275.4	0.81	1.10	0.99
15.7	5		5.82	40.0	366.5	5.69	32.6	311.2	0.82	1.08	0.98
15.8	5		4.57	48.1	279.8	4.46	40.4	223.0	0.85	1.11	0.98
15.9	5		5.32	46.2	356.9	5.09	37.5	264.1	0.81	1.10	0.96
15.10	5		6.02	45.7	394.1	5.67	37.8	292.0	0.81	1.07	0.94
15.11	5	4	4.51	65.6	148.1	3.88	55.6	106.4	0.78	1.18	0.86
15.12	5		3.69	31.8	162.2	3.56	26.1	153.4	0.80	1.02	0.96
15.13	5		4.50	30.6	206.3	4.39	24.7	183.9	0.80	1.03	0.98
15.14	5		5.25	32.9	242.3	5.12	24.7	214.8	0.75	1.06	0.98
15.15	5		4.36	40.6	192.9	4.22	30.5	166.6	0.75	1.10	0.97
15.16	5		5.19	40.4	217.5	4.99	31.0	194.6	0.77	1.08	0.96
15.17	5		5.83	39.8	290.4	5.66	30.8	217.0	0.78	1.09	0.97
15.18	5		4.57	47.4	215.2	4.45	38.2	163.0	0.82	1.13	0.97
15.19	5		5.38	46.3	263.7	5.04	36.0	200.2	0.76	1.10	0.94
15.20	5		6.07	44.1	297.6	5.77	34.0	210.4	0.76	1.10	0.95
15.21	5	4.3	4.56	64.8	134.1	3.83	54.1	96.2	0.75	1.15	0.84
15.22	5		3.76	32.8	154.4	3.58	27.1	142.3	0.80	1.01	0.95
15.23	5		4.45	30.9	196.7	4.38	24.6	176.5	0.80	1.04	0.98
15.24	5		5.11	30.3	214.3	5.02	23.3	207.0	0.77	1.05	0.98
15.25	5		4.39	41.3	183.1	4.25	31.0	158.3	0.75	1.11	0.97
15.26	5		5.08	40.5	211.0	4.93	33.0	178.8	0.81	1.07	0.97
15.27	5		5.77	39.6	243.0	5.59	30.6	206.2	0.77	1.08	0.97
15.28	5		4.64	46.2	212.4	4.26	36.0	147.4	0.75	1.07	0.92
15.29	5		5.34	46.5	236.9	5.05	36.4	178.0	0.77	1.11	0.95
15.30	5		6.06	45.1	273.7	5.77	34.1	206.3	0.75	1.12	0.95

Τα ανωτέρω δεδομένα χαρακτηρίζονται από μικρότερη επαναληψιμότητα σε σχέση με αυτά από τις δοκιμές ελεύθερης πτώσης, καθώς οι αρχικές συνθήκες πρόσκρουσης εξαρτώνται από την κίνηση του τεμάχου μέσα στον σωλήνα απελευθέρωσης, η οποία δεν είναι πανομοιότυπη μεταξύ των επαναλήψεων. Συνεπώς, τόσο η ταχύτητα όσο και η γωνία πρόσκρουσης καταλαμβάνουν μεγαλύτερο εύρος σε κάθε σειρά δοκιμών.

Από τις δοκιμές ελεύθερης πτώσης, που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα, προέκυψε ότι ο κάθετος (ή ο κινηματικός) συντελεστής αναπήδησης εξαρτάται από την σφοδρότητα της κρούσης, η οποία εκφράζεται μέσω της ταχύτητας πρόσκρουσης και της μάζας του τεμάχου. Ωστόσο, στις δοκιμές ελεύθερης πτώσης το μέτρο της ταχύτητας ταυτίζεται με την κάθετη συνιστώσα της, συνεπώς δεν διαφοροποιούνται οι δυο συντελεστές με αποτέλεσμα να μην γίνεται εμφανής ο μηχανισμός που συμβάλλει στον περιορισμό της κίνησης. Παρακάτω σχολιάζονται οι συντελεστές αναπήδησης συναρτήσεως διαφόρων χαρακτηριστικών των δοκιμών, όπως της ταχύτητας και της μάζας πρόσκρουσης, των γωνιών πρόσκρουσης και αναπήδησης καθώς και της γωνιακής ταχύτητας, με σκοπό τον εντοπισμό αυτών που επηρεάζουν την απόκριση του τεμάχου.

5.2.2.1 Σχολιασμός δοκιμών παραβολικής ρίψης με σφαιρικά τεμάχια

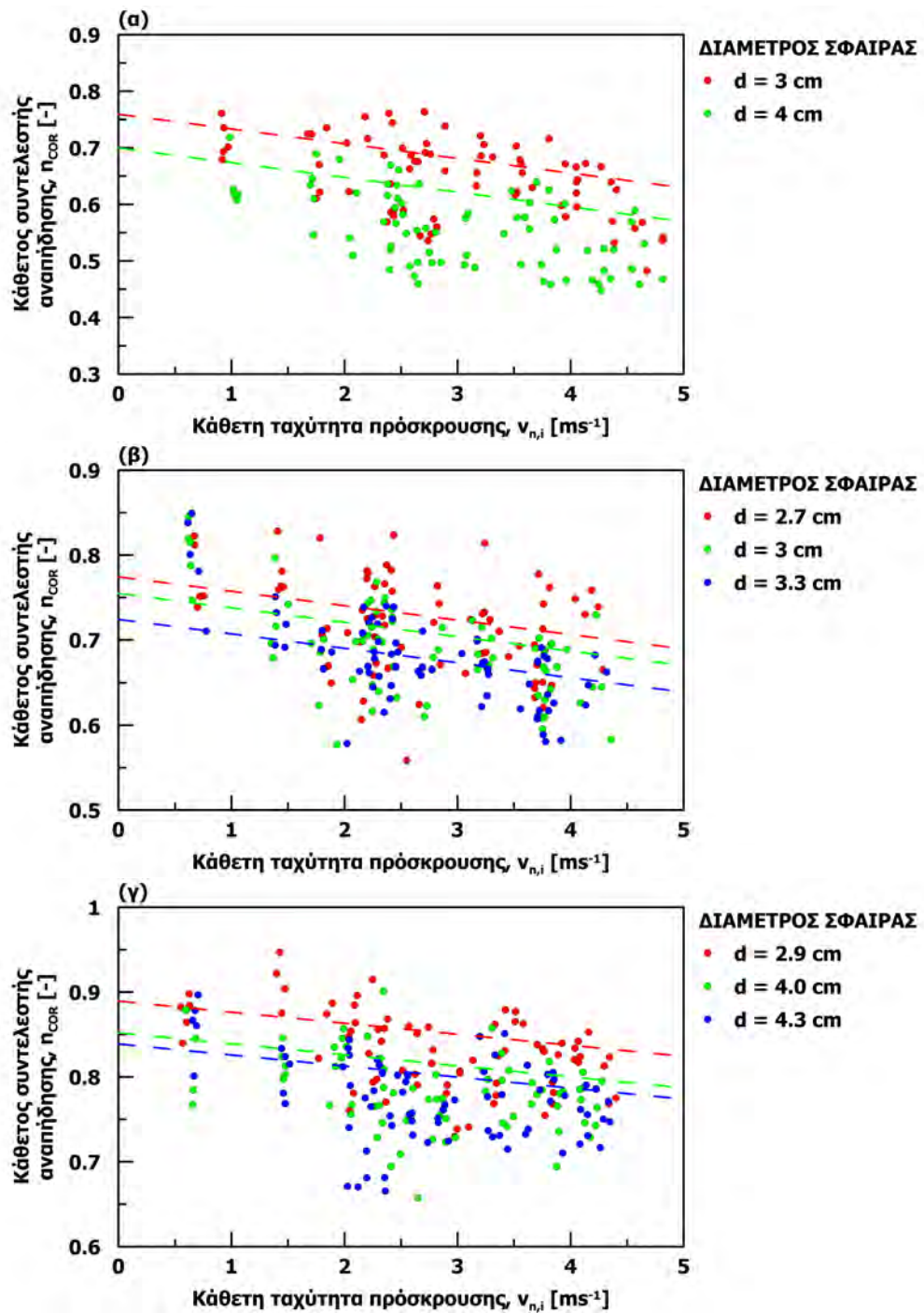
5.2.2.1.1 Κάθετος συντελεστής αναπήδησης

Ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης παρουσιάζεται στο σχήμα 5.25 συναρτήσεως της κάθετης συνιστώσας της ταχύτητας και γίνεται διάκριση των σημείων ανάλογα με την διάμετρο (μάζα) του τεμάχου. Προκύπτει ανάλογη συμπεριφορά με τις δοκιμές ελεύθερης πτώσης, δηλαδή η αύξηση της ταχύτητας πρόσκρουσης ή της μάζας του τεμάχου προκαλούν τον περιορισμό του ύψους αναπήδησης. Επιπρόσθετα, στα εν λόγω διαγράμματα αποτυπώνεται και η εκτίμηση του συντελεστή αναπήδησης βάσει της σχέσης 5.3, η οποία περιγράφει ικανοποιητικώς την αναπήδηση και στις δοκιμές παραβολικής ρίψης.

Χρησιμοποιώντας την ίδια μεθοδολογία για την κατάρτιση της σχέσης 5.3, οι συντελεστές συσχέτισης του καθέτου συντελεστή με την ταχύτητα πρόσκρουσης και την μάζα τους τεμάχου παρουσιάζονται στον πίνακα 5.18.

Πίνακας 5.18: Παράμετροι και συντελεστές της συσχέτισης μάζας - ταχύτητας από τις δοκιμές παραβολικής ρίψης

Τύπος υλικού	R[-]	a	b	c	R ²
Τσιμεντοείδες ένεμα	33.4	0.817	-0.033	-0.0025	0.50
Μάρμαρο	38.2	0.832	-0.03	-0.0013	0.33
Χαλαζιακός Ψαμμίτης	44.7	0.907	-0.018	-0.0008	0.34



Σχήμα 5.25: Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της ορθής συνιστώσας της ταχύτητας πρόσκρουσης για σφαιρικά δοκίμια από: (α) τσιμεντοειδές ένεμα, (β) μάρμαρο και (γ) χαλαζιακό ψαμμίτη

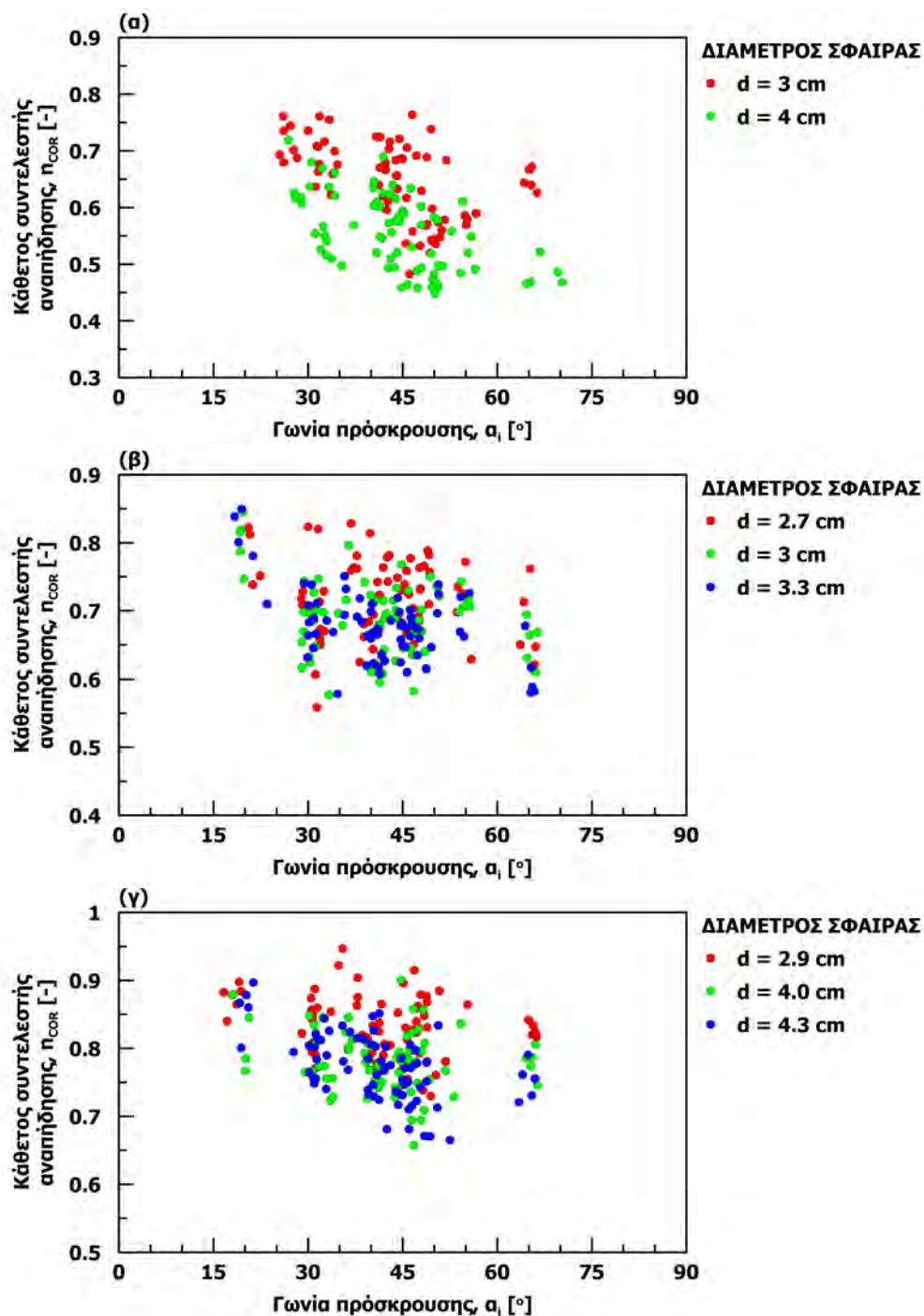
Αρχικώς, παρατηρείται ότι οι συντελεστές συσχέτισης ομοιάζουν μεταξύ των δυο διερευνήσεων, όπως είναι λογικό, αφού από τα παραπάνω σχήματα φαίνεται ότι η σχέση 5.3 περιγράφει ικανοποιητικά την απόκριση των τεμαχών. Δεδομένου όμως ότι η προέκταση των παραπάνω συσχετίσεων στην κλίμακα των φυσικών φαινομένων καταπτώσεων είναι προβληματική, η ερμηνεία των συντελεστών γίνεται πάλι ποιοτικά. Ο συντελεστής συσχέτισης R^2 προκύπτει σημαντικά χαμηλότερος από αυτόν στις δοκιμές ελεύθερης πτώσης, γεγονός που συνδέεται με την περιορισμένη επαναληψιμότητα των δοκιμών παραβολικής ρίψης αλλά και με τις πρόσθετες παραμέτρους που υπεισέρχονται, όπως είναι η γωνία πρόσκρουσης και η περιστροφική ταχύτητα. Ως συνέπεια, οι παραγόμενες συσχετίσεις υστερούν σε στατιστική σημαντικότητα, αλλά η ποιοτική τους ερμηνεία παραμένει ορθή. Πιο συγκεκριμένα, οι συντελεστές b και c που εφαρμόζονται στην ταχύτητα πρόσκρουσης και στην μάζα του τεμάχους είναι αρνητικοί. Συνεπώς η αύξησή τους οδηγεί στην μείωση του καθέτου συντελεστή αναπήδησης και ο σταθερός όρος είναι ανάλογος της σκληρότητας του υλικού, που συνεπάγεται ότι η αύξηση της σκληρότητας (κατά την σφύρα Schmidt) έχει σαν αποτέλεσμα την μεγαλύτερη αναπήδηση του τεμάχους.

Περαιτέρω, στο σχήμα 5.26 εξετάζεται ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης ως προς την γωνία πρόσκρουσης για τις δοκιμές με τεμάχη από τσιμεντοειδές ένεμα, μάρμαρο και ψαμμίτη αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι μειώνεται όσο η γωνία πρόσκρουσης τείνει προς τις 90° , επαληθεύοντας το συμπέρασμα από τις δοκιμές παραβολικής ρίψης που έγιναν σε τεμάχη με λειασμένες ακμές (ενότητα 5.1.2.1). Επιπρόσθετα, είναι εμφανής η μείωση του καθέτου συντελεστή αναπήδησης με την αύξηση της μάζας του τεμάχους.

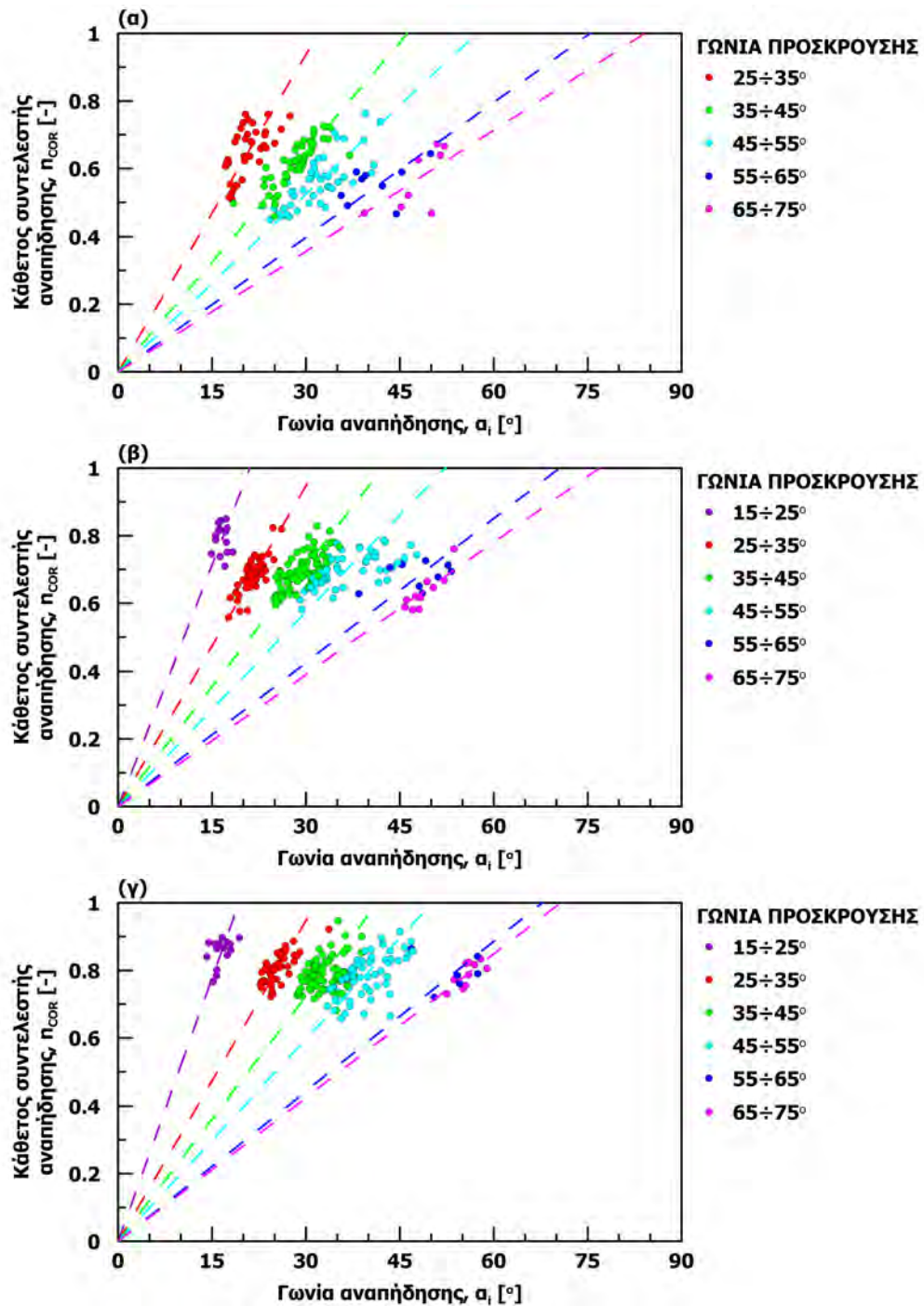
Σημαντικά ισχυρότερη συσχέτιση του καθέτου συντελεστή αναπήδησης προκύπτει συμπεριλαμβάνοντας και την γωνία αναπήδησης. Στο σχήμα 5.27 παρουσιάζεται, για κάθε υλικό, η σχέση του καθέτου συντελεστή με την γωνία αναπήδησης, ομαδοποιώντας τα δεδομένα σύμφωνα με την γωνία πρόσκρουσης σε κλάσεις των 10° .

Σε κάθε κλάση το μέγεθος του καθέτου συντελεστή αναπήδησης συνδέεται μέσω μιας ευθείας που διέρχεται από την αρχή των αξόνων με την γωνία αναπήδησης, η κλίση της οποίας μειώνεται όσο αυξάνει η γωνία πρόσκρουσης. Ακριβώς η ίδια συμπεριφορά προέκυψε και στις δοκιμές που έγιναν με κυβικά τεμάχη με λειασμένες ακμές (βλ. ενότητα 5.1.2.1).

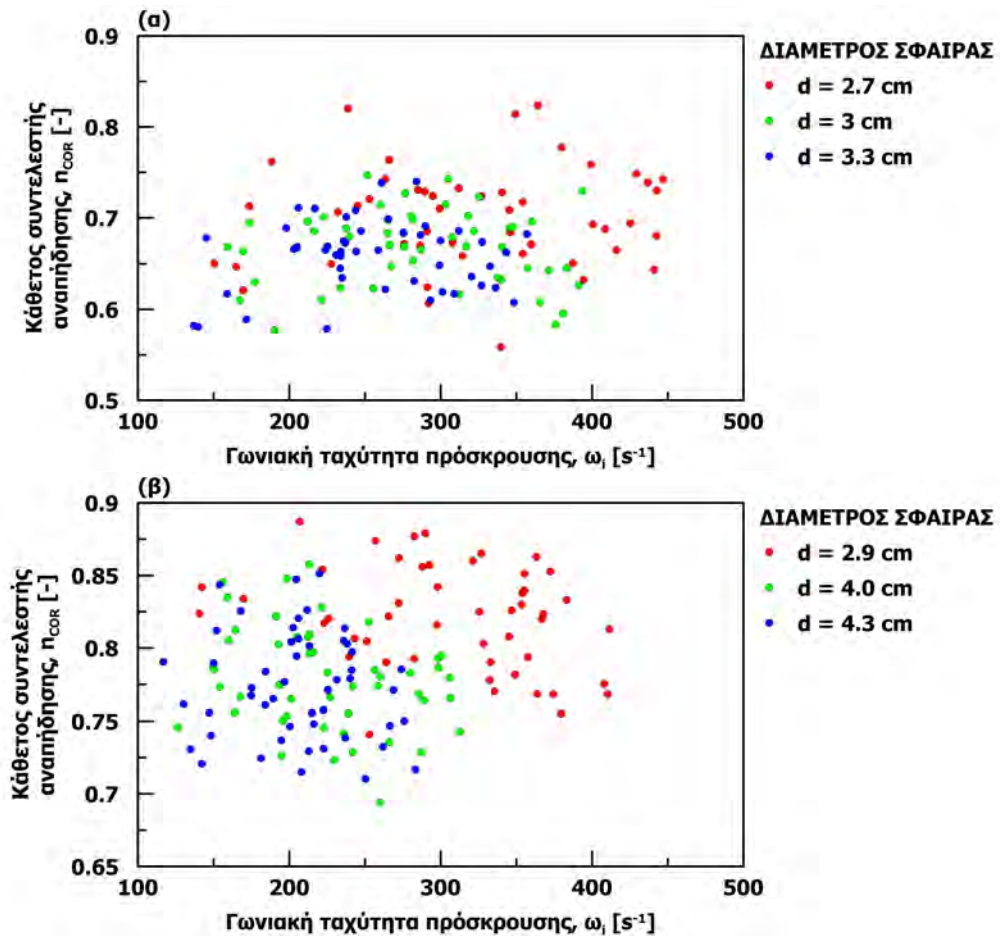
Περαιτέρω, εξετάζοντας τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης ως προς την γωνιακή ταχύτητα πρόσκρουσης (Σχήμα 5.28), στις δοκιμές με τεμάχη μαρμάρου και ψαμμίτη που μετρήθηκε, δεν προκύπτει κάποια επίδραση στην τιμή του καθέτου συντελεστή αναπήδησης με την μεταβολή της.



Σχήμα 5.26: Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης για σφαιρικά δοκίμια από: (α) τιμμεντοειδές ένεμα, (β) μάρμαρο και (γ) χαλαζιακό ψαμμίτη



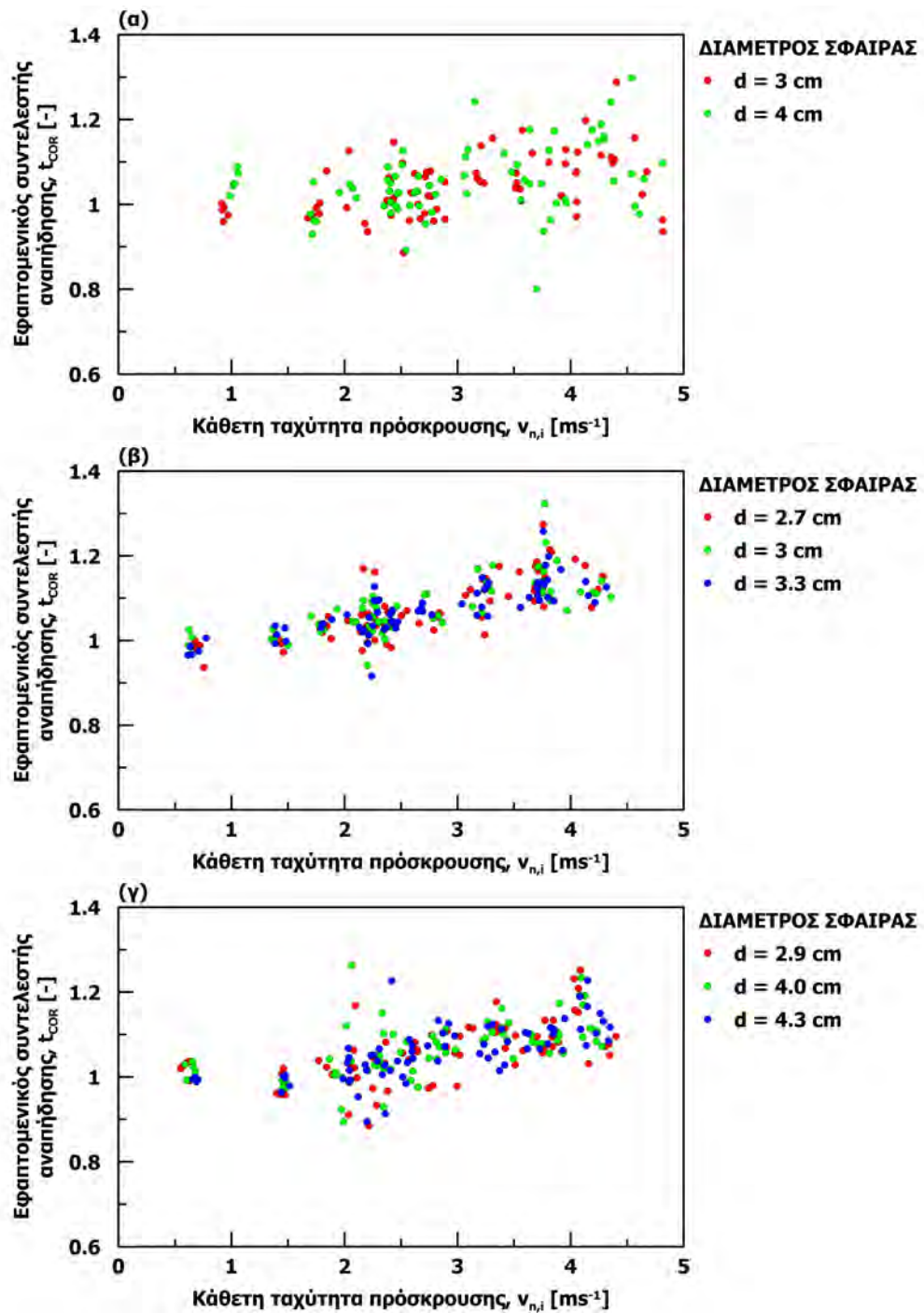
Σχήμα 5.27: Σχέση καθέτου συντελεστή με την γωνία αναπήδησης ως προς την γωνία πρόσκρουσης για σφαιρικά δοκίμια από: (α) τιμμεντοειδές ένεμα, (β) μάρμαρο και (γ) χαλαζιακό ψαμμίτη



Σχήμα 5.28: Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας για σφαιρικά δοκίμια από: (α) μάρμαρο και (β) χαλαζιακό ψαμμίτη

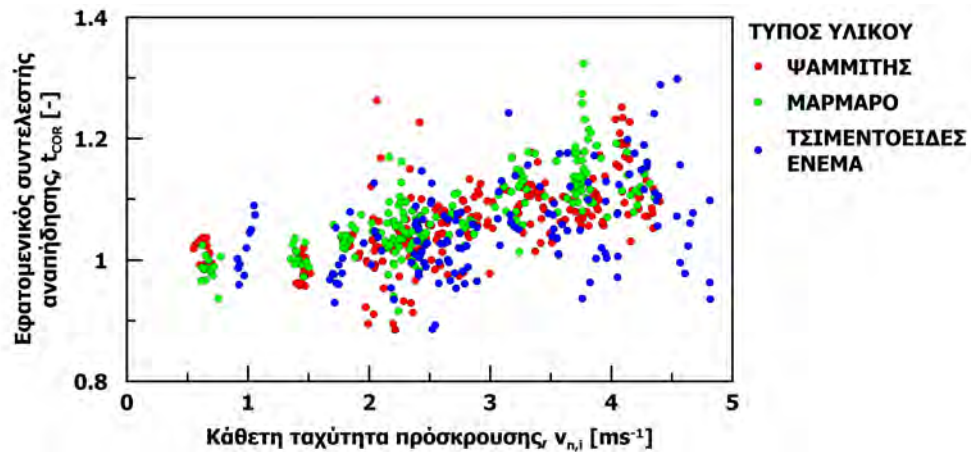
5.2.2.1.2 Εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης

Στο σχήμα 5.29 αναπαρίσταται ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της κάθετης συνιστώσας της ταχύτητας και γίνεται διάκριση των σημείων ανάλογα με την διάμετρο του τεμάχους. Παρατηρείται μια ελαφρώς αυξητική τάση του εφαπτομενικού συντελεστή με την αύξηση της κάθετης συνιστώσας της ταχύτητας πρόσκρουσης, ανεξαρτήτως του είδους του υλικού. Επίσης, προκύπτει ότι ο εφαπτομενικός συντελεστής δεν εξαρτάται από την διάμετρο του τεμάχους, ή ισοδύναμα την μάζα του, καθώς τα σημεία που αντιστοιχούν σε δοκίμια διαφορετικού μεγέθους αλληλοκαλύπτονται και για τα τρία υλικά που διερευνήθηκαν.



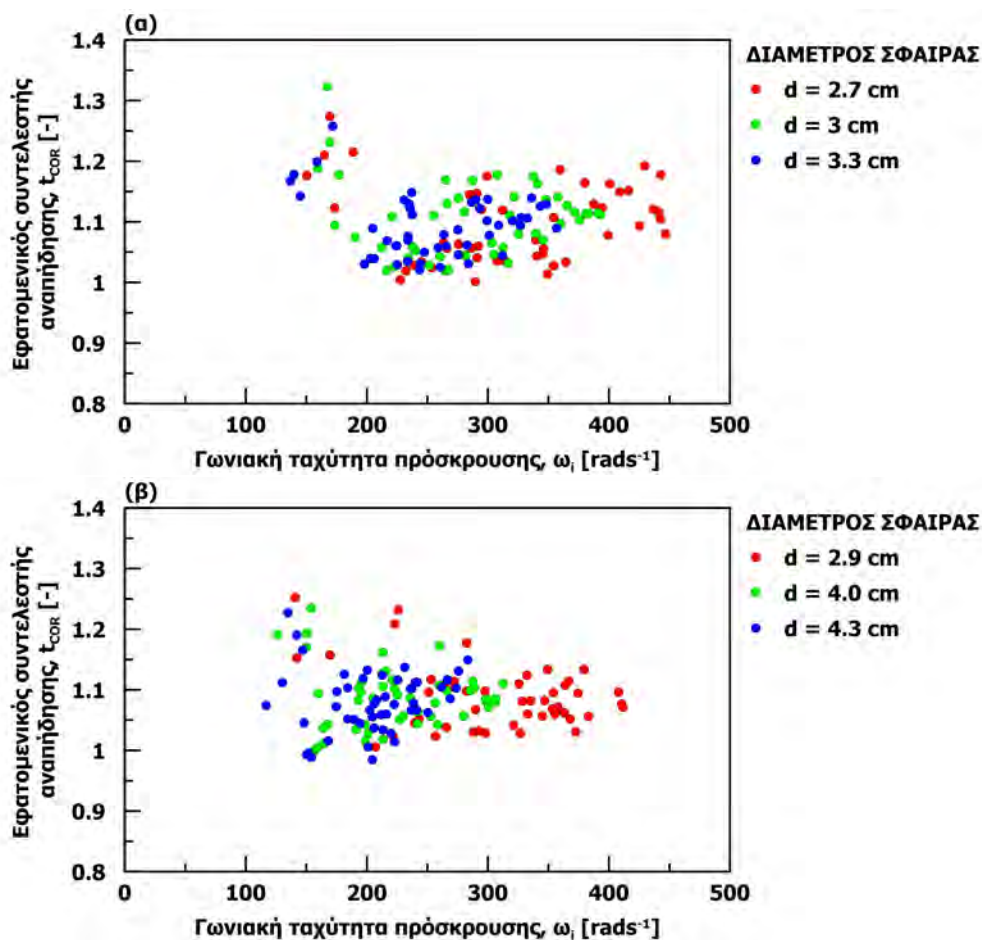
Σχήμα 5.29: Εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της ορθής συνιστώσας της ταχύτητας πρόσκρουσης για σφαιρικά δοκίμια από: (α) τιμμεντοειδές ένεμα, (β) μάρμαρο και (γ) χαλαζιακό ψαμμίτη

Τα ανωτέρω δεδομένα παρατίθενται συγκεντρωτικά στο σχήμα 5.30, ομαδοποιημένα σύμφωνα με το είδος του υλικού. Παρατηρείται ότι ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης λαμβάνει αντίστοιχες τιμές ανεξαρτήτως του είδους του πετρώματος, που κυμαίνονται μεταξύ 0.9 και 1.3. Συνεπώς, τα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του υλικού δεν επιδρούν στον εφαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης.



Σχήμα 5.30: Εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της ορθής συνιστώσας της ταχύτητας πρόσκρουσης για σφαιρικά δοκίμια από διαφορετικό υλικό

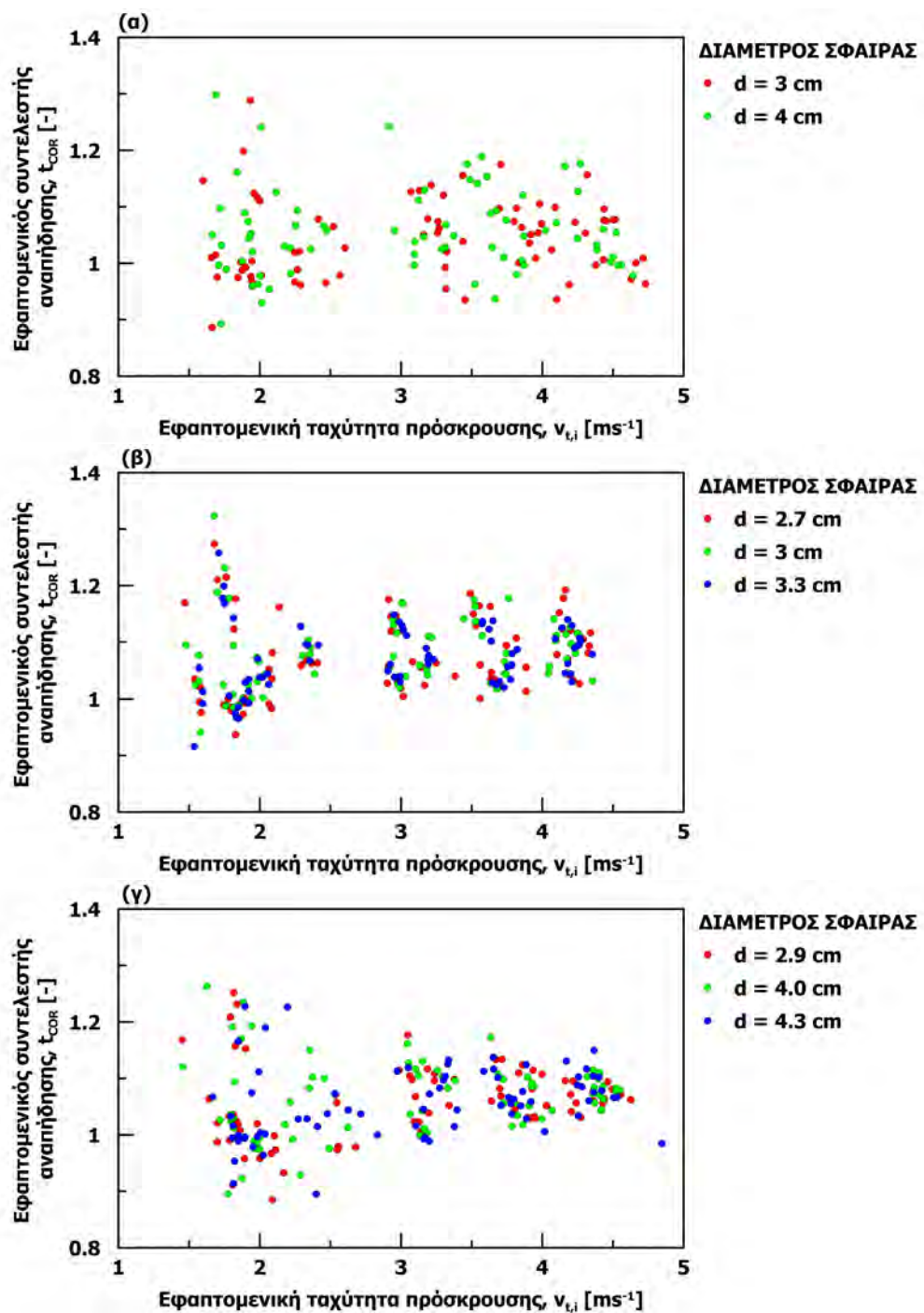
Στο σχήμα 5.31 αναπαρίσταται ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας από τις δοκιμές με τεμάχια μαρμάρου και ψαμμίτη που μετρήθηκε και η περιστροφή του τεμάχους. Δεν προκύπτει εξάρτηση του καθέτου συντελεστή αναπήδησης από την γωνιακή ταχύτητα την στιγμή της πρόσκρουσης, καθώς δεν υφίσταται κάποια διαφοροποίηση του μεγέθους του συντελεστή με την μεταβολή της γωνιακής ταχύτητας.



Σχήμα 5.31: Εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας πρόσκρουσης για σφαιρικά δοκίμια από: (α) μάρμαρο και (β) χαλαζιακό ψαμμίτη

Τέλος, ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της εφαπτομενικής συνιστώσας της ταχύτητας παρουσιάζεται στο σχήμα 5.32 και για τα τρία υλικά. Παρατηρείται πως ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης δεν εξαρτάται από την εφαπτομενική συνιστώσα της ταχύτητας, καθώς λαμβάνει αντίστοιχες τιμές ανεξαρτήτως του μεγέθους αυτής. Επιπλέον, ούτε η διάσταση του τεμάχους φαίνεται να επιδρά, καθώς δεν διακρίνεται διαφοροποίηση του εφαπτομενικού συντελεστή.

Συνοψίζοντας, από την διερεύνηση αυτή δεν προκύπτει κάποια επίδραση των κινηματικών χαρακτηριστικών στον εφαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης. Συνεπώς, κρίσιμη παράμετρος, εφόσον υπάρχει, οφείλει να είναι η τραχύτητα της επιφάνειας πρόσκρουσης σε συνδυασμό με σχήμα του τεμάχους, καθώς καθορίζουν την γεωμετρία επαφής και ελέγχουν τις κινηματικές δυνατότητες και περιορισμούς, παρόμοια με τον μηχανισμό που επιδρά στην διατμητική αντοχή ασυνεχειών.



Σχήμα 5.32: Εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της εφαπτομενικής συνιστώσας της ταχύτητας πρόσκρουσης για σφαιρικά δοκίμια από από: (α) τσιμεντοειδές ένεμα, (β) μάρμαρο και (γ) χαλαζιακό ψαμμίτη

5.2.2.1.3 Κινηματικός συντελεστής αναπήδησης

Στο σχήμα 5.33 αναπαρίσταται, για κάθε υλικό, ο κινηματικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει του μέτρου της ταχύτητας πρόσκρουσης. Επίσης, προβάλλεται η συσχέτιση του συντελεστή με την μάζα και την ταχύτητα, που καταρτίστηκε από τις δοκιμές ελεύθερης πτώσης (σχέση 5.3).

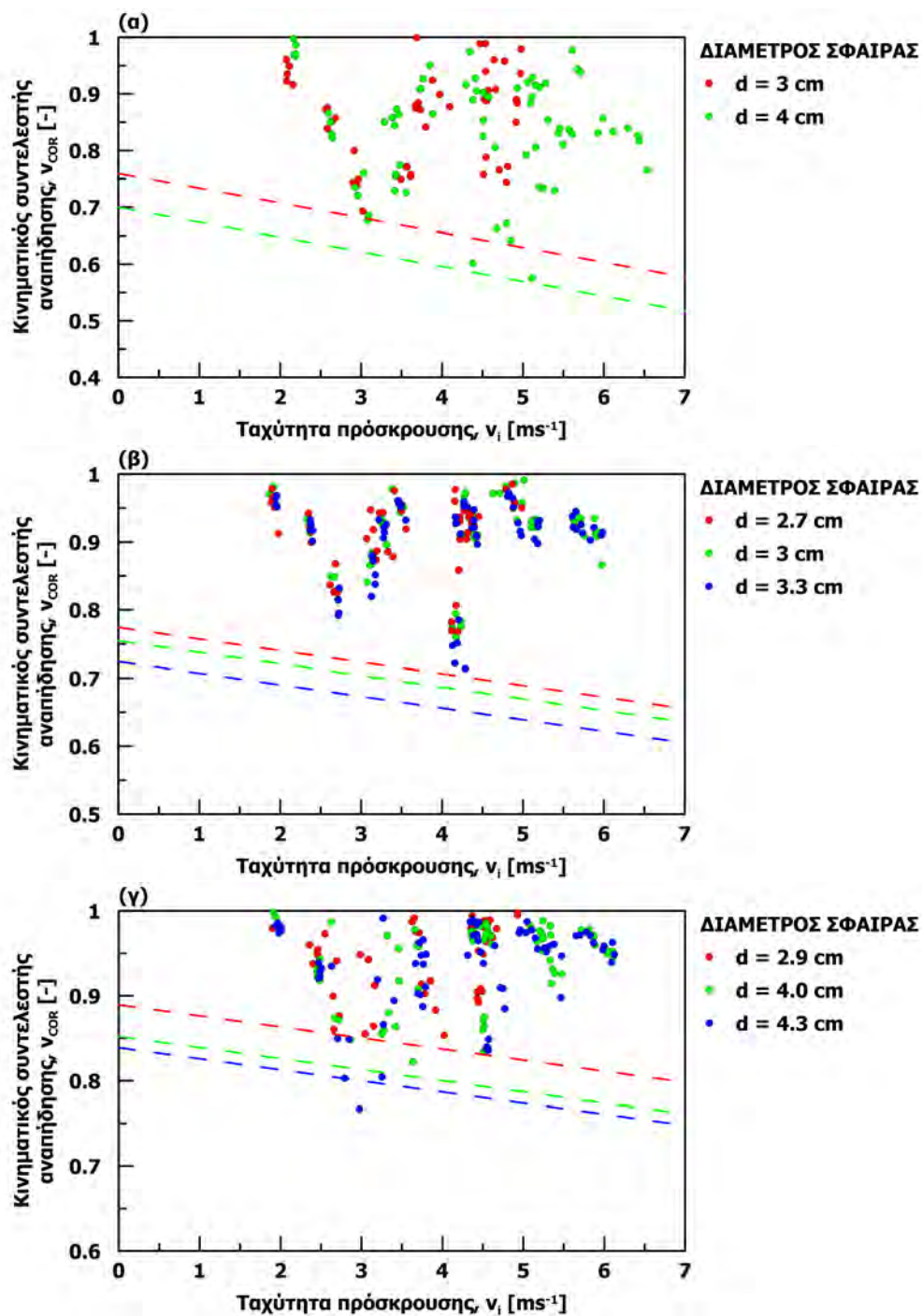
Από το σχήμα 5.33 γίνεται σαφές πως δεν προκύπτει κάποια συστηματική μεταβολή του κινηματικού συντελεστή αναπήδησης με την αύξηση της ταχύτητας πρόσκρουσης ή με την μεταβολή της διάστασης της σφαίρας. Συνεπώς, συμπεραίνεται ότι ο κινηματικός συντελεστής αναπήδησης δεν επηρεάζεται από την σφοδρότητα της κρούσης, τουλάχιστον στον βαθμό που επηρεάζεται ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης.

Έτσι, η συσχέτιση του συντελεστή με την ταχύτητα και την μάζα δεν είναι ικανή να περιγράψει την απώλεια κίνησης. Κατ' επέκταση, η αναπήδηση ελέγχεται από την κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας και όχι από το μέτρο αυτής, καθώς στις δοκιμές παραβολικής ρίψης επενεργούν πρόσθετοι μηχανισμοί απώλειας ενέργειας: αφενός αναπτύσσεται τριβή κατά την εφαπτομενική διεύθυνση και αφετέρου το τέμαχος έχει γωνιακή ταχύτητα.

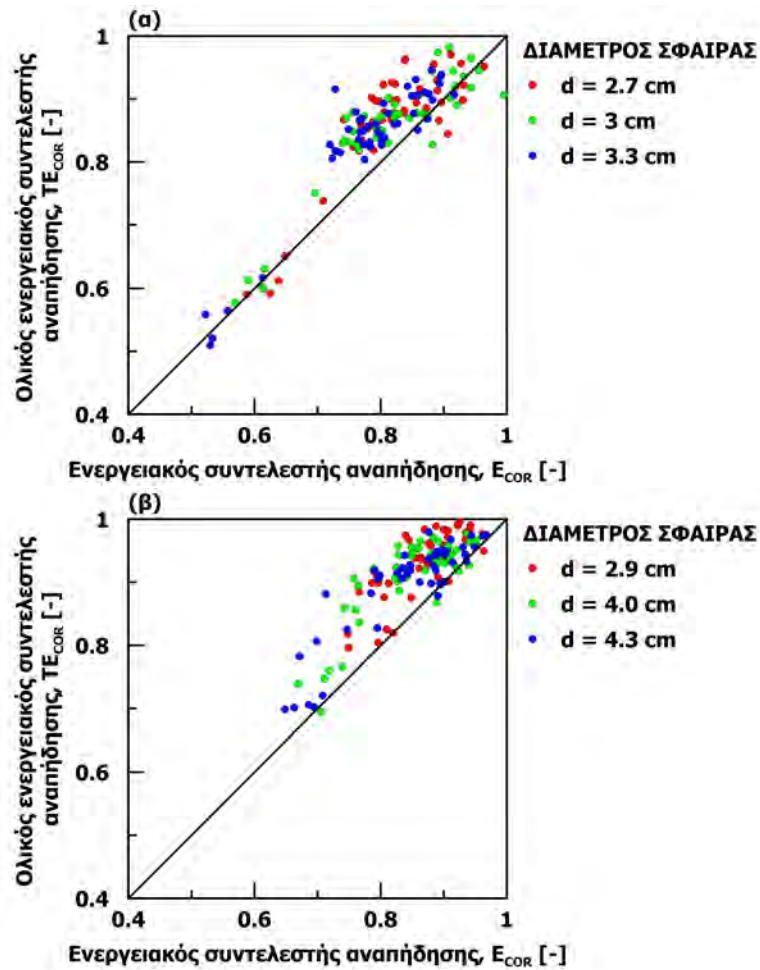
5.2.2.1.4 Ενεργειακός συντελεστής αναπήδησης

Όπως έχει αναφερθεί στην ενότητα 3.2.2.3, ο ενεργειακός συντελεστής αναπήδησης συναντάται στην βιβλιογραφία με ή χωρίς τον συνυπολογισμό της περιστροφικής συνιστώσας της κίνησης. Επισημαίνεται ότι στην παρούσα εργασία, για τον διαχωρισμό των δύο περιπτώσεων, όταν συνεκτιμάται η περιστροφική συνιστώσα της κίνησης ο συντελεστής αναπήδησης αναφέρεται ως ολικός ενεργειακός (TE_{COR}) ενώ όταν δεν λαμβάνεται υπόψη η γωνιακή ταχύτητα, ως ενεργειακός (E_{COR}). Γενικώς στην βιβλιογραφία και τις προτεινόμενες τιμές, σπανίως γίνεται διάκριση των δυο αυτών περιπτώσεων και η διαφοροποίηση που εμφανίζουν δεν έχει διερευνηθεί. Ακολούθως, εξετάζεται η σχέση μεταξύ των δυο αυτών ορισμών χρησιμοποιώντας τις δοκιμές με τεμάχια μαρμάρου και χαλαζιακού ψαμμίτη στις οποίες μετρήθηκε η γωνιακή ταχύτητα (Σχήμα 5.34).

Παρατηρείται ότι στην συντριπτική πλειοψηφία των δοκιμών, η τιμή του ενεργειακού συντελεστή είναι μεγαλύτερη όταν συνυπολογίζεται η γωνιακή ταχύτητα. Παρόλα αυτά, η μέση αύξηση του συντελεστή είναι περίπου 5%, ανεξαρτήτως υλικού ή διάστασης τεμάχους, που αποτελεί αμελητέα ποσότητα συγκριτικά με την γενικότερη διακύμανση που εμφανίζουν οι τιμές των συντελεστών αναπήδησης. Συνεπώς, βάσει των ανωτέρω, η συνεκτίμηση της γωνιακής ταχύτητας στον ενεργειακό συντελεστή αναπήδησης δεν επιφέρει σημαντική διαφοροποίηση και δεδομένου του αυξημένου υπολογιστικού κόστους που απαιτείται για τον προσδιορισμό της περιστροφής, δύναται να μην λαμβάνεται υπόψη.



Σχήμα 5.33: Κινηματικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσεως του μέτρου της ταχύτητας πρόσκρουσης για σφαιρικά δοκίμια από: (α) τσιμεντοειδές ένεμα, (β) μάρμαρο και (γ) χαλαζιακό ψαμμίτη



Σχήμα 5.34: Επίδραση συνυπολογισμού της γωνιακής ταχύτητας στον ενεργειακό συντελεστή αναπήδησης από τις δοκιμές με δοκίμια από: (α) μάρμαρο και (β) χαλαζιακό ψαμμίτη

5.2.3 Διερεύνηση κρούσης μεταξύ ανόμοιων υλικών τεμάχους - βάσης με δοκιμές ελεύθερης πτώσης

Στην ενότητα 5.1.1.1 εξετάσθηκε η δυνατότητα συσχέτισης των μηχανικών παραμέτρων του υλικού με τον κάθετο ή τον κινηματικό συντελεστή αναπήδησης στην περίπτωση που η κρούση γίνεται μεταξύ όμοιων υλικών. Η εν λόγω διερεύνηση έγινε με δοκιμές ελεύθερης πτώσης κυβικών δοκιμών που είχαν λειασμένες ακμές, πλευράς 2cm, που απελευθερώνονταν από ύψος $h_d = 80cm$. Από την διερεύνηση αυτή προκύπτει η δυνατότητα κατάρτισης εμπειρικής συσχέτισης του συντελεστή αναπήδησης με την σκληρότητα κατά τη σφύρα Schmidt. Σύμφωνα όμως με τα αναφερόμενα στην βιβλιογραφία, (Richards et al., 2001; Ansari et al., 2015) η αναπήδηση εξαρτάται από τον συνδυασμό των μηχανικών ιδιοτήτων της επιφάνειας πρόσκρουσης και του τεμάχους. Περαιτέρω, από την προηγούμενη ενότητα προκύπτει ότι η επίδραση του συνδυασμού ταχύτητας πρόσκρουσης και μάζας τεμάχους είναι καταλυτική.

Η διερεύνηση της αναπήδησης μεταξύ ανόμοιων υλικών επιφάνειας πρόσκρουσης και τεμάχους πραγματοποιήθηκε με σφαιρικά τεμάχια, ώστε η απόκριση στην αναπήδηση να μην επηρεάζεται από το σχήμα. Επίσης, εκτελέστηκαν δοκιμές ελεύθερης πτώσης ώστε να απαλειφθεί και η επίδραση της γωνίας πρόσκρουσης. Χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια σφαιρικά τεμάχια και βάσεις πρόσκρουσης με τις ανωτέρω διερευνήσεις (τσιμεντένεμα, μάρμαρο και ψαμμίτης), πραγματοποιώντας δοκιμές για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς τους με όλες τις διαθέσιμες σφαίρες διαφορετικής διαμέτρου. Έτσι, η μάζα των τεμαχών μεταβάλλεται, παρέχοντας την δυνατότητα εξέτασης της επίδρασης που έχει η διαφοροποίηση των μηχανικών ιδιοτήτων του τεμάχους και της βάσης αλλά συγχρόνως και της σφοδρότητας της κρούσης.

Πραγματοποιήθηκαν 16 σειρές δοκιμών απαρτιζόμενες από 5 επαναλήψεις, δηλαδή συνολικά εκτελέστηκαν 80 δοκιμές από ύψος ρίψης $h_d = 50cm$ (με ταχύτητα πρόσκρουσης περίπου $v_i = 3.1ms^{-1}$). Οι μέσοι όροι των αποτελεσμάτων (όπως αυτά παρουσιάζονται στο σχήμα 5.17) για κάθε σειρά δοκιμών παρατίθενται συγκεντρωτικά στους πίνακες 5.19 έως 5.21 για τις επιφάνειες πρόσκρουσης από τσιμεντοειδές ένεμα, μάρμαρο και ψαμμίτη αντίστοιχα, και αναλυτικότερα βρίσκονται στο παράρτημα 16. Στους πίνακες αυτούς περιλαμβάνονται επίσης οι δοκιμές από την ενότητα 5.2.1, που πραγματοποιήθηκαν από αντίστοιχο ύψος απελευθέρωσης και αφορούν σε κρούσεις με όμοιο υλικό επιφάνειας πρόσκρουσης και τεμάχους.

Στο σχήμα 5.35 παρουσιάζεται ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της σκληρότητας της βάσης για τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν με τεμάχια τσιμεντοειδούς ενέματος (Σχήμα 5.35-α), μαρμάρου (Σχήμα 5.35-β) και χαλαζιακού ψαμμίτη (Σχήμα 5.35-γ). Υπενθυμίζεται ότι η σκληρότητα κατά τη σφύρα Schmidt ισούται με 33.4, 38.2 και 44.7 για τα τρία υλικά αντίστοιχα.

Πίνακας 5.19: Δοκιμές ελεύθερης πτώσης σφαιρικών τεμαχίων σε επιφάνεια πρόσκρουσης από τσιμεντοειδές ένεμα υψηλής αντοχής

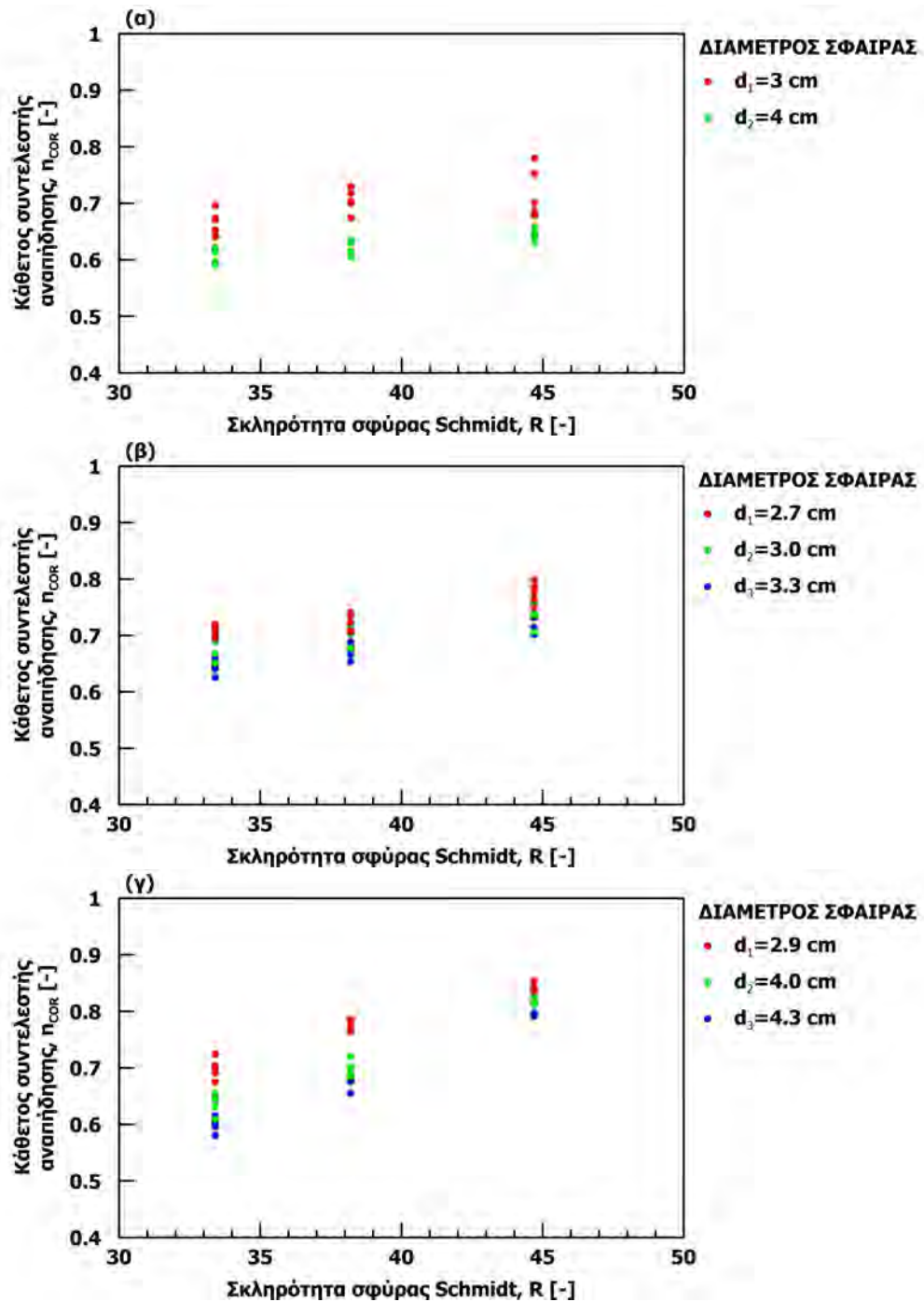
Σειρά δοκιμών	Αριθμός επαν.	Τύπος τεμαχίου Υλικό	d[cm]	Ταχύτητα		Συντ. αναπήδησης	
				$v_i[ms^{-1}]$	$v_r[ms^{-1}]$	$v_{COR}[-]$	$n_{COR}[-]$
7.3	5	Τσιμεν.	3	3.15	2.18	0.69	0.69
7.9	5	ένεμα	4	3.26	1.95	0.60	0.60
16.1	5	Μάρμαρο	2.7	2.98	2.11	0.71	0.71
16.2	5		3	2.97	2.02	0.68	0.68
16.3	5		3.3	2.96	1.91	0.64	0.64
16.4	5	Ψαμμίτης	2.9	3.04	2.12	0.70	0.70
16.5	5		4	3.07	1.96	0.64	0.64
16.6	5		4.3	3.09	1.85	0.60	0.60

Πίνακας 5.20: Δοκιμές ελεύθερης πτώσης σφαιρικών τεμαχίων σε επιφάνεια πρόσκρουσης από μάρμαρο

Σειρά δοκιμών	Αριθμός επαν.	Τύπος τεμαχίου Υλικό	d[cm]	Ταχύτητα		Συντ. αναπήδησης	
				$v_i[ms^{-1}]$	$v_r[ms^{-1}]$	$v_{COR}[-]$	$n_{COR}[-]$
16.7	5	Τσιμεν.	3	3.26	2.3	0.70	0.70
16.8	5	ένεμα	4	3.16	1.97	0.62	0.62
9.3	5	Μάρμαρο	2.7	3.00	2.16	0.72	0.72
9.7	5		3	3.00	2.11	0.70	0.70
9.11	5		3.3	3.03	2.04	0.67	0.67
16.9	5	Ψαμμίτης	2.9	3.10	2.41	0.78	0.78
16.10	5		4	3.11	2.17	0.70	0.70
16.11	5		4.3	3.12	2.11	0.68	0.68

Πίνακας 5.21: Δοκιμές ελεύθερης πτώσης σφαιρικών τεμαχίων σε επιφάνεια πρόσκρουσης από ψαμμίτη

Σειρά δοκιμών	Αριθμός επαν.	Τύπος τεμαχίου Υλικό	d[cm]	Ταχύτητα		Συντ. αναπήδησης	
				$v_i[ms^{-1}]$	$v_r[ms^{-1}]$	$v_{COR}[-]$	$n_{COR}[-]$
16.12	5	Τσιμεν.	3	3.44	2.48	0.72	0.72
16.13	5	ένεμα	4	3.32	2.16	0.65	0.65
16.14	5	Μάρμαρο	2.7	2.94	2.28	0.78	0.77
16.15	5		3	2.96	2.19	0.74	0.74
16.16	5		3.3	2.95	2.11	0.71	0.71
10.3	5	Ψαμμίτης	2.9	3.08	2.60	0.84	0.84
10.8	5		4	3.11	2.54	0.82	0.82
10.13	5		4.3	3.14	2.50	0.79	0.79



Σχήμα 5.35: Κάθετος συντελεστής αναπήδησης για κρούση σε επιφάνειες πρόσκρουσης διαφορετικού υλικού σφαιρικών τεμαχών από (α) τσιμεντοειδές ένεμα, (β) μάρμαρο και (γ) χαλαζιακό ψαμμίτη

Παρατηρείται ότι ο συντελεστής αναπήδησης λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές όταν η κρούση γίνεται σε σκληρότερη βάση. Συνεπώς, δεν μπορεί να αποτελεί ιδιότητα του πετρώματος καθώς εξαρτάται από τα μηχανικά χαρακτηριστικά βάσης και τεμαχούς. Επίσης, σε συμφωνία με τα συμπεράσματα της διερεύνησης αναφορικά με την σφοδρότητα της κρούσης (Ενότητα 5.2.1), όσο μεγαλύτερη είναι η μάζα του τεμαχούς τόσο μικρότερος είναι ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης.

5.3 Επίδραση του σχήματος του τεμάχους

Στην ενότητα 3.3.8 παρουσιάζονται τρεις θεωρητικές μεθοδολογίες που έχουν καταρτιστεί για τον προσδιορισμό των συντελεστών αναπήδησης, λαμβάνοντας υπόψη το σχήμα του τεμάχους και τον προσανατολισμό του κατά την επαφή. Οι προσεγγίσεις αυτές είναι εκφρασμένες στον διδιάστατο χώρο, το σχήμα του τεμάχους είναι ελλειπτικό και η επιφάνεια πρόσκρουσης είναι λεία.

Η πειραματική διερεύνηση που παρουσιάζεται στην ενότητα αυτή είναι επηρεασμένη από τις παραπάνω μεθοδολογίες. Πραγματοποιήθηκε ώστε να μελετηθεί αναλυτικότερα η επίδραση που έχει το σχήμα και η γεωμετρία επαφής, καθώς από τις προηγούμενες διερευνήσεις προκύπτει ότι οι παράμετροι αυτοί επιδρούν σημαντικά και ελέγχουν την επαναληψιμότητα των χαρακτηριστικών της τροχιάς και κατ' επέκταση την διακύμανση των συντελεστών αναπήδησης.

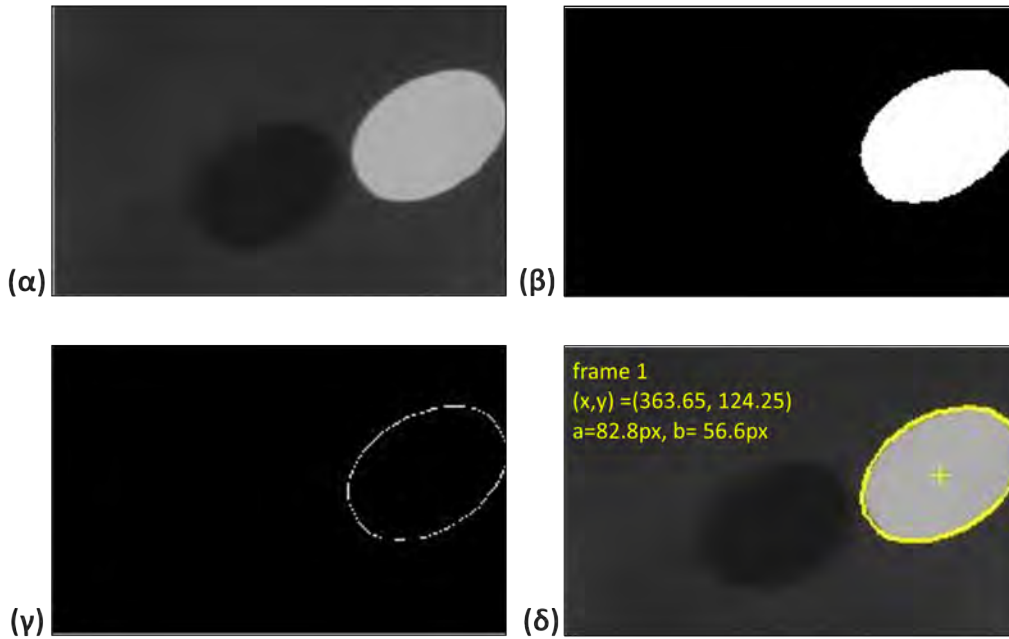
5.3.1 Πειραματική διάταξη

Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με την παραβολική ρίψη ελλειπτικών δίσκων σε λεία επιφάνεια πρόσκρουσης. Τόσο τα τεμάχια όσο και η επιφάνεια πρόσκρουσης διαμορφώθηκαν από το υψηλής αντοχής λεπτοκρυσταλλικό μάρμαρο Πεντέλης (βλ. πίνακα 4.2.1.6). Κατασκευάστηκε ειδικός για την περίπτωση μηχανισμός απελευθέρωσης των τεμαχίων (βλ. ενότητα 4.1.3.3) και διαμορφώθηκαν δοκίμια ελλειπτικών δίσκων, σταθερού πάχους, με ίσο μήκος μεγάλου άξονα και διαφορετικά μήκη για τον μικρό. Αναλυτικότερα, τα χαρακτηριστικά των τεμαχίων παρατίθενται στον πίνακα 5.22.

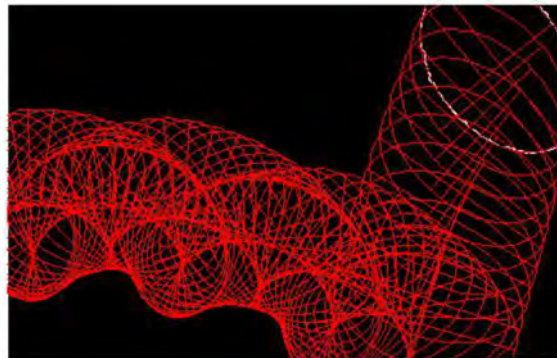
Πίνακας 5.22: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ελλειπτικών δίσκων

Λόγος αξόνων a/b	Μεγάλος ημιάξονας a [-]	Μικρός ημιάξονας b [-]	Πάχος t [mm]	Μάζα m [g]	Περίμετρος P [mm]
1.25	26	20.8	8	41.4	147.5
1.52	26	17.2	8	32.3	137
1.74	26	14.9	8	28.8	130.9
2.00	26	13.0	8	26.0	125.9

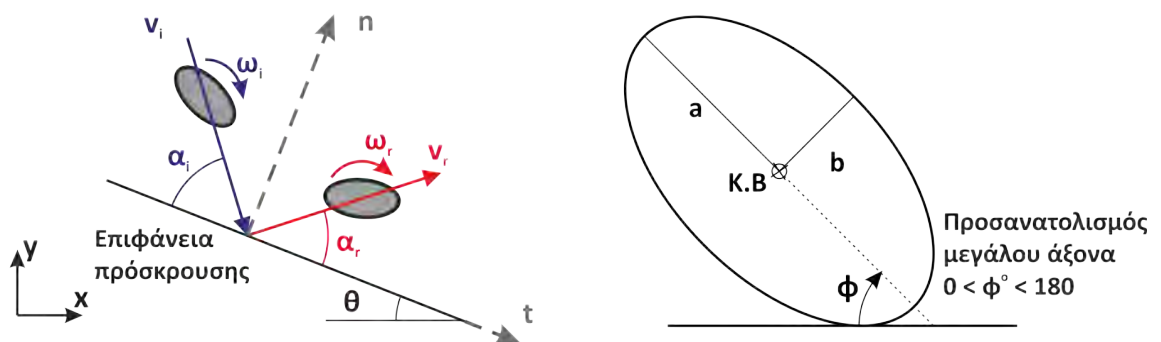
Στο σχήμα 5.36 παρουσιάζεται ένα στιγμιότυπο της δοκιμής και το περίγραμμα όπως προκύπτει από την επεξεργασία που περιγράφεται στην ενότητα 4.3.3.3. Συνθέτοντας τα περιγράμματα και τα κέντρα βάρους τους, προκύπτει η τροχιά του τεμάχους (Σχήμα 5.37). Στην συνέχεια, προσδιορίζονται τα μεγέθη ενδιαφέροντος (Σχήμα 5.38).



Σχήμα 5.36: Διαδικασία για τον προσδιορισμό της θέσης του δοκιμίου ελλειπτικού δίσκου: (α) αρχική καταγραφή, (β) εικόνα φωτεινότητας δυο τόνων, (γ) προσδιορισμός περιγράμματος και (δ) θέση κέντρου βάρους και χαρακτηριστικά της βέλτιστης έλλειψης



Σχήμα 5.37: Ανασύνθεση τροχιάς με την υπέρθεση των διαδοχικών θέσεων της έλλειψης



Σχήμα 5.38: Σχηματική απεικόνιση της δοκιμής με ελλειπτικά τεμάχια και μετρούμενα μεγέθη

Για κάθε σχήμα τεμάχους εκτελέστηκαν δοκιμές σε επιφάνεια πρόσκρουσης με κλίση $\theta = 0^\circ, 14.4^\circ, 26.9^\circ$ και 36.9° , διατηρώντας εν γένει σταθερές τις αρχικές συνθήκες ρίψης των τεμαχών, ώστε να εξετασθεί και η επίδραση της γωνίας πρόσκρουσης. Συνολικά, έγιναν 70 επαναλήψεις οργανωμένες σε 16 σειρές δοκιμών. Συγκεντρωτικά, τα χαρακτηριστικά των δοκιμών και οι μέσοι όροι των ταχυτήτων πρόσκρουσης και αναπήδησης και των αντίστοιχών γωνιών από κάθε σειρά δοκιμών παρουσιάζονται στον πίνακα 5.23. Αναλυτικότερα τα στοιχεία κάθε δοκιμής βρίσκονται στο παράρτημα 17.

Πίνακας 5.23: Πειραματική διερεύνηση με δοκίμια ελλειπτικών δίσκων

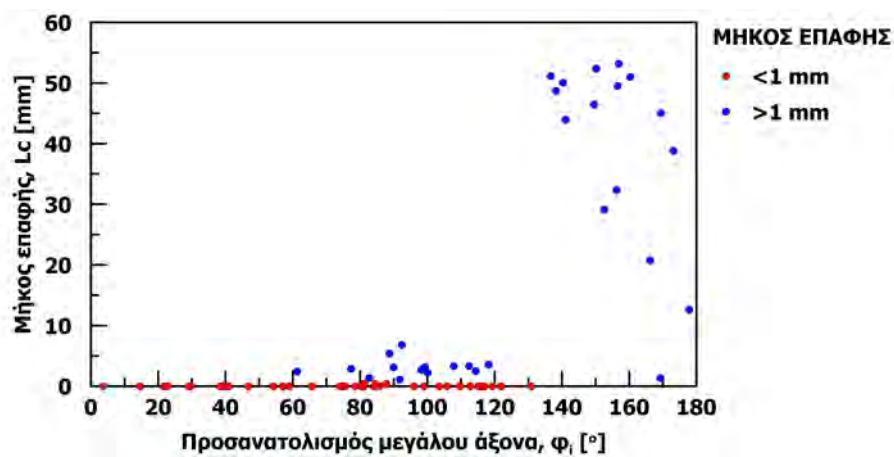
Σειρά δοκ.	Αρ. επαν.	Λόγος a/b	Κλίση $\theta[-]$	Πρόσκρουση			Αναπήδηση		
				$v_i[ms^{-1}]$	$\omega_i[rs^{-1}]$	$\alpha_i[^\circ]$	$v_r[ms^{-1}]$	$\omega_r[rs^{-1}]$	$\alpha_r[^\circ]$
17.1	3	2.00	0	2.85	44.0	71.0	1.81	74.1	50.5
17.2	4		14.4	2.90	16.8	47.0	1.90	65.9	35.5
17.3	3		26.9	2.91	15.1	29.0	2.17	25.1	19.1
17.4	4		36.9	3.49	23.0	25.1	2.74	90.9	19.6
17.5	6	1.74	0	2.90	21.8	67.6	1.63	59.2	44.9
17.6	5		14.4	3.09	13.1	45.2	1.92	82.0	19.5
17.7	5		26.9	3.06	18.5	29.7	2.37	-19.4	16.5
17.8	5		36.9	3.64	21.9	25.4	3.04	15.6	14.2
17.9	4	1.52	0	2.99	14.5	64.6	1.63	43.5	53.0
17.10	5		14.4	3.01	9.7	45.4	1.89	89.2	23.2
17.11	3		26.9	3.11	14.8	28.7	2.30	49.6	20.8
17.12	6		36.9	3.77	20.77	23	2.98	-3.83	11
17.13	4	1.25	0	2.99	14.1	66.2	1.42	52.1	35.6
17.14	5		14.4	3.04	10.5	46.8	1.68	55.4	17.6
17.15	3		26.9	3.22	9.1	28.6	2.44	64.0	9.9
17.16	5		36.9	3.69	11.2	25.6	2.96	63.1	12.4

5.3.2 Παρουσίαση και αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Γενικώς, παρατηρήθηκε διαφοροποίηση στην απόκριση των τεμαχών κατά την διάρκεια της επαφής με την επιφάνεια πρόσκρουσης. Σε ορισμένες δοκιμές η αναπήδηση συνέβη ακαριαία, δηλαδή χωρίς την μεταβολή της αρχικής γεωμετρίας επαφής, ενώ σε άλλες δοκιμές υπήρξε κύλιση του τεμάχους στην επιφάνεια πρόσκρουσης προ της αναπήδησης. Για τον διαχωρισμό των δυο αυτών συμπεριφορών χρησιμοποιήθηκε το μήκος επαφής, το οποίο προσδιορίζεται από το τμήμα της περιμέτρου του ελλειπτικού δίσκου που ήταν σε επαφή με την επιφάνεια πρόσκρουσης κατά την διάρκεια της κρούσης. Υπολογίζεται από τον προσανατολισμό του μεγάλου άξονα της έλλειψης κατά την έναρξη και την λήξη της επαφής, μέσω αριθμητικής προσέγγισης στο υπολογιστικό περιβάλλον της MatLab καθώς δεν διατίθεται αναλυτική σχέση.

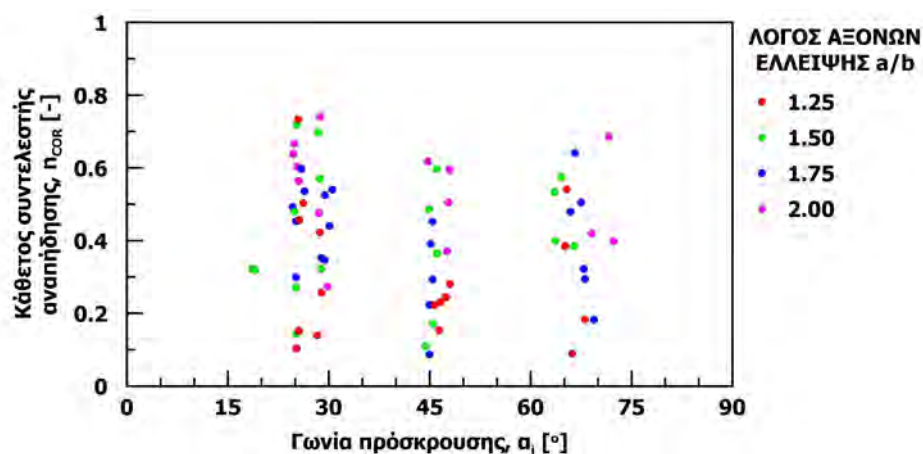
Περαιτέρω, επιλέχτηκε αυθαίρετα ως κριτήριο για την διαφοροποίηση μεταξύ των δύο αυτών συμπεριφορών το μήκος επαφής του 1mm . Στην περίπτωση που το μήκος επαφής είναι μικρότερο, η κρούση χαρακτηρίζεται ως στιγμιαία και όταν το μήκος επαφής υπερβαίνει την τιμή αυτή η κρούση καλείται ασταθής, δεδομένου ότι ο ελλειπτικός δίσκος κυλά επί της επιφάνειας πρόσκρουσης.

Το μήκος επαφής (L_c) συναρτήσει του προσανατολισμού (φ) του μεγάλου άξονα της έλλειψης την στιγμή της κρούσης (βλ. σχήμα 5.38) αποτυπώνεται στο σχήμα 5.39, από όπου προκύπτει ότι τα μεγέθη αυτά συνδέονται. Πιο συγκεκριμένα, όταν ο προσανατολισμός της έλλειψης κατά την πρώτη επαφή είναι έως $\varphi < 60^\circ$ το μήκος επαφής είναι πρακτικά μηδενικό. Για προσανατολισμό $\varphi > 120^\circ$, το μήκος επαφής είναι σημαντικό, που συνεπάγεται ότι συμβαίνει κύλιση ή ολίσθηση του τεμάχους στην επιφάνεια πρόσκρουσης. Τέλος, για ενδιάμεσους προσανατολισμούς της έλλειψης παρατηρούνται και οι δυο περιπτώσεις.



Σχήμα 5.39: Σχέση προσανατολισμού του μεγάλου άξονα της έλλειψης με το μήκος επαφής κατά την κρούση

Ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης προβάλλεται στο σχήμα 5.40 συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης, όπου η διακριτοποίηση των τιμών έχει γίνει σύμφωνα με τον λόγο των αξόνων των ελλειπτικών δίσκων. Γενικώς, ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης εμφανίζει σημαντικό εύρος. Πιο συγκεκριμένα, οι ελάχιστες τιμές που λαμβάνει κυμαίνονται περί του 0.1, ενώ οι μέγιστες φθίνουν ελαφρώς με την αύξηση της γωνίας πρόσκρουσης. Αυτή η συμπεριφορά έχει παρατηρηθεί στο σύνολο των διερευνήσεων που έχουν εκτελεστεί στην παρούσα έρευνα. Επιπρόσθετα, τα σημεία προβάλλονται χωρίς κάποια συστηματικότητα ως προς τον λόγο των αξόνων της έλλειψης, συνεπώς προκύπτει ότι ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης δεν καθορίζεται από την γεωμετρία του τεμάχους.

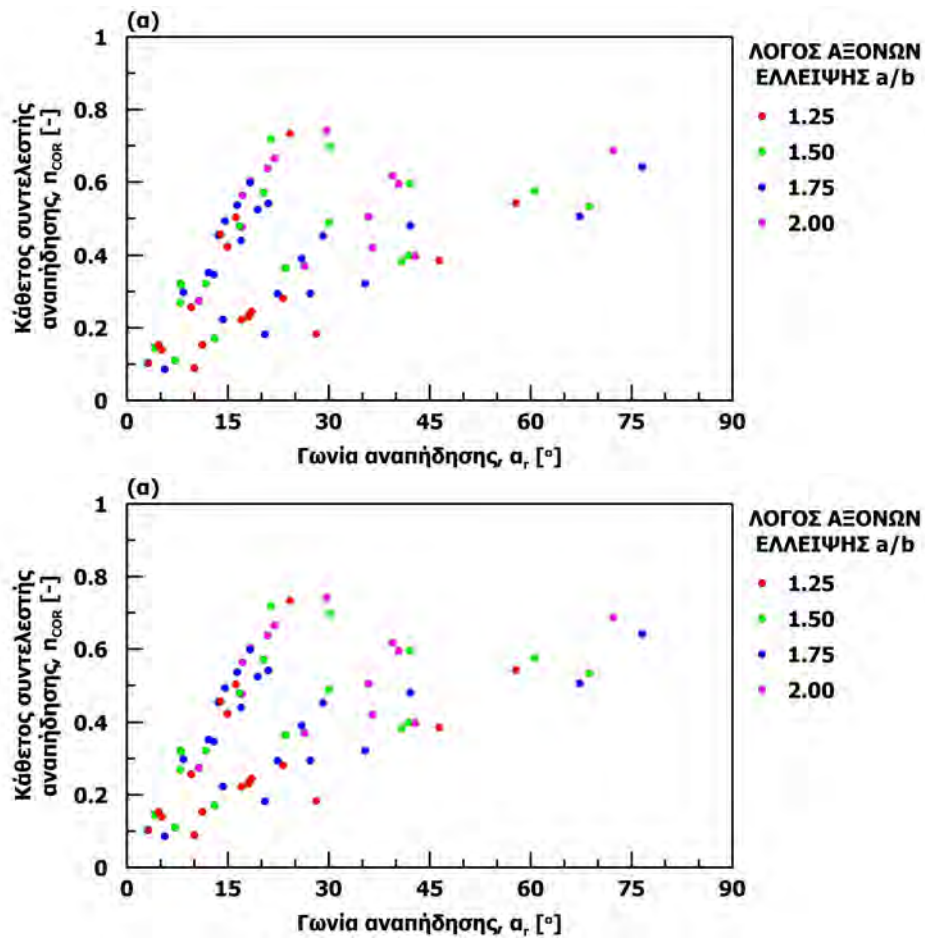


Σχήμα 5.40: Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει τη γωνίας πρόσκρουσης για τεμάχια ελλειπτικών δίσκων με διαφορετικούς λόγους αξόνων

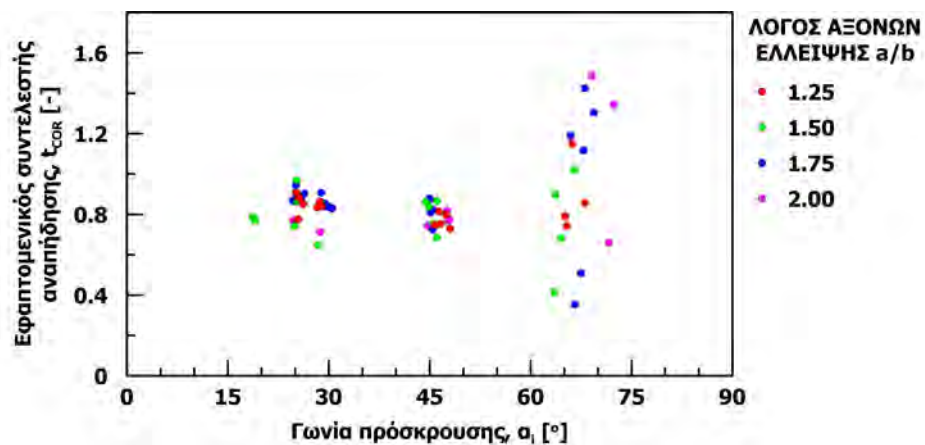
Στο σχήμα 5.41 παρουσιάζεται ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει την γωνίας αναπήδησης, όπου στο σχήμα 5.41-α η διακριτοποίηση των σημείων έχει γίνει βάσει του λόγου των αξόνων και στο σχήμα 5.41-β βάσει της γωνίας πρόσκρουσης σε κλάσεις των 10° .

Από τα διαγράμματα αυτά, προκύπτει ότι ο λόγος των αξόνων της έλλειψης δεν αποτελεί κρίσιμη παράμετρο στις τιμές του καθέτου συντελεστή αναπήδησης, καθώς δεν εμφανίζεται κάποια τάση με την διαφοροποίησή του. Αντιθέτως, όταν τα ίδια σημεία ομαδοποιούνται με βάση την γωνία πρόσκρουσης, γίνεται σαφές ότι ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης συνδέεται με την γωνία αναπήδησης μέσω ευθείας που διέρχεται από την αρχή των αξόνων. Η κλίση της ευθείας αυτής εξαρτάται από την γωνία πρόσκρουσης και πιο συγκεκριμένα, φθίνει με την αύξησή της. Τούτο έχει παρατηρηθεί στο σύνολο των διερευνήσεων με παραβολικές ρίψεις που έχουν πραγματοποιηθεί στη παρούσα έρευνα, ανεξαρτήτως του σχήματος του τεμάχους.

Ο επαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης λαμβάνει, εν γένει, σταθερές τιμές που κυμαίνονται στο διάστημα 0.7 έως 1 όταν η γωνία πρόσκρουσης είναι μικρότερη των 60° . Σε μεγαλύτερες γωνίες, οι τιμές εμφανίζουν μεγαλύτερη διακύμανση και σε ορισμένες δοκιμές υπερβαίνουν την μονάδα (Σχήμα 5.42). Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενες διερευνήσεις (βλ. ενότητα 5.1.2.1), η συμπεριφορά αυτή αποδίδεται στην αυξημένη ευαισθησία του επαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης όταν η κρούση τείνει προς την ορθή. Συνεπώς, δύναται ο επαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης να θεωρηθεί ανεξάρτητος της γωνίας πρόσκρουσης καθώς και της διαφοροποίησης του λόγου των αξόνων της έλλειψης.

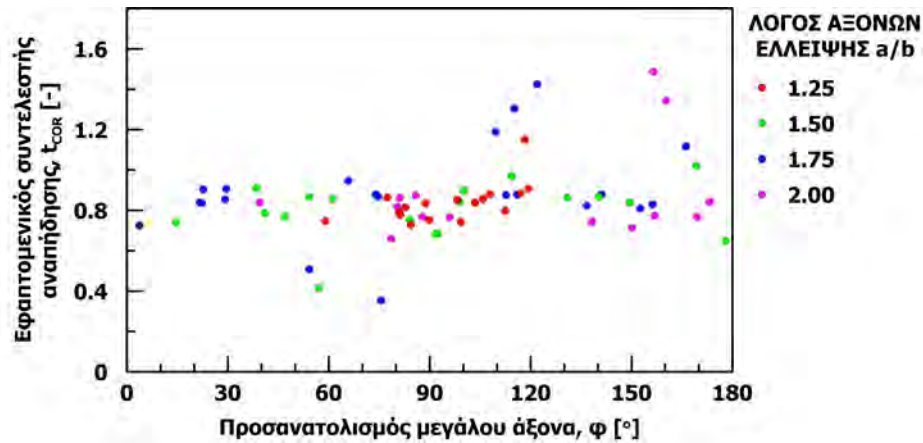


Σχήμα 5.41: Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει τη γωνίας αναπήδησης, (α) ανάλογα με λόγο αξόνων των ελλειπτικών δίσκων και (β) ομαδοποιημένα σύμφωνα με την γωνία πρόσκρουσης



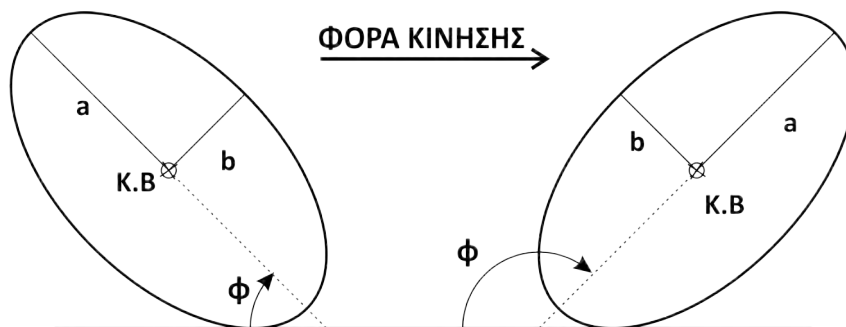
Σχήμα 5.42: Εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει τη γωνίας πρόσκρουσης για τεμάχια ελλειπτικών δίσκων με διαφορετικό λόγο ημιαξόνων

Εξετάζοντας τον εφαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης συναρτήσει του προσανατολισμού του μεγάλου άξονα της έλλειψης κατά την έναρξη της κρούσης (Σχήμα 5.43), προκύπτει ότι οι τιμές που είναι μεγαλύτερες της μονάδας αντιστοιχούν σε προσανατολισμό του μεγάλου άξονα της έλλειψης $\varphi > 90^\circ$.



Σχήμα 5.43: Εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει του προσανατολισμού του μεγάλου άξονα των τεμαχών ελλειπτικού δίσκου

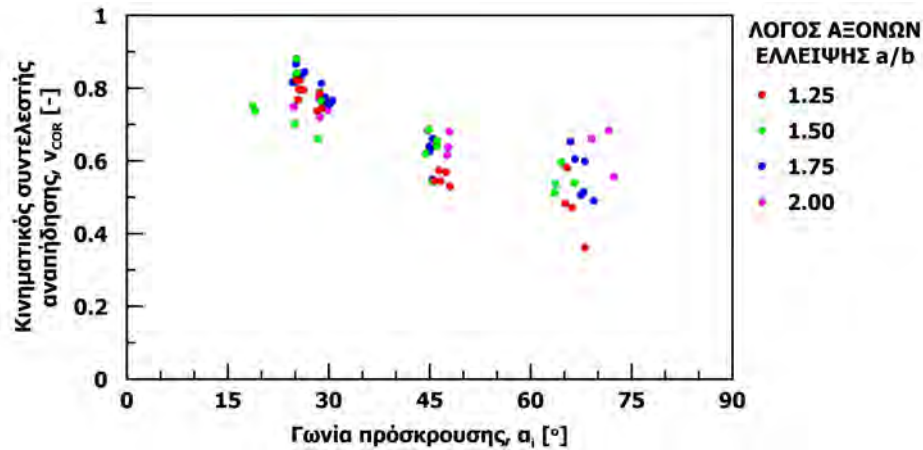
Στην περίπτωση αυτή ($\varphi > 90^\circ$) το σημείο επαφής βρίσκεται πίσω από το κέντρο βάρους του τεμάχου (Σχήμα 5.44) και στην πλειοψηφία των περιπτώσεων έχει ως αποτέλεσμα να συμβαίνει κύλιση του τεμάχου κατά την διάρκεια της επαφής, όπως σχολιάσθηκε προηγουμένως (βλ. σχήμα 5.39).



Σχήμα 5.44: Εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει του προσανατολισμού του μεγάλου άξονα των τεμαχών ελλειπτικού δίσκου

Περαιτέρω, δεν προκύπτει κάποια αξιοσημείωτη τάση του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης με τα υπόλοιπα μεγέθη που μετρήθηκαν στην παρούσα διερεύνηση, όπως λ.χ. της μεταθετικής ή της γωνιακής ταχύτητας και της γωνιάς αναπήδησης.

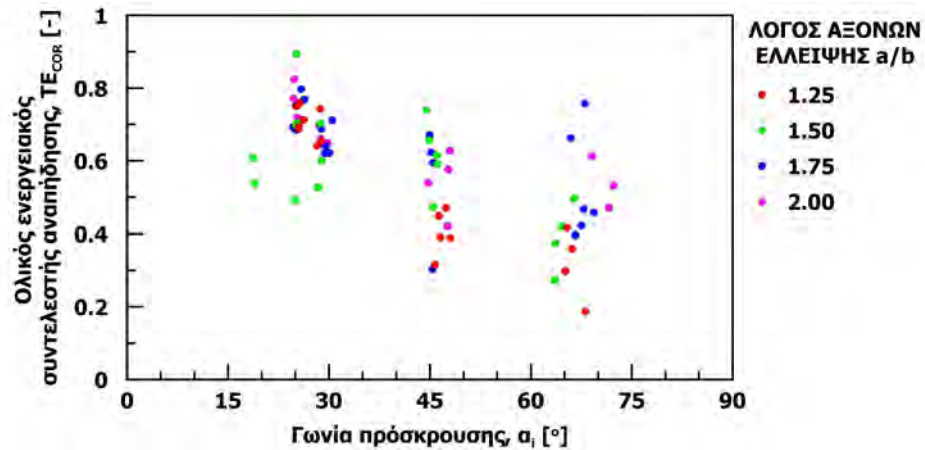
Αναφορικά με τον κινηματικό συντελεστή αναπήδησης, προκύπτει ότι μειώνεται με την αύξηση της γωνιάς πρόσκρουσης (Σχήμα 5.45). Τούτο είναι σε συμφωνία με τα ως τώρα αναφερόμενα αποτελέσματα των άλλων διερευνήσεων, όπου η ελάχιστη τιμή του κινηματικού συντελεστή αναπήδησης προσδιορίζεται για την περίπτωση της ορθής κρούσης.



Σχήμα 5.45: Κινηματικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει τη γωνίας πρόσκρουσης για τεμάχια ελλειπτικών δίσκων με μεταβλητό λόγο αξόνων

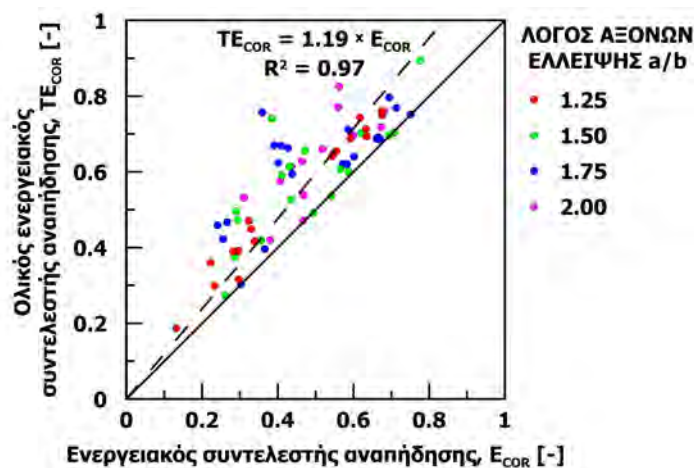
Το εύρος διακύμανσης του κινηματικού συντελεστή κυμαίνεται σε περίπου 0.2 και είναι αισθητά περιορισμένο συγκριτικά με του καθέτου συντελεστή αναπήδησης. Ωστόσο, για γωνίες πρόσκρουσης $\alpha_i > 65^\circ$ παρατηρούνται κάποιες ακραίες τιμές, με αποτέλεσμα το εύρος να αυξάνεται σε περίπου 0.4. Επισημαίνεται ότι το αντίστοιχο εύρος του καθέτου συντελεστή αναπήδησης κυμαίνεται περίπου σε 0.7 και μειώνεται ελαφρώς με την αύξηση της γωνίας πρόσκρουσης, ενώ οι τιμές είναι ομοιόμορφα κατανομημένες. Περαιτέρω, δεν προέκυψε κάποια τάση ή ικανοποιητική συσχέτιση του κινηματικού συντελεστή αναπήδησης με τα υπόλοιπα μεγέθη που μετρήθηκαν στην εν λόγω διερεύνηση.

Ο ολικός ενεργειακός συντελεστής αναπήδησης (TE_{COR}) εμφανίζει αντίστοιχη συμπεριφορά με τον κινηματικό, δηλαδή φθίνει με την αύξηση της γωνίας πρόσκρουσης και είναι ανεξάρτητος των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του τεμάχους (Σχήμα 5.46). Το εύρος τιμών αυξάνει ελαφρώς με την αύξηση της γωνίας πρόσκρουσης, από 0.4 στις ήπιες γωνίες σε περίπου 0.6 στις απότομες. Όπως και με τους άλλους συντελεστές που εξετάστηκαν παραπάνω, δεν προκύπτει κάποια συσχέτιση με τα υπόλοιπα μεγέθη που μετρήθηκαν και εξετάστηκαν.



Σχήμα 5.46: Ενεργειακός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσεται τη γωνίας πρόσκρουσης για τεμάχια ελλειπτικών δίσκων μεταβλητού λόγου αξόνων

Επισημαίνεται ότι οι τιμές του ολικού ενεργειακού συντελεστή αναπήδησης που παρατίθενται στο παραπάνω διάγραμμα, έχουν υπολογιστεί συνεκτιμώντας την περιστροφή του τεμάχους. Ωστόσο, στην βιβλιογραφία συναντάται κυρίως ο ενεργειακός συντελεστής αναπήδησης. Έτσι, αμελώντας την περιστροφική συνιστώσα της κίνησης, υπολογίστηκε ο ενεργειακός συντελεστής αναπήδησης και παρατίθεται στο σχήμα 5.47 προς σύγκριση με τον ολικό ενεργειακό συντελεστή.



Σχήμα 5.47: Ενεργειακός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσεται τη γωνίας πρόσκρουσης για τεμάχια ελλειπτικών δίσκων μεταβλητού λόγου αξόνων

Συνεκτιμώντας την περιστροφική ταχύτητα, προκύπτει ότι ο ολικός ενεργειακός συντελεστής αναπήδησης είναι μεγαλύτερος ή ίσος του ενεργειακού, αφού όλα τα σημεία προβάλλονται από την γραμμή των 45° και πάνω. Η μέση τιμή της αύξησης είναι περίπου 20%, αλλά δύναται να είναι ακόμη και διπλάσια συγκριτικά με τον ολικό ενεργειακό συντελεστή.

5.4 Επίδραση χαρακτηριστικών της επιφάνειας πρόσκρουσης

Στην ενότητα αυτή διερευνάται η επίδραση στους συντελεστές αναπήδησης, τριών συνήθων καταστάσεων που χαρακτηρίζουν τις επιφάνειες των πρανών στην φυσική τους θέση. Πιο συγκεκριμένα, μελετάται η επίδραση της αποσάθρωσης, της τραχύτητας και της επικάλυψης της επιφάνειας πρόσκρουσης με εδαφικό υλικό.

5.4.1 Αποσάθρωση της επιφάνειας πρόσκρουσης

Είναι σύνηθες η επιφάνεια ενός βραχώδους πρανούς να εμφανίζει κάποιο βαθμό αποσάθρωσης, καθώς είναι εκτεθειμένη στις ατμοσφαιρικές συνθήκες που επιτείνουν την ανάπτυξή της. Η αποσάθρωση επιδρά αρνητικά στην ποιότητα της βραχομάζας, υποβαθμίζοντας εν γένει τις μηχανικές ιδιότητές της.

Για την διερεύνηση της επίδρασης που έχει η αποσάθρωση της επιφάνειας πρόσκρουσης στους συντελεστές αναπήδησης, έγινε δειγματοληψία τεμαχών που χαρακτηρίζονταν από διαφορετικό βαθμό αποσάθρωσης, από γειτνιάζουσες θέσεις σχιστολιθικού πρανούς. Η δειγματοληψία έγινε στον Υμηττό, πλησίον της θέσης «Καλοπούλα» στα όρια του Δήμου Καισαριανής.

Η επιλογή των τεμαχών έγινε προσδιορίζοντας τον βαθμό αποσάθρωσης σύμφωνα με τον ποιοτικό χαρακτηρισμό που προτείνεται από την Διεθνή Ένωση Βραχομηχανικής (Barton, 1978). Στην συνέχεια, έγιναν δοκιμές σημειακής φόρτισης σε ακανόνιστα τεμάχια και δοκιμές σφύρας Schmidt. Τα εν λόγω χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στον πίνακα 4.2 της ενότητας 4.2.1.6 και επαναλαμβάνονται στον πίνακα 5.24. Δεν κατέστη δυνατή η εκτέλεση δοκιμών όπου απαιτείται μόρφωση του δοκιμίου (όπως η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης, brazil test κ.α.), λόγω των πτωχών χαρακτηριστικών του σχιστόλιθου.

Γενικά, η αποσάθρωση είναι αντιστρόφως ανάλογη τόσο της σκληρότητας κατά την σφύρα Schmidt (McCarroll, 1991) όσο και του δείκτη σημειακής φόρτισης (Z. Papadopoulos and Marinos, 1992). Έτσι, επιχειρήθηκε η συνεκτίμηση της επιφανειακής αποσάθρωσης του πρανούς στις τιμές του συντελεστή αναπήδησης μέσω της σκληρότητας κατά την σφύρα Schmidt. Άλλωστε, τούτο είναι σε συμφωνία με τα συμπεράσματα της ενότητας 5.1, όπου προέκυψε ότι η σκληρότητα αποτελεί την ιδιότητα που περιγράφει καλύτερα τους συντελεστές αναπήδησης.

5.4.1.1 Πειραματική διάταξη

Η χρήση τεμαχών από σχιστόλιθο στις δοκιμές αναπήδησης που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 5.1 ήταν προβληματική καθώς τα δοκίμια θραύονταν εξαιτίας της μειωμένης αντοχής του υλικού. Συνέπεια ήταν να απαιτηθεί η κατασκευή μεγάλου αριθμού δοκιμίων για την ολοκλήρωση της διερεύνησης. Επίσης, ενδεχομένως η απόκριση του τεμάχους στην κρούση να επηρεάζεται από τον προσανατολισμό της σχιστότητας, καθώς από την φύση του ο σχιστόλιθος παρουσιάζει έντονη ανισοτροπία. Έτσι, χρησιμοποιήθηκαν σφαιρικά τεμάχια από τσιμε-

ντοειδές ένεμα, αφού το υλικό αυτό ομοιάζει με τα φυσικά πετρώματα τόσο στις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες όσο και στην απόκριση στην κρούση (ενότητα 5.1). Με τον τρόπο αυτό, αντιμετωπίζονται τα παραπάνω ζητήματα και επιπρόσθετα περιορίζεται η διασπορά των συντελεστών αναπήδησης που οφείλεται στο σχήμα των τεμαχών, που όπως διαπιστώθηκε στην ενότητα 5.1 είναι σημαντική. Τα σφαιρικά τεμάχια που χρησιμοποιήθηκαν στην διερεύνηση αυτή είχαν διάμετρο 30mm και διαμορφώθηκαν σύμφωνα με τα αναφερόμενα στην ενότητα 4.1.1.3.

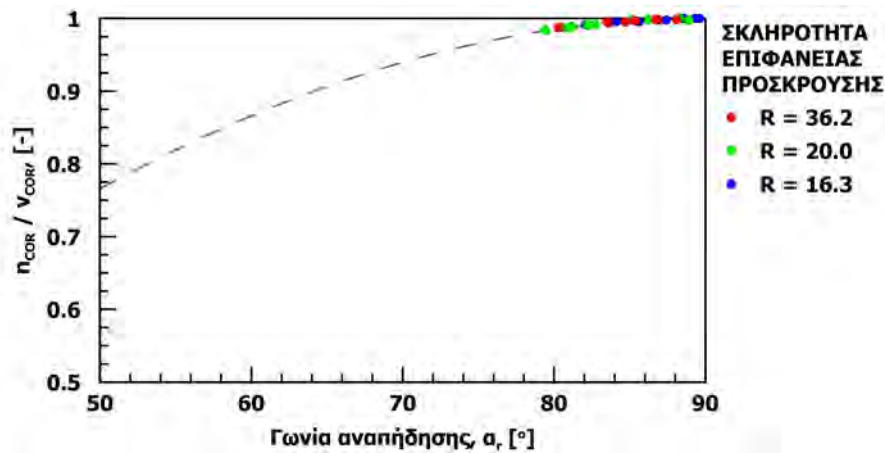
Χρησιμοποιήθηκε η διάταξη της ελεύθερης πτώσης, όπου εκτελέστηκαν 10 επαναλήψεις σε κάθε βάση διαφορετικού βαθμού αποσάθρωσης από ύψος ρίψης $h_d = 60cm$, δηλαδή με ταχύτητα πρόσκρουσης περίπου $v_i = 3.3ms^{-1}$. Τα αποτελέσματα (μέσες τιμές) παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 5.24 και αναλυτικότερα οι δοκιμές κάθε σειράς παρατίθενται στο παράρτημα 18.

Πίνακας 5.24: Δοκιμές για την διερεύνηση της επίδρασης που έχει η αποσάθρωση της επιφάνειας πρόσκρουσης στους συντελεστές αναπήδησης

Σειρά δοκ.	Αρ. επαν.	Βαθμός αποσάθρωσης	Σκληρότητα R [-]	Γωνία $\alpha_i [^\circ]$	Συντ. αναπήδησης $v_{COR} [-]$	$n_{COR} [-]$
18.1	10	I	36.2	85.1	0.65	0.65
18.2	10	II	20.0	83.5	0.54	0.54
18.3	10	IV	16.3	87.0	0.48	0.48

Η χρήση δοκιμίων σφαιρικού σχήματος έχει ως αποτέλεσμα οι τιμές των συντελεστών αναπήδησης να έχουν μικρότερη διασπορά από αυτήν των κυβικών δοκιμίων με λειασμένες ακμές. Αυτό οφείλεται στην γεωμετρία της επαφής μεταξύ της σφαίρας και της επιφάνεια πρόσκρουσης, η οποία δεν διαφοροποιείται μεταξύ των επαναλήψεων, αφού κάθε άξονας που διέρχεται από το κέντρο της σφαίρας αποτελεί και άξονα συμμετρίας.

Έτσι, για τις δοκιμές ελεύθερης πτώσης η εκτροπή του τεμάχους από την κατακόρυφο είναι περιορισμένη, με αποτέλεσμα ο κάθετος και ο κινηματικός συντελεστής αναπήδησης πρακτικά να ταυτίζονται. Ο λόγος του καθέτου προς το εφαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης συναρτήσσει της γωνίας αναπήδησης παρουσιάζεται στο σχήμα 5.48. Για το σύνολο των δοκιμών, η μεγίστη διαφοροποίηση μεταξύ των συντελεστών είναι 1.2%, με τον κινηματικό συντελεστή αναπήδησης να είναι μεγαλύτερος του καθέτου σε κάθε περίπτωση.



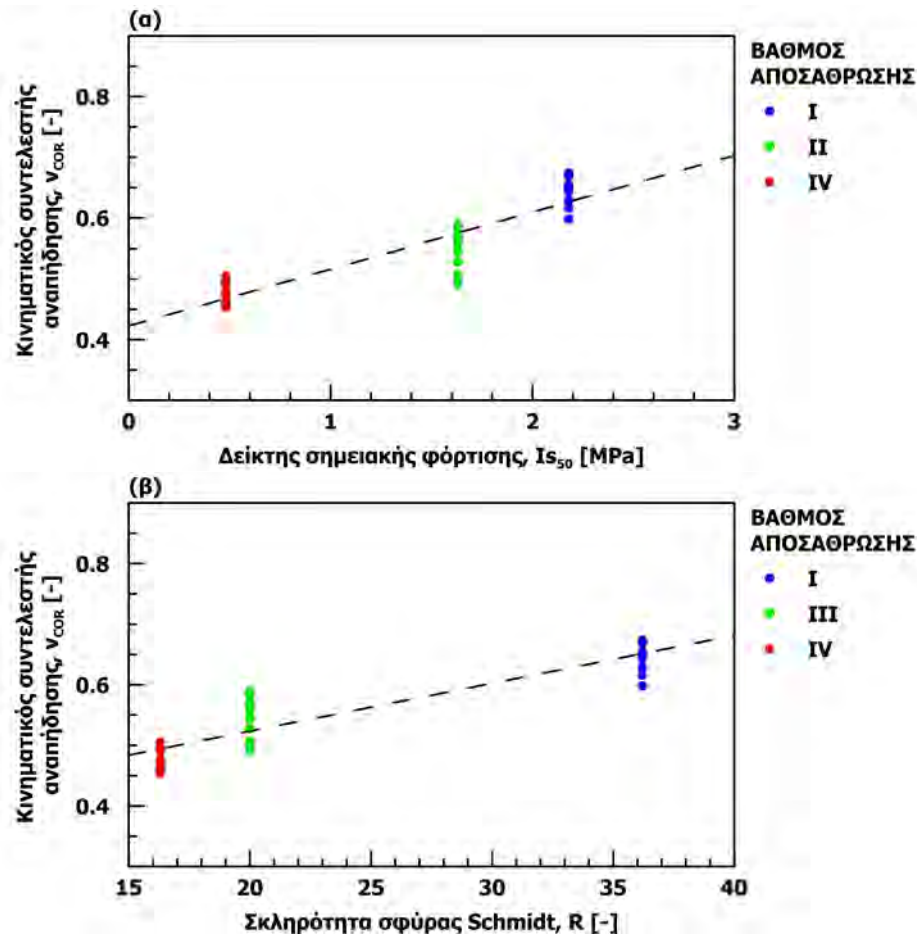
Σχήμα 5.48: Λόγος του καθέτου προς τον κινηματικό συντελεστή αναπήδησης με την γωνία αναπήδησης για δοκιμές με σφαιρικά τεμάχια

Συγκρίνοντας τα σχήματα 5.3 και 5.48 και λαμβάνοντας υπόψη ότι στο πρώτο σχήμα έχει χρησιμοποιηθεί το 25% των δεδομένων, αυτά που εμφανίζουν την λιγότερη απόκλιση από την κατακόρυφο, γίνεται εμφανής η σημαντική επίδραση που έχει το σχήμα του τεμάχους στην αναπήδηση. Έτσι, επαληθεύεται το συμπέρασμα ότι η επαναληψιμότητα των δοκιμών ελεύθερης πτώσης εξαρτάται από το σχήμα του τεμάχους, καθώς αυτό καθορίζει την γεωμετρία της επαφής μεταξύ τεμάχους και επιφάνειας πρόσκρουσης.

5.4.1.2 Επίδραση της αποσάθρωσης στους συντελεστές αναπήδησης

Στο σχήμα 5.49-α παρουσιάζεται η σχέση του κινηματικού συντελεστή αναπήδησης με την αποσάθρωση της επιφάνειας πρόσκρουσης, εκφρασμένη βάσει βάσει του δείκτη σημειακής φόρτισης και στο σχήμα 5.49-β βάσει της σκληρότητας κατά την σφύρα Schmidt. Παρατηρείται ότι η ανάπτυξη της αποσάθρωσης μειώνει τους συντελεστές αναπήδησης, σχέση που δύναται να εκφραστεί ως συνάρτηση των δυο αυτών χαρακτηριστικών του υλικού.

Η τάση που προκύπτει είναι σύμφωνη αυτήν που προκύπτει από την ενότητα 5.1, καθώς ο κινηματικός συντελεστής αναπήδησης μειώνεται με την μείωση της σκληρότητας της επιφάνειας. Παρόλα αυτά, σύγκριση των δυο σε επίπεδο τιμών δεν έχει νόημα στην παρούσα φάση, καθώς διαφέρουν οι πειραματικές συνθήκες. Πιο συγκεκριμένα, διαφέρει το σχήμα των δοκιμίων, γεγονός που επηρεάζει σημαντικά τις τιμές των συντελεστών αναπήδησης, όπως σχολιάστηκε παραπάνω. Επίσης, διαφέρουν η ταχύτητα πρόσκρουσης και η μάζα των τεμαχών, ενώ η σκληρότητα του τεμάχους δεν είναι ίδια με αυτή της βάσης. Στο κεφάλαιο 9 προτείνεται μια εμπειρική συσχέτιση που συνεκτιμώνται όλα τα παραπάνω για την εκτίμηση του συντελεστή αναπήδησης.



Σχήμα 5.49: Κινηματικός συντελεστής αναπήδησης για αποσαθρωμένες επιφάνειες σχιστόλιθου σε σχέση με: (α) τον δείκτη σημειακής φόρτισης και (β) την σκληρότητα κατά την σφύρα Schmidt

5.4.2 Τραχύτητα επιφάνειας πρόσκρουσης

Η ελεύθερη επιφάνεια βραχωδών σχηματισμών εμφανίζει τραχύτητα, που εξαρτάται από το είδος του πετρώματος, τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, την επιφανειακή απορροή, κ.α. Η μέτρηση της τραχύτητας γίνεται με την κλίμακα *JRC* και επιτυγχάνεται μέσω της σύγκρισης του προφίλ της επιφάνειας του επίπεδου με πρότυπα βαθμονομημένα προφίλ. Το σύνολο των διερευνήσεων που έχουν παρουσιασθεί στο κεφάλαιο αυτό έχουν εκτελεστεί σε λείες επίπεδες επιφάνειες πρόσκρουσης, καθώς θεωρήθηκε ότι η τραχύτητα θα αύξανε σημαντικά την διακύμανση των διαγραφόμενων τροχιών. Ωστόσο, λείες επιφάνειες σπανίως συναντώνται στην φύση, συνεπώς η επίδραση που έχει η τραχύτητα θα πρέπει να εξετασθεί και εφόσον είναι σημαντική, να λαμβάνεται υπόψη στην εκτίμηση των πιθανών τροχιών.

5.4.2.1 Πειραματική διάταξη

Για την διερεύνηση της τραχύτητας χρησιμοποιήθηκαν επιφάνειες πρόσκρουσης από μάρμαρο, τρεις με διαφορετικό βαθμό τραχύτητας και μια λεία. Αρχικά πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με σφαιρικά τεμάχια, ώστε να περιοριστεί η επίδραση του σχήματος έναντι της τραχύτητας. Στην συνέχεια, επαναλήφθηκαν οι δοκιμές με τεμάχια πολυεδρικού σχήματος και ίδιας μάζας, ώστε να συμπεριληφθεί και η επίδραση του σχήματος.

Καθώς από τα προηγούμενες διερευνήσεις έχει προκύψει ότι η γωνία πρόσκρουσης αποτελεί κρίσιμη παράμετρο, επιλέχθηκε η εκτέλεση δοκιμών παραβολικής ρίψης. Συνολικά, εκτελέστηκαν 300 δοκιμές οργανωμένες σε 32 σειρές. Έγιναν 10 επαναλήψεις σε κάθε σειρά, εκτός από τις δοκιμές μεταξύ σφαιρικού τεμάχους και λείας επιφάνεια πρόσκρουσης, όπου έγιναν 5 επαναλήψεις καθώς η απόκριση ήταν επαναλήψιμη. Τα στοιχεία των δοκιμών παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στους πίνακες 5.25 και 5.26 για τα σφαιρικά και τα πολυεδρικά τεμάχια αντίστοιχα και αναλυτικότερα παρατίθενται στα παρατήματα 19 και 20.

Πίνακας 5.25: Δοκιμές παραβολικής ρίψης με σφαιρικά τεμάχια για την διερεύνηση της επίδρασης της τραχύτητας στους συντελεστές αναπήδησης

Σειρά δοκ.	Αρ. επαν.	Τραχύτητα JRC [-]	Πρόσκρουση		Αναπήδηση		Συντελεστές αναπήδησης		
			$v_i [ms^{-1}]$	$\alpha_i [^\circ]$	$v_r [ms^{-1}]$	$\alpha_r [^\circ]$	$\eta_{COR} [-]$	$t_{COR} [-]$	$\nu_{COR} [-]$
19.1	5	0	2.74	25.3	2.53	17.6	0.65	0.97	0.93
19.2	5		3.32	44.6	2.92	26.0	0.55	1.11	0.88
19.3	5		3.51	58.8	2.47	40.3	0.53	1.04	0.70
19.4	5		3.54	70.7	2.00	54.2	0.49	1.00	0.57
19.5	10	2	2.58	23.3	2.37	13.7	0.54	0.97	0.92
19.6	10		3.30	42.9	2.73	29.1	0.59	0.98	0.83
19.7	10		3.40	58.5	2.48	35.5	0.50	1.14	0.73
19.8	10		3.49	70.7	2.04	54.4	0.50	1.03	0.58
19.9	10	6	2.62	24.7	2.44	17.6	0.68	0.97	0.93
19.10	10		3.39	44.1	2.99	24.2	0.52	1.11	0.88
19.11	10		3.46	59.0	2.59	34.7	0.48	1.18	0.75
19.12	10		3.53	70.7	1.88	60.8	0.49	0.78	0.53
19.13	10	8	2.90	21.9	2.75	17.7	0.76	0.96	0.95
19.14	10		3.45	43.6	2.90	29.3	0.59	1.01	0.84
19.15	10		3.44	58.9	2.47	41.1	0.53	1.04	0.72
19.16	10		3.47	70.5	2.01	53.4	0.48	1.03	0.58

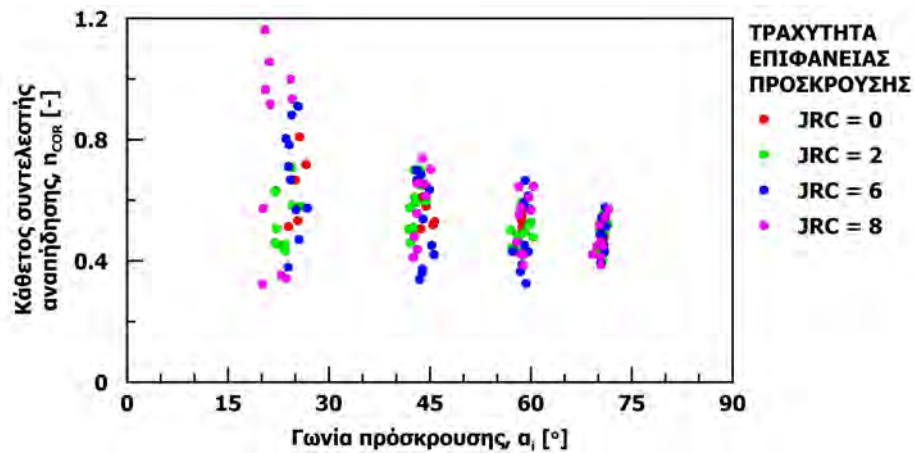
Πίνακας 5.26: Δοκιμές παραβολικής ρίψης με πολυεδρικά τεμάχια για την διερεύνηση της επίδρασης της τραχύτητας στους συντελεστές αναπήδησης

Σειρά δοκ.	Αρ. επαν.	Τραχύτητα JRC [-]	Πρόσκρουση		Αναπήδηση		Συντελεστές αναπήδησης		
			$v_i [ms^{-1}]$	$\alpha_i [^\circ]$	$v_r [ms^{-1}]$	$\alpha_r [^\circ]$	$n_{COR} [-]$	$t_{COR} [-]$	$v_{COR} [-]$
20.1	10	0	2.37	30.3	2.21	20.7	0.65	1.00	0.93
20.2	10		2.59	50.8	2.07	34.8	0.59	1.04	0.80
20.3	10		3.24	63.5	1.95	46.1	0.48	0.89	0.60
20.4	10		3.26	79.7	1.64	53.0	0.41	1.67	0.50
20.5	10	2	2.13	30.5	1.95	21.1	0.66	0.98	0.91
20.6	10		2.83	45.7	2.21	28.4	0.52	0.98	0.78
20.7	10		3.23	60.9	2.07	40.6	0.46	0.97	0.64
20.8	10		3.22	79.6	1.35	64.3	0.37	0.97	0.42
20.9	10	6	1.99	32.6	1.77	18.8	0.53	0.99	0.88
20.10	10		2.68	49.4	2.10	27.4	0.46	1.05	0.78
20.11	10		3.28	61.7	2.00	34.0	0.37	1.03	0.61
20.12	10		3.25	80.5	1.32	45.1	0.29	1.67	0.41
20.13	10	8	2.06	33.3	1.82	22.0	0.61	0.97	0.88
20.14	10		2.70	47.4	2.11	31.1	0.53	0.96	0.78
20.15	10		3.28	61.0	1.95	35.6	0.37	0.95	0.59
20.16	10		3.21	79.1	1.52	47.6	0.35	1.56	0.47

5.4.2.2 Σχολιασμός δοκιμών με σφαιρικό τέμαχος

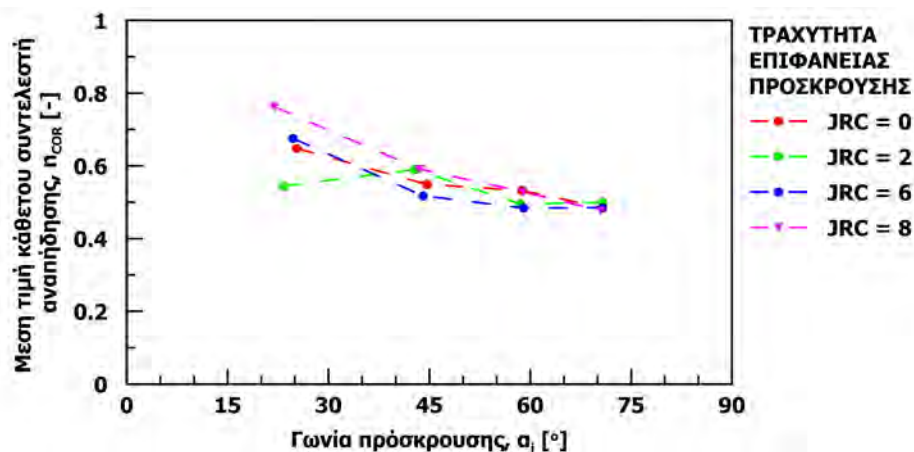
Αρχικά, εξετάζεται το σφαιρικό τέμαχος ώστε να μην υπεισέρχεται στα αποτελέσματα η επίδραση της γεωμετρίας επαφής μεταξύ τεμάχους και επιφάνειας πρόσκρουσης. Συνεπώς, η όποια διαφοροποίηση μεταξύ των σειρών δοκιμών που παρουσιάζονται παρακάτω αποδίδεται στην μεταβολή της τραχύτητας της επιφάνειας πρόσκρουσης.

Στο σχήμα 5.50 παρουσιάζεται ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης, με την διακριτοποίηση των σημείων να έχει γίνει βάσει της τραχύτητας της επιφάνειας πρόσκρουσης.



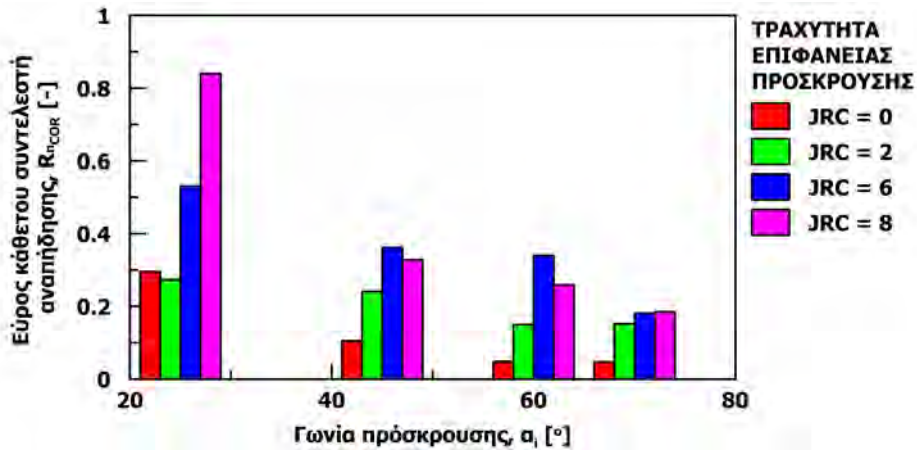
Σχήμα 5.50: Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης σε επιφάνειες διαφορετικού βαθμού τραχύτητας με σφαιρικά τεμάχια

Παρατηρείται ότι ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης μειώνεται με την αύξηση της γωνίας πρόσκρουσης, συμπέρασμα που προκύπτει από το σύνολό των δοκιμών που έχουν πραγματοποιηθεί στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας. Περαιτέρω, η μέση τιμή του συντελεστή αναπήδησης ομοιάζει ανεξαρτήτως της τραχύτητας της επιφάνειας πρόσκρουσης (Σχήμα 5.51).



Σχήμα 5.51: Μέση τιμή του καθέτου συντελεστή αναπήδηση συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης σε επιφάνειες διαφορετικού βαθμού τραχύτητας, από τις δοκιμές με σφαιρικά τεμάχια

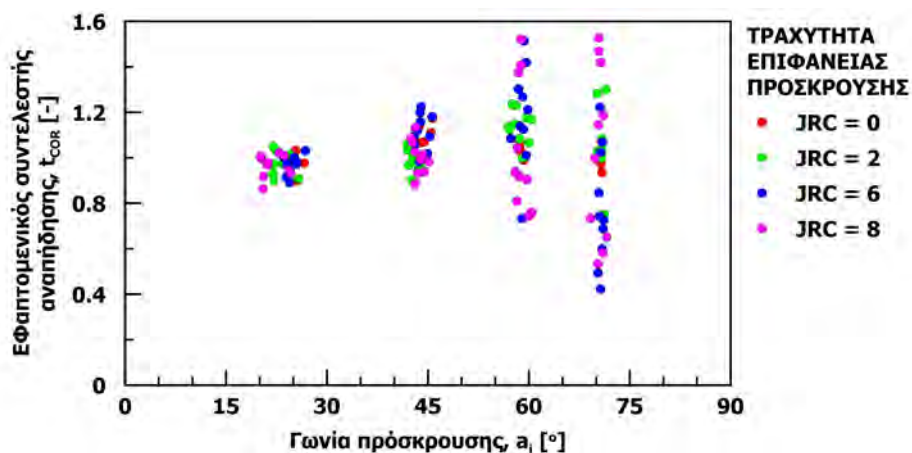
Η επίδραση της τραχύτητας αντικατοπτρίζεται από την σημαντική αύξηση της διακύμανσης του καθέτου συντελεστή αναπήδησης. Τούτο γίνεται ευκρινέστερο στο σχήμα 5.52 όπου αναπαρίσταται, με την μορφή ραβδογράμματος, το εύρος του καθέτου συντελεστή αναπήδησης για κάθε συνδυασμό τραχύτητας και γωνίας πρόσκρουσης.



Σχήμα 5.52: Εύρος καθέτου συντελεστή αναπήδησης ανάλογα της γωνίας πρόσκρουσης και της τραχύτητας της επιφάνειας από τις δοκιμές με σφαιρικά τεμάχια

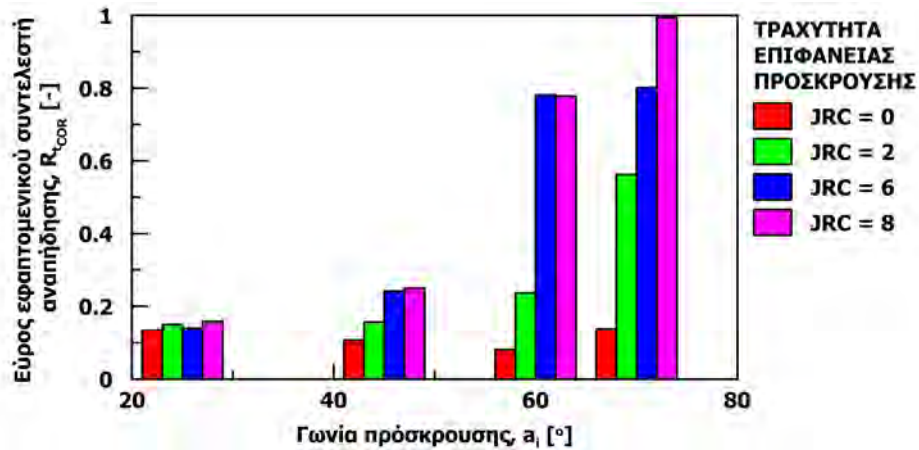
Παρόμοια συμπεριφορά εμφανίζεται και στον επαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης. Γενικώς, στις δοκιμές που έχουν παρουσιαστεί στις προηγούμενες ενότητες, προκύπτει για τα σφαιρικά τεμάχια ότι ο επαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης λαμβάνει τιμές περιορισμένης διακύμανσης και κοντά στην μονάδα, ενώ όταν τα τεμάχια είναι κυβικά η διακύμανση αυξάνεται. Επίσης, ανεξαρτήτως σχήματος, η διακύμανση αυξάνει όσο η γωνία πρόσκρουσης τείνει προς τις 90° .

Στο σχήμα 5.53 αναπαρίστανται ο επαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης για τις τέσσερις επιφάνειες διαφορετικής τραχύτητας που εξετάστηκαν. Παρατηρείται και σε αυτή τη περίπτωση ότι η μέση τιμή ομοιάζει ανεξαρτήτως της τραχύτητας ή της γωνίας πρόσκρουσης και πιο συγκεκριμένα κυμαίνεται περί της μονάδας.



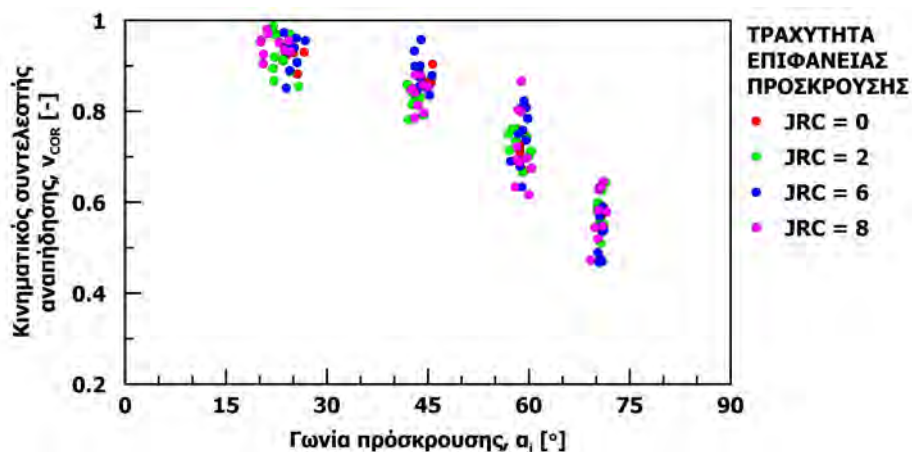
Σχήμα 5.53: Εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης και της τραχύτητας της επιφάνειας από τις δοκιμές με σφαιρικά τεμάχια

Όμως οι τιμές που λαμβάνει ο επαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης διευρύνονται σημαντικά με την αύξηση τόσο της γωνίας πρόσκρουσης όσο και της τραχύτητας της επιφάνειας πρόσκρουσης. Τούτο φαίνεται ευκρινώς με την βοήθεια του σχήματος 5.54, όπου προβάλλεται για κάθε επιφάνεια πρόσκρουσης το εύρος διακύμανσης του επαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης.



Σχήμα 5.54: Εύρος επαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης ανάλογα της γωνίας πρόσκρουσης και της τραχύτητας της επιφάνειας από τις δοκιμές με σφαιρικά τεμάχια

Σε συμφωνία με τις προηγούμενες διερευνήσεις του παρόντος κεφαλαίου, αντίστοιχη συμπεριφορά εμφανίζει και ο κινηματικός συντελεστής αναπήδησης. Παρατίθεται ενδεικτικά το σχήμα 5.55, στο οποίο αποτυπώνεται ο κινηματικός συντελεστής συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης. Παρατηρείται ότι το μέγεθός του μειώνεται όσο η γωνία πρόσκρουσης αυξάνεται, ενώ το εύρος διακύμανσής του είναι σαφώς πιο περιορισμένο συγκριτικά με αυτό του καθέτου συντελεστή αναπήδησης.

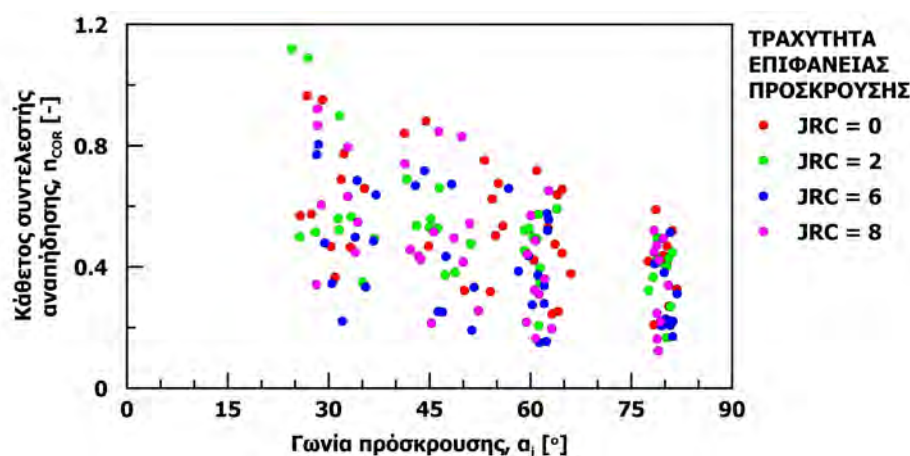


Σχήμα 5.55: Κινηματικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης και της τραχύτητας της επιφάνειας από τις δοκιμές με σφαιρικά τεμάχια

5.4.2.3 Σχολιασμός δοκιμών με πολυεδρικό τέμαχος

Στην ενότητα αυτή παρατίθενται τα αποτελέσματα των δοκιμών με το πολυεδρικό τέμαχος. Έτσι, η διακύμανση των τιμών που λαμβάνουν οι συντελεστές αναπήδησης οφείλεται τόσο στην επίδραση της γεωμετρίας επαφής όσο και στην τραχύτητα της επιφάνειας πρόσκρουσης.

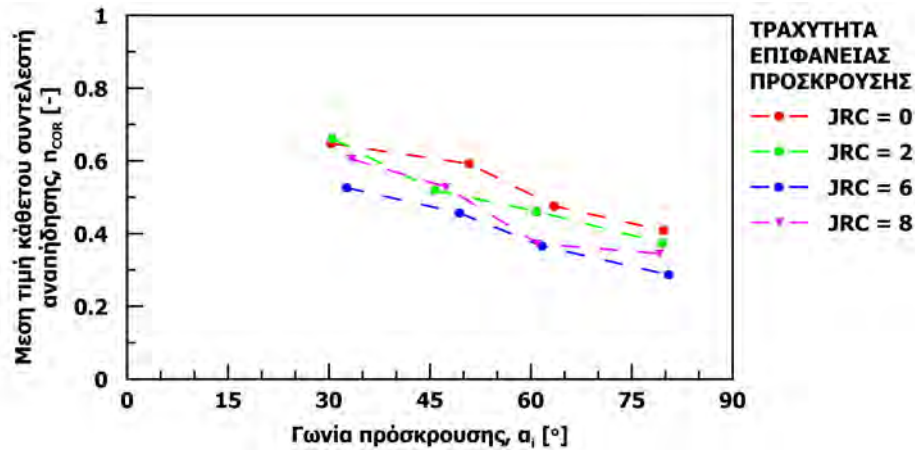
Στο σχήμα 5.56 παρουσιάζεται για το σύνολο των δοκιμών η σχέση μεταξύ του καθέτου συντελεστή αναπήδησης και της γωνίας πρόσκρουσης, με τα σημεία να είναι ομαδοποιημένα σύμφωνα με την τραχύτητα της επιφάνειας πρόσκρουσης. Οι δοκιμές επαληθεύουν το γενικότερο συμπέρασμα ότι η αύξηση της γωνίας πρόσκρουσης έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του καθέτου συντελεστή αναπήδησης.



Σχήμα 5.56: Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης και της τραχύτητας της επιφάνειας από τις δοκιμές με πολυεδρικά τεμάχη

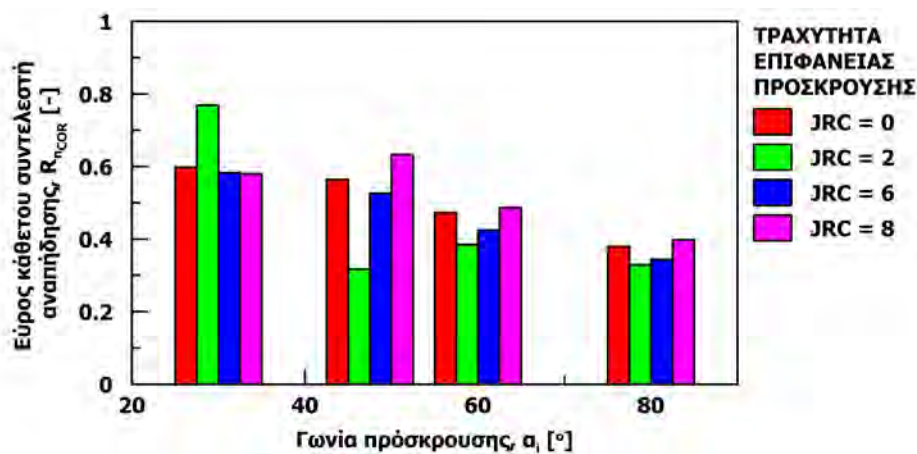
Παρατηρείται επίσης, ότι οι σειρές δοκιμών δεν διακρίνονται σε ομάδες βάσει της γωνίας πρόσκρουσης, όπως συμβαίνει στις αντίστοιχες δοκιμές με το σφαιρικό τέμαχος (Σχήμα 5.50), παρά το γεγονός ότι κάθε ανάλογη σειρά δοκιμών πραγματοποιήθηκε με ίδια διάταξη του μηχανισμού απελευθέρωσης. Τούτο οφείλεται στην διαφοροποίηση της κίνησης μέσα στον σωλήνα απελευθέρωσης. Είναι προφανές ότι στο σφαιρικό τέμαχος επικρατεί η κύλιση ενώ στο πολυεδρικό δοκίμιο η κίνηση μέσα στον σωλήνα απελευθέρωσης είναι ένας συνδυασμός κύλισης και ολίσθησης. Έτσι, οι αρχικές συνθήκες της κρούσης (ταχύτητα και γωνία πρόσκρουσης) εμφανίζουν μεγαλύτερη διακύμανση στα πολυεδρικά τεμάχη συγκριτικά με τα σφαιρικά.

Η μέση τιμή του καθέτου συντελεστή αναπήδησης (Σχήμα 5.57) δεν εμφανίζει σημαντική διαφοροποίηση με την τραχύτητα της επιφάνειας πρόσκρουσης. Τούτο παρατηρήθηκε και στις δοκιμές με σφαιρικά τεμάχη και συγκριτικά με αυτά λαμβάνει ελαφρώς μικρότερες τιμές σε κάθε σειρά δοκιμών.



Σχήμα 5.57: Μέση τιμή του καθέτου συντελεστή αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης σε επιφάνειες διαφορετικού βαθμού τραχύτητας, από τις δοκιμές με πολυεδρικά τεμάχια

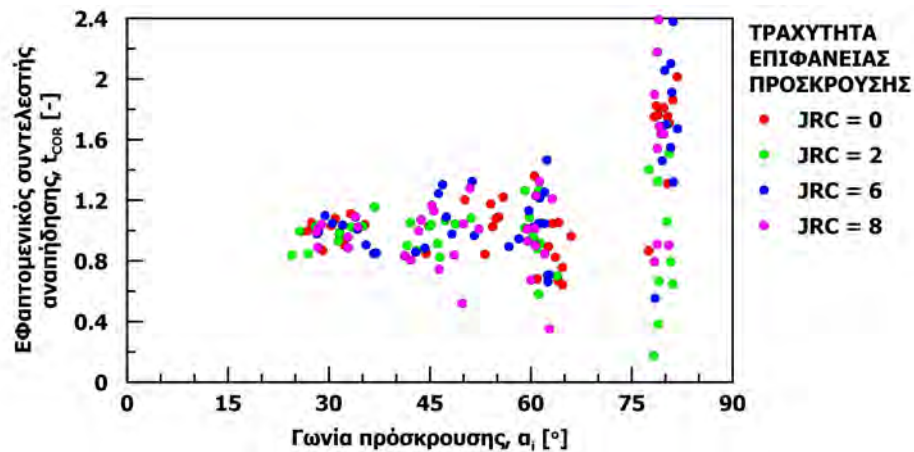
Στο σχήμα 5.58 παρουσιάζεται το εύρος τιμών που λαμβάνει ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης στις επιφάνειες διαφορετικής τραχύτητας, χρησιμοποιώντας την μέση τιμή της γωνίας πρόσκρουσης από κάθε σειρά δοκιμών.



Σχήμα 5.58: Εύρος καθέτου συντελεστή αναπήδησης ανάλογα της γωνίας πρόσκρουσης και της τραχύτητας της επιφάνειας από τις δοκιμές με πολυεδρικά τεμάχια

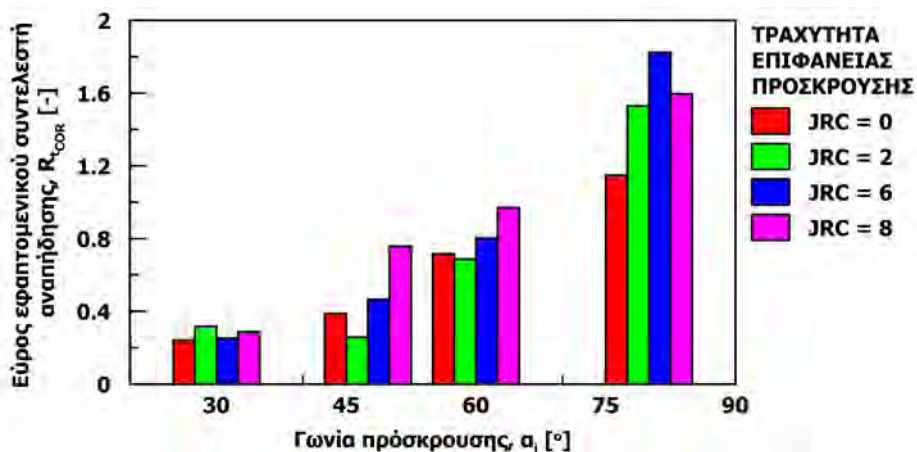
Το εύρος του καθέτου συντελεστή αναπήδησης είναι κατά προσέγγιση διπλάσιο από αυτό στις δοκιμές με τα σφαιρικά τεμάχια και μειώνεται όσο η γωνία πρόσκρουσης τείνει προς τις 90°. Όμως, σε αντίθεση με τα σφαιρικά τεμάχια, για δεδομένη γωνία πρόσκρουσης το εύρος τιμών δεν φαίνεται να εξαρτάται από την τραχύτητα της επιφάνειας πρόσκρουσης, συνεπώς συμπεραίνεται ότι η επίδραση του σχήματος καθίσταται ισχυρότερη της τραχύτητας, για τις εν λόγω πειραματικές συνθήκες.

Στο σχήμα 5.59 αναπαρίσταται ο επαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης, ανάλογα με την τραχύτητα της επιφάνειας. Η συμπεριφορά του επαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης των πολυεδρικών δοκιμών είναι ανάλογη με αυτήν στις δοκιμές με τα σφαιρικά τεμάχια (Σχήμα 5.53). Αναλυτικότερα, η μέση τιμή κυμαίνεται περί της μονάδας σε όλες τις επιφάνειες πρόσκρουσης και το εύρος τιμών αυξάνεται όσο η γωνία πρόσκρουσης τείνει προς τις 90°.



Σχήμα 5.59: Εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης και της τραχύτητας της επιφάνειας από τις δοκιμές με πολυεδρικά τεμάχια

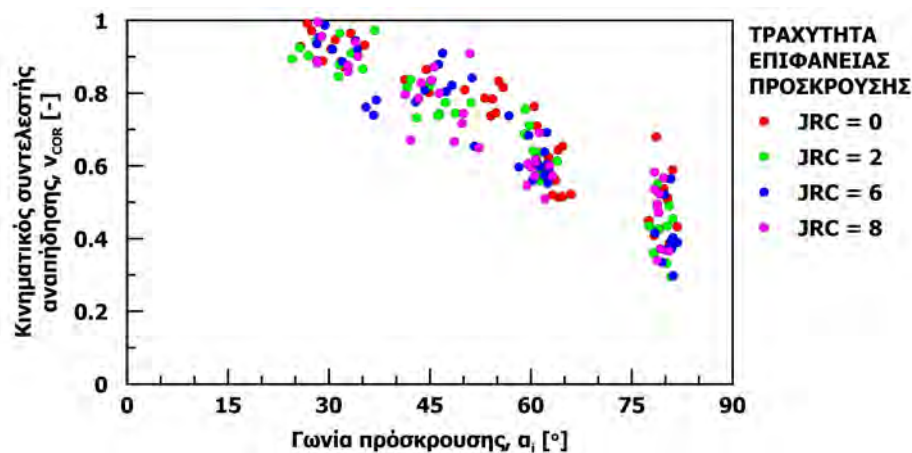
Το εύρος τιμών του επαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης εμφανίζει ανάλογη τάση συγκριτικά με τα σφαιρικά τεμάχια (Σχήμα 5.60), δηλαδή διευρύνεται όσο η γωνία πρόσκρουσης τείνει προς τις 90°, αλλά το μέγεθος του είναι σημαντικά μεγαλύτερο.



Σχήμα 5.60: Εύρος επαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης ανάλογα της γωνίας πρόσκρουσης και της τραχύτητας της επιφάνειας από τις δοκιμές με πολυεδρικά τεμάχια

Για τα πολυεδρικά τεμάχια και την λεία επιφάνεια πρόσκρουσης ($JRC = 0$), η αύξηση της γωνίας πρόσκρουσης οδηγεί στην αύξηση του εύρους που καταλαμβάνει ο συντελεστής, σε αντίθεση με τα σφαιρικά τεμάχια. Επίσης το εύρος είναι αντίστοιχο στις σειρές δοκιμών με παρόμοια γωνία πρόσκρουσης. Τα παραπάνω αποτελούν στοιχεία που καταδεικνύουν ότι η επίδραση του σχήματος είναι ισχυρότερη της τραχύτητας.

Ο κινηματικός συντελεστής αναπήδησης παρουσιάζεται στο σχήμα 5.61 συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης. Γενικώς, ο συντελεστής μειώνεται με την αύξηση της γωνίας πρόσκρουσης και το εύρος διακύμανσής του είναι αφενός μεγαλύτερο συγκριτικά με τις αντίστοιχες δοκιμές με σφαιρικά τεμάχια και αφετέρου είναι περιορισμένο ως προς αυτό του καθέτου συντελεστή αναπήδησης. Παρόλα αυτά δεν αντικατοπτρίζεται η μεταβολή της τραχύτητας της επιφάνειας πρόσκρουσης ούτε από τις τιμές που λαμβάνει ο συντελεστής αλλά ούτε και από την διακύμανσή τους.



Σχήμα 5.61: Κινηματικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης και της τραχύτητας της επιφάνειας από τις δοκιμές με πολυεδρικά τεμάχια

5.4.3 Επικάλυψη επιφάνειας με εδαφικό υλικό

Στις προηγούμενες ενότητες εξετάστηκε η επίδραση που έχει το είδος και η κατάσταση του γεωυλικού στους συντελεστές αναπήδησης, όταν η κρούση συμβαίνει σε βραχώδεις επιφάνειες. Όμως, σε ένα φυσικό πρανές είναι σύνηθες ο βραχώδης σχηματισμός να καλύπτεται επιφανειακά από εδαφικής φύσεως κορηματικά υλικά (πλευρικά κορήματα) το πάχος των οποίων βαίνει αυξανόμενο προς τον πόδα του πρανούς. Στην περίπτωση αυτή, οι αρχές της μηχανικής που διέπουν την απόκριση του τεμάχους στην κρούση διαφέρουν σημαντικά. Το εδαφικό υλικό παραμορφώνεται, σχηματίζοντας κρατήρα, από την διείδυση του τεμάχους στην μάζα του. Σε αντίθεση, η βραχώδης επιφάνεια εμφανίζει αμελητέα παραμόρφωση και δεν επιτρέπει την διείδυση του τεμάχους.

Αν και ο στόχος της παρούσας διατριβής επικεντρώνεται στην διερεύνηση της αναπήδησης σε βραχώδη υλικά, εξετάσθηκε συμπληρωματικά η επίδραση ύπαρξης στρώσης εδαφικού υλικού επί της βραχώδους επιφάνειας με σκοπό την προσομοίωση της παρουσίας των κορημάτων. Για την διερεύνηση του φαινομένου, εκτελέστηκαν δοκιμές στο εργαστήριο επικαλύπτοντας την βραχώδη επιφάνεια πρόσκρουσης με αργιλικό και αμμώδες υλικό καθώς και μείγματα αυτών, τόσο σε ξηρά κατάσταση όσο και με υγρασία.

Οι δοκιμές έγιναν με ελεύθερη πτώση σφαιρικών δοκιμών από τσιμεντοειδές ένεμα, ώστε η απόκριση των τεμαχών να είναι απαλλαγμένη από την επίδραση του σχήματος και της γεωμετρίας επαφής κατά την κρούση. Για τον έλεγχο του πάχους της στρώσης χρησιμοποιήθηκαν βάσεις από τσιμεντοειδές ένεμα με κατάλληλα διαμορφωμένες εσοχές (βλ. ενότητα 4.1.2.2). Οι παράμετροι που μεταβλήθηκαν ήταν η σύσταση και το πάχος της στρώσης του εδαφικού υλικού και το μέγεθος του δοκιμίου. Το υλικό επικάλυψης προσομοιώθηκε από δυο είδη αργίλων, χαμηλής και μέσης πλαστικότητας, καθώς και από δυο τύπους άμμου με διαφορετική κοκκομετρική διαβάθμιση, οι ιδιότητες των οποίων παρατίθενται στην ενότητα 4.2.2.

5.4.3.1 Επικάλυψη επιφάνειας με απόθεση ξηρού εδαφικού υλικού

Στην διερεύνηση αυτή, η εδαφική επικάλυψη υλοποιήθηκε με απλή απόθεση του υλικού στην ειδικά διαμορφωμένη εσοχή της βάσης πρόσκρουσης. Η προετοιμασία των εδαφικών υλικών περιλάμβανε την ξήρανσή τους στον εργαστηριακό κλίβανο και στην άργιλο έγινε επιπρόσθετα λειοτριβίση ώστε να είναι απαλλαγμένη από συσσωματώματα. Η προετοιμασία αυτή είχε σκοπό την επίτευξη παρόμοιων συνθηκών απόθεσης των υλικών μεταξύ των διαφορετικών διερευνήσεων που εκτελέστηκαν.

Αρχικά, έγιναν δοκιμές σε βάση χωρίς επικάλυψη από ύψος $h_d = 100\text{cm}$, χρησιμοποιώντας σφαίρες διαμέτρου 3 και 4cm, ώστε να αποτελέσουν τις τιμές αναφοράς για την συγκριτική αξιολόγηση της επίδρασης που έχει η επικάλυψη της επιφάνειας πρόσκρουσης. Έγιναν πέντε επαναλήψεις σε κάθε σειρά δοκιμών, καθώς τα αποτελέσματα έχουν ικανοποιητική επαναληψιμότητα, απόρροια του σχήματος και της ελεύθερης πτώσης των τεμαχών. Συγκεντρωτικά οι δοκιμές αυτές παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα, ενώ λεπτομερώς παρουσιάζονται στο παράρτημα 21.

Προκύπτει ότι το μέγεθος του τεμάχους επιδρά στον συντελεστή αναπήδησης (κάθετο ή κνηματικό). Το ύψος αναπήδησης περιορίζεται με την αύξηση της μάζας του τεμάχους, γεγονός που συνδέεται με την σφοδρότητα της κρούσης και των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων, που αμφότερα αυξάνουν με την μάζα του πίπτοντος τεμάχους. Τα αποτελέσματα (Πίνακας 5.27) αυτά είναι σε πλήρη συμφωνία με τις αντίστοιχες δοκιμές που παρουσιάζονται στην ενότητα 5.2.1.

Πίνακας 5.27: Δοκιμές αναφοράς για την διερεύνηση της επίδρασης της εδαφικής επικάλυψης: σφαιρικά τεμάχια διαμέτρου 3 και 4cm σε επιφάνεια πρόσκρουσης χωρίς υλικό επικάλυψης

Σειρά δοκ.	Αρ. επαν.	Διάμετρος d [cm]	Πάχος επ. t [mm]	Γωνία α_r [°]	Συντ. αναπήδησης v_{COR} [-]	n_{COR} [-]
21.1	5	3	0	88.3	0.67	0.67
21.2	5	4	0	87.1	0.56	0.56

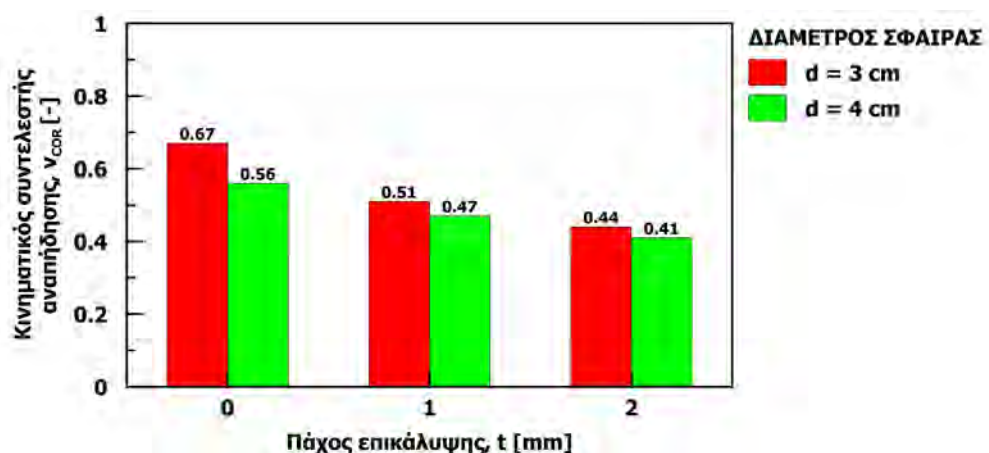
5.4.3.1.1 Επικάλυψη με αργιλικό υλικό

Χρησιμοποιήθηκε η άργιλος χαμηλής πλαστικότητας, που αποτέθηκε στις βάσεις με πάχη εσοχής 1 και 2mm και τα σφαιρικά τεμάχια διαμέτρου 3 και 4cm. Συνολικά εκτελέστηκαν 20 δοκιμές, οι μέσες τιμές των οποίων παρουσιάζονται στον πίνακα 5.28 και αναλυτικότερα παρατίθενται στο παράρτημα 21.

Πίνακας 5.28: Δοκιμές για την διερεύνηση της επίδρασης της εδαφικής επικάλυψης: σφαιρικά τεμάχια διαμέτρου 3 και 4cm σε επιφάνεια πρόσκρουσης με αργιλικό υλικό

Σειρά δοκ.	Αρ. επαν.	Διάμετρος d [cm]	Πάχος επ. t [mm]	Γωνία α_r [°]	Συντ. αναπήδησης v_{COR} [-]	n_{COR} [-]
21.3	5	3	1	87.7	0.51	0.51
21.4	5	4	1	87.0	0.47	0.47
21.5	5	3	2	83.3	0.44	0.44
21.6	5	4	2	85.6	0.41	0.41

Στο σχήμα 5.62 προβάλλονται οι μέσοι όροι του κινηματικού συντελεστή αναπήδησης συναρτήσει του πάχους της αργιλικής στρώσης και της διαμέτρου του τεμάχους. Επίσης, προβάλλονται και οι τιμές αναφοράς (για βάσεις χωρίς επικάλυψη, $t = 0mm$), με σκοπό την συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 5.62: Κινηματικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει του πάχους αργιλικής στρώσης επικάλυψης σε ξηρά κατάσταση

Παρατηρείται ότι η αύξηση τόσο του πάχους του υλικού πλήρωσης όσο και της μάζας του τεμάχους οδηγούν στην μείωση του κινηματικού συντελεστή αναπήδησης. Σε σχέση με την τιμή του συντελεστή αναπήδησης, που προκύπτει χωρίς την επικάλυψη της επιφάνειας, η παρουσία αργιλικού υλικού πάχους 1 και 2mm, προκαλεί μείωση του συντελεστή αναπήδησης κατά 24 και 34% αντίστοιχα, για τις σφαίρες με διάμετρο 3cm. Στις σφαίρες διαμέτρου 4cm η μείωση είναι μικρότερη, συγκεκριμένα ισούται με 16 και 27% αντίστοιχα.

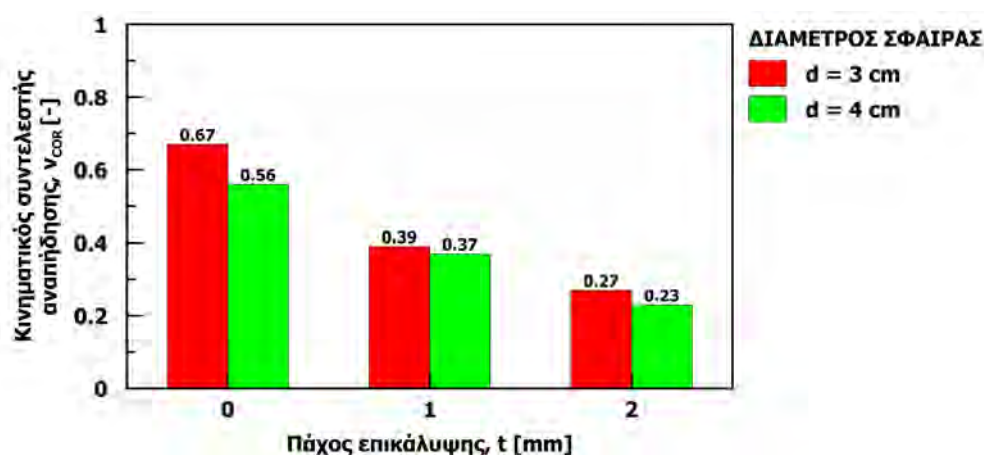
5.4.3.1.2 Επικάλυψη με αμμώδες υλικό

Ως υλικό πλήρωσης των βάσεων χρησιμοποιήθηκε η πρότυπη άμμος M31. Εκτελέστηκαν τέσσερις σειρές δοκιμών, δηλαδή συνολικά 20 επαναλήψεις. Ο μέσος όρος των συντελεστών αναπήδησης παρουσιάζεται στον πίνακα 5.29 και αναλυτικά οι δοκιμές στο παράρτημα 21.

Πίνακας 5.29: Δοκιμές για την διερεύνηση της επίδρασης της εδαφικής επικάλυψης: σφαιρικά τεμάχια διαμέτρου 3 και 4cm σε επιφάνεια πρόσκρουσης με αμμώδες υλικό

Σειρά δοκ.	Αρ. επαν.	Διάμετρος d [cm]	Πάχος επ. t [mm]	Γωνία α_r [°]	Συντ. αναπήδησης v_{COR} [-]	n_{COR} [-]
21.7	5	3	1	82.3	0.39	0.39
21.8	5	4	1	85.6	0.37	0.37
21.9	5	3	2	77.4	0.28	0.27
21.10	5	4	2	83.5	0.23	0.22

Στο σχήμα 5.63 αποτυπώνονται οι μέσες τιμές του κινηματικού συντελεστή αναπήδησης για τις βάσεις με και χωρίς επικάλυψη αμμώδους υλικού. Η συμπεριφορά του συντελεστή αναπήδησης είναι αντίστοιχη με αυτή που παρατηρήθηκε όταν η επικάλυψη της επιφάνειας ήταν από αργιλικό υλικό.



Σχήμα 5.63: Κινηματικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσεως του πάχους αμμώδους στρώσης επικάλυψης σε ξηρές συνθήκες

Πιο συγκεκριμένα, αύξηση του πάχους του υλικού πλήρωσης και της μάζας του τεμάχους έχουν σαν αποτέλεσμα την μείωση του συντελεστή αναπήδησης. Για πάχος 1 και 2mm η μεί-

ωση του συντελεστή αναπήδησης σε σχέση με την αναπήδηση χωρίς επικάλυψη της βάσεως, για την σφαίρα διαμέτρου 3cm είναι ίση με 42 και 57% και στην σφαίρα των 4cm ισούται με 34 και 59%, αντίστοιχα.

Συγκρίνοντας την αναπήδηση για τα δύο υλικά επικάλυψης, προκύπτει ότι η μείωση των συντελεστών αναπήδησης για το αμμώδες υλικό είναι μεγαλύτερη, σχεδόν διπλάσια, σε σχέση με το αργιλικό υλικό πλήρωσης. Η συμπεριφορά αυτή αποδίδεται στην διαφορά που έχει η δομή του εδαφικού σκελετού μεταξύ των δυο περιπτώσεων. Η άμμος αποτελείται από μεγαλύτερου μεγέθους στοιχεία – κόκκους σε σχέση με αυτό των πλακιδίων της αργίλου. Έτσι, δεδομένου ότι η απόθεση των υλικών έγινε με τον ίδιο τρόπο, τα κενά καταλαμβάνουν περισσότερο χώρο στην περίπτωση της άμμου. Ως αποτέλεσμα ο εδαφικός σκελετός της άμμου είναι ασθενέστερος με συνέπεια οι αναπτυσσόμενες τριβές που ανθίστανται στην διείδυση του τεμάχους να είναι λιγότερες. Στο συμπέρασμα αυτό συνηγορεί και η μακροσκοπική παρατήρηση των αποτυπωμάτων του σημείου πρόσκρουσης, τα οποία είχαν μεγαλύτερη έκταση στις δοκιμές με αμμώδες υλικό από αυτήν στις δοκιμές με το αργιλικό υλικό, που συνεπάγεται ότι η διείδυση του τεμάχους ήταν μεγαλύτερη.

5.4.3.1.3 Επικάλυψη με μείγμα αμμώδους και αργιλικού υλικού

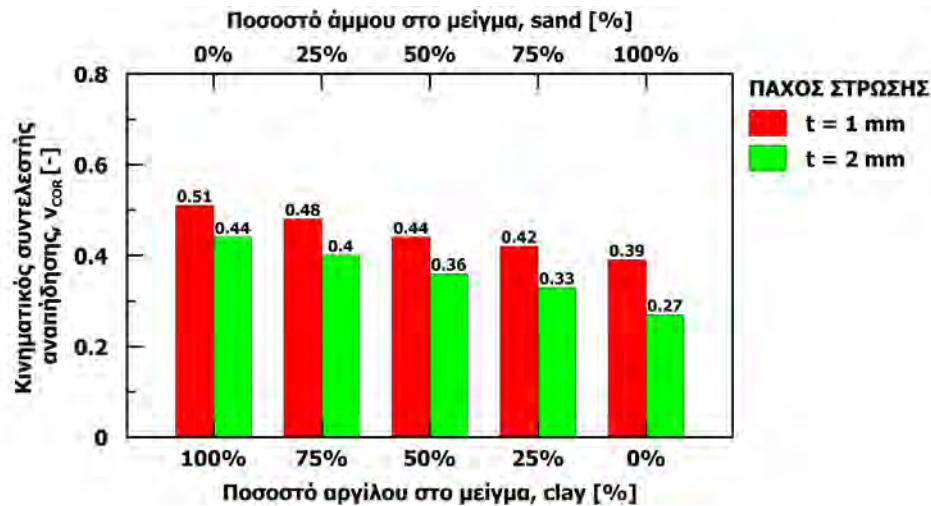
Στην φυσική τους θέση, οι ζώνες κορημάτων αποτελούνται από υλικά σε όλο το φάσμα της κοκκομετρικής διαβάθμισης. Δεδομένου ότι στις προηγούμενες διερευνήσεις παρατηρήθηκε σημαντική διαφοροποίηση στο μέγεθος του συντελεστή αναπήδησης ανάλογα με το υλικό πλήρωσης, η μελέτη συνεχίστηκε εξετάζοντας την επικάλυψη της επιφανείας από μείγμα αμμώδους και αργιλικού υλικού.

Έτσι, έγιναν έξι πρόσθετες σειρές δοκιμών δημιουργώντας μείγματα με τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στις παραπάνω διερευνήσεις σε ξηρά κατάσταση, μεταβάλλοντας την κατά βάρος περιεκτικότητά τους. Παρασκευάστηκαν τρία μείγματα με κατά βάρος ποσοστά αργίλου – άμμου: 75-25%, 50-50% και 25-75%. Οι δοκιμές έγιναν για πάχη στρώσεων $t = 1$ και $2mm$, χρησιμοποιώντας σφαιρικά δοκίμια διαμέτρου 3cm. Για κάθε συνδυασμό έγιναν πέντε επαναλήψεις, δηλαδή συνολικά 30 δοκιμές. Τα αποτελέσματα των δοκιμών συνοψίζονται στον πίνακα 5.30 και αναλυτικότερα παρατίθενται στο παράρτημα 21.

Πίνακας 5.30: Δοκιμές ελεύθερης πτώσης με σφαιρικά τεμάχια διαμέτρου 3cm, για την διερεύνηση της επίδρασης της εδαφικής επικάλυψης από μείγμα αργίλου και άμμου

Σειρά δοκ.	Αρ. επαν.	κ.β. % αργ. - αμμ.	Πάχος επ. t [mm]	Γωνία α_r [°]	Συντ. αναπήδησης v_{COR} [-]	n_{COR} [-]
21.11	5	75-25	1	84.4	0.48	0.48
21.12	5	50-50	1	87.5	0.44	0.44
21.13	5	25-75	1	85.2	0.42	0.42
21.14	5	75-25	2	83.2	0.40	0.40
21.15	5	50-50	2	86.9	0.36	0.36
21.16	5	25-75	2	85.2	0.33	0.33

Στο σχήμα 5.64 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του μέσου όρου κάθε σειράς δοκιμών με τα μείγματα των υλικών. Επίσης, παρατίθενται τα αποτελέσματα από τις αντίστοιχες δοκιμές με υλικό επικάλυψης αμιγώς αμμώδες ή αργιλικό, με σκοπό την σύγκρισή τους.



Σχήμα 5.64: Κινηματικός συντελεστής συναρτήσει του ποσοστού αργίλου-άμμου στην στρώσης επικάλυψης, για πάχη επικάλυψης $t = 1$ και 2 mm

Αρχικά, παρατηρείται ότι ο κινηματικός συντελεστής αναπήδησης είναι συστηματικά μικρότερος στις βάσεις με πάχος $t = 2\text{ mm}$. Συνεπώς, το πάχος του υλικού επικάλυψης αποτελεί καταλυτική παράμετρο στην απόκριση του τεμάχους, και στην περίπτωση αυτή. Επίσης, παρατηρείται ότι η μείωση του ποσοστού συμμετοχής της αργίλου στο μείγμα έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση του συντελεστή αναπήδησης, κάτι που είναι σε συμφωνία με τις δυο οριακές καταστάσεις που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες υποενότητες. Πιο συγκεκριμένα, η μείωση του συντελεστή αναπήδησης εμφανίζει σταθερό ρυθμό με την μεταβολή του ποσοστού συμμετοχής των υλικών στο μείγμα. Έτσι, τα ανωτέρω δύναται να συσχετισθούν μεταξύ τους με τη μέθοδο της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης. Η τιμή του συντελεστή αναπήδησης (εξαρτημένη μεταβλητή) μπορεί να εκτιμηθεί από το ποσοστό της αργίλου (*clay*) και το πάχος (t) της στρώσης (ανεξάρτητες μεταβλητές). Η μαθηματική σχέση διαμορφώνεται ως εξής:

$$v_{COR} = 0.465 + 0.142 \frac{clay}{100} - 0.088t \quad (5.4)$$

clay το ποσοστό αργίλου στο μείγμα [%]

t το πάχος της στρώσης του μείγματος σε mm

Η σχέση αυτή, αν και στατιστικά σημαντική (συντελεστής συσχέτισης $R^2 = 0.98$ και τυπικό σφάλμα $\sigma = 0.017$), υστερεί από σκοπιάς εφαρμοσιμότητας σε πρακτικές εφαρμογές αφού δεν υπεισέρχονται τα χαρακτηριστικά της πρόσκρουσης. Η ταχύτητα και η μάζα του τεμάχους την στιγμή της κρούσης ασκούν σημαντική επίδραση στην τιμή του συντελεστή αναπήδησης, όπως σχολιάσθηκε παραπάνω. Ωστόσο, δεν υπεισέρχονται στην σχέση 5.4, καθώς τα μεγέθη

αυτά ήταν σταθερά στην διερεύνηση. Η σχέση αυτή παρατίθεται για ποιοτικούς λόγους, αφού ποσοτικοποιεί τις προαναφερθείσες εξαρτήσεις. Πιο συγκεκριμένα για δεδομένο πάχος στρώσης, η αύξηση της περιεκτικότητας του μείγματος κατά 10% σε άργιλο οδηγεί στην αύξηση του συντελεστή αναπήδησης κατά περίπου 1.5%, ενώ για δεδομένη σύσταση μείγματος, ο διπλασιασμός του πάχους οδηγεί στην μείωση κατά περίπου 10% του συντελεστή αναπήδησης.

Έτσι, συμπεραίνεται ότι για την αύξηση της αποτελεσματικότητας μιας τάφρου αρκεί η πλήρωσή της με ικανοποιητικού πάχους εδαφικό υλικό. Επίσης, η επικρατούσα πρακτική να πληρώνονται οι τάφροι ανάσχεσης με αμμώδες και χονδρόκοκκο υλικό είναι ορθή, καθώς επιτυγχάνεται περισσότερη απόσβεση της κίνησης συγκριτικά με την πλήρωση της τάφρου με αργιλικό υλικό.

5.4.3.2 Επικάλυψη επιφάνειας με διαστρωμένο αργιλικό υλικό

Η πειραματική διερεύνηση που παρουσιάζεται ακολούθως έχει σκοπό την προσομοίωση της λεπτής αργιλικής επικάλυψης στην επιφάνεια πρόσκρουσης, αποκαλούμενη και ως «αργιλικό φιλμ». Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2, το φαινόμενο των καταπτώσεων εντείνεται σημαντικά σε περιόδους έξαρσης των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων. Υπό τις συνθήκες αυτές, αργιλικό υλικό που βρίσκεται στην επιφάνεια του πρανούς ή στις ασυνέχειες της βραχομάζας παρασύρεται κατά την επιφανειακή απορροή του νερού και επικάθεται σε οριζόντιες επιφάνειες, κυρίως στον πόδα του πρανούς. Οι θέσεις αυτές εμφανίζουν, εν γένει, αυξημένες πιθανότητες να αποτελέσουν σημεία πρόσκρουσης τεμαχών, συνεπώς η διερεύνηση της επίδρασης της λεπτής αργιλικής στρώσης στην απόκριση του τεμάχους έχει πρακτικό ενδιαφέρον.

5.4.3.2.1 Διάστρωση με αργιλικό υλικό στο όριο υδαρότητας

Για την εργαστηριακή διερεύνηση, χρησιμοποιήθηκε η άργιλος χαμηλής πλαστικότητας με περιεκτικότητα σε νερό περίξ της τιμής του ορίου υδαρότητας. Έτσι, το υλικό είχε αρκούντως υδαρή μορφή ώστε να είναι εφικτή η επάλειψή του στην επιφάνεια πρόσκρουσης με χρήση βούρτσας. Η διαδικασία αυτή έγινε συγχρόνως σε δυο όμοιες επιφάνειες, η μια χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση της δοκιμής και η άλλη για την μέτρηση του πάχους με χρήση μικρομέτρου ακριβείας $\pm 0.01mm$.

Έγιναν δώδεκα σειρές δοκιμών, απελευθερώνοντας σφαιρικά τεμάχη διαμέτρου $d = 3cm$ από ύψος $h_d = 150cm$, δηλαδή με ταχύτητα πρόσκρουσης περίπου $v_i = 5.5ms^{-1}$. Η πρώτη σειρά δοκιμών έγινε σε βάση χωρίς επικάλυψη, ώστε να αποτελέσει την τιμή αναφοράς του κινηματικού συντελεστή αναπήδησης. Στις επόμενες δέκα σειρές δοκιμών γινόταν μια πρόσθετη επάλειψη της βάσης κάθε φορά και τέλος στην τελευταία σειρά δοκιμών έγιναν 2 επάλειψεις. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 5.31 και αναλυτικότερα στο παράρτημα 22.

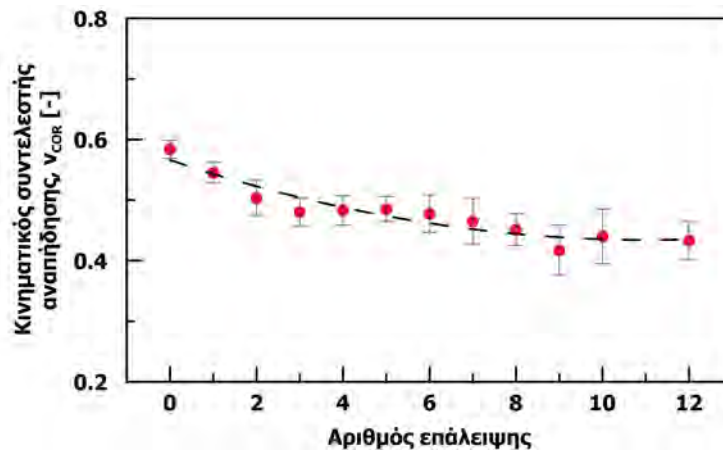
Πίνακας 5.31: Δοκιμές για την διερεύνηση της επίδρασης της εδαφικής επικάλυψης με αργιλικό υλικό σε υδαρή κατάσταση

Σειρά δοκ.	Αρ. επαν.	αριθμός % επάλειψης	Γωνία α_r [°]	Συντ. αναπήδησης	
				ν_{COR} [-]	η_{COR} [-]
22.1	5	0	88.8	0.58	0.58
22.2	5	1	86.3	0.55	0.55
22.3	5	2	86.7	0.50	0.50
22.4	5	3	87.0	0.50	0.48
22.5	5	4	86.8	0.48	0.48
22.6	5	5	85.8	0.49	0.49
22.7	5	6	86.0	0.48	0.48
22.8	5	7	86.9	0.47	0.47
22.9	5	8	87.8	0.45	0.45
22.10	5	9	86.2	0.42	0.42
22.11	5	10	87.5	0.44	0.44
22.12	5	12	87.5	0.43	0.43

Στο σχήμα 5.65 παρουσιάζεται ο μέσος κινηματικός συντελεστής αναπήδησης και η τυπική απόκλιση για κάθε σειρά δοκιμών συναρτήσει του αριθμού των επαλείψεων. Με την διαδικασία αυτή επιτεύχθηκε αρχικά πάχος στρώσης της τάξεως των 0.05mm , η οποία επηρέασε την απόκριση του τεμάχους προκαλώντας την χαμηλότερη αναπήδησή του συγκριτικά με την επιφάνεια χωρίς επικάλυψη. Έτσι, συνεχίστηκε η εφαρμογή επάλληλων στρώσεων με σκοπό την σταδιακή αύξηση του πάχους της στρώσης. Όμως, μετά την τρίτη επάλειψη το πάχος δεν παρουσίαζε ανάλογη αύξηση. Παρόλα αυτά η διαδικασία συνεχίστηκε καθώς η ανάλυση της κίνησης και ο προσδιορισμός των συντελεστών αναπήδησης εκπονείται σε επόμενα στάδια.

Η κατάσταση αυτή αντικατοπτρίζεται στο σχήμα 5.65, όπου χάνεται η αναλογικότητα στην μεταβολή του κινηματικού συντελεστή αναπήδησης μετά την τρίτη επάλειψη. Οι τιμές εμφανίζουν μια ανεπαίσθητη μείωση, που είναι σε συμφωνία με την περιορισμένη και ανομοιόμορφη μεταβολή του πάχους της στρώσης.

Η αποτυχία αύξησης του πάχους πέραν της τρίτης στρώσης αποδίδεται στην υδαρή κατάσταση του υλικού. Κατά την διάστρωση, παρασυρόταν το υλικό που προϋπήρχε στην βάση από την βούρτσα, με αποτέλεσμα η επικάλυψη να γίνεται ολοένα και πιο ανομοιόμορφη, όπως φαίνεται και από την αύξηση της τυπικής απόκλισης που παρουσιάζεται με την αύξηση του αριθμού των επαλείψεων. Όμως, η διαδικασία αυτή αποτέλεσε την βάση της ιδέας για την επίτευξη ιδιαίτερα λεπτών στρώσεων αργιλικού υλικού σε ξηρά κατάσταση, διερεύνηση που παρουσιάζεται παρακάτω.



Σχήμα 5.65: Κινηματικός συντελεστής συναρτήσει αριθμού επαλείψεων υδαρών αργιλικών στρώσεων

5.4.3.2.2 Διάστρωση με αργιλικό υλικό σε αποξηραμένη κατάσταση

Στην διερεύνηση αυτή ακολουθήθηκε η διαδικασία που περιγράφεται στην παραπάνω ενότητα με μια παραλλαγή. Μετά την διάστρωση του αργιλικού υλικού σε υδαρή κατάσταση, γινόταν η ξήρανση της στρώσης με χρήση αέρα μέχρι τον αποχρωματισμό του υλικού. Έτσι, επιτεύχθηκε ιδιαίτερα μικρό πάχος στρώσης σε σταθερή κατάσταση, επιτρέποντας την εφαρμογή επάλληλων στρώσεων για την σταδιακή αύξηση του πάχους και την διερεύνηση της επίδρασης που έχει στην αναπήδηση του τεμάχους.

Χρησιμοποιήθηκαν τα σφαιρικά τεμάχια διαμέτρου 3cm, τα οποία απελευθερώθηκαν από ύψη $h_d = 100$ και 150cm, ώστε εκτός του πάχους της στρώσης, να αξιολογηθεί επιπρόσθετα η επίδραση της ταχύτητας πρόσκρουσης στην αναπήδηση. Συνολικά έγιναν 14 σειρές δοκιμών με πέντε επαναλήψεις σε κάθε σειρά, οι οποίες συνοψίζονται στους πίνακες 5.32 και 5.33 για τις δοκιμές από ύψος ρίψης $h_d = 100$ και 150cm, αντίστοιχα. Στο παράρτημα 23 παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα κάθε σειράς δοκιμών.

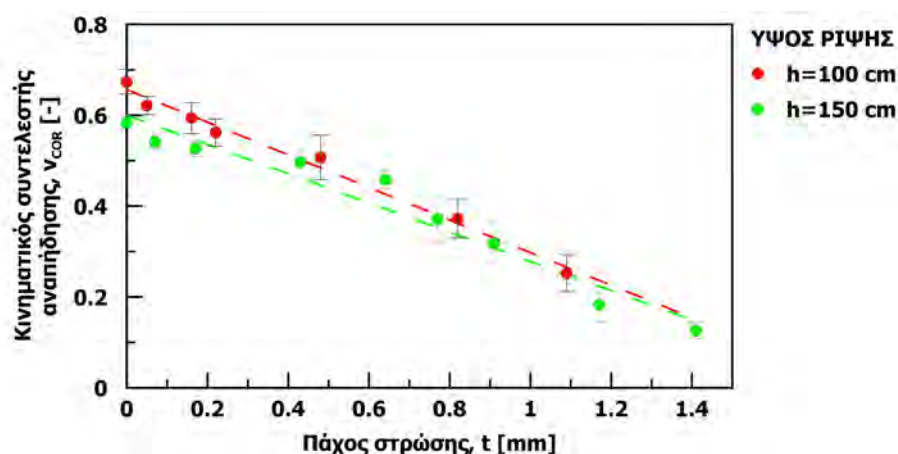
Πίνακας 5.32: Δοκιμές για την διερεύνηση της επίδρασης της εδαφικής επικάλυψης με αργιλικό υλικό σε ξηρή κατάσταση από ύψος απελευθέρωσης $h_d = 100cm$

Σειρά δοκ.	Αρ. επαν.	Επάλειψη		Γωνία α_r [°]	Συντ. αναπήδησης	
		α/α	t [mm]		ν_{COR} [-]	n_{COR} [-]
23.1	5	1	0.05	86.1	0.62	0.62
23.2	5	2	0.16	86.5	0.59	0.59
23.3	5	3	0.21	84.2	0.56	0.56
23.4	5	5	0.48	86.3	0.51	0.51
23.5	5	8	0.82	86.5	0.37	0.37
23.6	5	10	1.09	85.8	0.25	0.25

Πίνακας 5.33: Δοκιμές για την διερεύνηση της επίδρασης της εδαφικής επικάλυψης με αργιλικό υλικό σε ξηρή κατάσταση από ύψος απελευθέρωσης $h_d = 150\text{cm}$

Σειρά δοκ.	Αρ. επαν.	Επάλειψη		Γωνία $\alpha_r [^\circ]$	Συντ. αναπήδησης	
		α/α	$t[\text{mm}]$		$\nu_{\text{COR}}[-]$	$\eta_{\text{COR}}[-]$
23.7	5	1	0.07	87.9	0.54	0.54
23.8	5	2	0.17	87.2	0.53	0.53
23.9	5	4	0.43	85.6	0.50	0.50
23.10	5	6	0.64	87.7	0.46	0.46
23.11	5	8	0.77	84.4	0.37	0.37
23.12	5	10	0.91	82.6	0.32	0.32
23.13	5	12	1.17	82.6	0.18	0.18

Στο σχήμα 5.66 παρουσιάζεται η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση για κάθε σειρά δοκιμών, ομαδοποιημένα σύμφωνα με το ύψος απελευθέρωσης. Προβάλλονται επίσης οι τιμές από τις δοκιμές σε βάση χωρίς επικάλυψη, οι οποίες προσδιορίστηκαν στις προηγούμενες διερευνήσεις της ενότητας αυτής.

**Σχήμα 5.66:** Κινηματικός συντελεστής συναρτήσει αριθμού επαλείψεων ξηρών αργιλικών στρώσεων

Από το παραπάνω σχήμα καθίσταται προφανές ότι η αύξηση του πάχους της στρώσης έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του συντελεστή αναπήδησης. Επίσης, το ίδιο αποτέλεσμα έχει η αύξηση του ύψους απελευθέρωσης, δηλαδή της ταχύτητας πρόσκρουσης.

Επιπρόσθετα, προκύπτει ότι η επίδραση του τρόπου διάστρωσης του υλικού είναι σημαντική. Στην ενότητα 5.4.3.1.1 παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα για την απλή απόθεση της ίδιας αργίλου σε ξηρή μορφή χωρίς συσσωματώματα. Στην περίπτωση αυτή, η μέση τιμή του συντελεστή αναπήδησης υπολογίστηκε ίση με περίπου $\nu_{\text{COR}} = 0.5$, για πάχος υλικού $t = 1\text{mm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 100\text{cm}$. Με την παρούσα μεθοδολογία διάστρωσης και για τις ίδιες συνθήκες ρίψης, η τιμή του συντελεστή αναπήδησης κυμαίνεται περί του 0.3, δηλαδή 40% μικρότερη.

Αν και η στρώση αποξηράνθηκε επιφανειακά, ποσοστό νερού μεταξύ των πλακιδίων της αργίλου παρέμεινε, καθώς δεν σχηματίστηκαν ρωγμές στην επιφάνεια. Έτσι, η στρώση περιείχε νερό και άρα ήταν μαλακότερη συγκριτικά με την πλήρως ξηρή κατάσταση που είχε στην πρώτη διερεύνηση. Συνεπώς, η ικανότητα απόσβεσης ενέργειας της στρώσης ήταν μεγαλύτερη και άρα ο συντελεστής αναπήδησης μικρότερος. Επίσης, ενδεχομένως η απόσβεση της ενέργειας να επηρεάζεται από διαφοροποίηση στη δομή της στρώσης (προσανατολισμός πλακιδίων) που οφείλεται στην διαφορετική μεθοδολογία διάστρωσης στις δυο περιπτώσεις. Όμως, η επίδραση του τρόπου διαμόρφωσης στην δομή της στρώσης δεν ήταν εφικτό να μελετηθεί και υπερβαίνει τους στόχους της παρούσας έρευνας.

5.4.3.2.3 Διάστρωση με αναζυμωμένο αργιλικό υλικό

Στην διερεύνηση αυτή χρησιμοποιήθηκαν δυο άργιλοι, μια χαμηλής και μια μέσης πλαστικότητας, τα χαρακτηριστικά των οποίων παρατίθενται στην ενότητα 4.2.2. Η προετοιμασία του υλικού έγινε με διαδικασία παρόμοια αυτής που προδιαγράφεται για την εκτέλεση της δοκιμής προσδιορισμού του ορίου πλαστικότητας. Συγκεκριμένα, προστίθεται νερό σε ξηρό υλικό που είναι απαλλαγμένο από συσσωματώματα και πλάθεται μέχρι την ομογενοποίησή του. Στην συνέχεια, γίνεται η διαμόρφωση της στρώσης χρησιμοποιώντας σπάτουλα για την επιπεδοποίηση της επιφάνειας με την βοήθεια των οδηγών της βάσης, εξασφαλίζοντας έτσι το επιθυμητό πάχος.

Στις αρχικές δοκιμές το ποσοστό υγρασίας επιλέχθηκε με γνώμονα την εύκολη διάστρωση και διαμόρφωση του υλικού στην βάση. Έτσι το υλικό είχε σχετικά υψηλή περιεκτικότητα νερού. Όμως, η συμπεριφορά στην κρούση ήταν πλήρως πλαστική, δηλαδή το τέμαχος εμφάνιζε μηδενική αναπήδηση. Συνεπώς, έπρεπε να περιοριστεί το ποσοστό υγρασίας ώστε να γίνει πιο σκληρή η στρώση του υλικού. Περιορίζοντας όμως την περιεκτικότητα σε νερό, η διάστρωση ήταν προβληματική καθώς το υλικό δεν ήταν αρκούτσως εργάσιμο για την ομαλοποίηση της επιφάνειας με αποτέλεσμα η στρώση να προκύπτει ανομοιόμορφη.

Για την αντιμετώπιση του παραπάνω προβλήματος, η διάστρωση του υλικού έγινε με σχετικά αυξημένη περιεκτικότητα σε νερό και οι δοκιμές εκτελέστηκαν με χρονική υστέρηση κάποιων ωρών από την διαμόρφωση των βάσεων. Έτσι, επιτεύχθηκε ομοιόμορφη επιφάνεια της στρώσης με περιορισμένη υγρασία εξαιτίας της φυσικής ξήρανσης του υλικού στο περιβάλλον του εργαστηρίου. Μετά την εκτέλεση των δοκιμών γινόταν προσδιορισμός της υγρασίας και μέτρηση του πάχους της στρώσης.

Πραγματοποιήθηκαν αρκετές απόπειρες με την προαναφερθείσα διαδικασία, εκτελώντας περισσότερες από 180 δοκιμές σε σημαντικά διαφοροποιημένες συνθήκες. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν δυο άργιλοι διαφορετικής πλαστικότητας, πάχη στρώσης $t = 1, 2$ και 4mm , σφαίρες διαμέτρου $d = 3$ και 4cm , ρίψεις από ύψη $h_g = 100$ και 150cm και η περιεκτικότητα σε νερό κυμάνθηκε σε μεγάλο εύρος, μέχρι τα όρια συρρίκνωσης των δυο αργιλικών υλικών.

Παρόλα αυτά, τα αποτελέσματα δεν ήταν ικανοποιητικά, υπό την έννοια ότι στην συντριπτική πλειοψηφία των δοκιμών η αναπήδηση ήταν μηδενική. Συνεπώς μόνο περιορισμένα

ποιοτικά συμπεράσματα διατυπώνονται από την εν λόγω διερεύνηση και δεν παρατίθενται τα αποτελέσματά της. Αρχικά, επαληθεύτηκαν τα συμπεράσματα από τις προηγούμενες διερευνήσεις, δηλαδή ότι η αύξηση του πάχους της στρώσης, της μάζας του τεμάχου αλλά και της ταχύτητας πρόσκρουσης συντελούν στον περιορισμό της αναπήδησης. Επίσης, η ύπαρξη υγρασίας επιδρά καταλυτικά στην αύξηση της ικανότητας απόσβεσης της στρώσης, οδηγώντας σε σαφέστερα μικρότερα ύψη αναπήδησης.

5.4.3.2.4 Διάστρωση με αναζυμωμένο εδαφικό μείγμα

Στην συνέχεια, δημιουργήθηκαν μείγματα με την άργιλο χαμηλής πλαστικότητας, τις πρότυπες άμμους M31 και M34 και νερό. Χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια κατά βάρος ποσοστά συμμετοχής στο μείγμα με αυτά στην διερεύνηση των υλικών σε ξηρά κατάσταση. Πιο συγκεκριμένα, η συμμετοχή άργιλου προς άμμο ήταν 75–25%, 50–50% και 25–75% αντίστοιχα. Οι δοκιμές έγιναν για πάχη στρώσεων $t = 1$ και 2mm , από ύψος ρίψης $h_d = 100\text{cm}$ με σφαιρικά τεμάχια διαμέτρου $d = 3\text{cm}$. Συνολικά έγιναν 72 δοκιμές, εκτελώντας έξι επαναλήψεις για κάθε συνδυασμό. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στους πίνακες 5.34 και 5.35 για τα μείγματα με τις άμμους M31 και M34 και παρατίθενται αναλυτικά στο παράρτημα 24.

Πίνακας 5.34: Δοκιμές ελεύθερης πτώσης για την διερεύνηση της επίδρασης της εδαφικής επικάλυψης από αναζυμωμένο μείγμα άργιλου και άμμου M31

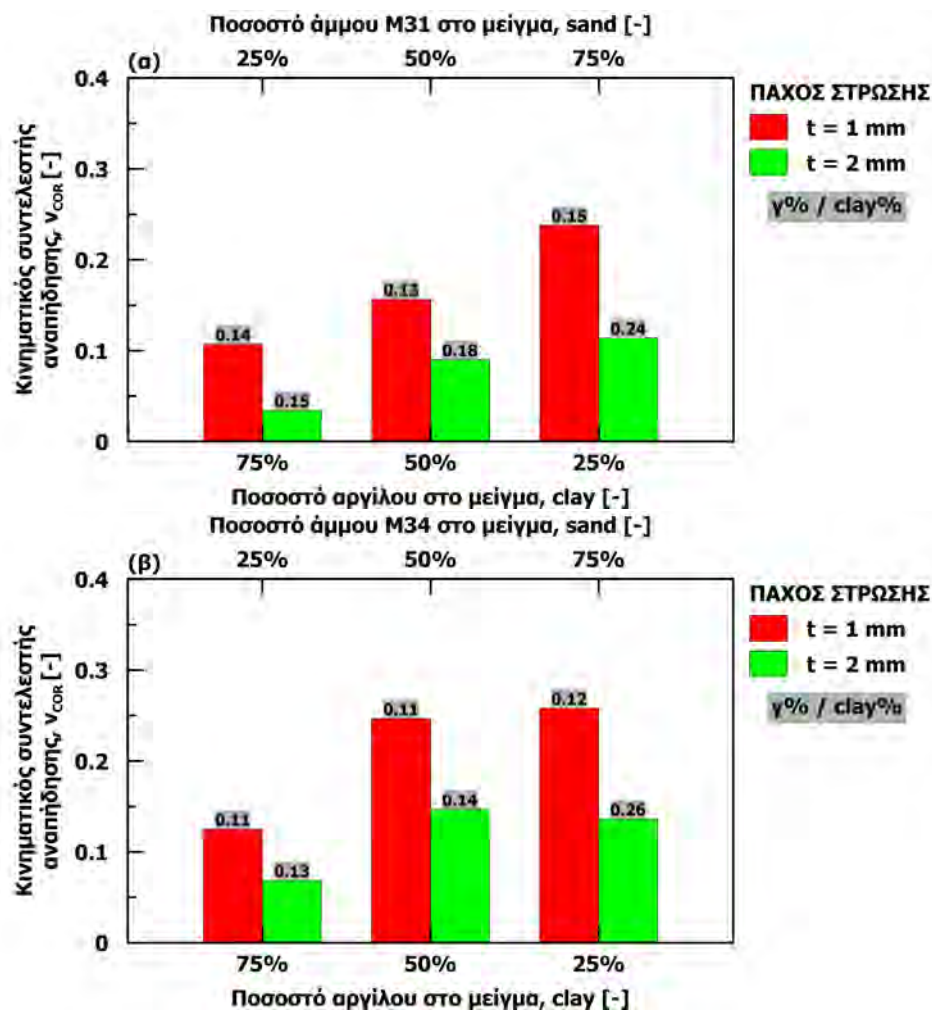
Σειρά δοκ.	Αρ. επαν.	κ.β. % αργ. - άμμου	Πάχος $t[\text{mm}]$	Υγρασία $\gamma[\%]$	Γωνία $\alpha_r[^\circ]$	Συντ. αναπήδησης $v_{\text{COR}}[-]$	$n_{\text{COR}}[-]$
24.1	6	75-25	1	10.4	74.9	0.11	0.10
24.2	6	75-25	2	11.2	69.0	0.03	0.03
24.3	6	50-50	1	6.7	78.2	0.16	0.15
24.4	6	50-50	2	8.9	78.9	0.09	0.09
24.5	6	25-75	1	3.8	80.3	0.24	0.23
24.6	6	25-75	2	7.1	72.5	0.11	0.11

Πίνακας 5.35: Δοκιμές ελεύθερης πτώσης για την διερεύνηση της επίδρασης της εδαφικής επικάλυψης από αναζυμωμένο μείγμα άργιλου και άμμου M34

Σειρά δοκ.	Αρ. επαν.	κ.β. % αργ. - άμμου	Πάχος $t[\text{mm}]$	Υγρασία $\gamma[\%]$	Γωνία $\alpha_r[^\circ]$	Συντ. αναπήδησης $v_{\text{COR}}[-]$	$n_{\text{COR}}[-]$
24.7	6	75-25	1	8.6	81.6	0.12	0.12
24.8	6	75-25	2	10.0	63.7	0.07	0.06
24.9	6	50-50	1	5.3	85.2	0.24	0.24
24.10	6	50-50	2	7.1	80.2	0.15	0.15
24.11	6	25-75	1	3.1	86.6	0.26	0.26
24.12	6	25-75	2	6.5	78.3	0.14	0.13

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα 5.67, όπου απεικονίζεται σε γραμμοσκιασμένο χωρίο η τιμή του λόγου υγρασίας προς την περιεκτικότητα του μείγματος σε άργιλο.

Το μείγμα με την άμμο M34 παρουσιάζει μια ανομοιομορφία για πάχος στρώσης 2mm. Πιο συγκεκριμένα, ο μέσος όρος του συντελεστή αναπήδησης είναι μεγαλύτερος στο μείγμα με συμμετοχή 50% αργίλου από ότι για συμμετοχή 25%, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες σειρές δοκιμών, όπου η αύξηση του ποσοστού αργίλου οδηγεί στην μείωση των συντελεστών αναπήδησης. Αυτό αποδίδεται στην μεγαλύτερη περιεκτικότητα νερού ως προς το ποσοστό αργίλου στο μείγμα, γεγονός που κάνει την άργιλο μαλακότερη, με αποτέλεσμα την μεγαλύτερη απόσβεση κίνησης του πίπτοντος τεμάχους.



Σχήμα 5.67: Κινηματικός συντελεστής συναρτήσει του πάχους στρώσης αναζυμωμένου μείγματος αργίλου και άμμου (α) M31 και (β) M34

Τα μείγματα με την άμμο M34 αποδίδουν ελαφρά υψηλότερες τιμές του συντελεστή αναπήδησης. Αυτό αποδίδεται στο γεγονός ότι η άμμος M34 είναι πιο λεπτόκοκκη από την M31, έτσι ο εδαφικός σκελετός είναι περισσότερο συμπαγής, οπότε παραμορφώνεται λιγότερο. Έτσι αποσβένεται μικρότερο ποσό ενέργειας σε σχέση με την άμμο M31 οδηγώντας σε μεγαλύτερους συντελεστές αναπήδησης.

5.5 Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκαν οι εργαστηριακές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν με διδιάστατη ανάλυση και είχαν σκοπό τον εντοπισμό των παραμέτρων που καθορίζουν τους συντελεστές αναπήδησης που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση των καταπτώσεων βράχων. Συνολικά εκτελέστηκαν περισσότερες των 2000 δοκιμών, είτε με ελεύθερη πτώση είτε με παραβολική ρίψη τεμαχίων διαφόρων σχημάτων σε επιφάνειες πρόσκρουσης με διαφορετικά χαρακτηριστικά.

Στις δοκιμές ελεύθερης πτώσης ο επαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης δεν ορίζεται. Επίσης, ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης προσεγγίζει τον κινηματικό, όσο η γωνία αναπήδησης τείνει προς τις 90° . Παρόλα αυτά, από τις δοκιμές που παρουσιάστηκαν προκύπτει ότι η γωνία αναπήδησης εξαρτάται σημαντικά από το σχήμα του τεμάχους. Γενικώς, στις δοκιμές ελεύθερης πτώσης, χρησιμοποιήθηκε κυρίως ο κινηματικός συντελεστής αναπήδησης για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων, λαμβάνοντας μέριμνα ώστε η γωνία αναπήδησης να είναι υψηλή, έτσι ώστε να ταυτίζεται με τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης.

Στις δοκιμές παραβολικής ρίψης, ο κάθετος και ο κινηματικός συντελεστής αναπήδησης δεν ταυτίζονται και ο επαπτομενικός ορίζεται κανονικά. Η απόκριση του τεμάχους εξαρτάται επιπλέον από την γωνία αναπήδησης, την περιστροφική ταχύτητα κ.α. προσδίδοντας στα αποτελέσματα μεγαλύτερη διακύμανση. Όμως, οι δοκιμές παραβολικής ρίψης προσομοιώνουν καλύτερα τις πραγματικές καταπτώσεις, καθώς σπανίως στην φύση συναντάται ελεύθερη πτώση τεμαχίου σε επίπεδη επιφάνεια πρόσκρουσης.

Αρχικά, διερευνήθηκε η δυνατότητα έκφρασης συσχετίσεων του κινηματικού (ή του καθέτου) συντελεστή αναπήδησης με τις τυπικές ιδιότητες των βραχωδών υλικών. Χρησιμοποιήθηκαν φυσικά πετρώματα από τον Ελλαδικό χώρο καθώς επίσης και τρία τεχνητά υλικά, στα οποία προσδιορίστηκαν οι ιδιότητές τους εκτελώντας τις συνήθεις δοκιμές βραχομηχανικής.

Η διερεύνηση πραγματοποιήθηκε με δοκιμές ελεύθερης πτώσης, χρησιμοποιώντας κυβικά τεμάχια με λειασμένες ακμές. Ιδανικά, τα τεμάχια θα έπρεπε να ήταν σφαιρικά, ώστε να απαλείφεται η επίδραση του σχήματος και του προσανατολισμού του τεμάχους κατά την επαφή στους συντελεστές αναπήδησης. Ωστόσο, η αδυναμία μόρφωσης σφαιρικών τεμαχίων από τα φυσικά υλικά, οδήγησε στην εκτέλεση των δοκιμών με το σχήμα αυτό.

Αναφορικά με την δυνατότητα συσχέτισης του κινηματικού (ή του καθέτου) συντελεστή αναπήδησης με τις ιδιότητες του υλικού, προέκυψε ότι αυτή είναι εφικτή με την σκληρότητα που προσδιορίζεται από την σφύρα Schmidt. Αυτό είναι εύλογο, καθώς το μηχανικό ανάλογο της σφύρας ομοιάζει με τις δοκιμές ελεύθερης πτώσης. Επίσης, μια τέτοια συσχέτιση παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα: η σκληρότητα κατά την σφύρα Schmidt είναι ιδιότητα του υλικού που προσδιορίζεται μέσω μιας εύκολης, γρήγορης και οικονομικής δοκιμής, δεν απαιτεί εξειδικευμένο προσωπικό για την εκτέλεσή της, τα αποτελέσματα είναι άμεσα διαθέσιμα και περιγράφει ικανοποιητικά τις μεταβολές στην κατάσταση ενός βραχώδους πρσανούς σε γειτνιάζουσες θέσεις. Επίσης, διαφαίνεται εφικτή η συσχέτιση του συντελεστή αναπήδησης

με την θλιπτική ή την εφελκυστική αντοχή του πετρώματος, ωστόσο θα είναι κατώτερης ποιότητας και θα υστερεί έναντι των πλεονεκτημάτων που έχει η συσχέτιση με την σκληρότητα της σφύρας Schmidt.

Στην διερεύνηση αυτή εξετάσθηκαν και τρία τεχνητά υλικά με σκοπό την βαθμονόμηση τους, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε επακόλουθες διερευνήσεις. Το πλεονέκτημα χρήσης τεχνητών υλικών έγκειται στην δυνατότητα διαμόρφωσης δοκιμίων οποιουδήποτε σχήματος και μεγέθους, μέσω έκχυσης σε κατάλληλα εκμαγεία. Από τα τρία υλικά που χρησιμοποιήθηκαν, ως καταλληλότερο προέκυψε το τσιμεντοειδές ένεμα, αφού οι ιδιότητές του ομοιάζουν με αυτές ενός τυπικού ασβεστόλιθου και η συμπεριφορά του στην αναπήδηση είναι αντίστοιχη.

Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκαν δοκιμές παραβολικής ρίψης, χρησιμοποιώντας πέντε από τα προαναφερθέντα υλικά με τεμάχια ίδιου σχήματος. Από την διερεύνηση αυτή επαληθεύεται ότι η σκληρότητα συνδέεται με τον κάθετο και τον κινηματικό συντελεστή αναπήδησης. Επιπρόσθετα, προέκυψε ότι τόσο ο κάθετος όσο και ο κινηματικός συντελεστής αναπήδησης μειώνονται με την αύξηση της γωνίας πρόσκρουσης ενώ ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης είναι ανεξάρτητος αυτής. Ο κάθετος και ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης μπορούν να λάβουν τιμές μεγαλύτερες της μονάδας ενώ οι τιμές του κινηματικού συντελεστή αναπήδησης ανήκουν στο εύρος 0 έως 1, σύμφωνα με το πεδίο ορισμού του. Παρατηρήθηκε επίσης μια ικανοποιητική συσχέτιση του καθέτου συντελεστή αναπήδησης με τις γωνίες πρόσκρουσης και αναπήδησης, η οποία είναι ικανή να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του εύρους τιμών του. Γενικώς, η εν λόγω διερεύνηση περιγράφεται από μεγάλη διακύμανση των μεγεθών που προσδιορίστηκαν, γεγονός που αποδίδεται στο σχήμα του τεμάχους και την διαφοροποίηση που προκαλεί στην γεωμετρία επαφής. Τούτο επαληθεύεται εξετάζοντας συγκριτικά την επίδραση του σχήματος με τις επακόλουθες σειρές δοκιμών, που χρησιμοποιήθηκε σφαιρικό τέμαχος και η διακύμανση των αντίστοιχων μεγεθών είναι σημαντικά περιορισμένη.

Έπειτα εξετάστηκε η επίδραση στους συντελεστές αναπήδησης που ασκεί η ταχύτητα πρόσκρουσης και η μάζα του τεμάχους, στοιχεία που καθορίζουν την ένταση της κρούσης. Αρχικά πραγματοποιήθηκαν δοκιμές ελεύθερης πτώσης ρίπτοντας σφαιρικά δοκίμια από διάφορα ύψη, ώστε η ταχύτητα πρόσκρουσης να μεταβάλλεται. Εξετάστηκαν τέσσερα υλικά, δυο φυσικά και δυο τεχνητά, από τα οποία διαμορφώθηκαν σφαίρες διαφορετικής διαμέτρου. Προέκυψε ότι και οι δυο παράμετροι επηρεάζουν τον κινηματικό συντελεστή αναπήδησης (ή τον κάθετο, αφού ταυτίζονται στις δοκιμές ελεύθερης πτώσης). Πιο συγκεκριμένα, ο συντελεστής αναπήδησης μειώνεται με την αύξηση τόσο της ταχύτητας πρόσκρουσης όσο και της μάζας του τεμάχους. Στην βιβλιογραφία διατίθενται σχέσεις προσαρμογής του συντελεστή με την ταχύτητα πρόσκρουσης, αλλά καμία επαρκώς τεκμηριωμένη με την μάζα του τεμάχους.

Ακολούθως, η διερεύνηση συνεχίσθηκε με δοκιμές παραβολικής ρίψης, ώστε να συνεκτιμηθεί η επίδραση της γωνίας πρόσκρουσης και της γωνιακής ταχύτητας. Αναφορικά με την επίδραση της μάζας και της ταχύτητας πρόσκρουσης τα συμπεράσματα συμφωνούν από τις

δοκιμές ελεύθερης πτώσης για τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης, αλλά όχι για τον κινηματικό. Αυτό σημαίνει ότι η αναπήδηση εξαρτάται από την κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας και όχι από το μέτρο της. Περαιτέρω, η μεταβολή του καθέτου συντελεστή αναπήδησης είναι ανάλογη με την σκληρότητα κατά τη σφύρα Schmidt, σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της διερεύνησης των ιδιοτήτων των υλικών.

Όσον αφορά την μεταβολή των συντελεστών αναπήδησης, παρατηρούνται ανάλογες τάσεις για τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης με την γωνία πρόσκρουσης και αναπήδησης, ενώ ο εφαπτομενικός αυξάνεται ελαφρώς με την αύξηση της γωνιακής ταχύτητας και δεν επηρεάζεται από την μάζα του τεμάχους. Ο κινηματικός συντελεστής αναπήδησης επίσης μειώνεται με την αύξηση της γωνίας πρόσκρουσης και παρουσιάζει την μικρότερη διασπορά. Τέλος, αξιοποιώντας τις δοκιμές που μετρήθηκε η γωνιακή ταχύτητα, συγκρίθηκαν οι ενεργειακοί ορισμοί των συντελεστών αναπήδησης και παρατηρήθηκε ότι συνεκτιμώντας την γωνιακή ταχύτητα ο ολικός ενεργειακός συντελεστής αναπήδησης είναι κατά μέσο όρο 20% μεγαλύτερος σε σχέση με τιμή που προκύπτει όταν δεν προσμετράται. Πέραν τούτου, δεν βρέθηκε κάποια σημαντική επίδραση της περιστροφής στον κάθετο, εφαπτομενικό και κινηματικό συντελεστή αναπήδησης.

Οι παραπάνω δοκιμές αφορούν την κρούση μεταξύ όμοιων υλικών, δηλαδή τεμάχους και επιφάνειας πρόσκρουσης. Όμως, στις πραγματικές καταπτώσεις δύναται ένα τέμαχος να αποκολληθεί από έναν σχηματισμό και κατά την κατάντη κίνησή του να αναπηδήσει σε υποκείμενο βραχώδες σχηματισμό διαφορετικής σύστασης. Για την προσομοίωση της περίπτωσης αυτής, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές ελεύθερης πτώσης με σφαιρικά δοκίμια διαφόρων διαστάσεων σε βάσεις διαφορετικών υλικών. Προέκυψε ότι ο συντελεστής αναπήδησης λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές όταν η κρούση γίνεται σε σκληρότερη βάση.

Έπειτα, εξετάστηκε η επίδραση του σχήματος του τεμάχους και της γεωμετρίας επαφής που διαμορφώνεται κατά την κρούση. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές παραβολικής ρίψης χρησιμοποιώντας ως τεμάχη δίσκους ελλειπτικού σχήματος με διαφορετικούς λόγους αξόνων. Προέκυψε ότι ο προσανατολισμός του τεμάχους κατά την επαφή καθορίζει την συμπεριφορά του τεμάχους κατά την διάρκεια της κρούσης. Πιο συγκεκριμένα, όταν το κέντρο βάρους του ελλειπτικού δίσκου βρίσκεται μπροστά από το σημείο επαφής, ως προς την διεύθυνση κίνησής του, τότε κατά την διάρκεια της κρούσης το τέμαχος κυλά επί της επιφάνειας προτού αναπηδήσει, ενώ στην αντίθετη περίπτωση η αναπήδηση συμβαίνει ακαριαία χωρίς την μεταβολή της γεωμετρίας επαφής. Περαιτέρω, η διαφοροποίηση του λόγου των αξόνων των ελλείψεων δεν έδειξε κάποια σχέση με την μεταβολή των συντελεστών αναπήδησης, οι οποίοι εμφάνισαν αντίστοιχες τάσεις με αυτές που προέκυψαν από τα δοκίμια με σχήμα σφαιρικό ή κυβικό με λειασμένες ακμές.

Στην συνέχεια, διερευνήθηκε η επίδραση της αποσάθρωσης της επιφάνειας πρόσκρουσης στους συντελεστές αναπήδησης. Γενικώς, η αποσάθρωση υποβαθμίζει τις μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος, κυρίως στην επιφάνειά του από όπου και ξεκινάει η εκδήλωσή της. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές ελεύθερης πτώσης με σφαιρικά δοκίμια σε επιφάνειες διαφορετικού

βαθμού αποσάθρωσης. Προέκυψε ότι ο συντελεστής αναπήδησης μειώνεται με την αύξηση του βαθμού αποσάθρωσης, σχέση που είναι ικανή να περιγραφεί μέσω της μεταβολής της σκληρότητας κατά την σφύρα Schmidt, η οποία συνδέεται με τον βαθμό αποσάθρωσης της επιφάνειας πρόσκρουσης.

Επίσης, εξετάστηκε η επίδραση που έχει η τραχύτητα της επιφάνειας πρόσκρουσης στους συντελεστές αναπήδησης. Για τον σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές παραβολικής ρίψης σε επιφάνειες πρόσκρουσης διαφορετικής τραχύτητας με σφαιρικό και πολυεδρικό τέμαχος. Γενικώς προέκυψαν ανάλογες τάσεις με αυτές από τις προηγούμενες διερευνήσεις παραβολικών ρίψεων. Όταν το τέμαχος είναι σφαιρικού σχήματος, η αύξηση της τραχύτητας έχει ως συνέπεια την αύξηση της διακύμανσης στις τιμές του καθέτου και του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης, αλλά καμία επίδραση στον κινηματικό. Αντιθέτως, με τα πολυεδρικά τεμάχη η διακύμανση σε όλους τους συντελεστές αναπήδησης είναι σημαντικά μεγαλύτερη, όμως δεν μεταβάλλεται με την αύξηση της τραχύτητας της επιφάνειας πρόσκρουσης, οδηγώντας στο συμπέρασμα ότι η επίδραση του σχήματος του τεμάχους είναι ισχυρότερη.

Τέλος, εξετάστηκε η επίδραση που έχει η επικάλυψη της επιφάνειας πρόσκρουσης με εδαφικό υλικό. Στην φύση, είναι σύνηθες να υπέρκειται της βραχώδους επιφάνειας ένα στρώμα εδαφικού υλικού. Από άποψη μηχανικής, οι συνθήκες διαφέρουν σημαντικά καθώς το εδαφικό υλικό παραμορφώνεται από την διείσδυση του τεμάχους στην μάζα του εν αντιθέσει με μια βραχώδη επιφάνεια η οποία εμφανίζει αμελητέα παραμόρφωση. Η εργαστηριακή διερεύνηση έγινε επικαλύπτοντας την βραχώδη επιφάνεια πρόσκρουσης με αργιλικό και αμμώδες υλικό καθώς και μείγματα αυτών, τόσο σε ξηρά κατάσταση όσο και με υγρασία.

Σε κάθε περίπτωση, η ύπαρξη επικάλυψης οδηγεί στον περιορισμό της αναπήδησης. Το πάχος της επικάλυψης είναι μια από τις καταλυτικές παραμέτρους που ελέγχουν τον συντελεστή αναπήδησης. Πιο συγκεκριμένα, προέκυψε ότι η αύξηση του πάχους οδηγεί στην μείωση του συντελεστή αναπήδησης, ανεξάρτητα από την σύσταση ή την περιεκτικότητα σε νερό της εδαφικής επικάλυψης. Όταν η εδαφική στρώση είναι σε ξηρή κατάσταση, η απόκριση του τεμάχους στην αναπήδηση καθορίζεται από την δομή του εδαφικού σκελετού. Όσο πιο πυκνή είναι η διάταξη των στοιχείων που αποτελούν την στρώση τόσο αυξάνουν οι αναπτυσσόμενες τριβές που ανθίστανται στην διείσδυση του τεμάχους, με αποτέλεσμα η στρώση να είναι λιγότερο παραμορφώσιμη και κατ' επέκταση η αναπήδηση είναι μεγαλύτερη. Στην περίπτωση που η εδαφική στρώση είναι αργιλικής σύστασης, η περιεκτικότητα σε νερό είναι καθοριστική στην μείωση της αναπήδησης, καθώς το υλικό γίνεται υδαρές με την προσθήκη νερού οπότε παραμορφώνεται περισσότερο με αποτέλεσμα να περιορίζεται η αναπήδηση του τεμάχους.

Κεφάλαιο 6

Εργαστηριακή Διερεύνηση στον Τριδιάστατο Χώρο

Οι δοκιμές που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο πραγματοποιήθηκαν με καταγραφή στις δυο διαστάσεις, ως εκ τούτου η επεξεργασία της κίνησης έγινε στο επίπεδο καταγραφής χωρίς να υπάρχει η δυνατότητα μελέτης της εκτροπής, παρά μόνο μέσω μακροσκοπικής παρατήρησης κατά την στιγμή εκτέλεσης των δοκιμών. Γενικώς, κατά τον σχεδιασμό των δοκιμών αυτών υπήρχε μέριμνα ώστε η εκτροπή να είναι το δυνατόν ελάχιστη. Ωστόσο το μέγεθός της ήταν σημαντικό, ιδίως στις δοκιμές με γωνιώδη τεμάχια. Τούτο περιορίσε τις δυνατότητες επέκτασης της εργαστηριακής διερεύνησης σε μη κανονικά σχήματα, καθώς υπεισέρχονται σφάλματα στον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών της τροχιάς. Συνεπώς, η τριδιάστατη διερεύνηση των καταπτώσεων θεωρήθηκε αναγκαία, αφού πλέον του προσδιορισμού των συντελεστών αναπήδησης είναι εφικτή και η μελέτη της εκτροπής των τεμαχίων εξαιτίας της κρούσης. Προϋπόθεση όμως ήταν η ανάπτυξη της κατάλληλης μεθοδολογίας για την εκτέλεση, καταγραφή και επεξεργασία των δοκιμών που παρουσιάστηκε στην ενότητα **4.3.4**.

Σε πρώτη φάση πραγματοποιήθηκε μια αρχική πειραματική διερεύνηση στο εργαστήριο και στο πεδίο, με σκοπό την αξιολόγηση της εφαρμοσιμότητας και τον έλεγχο της αξιοπιστίας της αναπτυσσόμενης μεθοδολογίας, καθώς και την απόκτηση στοιχείων αναφορικά με το μέγεθος της εκτροπής ώστε να προσδιορισθεί ο βαθμός επίδρασής της στην διαγραφόμενη τροχιά. Τα αποτελέσματα αυτά ήταν ενθαρρυντικά όσον αφορά τις δυνατότητες που παρείχε η νέα μεθοδολογία. Κατέδειξαν επίσης ότι το μέγεθος της εκτροπής είναι σημαντικό και χρήζει περαιτέρω έρευνας. Τα αποτελέσματα του εργαστηριακού σκέλους της αρχικής διερεύνησης παρουσιάζονται και σχολιάζονται στην ενότητα **6.1** και των δοκιμών πεδίου στο κεφάλαιο **7**.

Στην συνέχεια, έγιναν οι απαραίτητες τροποποιήσεις και βελτιώσεις στην μεθοδολογία και καταρτίστηκε ένα εκτενές πειραματικό πρόγραμμα, στοχευμένο στο ουσιώδες ζήτημα της εκτροπής, μέσω δοκιμών τόσο στο εργαστήριο όσο και στο πεδίο. Στο εργαστήριο πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με κυβικά και σφαιρικά τεμάχια, τα οποία προσέκρουαν μετά από παραβολική τροχιά σε επιφάνεια πρόσκρουσης μεταβαλλόμενης κλίσης και προσανατολισμού. Έτσι

μελετήθηκε η επίδραση του σχήματος των τεμαχών, της κλίσης και της φοράς μεγίστης κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης στην εκτροπή και στους συντελεστές αναπήδησης. Τα αποτελέσματα της εργαστηριακής διερεύνησης παρουσιάζονται στην ενότητα 6.2 και των δοκιμών πεδίου στο κεφάλαιο 7.

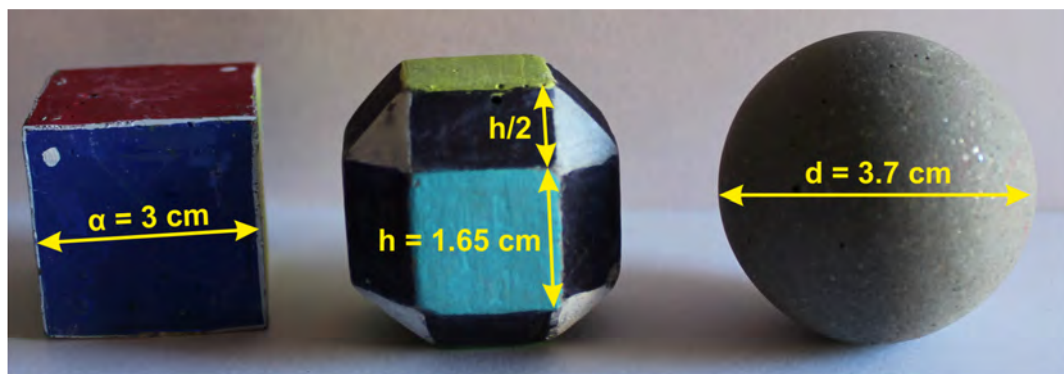
6.1 Αρχική πειραματική διερεύνηση

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, από την μακροσκοπική παρατήρηση των δοκιμών που αξιολογήθηκαν μέσω διδιάστατης ανάλυσης, προέκυψε ότι η εκτροπή σχετίζεται με το σχήμα του τεμάχους. Έτσι, στην διερεύνηση στον τριδιάστατο χώρο χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια με διαφορετικό σχήμα αλλά με όμοια φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά, επιτρέποντας την μεταξύ τους σύγκριση. Επιπρόσθετα, διενεργήθηκε αντίστοιχη πειραματική διερεύνηση στο πεδίο, με σκοπό τον προσδιορισμό της επίδρασης που έχει η κλίμακα εκτέλεσης των δοκιμών στις τιμές των συντελεστών αναπήδησης και στο μέγεθος της εκτροπής. Για να είναι εφικτή η συγκριτική αξιολόγηση των δοκιμών εργαστηρίου και πεδίου, ορισμένες από τις πειραματικές συνθήκες του εργαστηριακού σκέλους υπαγορεύθηκαν από την δυνατότητα αναπαραγωγής τους στο πεδίο.

Όπως προαναφέρθηκε, οι δοκιμές που παρουσιάζονται στην ενότητα αυτή πραγματοποιήθηκαν στα αρχικά στάδια ανάπτυξης του κώδικα τριδιάστατης αποτύπωσης. Ο προσδιορισμός του κέντρου βάρους του τεμάχους στον τριδιάστατο χώρο πραγματοποιήθηκε επιτυχώς και με ικανοποιητική ακρίβεια. Όμως η μεθοδολογία ανακατασκευής του τεμάχους στον τριδιάστατο χώρο, δηλαδή του προσδιορισμού της θέσης και του προσανατολισμού κάθε πλευράς του δοκιμίου, δεν ήταν δυνατόν να εφαρμοστεί, με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η μέτρηση της περιστροφικής συνιστώσας της κίνησης. Το πρόβλημα εντοπίστηκε στους μάρτυρες με τους οποίους είχαν σημειωθεί τα τεμάχια, καθώς ήταν ανεπαρκείς για τον μονοσήμαντο ορισμό των αντίστοιχων πλευρών στον χώρο. Το ζήτημα αυτό επιλύθηκε κωδικοποιώντας καλύτερα τις πλευρές στις επόμενες διερευνήσεις, αποκτώντας δεδομένα και για την περιστροφή.

6.1.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια κυβικού, πολυεδρικού και σφαιρικού σχήματος (Σχήμα 6.1), τα οποία κατασκευάστηκαν από το τσιμεντοειδές ένεμα υψηλής αντοχής με έκχυση σε ειδικά εκμαγεία (βλ. Ενότητα 4.1.1). Οι διαστάσεις των τεμαχών (βλ. Σχήμα 6.1) επιλέχτηκαν με κριτήριο ίσης μάζας των διαφορετικών τεμαχών, πιο συγκεκριμένα ίση με περίπου $m = 60g$.



Σχήμα 6.1: Κυβικό, σφαιρικό και πολυεδρικό δοκίμιο από τσιμεντοειδές ένεμα

Ως επιφάνειες πρόσκρουσης χρησιμοποιήθηκαν οι πλευρές ενός φυσικού ασβεστολιθικού τεμάχους, το οποίο συλλέχτηκε από την θέση που πραγματοποιήθηκαν οι αντίστοιχες δοκιμές πεδίου. Η επιλογή αυτή έγινε ώστε να περιορισθούν στο ελάχιστο οι διαφοροποιήσεις των φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών μεταξύ των δυο διερευνήσεων και να είναι εφικτή η μεταξύ τους σύγκριση.

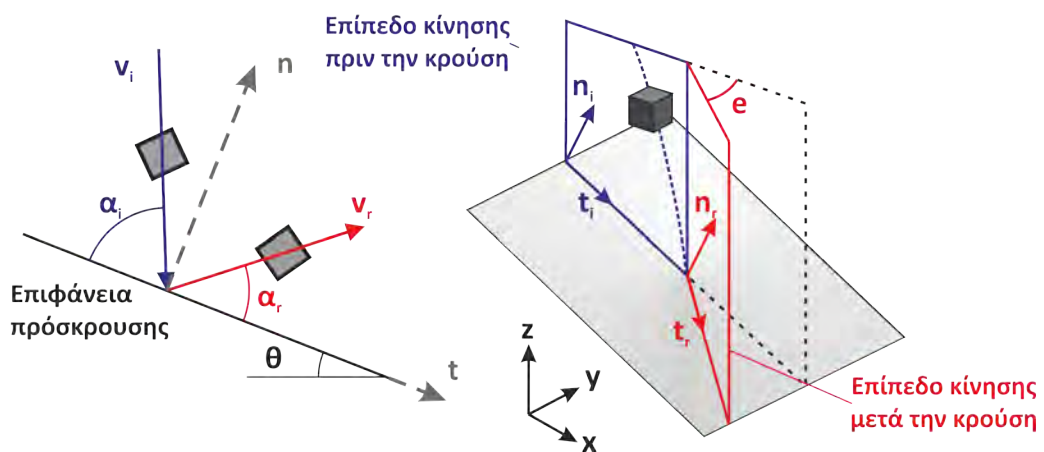
Το πρισματικό σχήματος ασβεστολιθικό τέμαχος παρουσιάζεται στο σχήμα 6.2. Η μάζα του εκτιμάται σε περισσότερο από $m = 15\text{kg}$, δηλαδή τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από τα δοκίμια που προσέκρουαν σε αυτό, καθιστώντας την επιφάνεια πρόσκρουσης ακλόνητη. Η τραχύτητα των επιφανειών του τεμάχους κυμαίνεται σε 4-6 της κλίμακας JRC και η σκληρότητα κατά την σφύρα Schmidt είναι ίση με 43.2. Επιπρόσθετα, μετά την ολοκλήρωση των δοκιμών αναπήδησης έγινε πυρηνοληψία κυλινδρικών δοκιμών από το τέμαχος και εκτελέστηκαν οι συνήθεις εργαστηριακές δοκιμές βραχομηχανικής για τον προσδιορισμό των φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών του ασβεστόλιθου.



Σχήμα 6.2: Άποψη του ασβεστολιθικού τεμάχους που χρησιμοποιήθηκε ως βάση πρόσκρουσης

Η απελευθέρωση των τεμαχών έγινε με το χέρι, αφήνοντας τα δοκίμια κατακόρυφα από ύψος περίπου $h_d = 60\text{cm}$ ψηλότερα από την θέση πρόσκρουσης, συνθήκη που σχετίζεται με την αναπαραγωγή των δοκιμών στο πεδίο. Δεν χρησιμοποιήθηκε ο μηχανισμός ρίψης της ελεύθερης πτώσης, διότι δεν υπήρχε η δυνατότητα εγκατάστασης αντίστοιχου μηχανισμού στο πεδίο. Έτσι, η τροχιά πριν την κρούση δεν ήταν απολύτως κατακόρυφη, αλλά σχημάτιζε γωνία έως και 5° από την κατακόρυφο.

Το ασβεστολιθικό τέμαχος τοποθετήθηκε με διαφορετικούς προσανατολισμούς, ώστε η επιφάνεια πρόσκρουσης να παρουσιάζει τρεις διαφορετικές κλίσεις. Έτσι, επιτρέπεται συγχρόνως η αξιολόγηση της επίδρασης που έχει η κλίση της επιφάνειας, ή ισοδύναμα η γωνία πρόσκρουσης, στην εκτροπή και στην αναπήδηση. Για κάθε σχήμα τεμάχους πραγματοποιήθηκαν τρεις σειρές δοκιμών με συνολικά 126 επαναλήψεις. Τα στοιχεία της κίνησης σε κάθε σειρά δοκιμών (μέσος όρος ταχύτητας πρόσκρουσης και αναπήδησης καθώς και οι αντίστοιχες γωνίες - βλ. σχήμα 6.3) παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στους πίνακες 6.1 έως 6.3, ομαδοποιημένα σύμφωνα με την κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης. Τα αποτελέσματα των δοκιμών παρατίθενται αναλυτικά στα παρατήματα 25 έως 27, για τα κυβικά, τα πολυεδρικά και τα σφαιρικά τεμάχια αντίστοιχα.



Σχήμα 6.3: Σχηματική απεικόνιση της δοκιμής και μετρούμενα μεγέθη

Πίνακας 6.1: Δοκιμές σε επιφάνεια πρόσκρουσης κλίσεως $\theta = 20^\circ$

Σειρά δοκιμών	Αριθμός επαν.	Σχήμα τεμάχους	Πρόσκρουση		Αναπήδηση	
			$v_i [ms^{-1}]$	$\alpha_i [^\circ]$	$v_r [ms^{-1}]$	$\alpha_r [^\circ]$
25.1	15	κυβικό	3.26	67.8	1.36	27.3
26.1	14	πολυεδρικό	3.24	67.9	1.56	36.9
27.1	15	σφαιρικό	3.21	67.8	1.82	50.8

Πίνακας 6.2: Δοκιμές σε επιφάνεια πρόσκρουσης κλίσεως $\theta = 45^\circ$

Σειρά δοκιμών	Αριθμός επαν.	Σχήμα τεμάχους	Πρόσκρουση		Αναπήδηση	
			$v_i [ms^{-1}]$	$\alpha_i [^\circ]$	$v_r [ms^{-1}]$	$\alpha_r [^\circ]$
25.2	13	κυβικό	3.42	44.5	2.12	16
26.2	14	πολυεδρικό	3.41	45	2.06	26.2
27.2	14	σφαιρικό	3.46	44.5	2.17	32.6

Πίνακας 6.3: Δοκιμές σε επιφάνεια πρόσκρουσης κλίσεως $\theta = 70^\circ$

Σειρά δοκιμών	Αριθμός επαν.	Σχήμα τεμάχους	Πρόσκρουση		Αναπήδηση	
			$v_i [ms^{-1}]$	$\alpha_i [^\circ]$	$v_r [ms^{-1}]$	$\alpha_r [^\circ]$
25.3	14	κυβικό	3.45	17.5	3.06	11.4
26.3	13	πολυεδρικό	3.32	17.4	3.00	10.6
27.3	14	σφαιρικό	3.39	17.5	2.98	14.3

6.1.2 Παρουσίαση και σχολιασμός αποτελεσμάτων

Στις ακόλουθες ενότητες παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα της εν λόγω πειραματικής διερεύνησης συναρτήσει της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης και του σχήματος του τεμάχους. Αρχικά, παρουσιάζεται η επίδραση των ανωτέρω στους συντελεστές αναπήδησης και έπειτα στην εκτροπή της τροχιάς.

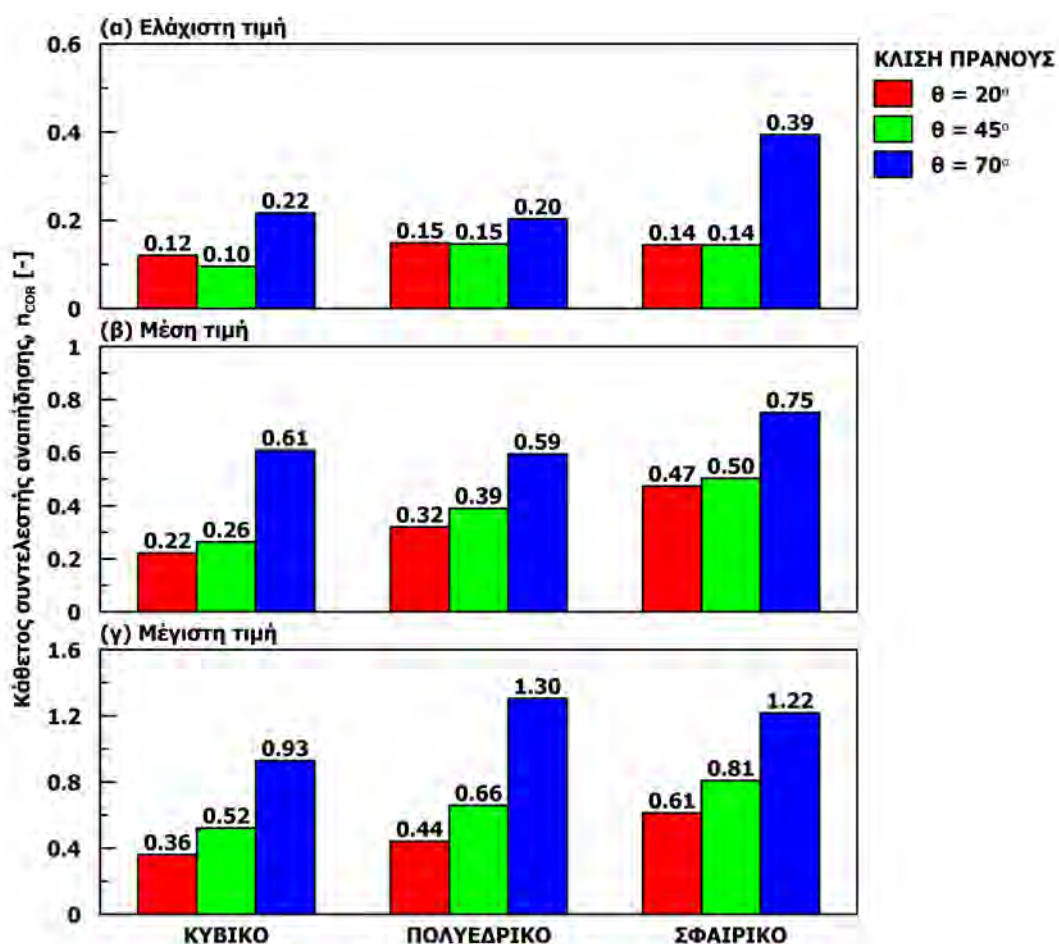
6.1.2.1 Κάθετος συντελεστής αναπήδησης

Οι χαρακτηριστικές τιμές του κάθετου συντελεστή αναπήδησης, δηλαδή η ελάχιστη, η μέγιστη και η μέση, παρουσιάζονται στον πίνακα 6.4 και αναπαρίστανται στο σχήμα 6.4 με την μορφή ραβδογράμματος για καλύτερη εποπτεία.

Γενικώς, τα αποτελέσματα χαρακτηρίζονται από σημαντική διασπορά στις τιμές των συντελεστών, ακόμη και για δοκιμές που ανήκουν στην ίδια σειρά, όπου οι συνθήκες ρίψης είναι παρόμοιες και το σχήμα του τεμάχους ίδιο. Η συμπεριφορά αυτή συνηγορεί στο ότι δεν πρέπει να θεωρείται ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης ως ιδιότητα του υλικού.

Πίνακας 6.4: Χαρακτηριστικές τιμές καθέτου συντελεστή αναπήδησης

Σειρά δοκιμών	Σχήμα τεμάχους	Κλίση $\theta [^\circ]$	Γωνία $\alpha_i [^\circ]$	Κάθετος συντελεστής αναπήδησης, $n_{COR} [-]$			
				ελάχιστη	μεγίστη	μέση	εύρος
25.1	κυβικό	21.2	67.8	0.12	0.36	0.22	0.24
25.2		43.3	44.5	0.10	0.52	0.26	0.43
25.3		71.5	17.5	0.22	0.93	0.61	0.71
26.1	πολυεδρικό	21.2	67.9	0.15	0.44	0.32	0.29
26.2		43.3	45.0	0.15	0.66	0.39	0.51
26.3		71.5	17.4	0.20	1.31	0.59	1.10
27.1	σφαιρικό	21.2	67.8	0.14	0.61	0.47	0.47
27.2		43.3	44.5	0.14	0.81	0.50	0.66
27.3		71.5	17.5	0.39	1.22	0.75	0.82



Σχήμα 6.4: Χαρακτηριστικές τιμές καθέτου συντελεστή αναπήδησης: (α) ελάχιστη, (β) μέση και (γ) μέγιστη

Η διαφοροποίηση στις τιμές του καθέτου συντελεστή αναπήδησης εξαιτίας της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης και του σχήματος του τεμάχους γίνεται περισσότερο εμφανής στις μέγιστες παρατηρούμενες τιμές. Όταν η κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης γίνεται πιο απότομη, η γωνία πρόσκρουσης μειώνεται και ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης αυξάνεται ενώ συγχρόνως διευρύνεται το εύρος τιμών του. Επισημαίνεται ότι προσδιορίστηκαν τιμές μεγαλύτερες της μονάδας στην απότομη επιφάνεια πρόσκρουσης. Τα ανωτέρω ισχύουν ανεξαρτήτως του σχήματος του δοκιμίου, όπως παρατηρείται με την βοήθεια του σχήματος 6.4. Επιπρόσθετα, παρατηρείται ότι οι τιμές του καθέτου συντελεστή αναπήδησης είναι μεγαλύτερες στα σφαιρικά τεμάχια και φθίνουν με την αύξηση της γωνιότητας του τεμάχους.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον εμφανίζει η σχέση του καθέτου συντελεστή με την γωνία αναπήδησης, που παρουσιάζεται στο σχήμα 6.5, ανάλογα με το σχήμα του τεμάχους.

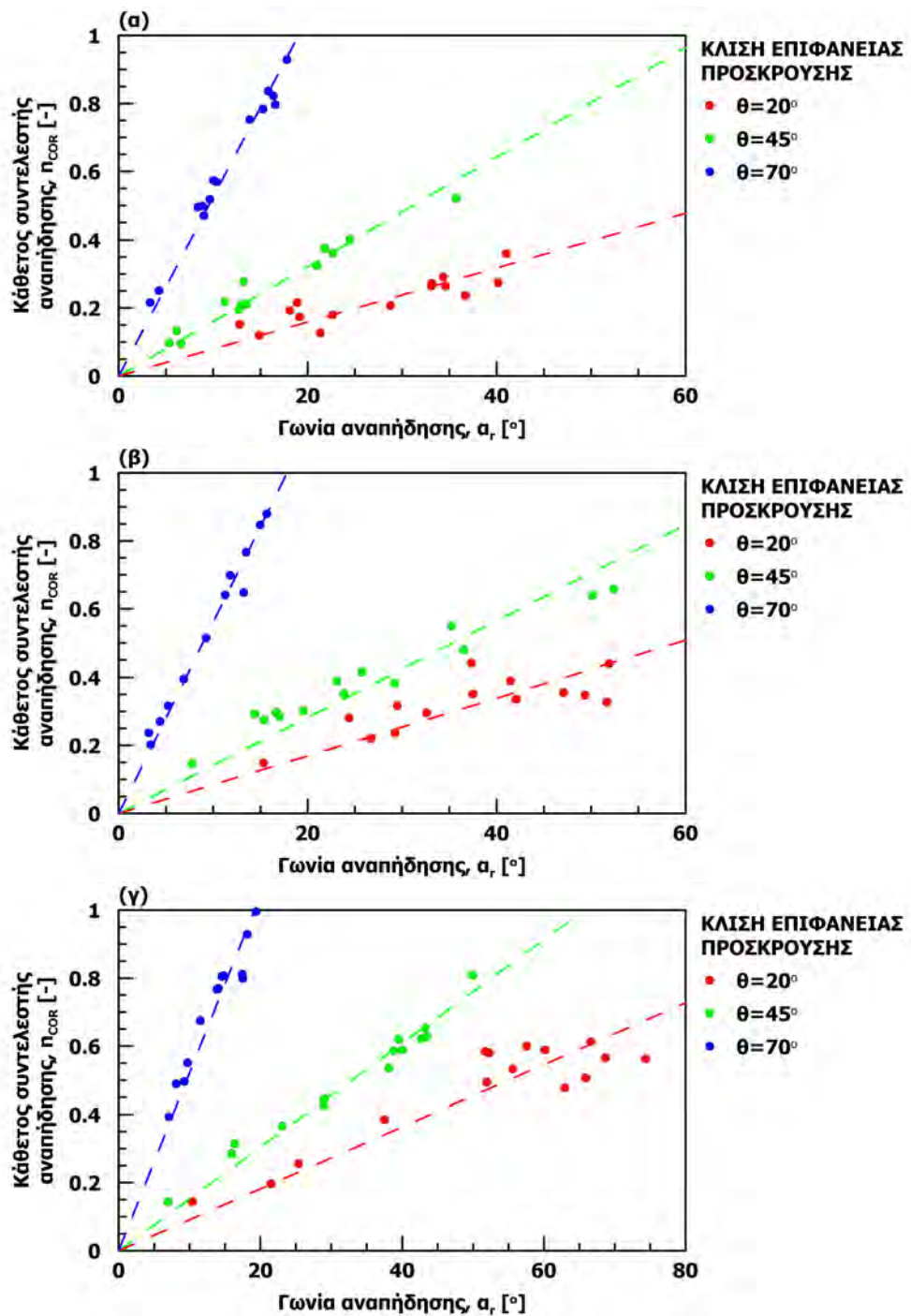
Παρατηρείται γραμμική σχέση μεταξύ των δυο μεγεθών, η οποία διέρχεται από την αρχή των αξόνων. Επιπρόσθετα, η κλίση της ευθείας συσχέτισης μειώνεται με την αύξηση της γωνίας πρόσκρουσης ή ισοδύναμα με την μείωση της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης, ανεξαρτήτως του σχήματος του τεμάχους.

6.1.2.2 Εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης

Οι χαρακτηριστικές τιμές του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης παρατίθενται στον πίνακα 6.5. Βάσει αυτών, δεν προκύπτει κάποια προφανής τάση με την κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης ή με το σχήμα του τεμάχους.

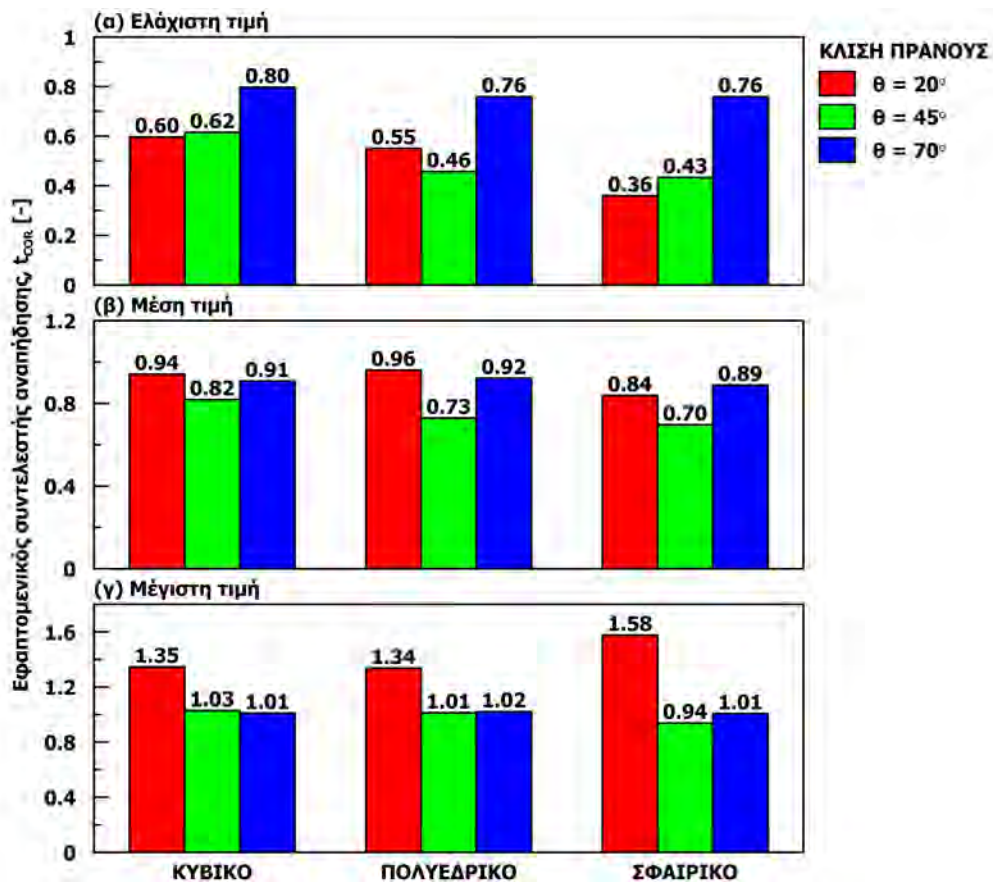
Πίνακας 6.5: Χαρακτηριστικές τιμές εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης

Σειρά δοκιμών	Σχήμα τεμάχους	Κλίση $\theta [^\circ]$	Γωνία $\alpha_i [^\circ]$	Εφαπτομενικός συντ. αναπήδησης, $t_{COR} [-]$			
				ελάχιστη	μεγίστη	μέση	εύρος
25.1	κυβικό	21.2	67.8	0.60	1.35	0.94	0.75
25.2		43.3	44.5	0.62	1.03	0.82	0.41
25.3		71.5	17.5	0.80	1.01	0.91	0.21
26.1	πολυεδρικό	21.2	67.9	0.55	1.34	0.96	0.79
26.2		43.3	45.0	0.46	1.01	0.73	0.56
26.3		71.5	17.4	0.76	1.02	0.92	0.26
27.1	σφαιρικό	21.2	67.8	0.36	1.58	0.84	1.22
27.2		43.3	44.5	0.43	0.94	0.70	0.50
27.3		71.5	17.5	0.76	1.01	0.89	0.25



Σχήμα 6.5: Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας αναπήδησης για τεμάχια σχήματος: (α) κυβικό, (β) πολυεδρικό και (γ) σφαιρικό

Στην απότομη επιφάνεια πρόσκρουσης ($\vartheta = 70^\circ$), οι χαρακτηριστικές τιμές ομοιάζουν ανεξαρτήτως σχήματος τεμάχους και εμφανίζουν την μικρότερη διασπορά σε σχέση με τις άλλες δυο κλίσεις της επιφάνειας πρόσκρουσης (Σχήμα 6.6). Γενικώς, σε όλες τις περιπτώσεις έχουν μετρηθεί τιμές του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης μεγαλύτερες της μονάδας, με τις μέγιστες στην ήπιας κλίσης επιφάνεια πρόσκρουσης ($\vartheta = 20^\circ$), όπου η γωνία πρόσκρουσης κυμαίνεται περίπου στις $\alpha_i = 70^\circ$, ανεξαρτήτως σχήματος τεμάχους. Εξαιρέση αποτελεί η περίπτωση κρούσης σφαιρικού δοκιμίου στην επιφάνεια κλίσης $\vartheta = 45^\circ$, όπου η μέγιστη τιμή που μετρήθηκε ήταν μικρότερη της μονάδας και συγκεκριμένα ίση με 0.94.



Σχήμα 6.6: Χαρακτηριστικές τιμές εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης: (α) ελάχιστη, (β) μέση και (γ) μέγιστη

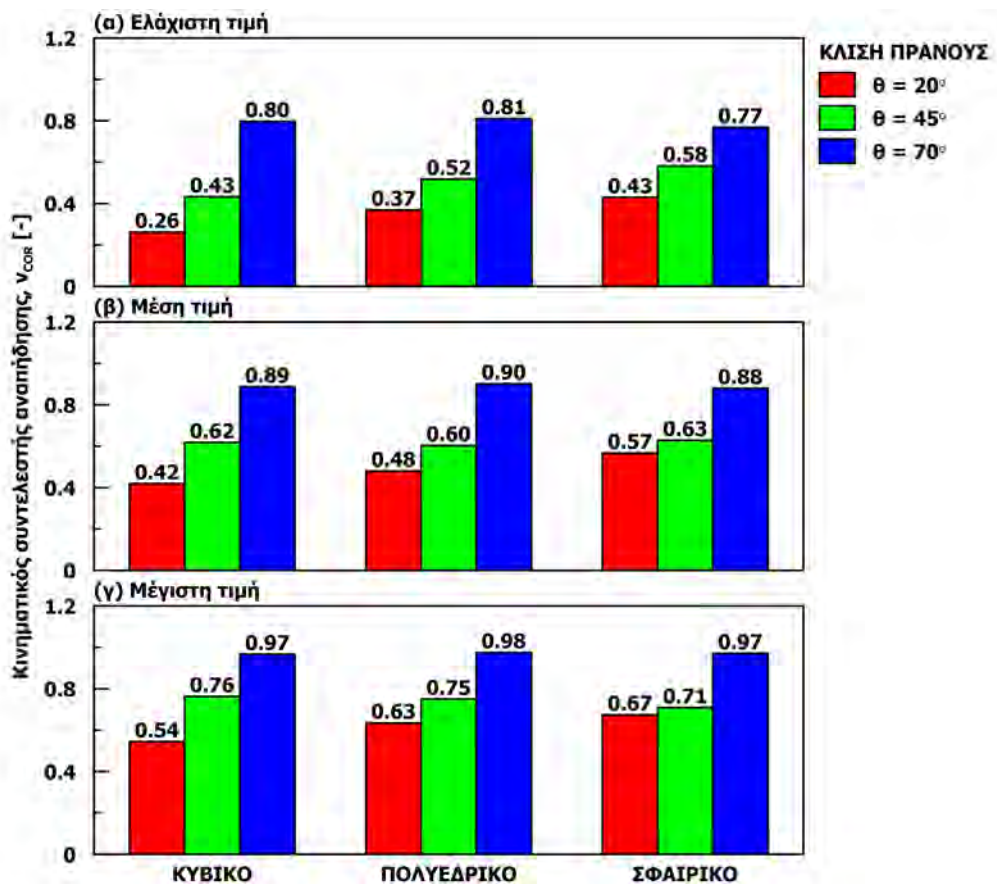
6.1.2.3 Κινηματικός συντελεστής αναπήδησης

Οι χαρακτηριστικές τιμές του κινηματικού συντελεστή αναπήδησης παρουσιάζονται στον πίνακα 6.6 και αναπαρίστανται στο σχήμα 6.7. Το μέγεθος του κινηματικού συντελεστή αναπήδησης φθίνει με την αύξηση της γωνίας πρόσκρουσης. Συμπεριφορά αντίστοιχη με του κάθετου συντελεστή αναπήδησης, με την διαφορά ότι οι τιμές που προκύπτουν είναι μικρότερες της μονάδας σε κάθε περίπτωση. Επίσης, το εύρος των τιμών του κινηματικού συντελεστή είναι σαφώς μικρότερο, συγκριτικά με τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης. Τέλος, η διαφορο-

ποίηση του σχήματος των τεμαχών δεν εμφανίζεται στον κινηματικό συντελεστή αναπήδησης, καθώς οι τιμές που λαμβάνει είναι παρόμοιες ανεξαρτήτως σχήματος.

Πίνακας 6.6: Χαρακτηριστικές τιμές κινηματικού συντελεστή αναπήδησης

Σειρά δοκιμών	Σχήμα τεμαχούς	Κλίση $\theta [^\circ]$	Γωνία $\alpha_i [^\circ]$	Κινηματικός συντελεστής αναπήδησης, $v_{COR} [-]$			
				ελάχιστη	μεγίστη	μέση	εύρος
25.1	κυβικό	21.2	67.8	0.26	0.54	0.42	0.28
25.2		43.3	44.5	0.43	0.76	0.62	0.33
25.3		71.5	17.5	0.80	0.97	0.89	0.17
26.1	πολυεδρικό	21.2	67.9	0.37	0.63	0.48	0.27
26.2		43.3	45.0	0.52	0.75	0.60	0.23
26.3		71.5	17.4	0.81	0.98	0.90	0.16
27.1	σφαιρικό	21.2	67.8	0.43	0.67	0.57	0.24
27.2		43.3	44.5	0.58	0.71	0.63	0.13
27.3		71.5	17.5	0.77	0.97	0.88	0.20



Σχήμα 6.7: Χαρακτηριστικές τιμές κινηματικού συντελεστή αναπήδησης: (α) ελάχιστη, (β) μέση και (γ) μέγιστη

6.1.2.4 Εκτροπή από το κατακόρυφο επίπεδο

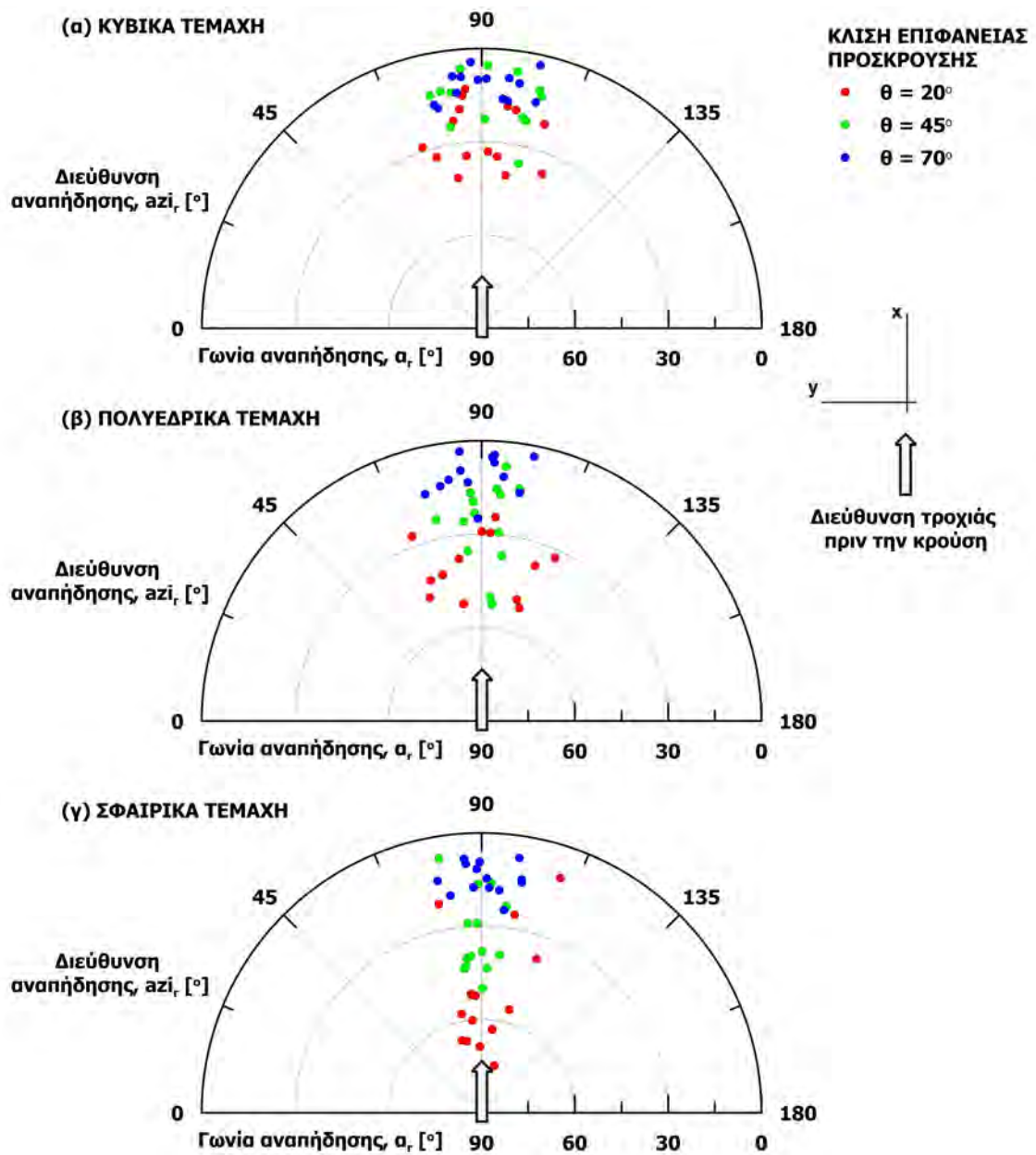
Το καινούργιο στοιχείο που προκύπτει από την τριδιάστατη καταγραφή των δοκιμών είναι η εκτροπή της τροχιάς εξαιτίας της κρούσης. Στις δοκιμές αυτές το τέμαχος αφήνεται σε ελεύθερη πτώση, συνεπώς υπάρχει απειρία κατακόρυφων επιπέδων που εμπεριέχουν την τροχιά πριν την κρούση. Έτσι, έγινε η θεώρηση ότι η τροχιά ανήκει στο κατακόρυφο επίπεδο που ορίζεται από την φορά μεγίστης κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης. Μετά την κρούση, η τροχιά γίνεται παραβολική οπότε ανήκει σε συγκεκριμένο κατακόρυφο επίπεδο. Η γωνία που σχηματίζεται εξαιτίας της κρούσης μεταξύ των δυο αυτών επιπέδων είναι η εκτροπή (e), που αναπαρίσταται στο σχήμα 6.3. Στο τριδιάστατο σύστημα αναφοράς της ανάλυσης, η διεύθυνση του άξονα x ταυτίζεται με την φορά μεγίστης κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης. Συνεπώς, η εκτροπή υπολογίζεται από την διεύθυνση κίνησης του τεμάχους μετά την κρούση αφαιρώντας 90° , καθώς το μηδέν (Βορράς) ταυτίζεται με τον άξονα y .

Στο σχήμα 6.8 παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της τροχιάς μετά την κρούση με την βοήθεια διαγράμματος πολικών συντεταγμένων. Στον περιφερειακό άξονα σημαίνεται ο προσανατολισμός της τροχιάς (αζιμούθιο) μετά την κρούση και στον ακτινικό η γωνία αναπήδησης (α_r). Παρατίθενται τρία διαγράμματα, ένα για κάθε σχήμα τεμάχους, στα οποία γίνεται περαιτέρω διάκριση των σημείων ανάλογα με την κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης.

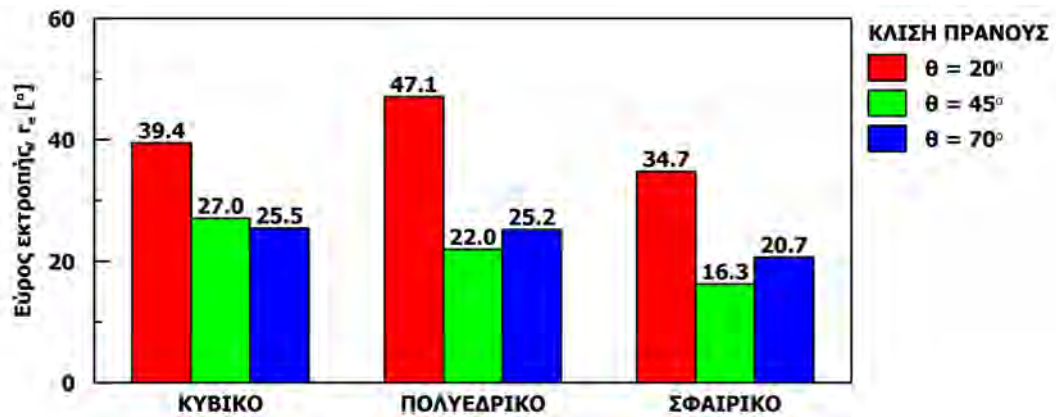
Οι χαρακτηριστικές τιμές της εκτροπής παρατίθενται στον πίνακα 6.7 και αναπαρίστανται στο σχήμα 6.9. Παρατηρείται ότι η εκτροπή μειώνεται με την αύξηση της κλίσης του επιπέδου πρόσκρουσης. Επίσης, το μέγεθός της εξαρτάται από το σχήμα του τεμάχους, καθώς προκύπτουν διαφορετικά εύρη για κάθε σχήμα. Γενικώς, το σφαιρικό σχήμα εμφανίζει μικρότερο εύρος εκτροπής συγκριτικά με το κυβικό.

Πίνακας 6.7: Χαρακτηριστικές τιμές εκτροπής

Σειρά δοκιμών	Σχήμα τεμάχους	Κλίση $\theta [^\circ]$	Γωνία $\alpha_i [^\circ]$	Εκτροπή, $e [^\circ]$		
				ελάχιστη	μεγίστη	εύρος
25.1	κυβικό	21.2	67.8	-18.1	21.3	39.4
25.2		43.3	44.5	-12.6	14.5	27.0
25.3		71.5	17.5	-12.0	13.4	25.5
26.1	πολυεδρικό	21.2	67.9	-22.8	24.2	47.1
26.2		43.3	45.0	-12.8	9.2	22.0
26.3		71.5	17.4	-14.0	11.3	25.2
27.1	σφαιρικό	21.2	67.8	-15.1	19.6	34.7
27.2		43.3	44.5	-9.5	6.8	16.3
27.3		71.5	17.5	-10.8	9.9	20.7



Σχήμα 6.8: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της τροχιάς (προσανατολισμός και γωνία αναπήδησης) μετά την κρούση για τεμάχια με σχήμα: (α) κυβικό, (β) πολυεδρικό και (γ) σφαιρικό



Σχήμα 6.9: Εύρος εκτροπής συναρτήσει του σχήματος του τεμάχου και της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης

Από τα παραπάνω, συμπεραίνεται ότι η εκτροπή της τροχιάς έχει σημαντικό εύρος, συνεπώς οφείλει να λαμβάνεται υπόψη στον προσδιορισμό του μήκους εφαρμογής των μέτρων προστασίας έναντι των καταπτώσεων.

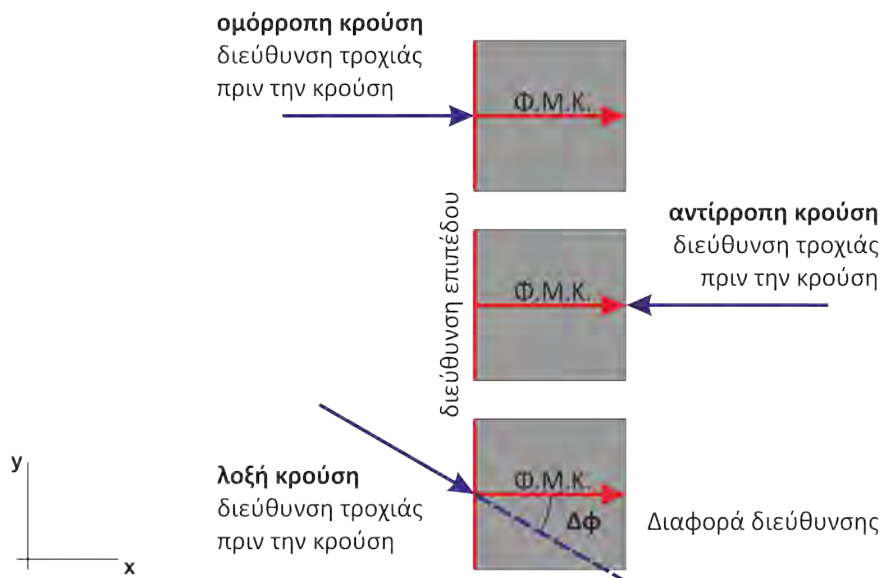
Περαιτέρω επεξεργασία των αποτελεσμάτων αυτών δεν θεωρήθηκε σκόπιμη, καθώς ανακύπτουν ορισμένα ζητήματα για την γενίκευσή τους σε πραγματικές συνθήκες. Πιο συγκεκριμένα, η απελευθέρωση των τεμαχών έγινε με ελεύθερη πτώση, που σπανίως συνιστά περίπτωση που θα συναντηθεί σε πραγματική κατάπτωση. Επιπρόσθετα, ο αριθμός επαναλήψεων των δοκιμών κρίνεται ως ανεπαρκής, καθώς δεν παρατηρείται συμμετρία στο άνω και κάτω όριο της εκτροπής, αποτυγχάνοντας την κάλυψη του πλήρους εύρους της. Τούτο δύναται να οφείλεται στην τραχύτητα της επιφάνειας πρόσκρουσης, η οποία προκαλεί σημαντική μεταβολή της γεωμετρίας επαφής στο περιορισμένο μήκος που γίνεται η επαφή. Τέλος, η αποτυχία προσδιορισμού της γωνιακής ταχύτητας αφήνει εκτός μελέτης μια παράμετρο που ενδεχομένως να είναι σημαντική.

Έτσι, πραγματοποιήθηκε η εκτενέστατη πειραματική διερεύνηση που παρουσιάζεται στην επόμενη ενότητα, αφού πρώτα τροποποιήθηκαν καταλλήλως οι πειραματικές συνθήκες για να είναι περισσότερο ελεγχόμενες και επιλύθηκε το ζήτημα σήμανσης των τεμαχών, ώστε να είναι εφικτή η ανακατασκευή τους στον χώρο και να είναι δυνατή η μέτρηση της περιστροφικής ταχύτητας.

6.2 Τριδιάστατη πειραματική διερεύνηση για τον προσδιορισμό της εκτροπής

Επεκτείνοντας την προηγούμενη εργαστηριακή διερεύνηση, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με έμφαση στην εκτροπή της τροχιάς μετά την κρούση. Χρησιμοποιήθηκαν σφαιρικά και κυβικά τεμάχια, που προσέκρουαν σε λεία οριζόντια ή κεκλιμένη επιφάνεια, διαγράφοντας παραβολική τροχιά πριν την κρούση. Επιπρόσθετα, εξετάστηκε η επίδραση στην εκτροπή που έχει η διαφορά διεύθυνσης μεταξύ του κατακόρυφου επιπέδου κίνησης του τεμάχους πριν την κρούση και της φοράς μέγιστης κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης.

Ανάλογα με την σχέση που υπάρχει μεταξύ της φοράς μέγιστης κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης και της διεύθυνσης κίνησης του τεμάχους πριν από την κρούση, διακρίνονται τρεις περιπτώσεις κρούσης: η ομόρροπη, η αντίρροπη και η λοξή (Σχήμα 6.10).



Σχήμα 6.10: Τύπος κρούσης ανάλογα με την διεύθυνση τροχιάς πριν την κρούση σε σχέση με την φορά μέγιστης κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης

Ειδική περίπτωση αποτελεί η οριζόντια επιφάνεια πρόσκρουσης, καθώς οποιαδήποτε ευθεία κείται επί οριζοντίου επιπέδου αποτελεί παράταξη και άρα διεύθυνση του επιπέδου. Συνεπώς, η διαφορά διεύθυνσης είναι μηδενική για οποιαδήποτε διεύθυνση κίνησης του τεμάχους πριν την κρούση.

6.2.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Οι δοκιμές εκτελέστηκαν με την παραβολική ρίψη κυβικών και σφαιρικών δοκιμίων σε επιφάνειες πρόσκρουσης υπό διαφορετική κλίση. Τα τεμάχια και οι επιφάνειες πρόσκρουσης κατασκευάστηκαν από το ένεμα τοιμεντοειδούς βάσης με έκχυση σε ειδικά εκμαγεία, ώστε

να είναι δυνατή η παραγωγή μεγάλου αριθμού όμοιων τεμαχών με σταθερές φυσικές και μηχανικές ιδιότητες. Επίσης, οι διαστάσεις επιλέχθηκαν ώστε το μέγεθος των δοκιμών να είναι παρόμοιο μεταξύ των δυο διαφορετικών σχημάτων, και έτσι να μην υπεισέρχεται η επίδραση εξαιτίας της διαφοράς μάζας στα αποτελέσματα. Επιπρόσθετα, η επιφάνεια πρόσκρουσης διαμορφώθηκε λεία ώστε να εξαλειφθεί και η επίδραση της τραχύτητας στην τροχιά, που όπως παρουσιάστηκε στην ενότητα 5.4.2 είναι υπαίτια για την αύξηση της διακύμανσης των χαρακτηριστικών κίνησης μετά την κρούση.

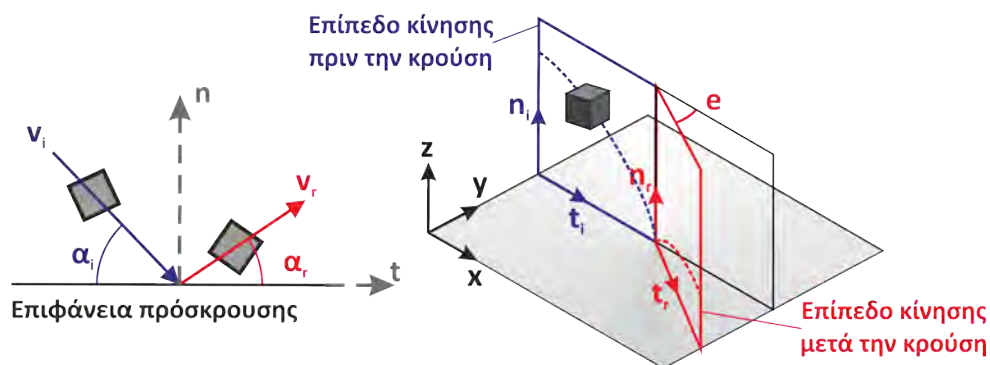
Οι ρίψεις των τεμαχών πραγματοποιήθηκαν με τον μηχανισμό ρίψης (Ενότητα 4.1.3.2). Η σχετική θέση του μηχανισμού ως προς την επιφάνεια πρόσκρουσης ρυθμιζόταν καταλλήλως, ώστε η ταχύτητα πρόσκρουσης να κυμαίνεται στο ίδιο μέγεθος μεταξύ των σειρών δοκιμών που εκτελέστηκαν.

Αρχικά έγιναν δοκιμές σε οριζόντια επιφάνεια πρόσκρουσης, όπου δόθηκε έμφαση στην διαφοροποίηση που προκαλείται εξαιτίας της μεταβολής του σχήματος. Στην συνέχεια, μελετήθηκε και η εκτροπή, εξετάζοντας τις τρεις περιπτώσεις κρούσης (ομόρροπη, αντίρροπη και λοξή) σε επιφάνειες πρόσκρουσης μεταβαλλόμενης κλίσης.

6.2.2 Κρούση σε οριζόντια επιφάνεια

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, όταν η κρούση γίνεται σε οριζόντια επιφάνεια πρόσκρουσης η διαφορά διεύθυνσης είναι μηδενική. Έτσι, οι δοκιμές αυτές καθίστανται ιδανικές για την αξιολόγηση της επίδρασης που έχει το σχήμα του τεμάχου, καθώς οι υπόλοιπες παράμετροι που επηρεάζουν την διαγραφόμενη τροχιά ομοιάζουν.

Ο μέσος όρος των χαρακτηριστικών της κίνησης από τις δοκιμές αυτές (ταχύτητα πρόσκρουσης και αναπήδησης και οι αντίστοιχες γωνίες - σχήμα 6.11) παρατίθενται συγκεντρωτικά στον πίνακα 6.8 και αναλυτικότερα στα παραρτήματα 28 και 29 για τα σφαιρικά και τα κυβικά τεμάχη αντίστοιχα. Κατά την εκτέλεση των δοκιμών με κυβικά τεμάχη, παρατηρήθηκε αυξημένη διακύμανση των χαρακτηριστικών της τροχιάς μετά την κρούση (διεύθυνση, γωνία αναπήδησης κ.α.). Έτσι, εκτελέστηκαν περισσότερες επαναλήψεις για αυτά.



Σχήμα 6.11: Σχηματική απεικόνιση των δοκιμών κρούσης σε οριζόντια επιφάνεια πρόσκρουσης - μετρούμενα μεγέθη

Πίνακας 6.8: Δοκιμές σφαιρικών και κυβικών δοκιμίων σε οριζόντια επιφάνεια πρόσκρουσης

Σειρά δοκιμών	Αριθμός επαν.	Σχήμα τεμάχους	Πρόσκρουση		Αναπήδηση	
			$v_i [ms^{-1}]$	$\alpha_i [^\circ]$	$v_r [ms^{-1}]$	$\alpha_r [^\circ]$
28.1	24	σφαιρικό	3.74	53.2	2.92	36.9
29.1	46	κυβικό	3.44	59.2	1.54	25.9

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται και σχολιάζονται συγκριτικά για τα δυο σχήματα τεμαχών, τα αποτελέσματα ως προς τους συντελεστές αναπήδησης και την εκτροπή.

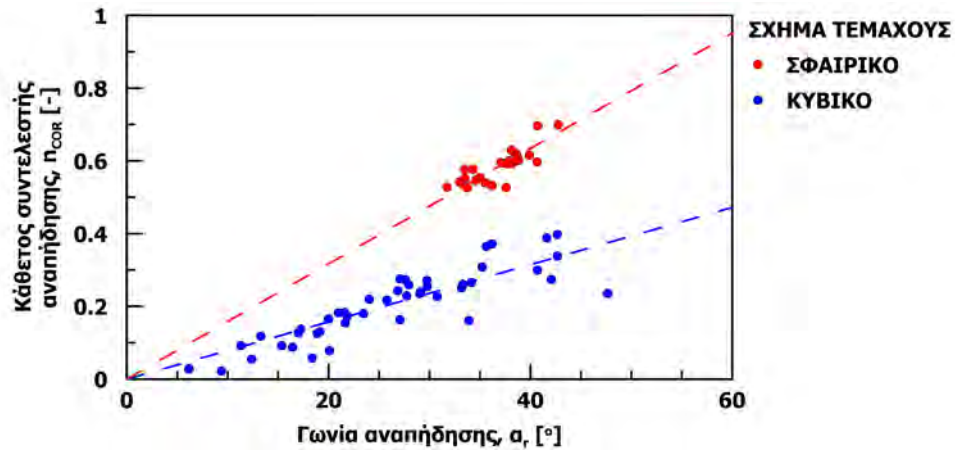
6.2.2.1 Συντελεστές αναπήδησης

Οι χαρακτηριστικές τιμές των συντελεστών αναπήδησης, για κρούση σε οριζόντια επιφάνεια πρόσκρουσης, παρουσιάζονται στον πίνακα 6.9. Συγκριτικά με τα κυβικά τεμάχη, τα σφαιρικά παρουσιάζουν σημαντικά μεγαλύτερες τιμές και συγχρόνως εμφανίζουν μικρότερο εύρος διακύμανσης.

Πίνακας 6.9: Χαρακτηριστικές τιμές συντελεστών αναπήδησης για κρούση σφαιρικών και κυβικών τεμαχών, σε οριζόντια επιφάνεια πρόσκρουσης

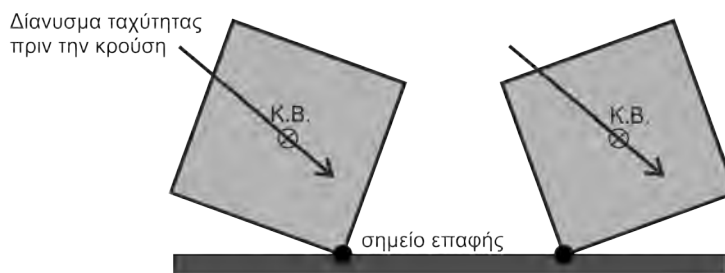
Συντελεστής αναπήδησης	Σειρά δοκιμών	Σχήμα τεμάχους	Χαρακτηριστικές τιμές συντελεστών αναπήδησης				
			ελάχιστη	μεγίστη	μέση	τυπ. απ.	εύρος
Κάθετος $\eta_{COR} [-]$	28.1	σφαιρικό	0.53	0.70	0.59	0.05	0.18
	29.1	κυβικό	0.02	0.40	0.20	0.10	0.37
Εφαπτομενικός $\tau_{COR} [-]$	28.1	σφαιρικό	0.94	1.16	1.04	0.05	0.21
	29.1	κυβικό	0.36	1.19	0.80	0.19	0.84
Κινηματικός $\nu_{COR} [-]$	28.1	σφαιρικό	0.72	0.84	0.78	0.03	0.12
	29.1	κυβικό	0.19	0.59	0.45	0.10	0.40
Ενεργειακός $E_{COR} [-]$	28.1	σφαιρικό	0.52	0.71	0.61	0.04	0.19
	29.1	κυβικό	0.04	0.35	0.21	0.08	0.32

Η σχέση μεταξύ του καθέτου συντελεστή αναπήδησης και της γωνίας αναπήδησης παρουσιάζεται στο σχήμα 6.12. Παρατηρείται και σε αυτή την περίπτωση η γραμμική σύνδεση των δυο μεγεθών, συνεπώς η διακύμανση του καθέτου συντελεστή αποτυπώνεται στην γωνία αναπήδησης. Οι μέγιστες τιμές γωνιών αναπήδησης ομοιάζουν για τα δυο σχήματα. Ωστόσο, στα σφαιρικά δοκίμια οι τιμές είναι συγκεντρωμένες σε ένα εύρος 10° , εν αντιθέσει με τα κυβικά όπου οι τιμές εκτείνονται αισθητά καταλαμβάνοντας εύρος μεγαλύτερο των 40° . Για τα κυβικά τεμάχη μετρήθηκαν τιμές του καθέτου συντελεστή αναπήδησης που προσεγγίζουν το μηδέν, υποδηλώνοντας ότι η κίνηση είναι πιθανό να μετατραπεί σε κύλιση ή ολίσθηση μετά την κρούση.



Σχήμα 6.12: Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας αναπήδησης για τα σφαιρικά και τα κυβικά δοκίμια

Η μόνη παράμετρος που μεταβάλλεται ουσιαστικά στις δοκιμές αυτές είναι το σχήμα του τεμάχους, που καθορίζει την γεωμετρία επαφής. Ένα σφαιρικό τέμαχος θα έχει την ίδια γεωμετρία επαφής όταν η κρούση γίνεται με την ίδια γωνία πρόσκρουσης. Αντιθέτως, σε ένα κυβικό δοκίμιο η γεωμετρία επαφής καθορίζεται από τον προσανατολισμό του τεμάχους. Ενδεικτικά, στο σχήμα 6.13 παρουσιάζονται δυο εξίσου πιθανοί προσανατολισμοί του τεμάχους κατά την επαφή, στην απλουστευμένη γεωμετρία των δυο διαστάσεων. Στον χώρο η κατάσταση περιπλέκεται στα κυβικά δοκίμια ενώ διατηρείται ως έχει στα σφαιρικά λόγω της συμμετρίας τους. Συνεπώς, η γεωμετρία επαφής συνδέεται με την επαναληψιμότητα των δοκιμών και αποτελεί τον κρισιμότερο παράγοντα που καθορίζει την τροχιά μετά την κρούση.

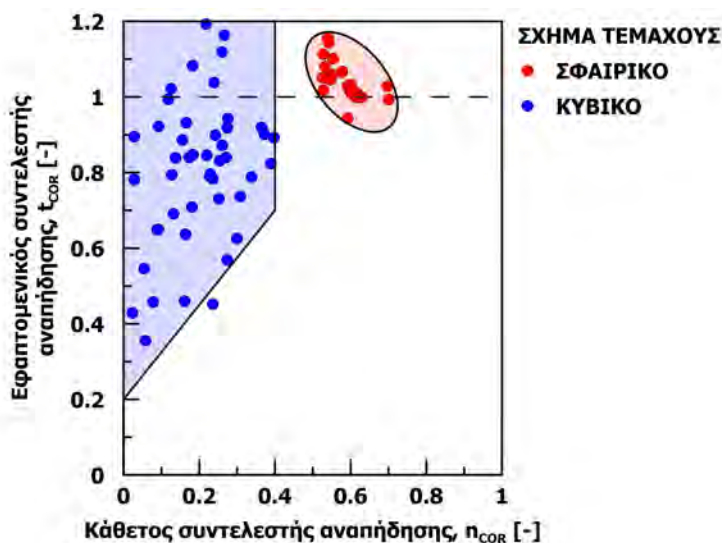


Σχήμα 6.13: Ενδεικτικές διατάξεις επαφής κυβικού δοκιμίου στις δυο διαστάσεις

Αναλύοντας τα μεγέθη που ενεργούν στις δυο ενδεικτικές γεωμετρίες επαφής του σχήματος 6.13, σύμφωνα με τις παραδοχές των θεωρητικών μεθοδολογιών που λαμβάνουν υπόψη την επίδραση του σχήματος 3.3.8 αλλά και τις δοκιμές με ελλειπτικούς δίσκους που έγιναν στην παρούσα έρευνα 5.3, προκύπτει ότι στην πρώτη περίπτωση ευνοείται η αναπήδηση και στην δεύτερη η κύλιση ή η ολίσθηση.

Από την μακροσκοπική παρατήρηση των δοκιμών, διαπιστώθηκε ότι τα κυβικά τεμάχια εμφανίζουν περιστροφή περί του σημείου επαφής και ολίσθηση επί της επιφάνειας πρόσκρουσης. Αντιθέτως, στα σφαιρικά δοκίμια δεν παρατηρήθηκαν ενδείξεις τέτοιας συμπεριφοράς. Τούτο ενισχύεται ποιοτικά από την διάρκεια της επαφής στις καταγραφές των δοκιμών. Παρά το γεγονός ότι ο ρυθμός καταγραφής είναι σημαντικά μεγαλύτερος από τον χρόνο επαφής, όπως αυτός προκύπτει με την εφαρμογή των θεωρητικών σχέσεων (3.2.1.2), οι ενδείξεις για την διαφοροποίησή του είναι ισχυρές. Πιο συγκεκριμένα, σε ορισμένες δοκιμές το κυβικό τέμαχος καταγράφηκε σε επαφή με την επιφάνεια πρόσκρουσης σε δυο διαδοχικές λήψεις. Αντιθέτως, ελάχιστες ήταν οι περιπτώσεις που το σφαιρικό τέμαχος καταγράφηκε να είναι σε επαφή έστω και σε μια λήψη. Έτσι, συμπεραίνεται ότι η διάρκεια επαφής είναι σαφώς βραχύτερη στα σφαιρικά τεμάχια από ότι στα κυβικά. Κατά την διάρκεια της επαφής, πραγματοποιείται αναδιάταξη των κυβικών δοκιμών σε σχέση με την επιφάνεια πρόσκρουσης, κατά την οποία αυξάνουν σημαντικά οι απώλειες ενέργειας και κατ' επέκταση μειώνονται οι συντελεστές αναπήδησης.

Ο εφαπτομενικός συντελεστή αναπήδησης (Πίνακας 6.9), λαμβάνει τιμές περίξ της μονάδας στα σφαιρικά τεμάχια, ενώ στα κυβικά χαρακτηρίζεται από σημαντική διασπορά. Στο σχήμα 6.14 αναπαρίσταται η σχέση του καθέτου με τον εφαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης, συναρτήσει του σχήματος του τεμάχους.



Σχήμα 6.14: Σχέση καθέτου και εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης συναρτήσει του σχήματος του δοκιμίου

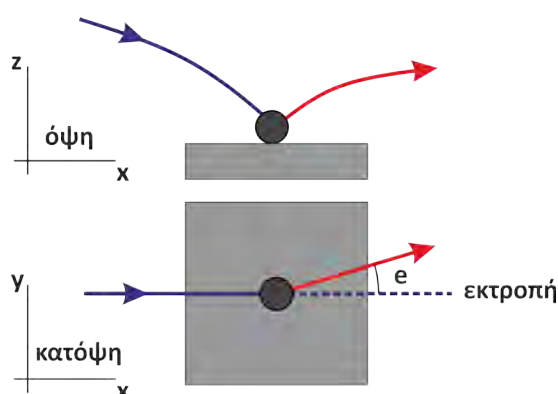
Βάσει της συγκέντρωσης των σημείων παρατηρούνται δυο διακριτές περιοχές που εξαρτώνται από το σχήμα του τεμάχους. Η επαναλήψιμη συμπεριφορά του σφαιρικού σχήματος αντικατοπτρίζεται από την προβολή των σημείων σε ένα περιορισμένης έκτασης χωρίο. Έτσι, η χρήση του μέσου όρου και της τυπικής απόκλισης των τιμών για την προσομοίωση της απόκρισης του τεμάχους, πρακτική που εφαρμόζεται σήμερα στην πράξη, είναι ορθή μόνο στα τεμάχια σφαιρικού σχήματος. Αντιθέτως, η περιοχή που προβάλλονται τα σημεία από τις δο-

κιμές με κυβικά τεμάχια καταλαμβάνει εκτεταμένο εύρος. Συνεπώς, η προαναφερθείσα πρακτική είναι ιδιαίτερα απλουστευτική και η κατάρτιση προτεινόμενων τιμών προβληματική για την προσομοίωση τεμαχίων ακανόνιστου σχήματος, καθώς η γεωμετρία επαφής διαφοροποιείται περισσότερο από ότι στα κυβικά.

Εξετάζοντας τον κινηματικό και τον ενεργειακό συντελεστή αναπήδησης (Πίνακας 6.9), παρατηρείται ότι τα σφαιρικά τεμάχια λαμβάνουν σημαντικά μεγαλύτερες τιμές από ότι τα κυβικά. Επίσης, το εύρος τιμών είναι σημαντικά μικρότερο στα σφαιρικά δοκίμια και στους δυο ορισμούς συντελεστών αναπήδησης. Ωστόσο δεν προκύπτει κάποια συσχέτιση με την γωνία αναπήδησης, όπως συνέβη με τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης.

6.2.2.2 Εκτροπή από το κατακόρυφο επίπεδο κίνησης

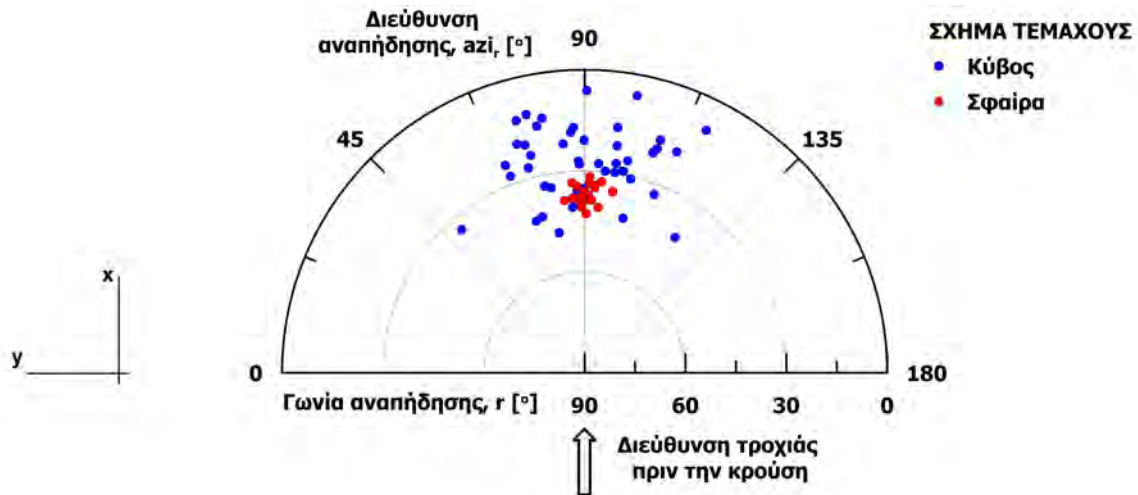
Το σύστημα αξόνων της ανάλυσης ορίστηκε ώστε ο άξονας x να ταυτίζεται με την διεύθυνση κίνησης του τεμάχους πριν την κρούση, καθώς δεν υπάρχει μονοσήμαντος ορισμός της φοράς μέγιστης κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης για οριζόντιο επίπεδο. Έτσι, η εκτροπή προκύπτει από την διαφορά μεταξύ των διευθύνσεων της τροχιάς πριν και μετά την κρούση (Σχήμα 6.15)



Σχήμα 6.15: Σχηματική απεικόνιση της κίνησης για τον προσδιορισμό της εκτροπής για κρούση σε οριζόντια επιφάνεια πρόσκρουσης

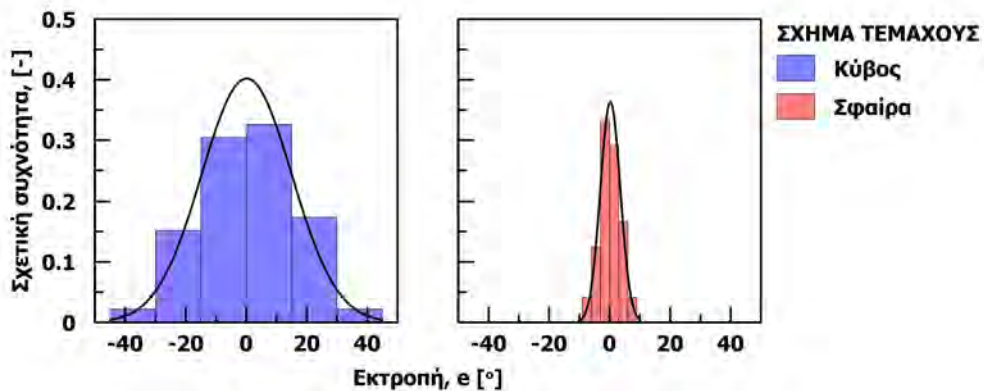
Τα χαρακτηριστικά της τροχιάς μετά την κρούση παρουσιάζονται στο (Σχήμα 6.16) μέσω διαγράμματος πολικών συντεταγμένων, όπου στον περιφερειακό άξονα προβάλλεται η διεύθυνση και στον ακτινικό η γωνία αναπήδησης. Τα σφαιρικά τεμάχια προβάλλονται συγκεντρωμένα σε μια περιοχή περιορισμένου εύρους. Αντιθέτως, η αντίστοιχη περιοχή είναι ιδιαίτερα διευρυμένη στα κυβικά τεμάχια. Αυτό καταδεικνύει διαφοροποίηση της επαναληψιμότητας των δοκιμών, που αποδίδεται στο σχήμα των τεμαχίων, τόσο όσον αφορά στην γωνία αναπήδησης όσο και στην διεύθυνση του τεμάχους μετά την κρούση και άρα την εκτροπή.

Οι κατανομές της εκτροπής, δηλαδή της μεταβολής της διεύθυνσης της τροχιάς μετά την κρούση, παρουσιάζονται στο σχήμα 6.17. Εφαρμόζοντας την στατιστική μέθοδο Kolmogorov-Smirnov (Massey J, 1951), προκύπτει ότι οι κατανομές είναι κανονικές και στις δυο περιπτώσεις. Το μέσο της κατανομής προσεγγίζει το μηδέν, επομένως το τέμαχος έχει ίσες πιθανό-



Σχήμα 6.16: Διεύθυνση και γωνία αναπήδησης της τροχιάς κυβικών και σφαιρικών τεμαχών μετά την κρούση σε οριζόντια επιφάνεια πρόσκρουσης

τητες να εκτραπεί προς την μια ή την άλλη κατεύθυνση. Το γεγονός αυτό αποτελεί ένδειξη ορθότητας της ακολουθούμενης μεθοδολογίας και των μετρήσεων, αφού μια μετατοπισμένη κατανομή θα υπονοούσε ότι η διεύθυνση της τροχιάς μετά την κρούση καθορίστηκε από τις αρχικές συνθήκες, όπως την μη τυχαία απελευθέρωση των τεμαχών ή από κάποιο συστηματικό σφάλμα στις μετρήσεις.

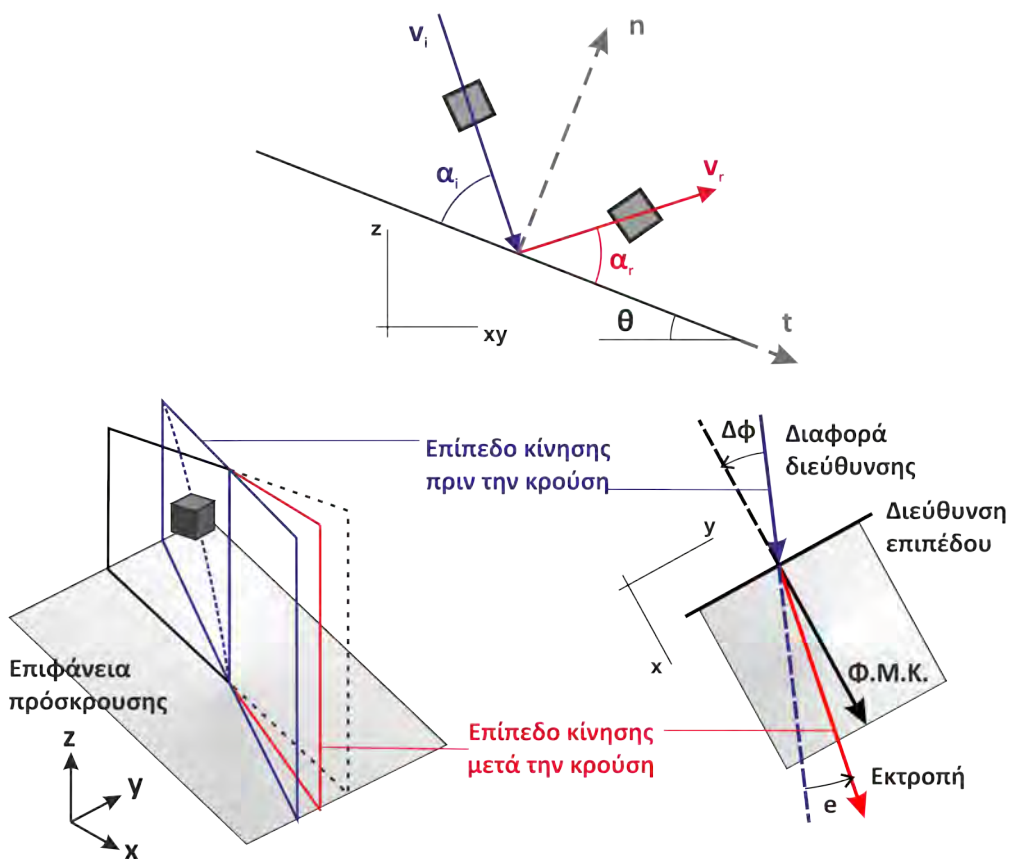


Σχήμα 6.17: Εκτροπή τεμαχών κυβικών και σφαιρικών τεμαχών μετά από κρούση σε οριζόντια επιφάνεια

Βάσει των κατανομών (Σχήμα 6.17), προκύπτει ότι ένα κυβικό τέμαχος εμφανίζει 68% πιθανότητα να εκτραπεί σε ένα εύρος $\pm 15^\circ$ και 90% πιθανότητα το εύρος να είναι $\pm 30^\circ$. Αντιθέτως, ένα σφαιρικό δοκίμιο θα εμφανίσει εκτροπή λιγότερη από $\pm 10^\circ$ στο 95% των περιπτώσεων. Η διαφοροποίηση αυτή αποδίδεται στην γεωμετρία επαφής κατ' ανάλογο τρόπο με όσα σχολιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Συνεπώς, το σχήμα του τεμαχούς επιδρά σημαντικά στην εκτροπή και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για την εκτίμηση της τροχιάς.

6.2.3 Κρούση σε κεκλιμένη επιφάνεια

Για την διερεύνηση της επίδρασης που έχει η κλίση και ο προσανατολισμός της επιφάνειας πρόσκρουσης στους συντελεστές αναπήδησης και στην εκτροπή του τεμάχου χρησιμοποιήθηκαν κυρίως τα κυβικά δοκίμια. Η επιλογή αυτή έγινε καθώς η διακύμανση των συντελεστών αναπήδησης και το εύρος της εκτροπής είναι περιορισμένα στα σφαιρικά τεμάχια. Έτσι, η εκτενής πειραματική διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε με σφαιρικά δοκίμια στις δυο διαστάσεις (βλ. Κεφάλαιο 5 επαρκεί για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς τους. Επίσης, η γεωμετρία επαφής διαφοροποιείται σημαντικά με τα κυβικά τεμάχια, προσεγγίζοντας καλύτερα την πληθώρα περιπτώσεων που προκύπτουν από τα ακανόνιστα σχήματα τεμαχών που συναντώνται στις καταπτώσεις βράχων. Τούτο συμπεραίνεται και πειραματικά από τις δοκιμές πεδίου της αρχικής διερεύνησης, που παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο, όπου συγκρίνεται η απόκριση κυβικών, πολυεδρικών, σφαιρικών και ακανόνιστων (φυσικών) τεμαχών. Ένα ακόμη κίνητρο για την χρήση των κυβικών τεμαχών ήταν η μέτρηση της περιστροφικής κίνησης, που με την χρησιμοποιούμενη μεθοδολογία τριδιάστατης ανάλυσης είναι εφικτή μόνο στα κυβικά και όχι στα σφαιρικά δοκίμια.

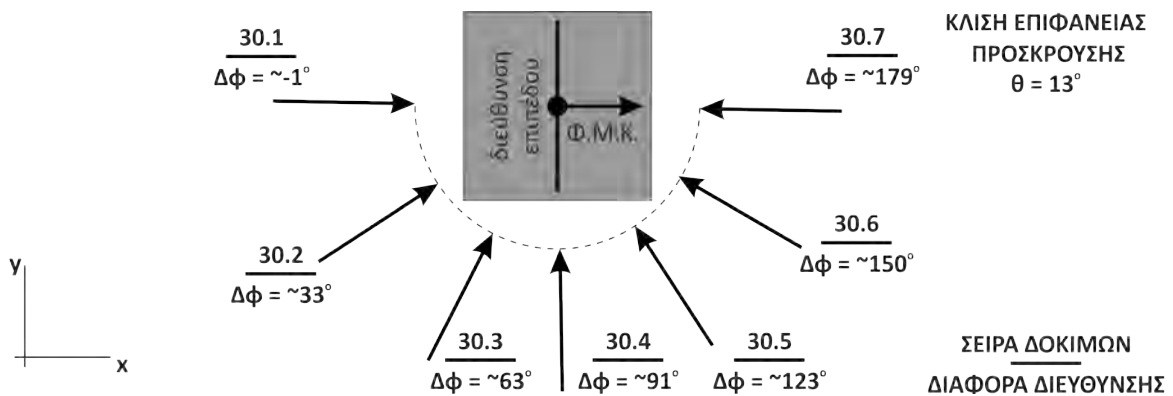


Σχήμα 6.18: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά τροχιάς στον χώρο

Τα κατακόρυφα επίπεδα κίνησης πριν και μετά την κρούση, που καθορίζουν την διαφορά διεύθυνσης ($\Delta\phi$), την εκτροπή (e), τα μέτρα των ταχυτήτων πρόσκρουσης και αναπήδησης και τις αντίστοιχες γωνίες παρουσιάζονται στο σχήμα 6.18.

Με σφαιρικά τεμάχια έγινε μια ομάδα δοκιμών σε επιφάνεια πρόσκρουσης με κλίση $\theta = 13^\circ$. Πραγματοποιήθηκαν 7 σειρές δοκιμών αποτελούμενες από 24 επαναλήψεις, οι οποίες διαφοροποιούνταν ως προς την φορά μέγιστης κλίσης του επιπέδου πρόσκρουσης. Πιο συγκεκριμένα, διατηρώντας σταθερή την διεύθυνση απελευθέρωσης των τεμαχίων, περιστρέφεται η επιφάνεια πρόσκρουσης σε βήματα των περίπου 30° , μέχρι να καλυφθεί ένα ημικύκλιο. Έτσι, σε κάθε σειρά δοκιμών υπάρχει διαφορά διεύθυνσης από την προηγούμενη κατά περίπου 30° .

Στο σχήμα 6.19 αναπαρίστανται οι διευθύνσεις της τροχιάς πριν την κρούση για κάθε σειρά δοκιμών, ως προς την φορά μέγιστης κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης. Συγκεντρωτικά, τα στοιχεία κίνησης από τις δοκιμές αυτές παρουσιάζονται στον πίνακα 6.10 και αναλυτικότερα τα αποτελέσματά τους παρατίθενται στο παράρτημα 30.

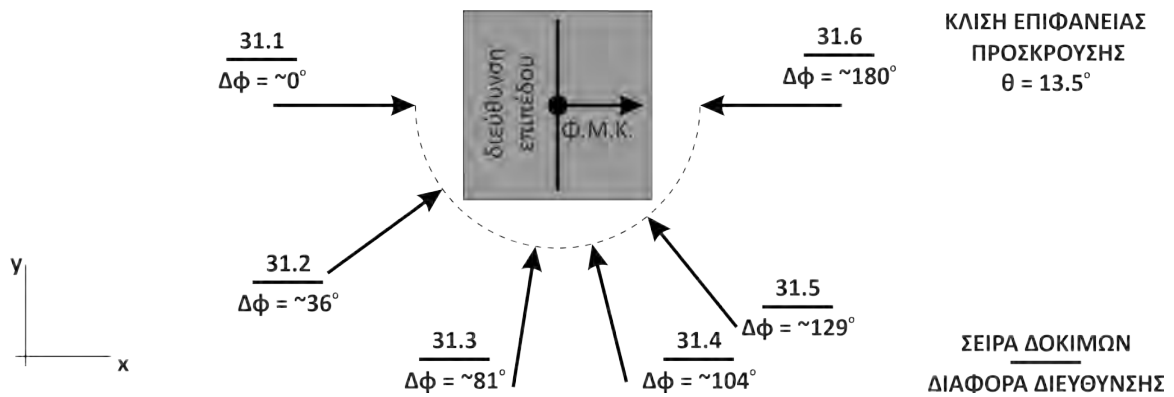


Σχήμα 6.19: Διεύθυνση ρίψης σφαιρικών τεμαχίων ανά σειρά δοκιμών

Πίνακας 6.10: Ρίψεις σφαιρικών δοκιμών σε επιφάνεια πρόσκρουσης με κλίση $\theta = 13^\circ$

Σειρά δοκιμών	Αριθμός επαν.	Διαφ. διεύθυνσης $\Delta\phi [^\circ]$	Πρόσκρουση		Αναπήδηση	
			$v_i [ms^{-1}]$	$\alpha_i [^\circ]$	$v_r [ms^{-1}]$	$\alpha_r [^\circ]$
30.1	24	-1.3	3.63	33.4	2.93	33.7
30.2	24	33.4	3.66	35.4	3.04	34.0
30.3	24	62.7	3.75	39.7	3.05	34.7
30.4	24	90.8	3.65	46.4	3.07	37.2
30.5	24	123.4	3.66	52.4	3.01	38.8
30.6	24	149.7	3.65	57.7	2.87	44.0
30.7	24	179.0	3.73	59.8	2.82	48.7

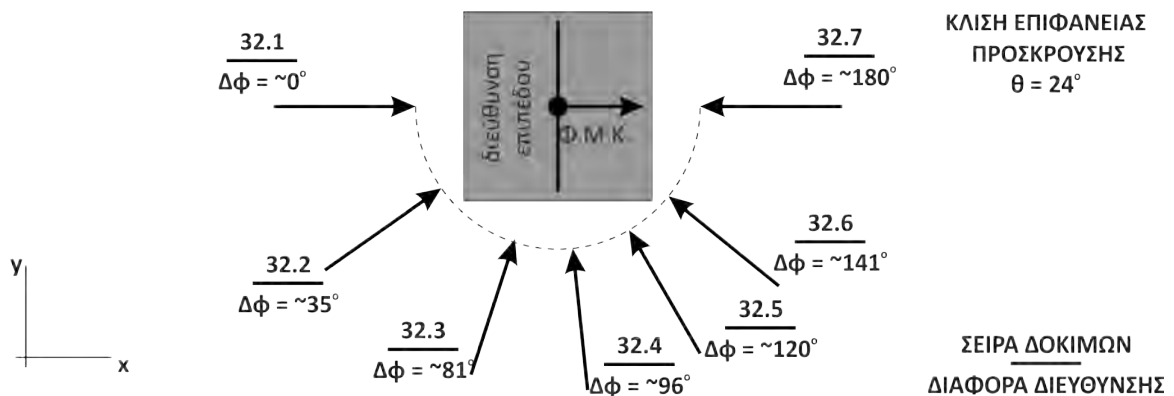
Με κυβικά τεμάχια έγιναν δοκιμές σε επιφάνειες πρόσκρουσης με κλίση $\theta = 13.5^\circ$, 24° και 43.5° . Για κάθε κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης πραγματοποιήθηκαν επιμέρους σειρές δοκιμών μεταβάλλοντας την διαφορά διεύθυνσης (Σχήμα 6.20 έως 6.22). Τα χαρακτηριστικά της κίνησης παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στους πίνακες που ακολουθούν, ομαδοποιημένα κατά την κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης. Τα αποτελέσματα παρατίθενται λεπτομερώς στα παράρτημα 31 έως 33.



Σχήμα 6.20: Διεύθυνση ρίψης κυβικών τεμαχίων, ανά σειρά δοκιμών, για κλίση επιφάνειας $\theta = 13.5^\circ$

Πίνακας 6.11: Ρίψεις κυβικών δοκιμών σε επιφάνεια πρόσκρουσης με κλίση $\theta = 13.5^\circ$

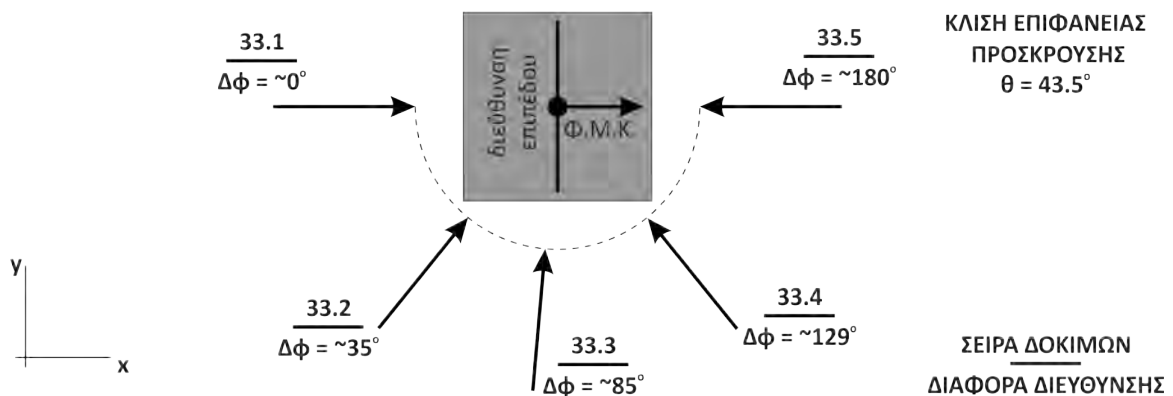
Σειρά δοκιμών	Αριθμός επαν.	Διαφ. διεύθυνσης $\Delta\phi [^\circ]$	Πρόσκρουση		Αναπήδηση	
			$v_i [ms^{-1}]$	$\alpha_i [^\circ]$	$v_r [ms^{-1}]$	$\alpha_r [^\circ]$
31.1	30	0.1	3.40	48.0	2.00	17.7
31.2	30	36.3	3.47	50.6	1.99	19.4
31.3	30	80.8	3.41	56.7	1.91	19.0
31.4	28	103.7	3.51	59.6	1.98	22.7
31.5	30	129.4	3.46	68.1	1.70	29.4
31.6	36	180.5	3.19	77.8	0.92	33.7



Σχήμα 6.21: Διεύθυνση ρίψης κυβικών τεμαχίων, ανά σειρά δοκιμών, για κλίση επιφάνειας $\theta = 24^\circ$

Πίνακας 6.12: Ρίψεις κυβικών δοκιμών σε επιφάνεια πρόσκρουσης με κλίση $\vartheta = 24^\circ$

Σειρά δοκιμών	Αριθμός επαν.	Διαφ. διεύθυνσης $\Delta\phi [^\circ]$	Πρόσκρουση		Αναπήδηση	
			$v_i [ms^{-1}]$	$\alpha_i [^\circ]$	$v_r [ms^{-1}]$	$\alpha_r [^\circ]$
32.1	39	0.1	3.36	37.3	2.19	14.4
32.2	32	35.1	3.39	40.7	2.12	12.6
32.3	30	72.3	3.31	52.5	1.86	14.6
32.4	28	95.8	3.35	63.1	1.70	16.9
32.5	32	120.0	3.44	73.6	1.35	23.7
32.6	24	141.5	3.2	82.9	1.06	43.4
32.7	30	180.4	3.49	83.1	0.77	41.5



Σχήμα 6.22: Διεύθυνση ρίψης κυβικών τεμαχών, ανά σειρά δοκιμών, για κλίση επιφάνειας $\vartheta = 43.5^\circ$

Πίνακας 6.13: Ρίψεις κυβικών δοκιμών σε επιφάνεια πρόσκρουσης με κλίση $\vartheta = 43.5^\circ$

Σειρά δοκιμών	Αριθμός επαν.	Διαφ. διεύθυνσης $\Delta\phi [^\circ]$	Πρόσκρουση		Αναπήδηση	
			$v_i [ms^{-1}]$	$\alpha_i [^\circ]$	$v_r [ms^{-1}]$	$\alpha_r [^\circ]$
33.1	24	0.1	4.09	22.2	3.24	6.8
33.2	24	51.1	3.81	35.6	3.12	10.6
33.3	23	84.8	3.78	57.5	2.70	17.3
33.4	24	129.4	3.98	97.3	1.66	24.3
33.5	24	179.9	3.65	108.0	1.35	40.4

Στις επόμενες ενότητες σχολιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών ανάλογα με το είδος της κρούσης (ομόρροπη, αντίρροπη ή λοξή).

6.2.3.1 Ομόρροπη κρούση

Στην ομόρροπη κρούση η διεύθυνση της τροχιάς ταυτίζεται με την φορά μεγίστης κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης. Η περίπτωση αυτή αποτελεί την βασική παραδοχή των αναλύσεων που γίνονται με την χρήση διδιάστατων λογισμικών στις μελέτες καταπτώσεων, όπου δεν υπεισέρχεται η παράμετρος της εκτροπής.

Στην ενότητα αυτή σχολιάζονται τα αποτελέσματα ως προς την κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης. Δεδομένου ότι η απελευθέρωση των τεμαχών πραγματοποιήθηκε με παρόμοιες συνθήκες σε όλες τις σειρές δοκιμών, η γωνία πρόσκρουσης έχει αντιστρόφως ανάλογη σχέση με την κλίση της επιφάνειας. Συνεπώς τα αποτελέσματα μπορούν να ερμηνευθούν αντιστοίχως και με την γωνία πρόσκρουσης.

6.2.3.1.1 Επίδραση του σχήματος στους συντελεστές αναπήδησης στην ομόρροπη κρούση

Στην ενότητα 6.2.2.1 εξετάστηκε η επίδραση του σχήματος στους συντελεστές αναπήδησης για κρούση σε οριζόντια επιφάνεια πρόσκρουσης, ενώ εδώ σχολιάζεται η επίδραση του σχήματος όταν η επιφάνεια έχει κλίση. Αξιοποιούνται οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν με τα σφαιρικά τεμάχια (Πίνακας 6.10 – σειρά δοκιμών 30.1) και με τα κυβικά (Πίνακας 6.13 – σειρά δοκιμών 31.1). Στις δοκιμές αυτές, η κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης είναι παρόμοια, πιο συγκεκριμένα $\vartheta = 13^\circ$ στις δοκιμές με τα σφαιρικά τεμάχια και $\vartheta = 13.5^\circ$ σε αυτές με τα κυβικά.

Οι χαρακτηριστικές τιμές των συντελεστών αναπήδησης (ελάχιστη, μέγιστη, μέση, τυπική απόκλιση και εύρος) παρουσιάζονται στον πίνακα 6.14.

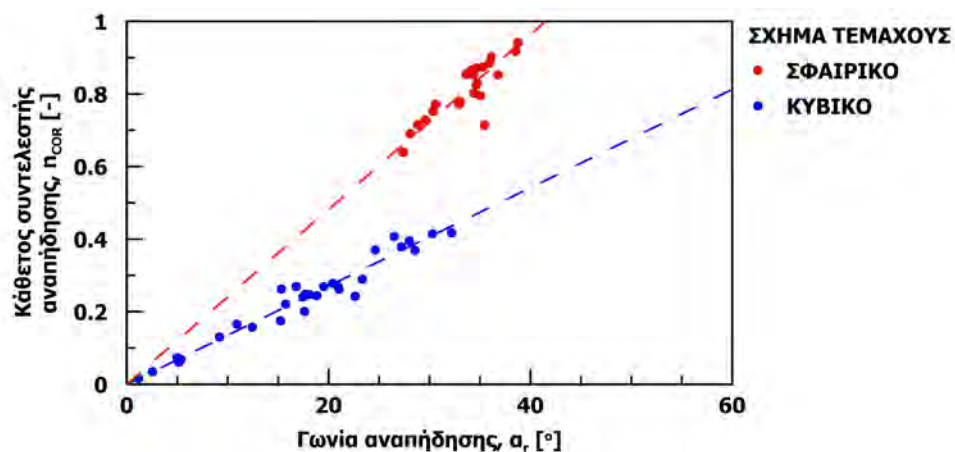
Πίνακας 6.14: Χαρακτηριστικές τιμές συντελεστών αναπήδησης για κρούση σφαιρικών και κυβικών τεμαχών σε επιφάνεια πρόσκρουσης με κλίση $\vartheta \approx 13^\circ$

Συντελεστής αναπήδησης	Σειρά δοκιμών	Σχήμα τεμαχίου	Χαρακτηριστικές τιμές συντελεστών αναπήδησης				
			ελάχιστη	μέγιστη	μέση	τυπ. απ.	εύρος
Κάθετος $\eta_{COR}[-]$	30.1	σφαιρικό	0.64	0.94	0.81	0.08	0.30
	31.1	κυβικό	0.02	0.42	0.24	0.11	0.40
Εφαπτομενικός $t_{COR}[-]$	30.1	σφαιρικό	0.77	0.84	0.80	0.02	0.07
	31.1	κυβικό	0.68	0.98	0.83	0.07	0.30
Κινηματικός $\nu_{COR}[-]$	30.1	σφαιρικό	0.75	0.84	0.81	0.02	0.09
	31.1	κυβικό	0.48	0.71	0.59	0.05	0.23
Ενεργειακός $E_{COR}[-]$	30.1	σφαιρικό	0.56	0.71	0.65	0.04	0.15
	31.1	κυβικό	0.23	0.50	0.35	0.06	0.28

Γενικώς, η συμπεριφορά των συντελεστών είναι παρόμοια με την περίπτωση της κρούσης σε οριζόντια επιφάνεια πρόσκρουσης. Πιο συγκεκριμένα, για το σύνολο των διαφορετικών ορισμών των συντελεστών αναπήδησης, ισχύει ότι τα σφαιρικά τεμάχια λαμβάνουν μεγαλύτερες τιμές για τον κάθετο, τον κινηματικό και τον ενεργειακό συντελεστή αναπήδησης, ενώ το εύρος τιμών είναι σημαντικά μεγαλύτερο στα κυβικά τεμάχια.

Επαληθεύεται επίσης η γραμμική σχέση του καθέτου συντελεστή με την γωνία αναπήδησης (Σχήμα 6.23). Παρατηρείται διαφοροποίηση της κλίσης της ευθείας συσχέτισης με το σχήμα του τεμάχους, ωστόσο είναι σε συμφωνία με την συμπεριφορά που παρατηρείται βάσει της γωνίας πρόσκρουσης. Πιο συγκεκριμένα, από τις προηγούμενες διερευνήσεις έχει προκύψει ότι η κλίση της ευθείας αυτής μειώνεται με την αύξηση της γωνίας πρόσκρουσης. Στις δοκιμές αυτές, η γωνία πρόσκρουσης είναι περίπου 48° στα κυβικά τεμάχια, μεγαλύτερη από την αντίστοιχη γωνία στα σφαιρικά (περίπου 33°), συνεπώς αιτιολογείται η παρατηρούμενη διαφοροποίηση.

Η διακύμανση του καθέτου συντελεστή αποτυπώνεται στην γωνία αναπήδησης και είναι σαφώς μικρότερη στα σφαιρικά τεμάχια αφού εμφανίζουν, εν γένει, επαναλήψιμη συμπεριφορά εξαιτίας της σταθερής γεωμετρίας επαφής.



Σχήμα 6.23: Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας αναπήδησης ως προς το σχήμα του τεμάχους για κρούση σε επιφάνεια με κλίση $\vartheta \approx 13^\circ$

6.2.3.1.2 Επίδραση της κλίσης στους συντελεστές αναπήδησης στην ομόροπη κρούση

Η επίδραση της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης σχολιάζεται χρησιμοποιώντας τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν με τα κυβικά τεμάχια, καθώς εκτελέστηκαν σε επιφάνειες με τρεις διαφορετικές κλίσεις. Επιπρόσθετα, χρησιμοποιούνται για σύγκριση οι δοκιμές που εκτελέστηκαν σε οριζόντια επιφάνεια. Οι χαρακτηριστικές τιμές των συντελεστών αναπήδησης παρουσιάζονται στον πίνακα 6.15 και αναπαρίστανται στο σχήμα 6.24.

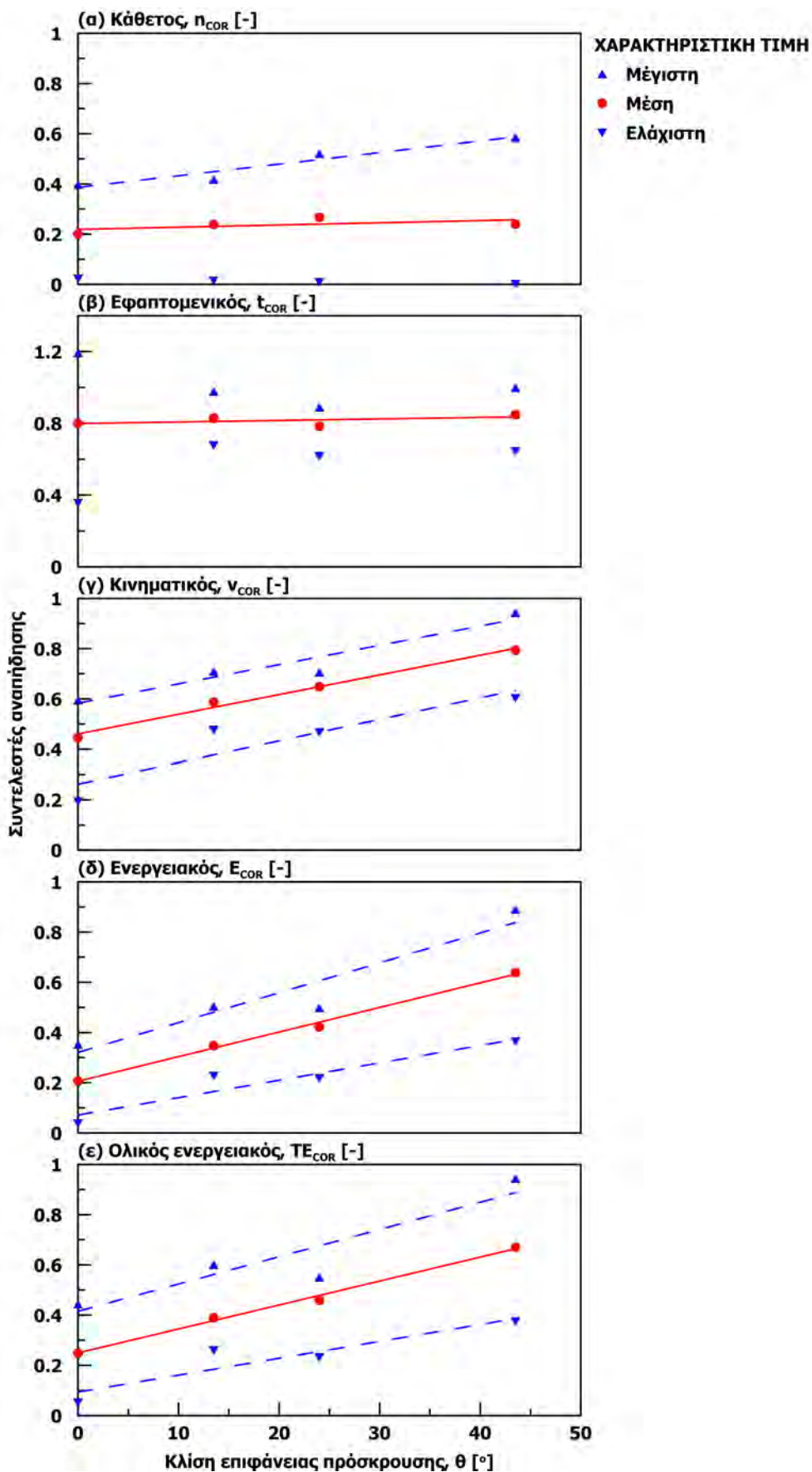
Πίνακας 6.15: Χαρακτηριστικές τιμές συντελεστών αναπήδησης για κρούση κυβικών τεμαχίων σε επιφάνειες πρόσκρουσης διαφορετικής κλίσης

Συντελεστής αναπήδησης	Σειρά δοκιμών	Κλίση θ [°]	Χαρακτηριστικές τιμές συντελεστών αναπήδησης				
			ελάχιστη	μεγίστη	μέση	τυπ. απ.	εύρος
Κάθετος $\eta_{COR}[-]$	29.1	0	0.02	0.40	0.20	0.10	0.37
	31.1	13.5	0.02	0.42	0.24	0.11	0.40
	32.1	24	0.01	0.52	0.27	0.13	0.51
	33.1	43.5	0.00	0.58	0.24	0.18	0.58
Εφαπτομενικός $t_{COR}[-]$	29.1	0	0.36	1.19	0.80	0.19	0.84
	31.1	13.5	0.68	0.98	0.83	0.07	0.30
	32.1	24	0.62	0.89	0.78	0.05	0.27
	33.1	43.5	0.64	1.00	0.85	0.10	0.36
Κινηματικός $\nu_{COR}[-]$	29.1	0	0.19	0.59	0.45	0.10	0.40
	31.1	13.5	0.48	0.71	0.59	0.05	0.23
	32.1	24	0.47	0.71	0.65	0.05	0.24
	33.1	43.5	0.60	0.94	0.79	0.09	0.34
Ενεργειακός $E_{COR}[-]$	29.1	0	0.05	0.35	0.21	0.08	0.32
	31.1	13.5	0.23	0.50	0.35	0.06	0.28
	32.1	24	0.22	0.50	0.42	0.06	0.28
	33.1	43.5	0.36	0.89	0.64	0.14	0.53
Ολικός ενεργειακός $TE_{COR}[-]$	29.1	0	0.05	0.45	0.25	0.09	0.39
	31.1	13.5	0.26	0.60	0.39	0.07	0.34
	32.1	24	0.23	0.55	0.46	0.07	0.32
	33.1	43.5	0.38	0.94	0.67	0.15	0.57

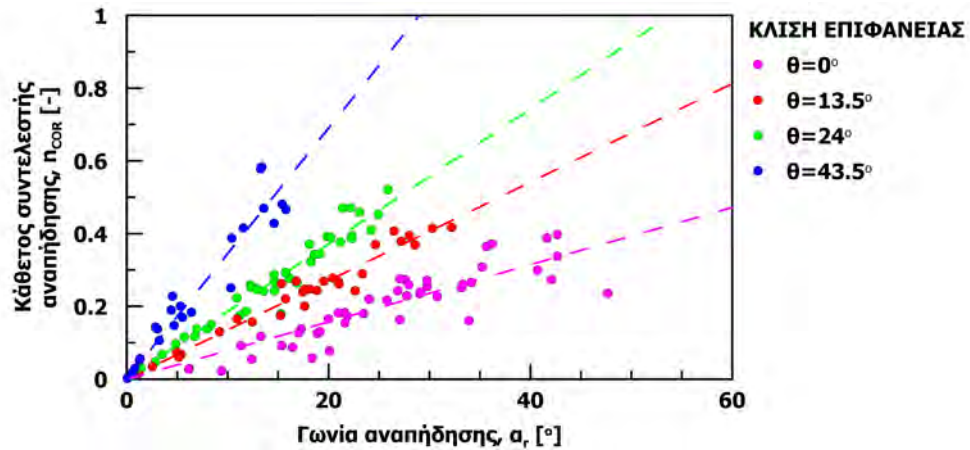
Η μέση τιμή του καθέτου συντελεστή αναπήδησης δεν εμφανίζει κάποια συγκεκριμένη τάση ως προς την κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης, λαμβάνοντας εν γένει σταθερή τιμή. Οι ελάχιστες τιμές που προσδιορίστηκαν ανεξαρτήτως της κλίσης της επιφάνειας ή της γωνίας πρόσκρουσης προσεγγίζουν το μηδέν, δείχνοντας την μετατροπή της κίνησης σε κύλιση ή ολίσθηση, αντί αναπήδησης. Οι μέγιστες τιμές αυξάνουν όσο η κλίση της επιφάνειας αυξάνεται, με αποτέλεσμα να διευρύνεται το εύρος τιμών του καθέτου συντελεστή αναπήδησης.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει η σχέση του καθέτου συντελεστή αναπήδησης με την γωνία αναπήδησης, που επαληθεύεται και στη περίπτωση αυτή (Σχήμα 6.25). Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα μεγέθη αυτά εμφανίζουν μεταξύ τους μια γραμμική σχέση που διέρχεται από την αρχή των αξόνων, με την κλίση των εν λόγω ευθειών να σχετίζεται με την γωνία πρόσκρουσης (ή ισοδύναμα από την κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης).

Οι μέσες τιμές του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης δεν μεταβάλλονται με την κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης. Το εύρος τους είναι σχετικά περιορισμένο, με εξαίρεση την οριζόντια επιφάνεια πρόσκρουσης όπου αυξάνεται σημαντικά.



Σχήμα 6.24: Μεταβολή συντελεστών αναπήδησης συναρτήσει της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης



Σχήμα 6.25: Σχέση καθέτου συντελεστή αναπήδησης με την γωνία αναπήδησης

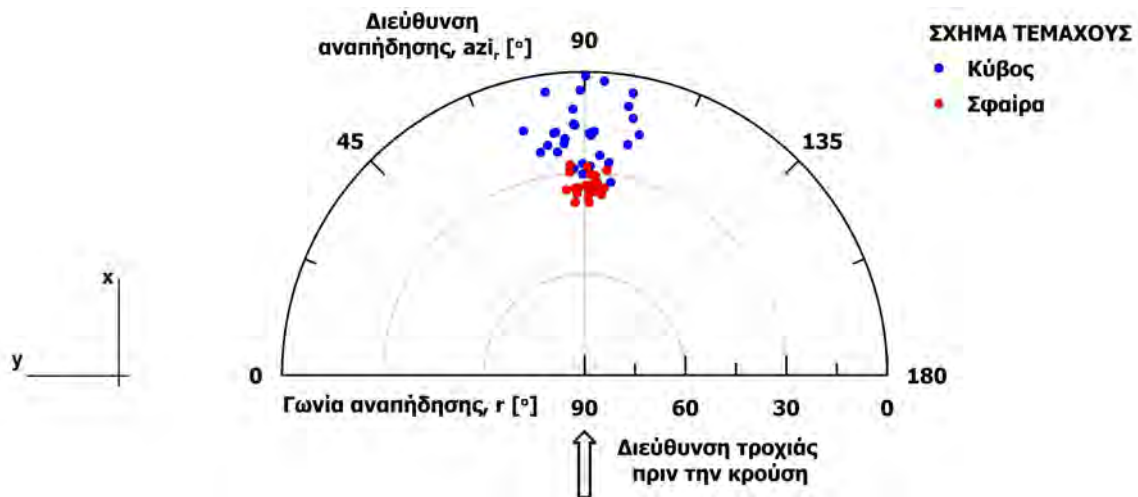
Η μέση τιμή του κινηματικού συντελεστή αναπήδησης αυξάνεται όσο η κλίση του πρανούς γίνεται πιο απότομη. Οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές εμφανίζουν αντίστοιχη τάση, σχηματίζοντας μια ζώνη δυνατών τιμών με σχετικά αυξημένο εύρος, αλλά σαφώς μικρότερο από αυτό του καθέτου συντελεστή αναπήδησης.

Οι συντελεστές αναπήδησης που υπολογίζονται βάσει της κινητικής ενεργείας εμφανίζουν παρόμοια τάση με τον κινηματικό συντελεστή αναπήδησης, αλλά μικρότερο μέγεθος. Συνοπολογίζοντας και την περιστροφική συνιστώσα της κίνησης (ολικός ενεργειακός συντελεστής αναπήδησης) λαμβάνονται ελαφρώς αυξημένες τιμές, χωρίς όμως η διαφοροποίηση να είναι σημαντική συγκριτικά με το εύρος που λαμβάνουν οι τιμές.

6.2.3.1.3 Επίδραση του σχήματος στην εκτροπή στην ομόρροπη κρούση

Στην ενότητα 6.2.2.2 προέκυψε ότι η εκτροπή εξαρτάται σημαντικά από το σχήμα του τεμάχους όταν η κρούση γίνεται σε οριζόντια επιφάνεια. Πιο συγκεκριμένα, τα σφαιρικά τεμάχη παρουσιάζουν σημαντικά λιγότερη εκτροπή συγκριτικά με τα κυβικά. Θέτοντας την επιφάνεια υπό κλίση ($\vartheta = 13^\circ$) παρατηρείται αντίστοιχη συμπεριφορά, ωστόσο το εύρος της εκτροπής μειώνεται και για τα δυο σχήματα. Στο σχήμα 6.26 προβάλλονται σε πολικό σύστημα αναφοράς τα δεδομένα από τις σειρές δοκιμών 30.1 και 31.1 (Πίνακες 6.11 και 6.13), δηλαδή για δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν με ομόρροπη διεύθυνση τροχιάς, σε επιφάνεια πρόσκρουσης κλίσης $\vartheta = 13^\circ$ με σφαιρικά και κυβικά τεμάχη αντίστοιχα.

Η συγκέντρωση των σημείων στο σχήμα 6.26 οδηγεί σε παρόμοια συμπεράσματα με αυτά που προκύπτουν από την κρούση σε οριζόντια επιφάνεια πρόσκρουσης (Σχήμα 6.16). Ειδικότερα, η απόκριση των σφαιρικών δοκιμών εμφανίζει σαφώς καλύτερη επαναληψιμότητα σε σχέση με τα κυβικά. Όμως, το εύρος της εκτροπής είναι μειωμένο συγκριτικά με την οριζόντια επιφάνεια πρόσκρουσης ανεξαρτήτως σχήματος (Πίνακας 6.16). Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι και η κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης, πλέον του σχήματος του τεμάχους, σχετίζεται με το μέγεθος της εκτροπής.



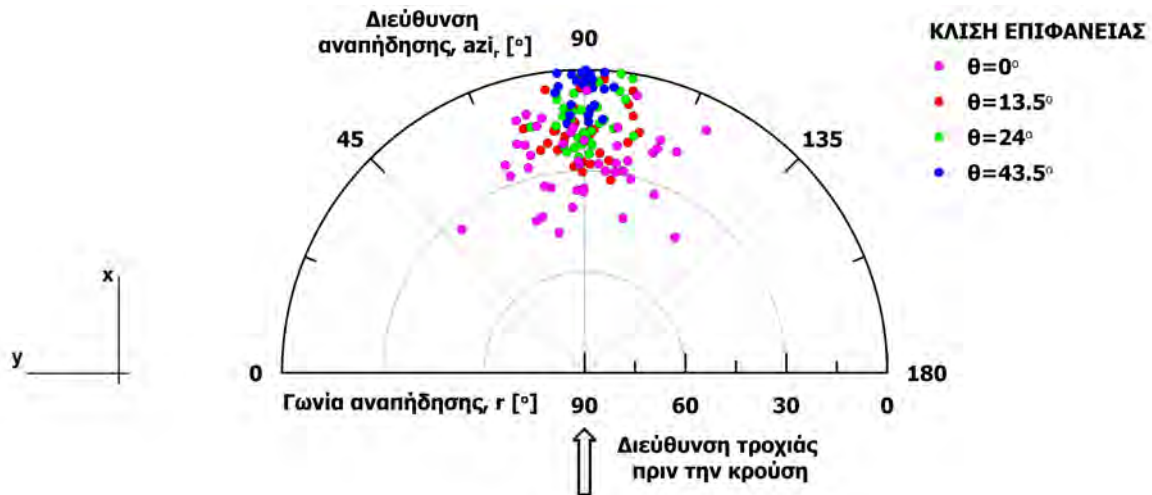
Σχήμα 6.26: Διεύθυνση αναπήδησης κυβικών και σφαιρικών δοκιμίων μετά από κρούση σε επιφάνεια με κλίση περίπου $\vartheta = 13^\circ$

Πίνακας 6.16: Επίδραση του σχήματος και της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης στην εκτροπή

Σχήμα τεμάχους	Κλίση θ [°]	Γων. προσ. a_i [°]	Γων. αν. a_r [°]	Χαρακτηριστικές τιμές εκτροπής, e [°]			
				ελάχιστη	μεγίστη	μέση	εύρος
Σφαιρικό	0	53.2	36.9	-6.7	8.8	0.2	15.5
	13	33.4	33.7	-4.7	3.8	-0.3	8.5
Κυβικό	0	59.2	25.9	-34.2	42.2	0.1	76.4
	13.5	48.0	17.7	-15.2	15.2	0.0	30.4

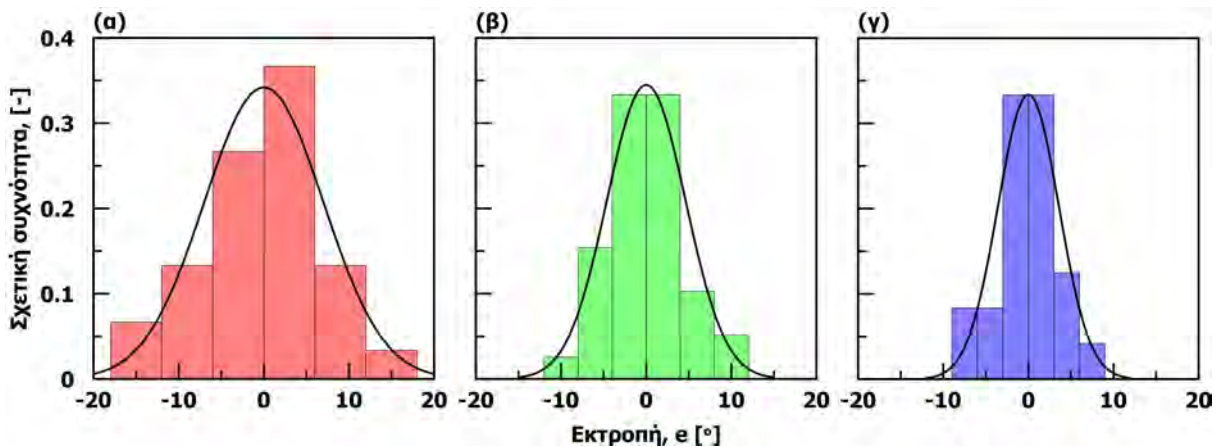
6.2.3.1.4 Επίδραση της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης στην εκτροπή

Η επίδραση της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης εξετάζεται ακολούθως με τα κυβικά τεμάχη. Στο σχήμα 6.27 προβάλλονται σε πολικό διάγραμμα η διεύθυνση (περιφερειακός άξονας) και η γωνία αναπήδησης (ακτινικός άξονας) από τις σειρές δοκιμών 31.1, 32.1 και 32.3, που η κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης είναι $\vartheta = 13^\circ$, 24° και 43.5° αντίστοιχα. Επίσης, με σκοπό την σύγκριση, προβάλλονται και τα σημεία από την σειρά δοκιμών 29.1, που η επιφάνεια πρόσκρουσης είναι οριζόντια.



Σχήμα 6.27: Διεύθυνση αναπήδησης στις δοκιμές ομόρροπης κρούσης κυβικών δοκιμών συναρτήσει της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης

Παρατηρείται ότι με την αύξηση της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης, τα σημεία προβάλλονται περισσότερο συγκεντρωμένα και κοντύτερα προς την περιφέρεια του διαγράμματος. Έτσι, σε συμφωνία με τα προηγούμενα, προκύπτει ότι τόσο η εκτροπή όσο και η γωνία αναπήδησης μειώνονται με την αύξηση της κλίσης του επιπέδου. Το συμπέρασμα αυτό γίνεται ευκρινές στις κατανομές της εκτροπής που παρουσιάζονται στο σχήμα 6.28 και στα χαρακτηριστικά των τροχιών, όπως συνοψίζονται στον πίνακα 6.17.



Σχήμα 6.28: Εκτροπή τεμαχών συναρτήσει της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης

Οι κατανομές που χαρακτηρίζουν την εκτροπή των τεμαχών (Σχήμα 6.28) είναι κανονικές. Το μέσο κάθε κατανομής προσεγγίζει ικανοποιητικά την διεύθυνση της τροχιάς πριν την κρούση, επαληθεύοντας ότι οι συνθήκες σχεδιασμού των δοκιμών επιτευχθήκαν κατά την εκτέλεσή τους στην πράξη και εμμέσως την ορθότητα των μετρούμενων μεγεθών.

Πίνακας 6.17: Εκτροπή κυβικών τεμαχών για πρόσκρουση σε επιφάνεια διαφορετικής κλίσης

Κλίση θ [°]	Γων. πρόσκρουσης, α_i [°]		Γων. αναπήδησης, α_r [°]		Εκτροπή, e [°] εύρος
	μέση	τυπ. απ.	μέση	τυπ. απ.	
0	59.2	3.9	25.9	10.2	76.4
13.5	48.0	2.4	17.7	8.2	30.4
24	37.3	2.4	14.4	6.9	22.7
43.5	22.2	2.6	6.8	5.3	14.9

Επισημαίνεται ότι στις παραπάνω δοκιμές το τέμαχος προσεγγίζει την επιφάνεια πρόσκρουσης σχηματίζοντας γωνία με την οριζόντιο περίπου 60° . Συνεπώς, η γωνία πρόσκρουσης προκύπτει, προσεγγιστικά, από την διαφορά της παραπάνω γωνίας με την κλίση της επιφάνειας. Κατ' επέκταση τα συμπεράσματα της ενότητας αυτής, δύνανται να εκφραστούν και ως προς την γωνία πρόσκρουσης (Πίνακας 6.17). Τούτο είναι χρήσιμο για την σύγκριση των αποτελεσμάτων με αντίστοιχα της βιβλιογραφίας, καθώς σε ορισμένες εργασίες χρησιμοποιείται η γωνία πρόσκρουσης και σε άλλες η κλίση του πρανούς.

6.2.3.2 Αντίρροπη κρούση

Στην αντίρροπη κρούση η διεύθυνση της τροχιάς σχηματίζει γωνία 180° με την φορά μεγίστης κλίσης του πρανούς. Σε πρακτικές εφαρμογές η περίπτωση αυτή είναι μάλλον σπάνια, ωστόσο μπορεί να συναντηθεί όταν η κρούση γίνεται σε κατασκευές ανάσχεσης (π.χ. σε οπλισμένα επιχώματα), σε αναβαθμούς υψηλών πρανών ή σε τοπικές εξάρσεις του φυσικού αναγλύφου.

6.2.3.2.1 Επίδραση του σχήματος στους συντελεστές αναπήδησης στην αντίρροπη κρούση

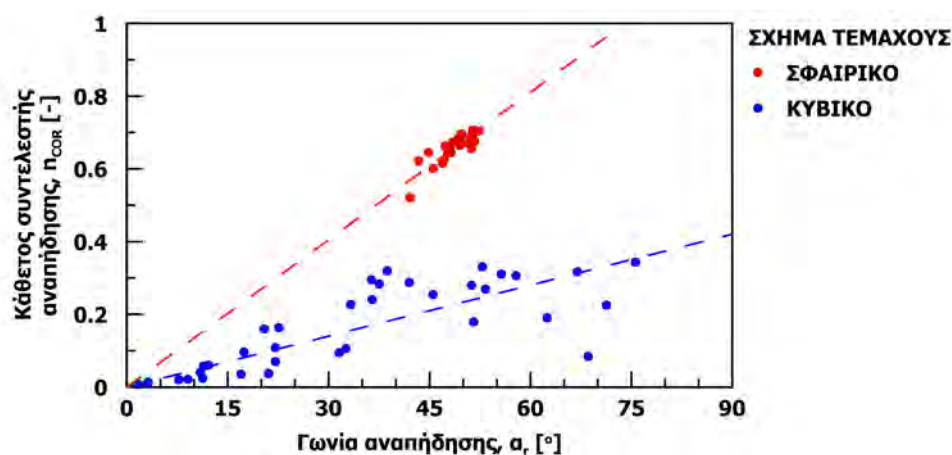
Η διερεύνηση της επίδρασης του σχήματος στην αντίρροπη κρούση γίνεται αξιοποιώντας τις σειρές δοκιμών 30.7 και 31.6, καθώς έχουν πραγματοποιηθεί με παρόμοιες συνθήκες αλλά με διαφορετικό σχήμα τεμάχους (σφαιρικό και κυβικό αντίστοιχα). Στον πίνακα 6.18 παρατίθενται οι χαρακτηριστικές τιμές των συντελεστών αναπήδησης συναρτήσει του σχήματος του τεμάχους.

Η συμπεριφορά των συντελεστών αναπήδησης στην κρούση σε επιφάνεια με αντίρροπη κλίση ομοιάζει με αυτήν στην ομόρροπη και την οριζόντια επιφάνεια πρόσκρουσης. Για τον κάθετο, τον κινηματικό και τον ενεργειακό συντελεστή αναπήδησης, οι τιμές είναι μεγαλύτερες στα σφαιρικά τεμάχη. Αντιθέτως, στα κυβικά τεμάχη το εύρος που λαμβάνουν είναι αισθητά μεγαλύτερο. Συγκριτικά με την κρούση σε ομόρροπη επιφάνεια, τα μεγέθη των συντελεστών αναπήδησης προκύπτουν ελαφρώς μειωμένα στην αντίρροπη επιφάνεια ανεξαρτήτως του σχήματος του τεμάχους.

Πίνακας 6.18: Χαρακτηριστικές τιμές συντελεστών αναπήδησης για κρούση σφαιρικών και κυβικών τεμαχών σε επιφάνεια πρόσκρουσης με αντίρροπη κλίση $\vartheta = 13^\circ$

Συντελεστής αναπήδησης	Σειρά δοκιμών	Σχήμα τεμαχίου	Χαρακτηριστικές τιμές συντελεστών αναπήδησης				
			ελάχιστη	μεγίστη	μέση	τυπ. απ.	εύρος
Κάθετος $\eta_{COR}[-]$	30.7	σφαιρικό	0.52	0.71	0.66	0.04	0.19
	31.6	κυβικό	0.01	0.34	0.16	0.11	0.34
Εφαπτομενικός $t_{COR}[-]$	30.7	σφαιρικό	0.90	1.10	0.99	0.05	0.20
	31.6	κυβικό	0.16	5.67	1.36	1.18	5.51
Κινηματικός $\nu_{COR}[-]$	30.7	σφαιρικό	0.68	0.79	0.76	0.02	0.11
	31.6	κυβικό	0.09	0.49	0.29	0.11	0.40
Ενεργειακός $E_{COR}[-]$	30.7	σφαιρικό	0.46	0.62	0.57	0.03	0.17
	31.6	κυβικό	0.01	0.24	0.09	0.06	0.23

Στο σχήμα 6.29 παρουσιάζεται ο κάθετος συντελεστής συναρτήσει της γωνίας αναπήδησης για τα σφαιρικά και τα κυβικά δοκίμια στην αντίρροπη κρούση.

**Σχήμα 6.29:** Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας αναπήδησης ως προς το σχήμα του τεμαχίου για κρούση σε επιφάνεια πρόσκρουσης με αντίρροπη κλίση

Παρατηρείται και σε αυτήν την περίπτωση η γραμμική συσχέτιση μεταξύ των εν λόγω μεγεθών, ωστόσο η ποιότητα της είναι χειρότερη από αυτήν στην ομόρροπη και την οριζόντια επιφάνεια πρόσκρουσης. Επίσης, στα κυβικά τεμάχια είναι εμφανής η έντονη διασπορά της γωνίας αναπήδησης, σε αντίθεση με τα σφαιρικά τεμάχια που κυμαίνεται σε περιορισμένο εύρος, που όπως έχει ήδη σχολιασθεί, αποτελεί χαρακτηριστικό της επαναλήψιμης συμπεριφοράς του σφαιρικού σχήματος.

6.2.3.2.2 Επίδραση της κλίσης στους συντελεστές αναπήδησης στην αντίρροπη κρούση

Στον πίνακα 6.19 παρατίθενται οι χαρακτηριστικές τιμές των συντελεστών αναπήδησης για κάθε κλίση επιφάνειας, καθώς και οι τιμές που αντιστοιχούν σε οριζόντια επιφάνεια πρόσκρουσης (Σειρά δοκιμών 29.1).

Πίνακας 6.19: Χαρακτηριστικές τιμές συντελεστών αναπήδησης για κρούση κυβικών τεμαχίων σε αντίρροπη επιφάνεια πρόσκρουσης διαφορετικών κλίσεων

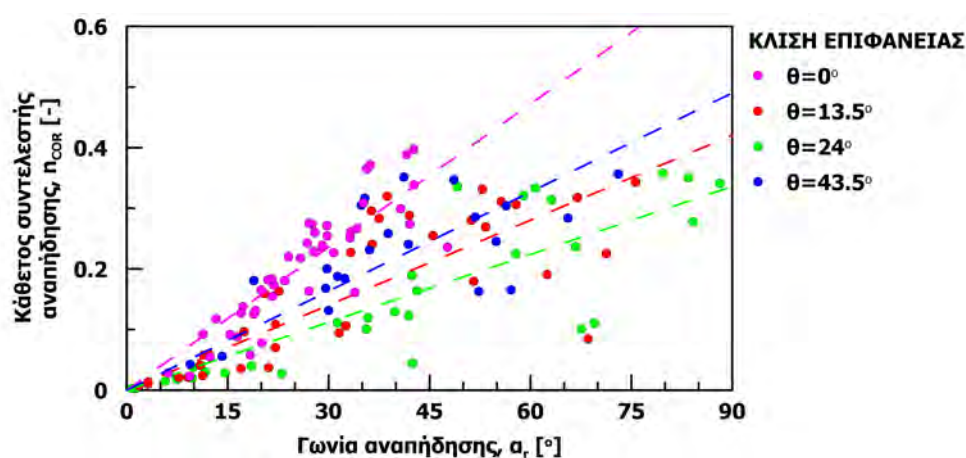
Συντελεστής αναπήδησης	Σειρά δοκιμών	Κλίση θ [°]	Χαρακτηριστικές τιμές συντελεστών αναπήδησης				
			ελάχιστη	μεγίστη	μέση	τυπ. απ.	εύρος
Κάθετος $\eta_{COR}[-]$	29.1	0	0.02	0.40	0.20	0.10	0.37
	31.6	13.5	0.01	0.34	0.16	0.11	0.34
	32.7	24	0.00	0.36	0.15	0.12	0.36
	33.5	43.5	0.04	0.36	0.23	0.09	0.31
Εφαπτομενικός $\tau_{COR}[-]$	29.1	0	0.36	1.19	0.80	0.19	0.84
	31.6	13.5	0.16	5.67	1.36	1.20	5.51
	32.7	24	-3.51	5.01	1.12	1.42	8.52
	33.5	43.5	0.33	1.83	0.89	0.39	1.51
Κινηματικός $\nu_{COR}[-]$	29.1	0	0.19	0.59	0.45	0.10	0.40
	31.6	13.5	0.09	0.49	0.29	0.11	0.40
	32.7	24	0.06	0.44	0.22	0.10	0.37
	33.5	43.5	0.19	0.53	0.36	0.10	0.35
Ενεργειακός $E_{COR}[-]$	29.1	0	0.05	0.35	0.21	0.08	0.32
	31.6	13.5	0.01	0.24	0.09	0.06	0.23
	32.7	24	0.00	0.19	0.06	0.05	0.19
	33.5	43.5	0.04	0.28	0.14	0.08	0.25
Ολικός ενεργειακός $TE_{COR}[-]$	29.1	0	0.05	0.44	0.25	0.09	0.39
	31.6	13.5	0.01	0.27	0.12	0.08	0.26
	32.7	24	0.01	0.23	0.08	0.06	0.23
	33.5	43.5	0.05	0.41	0.19	0.09	0.36

Παρατηρείται πως στην οριζόντια και στην απότομη επιφάνεια πρόσκρουσης οι τιμές του καθέτου, του κινηματικού και των ενεργειακών συντελεστών αναπήδησης είναι μεγαλύτερες από αυτές στις ενδιάμεσες κλίσεις ($\theta = 13.5^\circ$ και 24°). Επισημαίνεται ότι στις αντίστοιχες δοκιμές σε ομόρροπη επιφάνεια πρόσκρουσης, οι εν λόγω συντελεστές αναπήδησης μειώνονταν όσο η επιφάνεια πρόσκρουσης γινόταν οριζόντια, ή ισοδύναμα όσο αυξανόταν η γωνία πρόσκρουσης. Αυτό αποδίδεται στην μεγαλύτερη σφοδρότητα που έχει η κρούση όταν συμβαίνει κάθετα προς την επιφάνεια πρόσκρουσης, με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγαλύτερη απώλεια ενέργειας που χαρακτηρίζεται από μικρότερες τιμές των συντελεστών αναπήδησης.

Στις δοκιμές σε αντίρροπη επιφάνεια πρόσκρουσης, η κλίση της επιφάνειας είναι αρνητική με αποτέλεσμα να αυξάνεται η γωνία πρόσκρουσης. Έτσι, στις ενδιάμεσες κλίσεις ($\theta = 13.5^\circ$ και 24°) η γωνία πρόσκρουσης κυμαίνεται περί των 80° , δηλαδή προς την κάθετη κρούση όπου οι απώλειες ενέργειας είναι περισσότερες. Αντιθέτως, στην επιφάνεια κλίσης $\theta = 43.5^\circ$ η μέση γωνία πρόσκρουσης είναι $\alpha_i = 110^\circ$ οδηγώντας σε λιγότερο σφοδρή κρούση που περιγράφεται από μεγαλύτερους συντελεστές αναπήδησης.

Βάσει των ανωτέρω, συμπεραίνεται ότι οι συντελεστές αναπήδησης εξαρτώνται από την γωνία πρόσκρουσης αντί της κλίσης της επιφάνειας, καθώς η γωνία πρόσκρουσης περιγράφει με μεγαλύτερη συνέπεια την παρατηρούμενη συμπεριφορά.

Τούτο αποτυπώνεται και στην σχέση μεταξύ του καθέτου συντελεστή αναπήδησης και της γωνίας αναπήδησης (Σχήμα 6.30). Όπως έχει ήδη σχολιασθεί, οι βέλτιστες ευθείες που διέρχονται από την αρχή των αξόνων εμφανίζουν κλίση που βαίνει μειούμενη όσο η κλίση τείνει προς τις 90° , δηλαδή με την αύξηση της σφοδρότητας της κρούσης. Αν και η διασπορά των τιμών είναι σημαντική, ηπιότερη κλίση μεταξύ των βέλτιστων ευθειών εμφανίζει αυτή που αντιστοιχεί σε κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης ($\theta = 24^\circ$) στην οποία η γωνία πρόσκρουσης ήταν κοντύτερα στις 90° .



Σχήμα 6.30: Σχέση καθέτου συντελεστή αναπήδησης με την γωνία αναπήδησης στην αντίρροπη κρούση

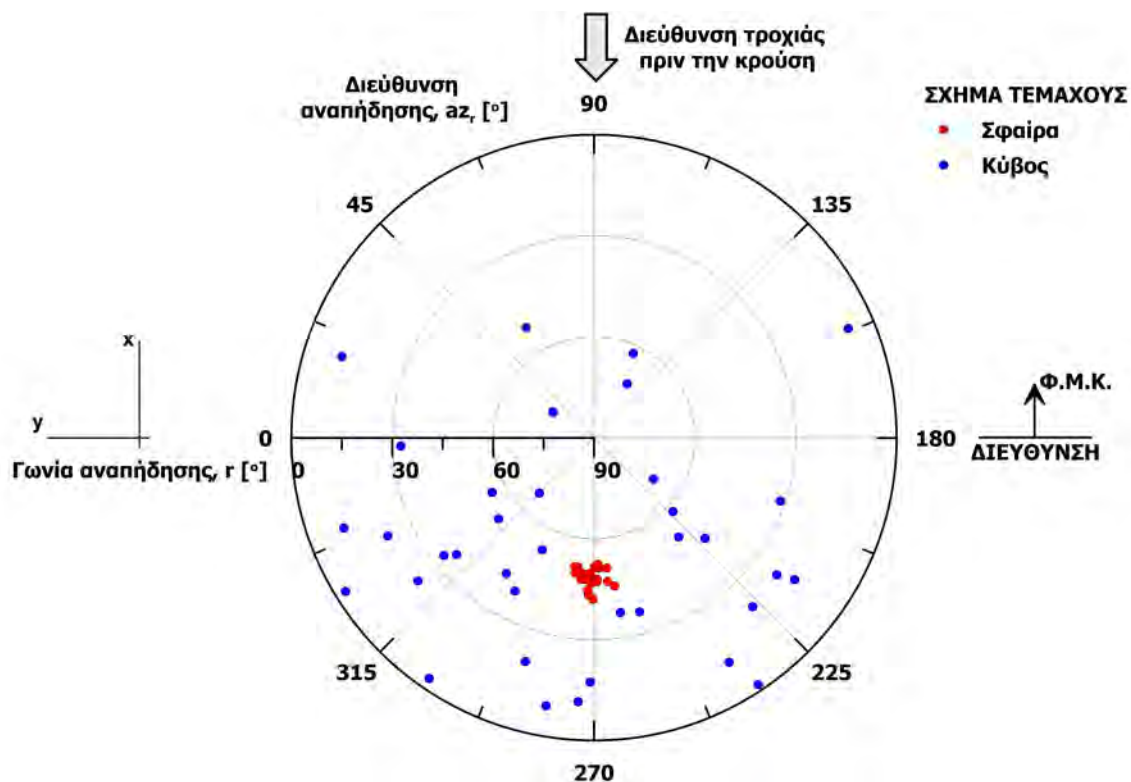
Για τον προσδιορισμό του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης, υπάρχει ασυμβατότητα στις περιπτώσεις όπου συμβαίνει αντιστροφή της διεύθυνσης, καθώς με την εφαρμογή της σχέσης 3.18 προκύπτουν αρνητικές τιμές. Επιπρόσθετα, όπως έχει αναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, όταν η διεύθυνση κίνησης του τεμάχου πριν την κρούση είναι κάθετη ως προς την επιφάνεια πρόσκρουσης, ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης δεν ορίζεται.

Έτσι, στις περιπτώσεις που η κρούση πραγματοποιείται με γωνία κοντά στις 90° , δηλαδή με μικρή εφαπτομενική ταχύτητα, ο συντελεστής λαμβάνει ιδιαίτερα υψηλές τιμές που οφείλονται στην απόκλιση της τροχιάς από την κατακόρυφο κατά την αναπήδηση. Για την αντιμετώπιση των παραπάνω, ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης έχει υπολογιστεί από τα μέτρα των ταχυτήτων στην εφαπτομενική διεύθυνση. Βάσει των ανωτέρω, η ερμηνεία της συμπεριφοράς του εφαπτομενικού συντελεστή καθίσταται προβληματική για τις δοκιμές αυτές. Περαιτέρω, από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων δεν προέκυψε κάποια αξιοσημείωτη συσχέτιση ή τάση του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης με τα υπόλοιπα μεγέθη που εξετάστηκαν.

6.2.3.2.3 Επίδραση του σχήματος του τεμαχίου στην εκτροπή στην αντίρροπη κρούση

Στο σχήμα 6.31 προβάλλονται, σε πολικό σύστημα αναφοράς, η διεύθυνση της τροχιάς και η γωνία αναπήδησης για πρόσκρουση σφαιρικών και κυβικών δοκιμίων σε επιφάνεια με αντίρροπη κλίση περίπου $\vartheta = 13^\circ$. Τα δεδομένα προέρχονται από τις σειρές δοκιμών 30.7 και 31.6 (Πίνακες 6.10 και 6.11 αντίστοιχα).

Για την καλύτερη εποπτεία του διαγράμματος, υπενθυμίζεται ότι η παράταξη του επιπέδου πρόσκρουσης ταυτίζεται με τον οριζόντιο άξονα (0-180°) και η φορά μεγίστης κλίσης είναι 090°. Επιπρόσθετα, σημαίνεται με βέλος η διεύθυνση της τροχιάς πριν την κρούση στο άνω μέρος του διαγράμματος. Έτσι, τα σημεία που προβάλλονται στο άνω ημικύκλιο έχουν διεύθυνση προς την φορά μεγίστης κλίσης του επιπέδου, συνεπώς η κατεύθυνσή τους μετά την κρούση έχει αντιστραφεί, αφού η επιφάνεια πρόσκρουσης είναι αντίρροπη της διεύθυνσης της κίνησης πριν την κρούση.

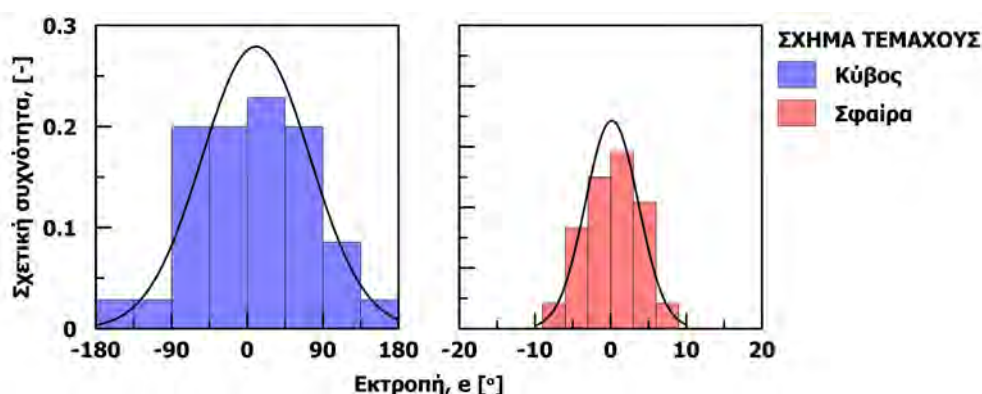


Σχήμα 6.31: Διεύθυνση αναπήδησης μετά την κρούση σε επιφάνεια με αντίρροπη κλίση για κυβικά και σφαιρικά δοκίμια

Τα χαρακτηριστικά της τροχιάς των σφαιρικών δοκιμίων προβάλλονται σε μια ιδιαίτερα περιορισμένη περιοχή, συνεπώς και στην περίπτωση την αντίρροπης κρούσης εμφανίζουν επαναλήψιμη συμπεριφορά. Η κατεύθυνση κίνησης μετά την κρούση διατηρείται σε όλες τις δοκιμές, συνεπώς η ήπια κλίση ($\vartheta = 13^\circ$) της επιφάνειας πρόσκρουσης που εξετάστηκε, δεν είναι ικανή να μεταβάλλει την διεύθυνση των σφαιρικών τεμαχίων.

Αντιθέτως, στα κυβικά δοκίμια υπάρχει αυξημένη διασπορά των τροχιών μετά την πρόσκρουση, όπως φαίνεται και από τον εκτεταμένο χώρο που προβάλλονται τα σημεία. Στην πλειοψηφία των δοκιμών η κατεύθυνση της κίνησης διατηρείται, όμως τόσο η εκτροπή όσο και η γωνία αναπήδησης καταλαμβάνουν σημαντικό εύρος.

Ειδικότερα, η εκτροπή περιγράφεται και στις δυο περιπτώσεις από κανονικές κατανομές (Σχήμα 6.32). Όμως για τα κυβικά δοκίμια η τυπική απόκλιση είναι περίπου 70° , δηλαδή για πιθανότητα εμφάνισης 68% το εύρος της εκτροπής θα είναι περίπου $\pm 70^\circ$, όταν για την ίδια πιθανότητα ένα σφαιρικό τεμάχιο θα εκτραπεί μόλις κατά $\pm 3.5^\circ$. Επίσης, με τυπική απόκλιση 70° συνεπάγεται ότι οποιαδήποτε κατεύθυνση του τεμάχους μετά την κρούση είναι πιθανή, αφού το συνολικό εύρος των διευθύνσεων (360°) καλύπτεται από διάστημα εμπιστοσύνης μικρότερο του $\pm 3s$, που αντιστοιχεί στο 99.7% των τιμών.



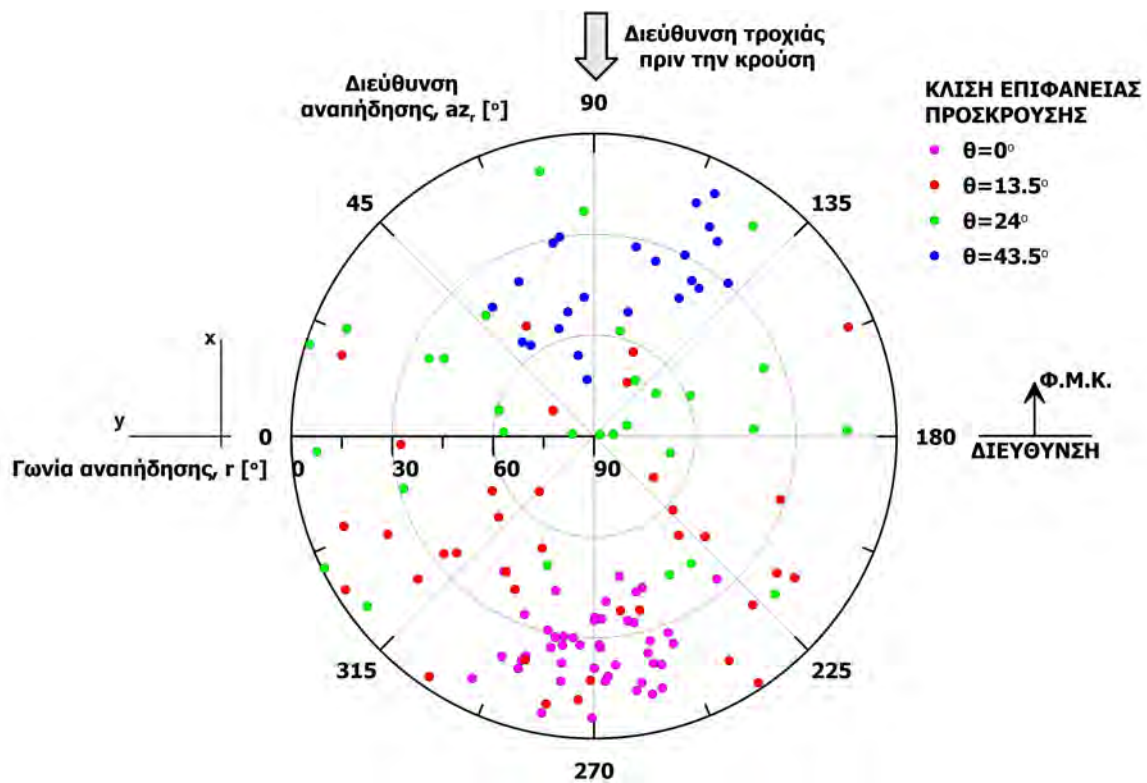
Σχήμα 6.32: Εκτροπή κυβικών και σφαιρικών τεμαχίων εξαιτίας πρόσκρουσης σε αντίρροπη επιφάνεια ήπιας κλίσης

6.2.3.2.4 Επίδραση της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης στην εκτροπή

Γενικώς, μια ανεπαίσθητη κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης αντίρροπα προς την διεύθυνση της τροχιάς πριν την κρούση, δεν αναμένεται να προκαλέσει αξιοσημείωτη μεταβολή συγκριτικά με την κρούση σε οριζόντιο επίπεδο. Έτσι, η κατεύθυνση του τεμάχους μετά την κρούση θα καθορίζεται από την κατεύθυνσή του πριν από αυτή, συν κάποια εκτροπή που θα οφείλεται στο σχήμα του. Αντιθέτως, όταν η επιφάνεια πρόσκρουσης είναι κατακόρυφη, αποτελεί ένα ακλόνητο εμπόδιο που περιορίζει τις κινηματικές δυνατότητες του τεμάχους και έχει ως αποτέλεσμα την αντιστροφή της κατεύθυνσης κίνησής του. Θεωρώντας τις παραπάνω περιπτώσεις ως τις δυο ακραίες καταστάσεις που συναντώνται στην αντίρροπη κρούση, συμπεραίνεται ότι η κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης έχει ουσιαστική επίδραση στην διεύθυνση κίνησης του τεμάχους.

Η επίδραση της κλίσης μεταξύ των δυο ακραίων αυτών καταστάσεων εμφανίζεται στο παρακάτω πολικό διάγραμμα (Σχήμα 6.33). Επίσης, προβάλλονται τα σημεία που αντιστοιχούν σε οριζόντια επιφάνεια πρόσκρουσης με σκοπό την συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Επισημαίνεται ότι στις δοκιμές που εκτελέστηκαν σε οριζόντια επιφάνεια πρόσκρουσης, η κατεύθυνση της κίνησης, πέραν της εκτροπής, δεν μεταβάλλεται κατά την κρούση. Έτσι, αφού το σύστημα αξόνων είναι προσανατολισμένο σύμφωνα με την φορά μεγίστης κλίσης, οι άξονες x και y έχουν αντίθετη φορά από αυτό που χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές σε οριζόντια επιφάνεια πρόσκρουσης. Συνεπώς, για την ορθή προβολή των εν λόγω σημείων, απαιτείται η περιστροφή τους κατά 180° ως προς την αρχή των αξόνων.

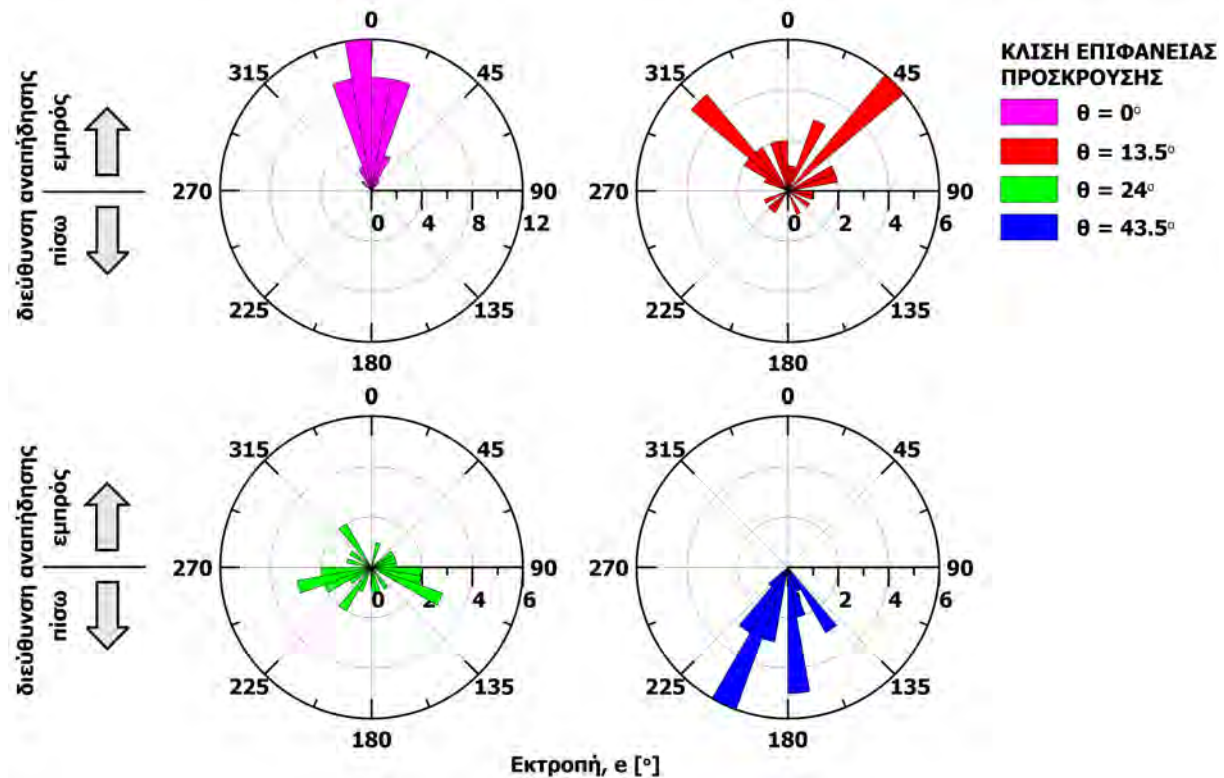


Σχήμα 6.33: Διεύθυνση τροχιάς μετά την κρούση σε επιφάνειες πρόσκρουσης με αντίρροπη κλίση

Τα αναμενόμενα βάσει των δυο ακραίων καταστάσεων επαληθεύονται ερμηνεύοντας το σχήμα 6.33. Η πλειοψηφία των δοκιμών που αντιστοιχούν στην ήπιας κλίσης επιφάνεια πρόσκρουσης ($\theta = 13.5^\circ$) έχουν διατηρήσει την κατεύθυνση που είχαν πριν την κρούση, αφού προβάλλονται στο κάτω τμήμα του διαγράμματος. Στο απότομο πρηνές ($\theta = 43.5^\circ$) όλα τα σημεία προβάλλονται στο άνω τμήμα του διαγράμματος, που σημαίνει ότι η κατεύθυνσή τους αντιστρέφεται μετά την κρούση και τείνει προς την φορά μεγίστης κλίσης του επιπέδου πρόσκρουσης. Για την ενδιάμεση κλίση ($\theta = 24^\circ$), η κατεύθυνση των τεμαχών δεν εμφανίζει κάποια προφανή τάση, καταλαμβάνοντας όλο το δυνατό εύρος τιμών.

Για την καλύτερη εποπτεία των ανωτέρω, στο σχήμα 6.34 παρουσιάζεται η εκτροπή των τεμαχών για κάθε σειρά δοκιμών με την μορφή διαγράμματος ροζέτας. Το διάγραμμα αυτό αποτελεί πρακτικά ένα ιστόγραμμα σε πολικές συντεταγμένες που αναπαριστά την εκτροπή μέσω του περιφερειακού άξονα τιμών, με τον ακτινικό άξονα να αντιστοιχεί στο πλήθος των δοκιμών που ανήκουν στην εκάστοτε κλάση εκτροπής.

Δεδομένου ότι η εκτροπή ορίζεται ως η απόκλιση στην διεύθυνση της τροχιάς πριν και μετά την κρούση, τα σημεία προβάλλονται αντίθετα από το πολικό διάγραμμα του σχήματος 6.33, καθώς η αντιστροφή της διεύθυνσης του τεμάχου συνεπάγεται με την μεταβολή της διεύθυνσης κατά 180° .

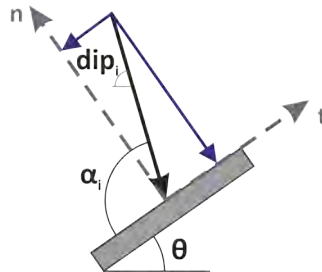


Σχήμα 6.34: Κατανομή της εκτροπής για κρούση κυβικών δοκιμίων σε επιφάνειες πρόσκρουσης με αντίρροπες κλίσεις

Στο σχήμα 6.34 παρατηρείται ποιοτικά η επιρροή της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης στην εκτροπή του τεμάχου. Στην οριζόντια επιφάνεια πρόσκρουσης η μέση διεύθυνση της τροχιάς μετά την κρούση ταυτίζεται με την διεύθυνση κίνησης του τεμάχου πριν από αυτήν ενώ για κλίση $\theta = 43.5^\circ$ αντιστρέφεται, επαληθεύοντας τις δυο οριακές περιπτώσεις. Η μετάβαση μεταξύ των οριακών αυτών καταστάσεων αποτυπώνεται στις επιφάνειες με κλίση 13.5° και 24° . Στην πρώτη επιφάνεια, η πλειοψηφία των τροχιών διατηρεί την διεύθυνση της τροχιάς πριν την κρούση, ενώ στην επιφάνεια με κλίση 24° κάθε διεύθυνση έχει ίση πιθανότητα εμφάνισης, συνεπώς φαίνεται να αλληλοεξουδετερώνονται οι δυο παράμετροι που καθορίζουν την κατεύθυνση των τεμαχίων.

Το εύρος της εκτροπής είναι σημαντικό ανεξαρτήτως της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης. Συνεπώς, παρά το γεγονός ότι η αντιστροφή της κίνησης είναι εν γένει ευμενής, επιβάλλεται να λαμβάνεται υπόψη η εκτροπή κατά τον σχεδιασμό των μέτρων αντιμετώπισης των καταπτώσεων και στις περιπτώσεις της αντίρροπης κρούσης.

Αναλύοντας την κίνηση στην κάθετη και εφαπτομενική συνιστώσα σε σχέση με την επιφάνεια πρόσκρουσης και αμελώντας την περιστροφική συνιστώσα της κίνησης, είναι δυνατός ο προσδιορισμός της σχέσης μεταξύ της κλίσης μιας αντίρροπης επιφάνειας και της γωνίας που το τέμαχος την προσεγγίζει ώστε να προκληθεί αντιστροφή της κίνησης (Σχήμα 6.35).



Σχήμα 6.35: Ευνοϊκή γεωμετρία επαφής για τη αντιστροφή της κίνησης σε επιφάνεια με αντίρροπη κλίση

Όταν το τέμαχος προσεγγίζει την επιφάνεια πρόσκρουσης, με γωνία ως προς την οριζόντιο (dip_i) που είναι μεγαλύτερη από την συμπληρωματική της κλίσης του πρανούς, ή ισοδύναμα όταν η γωνία πρόσκρουσης είναι μεγαλύτερη από 90° , τότε η εφαπτομενική συνιστώσα της ταχύτητας προβάλλεται αντίθετα από την διεύθυνση της κίνησης, διαμορφώνοντας τις συνθήκες για την αντιστροφή της κατεύθυνσης της τροχιάς.

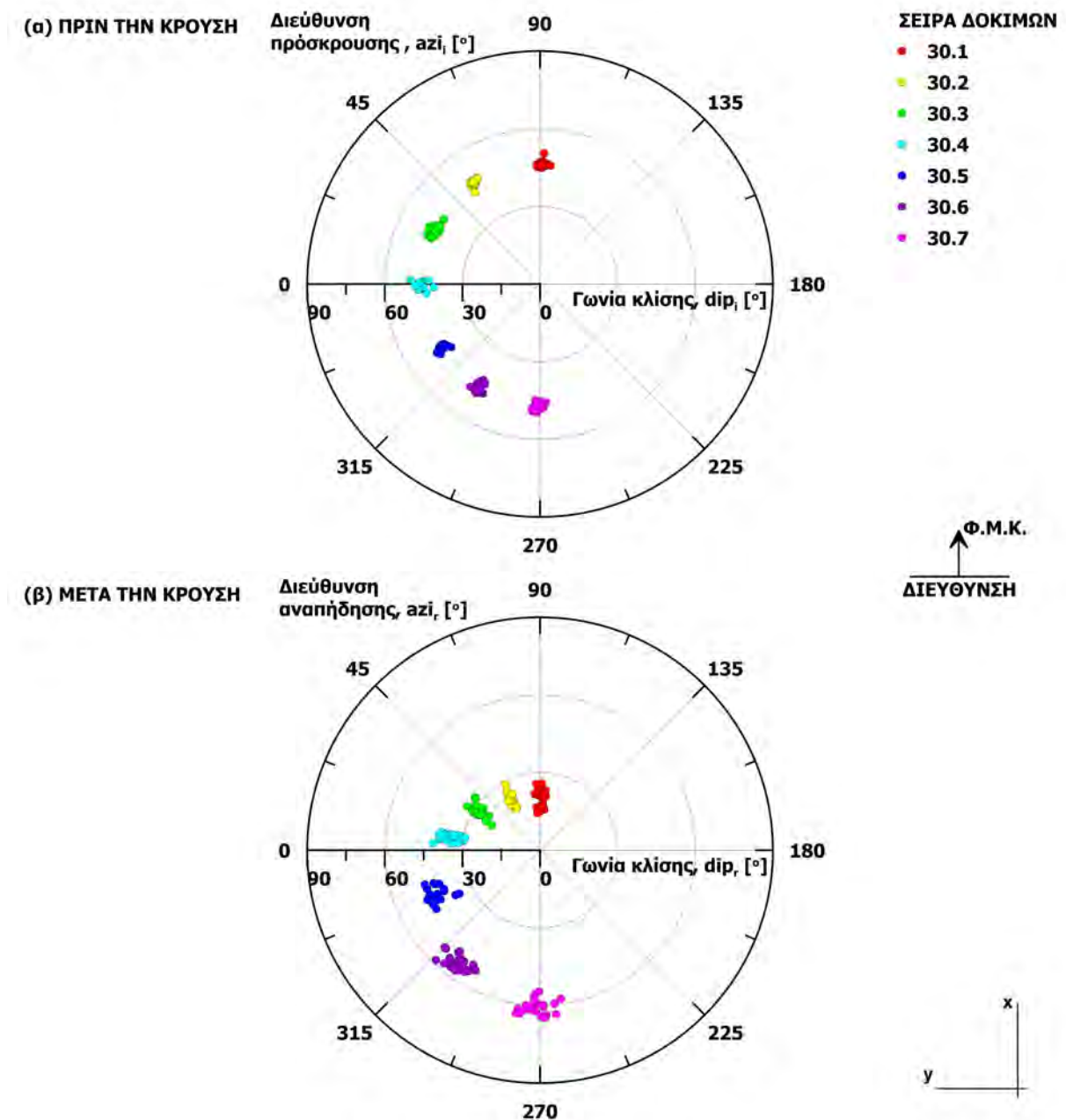
6.2.3.3 Λοξή κρούση

Στην γενική περίπτωση κρούσης, η διεύθυνση με την οποία το τέμαχος προσεγγίζει την επιφάνεια πρόσκρουσης σχηματίζει γωνία με την φορά μέγιστης κλίσης του πρανούς. Είναι εύλογο ότι η περίπτωση αυτή αντιπροσωπεύει την πλειοψηφία των περιπτώσεων στις φυσικές καταπτώσεις, χωρίς όμως να λαμβάνεται υπόψη κατά την διενέργεια διδιάστατων αναλύσεων, που μέχρι σήμερα συνιστά την συνήθη πρακτική στις μελέτες καταπτώσεων.

Όσον αφορά την διεύθυνση κίνησης, η ομόρροπη και η αντίρροπη κρούση αποτελούν τις οριακές καταστάσεις της λοξής κρούσης. Δεδομένου ότι μετά την κρούση υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση στην διεύθυνση των τεμαχών στις δυο αυτές περιπτώσεις, σύμφωνα με όσα παρουσιάστηκαν στις ενότητες 6.2.3.1 και 6.2.3.2, η μελέτη της επίδρασης της διαφοράς διεύθυνσης καθίσταται ενδιαφέρουσα και κρίσιμη για τον προσδιορισμό του πλάτους εφαρμογής των μέτρων ανάσχεσης των καταπτώσεων. Παρακάτω, παρατίθενται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα της εργαστηριακής διερεύνησης αρχικά για τα σφαιρικά τεμάχια και στην συνέχεια για τα κυβικά.

6.2.3.3.1 Στοιχεία κίνησης στη λοξή κρούση σφαιρικών τεμαχών

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της τροχιάς (διεύθυνση και κλίση από τον ορίζοντα) πριν και μετά την κρούση παρουσιάζονται μέσω του σχήματος 6.36 σε πολικές συντεταγμένες. Οι γωνίες πρόσκρουσης και αναπήδησης έχουν οριστεί προηγουμένως (Σχήμα 6.18), ως οι γωνίες που σχηματίζονται μεταξύ των διανυσμάτων κίνησης και της επιφάνειας πρόσκρουσης στο κατακόρυφο επίπεδο που εμπεριέχει το αντίστοιχο στάδιο της κίνησης. Έτσι, εξαρτώνται από την κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης και κατ' επέκταση από τον προσανατολισμό της. Αντιθέτως, οι γωνίες που απεικονίζονται στο σχήμα 6.36, είναι ορισμένες από τον ορίζοντα και συνεπώς είναι ανεξάρτητες από την κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης.



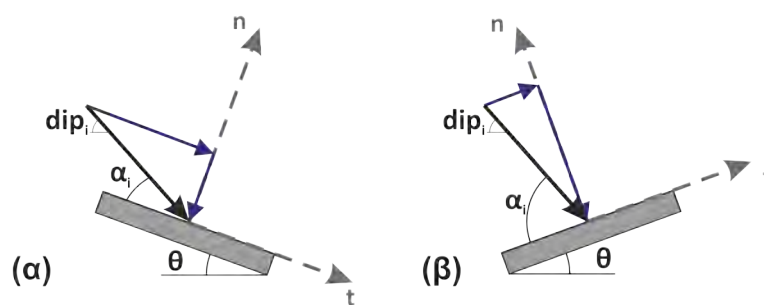
Σχήμα 6.36: Διεύθυνση και κλίση τροχιάς σφαιρικών τεμαχών πριν (πάνω) και μετά (κάτω) την κρούση

Πριν την κρούση (Σχήμα 6.36-α), η γωνία ως προς την οριζόντιο με την οποία το τέμαχος προσεγγίζει την επιφάνεια πρόσκρουσης (dip_i) είναι σταθερή και ίση περίπου με 45° σε όλες τις σειρές δοκιμών που εκτελέστηκαν. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο μηχανισμός απελευθέρωσης των τεμαχίων ήταν σταθερός και περιστρεφόταν η επιφάνεια πρόσκρουσης, συνεπώς προσέγγιζαν την επιφάνεια πρόσκρουσης με σταθερή γωνία σε όλες τις σειρές δοκιμών.

Αντιθέτως, μετά την κρούση (Σχήμα 6.36-β) η κλίση (dip_r) του διανύσματος κίνησης φαίνεται να εξαρτάται από τον προσανατολισμό της επιφάνειας πρόσκρουσης. Πιο συγκεκριμένα, αυξάνεται κατά την περιστροφή της επιφάνειας πρόσκρουσης από την ομόρροπη στην αντίρροπη κρούση, δηλαδή σε επιφάνεια με μεγαλύτερη διαφορά διεύθυνσης.

Η κίνηση αυτή συνοδεύεται με ανάλογη μείωση της φαινόμενης κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης, ως προς το κατακόρυφο επίπεδο που εμπεριέχει την κίνηση του τεμάχους. Έτσι, προκύπτει ότι ο προσανατολισμός της επιφάνειας πρόσκρουσης επηρεάζει την τροχιά και τους συντελεστές αναπήδησης, καθώς καθορίζει την φαινόμενη κλίση της επιφάνειας και άρα την γωνία πρόσκρουσης, που όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενες ενότητες επηρεάζει σημαντικά την διαγραφόμενη τροχιά.

Τούτο αποδίδεται στην γεωμετρία επαφής που σχηματίζεται μεταξύ της επιφάνειας πρόσκρουσης και του σφαιρικού τεμάχους. Στο σχήμα 6.37 αναλύεται η κίνηση στην κάθετη και στην εφαπτομενική συνιστώσα ως προς την επιφάνεια πρόσκρουσης, για κρούση σε ομόρροπη και αντίρροπη επιφάνεια, ενός διανύσματος κίνησης με ίσο μέτρο, φορά και γωνία ως προς τον οριζοντα. Παρατηρείται ότι η εφαπτομενική συνιστώσα της ταχύτητας είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση της ομόρροπης κρούσης, ενώ στην αντίρροπη επικρατεί η κάθετη συνιστώσα. Έτσι, με την παραδοχή ότι οι απώλειες στην κίνηση μεταξύ των δυο αυτών περιπτώσεων είναι ίσες, προκύπτει ότι η γωνία ως προς την οριζόντιο με την οποία αναπηδά το τέμαχος, θα είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση της αντίρροπης κρούσης.



Σχήμα 6.37: Ανάλυση κίνησης για κρούση σε επιφάνεια με (α) ομόρροπη και (β) αντίρροπη κλίση

Επιπρόσθετα, από κινηματικής σκοπιάς, όταν η κλίση είναι σύμφωνη με την κατεύθυνση κίνησης του τεμάχους αναμένεται ολίσθηση του τεμάχους στην επιφάνεια, αλλά στην αντίρροπη επιφάνεια η κλίση δρα περιοριστικά. Η εξέλιξη της κίνησης όσο το τέμαχος βρίσκεται σε επαφή με την επιφάνεια δεν ήταν δυνατό να αποτυπωθεί καθώς η διάρκεια της επαφής είναι αρκετά μικρότερη από την ταχύτητα καταγραφής.

Η γωνία με την οποία το τέμαχος αποχωρίζεται από την επιφάνεια πρόσκρουσης (α_o) έχει αντίκτυπο στην διαγραφόμενη τροχιά (Σχήμα 6.38), καθώς καθορίζει τόσο το μέγιστο ύψος αναπήδησης όσο και το βεληνεκές της τροχιάς. Το ύψος αναπήδησης προσδιορίζεται με την σχέση 6.1, από όπου προκύπτει ότι αυξάνεται όσο μεγαλώνει η γωνία α_o . Το βεληνεκές που προσδιορίζεται από την σχέση 6.2, μεγιστοποιείται για γωνία 45° και ταυτίζεται στις συμπληρωματικές γωνίες.

$$h_{max} = \frac{v_o^2 \sin^2 \alpha_o}{2g} \quad (6.1)$$

$$R = \frac{v_o^2 \sin 2\alpha_o}{g} \quad (6.2)$$

όπου:

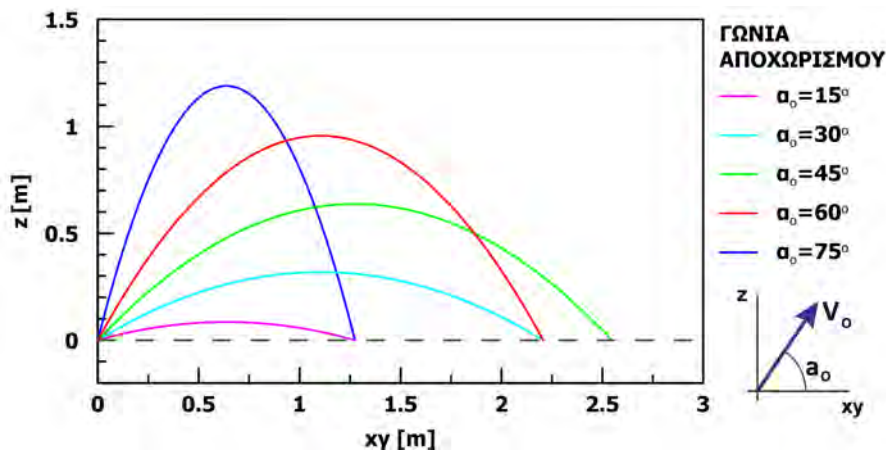
v_o η ταχύτητα αποχωρισμού (v_r)

α_o η γωνία αποχωρισμού ως προς τον ορίζοντα (dip_r)

h_{max} το μέγιστο ύψος της τροχιάς

R το βεληνεκές της τροχιάς

Στις δοκιμές που εκτελέστηκαν και παρουσιάζονται στην ενότητα αυτή, το μέγιστο βεληνεκές προκύπτει για την διαφορά διεύθυνσης $\Delta\varphi = 120^\circ$ καθώς η γωνία α_o προσεγγίζει τις 45° , ενώ το μεγαλύτερο ύψος αναπήδησης επιτυγχάνεται στην αντίρροπη επιφάνεια πρόσκρουσης όπου η γωνία αποχωρισμού ως προς την οριζόντιο είναι η μεγαλύτερη.



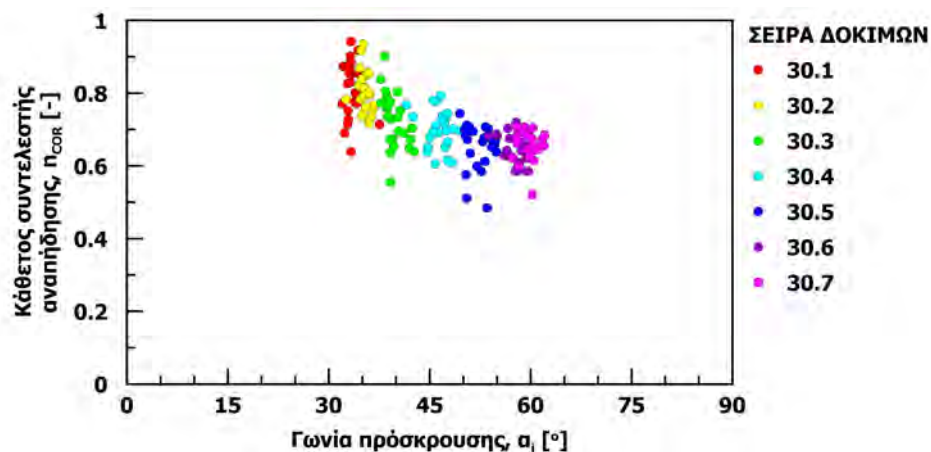
Σχήμα 6.38: Διαγραφόμενη τροχιά συναρτήσει της γωνίας αποχωρισμού (α_o) με αρχική ταχύτητα $v_o = 5\text{ms}^{-1}$

6.2.3.3.2 Συντελεστές αναπήδησης στη λοξή κρούση σφαιρικών τεμαχών

Οι χαρακτηριστικές τιμές του καθέτου συντελεστή αναπήδησης παρατίθενται στον πίνακα 6.20 για κάθε σειρά δοκιμών. Αν και το εξεταζόμενο εύρος της γωνίας πρόσκρουσης είναι μικρό (περίπου 30°), παρατηρείται, με την βοήθεια του σχήματος 6.39, ότι ο κάθετος συντελεστή αναπήδησης μειώνεται με την αύξηση της γωνίας πρόσκρουσης.

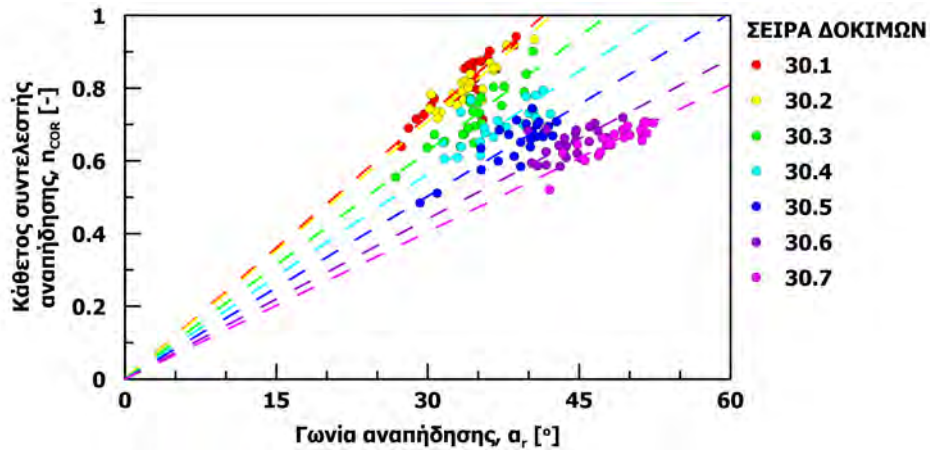
Πίνακας 6.20: Τιμές καθέτου συντελεστή αναπήδησης σφαιρικών τεμαχών σε επιφάνειες πρόσκρουσης κλίσης $\vartheta = 13.5^\circ$ με διαφορετικό προσανατολισμό

Σειρά δοκ.	Διαφ. διευθ. $\Delta\phi$ [°]	Γων. πρ. α_i [°]	Γων. αναπ. α_r [°]	Κάθετος συντελεστής αναπήδησης, η_{COR} [-]			
				ελάχιστη	μεγίστη	μέση	εύρος
30.1	-1.3	33.4	33.7	0.64	0.94	0.81	0.30
30.2	33.4	35.4	34.0	0.72	0.93	0.80	0.22
30.3	62.6	39.7	34.7	0.56	0.90	0.73	0.35
30.4	90.8	46.4	37.2	0.61	0.79	0.70	0.19
30.5	123.4	52.4	38.8	0.48	0.74	0.65	0.26
30.6	149.7	57.7	44.0	0.59	0.72	0.65	0.13
30.7	179	59.8	48.7	0.52	0.71	0.66	0.19



Σχήμα 6.39: Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης

Εξετάζοντας την σχέση του καθέτου συντελεστή αναπήδησης με την γωνία αναπήδησης (Σχήμα 6.40), επαληθεύεται εκ νέου η γραμμική μεταξύ τους συσχέτιση που διέρχεται από την αρχή των αξόνων. Η κλίση της ευθείας που περιγράφει κάθε σειρά δοκιμών εξαρτάται από την γωνία πρόσκρουσης, που αποτελεί το μέγεθος που διαφοροποιείται κατά την στροφή της επιφάνειας πρόσκρουσης. Ειδικότερα, με την αύξηση της γωνίας πρόσκρουσης παρατηρείται μείωση της κλίσης της ευθείας συσχέτισης.

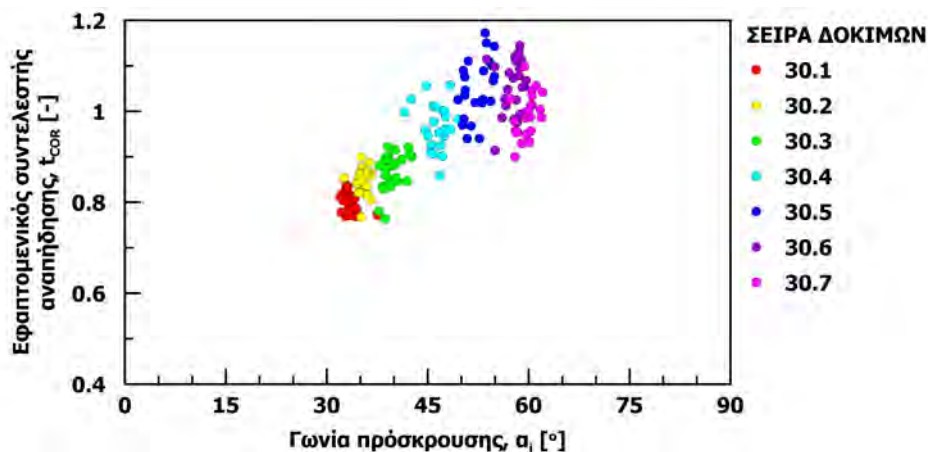


Σχήμα 6.40: Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας αναπήδησης

Όσον αφορά τον εφαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης (Πίνακας 6.21), παρατηρείται ότι αυξάνεται ελαφρώς με την αύξηση της γωνίας πρόσκρουσης (Σχήμα 6.41). Επιπρόσθετα, σε τέσσερις από τις σειρές δοκιμών, όπου η κρούση έγινε με γωνία μεγαλύτερη των 45°, μετρήθηκαν τιμές πάνω από την μονάδα.

Πίνακας 6.21: Τιμές εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης σφαιρικών τεμαχίων σε επιφάνειες πρόσκρουσης κλίσης $\theta = 13.5^\circ$ με διαφορετικό προσανατολισμό

Σειρά δοκ.	Διαφ. διευθ. $\Delta\phi$ [°]	Γων. πρ. α_i [°]	Γων. αναπ. α_r [°]	Εφαπτομενικός συντ. αναπήδησης, t_{COR} [-]		μέση	εύρος
				ελάχιστη	μεγίστη		
30.1	-1.3	33.4	33.7	0.77	0.84	0.80	0.07
30.2	33.4	35.4	34.0	0.77	0.90	0.85	0.13
30.3	62.6	39.7	34.7	0.76	0.92	0.87	0.16
30.4	90.8	46.4	37.2	0.86	1.06	0.97	0.20
30.5	123.4	52.4	38.8	0.94	1.17	1.05	0.23
30.6	149.7	57.7	44.0	0.91	1.15	1.06	0.23
30.7	179	59.8	48.7	0.90	1.10	0.99	0.20

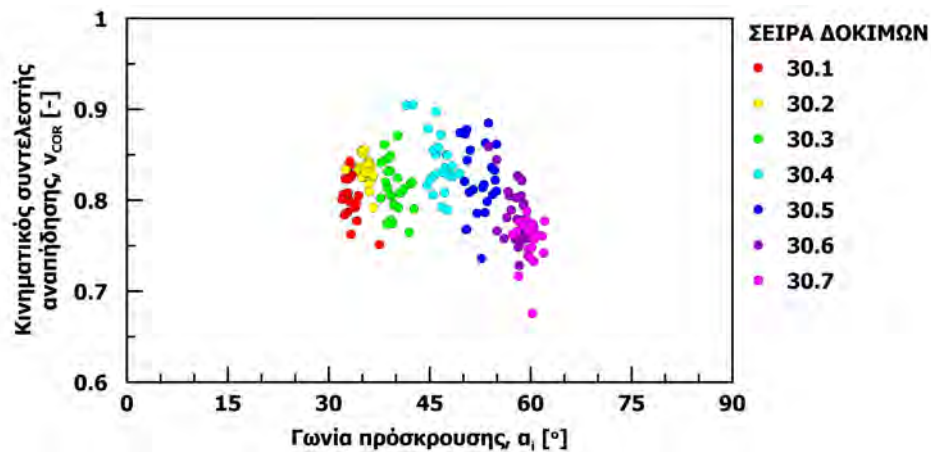


Σχήμα 6.41: Εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης

Ο κινηματικός συντελεστής αναπήδησης (Πίνακας 6.22) δεν συσχετίζεται με την γωνία πρόσκρουσης. Εμφανίζει σταθερή τιμή με περιορισμένο εύρος (Σχήμα 6.42), συμπεριφορά που συνάδει με την παρατηρούμενη στην εκτενή διερεύνηση της μάζας και της ταχύτητας πρόσκρουσης (βλ. ενότητα 5.2.2). Αντίστοιχη είναι και η συμπεριφορά του ενεργειακού συντελεστή αναπήδησης, οι τιμές του οποίου παρατίθενται στον πίνακα 6.23)

Πίνακας 6.22: Τιμές κινηματικού συντελεστή αναπήδησης σφαιρικών τεμαχών σε επιφάνειες πρόσκρουσης κλίσης $\vartheta = 13.5^\circ$ με διαφορετικό προσανατολισμό

Σειρά δοκ.	Διαφ. διευθ. $\Delta\phi$ [°]	Γων. πρ. α_i [°]	Γων. αναπ. α_r [°]	Κινηματικός συντ. αναπήδησης, $v_{COR}[-]$			εύρος
				ελάχιστη	μεγίστη	μέση	
30.1	-1.3	33.4	33.7	0.75	0.84	0.81	0.09
30.2	33.4	35.4	34.0	0.79	0.86	0.83	0.06
30.3	62.6	39.7	34.7	0.76	0.87	0.81	0.11
30.4	90.8	46.4	37.2	0.79	0.90	0.84	0.12
30.5	123.4	52.4	38.8	0.74	0.89	0.82	0.15
30.6	149.7	57.7	44.0	0.73	0.86	0.79	0.13
30.7	179	59.8	48.7	0.68	0.79	0.76	0.11



Σχήμα 6.42: Εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης

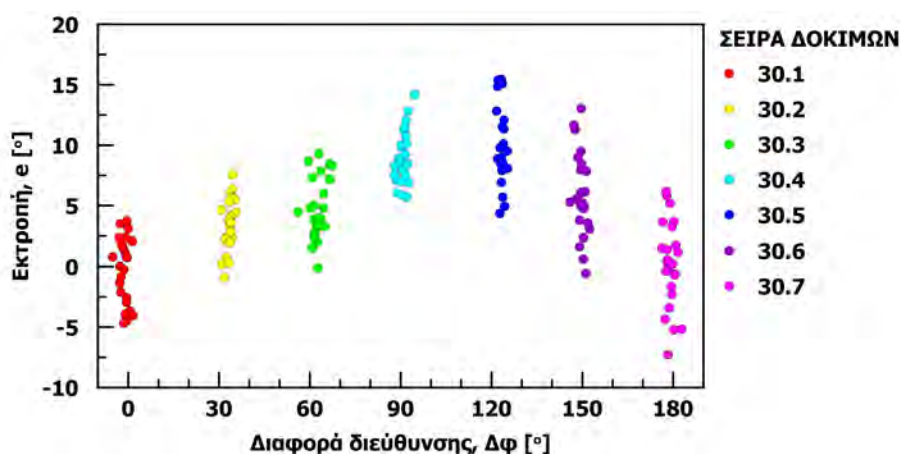
Πίνακας 6.23: Τιμές ενεργειακού συντελεστή αναπήδησης σφαιρικών τεμαχών σε επιφάνειες πρόσκρουσης κλίσης $\vartheta = 13.5^\circ$ με διαφορετικό προσανατολισμό

Σειρά δοκ.	Διαφ. διευθ. $\Delta\phi$ [°]	Γων. πρ. α_i [°]	Γων. αναπ. α_r [°]	Ενεργειακός συντ. αναπήδησης, $E_{COR}[-]$			εύρος
				ελάχιστη	μεγίστη	μέση	
30.1	-1.3	33.4	33.7	0.56	0.71	0.65	0.15
30.2	33.4	35.4	34.0	0.63	0.73	0.69	0.11
30.3	62.6	39.7	34.7	0.58	0.76	0.66	0.17
30.4	90.8	46.4	37.2	0.62	0.82	0.71	0.20
30.5	123.4	52.4	38.8	0.54	0.78	0.68	0.24
30.6	149.7	57.7	44.0	0.53	0.74	0.62	0.21
30.7	179	59.8	48.7	0.46	0.62	0.57	0.17

6.2.3.3.3 Εκτροπή στη λοξή κρούση σφαιρικών τεμαχίων

Στο σχήμα 6.43 απεικονίζεται η εκτροπή του τεμαχίου συναρτήσει της διαφοράς διεύθυνσης, από το σύνολο των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν με σφαιρικά δοκίμια, συμπεριλαμβανομένων αυτών από την ομόρροπη και την αντίρροπη κρούση. Όπως ήδη έχει αναφερθεί στις ενότητες 6.2.3.1 και 6.2.3.2 για την ομόρροπη και την αντίρροπη κρούση αντίστοιχα, η εκτροπή είναι συμμετρικά κατανομημένη ως προς την φορά μεγίστης κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης και παρουσιάζει μεγαλύτερο εύρος στην περίπτωση της αντίρροπης κρούσης.

Στην περίπτωση της λοξής κρούσης επηρεάζεται εμφανώς η κατεύθυνση της τροχιάς μετά την κρούση, καθώς το τεμάχιο εκτρέπεται προς την φορά μεγίστης κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης. Όσο η διαφορά διεύθυνσης είναι μικρότερη από 90° , δηλαδή όσο η επιφάνεια πρόσκρουσης κλίνει σύμφωνα με την διεύθυνση κίνησης του τεμαχίου πριν την κρούση, η εκτροπή εντείνεται με την αύξηση της διαφοράς διεύθυνσης. Όταν η διαφορά διεύθυνσης είναι μεγαλύτερη των 90° , όπου το τεμάχιο συναντά την επιφάνεια πρόσκρουσης με αρνητική κλίση, τότε το μέγεθος της εκτροπής φθίνει οδεύοντας προς την αντίρροπη κρούση, που είναι συμμετρικά κατανομημένη ως προς την φορά μεγίστης κλίσης.



Σχήμα 6.43: Εκτροπή συναρτήσει της διαφοράς διεύθυνσης για σφαιρικά τεμάχια

Στην περίπτωση αυτή το εύρος της εκτροπής δεν εμφανίζει σημαντικό μέγεθος, τουλάχιστον όσον αφορά στον σχεδιασμό των μέτρων αντιμετώπισης των καταπτώσεων. Για διαφορά διεύθυνσης μικρότερη των 90° το εύρος κυμαίνεται περί τις 10° , ενώ όταν η διαφορά διεύθυνσης είναι μεγαλύτερη των 90° , το εύρος αυξάνεται ελαφρώς στις 15° . Αντίστοιχα, η μέση εκτροπή έχει παρόμοια συμπεριφορά, είναι μικρότερη σε κρούσεις με διαφορά διεύθυνσης έως 90° . Ωστόσο, βάσει των ανωτέρω καθίσταται σαφές ότι η επιφάνεια πρόσκρουσης επηρεάζει την διεύθυνση κίνησης των τεμαχίων μετά την κρούση και ειδικότερα, τα εξαναγκάζει σε εκτροπή προς την φορά μεγίστης κλίσης της.

6.2.3.3.4 Συντελεστές αναπήδησης στη λοξή κρούση κυβικών τεμαχών

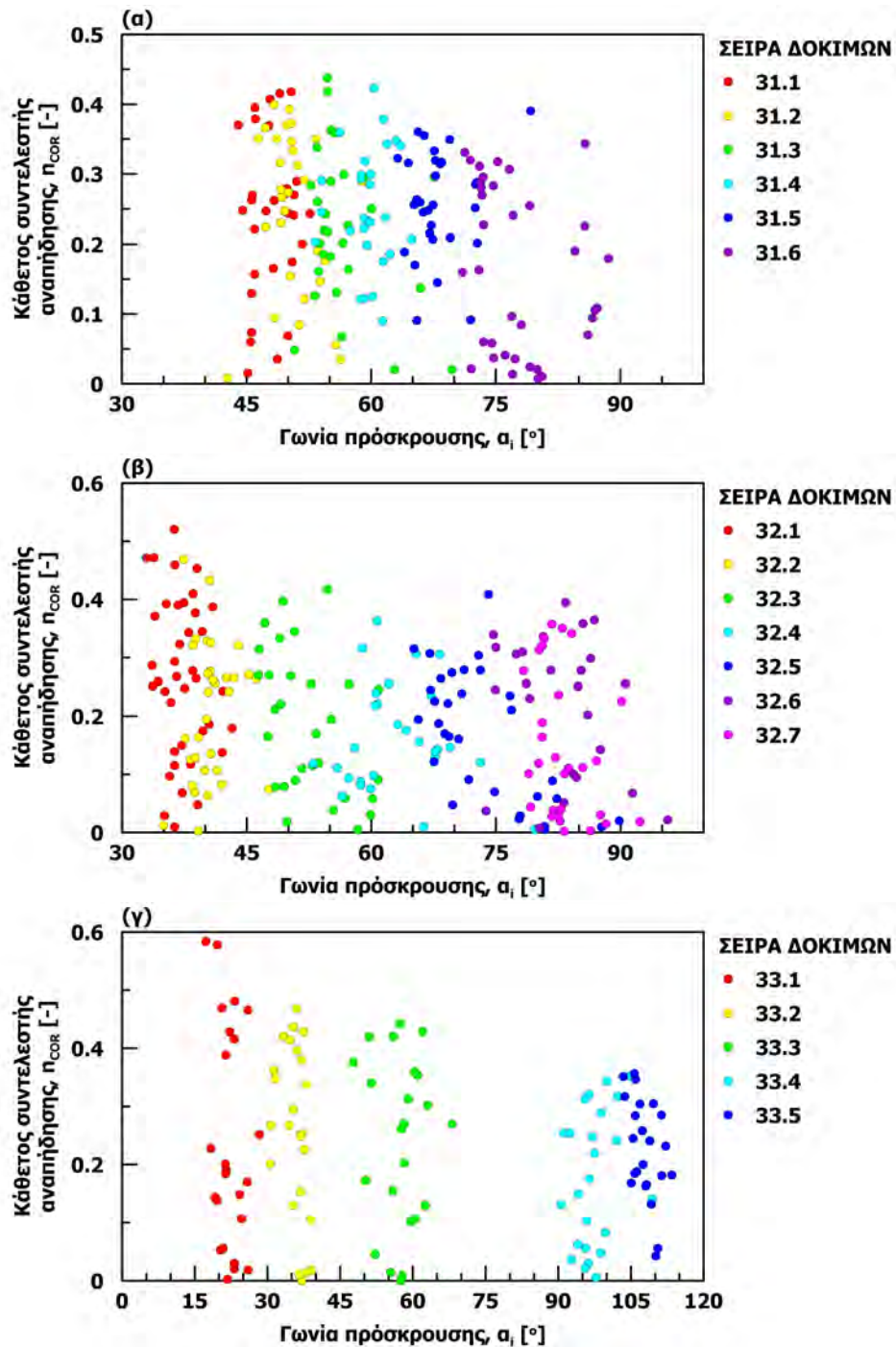
Προηγουμένως, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα από τις δοκιμές ομόρροπης κρούσης, παρατηρήθηκε ότι η μείωση της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης, ή ισοδύναμα η αύξηση της γωνίας πρόσκρουσης οδηγεί στην μείωση του καθέτου συντελεστή αναπήδησης. Στις δοκιμές υπό λοξή κρούση, η επιφάνεια πρόσκρουσης έχει σταθερή κλίση αλλά μεταβάλλεται ο προσανατολισμός της. Έτσι, η φαινόμενη γωνία, που ορίζεται ως προς την διεύθυνση κίνησης του τεμάχου πριν την κρούση, μειώνεται όσο η διαφορά διεύθυνσης αυξάνεται και γίνεται αρνητική όταν η διαφορά διεύθυνσης μεγαλύτερη των 90° . Ως αποτέλεσμα, η αύξηση της διαφοράς διεύθυνσης προκαλεί την αύξηση της γωνία πρόσκρουσης, παρά το γεγονός ότι η πραγματική κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης είναι σταθερή όπως επίσης και οι αρχικές συνθήκες απελευθέρωσης των τεμαχών. Στον πίνακα 6.24 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές τιμές του καθέτου συντελεστή αναπήδησης, ανά σειρά δοκιμών.

Πίνακας 6.24: Τιμές καθέτου συντελεστή αναπήδησης κυβικών τεμαχών σε επιφάνειες πρόσκρουσης διαφορετικής κλίσης και προσανατολισμού

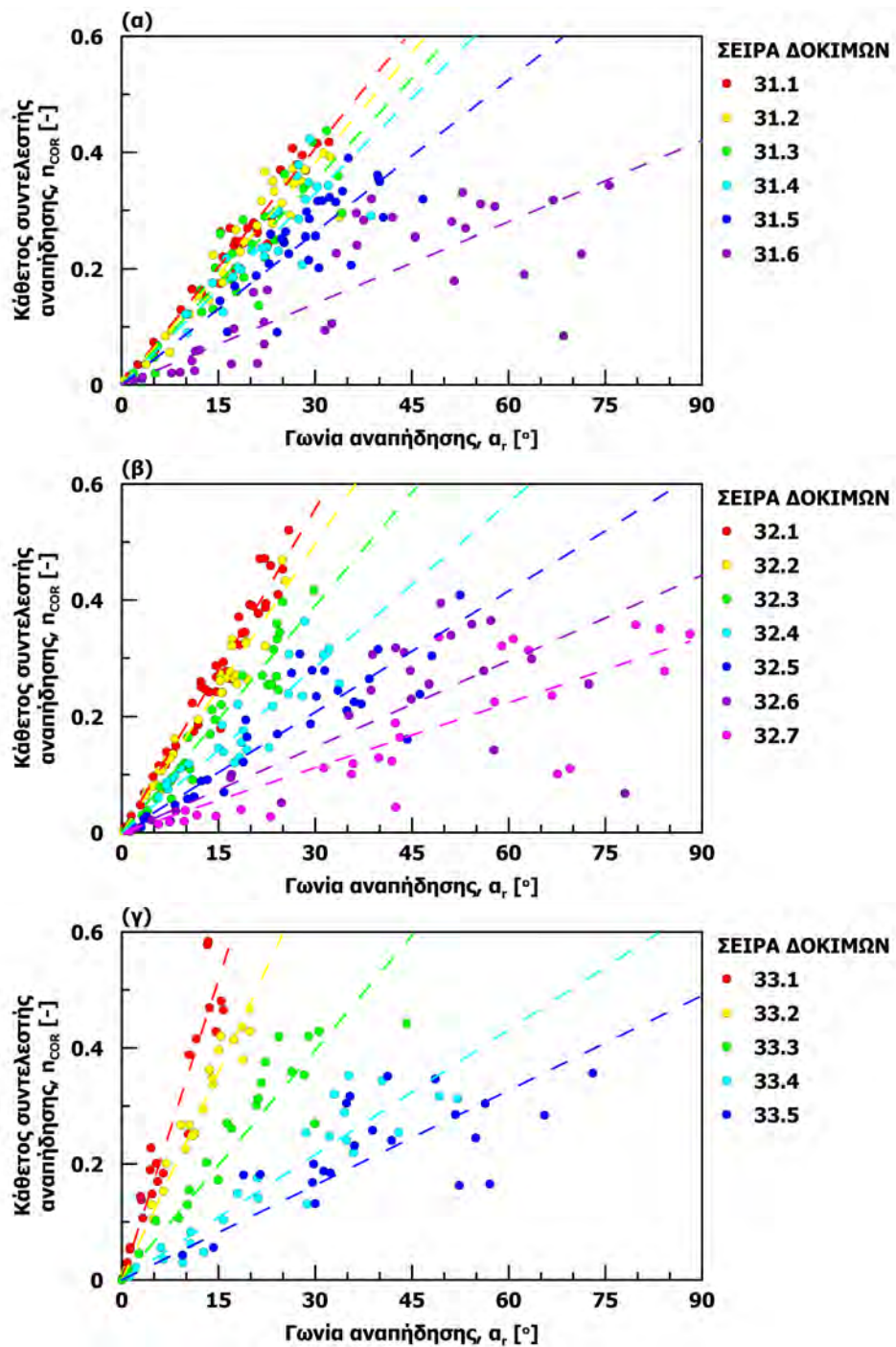
Σειρά δοκ.	Κλίση θ [$^\circ$]	Διαφ. διευθ. $\Delta\phi$ [$^\circ$]	Κάθετος συντ. αναπήδησης, $\eta_{COR}[-]$			
			ελάχιστη	μεγίστη	μέση	εύρος
31.2	13.5	36.3	0.01	0.40	0.25	0.39
31.3		80.9	0.02	0.44	0.22	0.42
31.4		103.7	0.09	0.42	0.25	0.33
31.5		129.4	0.09	0.39	0.26	0.30
32.2	24	35.1	0.00	0.47	0.21	0.47
32.3		72.3	0.00	0.42	0.19	0.41
32.4		95.8	0.01	0.36	0.16	0.36
32.5		120.0	0.01	0.41	0.17	0.40
32.6		141.5	0.01	0.39	0.22	0.39
33.2	43.5	51.1	0.00	0.47	0.26	0.47
33.3		84.8	0.00	0.44	0.24	0.44
33.4		129.4	0.01	0.35	0.17	0.34

Επίσης, στο σχήμα 6.44 παρουσιάζεται, για κάθε επιφάνεια πρόσκρουσης διαφορετικής κλίσης, ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης, συμπεριλαμβανομένων και των δοκιμών σε ομόρροπη και αντίρροπη κρούση. Παρατηρείται πως, ανεξαρτήτως της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης, η ελάχιστη τιμή του καθέτου συντελεστή αναπήδησης προσεγγίζει το μηδέν, η μέση τιμή δεν εμφανίζει κάποια σαφή τάση ενώ η μέγιστη φθίνει με την αύξηση της γωνίας πρόσκρουσης. Ως αποτέλεσμα, το εύρος των τιμών που λαμβάνει ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης μειώνεται με την αύξηση της γωνίας πρόσκρουσης. Ωστόσο το μέγεθός του είναι σημαντικό καθιστώντας υπεραπλουστευτική την θεώρηση του καθέτου συντελεστή αναπήδησης ως ιδιότητα υλικού. Όμοια συμπεριφορά, αναφορικά με το εύρος, παρατηρήθηκε και στις δοκιμές ομόρροπης και αντίρροπης κρούσης που παρουσιάστηκαν προηγουμένως.

Ιδιαίτερα καλή συσχέτιση του καθέτου συντελεστή αναπήδησης προκύπτει με την γωνία αναπήδησης και στις δοκιμές αυτές (Σχήμα 6.45). Κάθε σειρά δοκιμών περιγράφεται ικανοποιητικά από μια ευθεία που διέρχεται από την αρχή των αξόνων, η κλίση της οποίας βαίνει μειούμενη με την αύξηση της γωνίας πρόσκρουσης.



Σχήμα 6.44: Μεταβολή του καθέτου συντελεστή αναπήδησης με την γωνία πρόσκρουσης στις δοκιμές με κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης: (α) $\theta = 13.5^\circ$, (β) $\theta = 24^\circ$ και (γ) $\theta = 43.5^\circ$



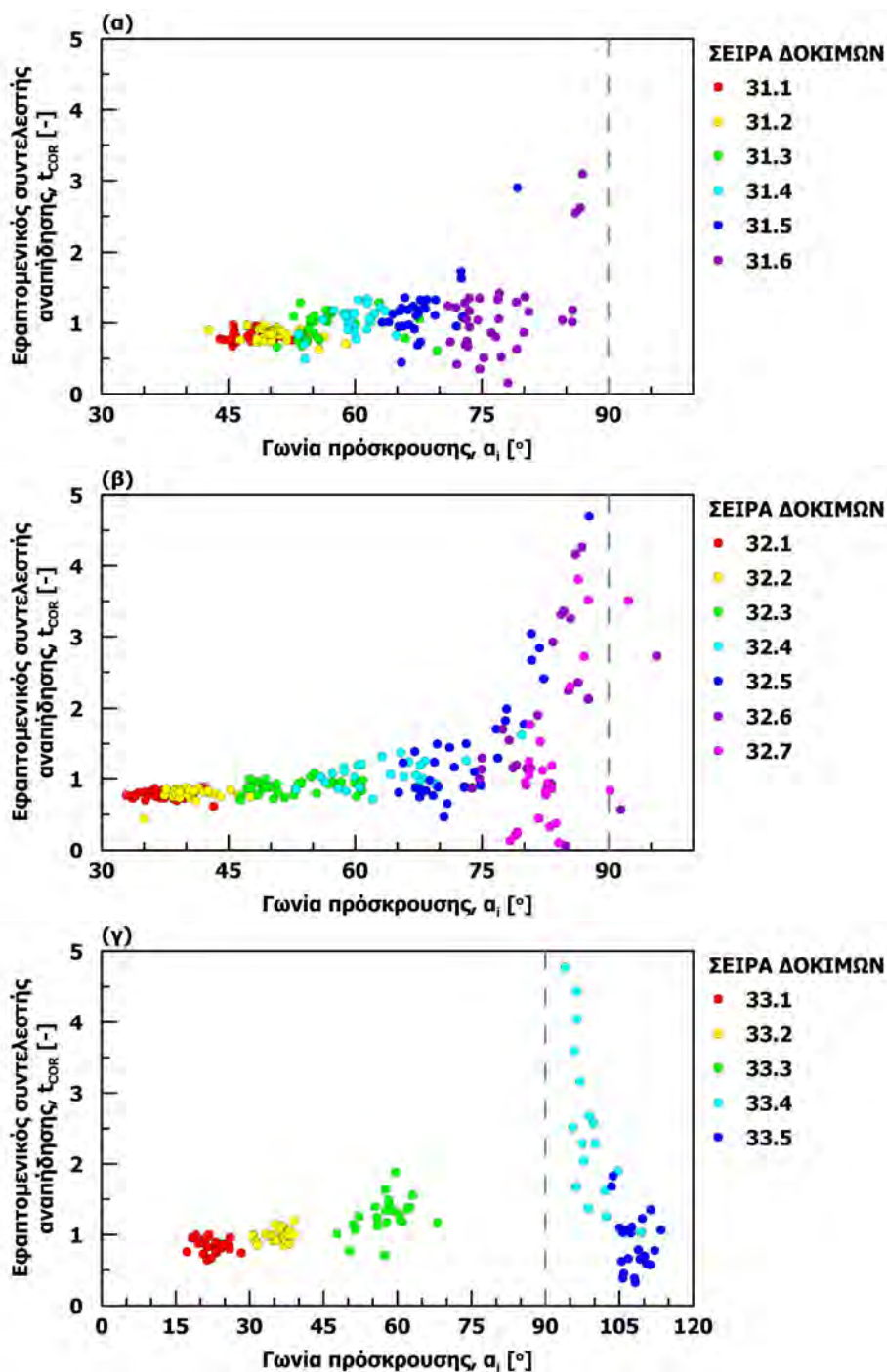
Σχήμα 6.45: Κάθετος συντελεστής συναρτήσει της γωνίας αναπήδησης στις δοκιμές με κλίση επιφανείας πρόσκρουσης: (α) $\theta = 13.5^\circ$, (β) $\theta = 24^\circ$ και (γ) $\theta = 43.5^\circ$

Οι χαρακτηριστικές τιμές του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης παρατίθενται στον πίνακα 6.25. Τα προβλήματα στον προσδιορισμό του υφίστανται και στη διερεύνηση αυτή, καθώς σε ορισμένες δοκιμές συμβαίνει αντιστροφή της κίνησης, όπου προκύπτουν αρνητικές τιμές. Ωστόσο, οι τιμές που αναπαρίστανται στα διαγράμματα που ακολουθούν έχουν υπολογιστεί από το μέτρο των εφαπτομενικών ταχυτήτων, πριν και μετά την κρούση, στο κατακόρυφο επίπεδο που εμπεριείχε τα αντίστοιχα σκέλη της τροχιάς.

Πίνακας 6.25: Τιμές εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης κυβικών τεμαχών σε επιφάνειες πρόσκρουσης διαφορετικής κλίσης και προσανατολισμού

Σειρά δοκ.	Κλίση θ [°]	Διαφ. διευθ. $\Delta\phi$ [°]	Εφαπτομενικός συντ. αναπήδησης, t_{COR} [-]			
			ελάχιστη	μεγίστη	μέση	εύρος
31.2	13.5	36.3	0.63	0.97	0.84	0.34
31.3		80.9	0.61	1.29	0.95	0.69
31.4		103.7	0.50	1.34	1.03	0.84
31.5		129.4	0.45	2.90	1.18	2.46
32.2	24	35.1	0.44	0.88	0.80	0.45
32.3		72.3	0.71	1.09	0.89	0.38
32.4		95.8	0.72	1.62	1.09	0.90
32.5		120.0	0.47	57.20	3.21	56.73
32.6		141.5	-8.03	4.27	1.27	12.30
33.2	43.5	51.1	0.85	1.20	0.99	0.35
33.3		84.8	0.71	1.89	1.27	1.17
33.4		129.4	-4.60	20.90	-4.76	21.50

Ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης αναπαρίσταται στο σχήμα 6.46 ως προς την γωνία πρόσκρουσης, για τις τρεις διαφορετικές κλίσεις της επιφάνειας πρόσκρουσης που εξετάστηκαν. Το πρόβλημα στον ορισμό του εφαπτομενικού συντελεστή γίνεται εμφανές στα παραπάνω διαγράμματα από την ασυμπτωτική τάση που εμφανίζουν οι τιμές του συντελεστή ως προς την γωνία πρόσκρουσης των 90°. Για γωνίες πρόσκρουσης έως περίπου 80° και μεγαλύτερες των 100°, ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης λαμβάνει τιμές στο εύρος 0.6 έως 1.2 με την μέση τιμή να εμφανίζει μια ελαφρώς αυξητική τάση όσο η κρούση τείνει προς την κάθετη. Σε όλα τα σχήματα υπάρχουν τιμές του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης μεγαλύτερες του 5 στις γωνίες περίξ των 90° (διακεκομμένη ευθεία) οι οποίες δεν προβάλλονται.



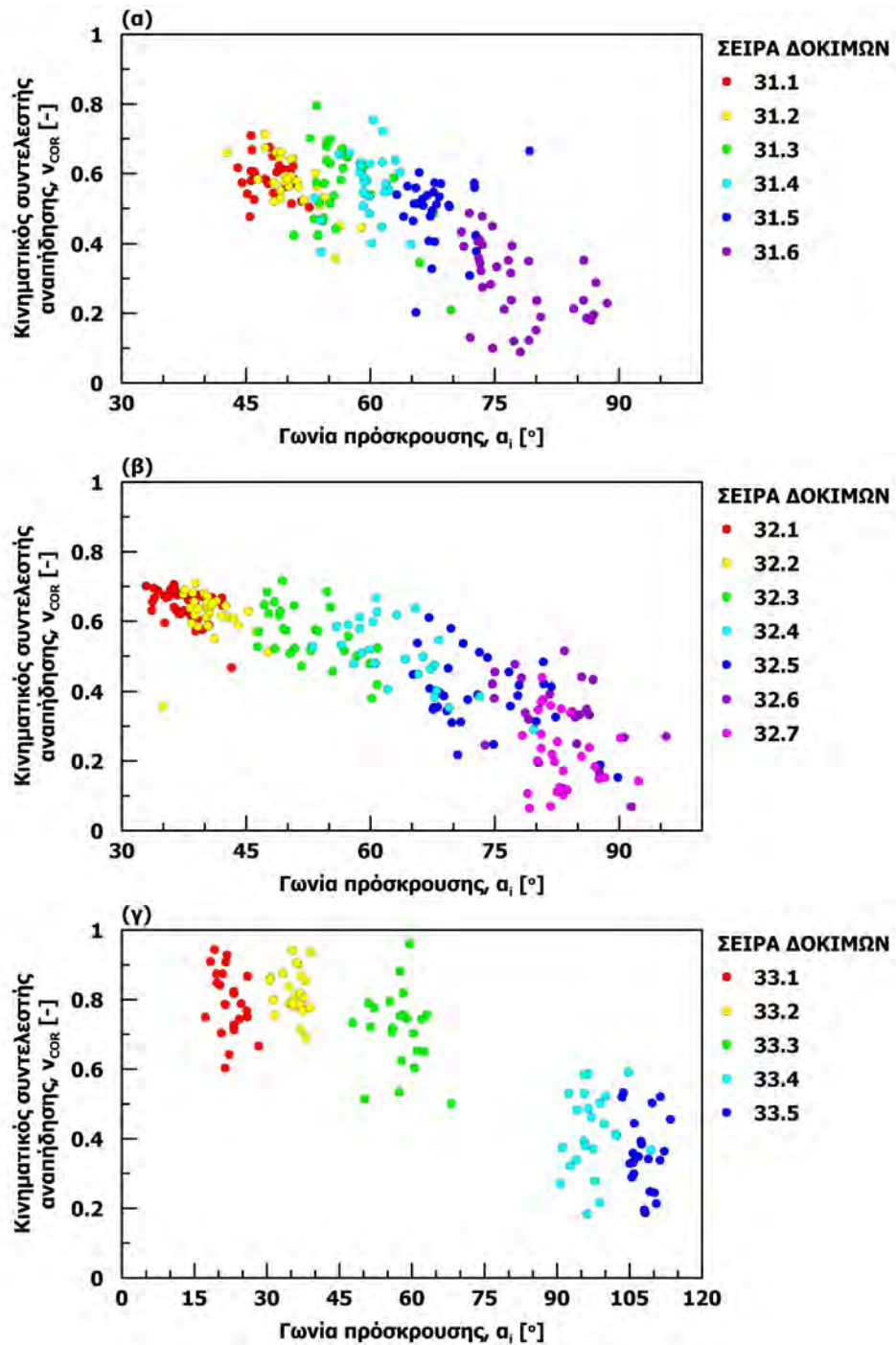
Σχήμα 6.46: Μεταβολή του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης με την γωνία πρόσκρουσης στις δοκιμές με κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης: (α) $\vartheta = 13.5^\circ$, (β) $\vartheta = 24^\circ$ και (γ) $\vartheta = 43.5^\circ$

Οι χαρακτηριστικές τιμές του κινηματικού συντελεστή αναπήδησης παρατίθενται στον πίνακα 6.26. Παρατηρείται ότι ο συντελεστής μειώνεται με την αύξηση της γωνίας πρόσκρουσης ανεξαρτήτως της κλίσης της επιφάνειας (Σχήμα 6.47) και έχει σταθερό εύρος περίπου 0.4. Ωστόσο, υπάρχει διαφοροποίηση της συμπεριφοράς σε σχέση με αυτήν που παρατηρήθηκε στις δοκιμές με τα σφαιρικά τεμάχια, στα οποία δεν παρατηρήθηκε εξάρτηση από την γωνία πρόσκρουσης. Επιπρόσθετα, δεν προκύπτει συσχέτιση του κινηματικού συντελεστή με την γωνία αναπήδησης.

Ο κινηματικός συντελεστής αναπήδησης καταλαμβάνει ελαφρώς μεγαλύτερο εύρος στην απότομη επιφάνεια πρόσκρουσης. Σε κάθε περίπτωση πάντως, οι τιμές που λαμβάνει είναι μικρότερες της μονάδας που συνεπάγεται ότι στην κρούση συμβαίνει απώλεια ταχύτητας.

Πίνακας 6.26: Τιμές κινηματικού συντελεστή αναπήδησης κυβικών τεμαχίων σε επιφάνειες πρόσκρουσης διαφορετικής κλίσης και προσανατολισμού

Σειρά δοκ.	Κλίση θ [°]	Διαφ. διευθ. $\Delta\phi$ [°]	Κινηματικός συντ. αναπήδησης, v_{COR} [-]			
			ελάχιστη	μεγίστη	μέση	εύρος
31.2	13.5	36.3	0.36	0.71	0.57	0.35
31.3		80.9	0.21	0.79	0.56	0.58
31.4		103.7	0.38	0.75	0.56	0.38
31.5		129.4	0.20	0.67	0.49	0.46
32.2	24	35.1	0.36	0.71	0.62	0.35
32.3		72.3	0.38	0.72	0.56	0.34
32.4		95.8	0.29	0.67	0.51	0.38
32.5		120.0	0.15	0.61	0.39	0.46
32.6		141.5	0.07	0.52	0.33	0.45
33.2	43.5	51.1	0.69	0.94	0.82	0.25
33.3		84.8	0.50	0.96	0.71	0.46
33.4		129.4	0.18	0.59	0.42	0.41

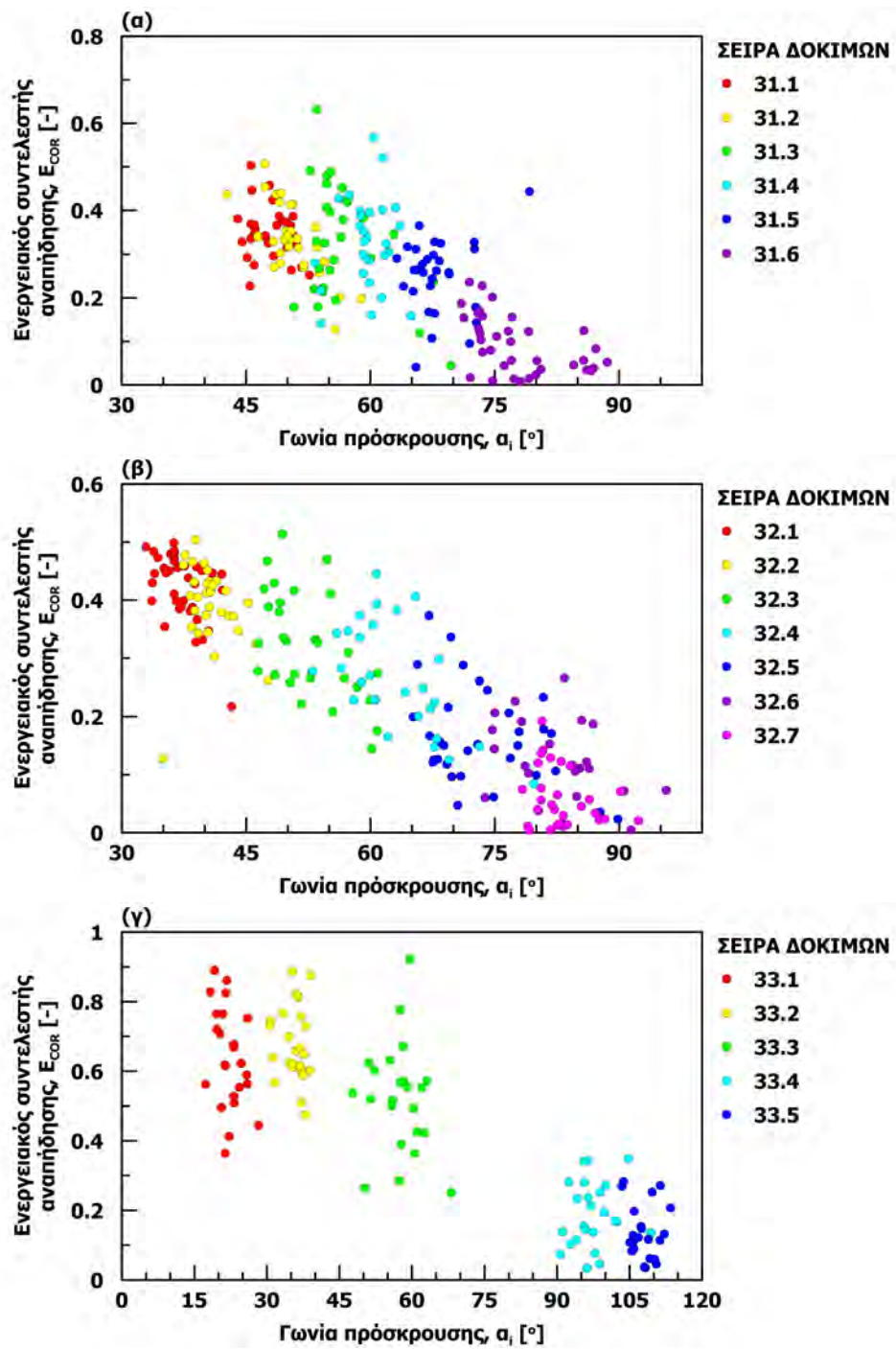


Σχήμα 6.47: Μεταβολή του κινηματικού συντελεστή αναπήδησης με την γωνία πρόσκρουσης στις δοκιμές με κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης: (α) $\theta = 13.5^\circ$, (β) $\theta = 24^\circ$ και (γ) $\theta = 43.5^\circ$

Οι τάσεις που περιγράφουν τον ενεργειακό συντελεστή αναπήδησης (Πίνακας 6.27) ομοιάζουν με αυτές του κινηματικού. Γενικώς, το μέγεθός του μειώνεται με την αύξηση της γωνίας πρόσκρουσης και οι τιμές που λαμβάνει είναι ελαφρώς αυξημένες με την αύξηση της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης ανεξαρτήτως της γωνίας που γίνεται η κρούση (Σχήμα 6.48).

Πίνακας 6.27: Τιμές ενεργειακού συντελεστή αναπήδησης κυβικών τεμαχίων σε επιφάνειες πρόσκρουσης διαφορετικής κλίσης και προσανατολισμού

Σειρά δοκ.	Κλίση θ [°]	Διαφ. διευθ. $\Delta\phi$ [°]	Ενεργειακός συντ. αναπήδησης, $E_{COR}[-]$			
			ελάχιστη	μεγίστη	μέση	εύρος
31.2	13.5	36.3	0.13	0.51	0.33	0.38
31.3		80.9	0.04	0.63	0.33	0.59
31.4		103.7	0.14	0.57	0.33	0.43
31.5		129.4	0.04	0.44	0.25	0.40
32.2	24	35.1	0.13	0.50	0.39	0.38
32.3		72.3	0.15	0.51	0.32	0.37
32.4		95.8	0.08	0.45	0.27	0.36
32.5		120.0	0.02	0.37	0.17	0.35
32.6		141.5	0.00	0.27	0.12	0.26
33.2	43.5	51.1	0.48	0.89	0.68	0.41
33.3		84.8	0.25	0.92	0.52	0.67
33.4		129.4	0.03	0.35	0.19	0.32



Σχήμα 6.48: Μεταβολή του κινηματικού συντελεστή αναπήδησης με την γωνία πρόσκρουσης στις δοκιμές με κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης: (α) $\theta = 13.5^\circ$, (β) $\theta = 24^\circ$ και (γ) $\theta = 43.5^\circ$

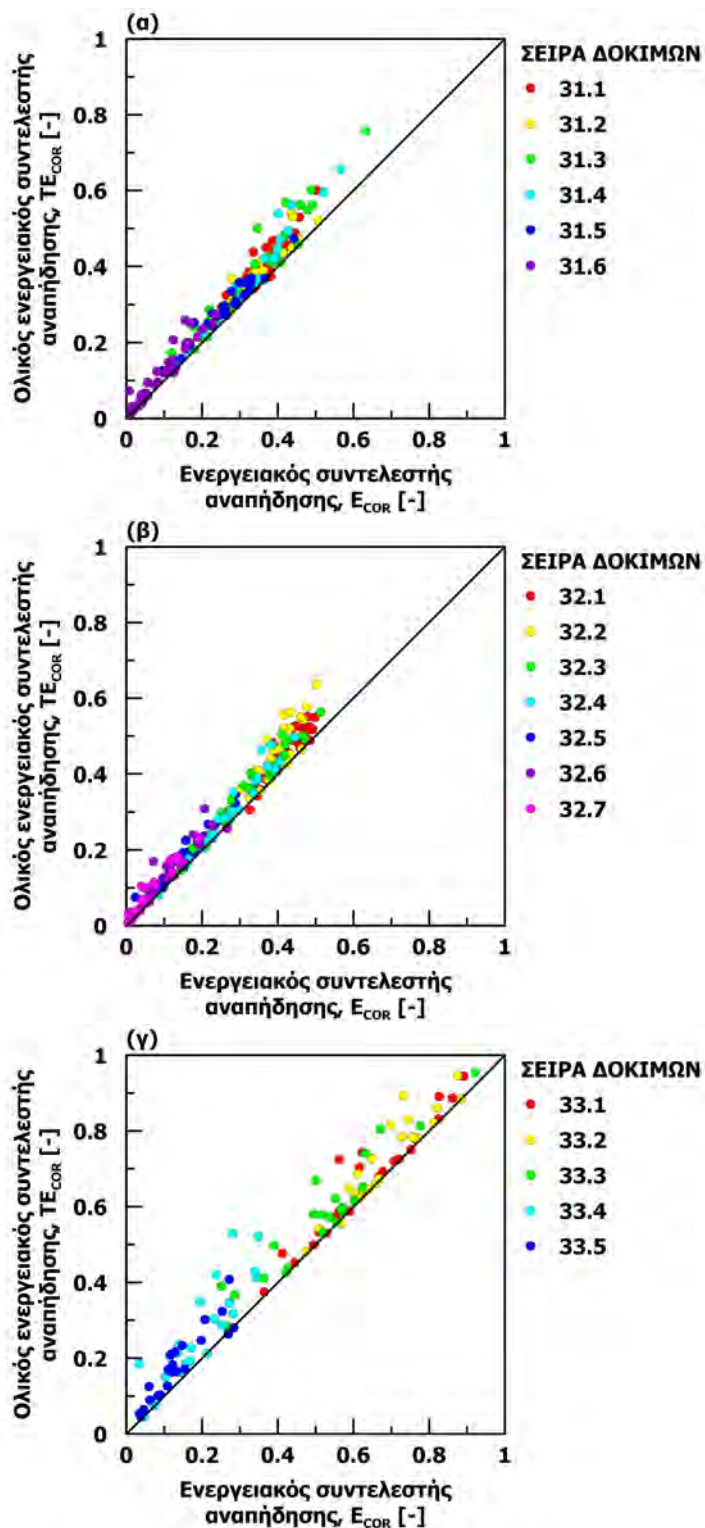
Παρόμοια συμπεριφορά με τον ενεργειακό συντελεστή αναπήδησης έχει και ο ολικός ενεργειακός συντελεστής (Πίνακας 6.28), όπου συνυπολογίζεται και η περιστροφική συνιστώσα της κίνησης. Το σύνολο των τιμών είναι μικρότερο της μονάδας και με τους δυο ορισμούς, που συνεπάγεται ότι κατά την κρούση υπάρχει απώλεια ενέργειας.

Πίνακας 6.28: Τιμές ολικού ενεργειακού συντελεστή αναπήδησης κυβικών τεμαχών σε επιφάνειες πρόσκρουσης διαφορετικής κλίσης και προσανατολισμού

Σειρά δοκ.	Κλίση θ [°]	Διαφ. διευθ. $\Delta\phi$ [°]	Ολικός Ενεργειακός συντ. αναπήδησης, $TE_{COR}[-]$			Εύρος
			ελάχιστη	μεγίστη	μέση	
31.2	13.5	36.3	0.13	0.54	0.37	0.41
31.3		80.9	0.05	0.76	0.38	0.71
31.4		103.7	0.15	0.66	0.37	0.50
31.5		129.4	0.04	0.47	0.28	0.43
32.2	24	35.1	0.14	0.64	0.45	0.50
32.3		72.3	0.15	0.56	0.35	0.42
32.4		95.8	0.08	0.50	0.29	0.42
32.5		120.0	0.04	0.38	0.19	0.35
32.6		141.5	0.01	0.31	0.15	0.30
33.2	43.5	51.1	0.48	0.98	0.72	0.50
33.3		84.8	0.28	0.95	0.58	0.67
33.4		129.4	0.05	0.53	0.26	0.48

Συνυπολογίζοντας την περιστροφή, ο ολικός συντελεστής λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές από τον ενεργειακό, ανεξαρτήτως της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης. Αυτό παρατηρείται στο σχήμα 6.49, όπου συγκρίνονται οι δυο ορισμοί, καθώς όλα τα σημεία προβάλλονται πάνω από την ευθεία των 45°. Ωστόσο, η διαφοροποίηση τους δεν είναι σημαντική, δεδομένης της διασποράς που εμφανίζουν οι εν λόγω συντελεστές αναπήδησης υπό παρόμοιες συνθήκες κρούσης.

Βάσει των ανωτέρω, συμπεραίνεται ότι η χρήση των ενεργειακών συντελεστών αναπήδησης, με ή χωρίς την συνεκτίμηση της περιστροφής, δεν προσφέρουν καλύτερη ερμηνεία του φαινομένου συγκριτικά με τους συντελεστές που βασίζονται στις ταχύτητες. Έτσι, είναι προτιμότερη η χρήση των κινηματικών ορισμών, καθώς είναι σαφώς ευκολότερη η μέτρησή τους ενώ συγχρόνως ο τρόπος που περιγράφουν την επίδραση της κρούσης στην διαγραφόμενη τροχιά είναι καλύτερα αντιληπτός.



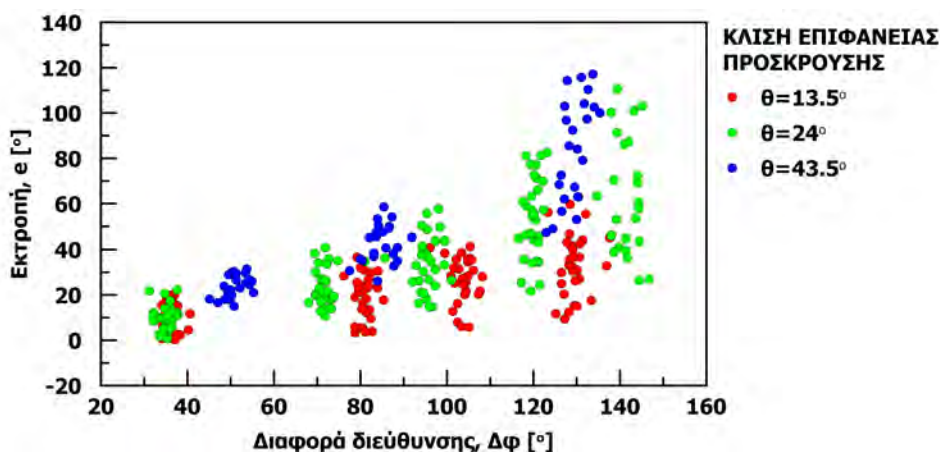
Σχήμα 6.49: Σχέση ολικού με τον ενεργειακό συντελεστή αναπήδησης στις δοκιμές με κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης: (α) $\theta = 13.5^\circ$, (β) $\theta = 24^\circ$ και (γ) $\theta = 43.5^\circ$

6.2.3.3.5 Εκτροπή στη λοξή κρούση κυβικών τεμαχών

Οι χαρακτηριστικές τιμές της εκτροπής συναρτήσει της διαφοράς διεύθυνσης και της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης παρατίθενται στον πίνακα 6.29. Στο σχήμα 6.50 προβάλλεται η εκτροπή συναρτήσει της διαφοράς διεύθυνσης για το σύνολο των δεδομένων, ομαδοποιημένα σύμφωνα με την κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης.

Πίνακας 6.29: Εκτροπή κυβικών τεμαχών σε επιφάνειες πρόσκρουσης διαφορετικής κλίσης και προσανατολισμού

Σειρά δοκ.	Κλίση θ [°]	Διαφ. διευθ. $\Delta\phi$ [°]	Εκτροπή, e [°]			
			ελάχιστη	μεγίστη	μέση	εύρος
31.2	13.5	36.3	-4.1	20.6	10.9	24.7
31.3		80.9	3.3	36.7	19.0	33.4
31.4		103.7	5.8	41.4	26.9	35.5
31.5		129.4	9.5	59.7	33.0	50.2
32.2	24	35.1	0.8	22.3	9.6	21.5
32.3		72.3	10.7	40.9	23.7	30.1
32.4		95.8	14.6	57.7	33.6	43.1
32.5		120.0	21.7	82.6	53.5	60.8
32.6		141.5	26.4	110.7	63.5	84.2
33.2	43.5	51.1	15.1	31.4	24.3	16.3
33.3		84.8	26.1	58.5	42.8	32.4
33.4		129.4	47.3	117.2	83.6	69.9

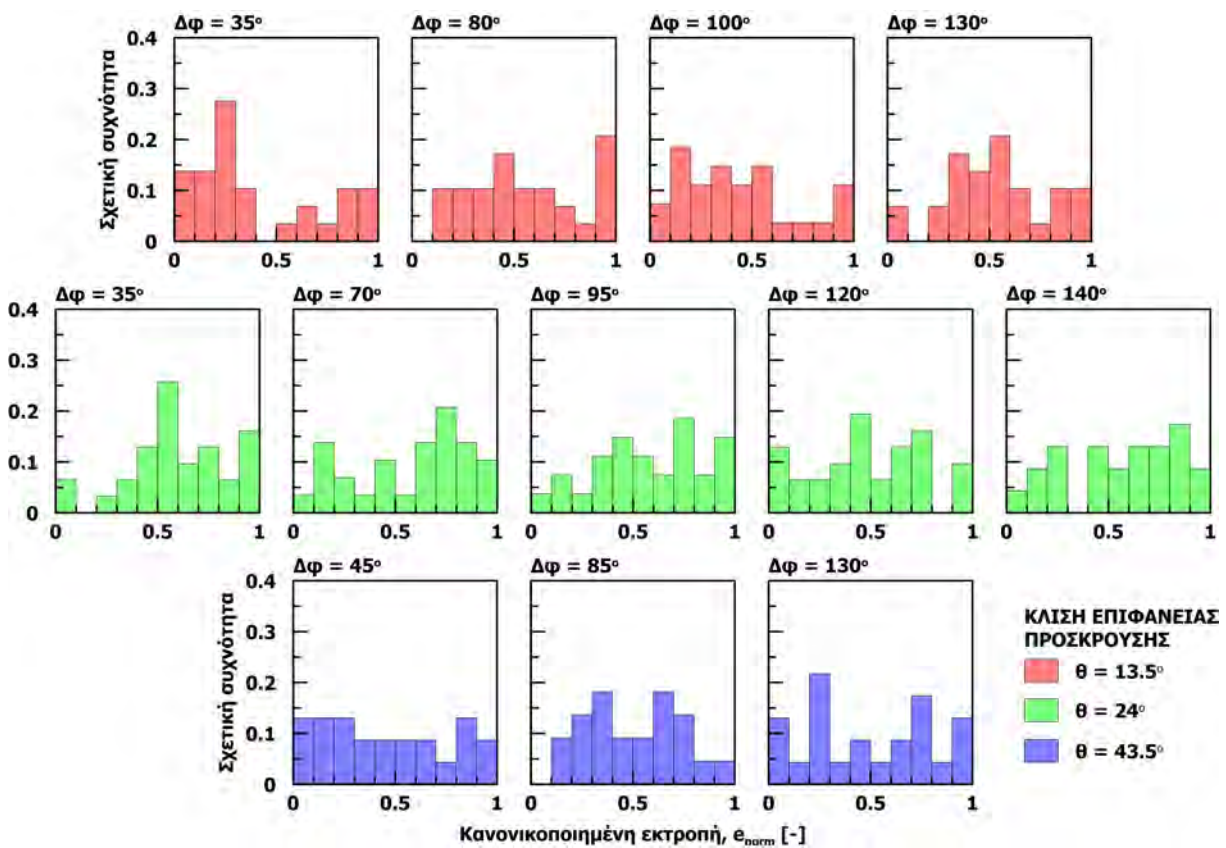


Σχήμα 6.50: Εκτροπή συναρτήσει της διαφοράς διεύθυνσης για κυβικά τεμάχια

Παρατηρείται ότι η αύξηση της διαφοράς διεύθυνσης προκαλεί αύξηση της εκτροπής των τεμαχών, ανεξαρτήτως της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης. Επίσης, με την αύξηση της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης αυξάνεται η αλλαγή της διεύθυνσης των τεμαχών.

Η διεύθυνση της τροχιάς πριν την κρούση παρουσιάζει μια διακύμανση της τάξεως των $\pm 5^\circ$, καθώς η κρούση των τεμαχών πραγματοποιείται μετά από την ολίσθηση τους στην σωλήνα απελευθέρωσης. Το γεγονός αυτό προσδίδει μια τυχαιότητα στις συνθήκες πρόσκρουσης που μεταφέρεται στον προσανατολισμό του τεμάχους κατά την πρόσκρουση και άρα στην γεωμετρία επαφής. Τούτο είναι επιθυμητό καθώς στις πραγματικές καταπτώσεις η γεωμετρία επαφής είναι τυχαία και εξαρτάται από παραμέτρους που δεν μπορούν να ελεγχθούν.

Ακολούθως, εξετάζονται οι κατανομές της εκτροπής με σκοπό την διερεύνηση ύπαρξης κάποιας τάσης στο διάστημα των πιθανών διευθύνσεων. Καθώς το εύρος της εκτροπής μεταβάλλεται σημαντικά ανάλογα της διαφοράς διεύθυνσης και της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης, σε κάθε σειρά δοκιμών έγινε κανονικοποίηση της εκτροπής ως προς το εύρος της. Οι κατανομές αυτές παρατίθενται στο σχήμα 6.51.



Σχήμα 6.51: Κανονικοποιημένες κατανομές της εκτροπής για τις διάφορες περιπτώσεις κλίσης και διαφοράς διεύθυνσης

Από την μορφή των παραπάνω κατανομών προκύπτει ότι τα αποτελέσματα χαρακτηρίζονται από την απλή περίπτωση της ομοιόμορφης κατανομής. Αντιθέτως στις περιπτώσεις της ομόρροπης και της αντίρροπης κρούσης, τα αποτελέσματα περιγράφονταν ιδιαίτερα ικανοποιητικά από κανονικές κατανομές.

6.3 Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκαν οι εργαστηριακές δοκιμές που καταγράφηκαν και αναλύθηκαν στις τρεις διαστάσεις, οι οποίες παρέχουν συγχρόνως στοιχεία για την εκτροπή των τεμαχών μετά την κρούση. Η διερεύνηση πραγματοποιήθηκε σε δυο φάσεις. Στην πρώτη, εξετάσθηκε κυρίως η αξιοπιστία και η εφαρμοσιμότητα της μεθόδου που αναπτύχθηκε για την καταγραφή, επεξεργασία και ανάλυση των δοκιμών και επιπρόσθετα εξήχθησαν κάποια πρώτα συμπεράσματα για την εκτροπή. Στην δεύτερη φάση, προσαρμόστηκαν οι συνθήκες της διερεύνησης έτσι ώστε να μελετηθεί διεξοδικά η εκτροπή. Σε όλες τις δοκιμές που εκτελέστηκαν, προσδιορίστηκαν και οι συντελεστές αναπήδησης με σκοπό αφενός τον προσδιορισμό των τάσεων που παρουσιάζουν συναρτήσει διαφόρων παραμέτρων που επενεργούν στην αναπήδηση, και αφετέρου την σύνδεσή τους με τα συμπεράσματα των δοκιμών που αναλύθηκαν στις δυο διαστάσεις.

Η πρώτη φάση-διερεύνηση πραγματοποιήθηκε με δοκιμές ελεύθερης πτώσης σε επιφάνειες πρόσκρουσης διαφορετικής κλίσης. Χρησιμοποιήθηκαν τεμάχια με κυβικό, πολυεδρικό και σφαιρικό σχήμα. Η τροχιά προσδιορίστηκε για το κέντρο βάρους των τεμαχών, καθώς δεν κατέστη δυνατή η ψηφιακή ανακατασκευή τους με συνέπεια να μην γίνει μέτρηση της γωνιακής ταχύτητας.

Από την διερεύνηση αυτή, προέκυψαν τα ακόλουθα: ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης αυξάνεται όσο η κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης γίνεται περισσότερο απότομη, ή ισοδύναμα μειώνεται η γωνία πρόσκρουσης. Επίσης, για παρόμοιες συνθήκες κρούσης, το σφαιρικό τέμαχος εμφανίζει σημαντικά μεγαλύτερες τιμές συγκριτικά με το κυβικό. Έτσι, ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης εμφανίζει μεγαλύτερο εύρος διακύμανσης για τα σφαιρικά τεμάχια συγκριτικά με τα υπόλοιπα σχήματα, καθώς οι ελάχιστες τιμές δεν παρουσίασαν αισθητή διαφοροποίηση. Ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης δεν έδειξε κάποια ευαισθησία με την αλλαγή του σχήματος, ούτε με την μεταβολή της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης (ή ισοδύναμα με την γωνία πρόσκρουσης). Ο κινηματικός συντελεστής αναπήδησης μειώνεται όσο αυξάνεται η γωνία πρόσκρουσης και το εύρος τιμών του είναι σαφώς πιο περιορισμένο συγκριτικά με του καθέτου, ωστόσο δεν αποτυπώνει την μεταβολή του σχήματος. Τα ανωτέρω είναι σε απόλυτη συμφωνία με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την διδιάστατη διερεύνηση που παρουσιάσθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Όσον αφορά στην εκτροπή, προέκυψε ότι εξαρτάται τόσο από το σχήμα του τεμάχους όσο και από την κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης. Πιο συγκεκριμένα, η εκτροπή μειώνεται όσο η επιφάνεια πρόσκρουσης γίνεται περισσότερο απότομη και όσο το σχήμα του τεμάχους τείνει προς το σφαιρικό.

Αξιοποιώντας την εμπειρία που αποκομίστηκε από τις δοκιμές της πρώτης φάσης, σχεδιάστηκε νέα, λεπτομερέστερη διερεύνηση με στόχο την μελέτη της εκτροπής συναρτήσει του σχήματος του τεμάχους, της διαφοράς διεύθυνσης και της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης. Οι δοκιμές εκτελέστηκαν με παραβολική ρίψη σε λείες επιφάνειες πρόσκρουσης με τρεις διαφορετικές κλίσεις.

Συνολικά, πραγματοποιήθηκαν 714 δοκιμές οργανωμένες σε τέσσερις ομάδες, τρεις με κυβικά τεμάχια και μια με σφαιρικά. Τόσο οι επιφάνειες πρόσκρουσης όσο και τα τεμάχια κατασκευάστηκαν από το ένεμα τσιμεντοειδούς βάσης. Η επίδραση του σχήματος εξετάστηκε συγκρίνοντας την απόκριση των σφαιρικών και των κυβικών τεμαχίων για πρόσκρουση σε επιφάνεια με ίδια κλίση και οριζόντια, ενώ η επίδραση της κλίσης μελετήθηκε με τα κυβικά δοκίμια στις διαφορετικές κλίσεις της επιφάνειας πρόσκρουσης. Στις παραπάνω ομάδες δοκιμών έγιναν επιμέρους σειρές μεταβάλλοντας την διαφορά διεύθυνσης, ώστε να εξεταστεί συγχρόνως και η επίδρασή της.

Γενικότερα, όσον αφορά το σχήμα του τεμάχους, προέκυψε ικανοποιητική επαναληψιμότητα των χαρακτηριστικών της κίνησης στις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν με σφαιρικό τέμαχος, η οποία αντικατοπτρίζεται και στις τάσεις που εμφανίζουν οι συντελεστών αναπήδησης. Αντιθέτως, η απόκριση στην κρούση των δοκιμών κυβικού σχήματος περιγράφεται από σημαντική διακύμανση, ακόμη και υπό παρόμοιες συνθήκες πρόσκρουσης.

Το σχήμα του τεμάχους καθορίζει την γεωμετρία επαφής, η οποία φαίνεται να έχει σημαντικό αντίκτυπο στην κίνηση μετά την κρούση. Ωστόσο, αν και η επαναληψιμότητα των δοκιμών είναι μικρότερη με την χρήση κυβικών δοκιμών, θεωρούνται αντιπροσωπευτικότερα για την μελέτη της αναπήδησης. Στην φύση τα τεμάχια είναι ακανόνιστου σχήματος, συνεπώς η γεωμετρία επαφής εμφανίζει σημαντική μεταβλητότητα που δεν μπορεί να προσομοιωθεί από τα σφαιρικά τεμάχια.

Ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης προκύπτει σημαντικά μεγαλύτερος στα σφαιρικά τεμάχια από ότι στα κυβικά. Ανεξαρτήτως σχήματος, το μέγεθός του μειώνεται με την αύξηση της γωνίας πρόσκρουσης. Γενικώς, εφόσον το τέμαχος λίπτει με ίδιες αρχικές συνθήκες, η γωνία πρόσκρουσης αυξάνεται με την μείωση της κλίσης. Το παραπάνω συμπέρασμα μπορεί να διατυπωθεί και ως προς την κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης, όταν η κρούση είναι ομόρροπη. Ωστόσο, στην φύση τα τεμάχια δεν απελευθερώνονται με παρόμοιες συνθήκες, συνεπώς η χρήση της γωνίας πρόσκρουσης είναι προτιμότερη.

Όμοια συμπεριφορά ως προς την γωνία πρόσκρουσης παρατηρείται και κατά την στροφή της επιφάνειας πρόσκρουσης. Πιο συγκεκριμένα, όσο αυξάνεται η διαφορά διεύθυνσης, δηλαδή η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της φοράς μεγίστης κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης και της διεύθυνσης κίνησης του τεμάχους, ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης μειώνεται καθώς αυξάνεται η γωνία πρόσκρουσης για δεδομένη κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης. Συνεπώς, η απόκριση του τεμάχους καθορίζεται από την γωνία πρόσκρουσης, που εξαρτάται από την φαινόμενη γωνία κλίσης του πρηνούς στην διεύθυνση της κίνησής του.

Περαιτέρω, ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης εμφανίζει μια επαναλήψιμη σχέση με τις γωνίες πρόσκρουσης και αναπήδησης, που είναι ανεξάρτητη του σχήματος του τεμάχους. Πιο συγκεκριμένα, στον χώρο του καθέτου συντελεστή αναπήδησης με την γωνία πρόσκρουσης, οι τιμές που λαμβάνει ο συντελεστής περιγράφονται ικανοποιητικώς από μια ευθεία που διέρχεται από την αρχή των αξόνων, με την κλίση αυτής να μειώνεται όσο αυξάνεται η γωνία πρόσκρουσης. Έτσι, εκτιμώντας την γωνία αναπήδησης, που εξαρτάται μόνο από τις συνθήκες

ρίψης, είναι εφικτός ο προσδιορισμός του εύρους τιμών που λαμβάνει ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης και της αντίστοιχης γωνίας.

Ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης λαμβάνει αντίστοιχες τιμές ανεξαρτήτως του σχήματος του τεμάχους, της κλίσης της επιφάνειας ή της γωνίας πρόσκρουσης και κατ' επέκτασιν της διαφοράς διεύθυνσης. Στα κυβικά τεμάχη το εύρος διακύμανσης του συντελεστή είναι σημαντικό, μεγαλύτερο από αυτό στα σφαιρικά, και αυξάνεται όταν η γωνία πρόσκρουσης κυμαίνεται περίξ των 90° , καθώς για την τιμή αυτή δεν μπορεί να οριστεί. Επιπρόσθετα, ο ορισμός του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης είναι προβληματικός όταν υπάρχει αντιστροφή της διεύθυνσης κίνησης του τεμάχους, κάτι σύνηθες όταν η επιφάνεια πρόσκρουσης κλίνει αντίρροπα της διεύθυνσης της τροχιάς πριν την κρούση.

Στα κυβικά τεμάχη, ο κινηματικός συντελεστής αναπήδησης φθίνει με την αύξηση της γωνίας πρόσκρουσης, συμπεριφορά που δεν ήταν εμφανής στα σφαιρικά τεμάχη για τα οποία παρουσιάζει μεγαλύτερο μέγεθος και μικρότερη διασπορά.

Ο ενεργειακός συντελεστής αναπήδησης εμφανίζει αντίστοιχη συμπεριφορά με τον κινηματικό, με ελαφρώς μικρότερο μέγεθος αλλά με μεγαλύτερο εύρος. Όταν συνεκτιμάται και η περιστροφική συνιστώσα της κίνησης, δηλαδή στον ολικό ενεργειακό συντελεστή αναπήδησης, η κατάσταση ομοιάζει. Συγκρίνοντας τους δυο αυτούς ορισμούς, παρατηρείται ότι ο ολικός συντελεστής λαμβάνει σε κάθε περίπτωση μεγαλύτερο μέγεθος. Ωστόσο η διαφοροποίηση δεν είναι ουσιαστική συγκρινόμενη με την διασπορά που εμφανίζουν αμφότεροι οι συντελεστές. Γενικότερα, η περιστροφική συνιστώσα της κίνησης δεν φαίνεται να έχει σημαντική επίδραση στην διαγραφόμενη τροχιά, καθώς δεν παρατηρήθηκε κάποια συστηματική τάση με αυτή.

Η εκτροπή επηρεάζεται σημαντικά από το σχήμα του τεμάχους. Πιο συγκεκριμένα, στα σφαιρικά τεμάχη το μέγεθός της είναι σημαντικά περιορισμένο σε σχέση με τα κυβικά. Ανεξαρτήτως του σχήματος του τεμάχους, το εύρος της μειώνεται όσο αυξάνεται η κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης.

Η διαφορά διεύθυνσης μεταξύ της φοράς μέγιστης κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης και της διεύθυνσης κίνησης του τεμάχους δεν επιδρά σημαντικά στα τεμάχη σφαιρικού σχήματος. Αντιθέτως στα κυβικά τεμάχη, η αύξηση της διαφοράς διεύθυνσης προκαλεί αύξηση της εκτροπής των τεμαχών, και συγχρόνως όσο αυξάνεται η κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης εντείνεται η αλλαγή διεύθυνσης των τεμαχών.

Στην ομόρροπη και την αντίρροπη κρούση, η εκτροπή περιγράφεται ικανοποιητικά από κανονικές κατανομές, που μάλιστα το κέντρο τους ταυτίζεται με την διεύθυνση κίνησης του τεμάχους πριν την κρούση. Ωστόσο, όταν η κρούση είναι λοξή δεν προκύπτει κάποια συγκεκριμένη κατανομή που να περιγράφει την διεύθυνση κίνησης, πέραν της ομοιόμορφης.

Κεφάλαιο 7

Επιτόπου Πειραματική Διερεύνηση

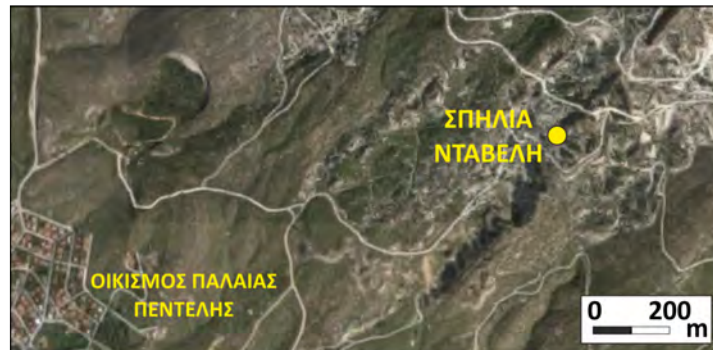
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στο πεδίο. Σημαντικό ζήτημα της πειραματικής διαδικασίας συνιστά η αναγωγή των συμπερασμάτων από την εργαστηριακή διερεύνηση στην πραγματική διάσταση του προβλήματος, η οποία προσεγγίζεται καλύτερα στις επιτόπου δοκιμές. Συνεπώς, σκοπός των δοκιμών πεδίου είναι η αξιολόγηση της εγκυρότητας των συμπερασμάτων και κατ' επέκταση της εφαρμοσιμότητας των εμπειρικών μεθόδων που προκύπτουν από την εκτενέστατη εργαστηριακή διερεύνηση.

Οι επιτόπου δοκιμές ενέχουν σημαντικές δυσκολίες στην πραγματοποίησή τους, με αποτέλεσμα το πλήθος τους να είναι περιορισμένο. Για λόγους ασφαλείας οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε περιοχές με πλήρως ελεγχόμενες συνθήκες προσπέλασης τρίτων, συνήθως σε απόμακρες θέσεις καθιστώντας έτσι την πρόσβαση δύσκολη.

Η εξέλιξη των δοκιμών ακολούθησε την ανάπτυξη των μεθόδων καταγραφής που εφαρμόζοταν κατά την διάρκεια της παρούσας έρευνας. Η πρώτη φάση δοκιμών εκτελέστηκε στην Σπηλιά Νταβέλη στην Πεντέλη, όπου η καταγραφή και η επεξεργασία έγινε στις δυο διαστάσεις. Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκαν δοκιμές πλησίον του θεάτρου Βράχων της Καισαριανής, όπου έγινε συσχέτιση της κλίμακας μεταξύ πεδίου και εργαστηρίου και μελετήθηκε η εκτροπή συναρτήσει της κλίσης και του σχήματος του τεμάχους, εφαρμόζοντας για πρώτη φορά στην ύπαιθρο την μέθοδο της τριδιάστατης καταγραφής. Τέλος, έγιναν δοκιμές σε δύο στο Πεντελικό όρος, χρησιμοποιώντας την τελική μορφή της μεθοδολογίας τριδιάστατης επεξεργασίας της τροχιάς, επιτυγχάνοντας την πλήρη ψηφιακή ανακατασκευή της κίνησης του τεμάχους. Στην διερεύνηση αυτή αναπαράχθηκαν οι δοκιμές εργαστηρίου που απετέλεσαν την βάση για την έκφραση της εμπειρικής μεθοδολογίας προσδιορισμού της εκτροπής, που παρουσιάζεται σε επόμενη ενότητα και επαληθεύεται από τις επιτόπου δοκιμές.

7.1 Επιτόπου δοκιμές στη σπηλιά Νταβέλη - Πεντέλη

Η σπηλιά Νταβέλη βρίσκεται στην νοτιοδυτική πλευρά του όρους Πεντέλη (Σχήμα 7.1). Η περιοχή φιλοξενούσε το σημαντικότερο λατομείο της πόλης των Αθηνών κατά τον Χρυσό Αιώνα του Περικλή. Από την θέση αυτή έχει εξορυχτεί το μάρμαρο για την κατασκευή του ναού του Παρθενώνα της Ακρόπολης των Αθηνών (5^{ος} αιώνας π.Χ.). Στην δεξιά είσοδο του σπηλαίου βρίσκεται το εκκλησάκι του Αγίου Σπυρίδωνα που χρονολογείται στον 10^ο μ.Χ.



Σχήμα 7.1: Δορυφορική άποψη της ευρύτερης περιοχής της Σπηλιάς Νταβέλη (πηγή: google maps)

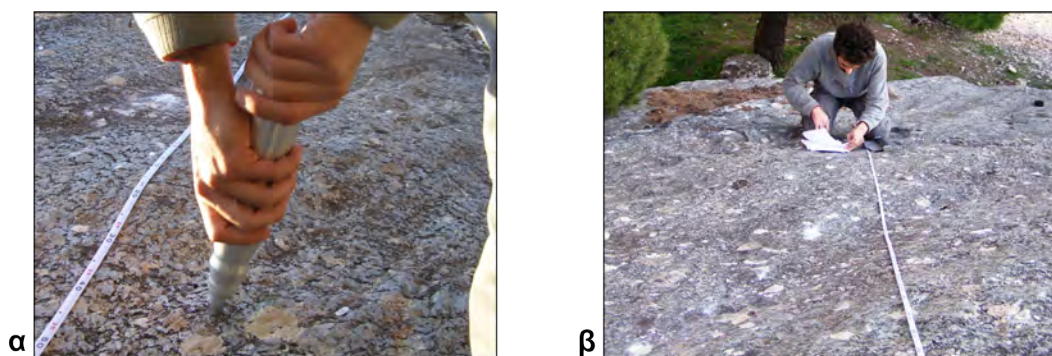
7.1.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Οι δοκιμές εκτελέστηκαν σε όγκο μαρμάρου που έχει αποκολληθεί από την φυσική του θέση (Σχήμα 7.2). Η άνω παρειά του, που αποτέλεσε την επιφάνεια πρόσκρουσης, είναι σχετικά ομαλή με μέση κλίση $\theta = 30^\circ$ και μήκος περίπου 6m. Το μέγιστο ύψος του τεμάχου είναι περίπου 4m, σχηματίζοντας όγκο μεγαλύτερο από 40m³, καθιστώντας την βάση πρόσκρουσης ακλόνητη.



Σχήμα 7.2: Άποψη του βραχώδους όγκου που αποτέλεσε την επιφάνεια πρόσκρουσης: (α) από κατάντη και (β) πλησίον της θέσης που γίνονταν οι ρίψεις

Κατά μήκος της διεύθυνσης κίνησης των τεμαχών, μετρήθηκαν ανά ένα μέτρο μήκους (Σχήμα 7.3), η σκληρότητα κατά την σφύρα Schmidt, η τραχύτητα με προφίλομετρο 30cm και η κλίση της επιφάνειας με ηλεκτρονικό κλισίμετρο. Τα στοιχεία αυτά παρουσιάζονται στον πίνακα 7.1.

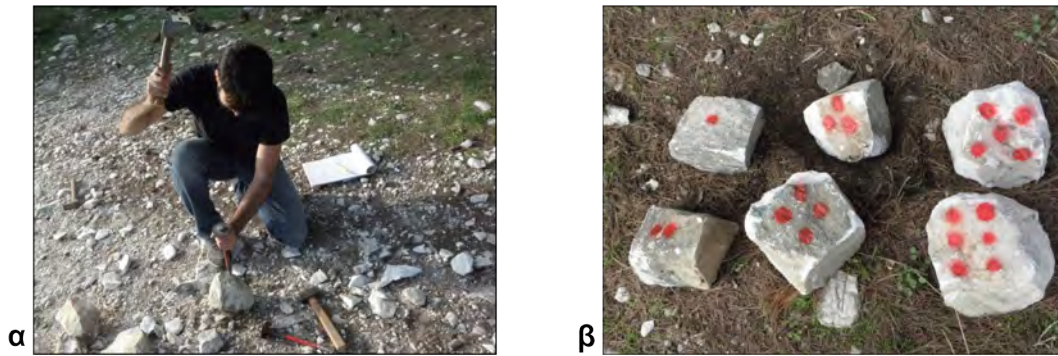


Σχήμα 7.3: Προσδιορισμός χαρακτηριστικών της επιφάνειας πρόσκρουσης:(α) σκληρότητα και (β) τραχύτητα

Πίνακας 7.1: Στοιχεία επιφάνειας πρόσκρουσης

Θέση μέτρησης [m]	Κλίση θ [$^{\circ}$]	Τραχύτητα JRC[-]	Σκληρότητα R[-]
0.5	30.9	6	34
1.5	29.3	9	32
2.5	31.7	11	30
3.5	31.5	10	37
4.5	29.3	12	31
5.5	26.8	9	31
Μέση τιμή	29.9	9.5	32.5

Τα τεμάχια συλλέχτηκαν από την περιοχή έχοντας ως κριτήριο το βάρος τους να μην υπερβαίνει τα 10kg, ώστε να μπορούν να μεταφερθούν και να απελευθερωθούν με το χέρι ασφαλώς. Το σχήμα των τεμαχών επιλέχτηκε ώστε να προσεγγίζει τα δοκίμια κυβικού σχήματος με λειασμένες ακμές που χρησιμοποιήθηκαν στις εργαστηριακές δοκιμές, που εκτελέστηκαν για την διερεύνηση της επίδρασης των φυσικών και μηχανικών παραμέτρων του πετρώματος στην αναπήδηση (Ενότητα 5.1). Επιπρόσθετα, διαμορφώθηκαν περαιτέρω ώστε να εξομαλυνθούν τυχόν γωνίες (Σχήμα 7.4) και να είναι δυνατή η σύγκριση με τις αντίστοιχες δοκιμές που έγιναν στο εργαστήριο. Οι διαστάσεις και τα βάρη των τεμαχών συνοψίζονται στον πίνακα 7.2.



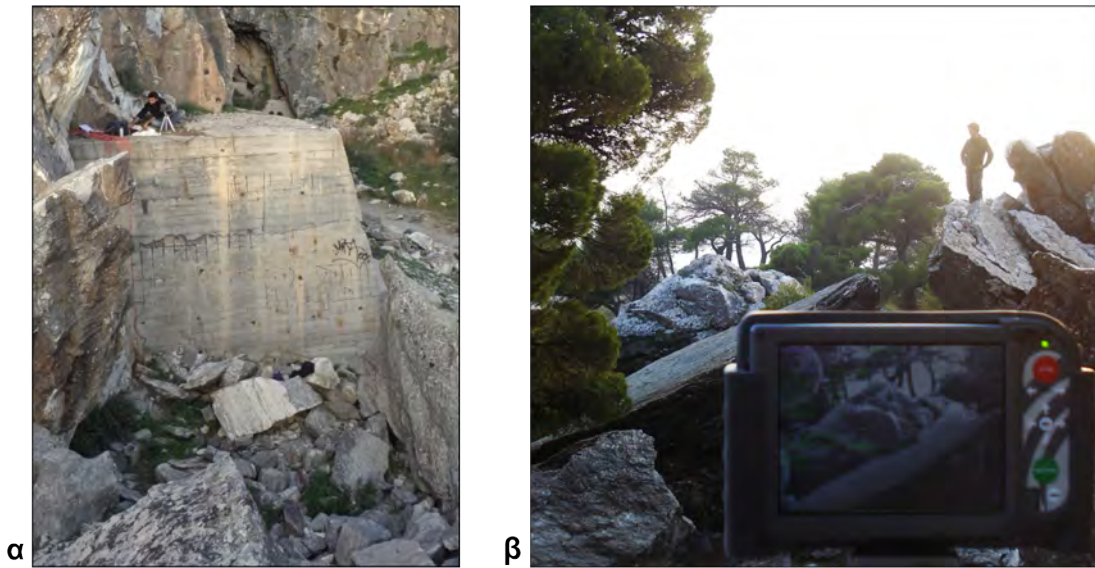
Σχήμα 7.4: Διαμόρφωση τεμαχών στις δοκιμές πεδίου: (α) διαδικασία και (β) τελική μορφή με σήμανση

Πίνακας 7.2: Διαστάσεις και μάζα τεμαχών

α/α	Μέσες διαστάσεις [cm]	Μάζα m[kg]
1	16 × 11 × 13	4.9
2	14 × 11 × 12	4.7
3	12 × 13 × 14	4.2
4	14 × 14 × 16	7.9
5	16 × 15 × 12	5.1
6	15 × 15 × 14	8.7

Η καταγραφή των δοκιμών έγινε στις δυο διαστάσεις με ταχύτητα λήψης 250fps, σε εικόνες φωτεινότητας γκρίζων τόνων ανάλυσης 640 × 480 εικονοστοιχείων. Η φωτομηχανή εγκαταστάθηκε σε απόσταση περίπου 15m από το πρανές, στην οροφή παρακείμενου βοηθητικού οικίσκου (Σχήμα 7.5-α). Ο προσανατολισμός της φωτομηχανής ήταν κάθετος προς το πρανές, ώστε το επίπεδο απεικόνισης να είναι παράλληλο με το κατακόρυφο επίπεδο που εμπειρεύει την κίνηση (Σχήμα 7.5-β). Για την αναγωγή της κλίμακας από μονάδες εικονοστοιχείων σε μονάδες μήκους, εγκαταστάθηκε μπροστά από το πρανές τοπογραφική σταδία ύψους 4m.

Στο σχήμα 7.6 είναι διακριτό τμήμα της τοπογραφικής σταδίας, επί της οποίας μήκος 50cm απεικονίζεται στην καταγραφή μέσω περίπου 120 εικονοστοιχείων. Έτσι, προκύπτει ότι το μέγεθος της πλευράς κάθε εικονοστοιχείου αντιστοιχεί σε περίπου 0.4cm, που αποτελεί την διακριτική ικανότητα προσδιορισμού του κέντρου βάρους του τεμάχους. Η προσφερόμενη ακρίβεια είναι ικανοποιητική δεδομένου ότι η τροχιά προσαρμόζεται στα διαδοχικά σημεία του κέντρου βάρους του τεμάχους (Σχήμα 7.6), βάσει των εξισώσεων της παραβολικής κίνησης.



Σχήμα 7.5: Θέση εγκατάστασης της φωτομηχανής: (α) όπως φαίνεται από το σημείο απελευθέρωσης των τεμαχών και (β) αντίστροφα

Η ανάλυση της τροχιάς έγινε στο επίπεδο της καταγραφής της φωτομηχανής (σε δύο διαστάσεις), το οποίο ήταν εγκατεστημένο ώστε να είναι, κατά προσέγγιση, παράλληλο με το κατακόρυφο επίπεδο που εμπεριέχει την κίνηση. Συνεπώς, οι μετρήσεις επηρεάζονται από την εκτροπή του τεμαχίου από το κατακόρυφο επίπεδο κίνησης εξαιτίας της κρούσης.



Σχήμα 7.6: Διαγραφόμενη τροχιά σε δοκιμή που συμβαίνουν δύο κρούσεις του τεμαχίου στο πρανές

7.1.2 Περιγραφή δοκιμών σπηλιάς Νταβέλη

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η απελευθέρωση των τεμαχών έγινε με το χέρι, συνεπώς ο έλεγχος της ταχύτητας και της γωνίας πρόσκρουσης τους ήταν περιορισμένος. Επιπρόσθετα, το πλήθος των επαναλήψεων που πραγματοποιήθηκε ήταν μικρό, καθώς η μεταφορά των τεμαχών στην θέση ρίψης ήταν χρονοβόρα και δυσχερής.

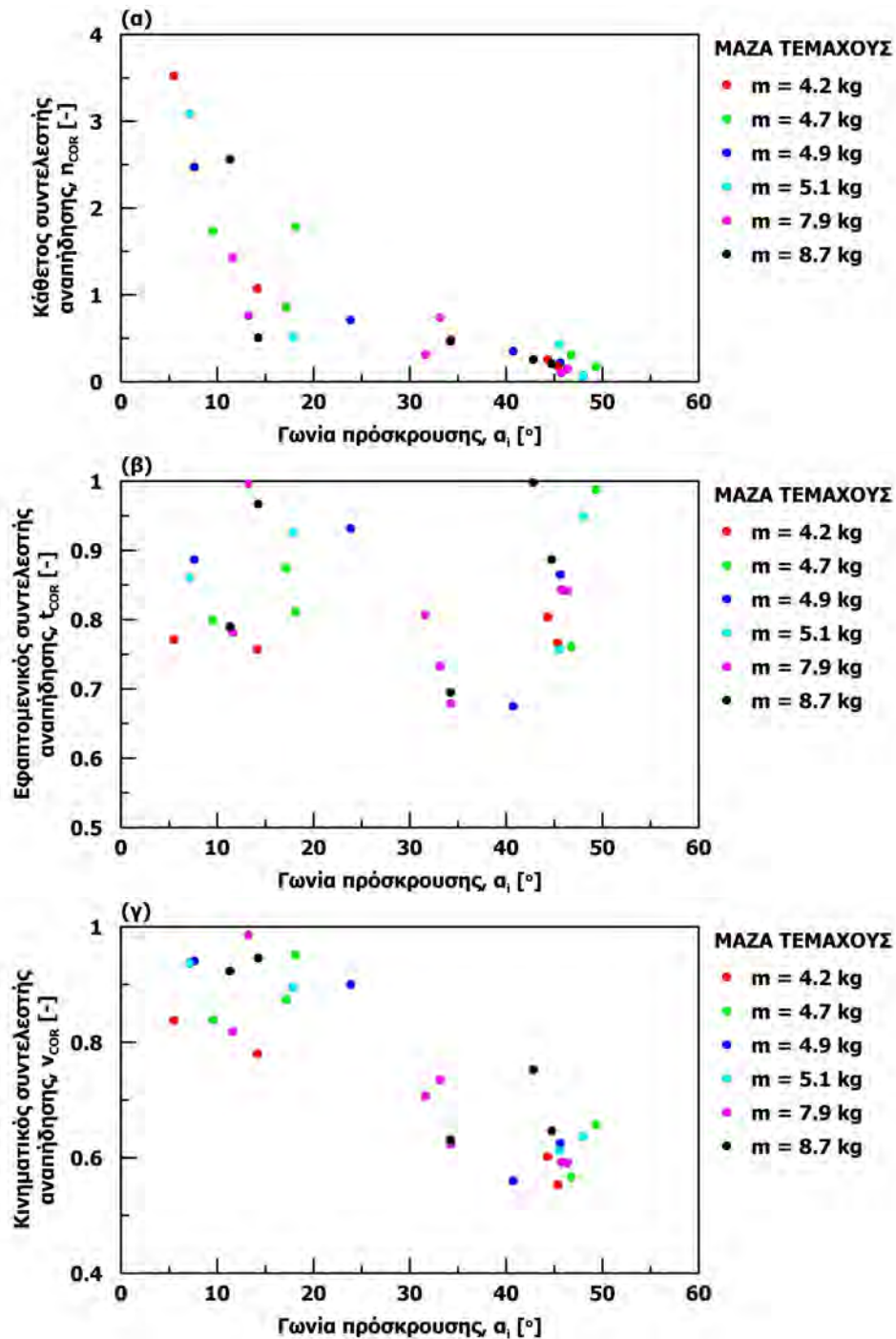
Στις περισσότερες δοκιμές έγιναν δύο ή και περισσότερες κρούσεις του τεμάχους στο πράγες (Σχήμα 7.6). Μετά την πρώτη κρούση, η γωνία και η ταχύτητα πρόσκρουσης στις επόμενες κρούσεις εξαρτώνται από την απόκριση του τεμάχους στην πρώτη κρούση, συνεπώς αποκτήθηκαν δεδομένα για διαφοροποιημένες συνθήκες. Έτσι, καλύφθηκε ένα εύρος από 4.9 έως 8.6ms^{-1} για το μέτρο της ταχύτητας πρόσκρουσης και από 5° έως 50° για την γωνία πρόσκρουσης. Συνολικά, αξιολογήθηκαν 16 ρίψεις με 29 κρούσεις, για τις οποίες προσδιορίστηκαν τα χαρακτηριστικά της κίνησης (ταχύτητα, γωνία) καθώς και οι συντελεστές αναπήδησης, με τις μεθόδους που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 5. Τα στοιχεία των δοκιμών παρατίθενται στο παράρτημα 34.

7.1.3 Παρουσίαση και αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Γενικώς, οι τάσεις που παρατηρούνται είναι ανάλογες με αυτές από την αντίστοιχη εργαστηριακή διερεύνηση με τα κυβικά τεμάχια με λειασμένες ακμές (Ενότητα 5.1.2). Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης αυξάνεται με την μείωση της γωνίας πρόσκρουσης (Σχήμα 7.7-α) και δύναται οι τιμές που λαμβάνει να υπερβαίνουν την μονάδα όταν η γωνία πρόσκρουσης είναι μικρή. Αντιθέτως, ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης (Σχήμα 7.7-β) δεν επηρεάζεται από την γωνία πρόσκρουσης και λαμβάνει τιμές στο εύρος 0.7 έως 1.0. Τέλος, ο κινηματικός συντελεστής αναπήδησης έχει αντίστοιχη συμπεριφορά με τον κάθετο (Σχήμα 7.7-γ), όμως παρουσιάζει μικρότερη διακύμανση και σε κάθε περίπτωση οι τιμές που λαμβάνει είναι μικρότερες της μονάδας.

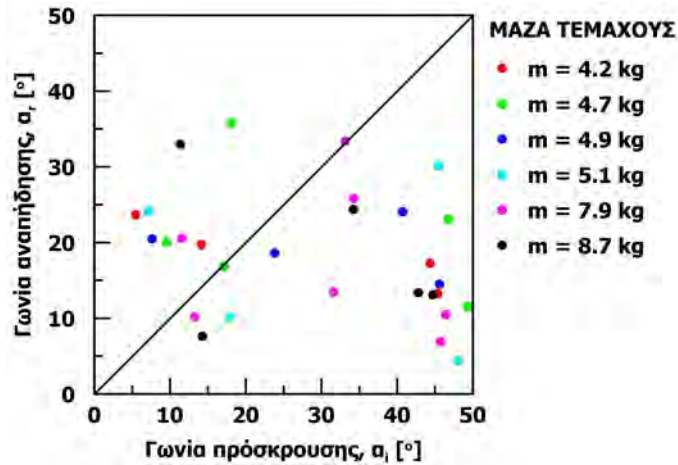
Στα διαγράμματα αυτά, τα δεδομένα είναι ομαδοποιημένα σύμφωνα με την μάζα των τεμαχών, ώστε να καταστεί εμφανής η αμελητέα επίδραση που έχει στους συντελεστές αναπήδησης. Σε παραπλήσιες γωνίες πρόσκρουσης, οι τιμές των συντελεστών δεν εμφανίζουν κάποια συστηματική μεταβολή με την μάζα. Η αναμενόμενη συμπεριφορά θα ήταν να υπάρχει μείωση των συντελεστών αναπήδησης με την αύξηση μάζας, όπως προέκυψε στην ενότητα 5.2, όπου διερευνήθηκε η επίδραση της μάζας του τεμάχους και της ταχύτητας πρόσκρουσης.

Συνεπώς, συμπεραίνεται ότι η επίδραση της γεωμετρίας επαφής είναι σαφώς ισχυρότερη από αυτήν της μάζας και της ταχύτητας πρόσκρουσης. Στις εν λόγω δοκιμές, η διακύμανση των συντελεστών αναπήδησης είναι σημαντικά αυξημένη συγκριτικά με τις αντίστοιχες εργαστηριακές δοκιμές (ενότητα 5.1.2), γεγονός που αποδίδεται στην διαφοροποίηση της γεωμετρίας επαφής, αφενός από την μη κανονικότητα του σχήματος και αφετέρου από την τραχύτητα της επιφάνειας πρόσκρουσης.



Σχήμα 7.7: Συντελεστές αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης: (α) κάθετος, (β) εφαπτομενικός και (γ) κινηματικός

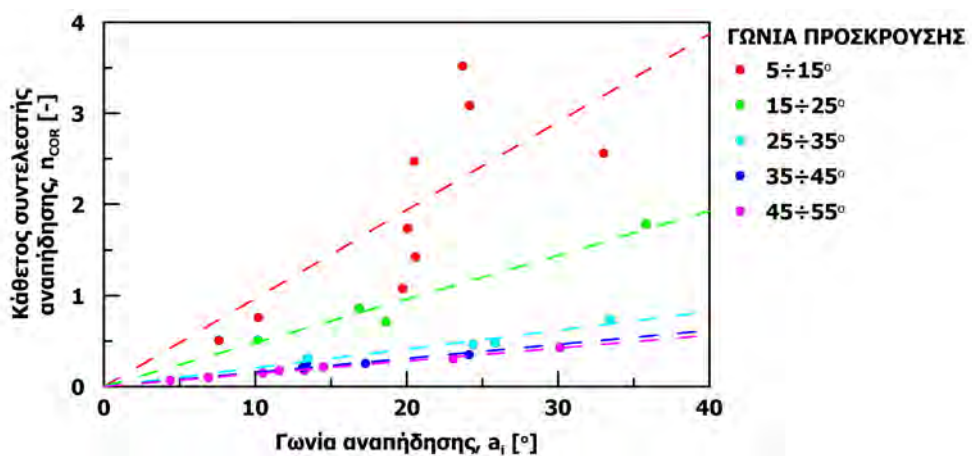
Η σχέση μεταξύ της γωνίας πρόσκρουσης και αναπήδησης αποτυπώνεται στο σχήμα 7.8. Παρατηρείται ότι η γωνία αναπήδησης μπορεί να είναι μεγαλύτερη της γωνίας πρόσκρουσης, ειδικά όταν η τελευταία είναι μικρότερη των 20° . Στις περιπτώσεις αυτές, ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης δύναται, υπό προϋποθέσεις, να λάβει τιμή μεγαλύτερη της μονάδας.



Σχήμα 7.8: Σχέση γωνιών πρόσκρουσης και αναπήδησης

Εξετάζοντας την σχέση των γωνιών πρόσκρουσης και αναπήδησης βάσει της μάζας των τεμαχών δεν προκύπτει μεταξύ τους κάποια σύνδεση. Επίσης, εμμέσως φαίνεται η επίδραση της γεωμετρίας επαφής μέσω της αυξημένης διασποράς των γωνιών. Στην αντίστοιχη εργαστηριακή διερεύνηση, οι γωνίες συνδέονται με μια γραμμική σχέση που διέρχεται από την αρχή των αξόνων (σχήμα 5.16 – ενότητα 5.1.2.1), αντιθέτως στην περίπτωση αυτή δεν προκύπτει κάτι ανάλογο.

Στο σχήμα 7.9 παρουσιάζεται η σχέση του καθέτου συντελεστή με την γωνία αναπήδησης, με τα σημεία ομαδοποιημένα σε κλάσεις των 10° βάσει της γωνίας πρόσκρουσης. Για κάθε κλάση, ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης συνδέεται με την γωνία αναπήδησης μέσω ευθείας που διέρχεται από την αρχή των αξόνων. Επιπρόσθετα, η κλίση της βέλτιστης ευθείας κάθε κλάσης μειώνεται με την αύξηση της γωνίας πρόσκρουσης. Έτσι, προκύπτει ότι τιμές μεγαλύτερες της μονάδας δύναται να συναντηθούν μόνο όταν η γωνία πρόσκρουσης είναι μικρή. Η σχέση αυτή έχει παρατηρηθεί στο σύνολο των διερευνήσεων που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο με παραβολική ρίψη των τεμαχών.



Σχήμα 7.9: Σχέση καθέτου συντελεστή αναπήδησης με τις γωνίες πρόσκρουσης και αναπήδησης

7.2 Επιτόπου δοκιμές στο Θέατρο Βράχων - Βύρωνα

Η δεύτερη σειρά επιτόπου δοκιμών πραγματοποιήθηκε στο θέατρο Βράχων «Μελίνα Μερκούρη» που βρίσκεται στον Βύρωνα. Η θέση οφείλει την σημερινή της μορφολογία στην πρότερη λειτουργία ανοιχτού λατομείου μαρμάρου (Σχήμα 7.10) και φιλοξενεί το ομώνυμο θέατρο καθώς επίσης αθλητικές και βοηθητικές εγκαταστάσεις του δήμου. Η περιοχή βρίσκεται στους πρόποδες του Υμηττού και δομείται επιφανειακά από ασβεστόλιθο.



Σχήμα 7.10: Δορυφορική άποψη της ευρύτερης περιοχής του Θεάτρου Βράχων (πηγή: google maps)

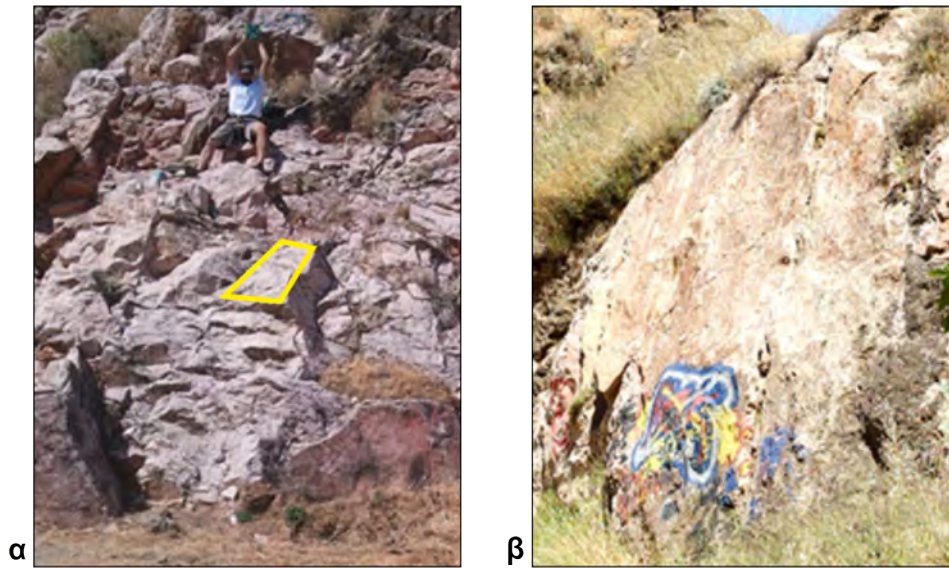
7.2.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Η διερεύνηση έγινε σε μια βραχώδη έξαρση στο νότιο άκρο της περιοχής (Σχήμα 7.11). Η πρόσβαση στην θέση είναι εύκολη με αυτοκινούμενο μέσο, καθιστώντας ευχερή την μεταφορά και εγκατάσταση του εξοπλισμού, αλλά συγχρόνως είναι αρκούντως απομονωμένη, ώστε οι συνθήκες ασφαλείας να είναι επαρκείς.



Σχήμα 7.11: Θέση εκτέλεσης των δοκιμών (πηγή: google maps)

Οι δοκιμές εκτελέστηκαν σε δύο παρειές της βραχώδους έξαρσης με διαφορετική κλίση και ύψος 4m. Στη πρώτη παρειά, η μέση κλίση είναι περίπου $\theta = 55^\circ$ και στη δεύτερη περίπου 75° (Σχήμα 7.12). Η πρόσβαση στην θέση ρίψης των τεμαχών έγινε με ειδικές τεχνικές εργασίας σε ύψος και η ανέλκυση των τεμαχών σε αυτήν πραγματοποιήθηκε με κατάλληλο εξοπλισμό.



Σχήμα 7.12: Άποψη των πρανών που χρησιμοποιήθηκαν ως επιφάνειες πρόσκρουσης, με κλίση: (α) $\vartheta = 55^\circ$ και (β) $\vartheta = 75^\circ$

Έγινε αποτύπωση της επιφάνειας των πρανών χρησιμοποιώντας τεχνικές καταρρίχησης. Στις επιφάνειες πρόσκρουσης μετρήθηκαν η σκληρότητα κατά την σφύρα Schmidt, η τραχύτητα και η κλίση τους (Πίνακας 7.3). Στο σχήμα 7.12 παρατηρείται ότι η επιφάνεια του πρανούς με κλίση $\vartheta = 55^\circ$ εμφανίζει σημαντική ανομοιομορφία συγκριτικά με το απότομο πρανές. Ωστόσο, η ρίψη των τεμαχών έγινε στοχευμένα σε συγκεκριμένη επιφάνεια με περιορισμένη τραχύτητα και σταθερή κλίση (σημαίνεται στο σχήμα 7.12-α με κίτρινη γραμμή), στην οποία έγιναν και οι μετρήσεις των χαρακτηριστικών της που παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 7.3: Στοιχεία επιφανειών πρόσκρουσης

Θέση	Κλίση $\theta [^\circ]$	Τραχύτητα JRC[-]	Σκληρότητα R[-]
1	55	7-9	44.4
2	75	8-10	44.4

Τα τεμάχια κατασκευάστηκαν με το ένεμα τσιμεντοειδούς βάσης υψηλής αντοχής με κυβικό, σφαιρικό και πολυεδρικό σχήμα (Σχήμα 7.13). Χρησιμοποιήθηκαν επίσης φυσικά τεμάχια ακανόνιστου σχήματος που συλλέχτηκαν από την περιοχή.

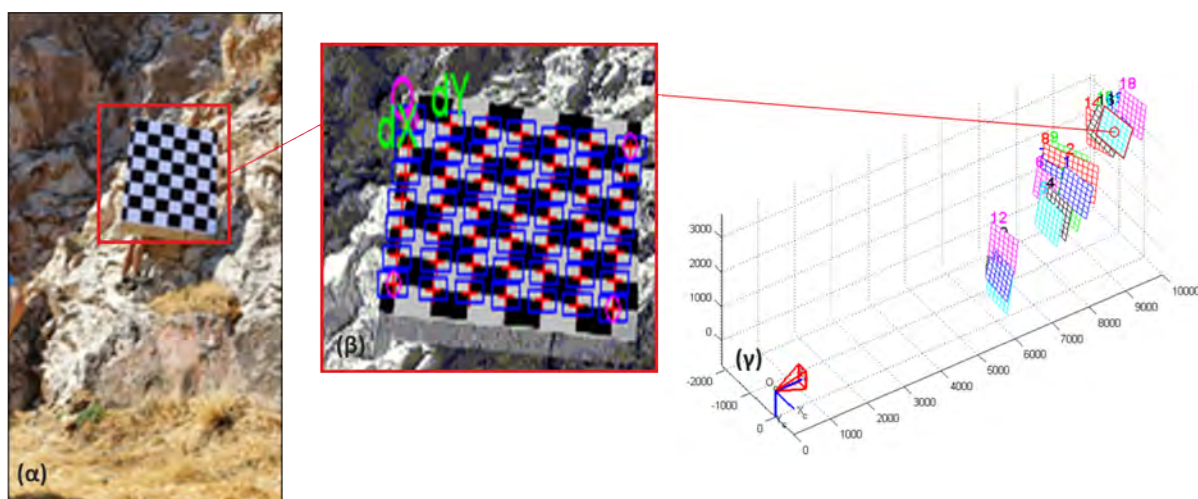
Οι διαστάσεις των τεμαχών επιλέχτηκαν ώστε να διατηρείται κάποια αναλογία με τα τεμάχια που χρησιμοποιήθηκαν στην αντίστοιχη εργαστηριακή διερεύνηση (βλ. ενότητα 6.1). Με σκοπό να είναι εφικτή η συγκριτική αξιολόγηση των δυο διερευνήσεων, αναφορικά με τους συντελεστές αναπήδησης και την εκτροπή, καθώς επίσης για τον προσδιορισμό της επίδρασης που έχει η κλίμακα διεξαγωγής των πειραμάτων. Έτσι, οι διαστάσεις των τεμαχών προέκυψαν θεωρώντας συντελεστή αναλογίας μηκών $\lambda = 5$ σε σχέση με την αντίστοιχη εργαστηριακή διερεύνηση. Έτσι, τα κυβικά δοκίμια κατασκευάστηκαν με πλευρά 15cm, τα σφαιρικά διάμετρο

15cm και τα πολυεδρικά με ύψος 17cm. Τα τυχαία δοκίμια επιλέχτηκαν επιτόπου με κριτήριο να έχουν μέση διάσταση 15cm. Περισσότερα στοιχεία για την αναγωγή της κλίμακας μεταξύ πεδίου και εργαστηρίου παρατίθενται στο κεφάλαιο 8.



Σχήμα 7.13: Δοκίμια σφαιρικού, πολυεδρικού και κυβικού σχήματος

Η καταγραφή των τροχιών έγινε με βαθμονομημένο σύστημα 2 φωτομηχανών (βλ. ενότητα 4.3.4) επιτρέποντας την ανακατασκευή της τροχιάς στον τριδιάστατο χώρο, σύμφωνα με την θέση του κέντρου βάρους του τεμαχίου σε κάθε λήψη. Η διαδικασία βαθμονόμησης, απαραίτητη για την μέτρηση στις τρεις διαστάσεις, παρουσιάζεται στο σχήμα 7.14 για το πρανές με κλίση $\vartheta = 55^\circ$. Φαίνονται τα ακόλουθα βήματα: (α) μια εικόνα του καννάβου βαθμονόμησης επί του πρανούς, (β) οι μετρήσεις που γίνονται στον κάνναβο και (γ) η θέση του στον χώρο ως προς το σύστημα αναφοράς της φωτομηχανής.



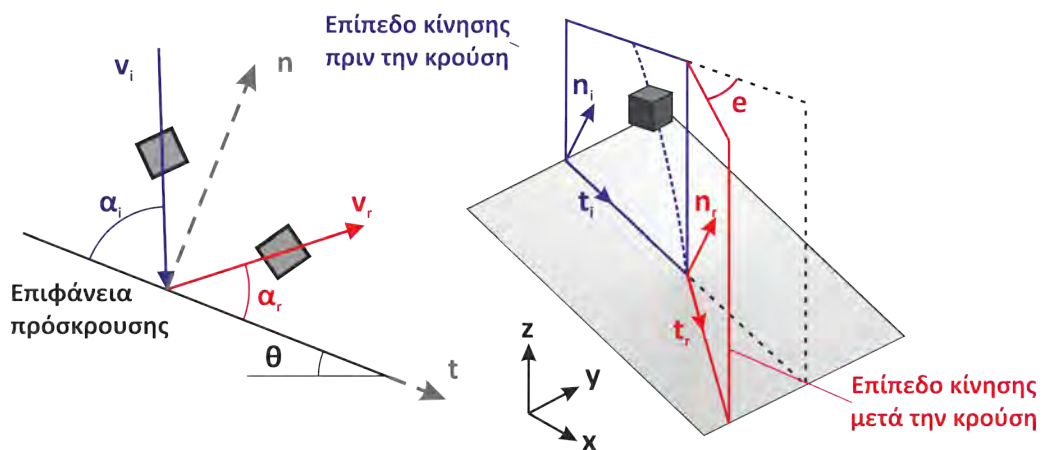
Σχήμα 7.14: Βήματα από την διαδικασία βαθμονόμησης του συστήματος φωτομηχανών στο πρανές κλίσης $\vartheta = 55^\circ$

Επισημαίνεται ότι στις δοκιμές αυτές έγινε τριδιάστατη καταγραφή του κέντρου βάρους των τεμαχίων, χωρίς να γίνει ψηφιακή ανακατασκευή του σχήματος. Συνεπώς δεν ήταν εφικτή η μέτρηση της περιστροφικής ταχύτητας.

7.2.2 Περιγραφή δοκιμών θεάτρου Βράχων

Η απελευθέρωση των δοκιμών έγινε με το χέρι από ύψος ανάλογο αυτού των αντίστοιχων εργαστηριακών δοκιμών που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 6.1. Έτσι, τηρουμένων των αναλογιών, το ύψος απελευθέρωσης ήταν $h_d = 3m$ καθώς το αντίστοιχο ύψος στο εργαστήριο ήταν $0.60m$ και ο συντελεστής αναλογίας μηκών είναι $\lambda = 5$. Σε όλες τις διερευνήσεις, τα τεμάχια αφέθηκαν κατακόρυφα προς την επιφάνεια πρόσκρουσης, με αποτέλεσμα η γωνία πρόσκρουσης να προσεγγίζει την συμπληρωματική γωνία της κλίσης του πρανούς.

Συνολικά εκτελέστηκαν 103 δοκιμές στα δυο πρανή με τέσσερα σχήματα τεμαχών, δηλαδή 8 σειρές δοκιμών. Τα χαρακτηριστικά της κίνησης από κάθε σειρά δοκιμών (μέσος όρος ταχύτητας πρόσκρουσης και αναπήδησης, καθώς και οι αντίστοιχες γωνίες - Σχήμα 7.15) παρατίθενται στους πίνακες 7.4 και 7.5. Αναλυτικότερα αποτελέσματα των δοκιμών παρατίθενται στα παραρτήματα 35 και 36.



Σχήμα 7.15: Σχηματική απεικόνιση της κίνησης του τεμαχούς και τα μετρούμενα μεγέθη των δοκιμών

Πίνακας 7.4: Δοκιμές στην θέση 1 του θεάτρου Βράχων $\vartheta = 55^\circ$

Σειρά δοκιμών	Αριθμός επαν.	Σχήμα τεμαχούς	Πρόσκρουση		Αναπήδηση	
			$v_i [ms^{-1}]$	$\alpha_i [^\circ]$	$v_r [ms^{-1}]$	$\alpha_r [^\circ]$
35.1	14	κυβικό	7.43	28.3	4.36	17.7
35.2	15	πολυεδρικό	7.48	28.2	4.64	14.7
35.3	10	σφαιρικό	7.4	28.7	4.47	22.9
35.4	11	τυχαίο	7.55	28	5.1	17.8

Πίνακας 7.5: Δοκιμές στην θέση 2 του θεάτρου Βράχων $\theta = 75^\circ$

Σειρά δοκιμών	Αριθμός επαν.	Σχήμα τεμάχους	Πρόσκρουση		Αναπήδηση	
			$v_i [ms^{-1}]$	$\alpha_i [^\circ]$	$v_r [ms^{-1}]$	$\alpha_r [^\circ]$
36.1	14	κυβικό	8.72	10.3	6.61	19.6
36.2	15	πολυεδρικό	8.4	11.1	7.13	16.2
36.3	6	σφαιρικό	8.2	11.9	6.01	27.5
36.4	12	τυχαίο	8.27	8.2	6.03	18.1

7.2.3 Παρουσίαση και σχολιασμός αποτελεσμάτων

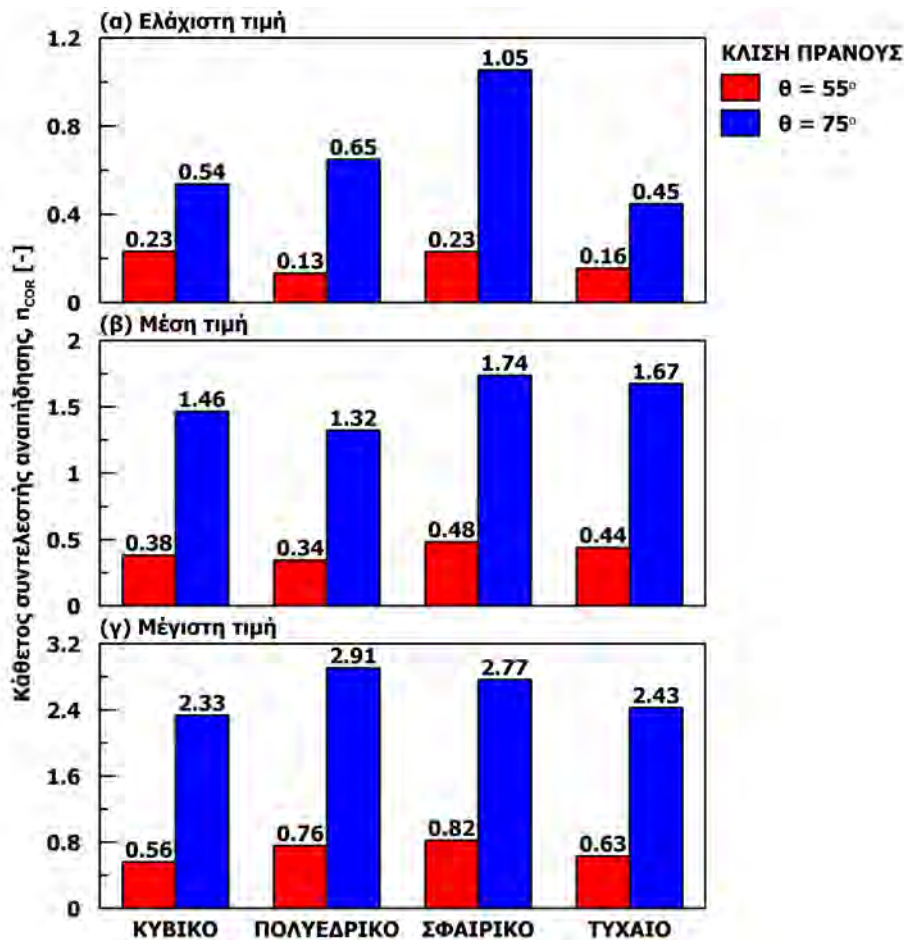
7.2.3.1 Κάθετος συντελεστής αναπήδησης

Ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης παρουσιάζει αυξημένη διασπορά ακόμη και για το ίδιο σχήμα τεμάχους που έχει απελευθερωθεί με παρόμοιες συνθήκες. Η διασπορά αυτή γίνεται εντονότερη στο απότομο πρηνές, όπου η γωνία πρόσκρουσης κυμαίνεται περί τις 10° . Στον πίνακα 7.6 και στο σχήμα 7.16 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές τιμές των συντελεστών αναπήδησης (ελάχιστη, μέγιστη, μέση και εύρος), ανάλογα με το σχήμα του τεμάχους και την κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης.

Πίνακας 7.6: Χαρακτηριστικές τιμές καθέτου συντελεστή αναπήδησης

Σειρά δοκιμών	Σχήμα τεμάχους	Κλίση $\theta [^\circ]$	Γωνία $\alpha_i [^\circ]$	Κάθετος συντελεστής αναπήδησης, $n_{COR} [-]$			
				ελάχιστη	μέση	μέγιστη	εύρος
35.1	κυβικό	56.2	28.3	0.23	0.38	0.56	0.33
36.1		76.3	10.3	0.54	1.46	2.33	1.80
35.2	πολυεδρικό	56.2	28.2	0.13	0.35	0.76	0.63
36.2		76.3	11.1	0.65	1.32	2.91	2.26
35.3	σφαιρικό	56.2	28.7	0.23	0.48	0.82	0.59
36.3		76.3	11.9	1.05	1.74	2.77	1.71
35.4	τυχαίο	56.2	28	0.16	0.44	0.63	0.48
36.4		76.3	8.2	0.45	1.67	2.43	1.98

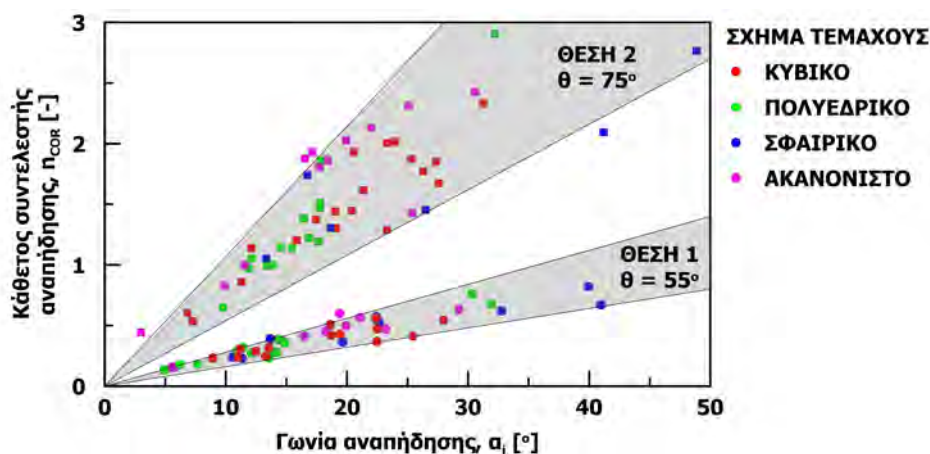
Οι χαρακτηριστικές τιμές του καθέτου συντελεστή αναπήδησης είναι σημαντικά μεγαλύτερες στις δοκιμές στο απότομο πρηνές. Τούτο έχει παρατηρηθεί σε όλες τις διερευνήσεις που έχουν παρουσιαστεί μέχρι στιγμής. Επιπρόσθετα όμως, προκύπτει ότι η συμπεριφορά αυτή ισχύει ανεξαρτήτως του σχήματος του τεμάχους. Επίσης, επαληθεύεται ότι ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης μπορεί να λάβει τιμές μεγαλύτερες της μονάδας, όταν η κρούση γίνεται υπό μικρή γωνία πρόσκρουσης.



Σχήμα 7.16: Χαρακτηριστικές τιμές καθέτου συντελεστή αναπήδησης: (α) ελάχιστη, (β) μέση και (γ) μέγιστη

Η σχέση του καθέτου συντελεστή με την γωνία αναπήδησης αναπαρίσταται στο σχήμα 7.17). Τα ζεύγη τιμών ορίζουν δυο τριγωνικές περιοχές με κορυφή στην αρχή των αξόνων, οι οποίες διαφοροποιούνται αναλόγως της κλίσης που έχει η επιφάνεια πρόσκρουσης. Στις αντίστοιχες δοκιμές που έγιναν στο εργαστήριο, η τάση αυτή περιγράφεται από μια ευθεία που διέρχεται από την αρχή των αξόνων. Η διαφοροποίηση εδώ αποδίδεται στην μεταβλητότητα των χαρακτηριστικών πρόσκρουσης εξαιτίας της τραχύτητας της επιφάνειας πρόσκρουσης.

Στο απότομο πρανές, η γωνία αναπήδησης μπορεί να είναι σημαντικά μεγαλύτερη της γωνίας πρόσκρουσης, οδηγώντας σε τιμές καθέτου συντελεστή αναπήδησης πάνω από την μονάδα. Αντιθέτως, στην πλειοψηφία των δοκιμών που εκτελέστηκαν στο πρανές με κλίση $\theta = 55^\circ$, η γωνία αναπήδησης είναι μικρότερη της γωνίας πρόσκρουσης. Σε όλες τις δοκιμές, το κάτω όριο της γωνίας αναπήδησης προσεγγίζει το μηδέν, περιγράφοντας έτσι την μετατροπή της κίνησης του τεμάχους σε κύλιση ή ολίσθηση.



Σχήμα 7.17: Σχέση καθέτου συντελεστή αναπήδησης με την γωνία αναπήδησης

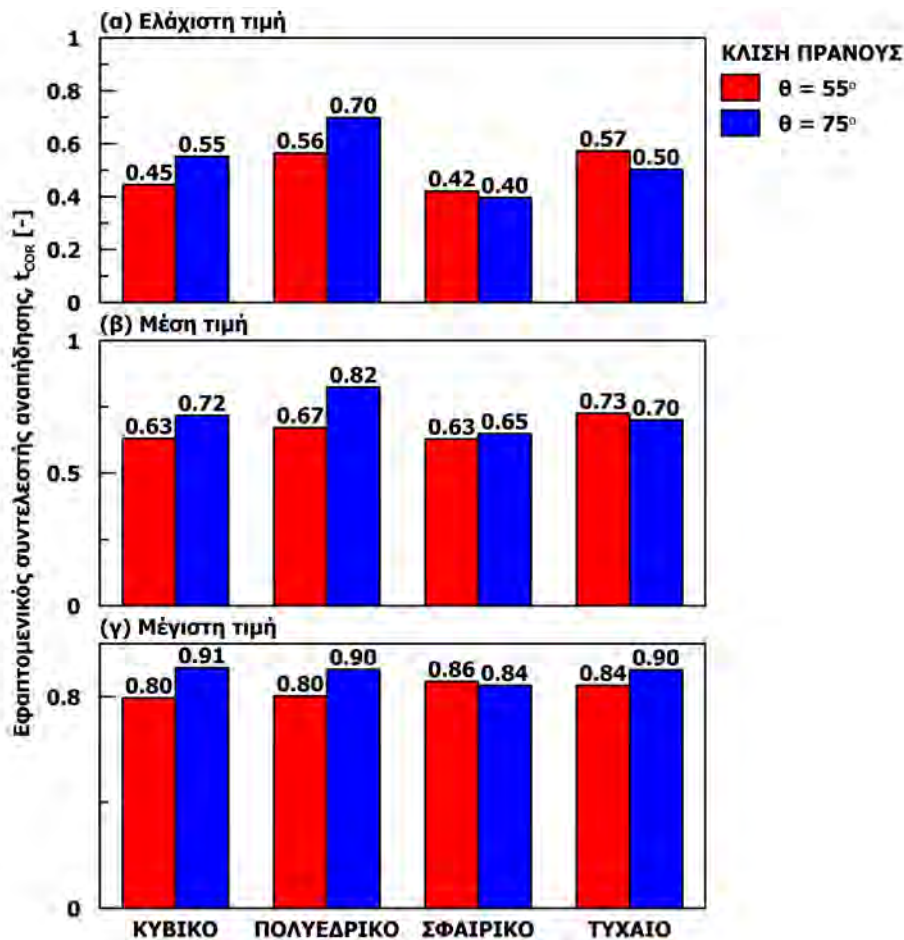
Η γωνία αναπήδησης είναι συστηματικά μεγαλύτερη στα σφαιρικά τεμάχια από αυτήν στα κυβικά. Έτσι, δεδομένης της σχέσης που υπάρχει μεταξύ του καθέτου συντελεστή και της γωνίας αναπήδησης, προκύπτει ότι το κυβικό σχήμα λαμβάνει μικρότερες τιμές του καθέτου συντελεστή αναπήδησης από το σφαιρικό, ανεξαρτήτως της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης. Τα τεμάχια τυχαίου σχήματος λαμβάνουν αντίστοιχες τιμές με αυτές των κυβικών δοκιμίων και συγχρόνως έχουν παρόμοιες τιμές γωνίας αναπήδησης. Έτσι, δύναται να θεωρηθεί ότι το κυβικό σχήμα δοκιμίου είναι ικανοποιητικό για την προσομοίωση των τεμαχίων τυχαίου σχήματος που συναντώνται στις καταπτώσεις βράχων.

7.2.3.2 Εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης

Οι χαρακτηριστικές τιμές του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης παρατίθενται στον πίνακα 7.7 και αναπαρίστανται με την βοήθεια του σχήματος 7.18 για καλύτερη εποπτεία.

Πίνακας 7.7: Χαρακτηριστικές τιμές εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης

Σειρά δοκιμών	Σχήμα τεμάχους	Κλίση $\theta [^\circ]$	Γωνία $\alpha_i [^\circ]$	Εφαπτομενικός συντ. αναπήδησης, $t_{COR} [-]$			
				ελάχιστη	μέση	μεγίστη	εύρος
35.1	κυβικό	56.2	28.3	0.45	0.63	0.80	0.35
36.1		76.3	10.3	0.55	0.72	0.91	0.36
35.2	πολυεδρικό	56.2	28.2	0.57	0.67	0.80	0.24
36.2		76.3	11.1	0.70	0.82	0.90	0.20
35.3	σφαιρικό	56.2	28.7	0.42	0.63	0.86	0.44
36.3		76.3	11.9	0.40	0.65	0.84	0.45
35.4	τυχαίο	56.2	28	0.57	0.73	0.84	0.27
36.4		76.3	8.2	0.50	0.70	0.90	0.40



Σχήμα 7.18: Χαρακτηριστικές τιμές εφαλτομενικού συντελεστή αναπήδησης: (α) ελάχιστη, (β) μέση και (γ) μέγιστη

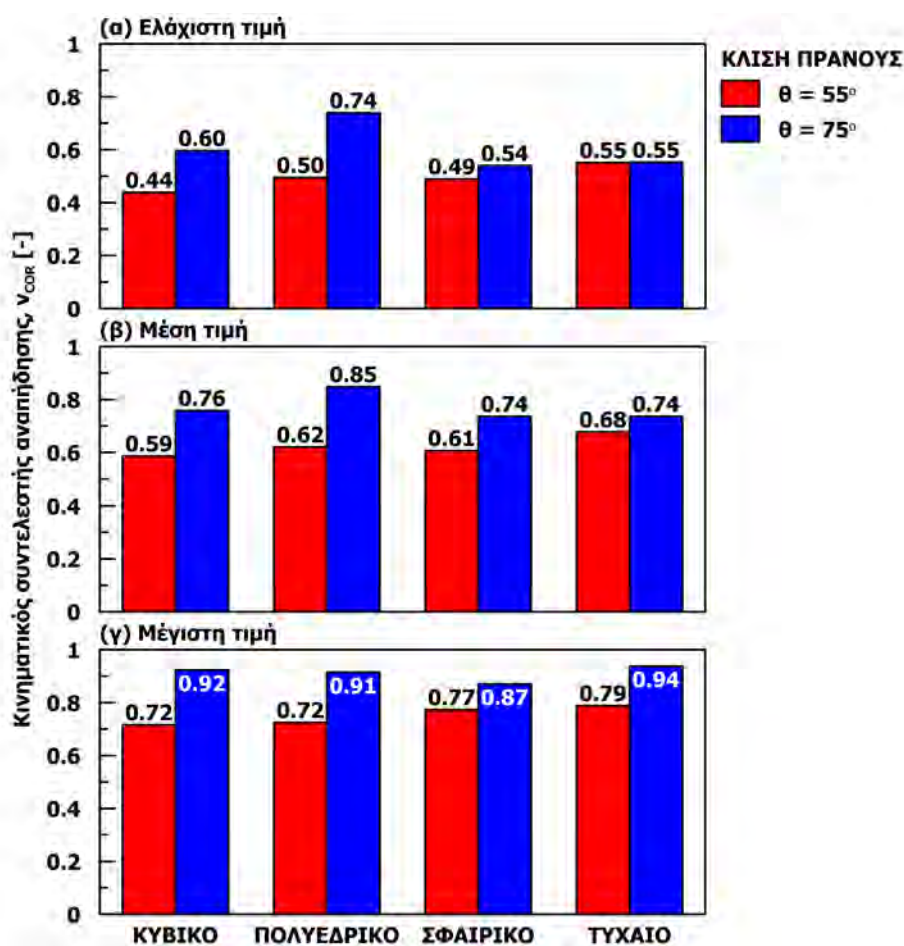
Από τα παραπάνω αποτελέσματα, προκύπτει ότι ο εφαλτομενικός συντελεστής αναπήδησης δεν εξαρτάται από την κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης, καθώς οι χαρακτηριστικές τιμές που περιγράφουν κάθε θέση συγκλίνουν (σύγκριση κόκκινης και μπλε ράβδου σε κάθε θέση). Επίσης, ούτε το σχήμα του τεμάχους επηρεάζει τις χαρακτηριστικές τιμές, αφού η διαφοροποίηση με το σχήμα τους φαίνεται να είναι περιορισμένη χωρίς να παρουσιάζει κάποια συστηματική τάση.

7.2.3.3 Κινηματικός συντελεστής αναπήδησης

Στον πίνακα 7.8 παρατίθενται οι χαρακτηριστικές τιμές του κινηματικού συντελεστή αναπήδησης και αναπαρίστανται στο σχήμα 7.19. Γενικώς, είναι υψηλότερες στο απότομο πρανές και σε αυτή την περίπτωση και δεν διαφοροποιούνται με το σχήμα του τεμάχους. Συνεπώς, με την χρήση του κινηματικού συντελεστή αναπήδησης αμβλύνεται η επίδραση του σχήματος.

Πίνακας 7.8: Χαρακτηριστικές τιμές κινηματικού συντελεστή αναπήδησης

Σειρά δοκιμών	Σχήμα τεμάχους	Κλίση θ [°]	Γωνία α_i [°]	Κινηματικός συντ. αναπήδησης, v_{COR} [-]			
				ελάχιστη	μέση	μεγίστη	εύρος
35.1	κυβικό	56.2	28.3	0.44	0.59	0.72	0.28
36.1		76.3	10.3	0.60	0.76	0.92	0.33
35.2	πολυεδρικό	56.2	28.2	0.50	0.62	0.73	0.23
36.2		76.3	11.1	0.74	0.85	0.92	0.18
35.3	σφαιρικό	56.2	28.7	0.49	0.61	0.77	0.28
36.3		76.3	11.9	0.54	0.74	0.87	0.33
35.4	τυχαίο	56.2	28	0.55	0.68	0.79	0.24
36.4		76.3	8.2	0.55	0.74	0.94	0.39



Σχήμα 7.19: Χαρακτηριστικές τιμές κινηματικού συντελεστή αναπήδησης (α) ελάχιστη, (β) μέση και (γ) μεγίστη

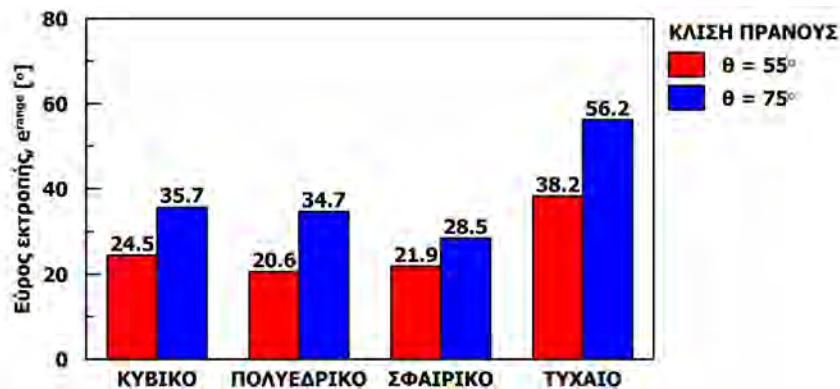
Ο κινηματικός συντελεστής αναπήδησης είναι μικρότερος της μονάδας σε κάθε περίπτωση. Άλλωστε, με τον ορισμό αυτό, τιμή μεγαλύτερη της μονάδας θα σήμαινε ότι στο σύστημα προστίθεται ενέργεια μετά την κρούση. Έτσι, δεδομένου του πεδίου ορισμού (0 έως 1), το εύρος τιμών είναι περιορισμένο συγκριτικά με τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης.

7.2.3.4 Εκτροπή

Σε αντιστοιχία με τις εργαστηριακές δοκιμές (Ενότητα 6.1.2.4), η εκτροπή προσδιορίζεται από την γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του κατακόρυφου επιπέδου που ανήκει η τροχιά μετά την κρούση και την φορά μεγίστης κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης (Σχήμα 7.15). Οι χαρακτηριστικές τιμές της εκτροπής παρατίθενται στον πίνακα 7.9. Παρατηρείται ότι μεταξύ των κανονικών σχημάτων, το κυβικό τέμαχος εμφανίζει το μεγαλύτερο εύρος εκτροπής και το σφαιρικό το μικρότερο, σχέση που ισχύει ανεξαρτήτως της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης (Σχήμα 7.20). Η εκτροπή των φυσικών τεμαχών είναι μεγαλύτερη κατά περίπου 1.5 φορές από αυτή των κυβικών δοκιμών.

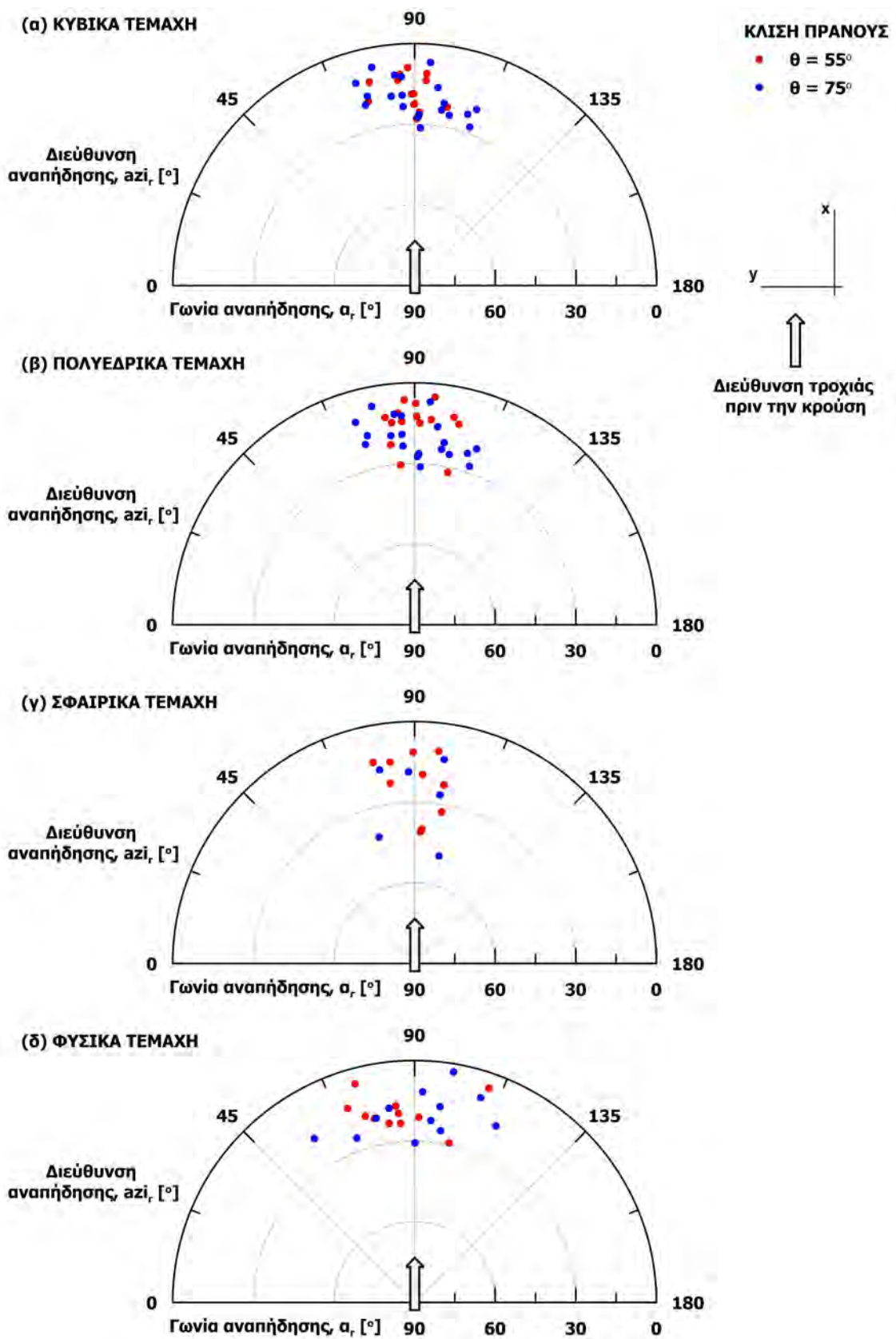
Πίνακας 7.9: Χαρακτηριστικές τιμές εκτροπής

Σειρά δοκιμών	Σχήμα τεμάχους	Κλίση θ [°]	Γωνία α_i [°]	Εκτροπή, e [°]		
				ελάχιστη	μεγίστη	εύρος
35.1	κυβικό	56.2	28.3	-14.2	10.3	24.5
36.1		76.3	10.3	-16.3	19.4	35.7
35.2	πολυεδρικό	56.2	28.2	-8.1	12.5	20.6
36.2		76.3	11.1	-16.8	18.0	34.7
35.3	σφαιρικό	56.2	28.7	-11.7	10.2	21.9
36.3		76.3	11.9	-15.7	12.8	28.5
35.4	τυχαίο	56.2	28	-19.1	19.2	38.2
36.4		76.3	8.2	-31.4	24.7	56.2



Σχήμα 7.20: Εύρος εκτροπής βάσει του σχήματος του δοκιμίου και της κλίσης του πρανούς

Στο σχήμα 7.21 παρουσιάζονται σε διαγράμματα πολικών συντεταγμένων η διεύθυνση της τροχιάς μετά την κρούση και η γωνία αναπήδησης για κάθε σχήμα τεμάχους, ομαδοποιημένα με την κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης.



Σχήμα 7.21: Διεύθυνση τροχιάς και γωνία αναπήδησης σύμφωνα με την κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης για: (α) κυβικά, (β) πολυεδρικά (γ) σφαιρικά και (δ) φυσικά τεμάχια

7.3 Επιτόπου δοκιμές στο Πεντελικό Όρος

Οι δοκιμές στο Πεντελικό όρος πραγματοποιηθήκαν σε θέση (Σχήμα 7.22) παραπλεύρως της οδού που συνδέει τον Δήμο της Παλαιάς Πεντέλης με το Ιερό Μετόχι του Αγίου Παντελεήμονα Κοκκιναρά, το οποίο βρίσκεται λίγο πριν την κορυφή του βουνού. Η ευρύτερη περιοχή έχει υποστεί στο παρελθόν έντονη λατομική εκμετάλλευση, νόμιμη και μη, με αποτέλεσμα να υπάρχει πλήθος διασκορπισμένων όγκων μάρμαρου καλής ποιότητας.



Σχήμα 7.22: Δορυφορική άποψη της περιοχής εκτέλεση των δοκιμών στο Πεντελικό όρος (πηγή: *google maps*)

Η διερεύνηση αυτή αποτελεί μια μεγέθυνση των αντίστοιχων δοκιμών που εκτελέστηκαν στο εργαστήριο (βλ. ενότητα 6.2), ώστε να είναι εφικτή η συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων μεταξύ των δοκιμών πεδίου και εργαστηρίου, επιτρέποντας επίσης την αξιολόγηση της επίδρασης που έχει η κλίμακα εκτέλεσης των δοκιμών.

Χρησιμοποιήθηκε η τριδιάστατη μέθοδος καταγραφής και ανάλυσης που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 4.3.4 και πραγματοποιήθηκε ψηφιακή ανακατασκευή του τεμάχους προσδιορίζοντας επιπρόσθετα και την γωνιακή ταχύτητα.

7.3.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης

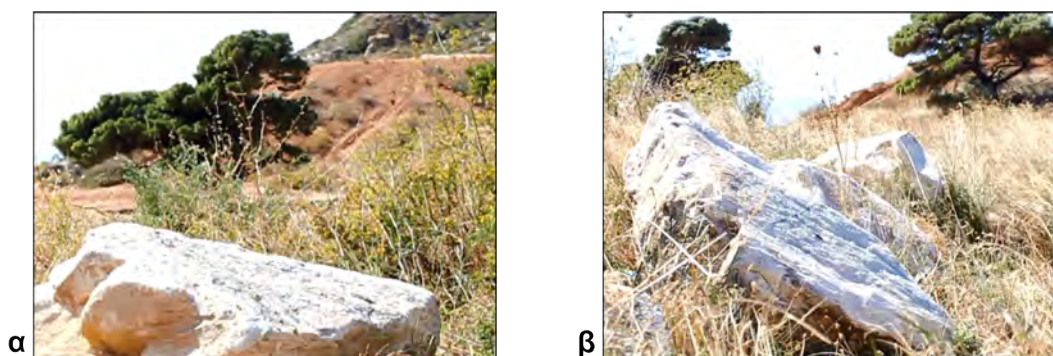
Οι όγκοι μάρμαρου που βρίσκονται στην περιοχή αποτέλεσαν τις βάσεις πρόσκρουσης των δοκιμών. Επιλέχθηκαν ώστε να είναι εφικτή η ρίψη των δοκιμών από οποιαδήποτε κατεύθυνση, επιτρέποντας την μελέτη της επίδρασης που έχει η διαφορά διεύθυνσης στην εκτροπή σε μεγαλύτερη κλίμακα από τις αντίστοιχες δοκιμές που εκτελέστηκαν στο εργαστήριο.

Σε κάθε επιφάνεια μετρήθηκε η σκληρότητα με την σφύρα Schmidt, η τραχύτητα με προφیلόμετρο 30cm καθώς και η φορά μεγίστη κλίσης και η κλίση της με την γεωλογική πυξίδα. (Πίνακας 7.10).

Πίνακας 7.10: Χαρακτηριστικά επιφανειών πρόσκρουσης

Θέση	Κλίση θ [$^{\circ}$]	Τραχύτητα JRC[-]	Σκληρότητα R[-]
1	20	2-4	43.2
2	45	2-4	42.8

Οι μέσες διαστάσεις των τεμαχών που χρησιμοποιήθηκαν ως βάσεις πρόσκρουσης ήταν $1.8 \times 1.4 \times 0.8m$ για την επιφάνεια με κλίση $\theta = 20^{\circ}$ (Σχήμα 7.23-α) και $2.0 \times 1.6 \times 1.6m$ για την επιφάνεια κλίσης $\theta = 45^{\circ}$ (Σχήμα 7.23-β), σχηματίζοντας όγκους $> 3m^3$. Έτσι οι βάσεις θεωρούνται ακλόνητες καθώς έχουν σημαντικά μεγαλύτερο όγκο από τα κυβικά δοκίμια ($0.0034m^3$) που προσκρούουν σε αυτές. Επιπρόσθετα, επιλέχτηκαν τεμάχια με το δυνατόν ομαλότερη επιφάνεια, ώστε να περιορισθεί η επίδραση της τραχύτητας.

**Σχήμα 7.23:** Βάσεις πρόσκρουσης με κλίση: (α) $\theta = 20^{\circ}$ και (β) $\theta = 45^{\circ}$

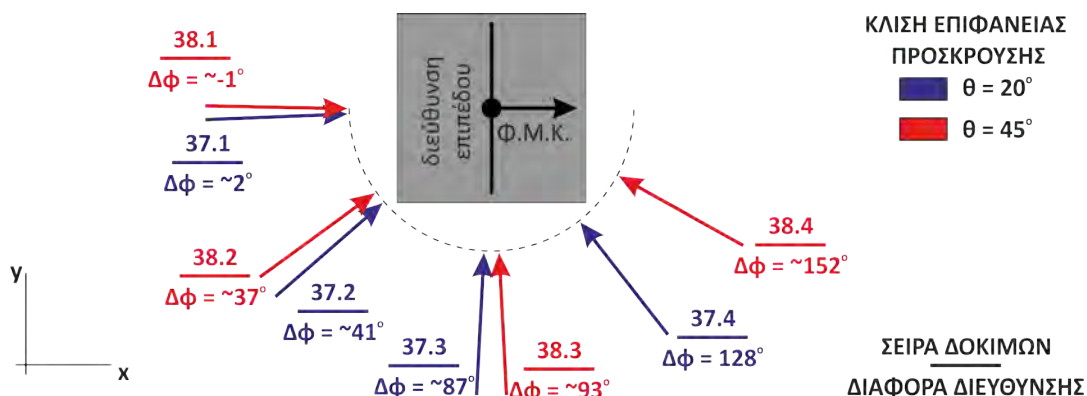
Τα κυβικά τεμάχια κατασκευάστηκαν από το ένεμα τσιμεντοειδούς βάσης υψηλής αντοχής. Για την διαμόρφωσή τους χρησιμοποιήθηκαν κυβικές μήτρες σκυροδέματος, εσωτερικής διάστασης $15cm$. Στην συνέχεια, οι πλευρές κωδικοποιήθηκαν χρωματικά (Σχήμα 7.24), ώστε να είναι δυνατή η εφαρμογή της μεθόδου ψηφιακής ανακατασκευής του δοκιμίου, όπως παρουσιάστηκε στην ενότητα 4.4.2.4-σχήμα 4.70. Η απελευθέρωση των δοκιμίων έγινε με το χέρι από διαφορετικές θέσεις ώστε να μεταβάλλεται η διαφορά διεύθυνσης.

**Σχήμα 7.24:** Χρωματική κωδικοποίηση τεμαχών

7.3.2 Περιγραφή δοκιμών Πεντελικού όρους

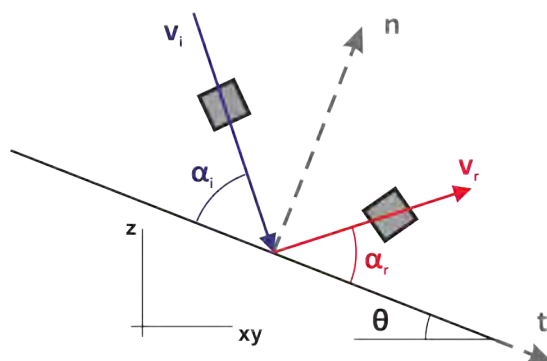
Σε κάθε επιφάνεια πρόσκρουσης έγιναν τέσσερις σειρές δοκιμών από διαφορετική θέση απελευθέρωσης των τεμαχίων. Έγιναν δοκιμές ομόρροπης και λοξής κρούσης με διαφορά διεύθυνσης ($\Delta\phi$) έως και 150° . Σχηματικά η διεύθυνση ρίψης των τεμαχίων παρουσιάζεται στο σχήμα 7.25.

Για λόγους ασφαλείας δεν εκτελέστηκαν δοκιμές αντίρροπης κρούσης (διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 180^\circ$). Στην αντίστοιχη εργαστηριακή διερεύνηση, η εκτροπή των τεμαχίων ήταν σημαντική με αποτέλεσμα η διεύθυνση της τροχιάς μετά την κρούση να είναι απρόβλεπτη, κάτι που επαληθεύτηκε ποιοτικά με διερευνητικές ρίψεις στις εν λόγω θέσεις. Έτσι, θεωρήθηκε επικίνδυνο να εκτελεστούν δοκιμές αντίρροπης κρούσης στο πεδίο καθώς ενείχαν τον κίνδυνο τραυματισμού ή καταστροφής του εξοπλισμού.



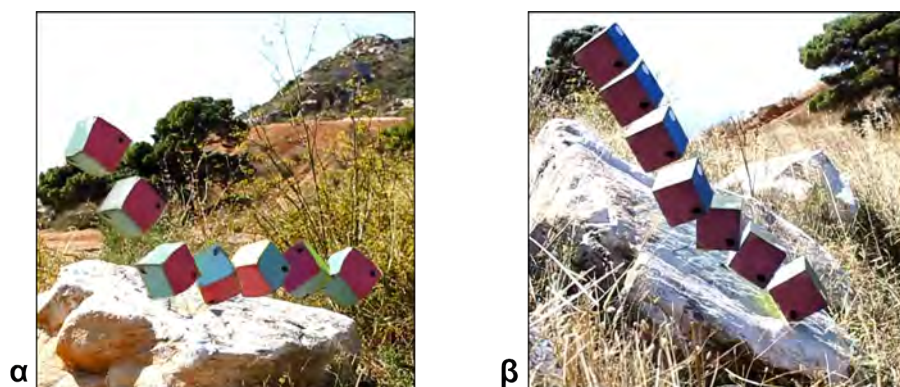
Σχήμα 7.25: Σχηματική παρουσίαση της διεύθυνσης ρίψης των τεμαχίων

Συνολικά, εκτελέστηκαν 180 δοκιμές, οι οποίες παρατίθενται αναλυτικά στα παραρτήματα 37 και 38, ενώ τα χαρακτηριστικά της κίνησης (μέσοι όροι ταχυτήτων και γωνιών - Σχήμα 7.26) συνοψίζονται στους πίνακες 7.11 και 7.12 για τις επιφάνειες πρόσκρουσης με κλίση 20° και 45° αντίστοιχα.



Σχήμα 7.26: Σχηματική απεικόνιση των χαρακτηριστικών των δοκιμών

Στο σχήμα 7.27 παρουσιάζεται ενδεικτικά η διαγραφόμενη τροχιά μέσω υπέρθεσης των διαδοχικών καταγραφών, σε δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στις δύο επιφάνειες πρόσκρουσης.



Σχήμα 7.27: Ανακατασκευή τροχιάς μέσω της υπέρθεσης διαδοχικών λήψεων, στις επιφάνειες πρόσκρουσης με κλίση: (α) $\vartheta = 20^\circ$ και (β) $\vartheta = 45^\circ$

Πίνακας 7.11: Ρίψεις κυβικών δοκιμών σε επιφάνεια πρόσκρουσης με κλίση $\vartheta = 20^\circ$

Σειρά δοκιμών	Αριθμός επαν.	Διαφ. διεύθυνσης $\Delta\phi[^\circ]$	Πρόσκρουση		Αναπήδηση	
			$v_i[ms^{-1}]$	$\alpha_i[^\circ]$	$v_r[ms^{-1}]$	$\alpha_r[^\circ]$
37.1	24	2.3	5.31	49.7	2.82	22.8
37.2	23	41.4	6.14	57.7	3.15	26.7
37.3	20	87.5	6.28	62.6	2.29	26.1
37.4	17	128.3	6.43	71.8	2.06	15.6

Πίνακας 7.12: Ρίψεις κυβικών δοκιμών σε επιφάνεια πρόσκρουσης με κλίση $\vartheta = 45^\circ$

Σειρά δοκιμών	Αριθμός επαν.	Διαφ. διεύθυνσης $\Delta\phi[^\circ]$	Πρόσκρουση		Αναπήδηση	
			$v_i[ms^{-1}]$	$\alpha_i[^\circ]$	$v_r[ms^{-1}]$	$\alpha_r[^\circ]$
38.1	24	-1.1	5.5	25.9	3.53	18.5
38.2	24	36.6	5.18	37.0	3.36	18.0
38.3	24	93.3	6.55	74.8	3.89	20.4
38.4	24	151.7	6.95	96.4	2.35	30.6

Συγκριτικά με τις αντίστοιχες δοκιμές εργαστηρίου, τα χαρακτηριστικά κίνησης πριν την κρούση εμφανίζουν μεγαλύτερη διακύμανση (ταχύτητα, γωνία πρόσκρουσης και διαφορά διεύθυνσης). Αυτό οφείλεται στην απελευθέρωση των τεμαχών με το χέρι, η οποία εκ των πραγμάτων δεν μπορεί να εμφανίζει την ίδια επαναληψιμότητα με τον μηχανισμό απελευθέρωσης.

7.3.3 Παρουσίαση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων από τις δοκιμές στο Πεντελικό όρος

Τα αποτελέσματα των δοκιμών πεδίου παρουσιάζονται αρχικά για την περίπτωση της ομόρροπης κρούσης και ακολουθεί η γενική περίπτωση της λοξής κρούσης. Εξετάζεται η επίδραση που έχει η κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης στους συντελεστές αναπήδησης και στην εκτροπή, αντίστοιχα με την παρουσίαση της τριδιάστατης διερεύνησης στο εργαστήριο (Ενότητα 6.2)

7.3.3.1 Επίδραση της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης στους συντελεστές αναπήδησης για ομόρροπη κρούση

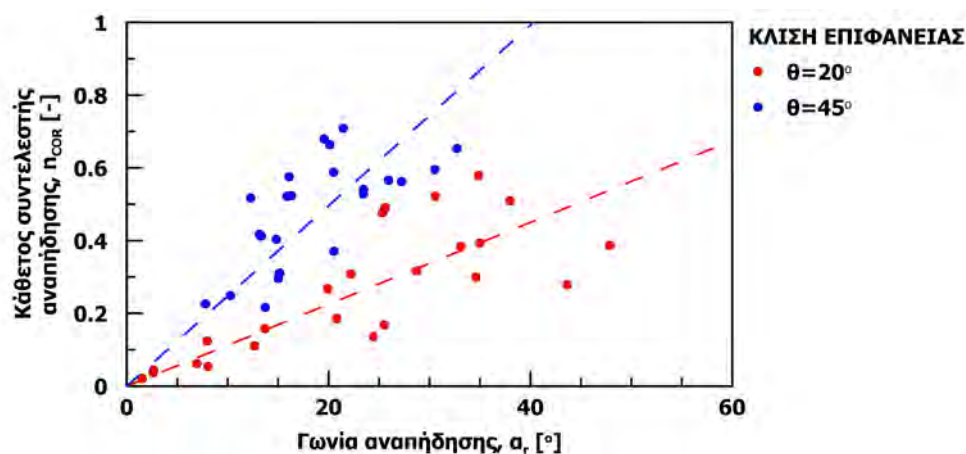
Οι χαρακτηριστικές τιμές των συντελεστών αναπήδησης (ελάχιστη, μέγιστη, μέση τυπική απόκλιση και εύρος) παρουσιάζονται στον πίνακα 7.13. Γενικώς, το εύρος διακύμανσης των τιμών, σε κάθε ορισμό, είναι ιδιαίτερος υψηλό συγκριτικά με τις αντίστοιχες δοκιμές στο εργαστήριο.

Πίνακας 7.13: Χαρακτηριστικές τιμές συντελεστών αναπήδησης στην ομόρροπη κρούση

Συντελεστής αναπήδησης	Σειρά δοκιμών	Σχήμα τεμάχους	Χαρακτηριστικές τιμές συντελεστών αναπήδησης			
			ελάχιστη	μέγιστη	μέση	εύρος
Κάθετος $\eta_{COR[-]}$	37.1	20	0.02	0.28	0.26	0.56
	38.1	45	0.22	0.71	0.48	0.49
Εφαπτομενικός $t_{COR[-]}$	37.1	20	0.31	1.25	0.75	0.93
	38.1	45	0.50	0.91	0.69	0.41
Κινηματικός $\nu_{COR[-]}$	37.1	20	0.24	0.86	0.53	0.62
	38.1	45	0.51	0.87	0.65	0.36
Ενεργειακός $E_{COR[-]}$	37.1	20	0.06	0.74	0.31	0.68
	38.1	45	0.26	0.76	0.43	0.50
Ολικός Ενεργ. $TE_{COR[-]}$	37.1	20	0.06	0.74	0.32	0.69
	38.1	45	0.26	0.77	0.44	0.51

Ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης λαμβάνει τιμές από 0 έως 1, γεγονός που καθιστά ιδιαίτερος απλουστευτική την συνήθη πρακτική να λαμβάνονται οι τιμές του ως ιδιότητα υλικού. Επίσης, στην επιφάνεια πρόσκρουσης με κλίση 45° ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές και η γωνία πρόσκρουσης είναι ηπιότερη συγκριτικά με την άλλη επιφάνεια. Έτσι, το μέγεθος του καθέτου συντελεστή αυξάνεται με την μείωση της γωνίας πρόσκρουσης, επαληθεύοντας το συμπέρασμα των προηγούμενων διερευνήσεων.

Η σχέση του καθέτου συντελεστή με την γωνία αναπήδησης περιγράφεται ικανοποιητικώς, και σε αυτές τις δοκιμές, από μια ευθεία που διέρχεται από την αρχή των αξόνων (Σχήμα 7.28), η κλίση της οποίας βαίνει μειούμενη όσο αυξάνει η γωνία πρόσκρουσης.



Σχήμα 7.28: Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας αναπήδησης

Στον επαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης το εύρος τιμών προκύπτει σημαντικά μεγαλύτερο στην επιφάνεια πρόσκρουσης με κλίση 20° . Τούτο οφείλεται στο γεγονός ότι η γωνία πρόσκρουσης προσεγγίζει τις 90° , όπου ο προσδιορισμός του επαπτομενικού συντελεστή είναι ιδιαίτερος ευαίσθητος στην γωνία αναπήδησης, λαμβάνοντας ασυνήθιστα μεγάλες τιμές.

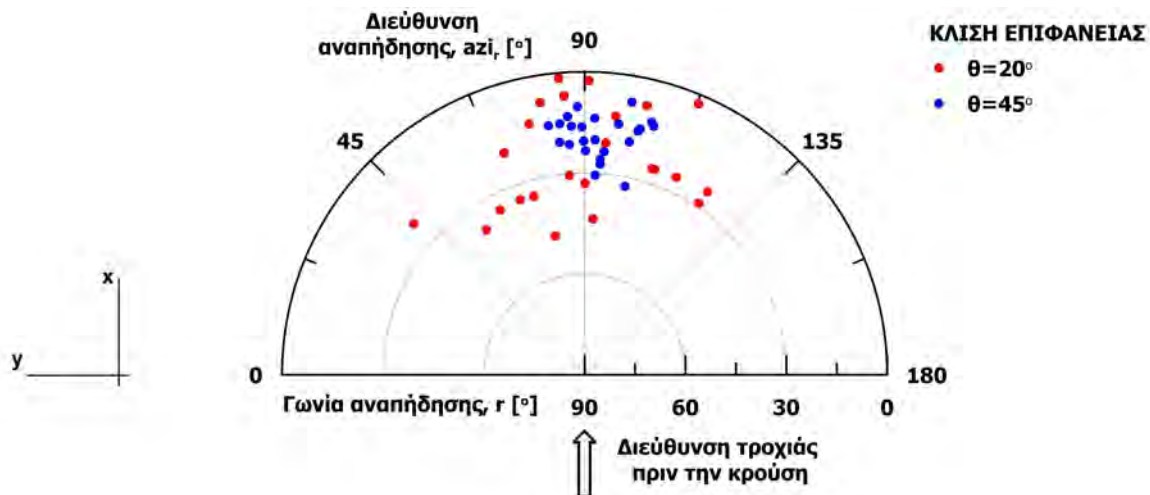
Σε συμφωνία με την εργαστηριακή διερεύνηση, η μέση τιμή του κινηματικού συντελεστή αναπήδησης αυξάνεται σε επιφάνειες πρόσκρουσης με πιο απότομη κλίση, ή ισοδύναμα με την μείωση της γωνίας πρόσκρουσης. Όμοια συμπεριφορά εμφανίζουν και οι ενεργειακοί συντελεστές αναπήδησης, με ή χωρίς την συνεκτίμηση της γωνιακής ταχύτητας, η διαφοροποίηση των οποίων είναι ασήμαντη στην παρούσα διερεύνηση.

7.3.3.2 Επίδραση της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης στην εκτροπή για ομόρροπη κρούση

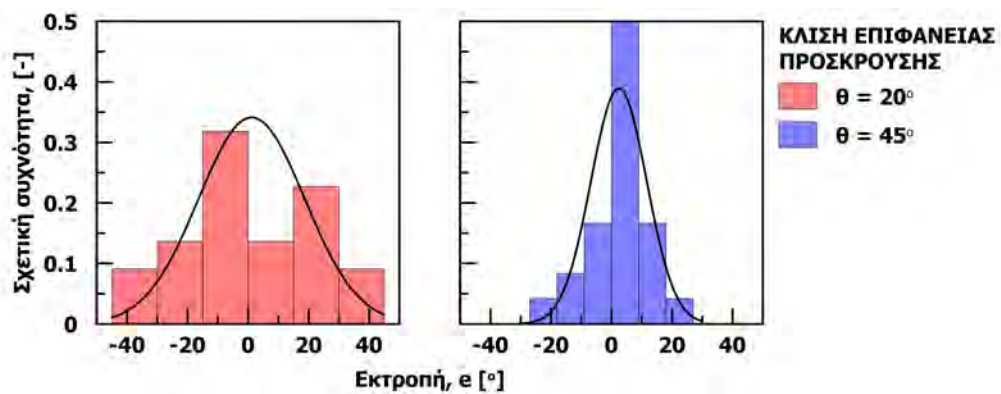
Στο σχήμα 7.29 προβάλλονται σε πολικό διάγραμμα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της τροχιάς ομαδοποιημένα σύμφωνα με την κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης. Η διεύθυνση της τροχιάς μετά την κρούση προβάλλεται στον περιφερειακό άξονα και η γωνία αναπήδησης στον ακτινικό.

Παρατηρείται ότι τα σημεία που αντιστοιχούν στην επιφάνεια πρόσκρουσης με κλίση $\vartheta = 45^\circ$ προβάλλονται πλησιέστερα ως προς την διεύθυνση της τροχιάς προ της κρούσης, δηλαδή παρουσιάζουν μικρότερη εκτροπή. Επιπρόσθετα, στις δοκιμές αυτές η γωνία αναπήδησης έχει μικρότερο εύρος.

Στο σχήμα 7.30 παρουσιάζονται οι κατανομές της εκτροπής για τις δυο επιφάνειες πρόσκρουσης. Σύμφωνα με τον στατιστικό έλεγχο Kolmogorov-Smirnov (Massey J, 1951) και στις δυο περιπτώσεις οι κατανομές περιγράφονται ικανοποιητικά με την κανονική κατανομή. Το εύρος της εκτροπής στην επιφάνεια κλίσης $\vartheta = 45^\circ$ κυμαίνεται σε $\pm 25^\circ$, σημαντικά μικρότερο από αυτό για κλίση $\vartheta = 20^\circ$ που κυμαίνεται σε $\pm 40^\circ$.



Σχήμα 7.29: Στοιχεία τροχιάς μετά της κρούση συναρτήσει της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης



Σχήμα 7.30: Κατανομές της εκτροπής για κρούση σε επιφάνεια πρόσκρουσης διαφορετικής κλίσης

Επιπρόσθετα, το μέσο της κατανομής προσεγγίζει την διεύθυνση της τροχιάς πριν την κρούση, γεγονός που αποτελεί ποιοτική ένδειξη για την ορθότητα της τεχνικής μετρήσεων και της μεθοδολογίας διενέργειας των δοκιμών, όπως σχολιάσθηκε και στην ενότητα 6.2.2.2.

7.3.3.3 Επίδραση της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης στους συντελεστές αναπήδησης στην λοξή κρούση

Σε κάθε επιμέρους σειρά δοκιμών η γωνία πρόσκρουσης είναι διαφορετική καθώς μεταβάλλεται η φαινόμενη κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης ως προς το κατακόρυφο επίπεδο της τροχιάς του τεμάχους πριν την κρούση. Υπενθυμίζεται ότι η γωνία πρόσκρουσης ορίζεται στο κατακόρυφο επίπεδο που εμπεριέχει την κίνηση, από τον φορέα του διανύσματος της τροχιάς και το ίχνος του πρανούς στο επίπεδο αυτό, δηλαδή από την φαινόμενη κλίση της επιφάνειας κατά την διεύθυνση της τροχιάς πριν την κρούση.

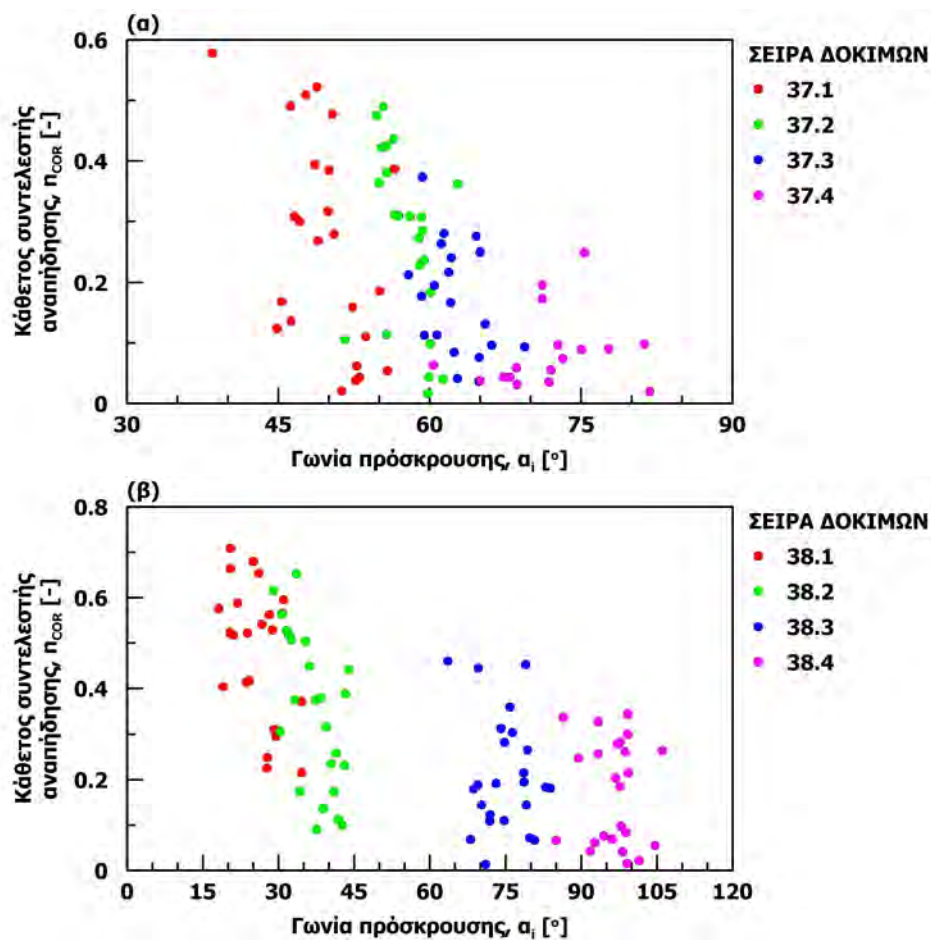
Στην αντίστοιχη εργαστηριακή διερεύνηση προέκυψε ότι οι συντελεστές αναπήδησης εξαρτώνται πρωτίστως από την γωνία πρόσκρουσης και όχι από την κλίση της επιφάνειας. Έτσι παρουσιάζονται στη συνέχεια οι συντελεστές αναπήδησης ως προς την γωνία πρόσκρουσης.

Για λόγους πληρότητας, ο σχολιασμός γίνεται συμπεριλαμβάνοντας τις δοκιμές ομόρροπης κρούσης, που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα.

Στον πίνακα 7.14 παρατίθενται οι χαρακτηριστικές τιμές του καθέτου συντελεστή αναπήδησης, ανά σειρά δοκιμών. Το σύνολο των τιμών αναπαρίσταται στο σχήμα 7.31-α και β, για τις επιφάνειες πρόσκρουσης με κλίση $\vartheta = 20^\circ$ και $\vartheta = 45^\circ$ αντίστοιχα.

Πίνακας 7.14: Χαρακτηριστικές τιμές καθέτου συντελεστή αναπήδησης στην λοξή κρούση

Σειρά δοκ.	Κλίση θ [°]	Διαφ. διευθ. $\Delta\phi$ [°]	Γων. πρ. α_i [°]	Γων. αν. α_r [°]	Κάθετος συντ. αναπήδησης, n_{COR} [-]			
					ελάχιστη	μεγίστη	μέση	εύρος
37.2	20	41.4	57.7	26.7	0.02	0.49	0.27	0.47
37.3		87.5	62.6	26.1	0.04	0.37	0.17	0.33
37.4		128.3	71.8	16.2	0.02	0.25	0.09	0.23
38.2	45	36.6	37.0	18.0	0.09	0.65	0.35	0.56
38.3		93.3	74.8	20.4	0.01	0.46	0.21	0.45
38.4		151.7	96.4	30.6	0.02	0.34	0.17	0.33



Σχήμα 7.31: Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσεως της γωνίας πρόσκρουσης για κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης: (α) $\vartheta = 20^\circ$ και (β) $\vartheta = 45^\circ$

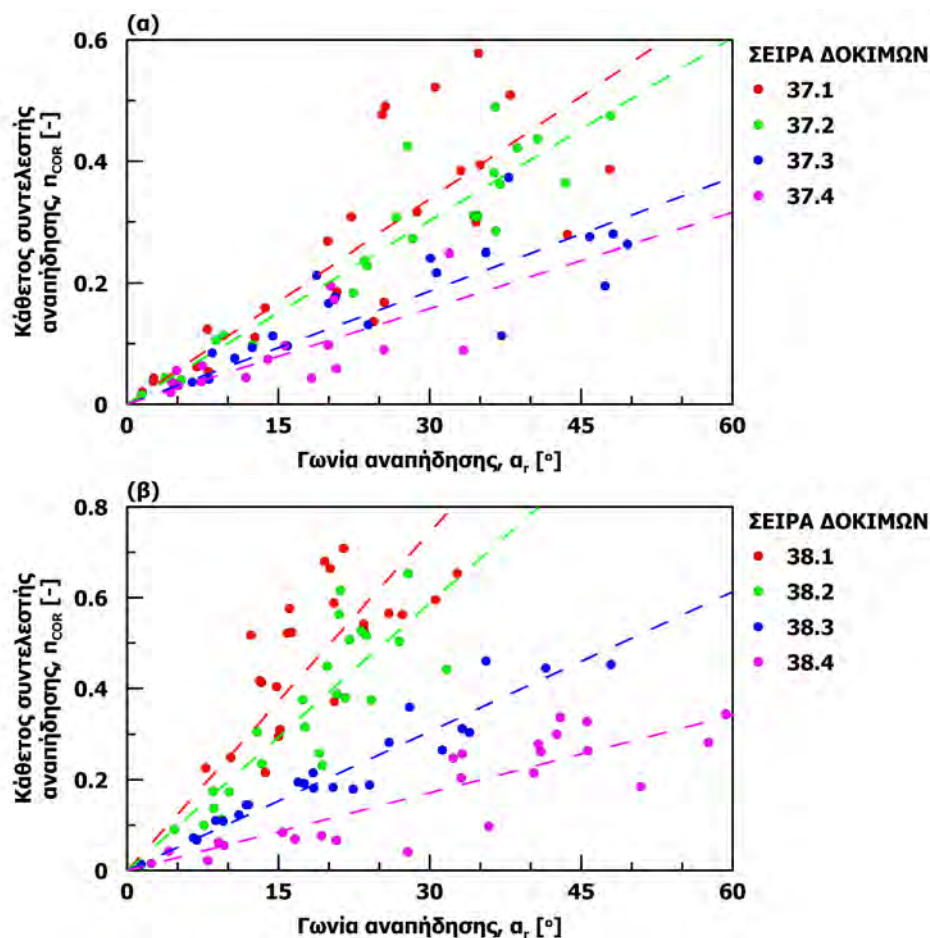
Σε κάθε σειρά δοκιμών, η ελάχιστη τιμή του καθέτου συντελεστή αναπήδησης προσεγγίζει το μηδέν, περιγράφοντας την μετατροπή της κίνησης από την εναέρια φάση στην κύλιση ή στην ολίσθηση. Η μέγιστη τιμή φθίνει με την αύξηση της γωνίας πρόσκρουσης με αποτέλεσμα να μειώνεται και η μέση τιμή του συντελεστή. Αξιοσημείωτο είναι ότι δεν προσδιορίστηκαν τιμές του καθέτου συντελεστή μεγαλύτερες της μονάδας, σε αντίθεση με τις αντίστοιχες εργαστηριακές δοκιμές αλλά και τις προηγούμενες δοκιμές πεδίου που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 7.2.

Επακόλουθο είναι πως το εύρος τιμών που καταλαμβάνει ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης μειώνεται όσο η γωνία πρόσκρουσης τείνει προς τις 90° . Συγκριτικά με τις δοκιμές στο εργαστήριο το εύρος τιμών είναι μεγαλύτερο. Γεγονός που αποδίδεται στην τραχύτητα της επιφάνειας πρόσκρουσης, η οποία προκαλεί διαφοροποίηση της γεωμετρίας επαφής και είναι υπαίτια για την αύξηση της διασποράς, όπως παρουσιάστηκε στην ενότητα 5.4.2.

Γενικότερα, το εύρος του καθέτου συντελεστή αναπήδησης είναι μεγάλο. Οι τιμές που προσδιορίστηκαν κυμαίνονται από 0.01 έως > 0.9 , καλύπτοντας ουσιαστικά το πεδίο ορισμού που υπάρχει στα λογισμικά ανάλυσης καταπτώσεων. Τούτο, καθιστά προβληματική την πρακτική επιλογή των συντελεστών αποκλειστικά ως ιδιότητα του υλικού, καθώς στις δοκιμές αυτές έχει χρησιμοποιηθεί ένα υλικό.

Ο κάθετος συντελεστής σχετίζεται ικανοποιητικά με την γωνία αναπήδησης μέσω ευθείας διερχόμενης από την αρχή των αξόνων. Στο σχήμα 7.32 παρουσιάζεται η εν λόγω σχέση και οι αντίστοιχες βέλτιστες ευθείες για τις δυο επιφάνειες πρόσκρουσης αντίστοιχα.

Παρατηρείται ότι η κλίση της βέλτιστης ευθείας κάθε σειράς δοκιμών διαφοροποιείται, και πιο συγκεκριμένα φθίνει με την αύξηση της γωνίας πρόσκρουσης. Τούτο έχει παρατηρηθεί στο σύνολο των διερευνήσεων που έχουν εκτελεστεί και αξιοποιείται σε επόμενο κεφάλαιο για την πρόβλεψή του εύρους τιμών που μπορεί να λάβει ο συντελεστής μέσω μιας εμπειρικής – φαινομενολογικής μεθοδολογίας.



Σχήμα 7.32: Σχέση κάθετου συντελεστή με την γωνία αναπήδησης για επιφάνεια πρόσκρουσης με κλίση: (α) $\theta = 20^\circ$ και (β) $\theta = 45^\circ$

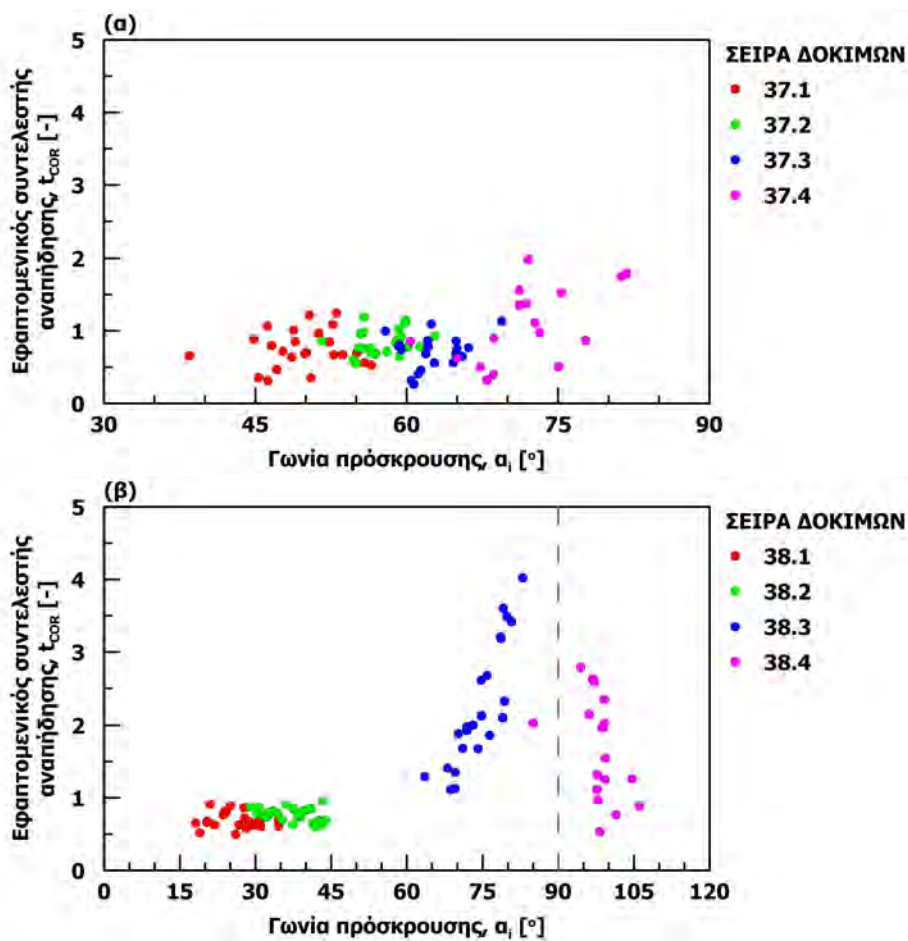
Στον πίνακα 7.15 παρατίθενται οι χαρακτηριστικές τιμές του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης. Επισημαίνεται ότι ο υφιστάμενος ορισμός αδυνατεί να περιγράψει την κάθετη κρούση, καθώς η εφαπτομενική συνιστώσα της κίνησης είναι μηδενική. Επίσης, ο ορισμός είναι προβληματικός όταν υπάρχει αντιστροφή της τροχιάς μετά την κρούση καθώς αποδίδει αρνητικές τιμές που δεν ανήκουν στο πεδίο ορισμού του. Έτσι, οι τιμές που παρουσιάζονται στο σχήμα 7.33 έχουν προσδιοριστεί από τα μέτρα των εφαπτομενικών ταχυτήτων, ενώ αυτές που παρατίθενται στον πίνακα 7.15 από τον αρχικό ορισμό του συντελεστή.

Ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης κυμαίνεται από 0.3 έως 1.2 στις δοκιμές που η γωνία πρόσκρουσης είναι μικρότερη των 60° , ενώ οδεύοντας προς την κάθετη κρούση αυξάνει σημαντικά. Ειδικότερα, στη σειρά δοκιμών 38.3, όπου η κρούση συμβαίνει υπό γωνία περί τις 90° , παρατηρείται η αδυναμία ορισμού του εφαπτομενικού συντελεστή μέσω της ασυμπτωτικής τάσης των τιμών που λαμβάνει.

Στο σχήμα 7.33 αναπαρίστανται ο επαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης, όπου τα ανωτέρω γίνονται εμφανή. Ωστόσο, δεν προβάλλονται οι τιμές του επαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης που ήταν μεγαλύτερες του 5, καθώς η σχέση των δυο μεγεθών γινόταν μη ευκρινής. Επισημαίνεται ότι προσδιορίστηκαν τιμές του επαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης έως και 40.

Πίνακας 7.15: Χαρακτηριστικές τιμές επαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης στην λοξή κρούση

Σειρά δοκ.	Κλίση θ [°]	Διαφ. διευθ. $\Delta\phi$ [°]	Γων. πρ. α_i [°]	Γων. αν. α_r [°]	Εφαπτομενικός συντ. αναπ. $t_{COR}[-]$			
					ελάχιστη	μεγίστη	μέση	εύρος
37.2	20	41.4	57.7	26.7	0.55	1.19	0.84	0.64
37.3		87.5	62.6	26.5	0.27	1.14	0.71	0.87
37.4		128.3	71.8	16.2	0.32	1.99	1.08	1.67
38.2	45	36.6	37.0	18.0	0.61	0.96	0.77	0.35
38.3		93.3	74.8	20.4	1.11	5.06	2.37	3.95
38.4		151.7	96.4	30.6	-18.52	40.76	-0.78	59.28

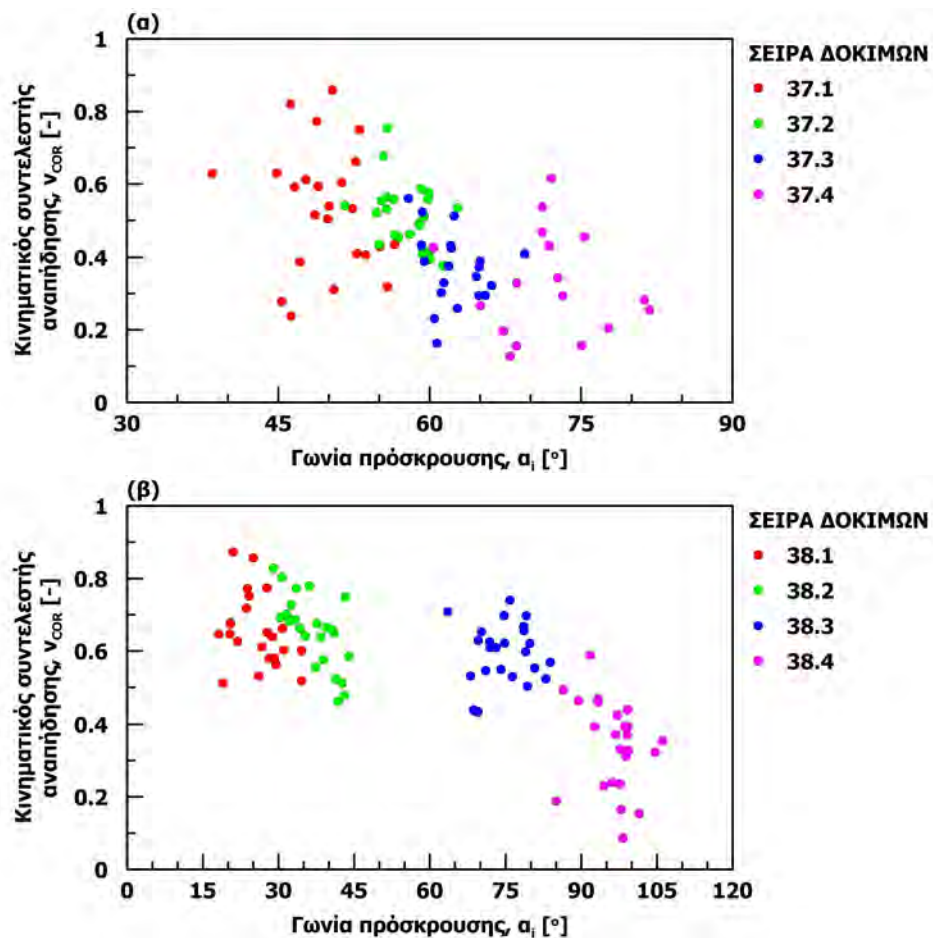


Σχήμα 7.33: Εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης για κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης: (α) $\theta = 20^\circ$ και (β) $\theta = 45^\circ$

Ο κινηματικός συντελεστής αναπήδησης μειώνεται με την αύξηση της γωνίας πρόσκρουσης, όπως αποτυπώνεται από τις μέσες, ελάχιστες και μέγιστες τιμές (Πίνακας 7.16 και σχήμα 7.34). Το εύρος τιμών είναι σαφώς περιορισμένο συγκριτικά με του καθέτου συντελεστή, εξακολουθεί όμως να είναι σημαντικό. Επιπρόσθετα, το μέγεθος του κινηματικού συντελεστή αναπήδησης είναι ανεξάρτητο της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης, καθώς είναι παρόμοιο για δοκιμές με αντίστοιχες γωνίες πρόσκρουσης.

Πίνακας 7.16: Χαρακτηριστικές τιμές κινηματικού συντελεστή αναπήδησης στην λοξή κρούση

Σειρά δοκ.	Κλίση θ [°]	Διαφ. διευθ. $\Delta\phi$ [°]	Γων. πρ. α_i [°]	Γων. αν. α_r [°]	Κινηματικός συντ. αναπ. $v_{COR}[-]$			
					ελάχιστη	μέγιστη	μέση	εύρος
37.2	20	41.4	57.7	26.7	0.38	0.75	0.52	0.38
37.3		87.5	62.6	26.5	0.16	0.56	0.37	0.40
37.4		128.3	71.8	16.2	0.13	0.62	0.33	0.49
38.2	45	36.6	37.0	18.0	0.46	0.83	0.65	0.37
38.3		93.3	74.8	20.4	0.43	0.74	0.60	0.31
38.4		151.7	96.4	30.6	0.09	0.59	0.34	0.50

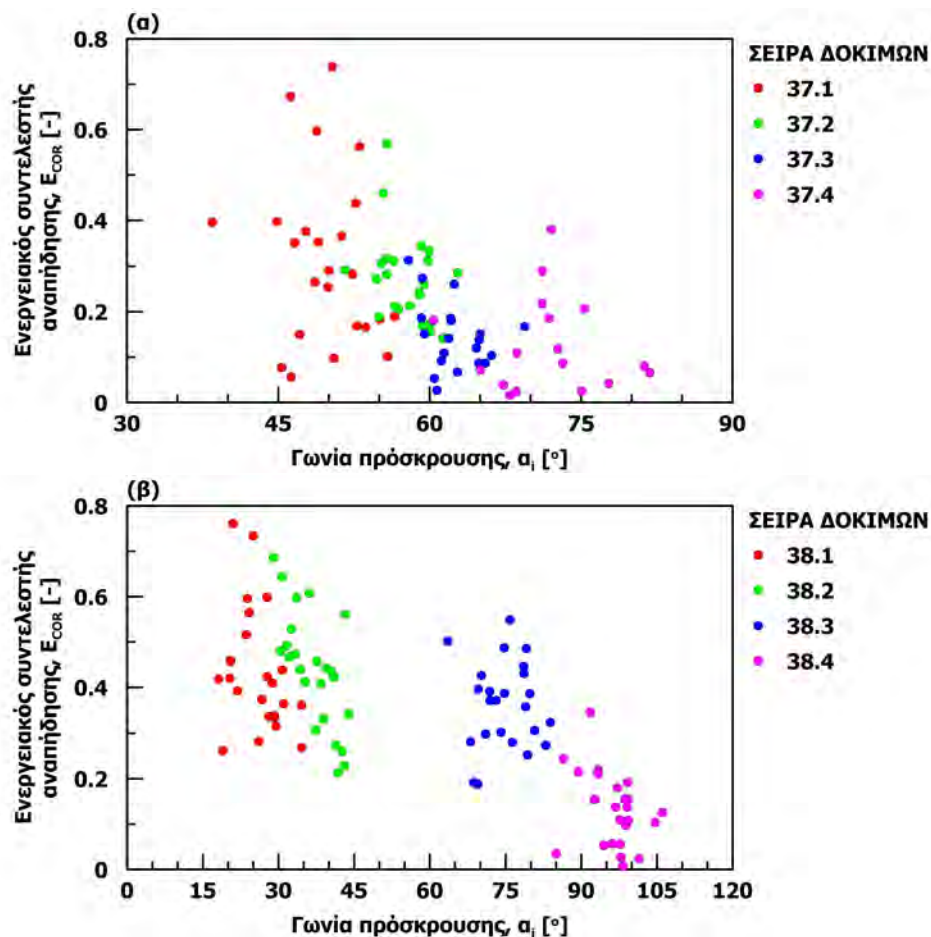


Σχήμα 7.34: Κινηματικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης για κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης: (α) $\theta = 20^\circ$ και (β) $\theta = 45^\circ$

Ο ενεργειακός συντελεστής αναπήδησης (Πίνακας 7.17) έχει παρόμοια συμπεριφορά με τον κινηματικό. Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.35, μειώνεται με την αύξηση της γωνίας πρόσκρουσης.

Πίνακας 7.17: Χαρακτηριστικές τιμές ενεργειακού συντελεστή αναπήδησης στην λοξή κρούση

Σειρά δοκ.	Κλίση θ [°]	Διαφ. διευθ. $\Delta\phi$ [°]	Γων. πρ. α_i [°]	Γων. αν. α_r [°]	Ενεργειακός συντ. αναπ. $E_{COR}[-]$			
					ελάχιστη	μεγίστη	μέση	εύρος
37.2	20	41.4	57.7	26.7	0.14	0.57	0.27	0.43
37.3		87.5	62.6	26.5	0.03	0.31	0.15	0.29
37.4		128.3	71.8	16.2	0.02	0.38	0.13	0.36
38.2	45	36.6	37.0	18.0	0.21	0.69	0.44	0.47
38.3		93.3	74.8	20.4	0.19	0.55	0.36	0.36
38.4		151.7	96.4	30.6	0.01	0.35	0.13	0.34



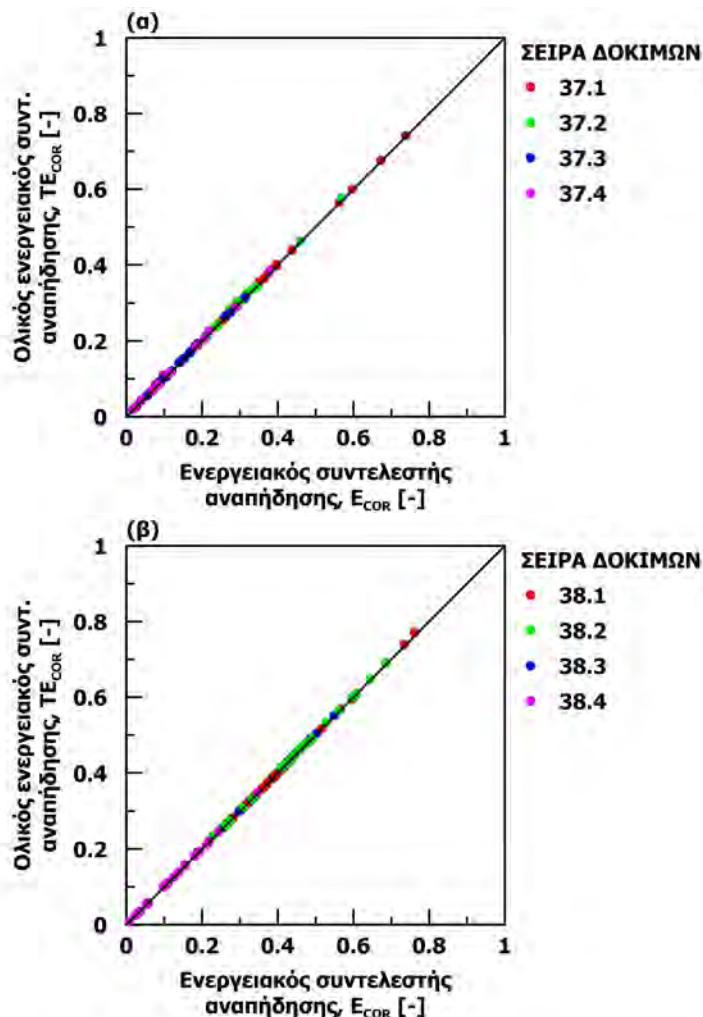
Σχήμα 7.35: Ενεργειακός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης για κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης: (α) $\vartheta = 20^\circ$ και (β) $\vartheta = 45^\circ$

Συνεκτιμώντας την γωνιακή ταχύτητα, δηλαδή με τον ολικό ενεργειακό συντελεστή αναπήδησης, παρατηρείται ανάλογη συμπεριφορά (Πίνακας 7.18). Η διαφοροποίηση του μεγέθους των δυο ενεργειακών συντελεστών αναπήδησης είναι αμελητέα, όπως προκύπτει από

το σχήμα 7.36 όπου προβάλλονται συγκριτικά οι δυο ορισμοί. Ο ολικός ενεργειακός συντελεστής αναπήδησης είναι ελαφρώς μεγαλύτερος από τον ενεργειακό, χωρίς όμως αυτό να είναι ουσιαστικό καθώς η διαφορά τους είναι αρκετά μικρότερη από την διακύμανση των τιμών.

Πίνακας 7.18: Χαρακτηριστικές τιμές ολικού ενεργειακού συντελεστή αναπήδησης στην λοξή κρούση

Σειρά δοκ.	Κλίση θ [°]	Διαφ. διευθ. $\Delta\phi$ [°]	Γων. πρ. α_i [°]	Γων. αν. α_r [°]	Ολικός Ενεργειακός συντ. αναπ. $TE_{COR}[-]$			
					ελάχιστη	μέγιστη	μέση	εύρος
37.2	20	41.4	57.7	26.7	0.14	0.58	0.28	0.43
37.3		87.5	62.6	26.5	0.03	0.32	0.15	0.29
37.4		128.3	71.8	16.2	0.02	0.39	0.13	0.37
38.2	45	36.6	37.0	18.0	0.21	0.69	0.44	0.48
38.3		93.3	74.8	20.4	0.19	0.71	0.37	0.52
38.4		151.7	96.4	30.6	0.01	0.35	0.13	0.34



Σχήμα 7.36: Σύγκριση ενεργειακών συντελεστών αναπήδησης στις δοκιμές με κλίση: (α) $\theta = 20^\circ$ και (β) $\theta = 45^\circ$

7.3.3.4 Επίδραση της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης στην εκτροπή στην λοξή κρούση

Τα στοιχεία κατεύθυνσης μετά την κρούση παρουσιάζονται σε πολικό σύστημα συντεταγμένων στο σχήμα 7.37. Στον περιφερειακό άξονα αποτυπώνεται η διεύθυνση της τροχιάς και στον ακτινικό η γωνία αναπήδησης. Επίσης, σημαίνεται με βέλος και προβάλλεται με διακεκομμένη γραμμή η μέση διεύθυνση της τροχιάς πριν την κρούση για κάθε σειρά δοκιμών.

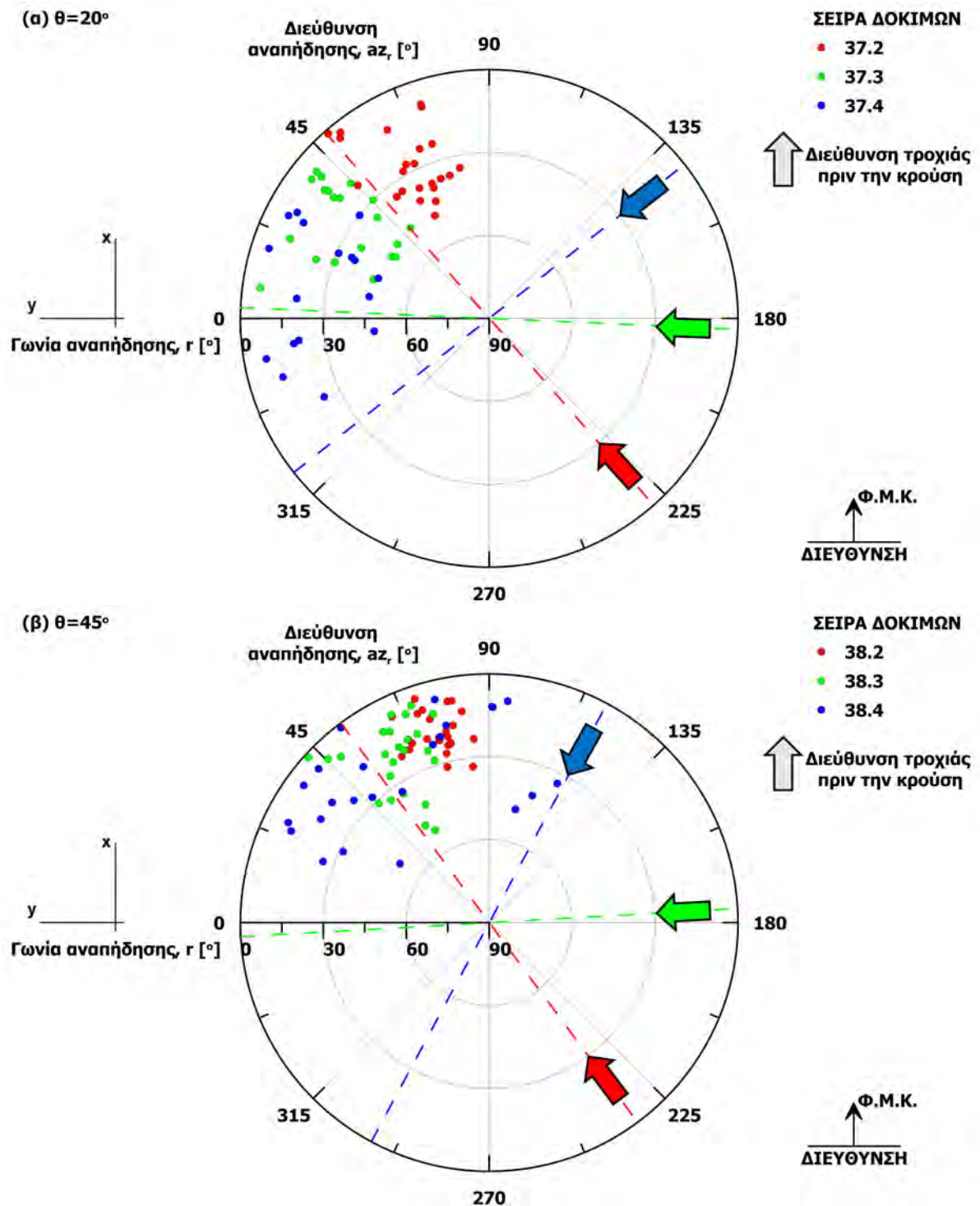
Παρατηρείται και στις δυο περιπτώσεις, ότι τα τεμάχια εκτρέπονται προς την φορά μεγίστης κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης (διεύθυνση $90^\circ - 270^\circ$). Εξετάζοντας συγκριτικά τα δύο σχήματα προκύπτει ότι το μέγεθος της εκτροπής εξαρτάται από την κλίση της επιφάνειας, καθώς στο πρηνές κλίσης 20° τα σημεία βρίσκονται πλησιέστερα στην διεύθυνση κίνησης προ της κρούσης, δηλαδή εμφανίζουν λιγότερη εκτροπή.

Επίσης, όσο η διαφορά διεύθυνσης αυξάνεται, δηλαδή η γωνία που σχηματίζεται από την διεύθυνση της τροχιάς πριν την κρούση προς την φορά μεγίστης κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης (βλ. Σχήμα 6.18), αυξάνει και η εκτροπή. Ειδικότερα, για το πρηνές κλίσης $\vartheta = 45^\circ$ παρατηρήθηκε ακόμα και αντιστροφή της τροχιάς όταν η διαφορά διεύθυνσης ήταν περίπου 150° . Απόρροια της σύμβασης του συστήματος αξόνων που επιλέχθηκε, η εκτροπή είναι θετική όταν κατευθύνεται προς την φορά μεγίστης κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης.

Στον πίνακα 7.19 παρατίθενται οι χαρακτηριστικές τιμές της εκτροπής (ελάχιστη, μέγιστη και εύρος), για κάθε σειρά δοκιμών. Επίσης στο σχήμα 7.38 αναπαρίσταται η εκτροπή συναρτήσει της διαφοράς διεύθυνσης, όπου γίνεται εμφανής η εξάρτηση των δυο μεγεθών.

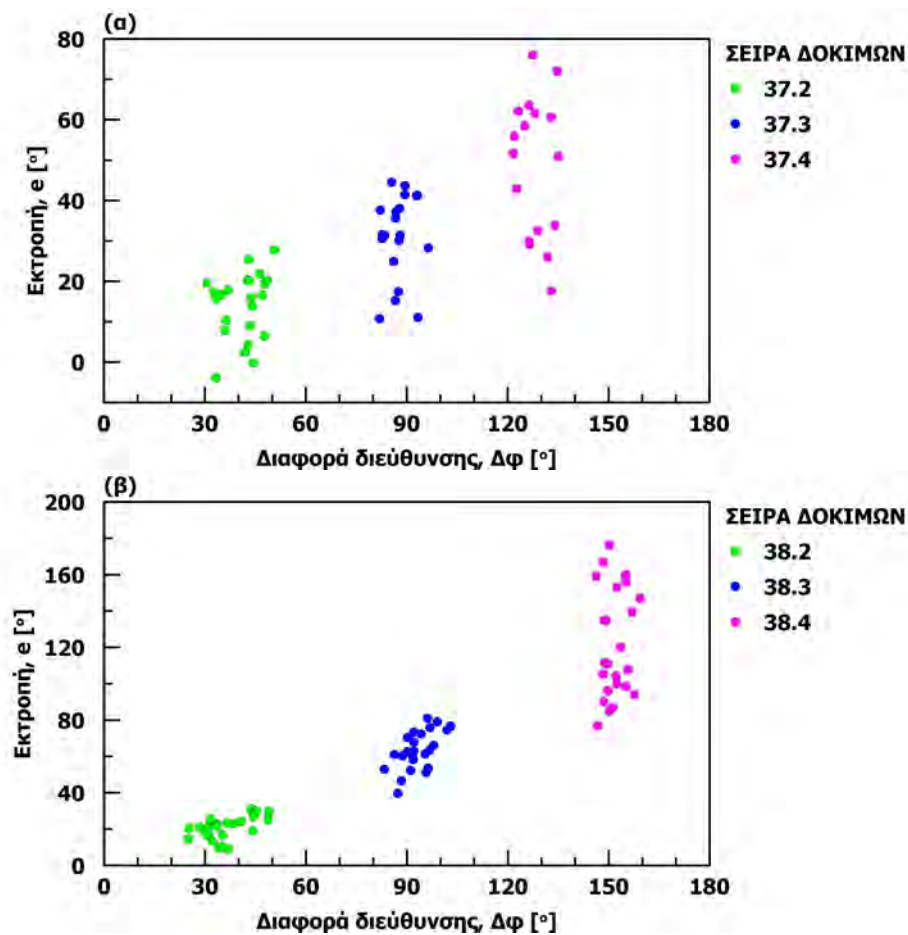
Πίνακας 7.19: Χαρακτηριστικές τιμές εκτροπής στην λοξή κρούση

Σειρά δοκ.	Κλίση θ [$^\circ$]	Διαφ. διευθ. $\Delta\phi$ [$^\circ$]	Γων. πρ. α_i [$^\circ$]	Γων. αν. α_r [$^\circ$]	Εκτροπή e [$^\circ$]		
					ελάχιστη	μέγιστη	εύρος
37.2	20	41.4	57.7	26.7	-3.9	27.9	31.7
37.3		87.5	62.6	26.5	10.8	44.6	33.8
37.4		128.3	71.8	16.2	17.7	76.0	58.3
38.2	45	36.6	37.0	18.0	9.2	31.1	21.9
38.3		93.3	74.8	20.4	39.7	81.0	41.4
38.4		151.7	96.4	30.6	76.9	176.3	99.4



Σχήμα 7.37: Στοιχεία κατεύθυνσης της τροχιάς μετά την κρούση στις δοκιμές με κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης: (α) $\theta = 20^\circ$ και (β) $\theta = 45^\circ$

Γενικώς, το εύρος της εκτροπής είναι σημαντικό, ενώ δεν προκύπτει κάποια κατανομή εντός αυτού που θα μπορούσε να αποτελέσει την βάση κάποιας στατιστικής μεθοδολογίας για την εκτίμηση της εκτροπής. Αντίστοιχη κατάσταση προέκυψε και στις ομόλογες εργαστηριακές δοκιμές. Σε επόμενο κεφάλαιο προτείνεται μια εμπειρική μεθοδολογία εκτίμησης των χαρακτηριστικών τιμών της εκτροπής, συναρτήσει της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης και της διαφοράς διεύθυνσης, αξιοποιώντας τα αποτελέσματα της εργαστηριακής διερεύνησης. Στην συνέχεια, ελέγχεται η αξιοπιστία της και η εφαρμοσιμότητά της σε μεγαλύτερα κλίμακα, βάσει των δοκιμών που παρουσιάστηκαν στην παρούσα ενότητα.



Σχήμα 7.38: Εκτροπή συναρτήσει της διαφοράς διεύθυνσης στις δοκιμές με κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης: (α) $\theta = 20^\circ$ και (β) $\theta = 45^\circ$

7.4 Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι επιτόπου δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας. Σκοπός των δοκιμών πεδίου είναι ο προσδιορισμός της επίδρασης που έχει η κλίμακα εκτέλεσης των δοκιμών, ώστε να εξεταστεί η δυνατότητα αναγωγής των συμπερασμάτων της εκτενούς εργαστηριακής διερεύνησης στην πραγματική διάσταση του φαινομένου.

Γενικώς, όταν η καταγραφή της κίνησης γίνεται με μια φωτομηχανή, πρέπει αυτή να είναι εγκατεστημένη έτσι ώστε το επίπεδο καταγραφής να είναι παράλληλο με το επίπεδο που εμπεριέχει την κίνηση για να αποφεύγεται σφάλμα από την λοξή προβολή. Όμως, οι δυνατότητες εγκατάστασης του εξοπλισμού υπαγορεύονται από την μορφολογία της θέσης εκτέλεσης των δοκιμών, που εκ των πραγμάτων είναι δυσμενείς. Αντιθέτως, χρησιμοποιώντας την μεθοδολογία τρισδιάστατης καταγραφής δεν υφίσταται τέτοιος περιορισμός καθώς οι φωτομηχανές μπορούν να εγκατασταθούν σε οποιαδήποτε θέση, αρκεί να είναι προσανατολισμένες προς την θέση ενδιαφέροντος.

Στην διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε στο θέατρο Βράχων εξετάστηκαν τέσσερα σχήματα τεμαχών, μεταξύ των οποίων και φυσικά τεμάχια. Προέκυψε ότι η συμπεριφορά που έχουν τα φυσικά τεμάχια προσομοιώνεται καλύτερα από τα κυβικά, καθώς εμφανίζουν παρόμοιες τάσεις των συντελεστών αναπήδησης και αντίστοιχες τιμές, ωστόσο το μέγεθος της εκτροπής ήταν μεγαλύτερο.

Όσον αφορά τους συντελεστές αναπήδησης, οι επιτόπου δοκιμές επαληθεύουν όλες τις τάσεις που παρατηρήθηκαν στην εργαστηριακή διερεύνηση. Πιο συγκεκριμένα, εφόσον ομοιάζουν οι συνθήκες απελευθέρωσης, ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης μειώνεται με την αύξηση της γωνίας πρόσκρουσης ή με την μείωση της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης. Επίσης, ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης σχετίζεται ικανοποιητικά με την γωνία αναπήδησης μέσω ευθείας που διέρχεται από την αρχή των αξόνων, η κλίση της οποίας εξαρτάται από την γωνία πρόσκρουσης. Τα σφαιρικά τεμάχια παρουσιάζουν μικρότερη διασπορά τιμών, αλλά μεγαλύτερο μέγεθος καθέτου συντελεστή αναπήδησης συγκριτικά με τα κυβικά. Αντιθέτως, ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης δεν παρουσιάζει κάποια ευαισθησία με το σχήμα του τεμαχίου ή με την γωνία πρόσκρουσης. Ωστόσο, οι τιμές που λαμβάνει κυμαίνονται σε μεγαλύτερο εύρος συγκριτικά με τις αντίστοιχες δοκιμές που έγιναν στο εργαστήριο. Ο κινηματικός συντελεστής αναπήδησης μειώνεται με την αύξηση της γωνίας πρόσκρουσης και εμφανίζει μικρότερο εύρος. Ωστόσο η επίδραση του σχήματος του τεμαχίου δεν είναι εμφανής, καθώς δεν μεταβάλλονται οι τιμές του με την διαφοροποίηση του σχήματος.

Από τις δοκιμές που εκτελέστηκαν στο Πεντελικό όρος, όπου μετρήθηκε και η γωνιακή ταχύτητα, προέκυψε ότι ο ενεργειακός συντελεστής αναπήδησης εμφανίζει παρόμοια συμπεριφορά με τον κινηματικό, δηλαδή μειώνεται με την αύξηση της γωνίας πρόσκρουσης, ωστόσο παρουσιάζει ελαφρώς μεγαλύτερο εύρος τιμών. Συνεκτιμώντας την γωνιακή ταχύτητα δεν παρατηρείται αξιοσημείωτη διαφοροποίηση μεταξύ των δυο ενεργειακών ορισμών (ενεργειακός

και ολικός ενεργειακός). Ειδικότερα, η διαφοροποίηση είναι ακόμα μικρότερη συγκριτικά με αυτήν στις αντίστοιχες δοκιμές στο εργαστήριο. Έτσι, η χρήση του ολικού ενεργειακού συντελεστή αναπήδησης, που προϋποθέτει την μέτρηση της γωνιακής ταχύτητας, δεν φαίνεται να προσδίδει μεγαλύτερη ακρίβεια στην εκτίμηση της τροχιάς του τεμάχους.

Τα συμπεράσματα σχετικά με την εκτροπή του τεμάχους από το κατακόρυφο επίπεδο κίνησης πριν την κρούση είναι παρόμοια μεταξύ των δοκιμών πεδίου και εργαστηρίου. Το μέγεθος της εκτροπής μειώνεται όσο η κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης αυξάνεται. Επίσης, το σχήμα του τεμάχους παίζει σημαντικό ρόλο καθώς το σφαιρικό τέμαχος εμφανίζει λιγότερη εκτροπή, η οποία αυξάνεται όσο το τέμαχος γίνεται περισσότερο γωνιώδες.

Όταν υπάρχει διαφορά διεύθυνσης μεταξύ της φοράς μεγίστης κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης και της διεύθυνσης κίνησης του τεμάχους πριν την κρούση, τότε το τέμαχος εκτρέπεται προς την φορά μεγίστης κλίσης του επιπέδου πρόσκρουσης. Το εύρος της εκτροπής αυξάνεται με την αύξηση της διαφοράς διεύθυνσης, όπως και η κατευθυντικότητα που ασκείται στο τέμαχος. Περαιτέρω, τα παραπάνω εντείνονται με την αύξηση της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης.

Γενικότερα, οι επιτόπου δοκιμές έδειξαν αντίστοιχη συμπεριφορά με τις δοκιμές στο εργαστήριο, τόσο για τους συντελεστές αναπήδησης όσο και για την εκτροπή. Συνεπώς, παρά την διαφοροποίηση της κλίμακας, οι δοκιμές στο εργαστήριο είναι κατάλληλες για την μελέτη του φαινομένου και σαφώς ευκολότερες τόσο στην εκτέλεση όσο και στον έλεγχο των παραμέτρων που διερευνώνται.

Κεφάλαιο 8

Συγκριτική Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

Στο κεφάλαιο γίνεται συγκριτική αξιολόγηση των πειραματικών αποτελεσμάτων, χρησιμοποιώντας δεδομένα που προέρχονται από διαφορετικές διερευνήσεις που εκτελέστηκαν στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας. Συγχρόνως, τα αποτελέσματα αυτά συγκρίνονται με σχετικές έρευνες που συναντώνται στην διεθνή βιβλιογραφία. Ο σχολιασμός παρατίθεται ως προς τις παραμέτρους που επηρεάζουν την διαγραφόμενη τροχιά των τεμαχών, εξετάζοντας τις κρισιμότερες εξ αυτών (τύπος υλικού, ταχύτητα πρόσκρουσης, μάζα τεμάχους κ.α.).

Επίσης, γίνεται σχολιασμός της επίδρασης που έχει η κλίμακα εκτέλεσης των δοκιμών, συγκρίνοντας τις δοκιμές πεδίου με αυτές που έγιναν στο εργαστήριο, καθώς επίσης και με διαθέσιμα στοιχεία από την βιβλιογραφία που έχουν εξαχθεί σε διαφορετική κλίμακα.

Περαιτέρω, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα της εργαστηριακής διερεύνησης, αξιολογούνται τρεις μεθοδολογίες ανάλυσης που βασίζονται στην θεώρηση του τεμάχους ως άκαμπτο σώμα. Τέλος, γίνεται αναφορά στην θραύση των τεμαχών, που παρατηρήθηκε σε ορισμένες από τις δοκιμές που εκτελέστηκαν και αναλύεται η μορφή της.

8.1 Επίδραση φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών

Στην σχετική με το αντικείμενο βιβλιογραφία, επικρατεί η άποψη ότι όσο σκληρότερο είναι το υλικό, τόσο μεγαλύτερος είναι ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης (βλ. ενότητα 3.3.2). Ωστόσο δεν υφίσταται κάποια σαφής ένδειξη για τον επαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης.

Στην παρούσα έρευνα, διερευνήθηκε αρχικά η δυνατότητα συσχέτισης των συντελεστών αναπήδησης με τις φυσικές και τις μηχανικές παραμέτρους των υλικών. Καταλληλότερη ιδιότητα για την έκφραση των συσχετίσεων, όπως προέκυψε, είναι η σκληρότητα που προσδιορίζεται με την σφύρα Schmidt.

Πιο συγκεκριμένα, στην διερεύνηση των δυναμικών συσχετίσεων (ενότητα 5.1), εξετάστηκαν με δοκιμές ελεύθερης πτώσης 11 διαφορετικά υλικά. Προέκυψε ότι ο κάθετος, ή ισοδύναμα ο κινηματικός, συντελεστής αναπήδησης αυξάνεται γραμμικά με την σκληρότητα του υλικού. Στις δοκιμές παραβολικής ρίψης, όπου εξετάστηκαν 5 από τα υλικά, παρατηρήθηκε

ότι οι συντελεστές αναπήδησης εμφανίζουν μεγάλη διασπορά και εξαρτώνται σημαντικά από την γωνία πρόσκρουσης. Ωστόσο, τα σκληρότερα υλικά χαρακτηρίζονται εν γένει από υψηλότερο κάθετο και κινηματικό συντελεστή αναπήδησης.

Αντίστοιχη εικόνα προκύπτει και από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν για την διερεύνηση των χαρακτηριστικών πρόσκρουσης (ενότητα 5.2), όπου οι δοκιμές έγιναν με τέσσερα διαφορετικά υλικά. Γενικώς, το μέγεθος του κινηματικού ή του καθέτου συντελεστή αναπήδησης εξαρτάται σημαντικά από την μάζα του τεμάχους και την ταχύτητα πρόσκρουσης. Από τις δοκιμές ελεύθερης πτώσης καταρτίστηκε μια ποιοτική συσχέτιση του συντελεστή αναπήδησης με την ταχύτητα και την μάζα (σχέση 5.3 και πίνακας 5.12), που επαληθεύει εμμέσως ότι η αναπήδηση είναι ανάλογη της σκληρότητας του υλικού. Από τις δοκιμές παραβολικής ρίψης προκύπτει ότι η σχέση αυτή αφορά τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης και την κάθετη συνιστώσα της κίνησης. Αντιθέτως, η επιρροή της μάζας του τεμάχους και της ταχύτητας πρόσκρουσης δεν ήταν εμφανής στον κινηματικό συντελεστή αναπήδησης.

Σύμφωνα με τους Imre et al. (2008), ο συντελεστής αναπήδησης αποτελεί ιδιότητα της κρούσης και όχι αποκλειστικά του υλικού. Θεωρώντας ότι η απόσβεση της κίνησης εξαιτίας της κρούσης οφείλεται στην παραμόρφωση των σωμάτων που μετέχουν σε αυτή (βλ. ενότητα 3.2.1), τότε η μεταβολή των ιδιοτήτων ενός εκ των δύο θα έχει ως αντίκτυπο την διαφοροποίηση των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων και άρα της αναπήδησης.

Στην βιβλιογραφία, η σχέση μεταξύ του καθέτου συντελεστή αναπήδησης και της σκληρότητας του υλικού έχει ποσοτικοποιηθεί από τους Richards et al. (2001) και τους Ansari et al. (2015). Οι σχέσεις που προτείνουν λαμβάνουν υπόψη και την περίπτωση κρούσης μεταξύ ανόμοιων υλικών, καθώς είναι εκφρασμένες σύμφωνα με την σκληρότητα της επιφάνειας πρόσκρουσης αλλά και του τεμάχους.

Στην παρούσα έρευνα, εξετάστηκαν παραμετρικά οι κρούσεις μεταξύ ανόμοιων υλικών, μέσω της ελεύθερης πτώσης σφαιρικών τεμαχών, για τους δυνατούς συνδυασμούς μεταξύ τριών υλικών (βλ. ενότητα 5.2.3). Όταν η κρούση γίνεται σε επιφάνεια πρόσκρουσης με μεγαλύτερη σκληρότητα από το τέμαχος, τότε η αναπήδηση είναι μεγαλύτερη από αυτή που θα συνέβαινε αν η επιφάνεια πρόσκρουσης ήταν ίδιας σκληρότητας. Τούτο, είναι σε συμφωνία με τις συσχετίσεις των Richards et al. (2001) και Ansari et al. (2015), καθώς οι συντελεστές που εφαρμόζονται στην σκληρότητα της επιφάνειας πρόσκρουσης (σχέσεις 3.35 και 3.37 αντίστοιχα) είναι μεγαλύτεροι αυτών που εφαρμόζονται στην σκληρότητα των τεμαχών, κατ' επέκταση έχουν μεγαλύτερο βάρος στην εκτίμηση του καθέτου συντελεστή αναπήδησης.

Επίσης, σε συμφωνία είναι και τα αποτελέσματα των δοκιμών που έγιναν για την διερεύνηση της αποσάθρωσης (ενότητα 5.4.1). Στις δοκιμές αυτές χρησιμοποιήθηκε σφαιρικό τέμαχος από τσιμεντοειδές ένεμα και τρεις επιφάνειες πρόσκρουσης από σχιστόλιθο, που είχαν διαφορετικό βαθμό αποσάθρωσης. Η αναπήδηση, όπως αναμενόταν, ήταν μεγαλύτερη στις λιγότερο αποσθρωμένες επιφάνειες πρόσκρουσης, οι οποίες συγχρόνως έχουν υψηλότερη σκληρότητα σφύρας Schmidt.

Αναφορικά με τον εφαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης, δεν προέκυψε κάποια σύνδεση με τις ιδιότητες του υλικού. Δεν παρατηρήθηκε αξιοσημείωτη διαφοροποίηση ως προς το υλικό, ούτε από τις δοκιμές με κυβικά τεμάχια που είχαν λειασμένες ακμές (ενότητα 5.1.2), ούτε από αυτές με τα σφαιρικά τεμάχια (ενότητα 5.2.2). Επισημαίνεται ότι ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης δεν ορίζεται στις δοκιμές ελεύθερης πτώσης, συνεπώς το συμπέρασμα αυτό προκύπτει από τις δοκιμές παραβολικής ρίψης.

Η μη εξάρτηση του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης από την φύση του υλικού, έχει παρατηρηθεί και στις έρευνες των Richards et al. (2001) και Ansari et al. (2015). Ωστόσο, οι τιμές που προτείνονται στην βιβλιογραφία (Hoek, 1987; Pfeiffer and Bowen, 1989, κ.α. - βλ. ενότητα 3.2.4), διαφοροποιούνται με το είδος του πετρώματος και συνεπώς υπονοείται εμμέσως ότι εξαρτώνται από αυτό. Όπως έχει ήδη σχολιασθεί στην ενότητα 3.2.6, οι τιμές αυτές απέχουν αισθητά, για την πλειοψηφία των περιπτώσεων, από αυτές που έχουν προσδιοριστεί μέσω πειραματικών διερευνήσεων.

Στο επόμενο κεφάλαιο προτείνεται μια εμπειρική συσχέτιση του καθέτου συντελεστή αναπήδησης με την σκληρότητα και άλλες παραμέτρους που τον επηρεάζουν, όπου οι συσχετίσεις των Richards et al. (2001) και Ansari et al. (2015) συγκρίνονται σε ποσοτική βάση.

8.2 Επίδραση μάζας και ταχύτητας πρόσκρουσης

Για την εξέταση της επίδρασης που έχει η ταχύτητα πρόσκρουσης και η μάζα του τεμάχους στους συντελεστές αναπήδησης, πραγματοποιήθηκε εργαστηριακή διερεύνηση με δοκιμές ελεύθερης πτώσης σφαιρικών τεμαχίων σε οριζόντια επιφάνεια πρόσκρουσης. Με τον τρόπο αυτό απαλείφονται σημαντικές παράμετροι που επηρεάζουν την απόκριση του τεμάχους (όπως το σχήμα του, η γωνία πρόσκρουσης κ.α.) και προκαλούν κυρίως την αύξηση της διασποράς των συντελεστών αναπήδησης.

Από τις δοκιμές ελεύθερης πτώσης προέκυψε ότι η αύξηση της ταχύτητας πρόσκρουσης προκαλεί τον περιορισμό της αναπήδησης και επομένως την μείωση του καθέτου συντελεστή αναπήδησης. Τούτο είναι σε συμφωνία με το σύνολο των σχετικών δημοσιεύσεων. Ωστόσο, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παρούσας πειραματικής διερεύνησης (βλ. ενότητα 5.2), εξίσου σημαντική είναι η επίδραση της μάζας του τεμάχους. Πιο συγκεκριμένα, η αύξηση της μάζας προκαλεί επίσης μείωση του καθέτου συντελεστή αναπήδησης.

Στην βιβλιογραφία, διατίθενται μεθοδολογίες προσαρμογής του συντελεστή αναπήδησης με την βάση την ταχύτητα πρόσκρουσης (βλ. ενότητα 3.3.4). Έτσι, η επίδραση της μάζας δεν μπορεί να ληφθεί υπόψη. Επιπρόσθετα εμφανίζουν μεταξύ τους σημαντικές διαφορές, αρχικά ως προς την φιλοσοφία που τις διέπει, αλλά επίσης και ως προς τον βαθμό που επιτελείται η προσαρμογή των συντελεστών.

Η πρώτη φιλοσοφία για τις μεθοδολογίες προσαρμογής συναντάται στην σχέση του Johnson (1985), που αποδίδει απευθείας τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης συναρτήσει της ταχύτητας πρόσκρουσης. Ωστόσο, αυτό είναι σε αντίθεση με την επικρατούσα άποψη αναφορικά με την επίδραση του είδους του υλικού, που επαληθεύεται καθολικά και από την παρούσα έρευνα (βλ. ενότητα 8.1 κ.α.). Επί της ουσίας, τέτοιου είδους προσέγγιση δεν μπορεί να συνεκτιμήσει την επίδραση του είδους του υλικού, καθώς δεν υπεισέρχεται ως μεταβλητή.

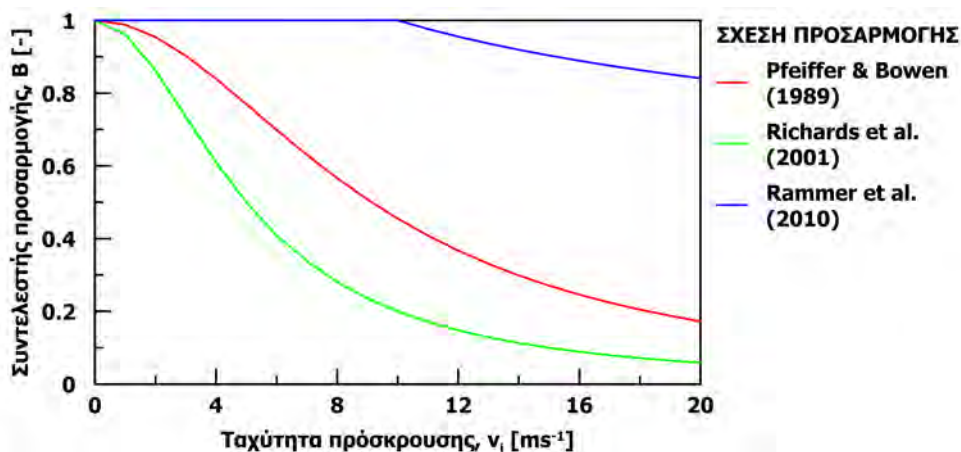
Στην λογική αυτή εμπίπτουν και οι δυο συσχετίσεις των Ushiro et al. (2000), ωστόσο όντας προσδιορισμένες για δυο συγκεκριμένα υλικά, εμμέσως εξαρτώνται από την φύση του υλικού. Όμως η σύγκρισή τους με τα δεδομένα της παρούσας έρευνας δεν είναι ευχερής καθώς δεν είναι διαθέσιμες οι λεπτομέρειες για τις συνθήκες εκτέλεσης των δοκιμών (π.χ. σχήμα και μάζα τεμάχους, γωνία πρόσκρουσης κ.α.) που επιδρούν σημαντικά στο μέγεθος του καθέτου συντελεστή αναπήδησης, όπως σχολιάσθηκε εκτενώς στα κεφάλαια της παρουσίασης των πειραματικών διερευνήσεων.

Αντιθέτως, οι σχέσεις των Pfeiffer and Bowen (1989) και Rammer et al. (2010) έχουν διαφορετική φιλοσοφία. Προσδιορίζουν έναν συντελεστή προσαρμογής, που εφαρμόζεται στην χαρακτηριστική τιμή του καθέτου συντελεστή αναπήδησης, από όπου προσδιορίζεται ο συντελεστής αναπήδησης για την αναμενόμενη ταχύτητα πρόσκρουσης.

Ωστόσο, η έννοια της χαρακτηριστικής τιμής του καθέτου συντελεστή αναπήδησης δεν είναι σαφώς ορισμένη, καθώς δεν αναφέρεται σε συγκεκριμένες συνθήκες πρόσκρουσης. Στην πράξη, χρησιμοποιούνται προτεινόμενες τιμές (βλ. ενότητα 3.2.4) που βασίζονται είτε σε εμπειρικές εκτιμήσεις είτε σε σχετικές ερευνητικές εργασίες.

Επίσης, η μορφή των καμπυλών που περιγράφουν τους συντελεστές προσαρμογής συναρτήσει της ταχύτητας πρόσκρουσης είναι διαφορετική. Στην σχέση των Pfeiffer and Bowen (1989) η μεταβολή του συντελεστή προσαρμογής (B_v) περιγράφεται από μια σιγμοειδή καμπύλη, η οποία εξαρτάται από την ταχύτητα αναφοράς (v_{ref}) που ορίζεται ως η ταχύτητα για την οποία ο κάθετος συντελεστής περιορίζεται κατά 50%.

Ως ταχύτητα αναφοράς προτείνεται η τιμή $v_{ref} = 9.14ms^{-1}$, χωρίς ωστόσο να υπάρχει αναφορά στην μέθοδο προσδιορισμού της. Οι Richards et al. (2001) μετά από εργαστηριακή διερεύνηση με δοκιμές ελεύθερης πτώσης σε επιφάνειες υπό κλίση, προτείνουν την ταχύτητα αναφοράς ίση με $v_{ref} = 5ms^{-1}$. Στο σχήμα 8.1 προβάλλονται οι καμπύλες που αναπαριστούν τις εν λόγω σχέσεις προσαρμογής.

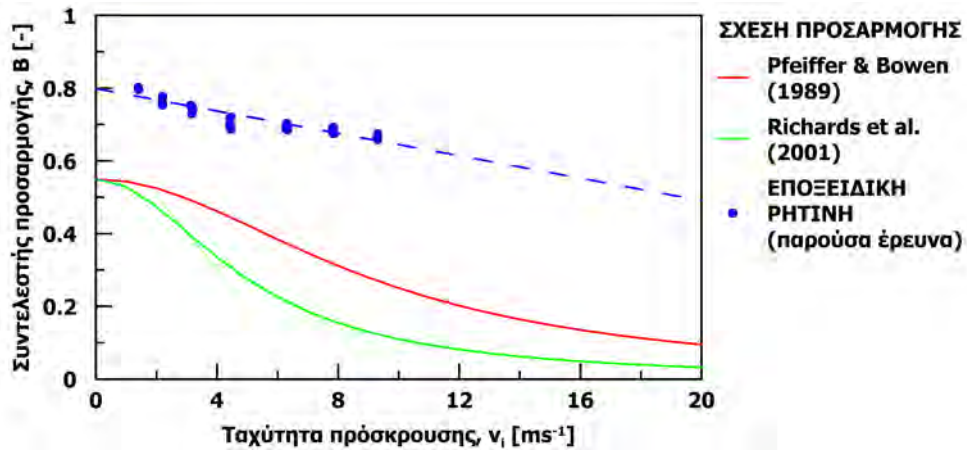


Σχήμα 8.1: Σύγκριση των συντελεστών προσαρμογής του καθέτου συντελεστή αναπήδησης βάσει της ταχύτητας πρόσκρουσης

Δεδομένου ότι η εξάρτηση από την μάζα είναι εξίσου σημαντική (βλ. σχήμα 5.22), η απευθείας σύγκριση των αποτελεσμάτων της παρούσας έρευνας με τις παραπάνω συσχετίσεις δεν έχει ουσία. Ωστόσο, έχει ενδιαφέρον η εξέταση του ρυθμού μεταβολής του καθέτου συντελεστή αναπήδησης συναρτήσει της ταχύτητας πρόσκρουσης. Για τον σκοπό αυτό, η αξιολόγηση των παραπάνω συσχετίσεων γίνεται με τα δεδομένα από τις δοκιμές ελεύθερης πτώσης σφαιρικών τεμαχών διαμέτρου $d = 40mm$ από εποξειδική ρητίνη (σειρές δοκιμών 8.8 έως 8.14), καθώς με αυτά επιτεύχθηκε το μεγαλύτερο εύρος ταχυτήτων πρόσκρουσης. Έτσι, τα δεδομένα αυτά προέρχονται από δοκιμές με τεμάχια ίσου μεγέθους, επομένως δεν επηρεάζει η μάζα του τεμαχίου την μεταβολή του καθέτου συντελεστή αναπήδησης.

Αρχικά αξιολογείται η σχέση των Pfeiffer and Bowen (1989), που είναι και η πλέον διαδεδομένη στα λογισμικά καταπτώσεων. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η σχέση αυτή περιγράφει την μεταβολή του συντελεστή προσαρμογής B_v με μια σιγμοειδή καμπύλη, συνεπώς και η μεταβολή του καθέτου συντελεστή αναπήδησης θα εμφανίζει τέτοια μορφή. Ωστόσο, τα σημεία από την παρούσα εργαστηριακή διερεύνηση προσεγγίζονται από ευθεία γραμμή (Σχήμα 8.2).

Για να γίνει η σύγκριση των εν λόγω πειραματικών αποτελεσμάτων με την συσχέτιση των Pfeiffer and Bowen (1989), πρέπει αρχικά να εκτιμηθεί η χαρακτηριστική τιμή του καθέτου συντελεστή αναπήδησης, διαδικασία που όπως αναφέρθηκε προηγουμένως είναι προβληματική. Αξιοποιώντας τις προτεινόμενες τιμές που συναντώνται στην βιβλιογραφία (βλ. πίνακα 3.6), το υλικό ταξινομείται ως σκληρός βράχος, έτσι μια εύλογη επιλογή χαρακτηριστικής τιμής είναι $n_{COR} = 0.55$. Στο σχήμα 8.2, αναπαρίσταται με συνεχή γραμμή η σχέση των Pfeiffer and Bowen (1989), όπου η ταχύτητα αναφοράς ισούται με $9.14ms^{-1}$ και με διακεκομμένη γραμμή με την ταχύτητα αναφοράς που προτείνουν οι Richards et al. (2001). Επίσης, σημαίνονται τα δεδομένα από τις σειρές δοκιμών 8.8 έως 8.14 προς σύγκριση.



Σχήμα 8.2: Εφαρμογή των μεθοδολογιών προσαρμογής του καθέτου συντελεστή αναπήδησης βάσει της ταχύτητας πρόσκρουσης για τα χαρακτηριστικά της διερεύνησης ελεύθερης πτώσης με σφαιρικά τεμάχια εποξειδικής ρητίνης

Όπως φαίνεται στο σχήμα 8.2, οι τιμές του καθέτου συντελεστή αναπήδησης που αποδίδει η προσαρμογή των Pfeiffer and Bowen (1989) είναι σημαντικά μικρότερες από αυτές που προσδιορίστηκαν πειραματικά. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς η χαρακτηριστική τιμή του καθέτου συντελεστή αναπήδησης που χρησιμοποιήθηκε είναι μικρότερη από τις τιμές που προσδιορίστηκαν πειραματικά που απομειώνονται περαιτέρω με τον συντελεστή προσαρμογής.

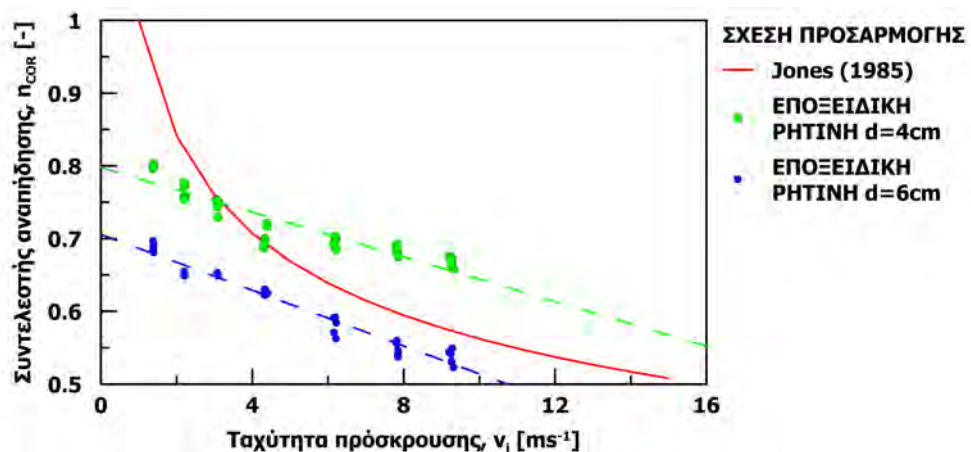
Για την καλύτερη εκτίμηση της χαρακτηριστικής τιμής του καθέτου συντελεστή αναπήδησης, βαθμονομήθηκε η σχέση με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Για ταχύτητα αναφοράς $v_{ref} = 9.14\text{ms}^{-1}$, όπως προτείνεται από τους Pfeiffer and Bowen (1989), προκύπτει χαρακτηριστική τιμή του καθέτου συντελεστή αναπήδησης ίση με 0.91, ενώ με ταχύτητα αναφοράς $v_{ref} = 5\text{ms}^{-1}$ (Richards et al., 2001), η χαρακτηριστική τιμή του καθέτου συντελεστή αναπήδησης ισούται με 1.1. Ωστόσο και στις δυο περιπτώσεις ο συντελεστής συσχέτισης (R^2) είναι αρνητικός, υποδηλώνοντας την απουσία συσχέτισης. Επίσης, για τις συνθήκες των εν λόγω δοκιμών (ελεύθερη πτώση σε οριζόντια επιφάνεια πρόσκρουσης) δεν μπορεί ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης να υπερβαίνει την μονάδα, όπως συμβαίνει με την ταχύτητα αναφοράς των 5ms^{-1} .

Περαιτέρω, βαθμονομήθηκαν συγχρόνως και οι δυο παράμετροι αναφοράς (v_{ref}, n_{COR}^{ref}), πάλι με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Η ταχύτητα πρόσκρουσης προέκυψε ίση με 21.9ms^{-1} και η χαρακτηριστική τιμή του καθέτου συντελεστή αναπήδησης ίση με 0.77. Στην βαθμονόμηση αυτή, ο συντελεστής συσχέτισης (R^2) ισούται με περίπου 0.7, που από άποψη στατιστικής είναι αποδεκτός. Όμως, τα δεδομένα δεν περιγράφονται ικανοποιητικά καθώς η αυξημένη τιμή της ταχύτητας αναφοράς εξαναγκάζει τον αρχικό κλάδο της σιγμοειδούς καμπύλης σε ευθεία, που για το εξεταζόμενο εύρος ταχυτήτων διέρχεται κοντά από τα εν λόγω σημεία. Ως αποτέλεσμα το σφάλμα εμφανίζει έντονη συστηματικότητα, καθιστώντας την σχέση αυτή ανεπαρκή για την περιγραφή της αναπήδησης στις εν λόγω δοκιμές.

Επαναλαμβάνοντας την παραπάνω ανάλυση αλλά χρησιμοποιώντας δεδομένα από άλλες σειρές δοκιμών, η συμπεριφορά είναι εφάμιλλη. Συνεπώς, η εξάρτηση του συντελεστή αναπήδησης από την ταχύτητα πρόσκρουσης, δεν μπορεί να αναπαραχθεί ικανοποιητικά από την σχέση των Pfeiffer and Bowen (1989).

Αντίστοιχα ζητήματα για τον προσδιορισμό της χαρακτηριστική τιμής του καθέτου συντελεστή αναπήδησης εγείρονται και στην σχέση των Rammer et al. (2010), όπου επίσης δεν υπεισέρχεται η επίδραση της μάζας. Περαιτέρω στο εύρος τιμών που εξετάστηκε στη παρούσα έρευνα (0 έως 10ms^{-1}), η εν λόγω σχέση αποδίδει αυτούσια την χαρακτηριστική τιμή. Η θεώρηση αυτή είναι εύλογη, καθώς η μεθοδολογία αυτή στηρίζεται στο γεγονός ότι οι προτεινόμενες τιμές έχουν προκύψει από την εμπειρία, δοκιμές και συμβάντα που προέρχονται κυρίως από αυτό το εύρος ταχυτήτων. Ωστόσο, με βάση τα αποτελέσματα των δοκιμών, καθίσταται σαφές ότι για το διάστημα αυτό η μεταβολή του συντελεστή αναπήδησης εξαιτίας της ταχύτητας πρόσκρουσης είναι σημαντική, ακόμα και αν αγνοηθεί η επίδραση της μάζας.

Τέλος, ούτε η σχέση του Johnson (1985) μπορεί να περιγράψει τα πειραματικά αποτελέσματα ικανοποιητικά. Για την σειρά δοκιμών που εξετάζεται, υπάρχει κοινός τόπος με τις τιμές που εκτιμώνται από την εν λόγω σχέση για ταχύτητες πρόσκρουσης της τάξης των 4ms^{-1} , καθώς τα αποτελέσματα προβάλλονται κοντά στην καμπύλη (Σχήμα 8.3). Ωστόσο, εάν εξετασθεί με άλλη σειρά δοκιμών (π.χ. τις σειρές 8.22 έως 8.28 όπου η διάμετρος του τεμάχους είναι 60mm) τότε η απόκλιση αυξάνεται (Σχήμα 8.3) καθώς επιδρά πλέον και η μάζα του τεμάχους.



Σχήμα 8.3: Σύγκριση του καθέτου συντελεστή αναπήδησης από την σχέση του Johnson (1985) με τα αποτελέσματα των διερευνήσεων ελεύθερης πτώσης με σφαιρικά τεμάχια από εποξειδική ρητίνη διαμέτρου 4cm και 6cm

Οι Bourrier and Hungr (2011) διατύπωσαν προσφάτως μια σχέση προσαρμογής του καθέτου συντελεστή αναπήδησης που βασίζεται στην ορμή πρόσκρουσης (βλ. ενότητα 3.3.4.3), με σκοπό την περιγραφή της επίδρασης που έχει η σφοδρότητα της κρούσης. Η σχέση αυτή έχει υπερβολική μορφή, για μηδενική ορμή πρόσκρουσης καταλήγει στην χαρακτηριστική τιμή του καθέτου συντελεστή αναπήδησης και για $M_n \gg M_{n,ref}$ τείνει ασυμπτωτικά στο μηδέν.

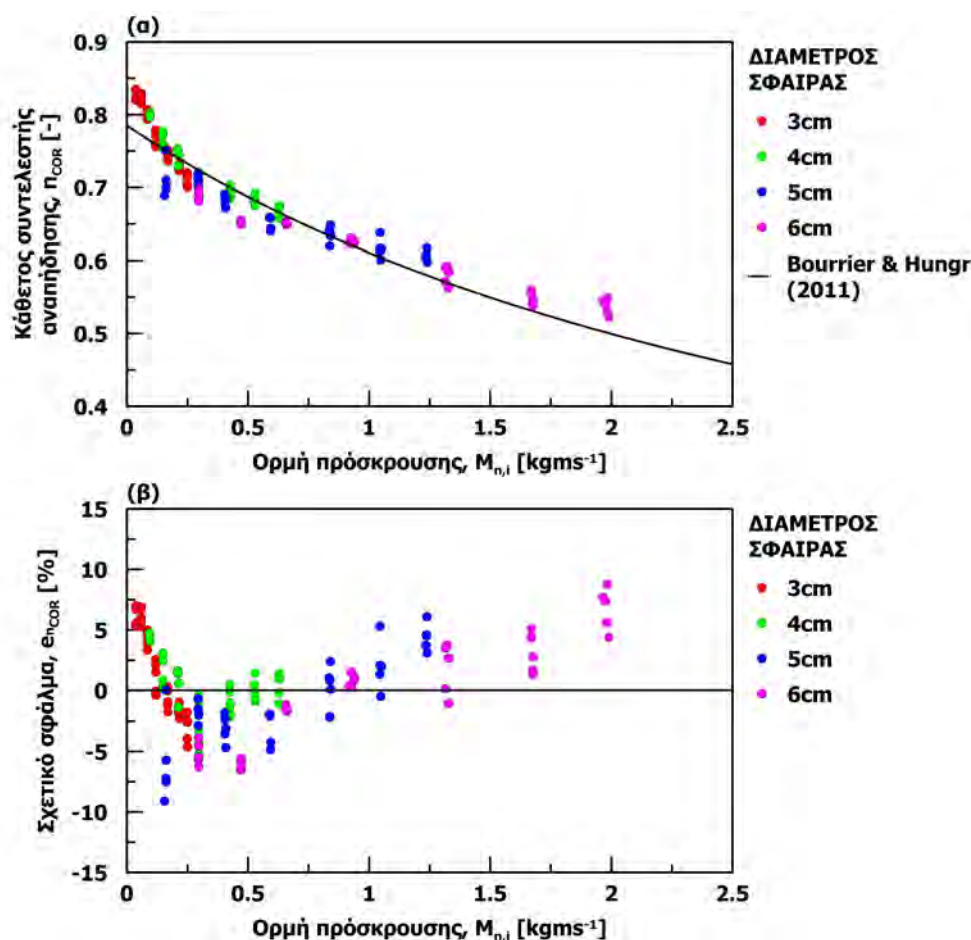
Ωστόσο, η παράμετρος $M_{n,ref}$ δεν έχει βαθμονομηθεί, καθώς η σχέση καταρτίστηκε διαισθητικά ώστε να ικανοποιούνται ποιοτικά οι αρχές της μηχανικής των κρούσεων. Επίσης, για την εφαρμογή της σχέσης πρέπει να εκτιμηθεί η χαρακτηριστική τιμή του καθέτου συντελεστή αναπήδησης, διαδικασία που όπως αναφέρθηκε προηγουμένως έχει σημαντικά μειονεκτήματα.

Σε μια προσπάθεια βαθμονόμησης της εν λόγω σχέσης, χρησιμοποιείται το σύνολο των δεδομένων από τις δοκιμές ελεύθερης πτώσης με τεμάχια από εποξειδική ρητίνη, καθώς το εύρος της ορμής πρόσκρουσης στις δοκιμές με το υλικό αυτό είναι το μεγαλύτερο διαθέσιμο. Ωστόσο, επιλέγοντας χαρακτηριστική τιμή του καθέτου συντελεστή αναπήδησης σύμφωνα με τις συστάσεις της βιβλιογραφίας (π.χ. $n_{COR} = 0.55$), η βαθμονόμηση καθίσταται ανούσια. Όπως προηγουμένως, η τιμή είναι μικρότερη από την πλειοψηφία τιμών του καθέτου συντελεστή αναπήδησης που προσδιοριστήκαν πειραματικά. Συνεπώς, εκ των πραγμάτων δεν θα υπάρξει σύγκλιση στην διαδικασία βαθμονόμησης.

Έτσι η βαθμονόμηση γίνεται συγχρόνως και για τις δυο παραμέτρους (n_{COR}^{ref} και $M_{n,ref}$). Εφαρμόζοντας την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων, η ορμή αναφοράς ισούται με 3.5kgms^{-1} και η χαρακτηριστική τιμή του καθέτου συντελεστή αναπήδηση ίση με 0.785. Ο συντελεστής συσχέτισης της βαθμονόμησης είναι $R^2 = 0.88$, δηλαδή αρκούντως ικανοποιητικός και σημαντικά μεγαλύτερος συγκριτικά με τις βαθμονομήσεις των μεθοδολογιών που περιορίζονται στην ταχύτητα πρόσκρουσης.

Στο σχήμα 8.4-α αναπαρίστανται η εν λόγω σχέση και προβάλλονται τα σημεία από την πειραματική διερεύνηση που χρησιμοποιήθηκαν στην βαθμονόμηση. Παρατηρείται ότι υπάρχει καλή σύνδεση της θεωρητικής αυτής μεθοδολογίας με τα πειραματικά δεδομένα, άλλωστε τούτο υπαγορεύεται και από τον υψηλό συντελεστή συσχέτισης R^2 . Ωστόσο, το σφάλμα εμφανίζει κάποια συστηματικότητα (Σχήμα 8.4-β) που συνεπάγεται είτε ότι υπάρχει επιπρόσθετη επίδραση μίας ή περισσότερων παραμέτρων που δεν λαμβάνονται υπόψη, είτε ότι η μορφή της σχέσης δεν είναι η πλέον κατάλληλη. Σε κάθε περίπτωση πάντως, η προσαρμογή του συντελεστή αναπήδησης με βάση την ορμή του τεμάχους προσεγγίζει καλύτερα από τις άλλες μεθόδους τα αποτελέσματα της εργαστηριακής διερεύνησης.

Επίσης, στο σχήμα 8.4-α αποκαλύπτεται μια ενδιαφέρουσα σχέση: το μέγεθος του συντελεστή αναπήδησης μεταβάλλεται με την ορμή πρόσκρουσης χωρίς να διακρίνεται η διαφοροποίηση της μάζας του τεμάχους. Συνεπώς, η ορμή έχει την δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί για την προσαρμογή του συντελεστή αναπήδησης στην σφοδρότητα της κρούσης.



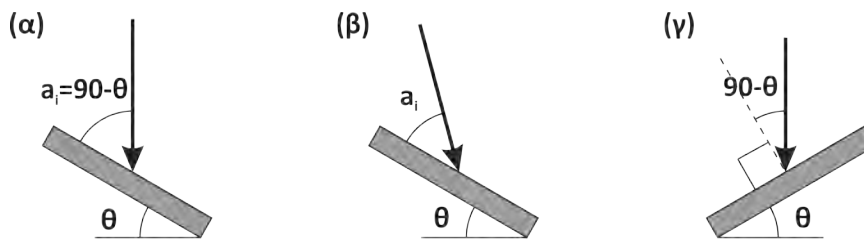
Σχήμα 8.4: Βαθμονόμηση την σχέσης των Bourrier and Hungr (2011): (α) σύγκριση του καθέτου συντελεστή αναπήδησης με τα αποτελέσματα των δοκιμών ελεύθερης πτώσης τεμαχών από εποξειδική ρητίνη και (β) παραμένον σφάλμα στην βαθμονόμηση

8.3 Επίδραση γωνίας πρόσκρουσης

Από το σύνολο των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν, προκύπτει ότι η γωνία πρόσκρουσης έχει σημαντική επίδραση στην τροχιά του τεμάχους και κατ' επέκταση στους συντελεστές αναπήδησης. Στην βιβλιογραφία υπάρχει γενικώς συμφωνία μεταξύ των αντίστοιχων ερευνών πως η αύξηση της γωνίας πρόσκρουσης έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του καθέτου συντελεστή αναπήδησης.

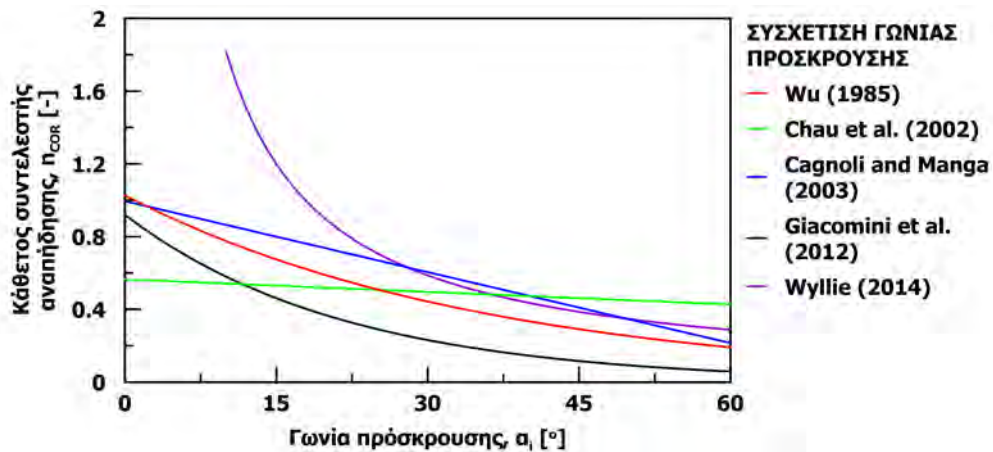
Ωστόσο, ο τρόπος που το συμπέρασμα αυτό είναι διατυπωμένο διαφέρει μεταξύ των ερευνών, καθώς είτε χρησιμοποιείται η γωνία πρόσκρουσης, είτε η κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης. Όταν η απελευθέρωση του τεμάχους γίνεται με ελεύθερη πτώση και η επιφάνεια πρόσκρουσης βρίσκεται υπό κλίση (θ), τότε η γωνία πρόσκρουσης (α_i) είναι η συμπληρωματική γωνία της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης (Σχήμα 8.5-α). Στην περίπτωση που η τροχιά είναι παραβολική, το άνω όριο της γωνίας πρόσκρουσης είναι η συμπληρωματική γωνία της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης, εφόσον η κρούση είναι ομόρροπη (Σχήμα 8.5-β).

Στην περίπτωση της αντίρροπης κρούσης, δύναται η γωνία πρόσκρουσης να είναι έως την συμπληρωματική γωνία της κλίσης του πρανούς συν 90° (Σχήμα 8.5-γ).



Σχήμα 8.5: Σχέση γωνίας πρόσκρουσης με την κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης

Στην ενότητα 3.3.1 παρατίθενται οι συσχετίσεις των συντελεστών αναπήδησης με την κλίση της επιφάνειας ή με την γωνία πρόσκρουσης από τα αποτελέσματα διαφόρων ερευνών και αναπαρίστανται συγκεντρωτικά στο σχήμα 8.6.



Σχήμα 8.6: Συσχετίσεις γωνίας πρόσκρουσης με τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης από την βιβλιογραφία

Τα στοιχεία αυτά προέρχονται από δοκιμές στο εργαστήριο (Wu, 1985; Chau et al., 2002; Cagnoli and Manga, 2003), στο πεδίο (Giacomini et al., 2012) και από ανάδρομες αναλύσεις φυσικών καταπτώσεων (Wyllie, 2014a). Έτσι, οι συνθήκες κρούσης (ταχύτητα πρόσκρουσης, μάζα και σχήμα τεμάχους κ.α.) είναι διαφορετικές, γεγονός που αντικατοπτρίζεται στην ασυμφωνία που εμφανίζουν οι παραπάνω σχέσεις στο μέγεθος του καθέτου συντελεστή αναπήδησης.

Οι δοκιμές των Wu (1985) και Chau et al. (2002) πραγματοποιήθηκαν με κατακόρυφη ρίψη σε κεκλιμένη επιφάνεια ενώ στις υπόλοιπες η τροχιά ήταν παραβολική. Η μείωση του καθέτου συντελεστή αναπήδησης με την αύξηση της γωνίας πρόσκρουσης παρατηρείται και στους δυο τύπους δοκιμών. Ωστόσο, στις δύο πρώτες διερευνήσεις η μεταξύ τους σχέση είναι γραμμική ενώ στις υπόλοιπες εκθετική. Το γεγονός αυτό ενδεχομένως να είναι τυχαίο ή μπορεί να οφείλεται στην περιορισμένη διαφοροποίηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών πρόσκρουσης που υπάρχει στις δοκιμές ελεύθερης πτώσης, με επακόλουθο τον περιορισμό του εύρους

διακύμανσης των συντελεστών αναπήδησης. Αξίζει να αναφερθεί ότι μόνο η σχέση του Wyllie (2014a) αποδίδει τιμές μεγαλύτερες της μονάδας.

Η μείωση του καθέτου συντελεστή αναπήδησης με την αύξηση της γωνίας πρόσκρουσης προκύπτει στην παρούσα έρευνα από όλες τις δοκιμές με ελεύθερη πτώση σε κεκλιμένη επιφάνεια και με παραβολική τροχιά πριν την κρούση. Επισημαίνεται ότι στις δοκιμές ελεύθερης πτώση σε οριζόντια επιφάνεια η γωνία πρόσκρουσης είναι σταθερή και ίση με 90° , συνεπώς δεν μπορούν να συνεκτιμηθούν. Ωστόσο υπό παρόμοιες συνθήκες πρόσκρουσης και για το ίδιο υλικό, αποδίδουν συστηματικά μικρότερες τιμές από ότι οι δοκιμές παραβολικής ρίψης, επαληθεύοντας την εν λόγω σχέση.

Οι δοκιμές παραβολικής ρίψης που πραγματοποιήθηκαν με κυβικά τεμάχια που είχαν λειασμένες ακμές, περιγράφουν την παραπάνω σχέση με εκθετική καμπύλη. Επιπρόσθετα, μεταβαίνοντας προς τις 90° , το μέγεθος του καθέτου συντελεστή αναπήδησης είναι ανάλογο της σκληρότητας του υλικού. Ωστόσο, οι τιμές εμφανίζουν σημαντικό εύρος που αποδίδεται στο σχήμα του τεμάχους. Επιπρόσθετα, παρατηρήθηκαν τιμές μεγαλύτερες της μονάδας σε μικρές γωνίες πρόσκρουσης $\alpha_i < 15^\circ$, δηλαδή σε περιπτώσεις όπου η εφαπτομενική συνιστώσα της ταχύτητας πρόσκρουσης είναι περίπου τέσσερις φορές μεγαλύτερη από την κάθετη συνιστώσα, που είναι σε συμφωνία με τις παρατηρήσεις του Broili (1977).

Χρησιμοποιώντας σφαιρικά τεμάχια, προκύπτει αντίστοιχη τάση αλλά καλύτερη κατάσταση αναφορικά με την διασπορά. Ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης μειώνεται εμφανώς όσο αυξάνεται η γωνία πρόσκρουσης, όμως το ίδιο συμβαίνει με την αύξηση της ταχύτητας πρόσκρουσης και της μάζας του τεμάχους. Το γεγονός αυτό αιτιολογεί την διαφοροποίηση που παρατηρείται στις σχέσεις της βιβλιογραφίας που παρουσιάζονται στο σχήμα 8.6 αλλά και στις τιμές που συναντώνται στην βιβλιογραφία (βλ. πίνακα 3.2.4), καθώς οι συνθήκες πρόσκρουσης είναι διαφορετικές.

Αντιστοίχως, παρόμοια τάση παρατηρείται και στις δοκιμές με ελλειπτικούς δίσκους, με τις μέγιστες τιμές των κάθετων συντελεστών αναπήδησης, ωστόσο οι ελάχιστες τιμές προσεγγίζουν το μηδέν ανεξαρτήτως της γωνίας πρόσκρουσης γεγονός που υποδεικνύει ότι μετά την κρούση υπάρχει πιθανότητα η κίνηση να εξελιχθεί ως κύλιση ή ολίσθηση.

Στις δοκιμές παραβολικής ρίψης που έγιναν σε επιφάνειες με διαφορετικό βαθμό τραχύτητας προέκυψε πάλι η ίδια σχέση. Επιπρόσθετα, στις δοκιμές που έγιναν με σφαιρικό τέμαχος παρατηρήθηκε ότι η διασπορά των τιμών του καθέτου συντελεστή αναπήδησης αυξάνεται με την τραχύτητα, ωστόσο περιορίζεται με την αύξηση της γωνίας πρόσκρουσης. Αντιθέτως, όταν το τέμαχος είναι πολυεδρικό εντείνεται ο ρυθμός μείωσης του καθέτου συντελεστή αναπήδησης με την αύξηση της γωνίας πρόσκρουσης, όμως η διασπορά δεν εξαρτάται πλέον από την τραχύτητα, αλλά υπερκαλύπτεται από την επίδραση του σχήματος και την διαφοροποίηση που προκαλεί στην γεωμετρία επαφής.

Αντίστοιχες τάσεις περιγράφουν και την απόκριση στις δοκιμές που έγιναν για την διερεύνηση του σχήματος με ελεύθερη πτώση σε κεκλιμένες επιφάνειες, τόσο στο πεδίο όσο και στο εργαστήριο. Στις δοκιμές αυτές, η σχέση μεταξύ καθέτου συντελεστή αναπήδησης και γωνίας πρόσκρουσης εκφράστηκε ως προς την κλίση του πρανούς. Περαιτέρω, προέκυψαν μεγαλύτερες τιμές στα σφαιρικά τεμάχια από ότι στα κυβικά και τα φυσικά, ενώ το πολυεδρικό τέμαχος εμφανίζει τιμές μεταξύ αυτών σε σφαιρικά και κυβικά τεμάχια.

Τέλος, στην διερεύνηση που έγινε για τον προσδιορισμό της εκτροπής, παρατηρήθηκαν αντίστοιχες τάσεις του καθέτου συντελεστή αναπήδησης με την γωνία πρόσκρουσης, τόσο στο πεδίο όσο και στο εργαστήριο. Η σχέση αυτή δύναται να εκφραστεί ως προς την κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης μόνο στις περίπτωση της ομόρροπης κρούσης. Όμως, στην γενική περίπτωση της λοξής κρούσης, η μεταβολή του καθέτου συντελεστή αναπήδησης δεν αποτυπώνεται στην κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης, καθώς αυτή παραμένει σταθερή. Αντιθέτως, η γωνία πρόσκρουσης περιγράφει με συστηματικό τρόπο την μεταβολή του καθέτου συντελεστή αναπήδησης, καθιστώντας προτιμότερη την χρήση της για την έκφραση συσχετίσεων. Επίσης, η σχέση αυτή δεν επηρεάζεται από το μέγεθος του τεμάχους και το μέτρο της ταχύτητας πρόσκρουσης, καθώς γίνεται εξίσου εμφανής στις δοκιμές που έγιναν στο πεδίο και το εργαστήριο.

Η γωνία πρόσκρουσης σχετίζεται και με τις τιμές του καθέτου συντελεστή αναπήδησης που είναι μεγαλύτερες της μονάδας. Γενικώς, στην βιβλιογραφία υπήρξε η τάση να αποκρύπτονται τιμές μεγαλύτερες της μονάδας, καθώς σε ορισμένες σημαντικές δημοσιεύσεις τέθηκε πεδίο ορισμού του καθέτου συντελεστή αναπήδησης το διάστημα 0 έως 1, κάτι που μεταφέρθηκε και στα σχετικά λογισμικά ανάλυσης των καταπτώσεων.

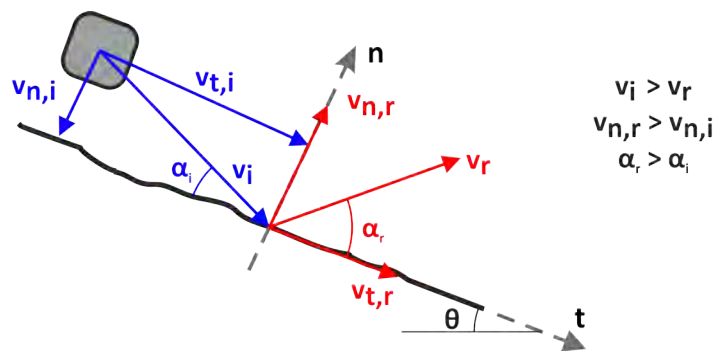
Για να είναι μεγαλύτερος από την μονάδα ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης, οι Buzzi et al. (2012) θεωρούν απαραίτητο το σχήμα του τεμάχους να είναι γωνιώδες, η επιφάνεια πρόσκρουσης να είναι τραχεία, να υπάρχει περιστροφική ταχύτητα και η γωνία πρόσκρουσης να είναι μικρή. Αντίστοιχα, οι Ferrari et al. (2013) θεωρούν ότι η ταχύτητα πρόσκρουσης πρέπει να είναι μικρότερη των 10ms^{-1} , το σχήμα του τεμάχους να είναι επίμηκες, να υπάρχει γωνιακή ταχύτητα, η γωνία πρόσκρουσης να είναι μικρή και ο μεγάλος άξονας του τεμάχους να είναι περίπου κάθετος στην επιφάνεια πρόσκρουσης.

Με έναυσμα τις μεγάλες τιμές του καθέτου συντελεστή αναπήδησης που παρατηρήθηκαν στην παρούσα έρευνα, πραγματοποιήθηκε η διερεύνηση με τους ελλειπτικούς δίσκους. Αν και οι συνθήκες στις δοκιμές αυτές ήταν ικανές για να προσδιορισθούν τιμές του καθέτου συντελεστή αναπήδησης μεγαλύτερες της μονάδας, κάτι τέτοιο δεν προέκυψε. Ωστόσο, σε συμφωνία με τους Ferrari et al. (2013), ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης παρουσίασε συστηματικά μεγαλύτερες τιμές όταν η κρούση πραγματοποιούταν με μικρή γωνία πρόσκρουσης και η γωνία μεταξύ του προσανατολισμού του μεγάλου άξονα της έλλειψης και της επιφάνειας πρόσκρουσης προσέγγιζε τις 90° (Ενότητα 5.3).

Γενικότερα, στις δοκιμές που εκτελέστηκαν στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας, προέκυψαν τιμές του καθέτου συντελεστή αναπήδησης μεγαλύτερες της μονάδας για όλα τα σχή-

ματα τεμαχών που εξετάστηκαν. Ωστόσο, για τα σφαιρικά απαιτείτο η επιφάνεια πρόσκρουσης να έχει τραχύτητα. Συνεπώς, το σχήμα του τεμάχους δεν αποτελεί απαραίτητη συνθήκη, αλλά η γεωμετρία επαφής. Επιπρόσθετα, σε όλες τις περιπτώσεις που προσδιορίστηκε κάθετος συντελεστής αναπήδησης μεγαλύτερος της μονάδας η γωνία πρόσκρουσης ήταν περιορισμένη.

Όσον αφορά τις υπόλοιπες συνθήκες που περιγράφουν οι προαναφερθέντες ερευνητές, δηλαδή την ύπαρξη γωνιακής ταχύτητας και το περιορισμένο μέγεθος της ταχύτητας πρόσκρουσης, δεν εξήχθησαν τα απαραίτητα δεδομένα για να επαληθευτεί αν πράγματι αποτελούν ικανές συνθήκες. Ωστόσο, στην παραβολική τροχιά το τέμαχος θα έχει, εν γένει, γωνιακή ταχύτητα. Η συνθήκη σχετικά με το μέτρο της ταχύτητας έχει ως λογική να είναι περιορισμένες οι απώλειες ταχύτητας μετά την κρούση, ώστε μετά την ανάλυσή του σε συνιστώσες, να προκύπτει μεγαλύτερη κάθετη συνιστώσα από αυτήν πριν την κρούση (Σχήμα 8.7). Έτσι, ικανή και αναγκαία συνθήκη είναι η γωνία αναπήδησης να είναι μεγαλύτερη από την γωνία πρόσκρουσης.



Σχήμα 8.7: Κινηματικά χαρακτηριστικά για την επίτευξη κάθετου συντελεστή αναπήδησης μεγαλύτερο της μονάδας

Περαιτέρω αξιολόγηση της γεωμετρίας επαφής δεν κατέστη δυνατόν να πραγματοποιηθεί, καθώς απαιτούνται λεπτομερέστερα στοιχεία της θέσης του τεμάχους κατά την διάρκεια της επαφής. Για την απόκτηση αυτών, πρέπει η χρονική απόσταση μεταξύ των διαδοχικών καταγραφών να είναι πολύ μικρότερη από την διάρκεια της κρούσης, απαίτηση που δεν ικανοποιείται με τον διαθέσιμο εξοπλισμό.

Όσον αφορά στον επαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης δεν υπάρχουν σαφείς ενδείξεις στην βιβλιογραφία για τον τρόπο που επηρεάζεται από την γωνία πρόσκρουσης. Γενικώς, έχει παρατηρηθεί μια ανεπαίσθητη αύξηση του όσο η γωνία πρόσκρουσης τείνει προς τις 90° .

Ωστόσο, όταν η γωνία πρόσκρουσης είναι 90° , ο επαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης δεν ορίζεται, ενώ πλησίον την γωνίας αυτής το μέγεθος του είναι ιδιαιτέρως ευαίσθητο στην γωνία αναπήδησης με αποτέλεσμα να προσδιορίζονται ιδιαιτέρως υψηλές τιμές, ειδικά στα γωνιώδη τεμάχη που η γωνία αναπήδησης εξαρτάται από τον προσανατολισμό του τεμάχους κατά την επαφή.

8.4 Επίδραση του σχήματος του τεμάχους

Αν και σαφώς αναφέρεται στην βιβλιογραφία ότι το σχήμα του τεμάχους επηρεάζει σημαντικά την αναπήδηση και άρα τους συντελεστές που την προσομοιώνουν, η επίδραση αυτή δεν έχει ποσοτικοποιηθεί ακόμα σε κάποια έρευνα από τις προηγούμενες έρευνες.

Σύμφωνα με τον C. Jones et al. (2000), το ακανόνιστο σχήμα τεμάχους είναι η βασική αιτία που προκαλεί την τυχαιότητα της αναπήδησης και κατ' επέκταση των συντελεστών αναπήδησης. Τούτο παρατηρήθηκε καθολικά στα αποτελέσματα της παρούσας πειραματικής διερεύνησης, όπως σχολιάσθηκε εκτενώς στα κεφάλαια 6, 7 και 8. Ενδεικτικά, η απόκριση στην κρούση των σφαιρικών τεμαχών ήταν επαναλήψιμη, δηλαδή η διακύμανση των τιμών ήταν περιορισμένη, ανεξαρτήτως του τύπου της δοκιμής (ελεύθερης πτώσης ή παραβολικής ρίψης). Αντιθέτως, με τα κυβικά τεμάχη, ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης λαμβάνει τιμές σε σημαντικό εύρος, ενώ ο εφαπτομενικός δεν εμφανίζει κάποια ευαισθησία στο σχήμα.

Από την εργαστηριακή διερεύνηση των Peng (2000) and Richards et al. (2001), ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης βρέθηκε τρεις φορές μικρότερος στα τεμάχη ακανόνιστου σχήματος από ότι στα σφαιρικά (σχέσεις 3.35 και 3.36). Επίσης, σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας, ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης δεν επηρεάζεται από το σχήμα. Τούτο επαληθεύεται συγκρίνοντας τις δοκιμές που έγιναν με τριδιάστατη καταγραφή και επεξεργασία (Σχήμα 6.6). Όταν τα τεμάχη είναι γωνιώδη και η κίνηση παραβολική, η διακύμανση του καθέτου συντελεστή αναπήδησης αυξάνεται περισσότερο, ενώ υπό συνθήκες είναι δυνατός ο προσδιορισμός τιμών μεγαλύτερων της μονάδας (βλ. ενότητα 8.3).

Στην έρευνα των Chau et al. (1999), έγιναν δοκιμές ελεύθερης πτώσης τεμαχών με σφαιρικό, κυλινδρικό, κυβικό και εξαεδρικό σχήμα. Παρατηρήθηκε πως ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης είναι ανεξάρτητος της γωνίας πρόσκρουσης στα σφαιρικά δοκίμια, ενώ με την αύξηση της γωνιότητας του τεμάχους λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές όσο η κρούση γίνεται υπό μικρότερη γωνία πρόσκρουσης. Ούτε στην έρευνα αυτή προέκυψε κάποια εξάρτηση του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης από το σχήμα του τεμάχους.

Οι παραπάνω παρατηρήσεις είναι απολύτως σύμφωνες με τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας. Όταν το τεμάχος είναι σφαιρικό, ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης εξαρτάται μόνο από την φύση του υλικού και την σφοδρότητα της κρούσης, όπως παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο. Επίσης, σε όλες τις δοκιμές με γωνιώδη τεμάχη, ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης καταλαμβάνει μεγαλύτερο εύρος με τον περιορισμό της γωνίας πρόσκρουσης. Πιο συγκεκριμένα, ανεξαρτήτως της γωνίας πρόσκρουσης, η ελάχιστη τιμή δύναται να είναι μηδενική υποδηλώνοντας μετατροπή του τύπου κίνησης σε ολίσθηση ή κύλιση, ενώ η μέγιστη τιμή αυξάνεται εκθετικά με την μείωση της γωνίας πρόσκρουσης συμπαρασύροντας έτσι το εύρος τιμών που λαμβάνει.

Ωστόσο, στα συμπεράσματα της έρευνας των Chau et al. (1999) αναφέρεται ότι στο διάστημα γωνιών πρόσκρουσης από 40 έως 60° (η μέγιστη γωνία πρόσκρουσης που διερευνήθηκε) δεν παρατηρείται διαφοροποίηση του καθέτου συντελεστή με το σχήμα. Αντιθέτως,

στην ανάλογη διερεύνηση που έγινε στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας, τόσο στο εργαστήριο όσο και στο πεδίο (ενότητα 6.1 και 7.2 αντίστοιχα), παρατηρείται αξιοσημείωτη διαφοροποίηση και στο εύρος αυτό.

Στην διερεύνηση των Buzzi et al. (2012) χρησιμοποιήθηκαν τεμάχια δίσκου με κυκλικό, ελλειπτικό, πενταγωνικό και τετραγωνικό σχήμα. Τα αποτελέσματα αξιολογήθηκαν ως προς την γωνιακή ταχύτητα, χωρίς να δοθεί εμφάση στην διαφοροποίηση του σχήματος. Ωστόσο, ερμηνεύοντας τα δημοσιευμένα αποτελέσματα, δεν προκύπτει συστηματική εξάρτηση του καθέτου ή του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης από το σχήμα.

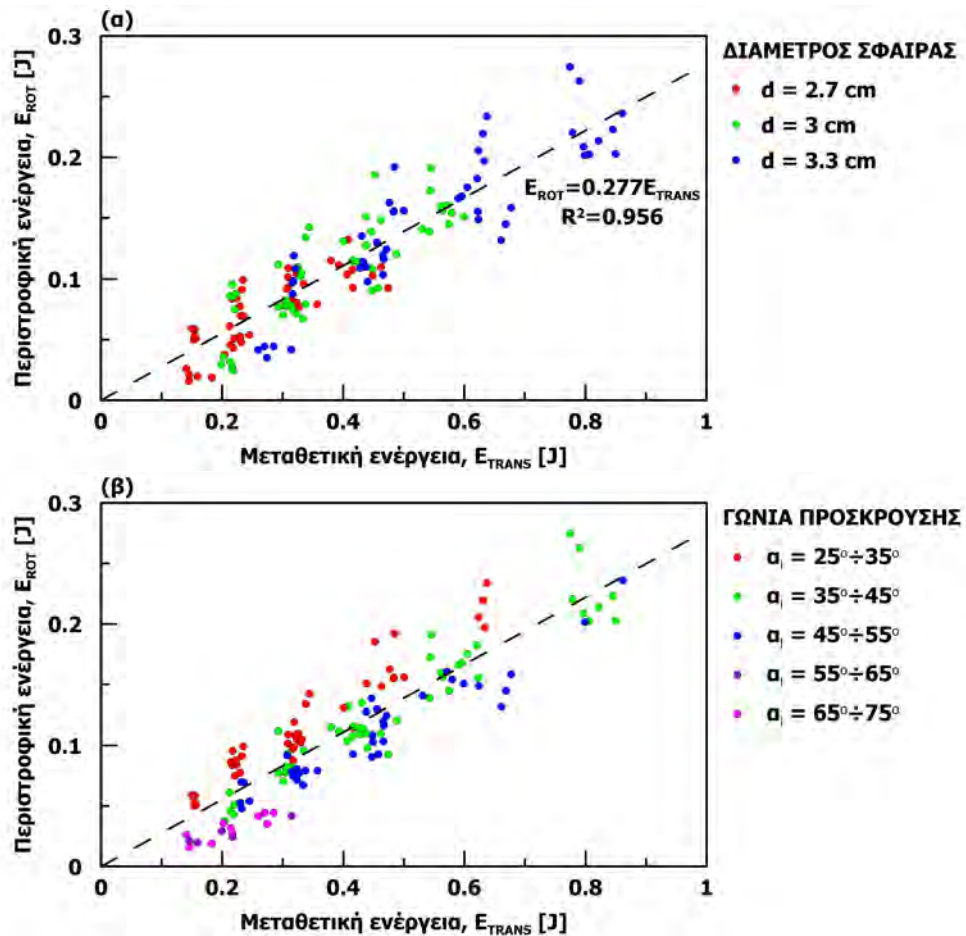
Τέλος, στις δοκιμές με τους ελλειπτικούς δίσκους (ενότητα 5.3), διαφοροποιήθηκε εμμέσως το σχήμα του τεμάχους, μεταβάλλοντας τον λόγο τον ημιαξόνων της έλλειψης. Ωστόσο, τα αποτελέσματα δεν έδειξαν κάποια ευαισθησία στους διαφορετικούς λόγους αξόνων που εξετάστηκαν. Στην ενότητα 7.8, τα αποτελέσματα των εν λόγω δοκιμών χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των θεωρητικών μεθοδολογιών που συνεκτιμούν το σχήμα του τεμάχους, την γωνιακή ταχύτητα και τον προσανατολισμό του τεμάχους κατά την επαφή.

8.5 Επίδραση γωνιακής ταχύτητας

Η Japan Railroad Association (από Chau et al., 2002) πρότεινε η συνεκτίμηση της γωνιακής ταχύτητας να γίνεται έμμεσα, ως ποσοστό της μεταθετικής ενέργειας που έχει το τέμαχος μετά την κρούση, με τον λόγο β (βλ. ενότητα 3.3.7). Αν και στις δοκιμές πεδίου που αξιολογήθηκαν, προσδιορίστηκαν τιμές του λόγου β έως 0.4, προτείνεται να λαμβάνεται ίσος με 0.1 στις πρακτικές εφαρμογές.

Οι Chau et al. (2002) απέδειξαν για την περίπτωση σφαίρας που εκτελεί ελεύθερη πτώση και προσκρούει σε κεκλιμένη επιφάνεια πρόσκρουσης, ότι η μέγιστη τιμή του λόγου β ισούται με 0.4 και πως εξαρτάται από την κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης. Στην παρούσα έρευνα, η περιστροφική ταχύτητα μετρήθηκε μόνο σε δοκιμές παραβολικής ρίψης. Πιο συγκεκριμένα, σε κάποιες από τις δοκιμές με σφαιρικά τεμάχια στο εργαστήριο και στις δοκιμές με κυβικά στις τρεις διαστάσεις (στο εργαστήριο και στο πεδίο). Έτσι, δεδομένου ότι οι αρχικές συνθήκες είναι διαφορετικές, τα αποτελέσματα δεν είναι άμεσα συγκρίσιμα με αυτά των Chau et al. (2002), καθώς η απόδειξή τους αφορά την περίπτωση της ελεύθερης πτώσης, όπου τα τεμάχια δεν έχουν γωνιακή ταχύτητα πριν από την κρούση.

Για τα σφαιρικά τεμάχια η σχέση μεταθετικής και περιστροφικής ενέργειας αναπαρίσταται στο σχήμα 8.8 με τα σημεία να διακρίνονται ως προς την διάσταση του τεμάχους (Σχήμα 8.8-α) και την γωνία πρόσκρουσης (Σχήμα 8.8-β). Τα δεδομένα προέρχονται από τις δοκιμές με τεμάχια μαρμάρου (ενότητα 5.2.2 – σειρές δοκιμών 14.1 έως 14.30). Οι αντίστοιχες δοκιμές με τεμάχια ψαμίτη εμφανίζουν πανομοιότυπη εικόνα καθιστώντας άνευ ουσίας την παράθεσή τους.

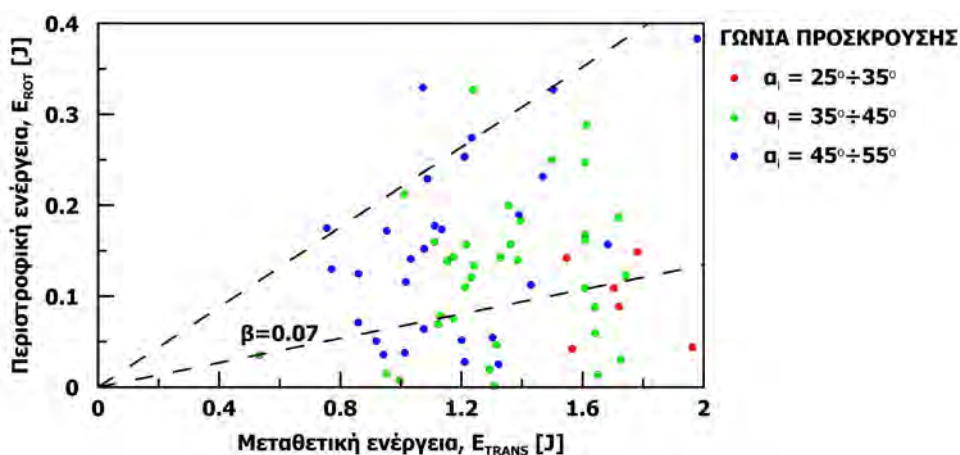


Σχήμα 8.8: Σχέση μεταθετικής και περιστροφικής ενέργειας ως προς: (α) την διάσταση του τεμάχους και (β) την γωνία πρόσκρουσης

Παρατηρείται ότι ο λόγος β (δηλαδή η βέλτιστη ευθεία που διέρχεται από την αρχή των αξόνων), δεν εξαρτάται από την διάσταση του τεμάχους αλλά ούτε από την γωνία πρόσκρουσης. Γενικώς, για τις συνθήκες που πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές, ο λόγος β είναι σταθερός και ισούται με 0.27 (ή 27%), τιμή που είναι εντός του εύρους που αναφέρει η JRA. Ο λόγος β περιορίζεται ελαφρώς με την αύξηση της γωνίας πρόσκρουσης, ωστόσο δεν προκύπτει η σχέση που περιγράφουν οι Chau et al. (2002), δηλαδή η καμπανοειδής μεταβολή με μέγιστο περίπου στις 40° (Σχήμα 3.36-β). Η ασυμφωνία αυτή πιθανότατα να οφείλεται στον διαφορετικό τύπο δοκιμής.

Στο σχήμα 8.9 παρατίθεται η σχέση της μεταθετικής με την περιστροφική ενέργεια από τις δοκιμές με κυβικά τεμάχια, που έγιναν σε επιφάνειες πρόσκρουσης διαφορετικής κλίσης. Τα αποτελέσματα είναι ομαδοποιημένα ως προς την γωνία πρόσκρουσης, ώστε να είναι συμφωνία με την αναπαράσταση του σχήματος 8.8. Παρατηρούνται τα εξής:

- η διακύμανση των τιμών είναι αισθητά μεγαλύτερη συγκριτικά με τα αυτήν στα σφαιρικά τεμάχια
- η διαφοροποίηση με γωνία πρόσκρουσης δεν γίνεται εμφανής
- ο λόγος β κυμαίνεται από 0 έως περίπου 0.25, με την μέση τιμή ($\beta = 0.07$) να είναι σημαντικά περιορισμένη σε σχέση με τα σφαιρικά, αλλά και λιγότερο αντιπροσωπευτική ($R^2 = 0.45$)



Σχήμα 8.9: Σχέση μεταθετικής και περιστροφικής ενέργειας ως προς την γωνία πρόσκρουσης για την ομόρροπη κρούση με κυβικά τεμάχια

Συνεπώς, ο λόγος β εξαρτάται από σχήμα του τεμάχους, με τις ενδείξεις να οδηγούν στο συμπέρασμα ότι είναι μεγαλύτερος στα σφαιρικά τεμάχια. Επίσης, η προτεινόμενη τιμή από την JRA είναι λογική για την περιγραφή της μέσης κατάστασης.

Στην έρευνα πεδίου των Spadari et al. (2012) προσδιορίστηκε η γωνιακή ταχύτητα κάθετα στο επίπεδο κίνησης του τεμάχους. Τα αποτελέσματα εκφράστηκαν σε όρους περιστροφικής ενέργειας, συμπεριλαμβάνοντας την επίδραση του σχήματος μέσω της ροπής αδρανείας. Δεν προέκυψε κάποια συστηματική εξάρτηση του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης με την περιστροφική ενέργεια. Ο κάθετος συντελεστής παρουσιάζει μια ελαφρώς αυξητική τάση με την αύξηση της περιστροφικής ενέργειας, ωστόσο η διακύμανση των τιμών υπερβαίνει την παρατηρούμενη τάση, περιορίζοντας έτσι την αξιοπιστία της.

Επίσης, στην έρευνα των Buzzi et al. (2012), που πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο, παρατηρήθηκε πως η σχέση μεταξύ καθέτου συντελεστή αναπήδησης και γωνιακής ταχύτητας εξαρτάται και από το σχήμα του τεμάχους. Πιο συγκεκριμένα, δεν προκαλεί μεταβολή στα τεμάχια κυκλικού δίσκου, αλλά επιφέρει αύξηση στον κάθετο συντελεστή με την αύξηση της γωνιακής ταχύτητας στα τεμάχια τετραγωνικού και πενταγωνικού δίσκου. Ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης αυξάνεται με την αύξηση της γωνιακής ταχύτητας ανεξαρτήτως σχήματος τεμάχους. Ωστόσο, η διακύμανση των συντελεστών αναπήδησης είναι σημαντική και στην έρευνα αυτή.

Αντιπαραβάλλοντας τις εργαστηριακές δοκιμές που εκτελέστηκαν στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας με τα σφαιρικά τεμάχια στις οποίες μετρήθηκε η γωνιακή ταχύτητα, επαληθεύονται εν μέρει τα παραπάνω συμπεράσματα. Πιο συγκεκριμένα, ούτε ο κάθετος αλλά ούτε και ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης επηρεάζονται από την αύξηση της γωνιακής ταχύτητας (Σχήμα 5.28 και 5.31 αντίστοιχα). Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε, η διακύμανση των αποτελεσμάτων στις έρευνες των Spadari et al. (2012) και Buzzi et al. (2012) είναι σημαντική και κάποια από τα συμπεράσματα είναι μεταξύ τους αντικρουόμενα.

8.6 Επίδραση κλίμακας δοκιμών

Οι δοκιμές πεδίου που εκτελέστηκαν στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας, σχεδιάστηκαν ώστε να αποτελούν "μεγέθυνση" ορισμένων σειρών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο. Γενικώς, οι συνθήκες διεξαγωγής των δοκιμών στο πεδίο ήταν δυσχερείς, με αποτέλεσμα το πλήθος τους να είναι περιορισμένο. Έτσι, εκτελέστηκαν επικουρικά, με σκοπό να διερευνηθεί η δυνατότητα αναγωγής των αποτελεσμάτων της εκτενούς εργαστηριακής διερεύνησης σε μεγαλύτερη κλίμακα. Ακολούθως, συγκρίνονται οι συντελεστές αναπήδησης από τις εν λόγω διερευνήσεις και σχολιάζονται ως προς την επίδραση της κλίμακας.

8.6.1 Δοκιμές στη σπηλιά Νταβέλη - Πεντέλη

Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στην Σπηλιά Νταβέλη (ενότητα 7.1), ήταν, κατά κάποιο τρόπο, μια αναπαραγωγή των δοκιμών παραβολικής ρίψης που έγιναν στο εργαστήριο με κυβικά τεμάχια λειασμένων ακμών (ενότητα 5.1.2). Στο σχήμα 8.10 παρουσιάζονται συγκριτικά οι συντελεστές αναπήδησης (κάθετος, εφαπτομενικός και κινηματικός) από τις δοκιμές πεδίου και εργαστηρίου. Από την εργαστηριακή διερεύνηση χρησιμοποιούνται τα στοιχεία από την σειρά δοκιμών με μάρμαρο, καθώς το υλικό προέρχεται από την ίδια θέση.

Η σύγκριση των εν λόγω διερευνήσεων έχει κυρίως ποιοτικό χαρακτήρα, καθώς μεταξύ των διερευνήσεων διαφοροποιούνται, με μη συστηματικό τρόπο, αρκετές παράμετροι, που επηρεάζουν την απόκριση του τεμάχους στην αναπήδηση. Πιο συγκεκριμένα, διαφοροποιούνται τα κάτωθι:

- η μάζα: στην εργαστηριακή διερεύνηση ήταν περίπου $m = 20g$ ενώ στις δοκιμές πεδίου κυμαινόταν από $m = 4.2$ έως $8.7kg$
- η ταχύτητα πρόσκρουσης: στις δοκιμές εργαστηρίου ήταν από $v_i = 2.4$ έως $3ms^{-1}$ και στο πεδίο από $v_i = 4.8$ έως $8.6ms^{-1}$
- η σκληρότητα με τη σφύρα Schmidt: τόσο μεταξύ πεδίου και εργαστηρίου, όσο και μεταξύ επιφάνειας πρόσκρουσης και τεμάχους στο πεδίο. Αν και το υλικό που χρησιμοποιήθηκε στο εργαστήριο προέρχεται από την ίδια θέση, η κατάσταση του ήταν σαφώς

καλύτερη (σκληρότητα με τη σφύρα Schmidt $R = 38.2$) σε σχέση με την επιφάνεια πρόσκρουσης του πεδίου ($R = 32.5$), εξαιτίας της επιφανειακής αποσάθρωσης

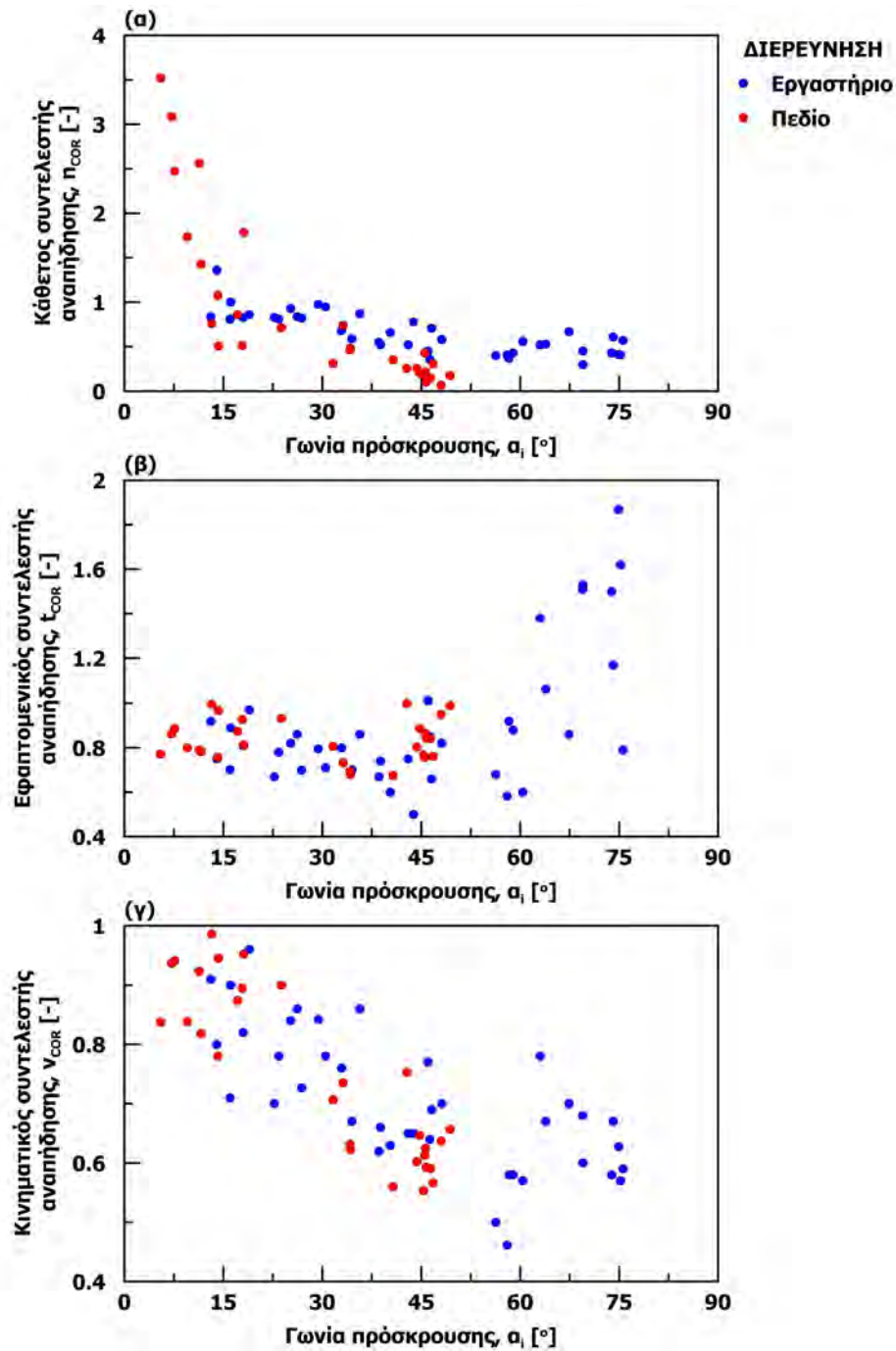
- το σχήμα των τεμαχών: στο εργαστήριο τα τεμάχια διαμορφώθηκαν αρχικά σε κυβικά και στην συνέχεια λειάνθηκαν οι ακμές τους με συστηματικό τρόπο, ώστε να είναι όμοια και να έχουν κάποια μορφή κανονικότητας. Αντιθέτως, τα δοκίμια στο πεδίο διαμορφώθηκαν με σφυρηλάτηση για να εξομαλυνθούν οι οξείες γωνίες που είναι ευαίσθητες στη θραύση, ωστόσο οι παρειές τους ήταν τραχείες
- η τραχύτητα της επιφάνειας πρόσκρουσης: στο εργαστήριο η κρούση γινόταν σε λεία επιφάνεια πρόσκρουσης. Αντιθέτως, στο πεδίο το φυσικό ανάγλυφο είχε μέση τραχύτητα $JRC = 10$

Ωστόσο, όπως παρατηρείται στο σχήμα 8.10-α, η τάση μεταξύ του καθέτου συντελεστή αναπήδησης και της γωνίας πρόσκρουσης ομοιάζει μεταξύ των δυο διερευνήσεων, γεγονός που υποδεικνύει ότι η μορφή μεταβολής είναι ανεξάρτητη της κλίμακας.

Ο επαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης (Σχήμα 8.10-β) δεν εμφανίζει κάποια εξάρτηση με την γωνία πρόσκρουσης και οι τιμές που λαμβάνει είναι αντίστοιχες τόσο στο εργαστήριο όσο και στο πεδίο. Έτσι, συμπεραίνεται ότι ο επαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης δεν εμφανίζει ευαισθησία στις παραμέτρους που διαφοροποιούνται μεταξύ των δυο αυτών διερευνήσεων. Γενικώς, στην πλειοψηφία των ερευνών που συναντώνται στην βιβλιογραφία, δεν έχει παρατηρηθεί κάποια παράμετρος που να επιδρά στον επαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης με συστηματικό τρόπο.

Ο κινηματικός συντελεστής αναπήδησης (Σχήμα 8.10-γ) εμφανίζει παρόμοια συμπεριφορά με τον κάθετο, αλλά η διαφοροποίηση μεταξύ των δοκιμών πεδίου και εργαστηρίου αμβλύνεται.

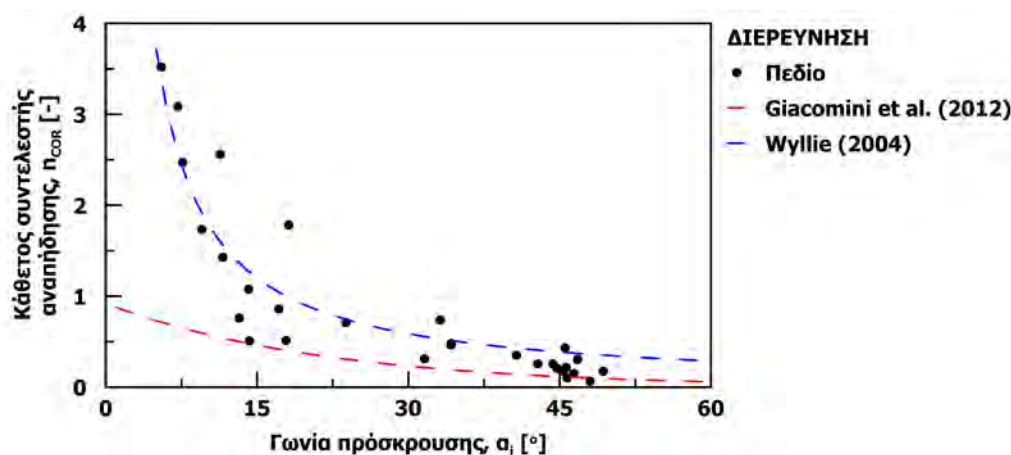
Επισημαίνεται ότι στην κλίμακα των δοκιμών πεδίου δεν προκύπτει σαφής επίδραση της μάζας του τεμάχους, καθώς σε τεμάχια με διπλάσια μάζα δεν αποτυπώνεται κάποια διαφοροποίηση των συντελεστών αναπήδησης (βλ. σχήμα 7.7). Αυτό έχει παρατηρηθεί και στις έρευνες των Ferrari et al. (2013) και Wyllie (2014a). Ωστόσο, σε καμία διερεύνηση, συμπεριλαμβανομένης και της παρούσας, το πλήθος των επαναλήψεων δεν χαρακτηρίζεται επαρκές ώστε να θεωρηθεί ότι έχουν παρατηρηθεί οι μέγιστες τιμές του καθέτου συντελεστή αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης, στις οποίες άλλωστε καθίσταται εμφανής η εν λόγω επίδραση.



Σχήμα 8.10: Σύγκριση συντελεστών αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης μεταξύ των δοκιμών πεδίου στη σπηλιά Νταβέλη και των αντίστοιχων στο εργαστήριο

Περαιτέρω, η επίδραση της κλίμακας μπορεί να αξιολογηθεί εμμέσως με τις εμπειρικές συσχετίσεις προσδιορισμού του καθέτου συντελεστή αναπήδησης που συναντώνται στην βιβλιογραφία. Η συσχέτιση του Wyllie (2014a) έχει προκύψει από ανάδρομες αναλύσεις πραγματικών καταπτώσεων με τεμάχια πολλαπλάσιας μάζας (Σχέση 3.29) και η συσχέτιση των Giacomini et al. (2012) από δοκιμές πεδίου με τεμάχια περίπου οκταπλάσιας μάζας αλλά σε σημαντικά υψηλότερα πρηνή (σχέση 3.28), οπότε με μεγαλύτερες ταχύτητες πρόσκρουσης.

Από την σύγκριση αυτή (Σχήμα 8.11), παρατηρείται ότι τα δεδομένα από τις δοκιμές πεδίου στην σπηλιά Νταβέλη είναι σε καλή συμφωνία με τις εν λόγω εμπειρικές συσχετίσεις. Συνεπώς, δύναται να θεωρηθεί ότι η κλίμακα εκτέλεσης των δοκιμών δεν επηρεάζει τον τρόπο μεταβολής του καθέτου συντελεστή αναπήδησης ως προς την γωνία πρόσκρουσης, καθώς υπάρχει σύγκλιση των αποτελεσμάτων που έχουν προσδιορισθεί σε σημαντικά διαφορετικές κλίμακες.



Σχήμα 8.11: Σύγκριση καθέτου συντελεστή αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης μεταξύ των δοκιμών πεδίου στη σπηλιά Νταβέλη και των προτεινόμενων συσχετίσεων των Giacomini et al. (2012) και Wyllie (2014a)

8.6.2 Δοκιμές στο θέατρο βράχων Βύρωνα

Τα πειράματα πεδίου που έλαβαν χώρα στο Θέατρο Βράχων (Ενότητα 7.2) σχεδιάστηκαν ώστε να είναι άμεσα συγκρίσιμα με τις δοκιμές μικρής κλίμακας που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 6.1.

Η επιλογή της αναλογίας μεταξύ των διαστάσεων των τεμαχίων και της ταχύτητας στο πεδίο και το εργαστήριο έγινε με το θεώρημα π του Buckingham (1914), που βασίζεται στις αρχές της διαστατικής ανάλυσης. Αρχικά, περιορίζονται στον ελάχιστο αριθμό οι ανεξάρτητες μεταβλητές και στην συνέχεια εκφράζονται τα υπόλοιπα μεγέθη ως αδιάστατες παράμετροι (Langhaar, 1951). Οι θεμελιώδεις διαστατικές παράμετροι είναι το μήκος (L σε m), η μάζα (M σε kg) και ο χρόνος (T σε s). Τα υπόλοιπα μεγέθη μπορούν να εκφραστούν ως προς τις θεμελιώδεις διαστάσεις (βλ. πίνακα 8.1). Η μεθοδολογία αυτή είναι εμπνευσμένη από δοκιμές εργαστηρίου και πεδίου που έγιναν στο πλαίσιο διερεύνησης της αναπήδησης σε εδαφικά υλικά (Heidenreich, 2004).

Πίνακας 8.1: Μεγέθη που συναντώνται στο πρόβλημα των καταπτώσεων εκφρασμένα ως προς τις θεμελιώδεις διαστάσεις τους

Μέγεθος	Μονάδες	Θεμελιώδης διάσταση
Μήκος (l)	m	L
Χρόνος (t)	s	T
Μάζα (m)	kg	M
Μεταθετική ταχύτητα (v)	m/s	LT^{-1}
Γωνιακή ταχύτητα (ω)	rad/s	T^{-1}
Επιτάχυνση (a)	m/s^2	LT^{-2}
Δύναμη (F)	kgm/s	MLT^{-2}
Πυκνότητα (ρ)	kg/m^3	MLT^{-3}
Μέτρο Ελαστικότητας (E_s)	$kg/(ms^2)$	$ML^{-1}T^{-2}$
Ενέργεια (E)	kgm^2/s^2	ML^2T^{-2}
Τραχύτητα (JRC)	-	-
Συντελεστής αναπήδησης (COR)	-	-

Για να επιτευχθεί η ομοιότητα μεταξύ της πραγματικής κατάστασης (πρωτότυπο) και ενός υπό κλίμακα ομοιώματος πρέπει να πληρούνται η γεωμετρική, η κινηματική και η δυναμική ομοιότητα. Γεωμετρική ομοιότητα υπάρχει όταν ισούνται οι λόγοι των ομολόγων διαστάσεων μεταξύ ομοιώματος και πρωτοτύπου. Η κινηματική ομοιότητα προϋποθέτει την γεωμετρική ομοιότητα και επιπρόσθετα να ισούνται οι λόγοι των ομολόγων ταχυτήτων και επιταχύνσεων. Τέλος, για την επίτευξη δυναμικής ομοιότητας απαιτείται η κινηματική σε συνδυασμό με την διατήρηση της αναλογίας στις ασκούμενες δυνάμεις και τάσεις μεταξύ πρωτοτύπου και ομοιώματος.

Έτσι, για κάθε θεμελιώδη διάσταση ορίζεται η αντίστοιχη σχέση αναλογίας μεταξύ του ομοιώματος και του πρωτοτύπου, ως εξής:

$$\begin{aligned}
 \lambda &= L_r/L_m \\
 \mu &= M_r/M_m \\
 \tau &= T_r/T_m
 \end{aligned}
 \tag{8.1}$$

όπου:

r, m δείκτες που περιγράφουν το πρωτότυπο (real) και το ομοίωμα (model)

λ η κλίμακα μήκους

μ η κλίμακα μάζας

τ η κλίμακα χρόνου

Όταν οι δοκιμές δεν εκτελούνται σε φυγοκεντρική, υπάρχει δέσμευση της αναλογίας στην κλίμακα από την επιτάχυνση της βαρύτητας, καθώς εκ των πραγμάτων ισούται μεταξύ πρωτοτύπου και ομοιώματος. Επίσης, δεσμευτική ιδιότητα αποτελεί το μοναδιαίο βάρος των υλικών, καθώς οι δοκιμές εκτελέστηκαν με τεμάχια ίδιου υλικού στο εργαστήριο και το πεδίο.

Έτσι, εξαιτίας της δέσμησης της βαρύτητας, προκύπτει:

$$\frac{g_r}{g_m} = 1 \Rightarrow \frac{L_r T_r^{-2}}{L_m T_m^{-2}} = 1 \Rightarrow \lambda \tau^{-2} = 1 \Rightarrow \tau = \lambda^{1/2} \quad (8.2)$$

και από την δέσμηση του μοναδιαίου βάρους προκύπτει:

$$\frac{\rho_r}{\rho_m} = 1 \Rightarrow \frac{M_r L_r^{-3}}{M_m L_m^{-3}} = 1 \Rightarrow \mu \lambda^{-3} = 1 \Rightarrow \mu = \lambda^3 \quad (8.3)$$

Συνεπώς, χρησιμοποιώντας τις σχέσεις 8.2 και 8.3, είναι εφικτή η έκφραση όλων των μεγεθών που εμπλέκονται στο πρόβλημα συναρτήσει της κλίμακας μήκους λ . Πιο συγκεκριμένα, τα μεγέθη μήκους και τα παραγόμενά του (εμβαδόν και όγκος), εκφράζονται ως εξής:

$$\begin{aligned} \frac{l_r}{l_m} &= \frac{L_r}{L_m} = \lambda \\ \frac{A_r}{A_m} &= \frac{L_r^2}{L_m^2} = \lambda^2 \\ \frac{V_r}{V_m} &= \frac{L_r^3}{L_m^3} = \lambda^3 \end{aligned} \quad (8.4)$$

Η αναλογία μεταξύ των ταχυτήτων είναι:

$$\frac{v_r}{v_m} = \frac{L_r T_r^{-1}}{L_m T_m^{-1}} = \lambda \tau^{-1} = \lambda (\lambda^{1/2})^{-1} \Rightarrow \frac{v_r}{v_m} = \lambda^{1/2} \quad (8.5)$$

Η αναλογία μεταξύ των δυνάμεων είναι:

$$\frac{F_r}{F_m} = \frac{M_r L_r T_r^{-2}}{M_m L_m T_m^{-2}} = \mu \lambda \tau^{-2} = \lambda^3 \lambda (\lambda^{1/2})^{-2} \Rightarrow \frac{F_r}{F_m} = \lambda^3 \quad (8.6)$$

Η αναλογία μεταξύ των ενεργειών είναι:

$$\frac{E_r}{E_m} = \frac{M_r L_r^2 T_r^{-2}}{M_m L_m^2 T_m^{-2}} = \mu \lambda \tau^{-2} = \lambda^3 \lambda^2 (\lambda^{1/2})^{-2} \Rightarrow \frac{E_r}{E_m} = \lambda^4 \quad (8.7)$$

Ενώ στα μεγέθη των τάσεων και της ελαστικότητας, η αναλογία έχει ως εξής:

$$\frac{Es_r}{Es_m} = \frac{M_r L_r^{-1} T_r^{-2}}{M_m L_m^{-1} T_m^{-2}} = \mu \lambda^{-1} \tau^{-2} = \lambda^3 \lambda^{-1} (\lambda^{1/2})^{-2} \Rightarrow \frac{Es_r}{Es_m} = \lambda \quad (8.8)$$

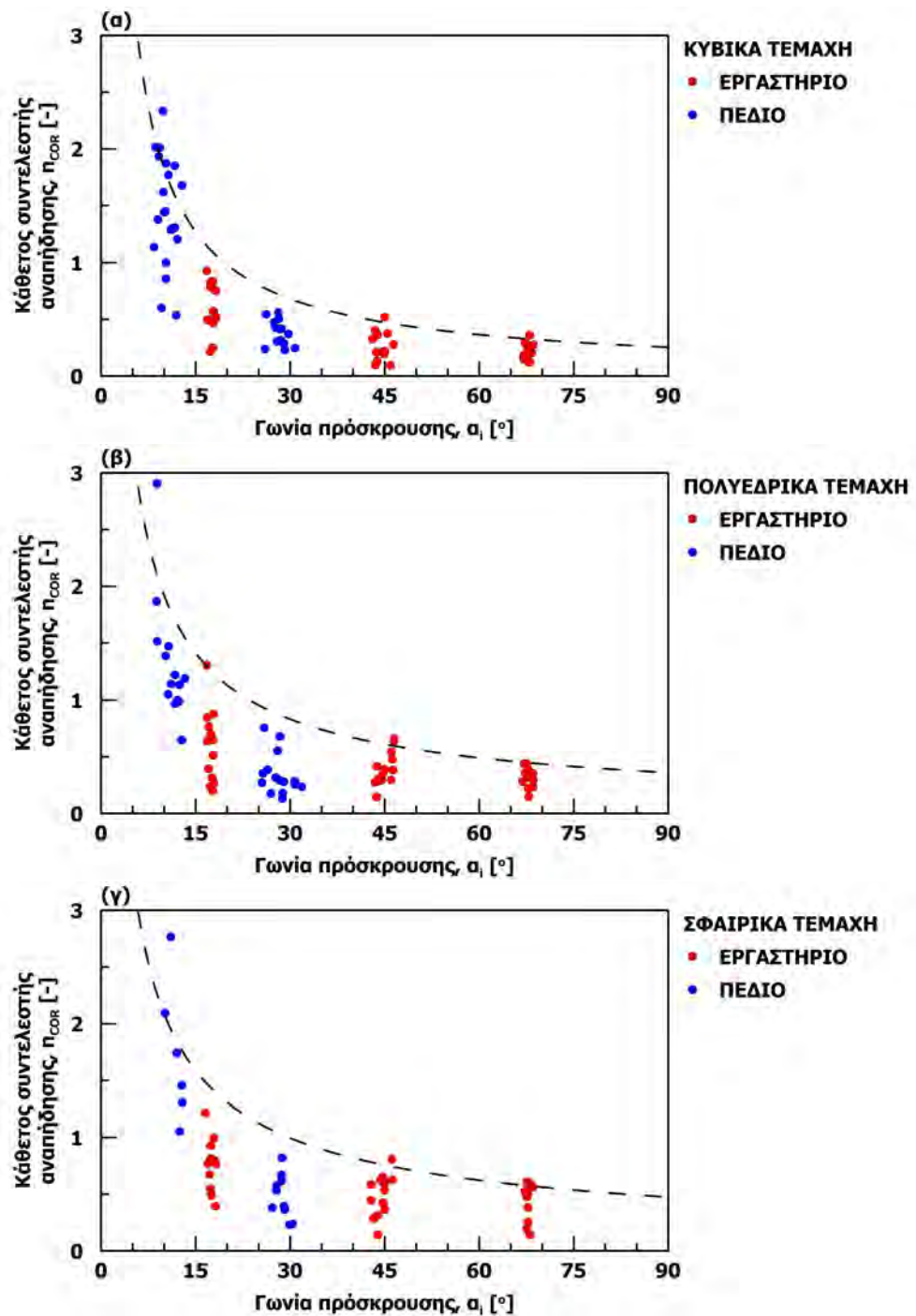
Τέλος, για τους συντελεστές αναπήδησης δεν υπάρχει συντελεστής αναλογίας κλίμακας καθώς είναι αδιάστατα μεγέθη, συνεπώς δεν διαφοροποιούνται μεταξύ πρωτοτύπου και ομοιώματος.

Βάσει των ανωτέρω, καθορίστηκαν οι διαστάσεις των τεμαχών και το ύψος απελευθέρωσης τους ώστε να ικανοποιούνται η γεωμετρική και η κινηματική ομοιότητα με συντελεστή κλίμακας $\lambda = 5$. Ωστόσο, δεν επιτεύχθηκε δυναμική ομοιότητα καθώς απαιτείτο να χρησιμοποιηθούν διαφορετικά υλικά μεταξύ των διερευνήσεων, με ιδιότητες που δεν είναι εύκολο να ευρεθούν σε φυσικά υλικά. Άλλωστε, στην προσπάθεια που έγινε για την εύρεση τέτοιων υλικών, εξετάστηκε το μείγμα πολυεστέρα με χαλαζιακή άμμο, που όμως δεν είχε ανάλογη απόκριση με τα βραχώδη υλικά (βλ. ενότητα 5.1) και δεν χρησιμοποιήθηκε περαιτέρω στην πειραματική διερεύνηση.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην ενότητα 6.1, η επιφάνεια πρόσκρουσης που χρησιμοποιήθηκε στο εργαστηριακό σκέλος της διερεύνησης ήταν από ένα φυσικό τέμαχος που συλλέχθηκε από την θέση διεξαγωγής των δοκιμών πεδίου, ώστε να είναι όμοιας σύστασης. Αντιστοίχως, τα τεμάχια διαμορφώθηκαν από τσιμεντοειδές ένεμα ώστε οι φυσικές και μηχανικές παράμετροι τους να είναι ίδιες.

Στο σχήμα 8.12 παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ του καθέτου συντελεστή αναπήδησης και της γωνίας πρόσκρουσης για τα κυβικά, τα πολυεδρικά και τα σφαιρικά τεμάχια από τις δοκιμές πεδίου και εργαστηρίου.

Ανεξάρτητα της κλίμακας της δοκιμής (πεδίο ή εργαστήριο) και του σχήματος παρατηρείται μια σαφής τάση αύξησης του καθέτου συντελεστή αναπήδησης με την μείωση της γωνίας πρόσκρουσης, που συνοδεύεται από ανάλογη αύξηση του εύρους. Η διακεκομμένη καμπύλη στο σχήμα 8.12 περιγράφει την τάση των μεγίστων τιμών από κάθε σειρά δοκιμών, αποτελώντας το άνω (συντηρητικό) όριο του καθέτου συντελεστή. Η μορφή της καμπύλης ομοιάζει με την αυτήν που περιγράφει την σχέση του Wyllie (βλ. σχέση 3.29 και σχήμα 8.11).



Σχήμα 8.12: Σύγκριση καθέτου συντελεστή αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης μεταξύ των δοκιμών πεδίου στο Θέατρο βράχων και των αντίστοιχων στο εργαστήριο για τεμάχια σχήματος: (α) κυβικού (β) πολυεδρικού και (γ) σφαιρικού

Σε κάθε περίπτωση πάντως, παρατηρείται καλή συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων πεδίου και εργαστηρίου, παρά την σημαντική διαφοροποίηση που υπάρχει στην κλίμακα διεξαγωγής των δοκιμών. Έτσι, δύναται να θεωρηθεί πως, υπό γεωμετρική και κινηματική ομοιότητα, η προσομοίωση της αναπήδησης στο εργαστήριο μπορεί να περιγράψει ικανοποιητικά την απόκριση του τεμάχους σε μια φυσική κατάρπτωση. Τούτο συνεπάγεται ότι οι παραγόμενες συσχετίσεις από την εκτενή εργαστηριακή διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της έρευνας αυτής, μπορούν να αξιοποιηθούν για την εκτίμηση της τροχιάς σε φυσικά φαινόμενα.

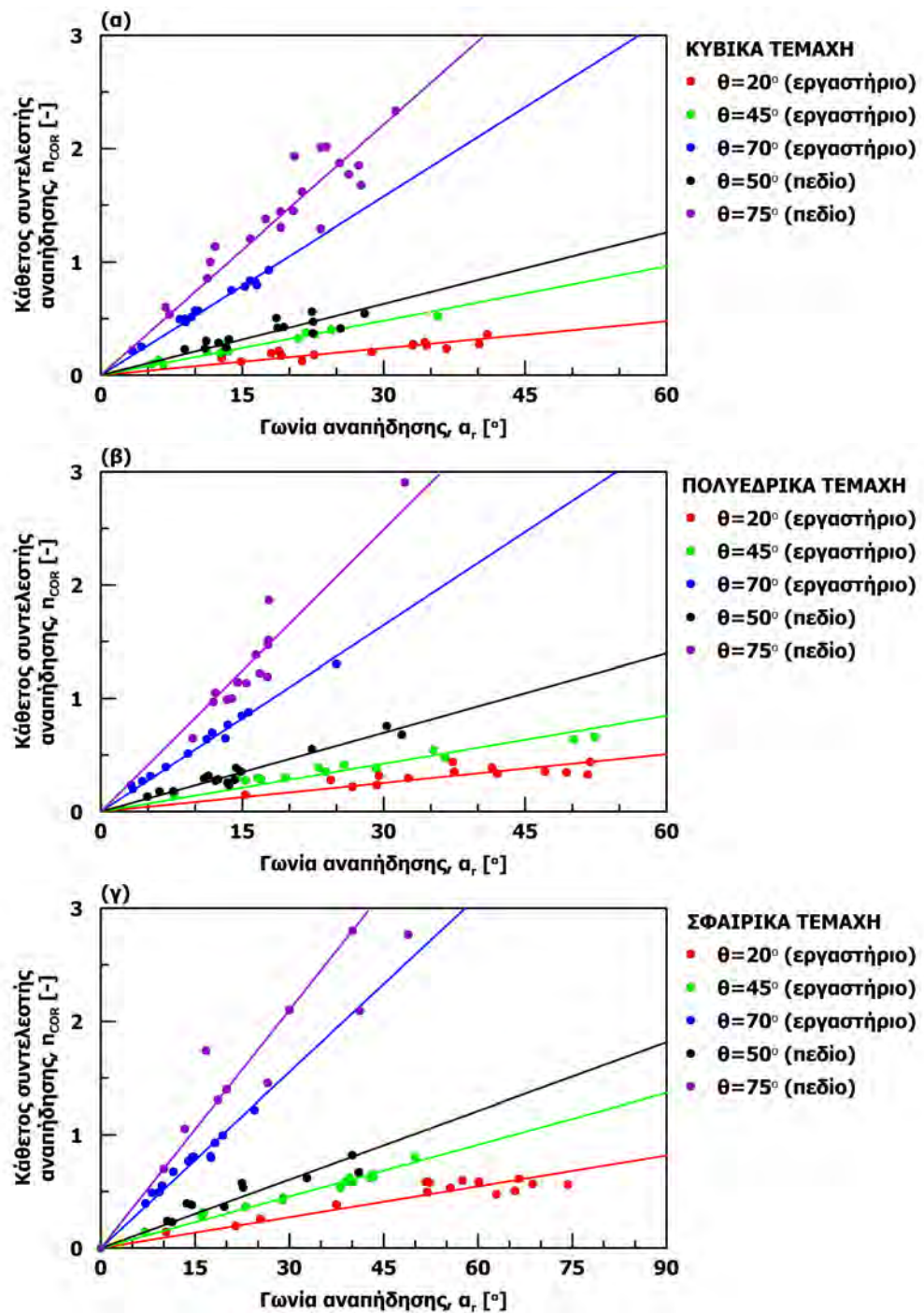
Εξίσου ικανοποιητική, όσον αφορά στην κλίμακα εκτέλεσης των δοκιμών, είναι και η σχέση μεταξύ του καθέτου συντελεστή αναπήδησης και της γωνίας αναπήδησης. Τούτο προκύπτει από το σχήμα 8.13, όπου παρουσιάζεται η εν λόγω σχέση για κάθε σχήμα τεμάχους που εξετάστηκε.

Υπενθυμίζεται ότι, στο σύνολο των διερευνήσεων που πραγματοποιήθηκαν, ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης εμφανίζει γραμμική συσχέτιση με την γωνία αναπήδησης, που διέρχεται από την αρχή των αξόνων. Πιο συγκεκριμένα, η αύξηση της γωνίας αναπήδησης οδηγεί σε μεγαλύτερες τιμές του καθέτου συντελεστή αναπήδησης και η διακύμανσή της αντικατοπτρίζεται στο εύρος τιμών του εν λόγω συντελεστή.

Στο σχήμα 8.13 τα σημεία έχουν ομαδοποιηθεί σύμφωνα με την κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης. Καθώς οι δοκιμές έχουν γίνει με ελεύθερη πτώση, η γωνία πρόσκρουσης είναι η συμπληρωματική γωνία της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης και είναι πρακτικά σταθερή σε κάθε σειρά δοκιμών. Έτσι, η σχέση αυτή μπορεί να εκφραστεί και ως προς την γωνία πρόσκρουσης, όπου και παρατηρείται πως η κλίση της ευθείας που συνδέει τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης με την γωνία αναπήδησης καθορίζεται από την γωνία πρόσκρουσης, και ειδικότερα, μειώνεται με την αύξηση της γωνίας πρόσκρουσης.

Από την σύγκριση των δοκιμών πεδίου και εργαστηρίου, προκύπτει ότι η σχέση αυτή είναι ανεξάρτητη της κλίμακας εκτέλεσης των δοκιμών και του σχήματος του τεμάχους, καθώς επαληθεύεται σε όλες τις διερευνήσεις, με τις αναλογίες να τηρούνται ικανοποιητικώς. Συνεπώς, η σχέση μεταξύ του καθέτου συντελεστή αναπήδησης και της γωνίας αναπήδησης που προκύπτει από τις εργαστηριακές δοκιμές, ισχύει με ανάλογο τρόπο και στις δοκιμές πεδίου. Ως εκ τούτου μπορεί να αξιοποιηθεί για την κατάρτιση μεθοδολογίας που θα προσδιορίζει το εύρος διακύμανσης του καθέτου συντελεστή αναπήδησης.

Οστόσο, ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης δεν εμφανίζει κάποια αξιοσημείωτη συμπεριφορά ούτε στο πεδίο ούτε στο εργαστήριο. Και για τις δυο διερευνήσεις, για γωνίες πρόσκρουσης έως περίπου 60° οι τιμές που λαμβάνει είναι από 0.8 έως και 1.0, αντίστοιχες με αυτές που συναντώνται στη σχετική βιβλιογραφία (βλ. πίνακας 3.2.4.2). Συνεπώς, δεδομένου ότι οι τιμές είναι ανάλογες με αυτές που απαντώνται στην βιβλιογραφία, όπου οι κλίμακες εκτέλεσης των δοκιμών είναι διαφορετικές, συμπεραίνεται ότι ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης δεν έχει ευαισθησία στην κλίμακα.



Σχήμα 8.13: Σχέση καθέτου συντελεστή αναπήδησης με την γωνία αναπήδησης και σύγκριση μεταξύ των δοκιμών πεδίου στο Θέατρο βράχων και των αντίστοιχων στο εργαστήριο για τεμάχια σχήματος: (α) κυβικού (β) πολυεδρικού και (γ) σφαιρικού

8.6.3 Δοκιμές στο Πεντελικό όρος

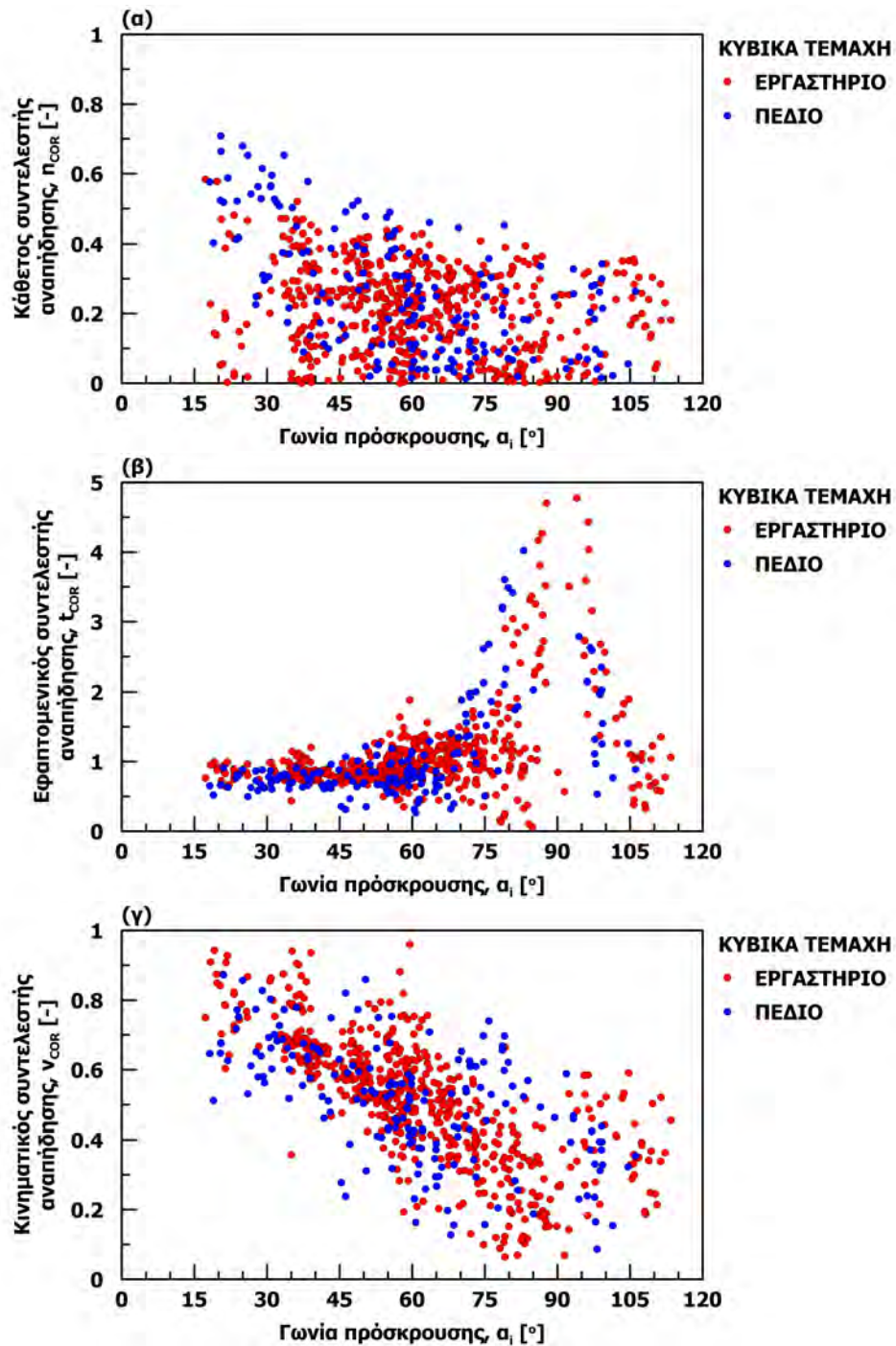
Οι δοκιμές στο Πεντελικό όρος (Ενότητα 7.3) έγιναν ως μεγέθυνση των δοκιμών με κυβικά τεμάχια που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο για την διερεύνηση της εκτροπής του τεμάχους συναρτήσει της διαφοράς διεύθυνσης μεταξύ της τροχιάς του τεμάχους και της φοράς μεγίστης κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης (Ενότητα 6.2).

Ο σχεδιασμός τους έγινε ώστε μεταξύ των δυο διερευνήσεων να υπάρχει γεωμετρική και κινηματική ομοιότητα, όπως στις δοκιμές που περιγράφονται στην προηγούμενη ενότητα. Η γεωμετρική ομοιότητα καθορίζεται από τις ομόλογες διαστάσεις των τεμαχών στις δυο διερευνήσεις. Δεδομένου ότι τα κυβικά τεμάχια που χρησιμοποιήθηκαν στο εργαστήριο είχαν πλευρά 3cm και στο πεδίο 15cm, ο συντελεστής αναλογίας του μήκους ισούται με $\lambda = 5$.

Έτσι, για την επίτευξη κινηματικής ομοιότητας, η ταχύτητα πρόσκρουσης στο πεδίο θα έπρεπε να είναι $\lambda^{1/2}$ φορές αυτή των δοκιμών εργαστηρίου. Ωστόσο, η ταχύτητα πρόσκρουσης εξαρτάται από την θέση απελευθέρωσης, την αρχική ταχύτητα ρίψης και την γωνία βολής, αλλά είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη σε μικρές μεταβολές των παραπάνω. Στο πεδίο, η απελευθέρωση των τεμαχών πραγματοποιήθηκε με το χέρι, με αποτέλεσμα ο έλεγχος των παραπάνω παραμέτρων να είναι περιορισμένος. Επίσης, ο προσδιορισμός της ταχύτητας πρόσκρουσης κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων, ώστε να προσδιορισθούν οι κατάλληλες συνθήκες απελευθέρωσης των τεμαχών, δεν είναι πρακτικά εφικτός καθώς απαιτεί την ιδιαίτερα χρονοβόρα διαδικασία της επεξεργασίας των δοκιμών (βλ. ενότητα 4.3.4).

Ως αποτέλεσμα, δεν κατέστη δυνατή η εκπλήρωση των συνθηκών για την επίτευξη κινηματικής ομοιότητας μεταξύ των δυο αυτών διερευνήσεων. Πιο συγκεκριμένα, η αναλογία ταχυτήτων κυμαίνεται περίξ του 3 αντί της απαιτούμενης ($\lambda = 5$). Επισημαίνεται πως στις δοκιμές στο Θέατρο Βράχων, τούτο δεν αποτέλεσε πρόβλημα, καθώς η ρίψη των τεμαχών πραγματοποιήθηκε με ελεύθερη πτώση, όπου η ταχύτητα πρόσκρουσης εξαρτάται μόνο από την ύψος απελευθέρωσης των τεμαχών, και άρα είναι εύκολα επιτεύξιμο όποιο μέγεθος. Ωστόσο, όπως παρουσιάζεται παρακάτω, η τάση μεταβολής των συντελεστών αναπήδησης συναρτήσει την γωνίας πρόσκρουσης είναι αντίστοιχη στις δυο διερευνήσεις.

Στο σχήμα 8.14 αναπαρίσταται ο κάθετος, ο εφαπτομενικός και ο κινηματικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης, από τις διερευνήσεις πεδίου και εργαστηρίου. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται ως προς την γωνία πρόσκρουσης, καθώς αποτελεί την μοναδική παράμετρο που περιγράφει συστηματικά τις διαφορετικές συνθήκες μεταξύ των σειρών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν.



Σχήμα 8.14: Σύγκριση συντελεστών αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης μεταξύ των δοκιμών με κυβικά τεμάχια στο πεδίο και το εργαστήριο: (α) κάθετος, (β) εφαπτομενικός και (γ) κινηματικός

Παρατηρείται πως, για όλους τους συντελεστές αναπήδησης, οι τάσεις που εμφανίζονται συμπίπτουν ενώ και οι τιμές που λαμβάνουν είναι παρόμοιες. Ειδικότερα, στο πεδίο προκύπτουν ελαφρώς μεγαλύτερες τιμές για τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης, που μπορεί να οφείλονται είτε στην μεγαλύτερη διασπορά που προκαλείται από την τραχύτητα της επιφάνειας πρόσκρουσης, είτε από την μη ικανοποίηση της κινηματικής ομοιότητας.

Πιο συγκεκριμένα, με μικρότερο συντελεστή αναλογίας ταχυτήτων, δηλαδή με την ταχύτητα πρόσκρουσης στο πεδίο να είναι αναλογικά λιγότερη από αυτήν στο εργαστήριο, ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης θα πρέπει να είναι μεγαλύτερος, καθώς η κρούση είναι λιγότερη σφοδρή (βλ. ενότητα 8.2). Ωστόσο, αν και με τον τρόπο αυτό, αιτιολογείται ποιοτικά η περιορισμένη διαφορά που εμφανίζεται μεταξύ πεδίου και εργαστηρίου, χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.

Σε κάθε περίπτωση πάντως, φαίνεται πως οι δοκιμές εργαστηρίου είναι ικανές να περιγράψουν την απόκριση των τεμαχών σε μεγαλύτερη διάσταση. Συνεπώς, οι συσχετίσεις που βασίζονται στα εργαστηριακά δεδομένα δύνανται να χρησιμοποιηθούν και για την εκτίμηση των παραμέτρων σε μεγαλύτερη κλίμακα.

8.7 Αξιολόγηση αναλυτικών μεθοδολογιών σχήματος

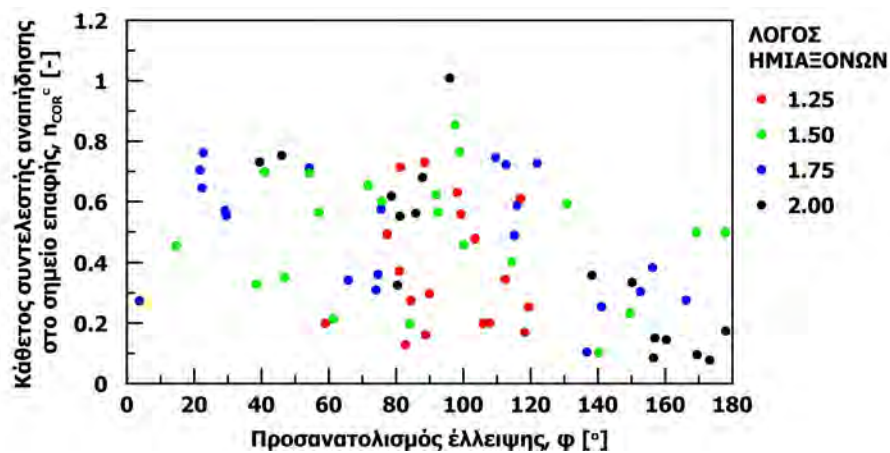
Η σημαντική επίδραση που έχει το σχήμα του τεμάχους και ο προσανατολισμός του κατά την κρούση, παρατηρήθηκε στο σύνολο των δοκιμών που εκτελέστηκαν στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας. Έτσι, έγιναν οι δοκιμές με τους ελλειπτικούς δίσκους (Ενότητα 5.3), καθώς ήταν εφικτή η σύγχρονη μελέτη των δυο αυτών παραμέτρων. Επίσης, στην βιβλιογραφία διατίθενται σχετικές μεθοδολογίες, βάσει των οποίων επιχειρείται η αναλυτικότερη εξήγηση φαινομένων που ελέγχουν την αναπήδηση. Ωστόσο, δεν προέκυψαν αξιόλογα στοιχεία από την εν λόγω πειραματική διερεύνηση. Ακολουθως, χρησιμοποιούνται τα δεδομένα αυτά για την αξιολόγηση των προτεινόμενων μεθόδων από τους Vijayakumar et al. (2012), Azzoni et al. (1995) και Bozzolo and Pamini (1986).

8.7.1 Αξιολόγηση μεθόδου Vijayakumar et al. (2012)

Η μέθοδος αυτή καταρτίστηκε ώστε να αιτιολογήσει την σημαντική διαφοροποίηση των τιμών του κάθετου συντελεστή αναπήδησης που έχουν προσδιοριστεί πειραματικά και αναφέρονται στην σχετική βιβλιογραφία. Σύμφωνα με τους συγγραφείς, η διαφοροποίηση αυτή αποδίδεται στο σχήμα του τεμάχους, καθώς δεν λαμβάνεται υπόψη στο προσομοίωμα σημειακής μάζας που χρησιμοποιείται για την έκφραση των συντελεστών αναπήδησης.

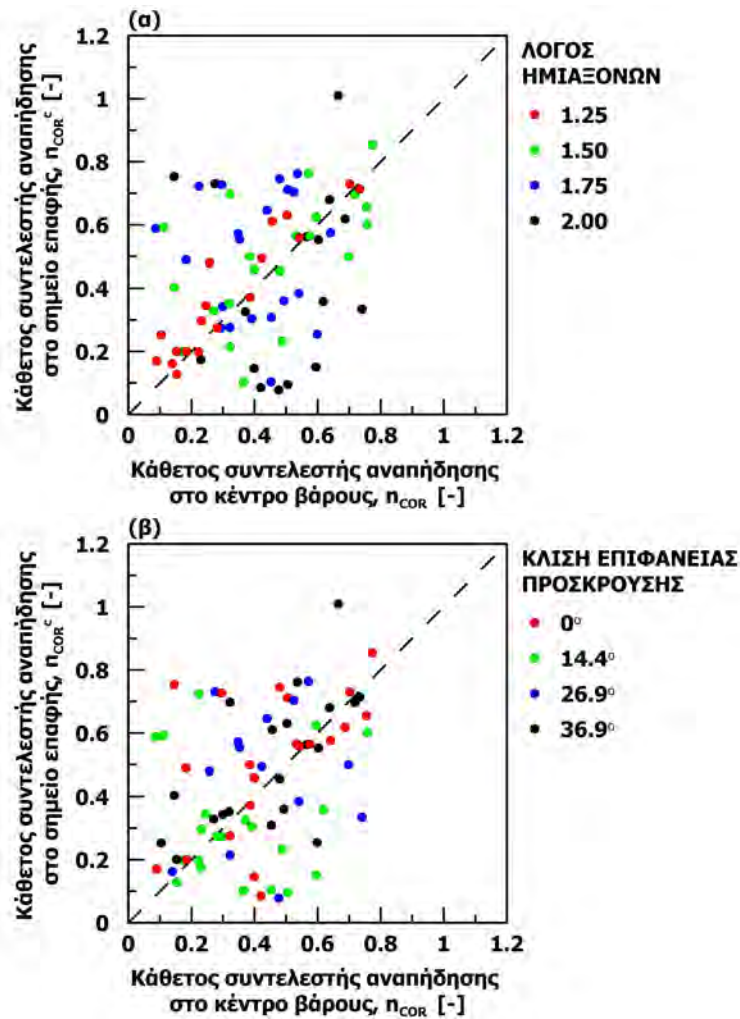
Οι συγγραφείς όρισαν τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης για το σημείο επαφής, ο οποίος θεωρείται ως σταθερή ιδιότητα του υλικού και υπολογίζεται από τα κινηματικά χαρακτηριστικά στην θέση επαφής. Αυτά είναι διαφορετικά από τα κινηματικά χαρακτηριστικά που αντιστοιχούν στο κέντρο βάρους, εξαιτίας της επενέργειας της γωνιακής ταχύτητας. Ως αποτέλεσμα, διαφοροποιείται και ο συντελεστής αναπήδησης που αντιστοιχεί στο κέντρο βάρους του τεμάχους.

Από τα αποτελέσματα της πειραματικής διερεύνησης που εκπονήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, προκύπτει ασυμβατότητα με την βασική φιλοσοφία της εν λόγω μεθοδολογίας, δηλαδή ότι ο συντελεστής αναπήδησης του σημείου επαφής είναι σταθερός. Οι τιμές που υπολογίστηκαν εμφανίζουν σημαντική διασπορά, ενδεικτικά η μέση τιμή ισούται με 0.44 και η τυπική απόκλιση είναι 0.22. Έτσι, για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% καλύπτεται το πεδίο ορισμού του καθέτου συντελεστή αναπήδησης, συνεπώς δεν δύναται να θεωρηθεί ως σταθερά του υλικού. Οι τιμές του καθέτου συντελεστή αναπήδησης του σημείου επαφής, ομαδοποιημένες σύμφωνα με τον λόγο των ημιάξονων (a/b), αποτυπώνονται στο σχήμα 8.15 συναρτήσει του προσανατολισμού του μεγάλου άξονα της έλλειψης (φ).



Σχήμα 8.15: Συντελεστής αναπήδησης στο σημείο επαφής συναρτήσει του προσανατολισμού της έλλειψης

Επιπρόσθετα, στο σχήμα 8.16 προβάλλεται ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης του κέντρου βάρους συναρτήσει αυτού στο σημείο επαφής. Οι τιμές τους είναι ομαδοποιημένες σύμφωνα με τον λόγο των ημιαξόνων (Σχήμα 8.16-α) και την κλίση του επιπέδου πρόσκρουσης (Σχήμα 8.16-β). Ωστόσο, από την αυξημένη διασπορά των τιμών συμπεραίνεται ότι οι δυο αυτοί συντελεστές δεν σχετίζονται μεταξύ τους.



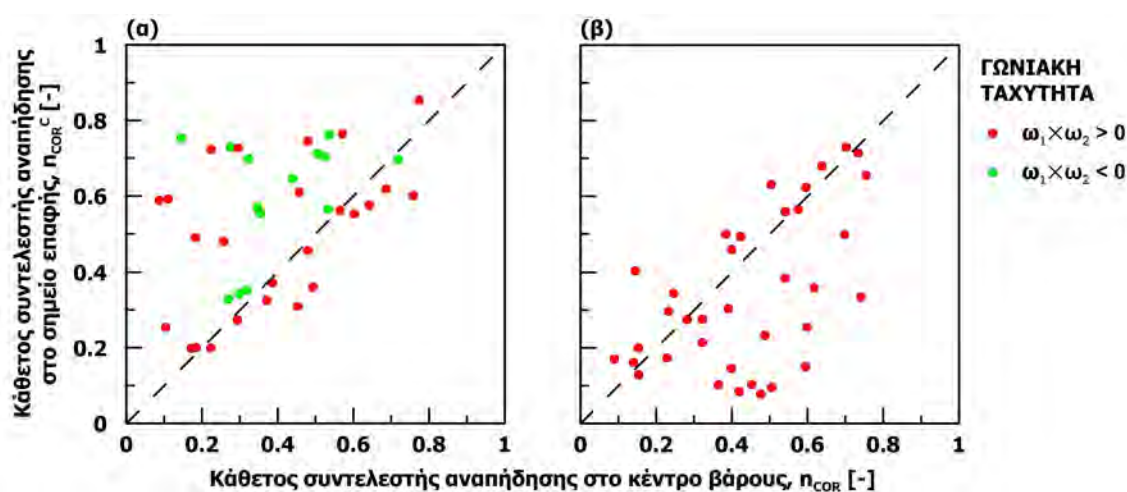
Σχήμα 8.16: Συντελεστής αναπήδησης στο σημείο επαφής συναρτήσκει αυτού στο κέντρο βάρους, ομαδοποίηση σύμφωνα: (α) με τον λόγο των ημιαξόνων της έλλειψης και (β) με την κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης

Επίσης, με την βοήθεια του σχήματος 8.16-α παρατηρείται ότι όσο μικρότερος είναι ο λόγος των ημιαξόνων, δηλαδή όσο η έλλειψη τείνει προς τον κύκλο, ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης στο σημείο επαφής προσεγγίζει αυτόν του κέντρου βάρους του τεμάχους. Τούτο είναι εύλογο, καθώς στην περίπτωση αυτή η συνιστώσα της ταχύτητας που οφείλεται στην περιστροφή γίνεται οριζόντια, οπότε η κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας στο κέντρο βάρους να προσεγγίζει αυτήν στο σημείο επαφής.

Η διατύπωση των σχέσεων που χρησιμοποιούνται στο προσομοίωμα των Vijayakumar et al. (2012) βασίζεται στην παραδοχή ότι η κρούση έχει απειροστή διάρκεια, που συνεπάγεται ότι ο προσανατολισμός της έλλειψης παραμένει σταθερός κατά την διάρκεια της επαφής. Ωστόσο, τούτο δεν επαληθεύτηκε από τα πειραματικά δεδομένα (βλ. ενότητα 5.3.2).

Για να είναι σύμφωνη η αξιολόγηση της μεθοδολογίας των Vijayakumar et al. (2012) με τις παραδοχές που έχουν διατυπωθεί, εξετάζονται ξεχωριστά οι δοκιμές όπου το μήκος επαφής είναι μικρότερο του 0.1mm . Η περίπτωση αυτή χαρακτηρίζεται ως στιγμιαία, αφού δεν συμβαίνει κύλιση ή/και ολίσθηση του τεμάχους στην επιφάνεια πρόσκρουσης, εν αντιθέσει με την περίπτωση όπου το μήκος επαφής είναι μεγαλύτερο, περίπτωση που χαρακτηρίζεται ως ασταθής.

Βάσει του ανωτέρω διαχωρισμού, παρατηρείται ότι ο συντελεστής αναπήδησης που αντιστοιχεί στο σημείο επαφής συνδέεται με τον συντελεστή αναπήδησης του κέντρου βάρους. Στην περίπτωση της σταθερής επαφής (Σχήμα 8.17-α), ο συντελεστής αναπήδησης στο σημείο επαφής είναι ως επί το πλείστον μεγαλύτερος από αυτόν στο κέντρο βάρους, ενώ στην περίπτωση ασταθούς επαφής συμβαίνει το αντίθετο (Σχήμα 8.17-β).

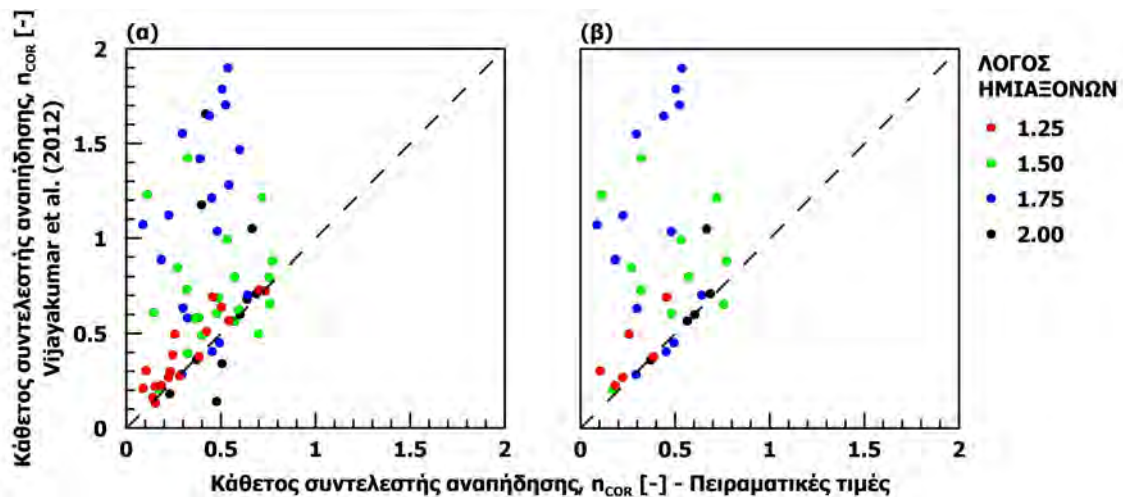


Σχήμα 8.17: Συντελεστής αναπήδησης στο σημείο επαφής συναρτήσει του προσανατολισμού της έλλειψης ως προς το είδος της επαφής: (α) στιγμιαία και (β) για ασταθή

Επιπρόσθετα, τα σημεία που προβάλλονται στο σχήμα 8.17 είναι χρωματικά κωδικοποιημένα ανάλογα με το αν διατηρείται η φορά της γωνιακής ταχύτητας μετά την κρούση (κόκκινα σημεία) ή αν μεταβάλλεται (πράσινα σημεία). Παρατηρείται ότι μόνο στην περίπτωση σταθερής επαφής δύναται, υπό προϋποθέσεις, να αλλάξει φορά η γωνιακή ταχύτητα.

Η αξιολόγηση της μεθοδολογίας των Vijayakumar et al. (2012) γίνεται συγκρίνοντας τον συντελεστή αναπήδησης του κέντρου βάρους που υπολογίζεται με την σχέση 3.69, με αυτόν που προσδιορίστηκε πειραματικά. Χρησιμοποιούνται η γωνιακή και η μεταθετική ταχύτητα, τα γεωμετρικά στοιχεία της έλλειψης, ο προσανατολισμός της κατά την επαφή καθώς και ο συντελεστής αναπήδησης που αντιστοιχεί στο σημείο επαφής.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 8.18-α, η εν λόγω σχέση αποδίδει ως επί το πλείστον μεγαλύτερες τιμές από αυτές που προσδιορίστηκαν πειραματικά. Δηλαδή, η μεθοδολογία αυτή προβλέπει μεγαλύτερη κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας μετά την κρούση και άρα μεγαλύτερη αναπήδηση. Συνεπώς ένας ή περισσότεροι μηχανισμοί που προκαλούν τον περιορισμό της κίνησης δεν λαμβάνονται υπόψη.



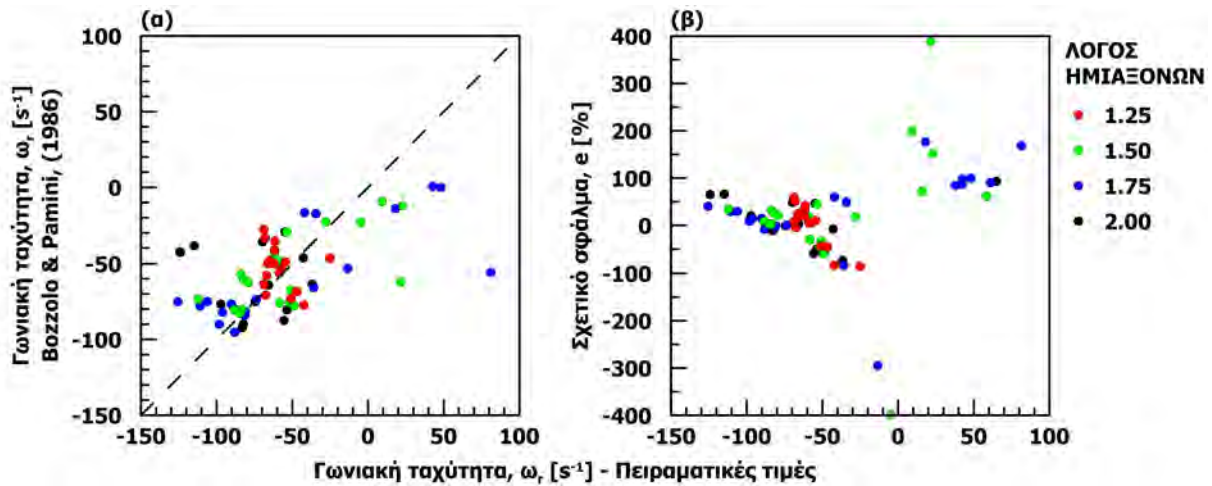
Σχήμα 8.18: Σύγκριση του συντελεστή αναπήδησης από τις δοκιμές με αυτόν που προσδιορίζεται από την μεθοδολογία Vijayakumar et al. (2012): (α) για όλα τα δεδομένα και (β) για την περίπτωση της στιγμιαίας επαφής

Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που αντιστοιχούν στην περίπτωση της σταθερής επαφής (Σχήμα 8.18-β), ώστε να είναι, εν μέρει, σε ισχύ οι παραδοχές, η πρόβλεψη δεν βελτιώνεται. Συνεπώς, η εν λόγω μεθοδολογία δεν φαίνεται να ανταποκρίνεται στην συμπεριφορά των τεμαχών κατά την κρούση και κατ' επέκταση δεν έχει χρηστική αξία.

8.7.2 Αξιολόγηση μεθόδου Bozzolo and Pamini (1986)

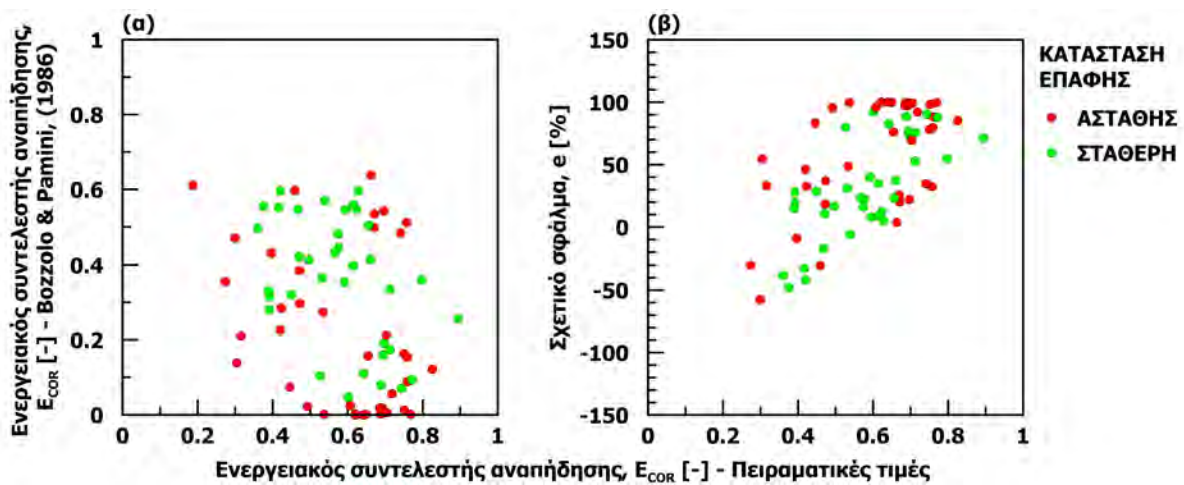
Στο σχήμα 8.19 είναι αποτυπωμένα τα σημεία που αντιστοιχούν στην γωνιακή ταχύτητα που προσδιορίστηκε πειραματικά με την αυτήν που υπολογίζεται από την προτεινόμενη σχέση 3.52 (Bozzolo and Pamini, 1986). Τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό είναι η γωνιακή και η μεταθετική ταχύτητα πριν την κρούση, καθώς και η σχετική θέση του σημείου επαφής με το κέντρο βάρους της έλλειψης.

Παρατηρείται κάποια τάση συσχέτισης, υπό την έννοια ότι τα σημεία προβάλλονται περίεξ της ευθείας των 45° (Σχήμα 8.19-α). Όμως, το σχετικό σφάλμα (Σχήμα 8.19-β) που προκύπτει ανέρχεται έως και 400%, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον προσδιορισμό της τροχιάς. Επιπρόσθετα, εξετάζοντας μόνο τις δοκιμές στις οποίες η επαφή χαρακτηρίζεται ως σταθερή, το μέγεθος του σφάλματος παραμένει υψηλό, καθιστώντας προβληματική την χρήση της εν λόγω σχέσης.



Σχήμα 8.19: Αξιολόγηση της γωνιακής ταχύτητας που προσδιορίζεται με την σχέση των Bozzolo and Pamini (1986): (α) σύγκριση γωνιακής ταχύτητας με τα πειραματικά αποτελέσματα και (β) σχετικό σφάλμα εκτίμησης

Αναφορικά με τον ενεργειακό συντελεστή αναπήδησης, που υπολογίζεται από την σχέση 3.54 των Bozzolo and Pamini (1986), προκύπτουν κυρίως μικρότερες τιμές από αυτές που προσδιορίστηκαν πειραματικά, δηλαδή μικρότερη αναπήδηση (Σχήμα 8.20). Αυτό είναι σε αντίθεση με την συμπεριφορά που παρατηρήθηκε στις δοκιμές πεδίου που εκτελέστηκαν από τους ίδιους για την βαθμονόμηση της εν λόγω σχέσης. Έτσι έθεσαν πεδίο ορισμού στην τιμή του ενεργειακού συντελεστή αναπήδησης, με το άνω όριο να προσδιορίζεται πειραματικά και να είναι συνδεδεμένο με το είδος του γεωυλικού και την κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης. Η περιγραφή των δοκιμών που εκτέλεσαν καθώς και η τεκμηρίωση των τιμών που προτείνουν ως άνω όρια είναι ανεπαρκής. Κατ' επέκταση δεν υπάρχει η δυνατότητα περαιτέρω διερεύνησης της μεθοδολογίας αυτής.



Σχήμα 8.20: Αξιολόγηση του ολικού ενεργειακού συντελεστή αναπήδησης που προσδιορίζεται με την σχέση των Bozzolo and Pamini (1986): (α) σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα και (β) σχετικό σφάλμα εκτίμησης

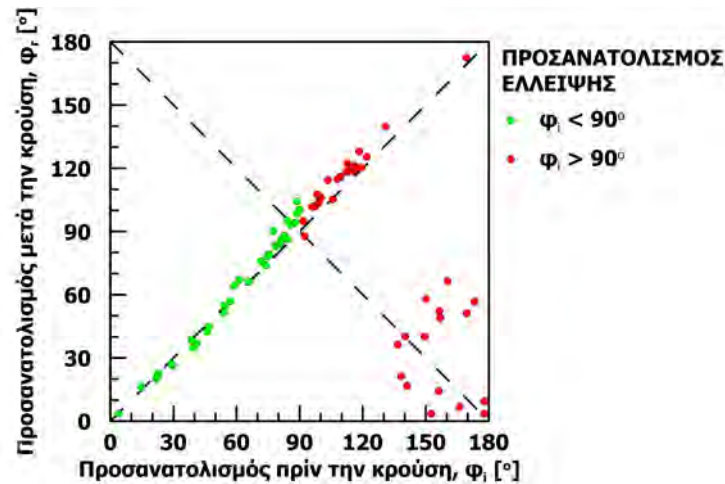
Στο σχήμα 8.20-α παρουσιάζεται η σύγκριση του ενεργειακού συντελεστή αναπήδησης από τα πειράματα με αυτόν που προκύπτει από την εφαρμογή της σχέσης των Bozzolo and Ramini (1986). Όπως παρατηρείται, η δυνατότητα πρόβλεψης είναι περιορισμένη, ανεξάρτητα με το εάν η επαφή είναι σταθερή ή ασταθής (πράσινα και κόκκινα σημεία αντίστοιχα) και το σχετικό σφάλμα σημαντικό 8.20-β, κάτι αναμενόμενο δεδομένης της διαφοροποίησης που υπάρχει στην γωνιακή ταχύτητα. Συνεπώς, δεν ενδείκνυται η χρήση της για την μελέτη των καταπτώσεων και την διαστασιολόγηση μέτρων προστασίας.

8.7.3 Αξιολόγηση μεθόδου Azzoni et al. (1995)

Το προσομοίωμα των Azzoni et al. (1995) έχει το χαρακτηριστικό ότι διακρίνει τρεις περιπτώσεις ανάλογα με τον προσανατολισμό που έχει η έλλειψη κατά την επαφή. Η διάκριση αυτή επαληθεύεται, εν μέρει, από την απόκριση των τεμαχών στις δοκιμές που εκτελέστηκαν, όπως προκύπτει και από το σχήμα 5.39 στην ενότητα 5.3.2. Στην περίπτωση όπου η έλλειψη έχει προσανατολισμό από 90 έως 180°, γίνεται η παραδοχή ότι το τέμαχος θα κυλήσει στην επιφάνεια πρόσκρουσης και η αναπήδηση θα γίνει από την συμμετρική ως προς την κατακόρυφο θέση σε σχέση με την αυτήν κατά την επαφή. Δηλαδή, ο προσανατολισμός της έλλειψης κατά την αναπήδηση θα ισούται με την συμπληρωματική γωνία του προσανατολισμού κατά την κρούση.

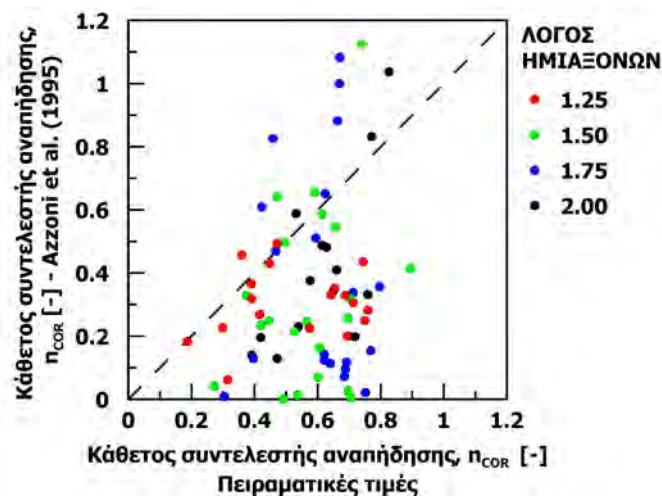
Στο σχήμα 8.21 προβάλλονται για όλες τις δοκιμές, οι προσανατολισμοί της έλλειψης πριν και μετά την κρούση καθώς και ευθείες με κλίση 1 και -1. Ένα σημείο που προβάλλεται επί της ευθείας με κλίση 1 περιγράφει δοκιμή όπου ο προσανατολισμός της έλλειψης κατά την αναπήδηση ταυτίζεται με τον προσανατολισμό κατά την κρούση. Αντιθέτως, η ευθεία με κλίση -1 περιγράφει την περίπτωση όπου η αναπήδηση γίνεται με τον συμπληρωματικό προσανατολισμό της έλλειψης σε σχέση με αυτόν της κρούσης. Συνεπώς, για να ισχύει η παραδοχή αυτή, τα σημεία με προσανατολισμό κατά την κρούση από 90 έως 180° θα πρέπει να προβάλλονται επί της ευθείας με κλίση -1.

Η παραδοχή αυτή φαίνεται να προσεγγίζει την απόκριση των τεμαχών μόνο στις περιπτώσεις όπου ο προσανατολισμός της έλλειψης κατά την κρούση είναι μεγαλύτερος από περίπου 120°. Παρόλα αυτά υπάρχει αξιοσημείωτη απόκλιση των τιμών από την ευθεία κλίσης -1. Μέχρι την τιμή αυτή, ο προσανατολισμός της έλλειψης στην αναπήδηση δεν φαίνεται να μεταβάλλεται σε σχέση με τον προσανατολισμό κατά την επαφή. Συνεπώς, ο μηχανισμός αναδιάταξης του τεμάχους που περιγράφεται από τους Azzoni et al. (1995) δεν επαληθεύεται από τα πειραματικά αποτελέσματα.



Σχήμα 8.21: Προσανατολισμός έλλειψης πριν και μετά την κρούση

Επίσης, η μεθοδολογία αυτή δεν επαληθεύεται ούτε ως προς την εκτίμηση του ενεργειακού συντελεστή αναπήδησης. Στο σχήμα 8.22 αποτυπώνεται η πειραματική και η εκτιμώμενη τιμή, όπου παρατηρείται σημαντική διαφοροποίηση. Αυτό συνεπάγεται αδυναμία της εν λόγω μεθοδολογίας να προβλέψει την απόκριση του τεμάχους.



Σχήμα 8.22: Σύγκριση του ενεργειακού συντελεστή αναπήδησης από τις δοκιμές με αυτόν που προκύπτει με την μεθοδολογία των Azzoni et al. (1995)

Συνεπώς, οι παραπάνω θεωρητικές μεθοδολογίες αποτυγχάνουν να περιγράψουν την απόκριση των τεμαχών, κυρίως λόγω της μη ικανοποίησης των παραδοχών στις οποίες έχει βασισθεί η κατάρτισή τους.

8.8 Εκτροπή τροχιάς εξαιτίας της κρούσης

Γενικώς, η εκτροπή της τροχιάς εξαιτίας της κρούσης έχει διερευνηθεί ελάχιστα μέχρι σήμερα. Κατά συνέπεια, τα διαθέσιμα στοιχεία για την αξιολόγηση – επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων της παρούσας έρευνας είναι περιορισμένα.

Από την πειραματική διερεύνηση προέκυψε ότι η εκτροπή εξαρτάται τόσο από το σχήμα του τεμάχου όσο και από την κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης. Πιο συγκεκριμένα, στην ομόρροπη κρούση, η εκτροπή μειώνεται όσο η επιφάνεια πρόσκρουσης γίνεται περισσότερο απότομη και όσο το σχήμα του τεμάχου τείνει προς το σφαιρικό. Στην λοξή κρούση, η αύξηση της διαφοράς διεύθυνσης επιδρά σημαντικά προκαλώντας την αύξηση του εύρους της εκτροπής, ενώ σε συνδυασμό με την κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης καθορίζεται το μέγεθος της αλλαγής της διεύθυνσης των τεμαχών.

Σύμφωνα με τους Crosta and Agliardi (2004), η πλευρική διασπορά της τροχιάς εξαρτάται από το γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά (διεύθυνση και κλίση), τις τοπικές ανωμαλίες της επιφάνειας πρόσκρουσης (τραχύτητα και κυματισμός) και την γεωμετρία επαφής (σχήμα τεμάχου και κινηματικά χαρακτηριστικά κρούσης). Τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας αναφορικά με την εκτροπή είναι, εν γένει, σε συμφωνία με τα παραπάνω.

Στην ομόρροπη κρούση η εκτροπή μειώνεται όσο η επιφάνεια πρόσκρουσης έχει μεγαλύτερη κλίση (βλ. ενότητα 6.2.3.1), συμπέρασμα στο οποίο κατέληξαν και οι Azzoni and De Freitas (1995) μετά από επιτόπου δοκιμές. Στην εν λόγω έρευνα, η πλευρική διασπορά της τροχιάς κυμαίνεται από 10% έως 20%, που ισοδυναμεί με εκτροπή από 5.5 έως 11.5°. Από τις αριθμητικές αναλύσεις των Agliardi and Crosta (2003), το μέγεθος της εκτροπής προσδιορίστηκε έως 20°. Γενικώς, τα μεγέθη αυτά προσεγγίζουν την εκτροπή των σφαιρικών τεμαχών αλλά είναι μικρότερα από την εκτροπή που προσδιορίστηκε για τα κυβικά τεμάχη στην παρούσα έρευνα. Ωστόσο, δεν είναι εφικτή η απευθείας σύγκριση, καθώς η πλευρική διασπορά που αναφέρεται στις παραπάνω εργασίες απαρτίζεται από διαδοχικές κρούσεις. Επίσης, στις παραπάνω εργασίες η διεύθυνσή της τροχιάς πριν την κρούση είναι σχεδόν παράλληλη με την φορά μέγιστης κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης, έτσι δεν είναι κατάλληλες για σύγκριση με τα αποτελέσματα των δοκιμών λοξής κρούσης.

Οι Bourrier et al. (2009) έχουν καταρτίσει ένα εμπειρικό μοντέλο για την εκτίμηση της εκτροπής, στο οποίο λαμβάνεται υπόψη και η διαφορά διεύθυνσης. Κατ' αρχήν, θεωρούν ότι η εκτροπή συμβαίνει αποκλειστικά από την διεύθυνσή της τροχιάς πριν την κρούση προς την φορά μέγιστης κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης.

Ωστόσο, από την παρούσα πειραματική διερεύνηση προκύπτει ότι για περιορισμένη διαφορά διεύθυνσης ($< 30^\circ$), η εκτροπή μπορεί να είναι και προς την αντίθετη πλευρά από την φορά μέγιστης κλίσης. Τούτο είναι λογικό, καθώς στην ομόρροπη κρούση η εκτροπή είναι συμμετρικά κατανομημένη ως προς την φορά μέγιστης κλίσης, δηλαδή και προς τις δύο κατευθύνσεις. Έτσι, εάν υπάρχει περιορισμένη διαφορά διεύθυνσης, τότε η κατανομή μετατοπίζεται ελαφρώς προς την φορά μέγιστης κλίσης, όμως ο ένας κλάδος της θα παραμείνει προς

την αντίθετη κατεύθυνση. Επίσης, όταν η διαφορά διεύθυνσης είναι μεγάλη, η εκτροπή δεν ξεκινάει από την διεύθυνση της τροχιάς πριν την κρούση, αλλά λαμβάνει τιμή που εξαρτάται από την κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης και την φορά μεγίστης κλίσης αυτής.

Επίσης, στο μοντέλο των Bourrier et al. (2009) η εκτροπή εξαρτάται μόνο από την ταχύτητα πρόσκρουσης. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας καταδεικνύουν ότι η διαφορά διεύθυνσης και η κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης έχουν βαρύνουσα σημασία. Όσον αφορά στην ταχύτητα πρόσκρουσης δεν προέκυψε κάποια διαφοροποίηση στο μέγεθος της εκτροπής μεταξύ των δοκιμών πεδίου και εργαστηρίου, όπου η ταχύτητα πρόσκρουσης στο πεδίο ήταν σχεδόν διπλάσια. Όμως όλες οι δοκιμές που έγιναν ανήκουν στην ίδια κλάση ταχυτήτων πρόσκρουσης του εν λόγω μοντέλου, κατά συνέπεια δεν δύναται να αξιολογηθεί κατά πόσο επιδρά η ταχύτητα πρόσκρουσης.

Περαιτέρω, οι Bourrier et al. (2009) θεωρούν ότι η εκτροπή κατανέμεται βάσει μια εμπειρικής κατανομής που έχει λοξότητα ως προς την διεύθυνση της τροχιάς πριν την κρούση, ώστε να επικρατούν οι περιορισμένες τιμές εκτροπής. Ωστόσο, στα πειραματικά αποτελέσματα της παρούσας έρευνας η εκτροπή είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη στο εύρος της, συνεπώς δεν μπορούν να περιγραφούν από κατανομή με την εν λόγω μορφή.

Τα αποτελέσματα από τις δοκιμές εργαστηρίου και πεδίου της παρούσας έρευνας, σχολιάζονται περαιτέρω στην ενότητα 9.5.1, όπου έχουν χρησιμοποιηθεί για την κατάρτιση και αξιολόγηση μιας εμπειρικής μεθοδολογίας προσδιορισμού του εύρους που λαμβάνει.

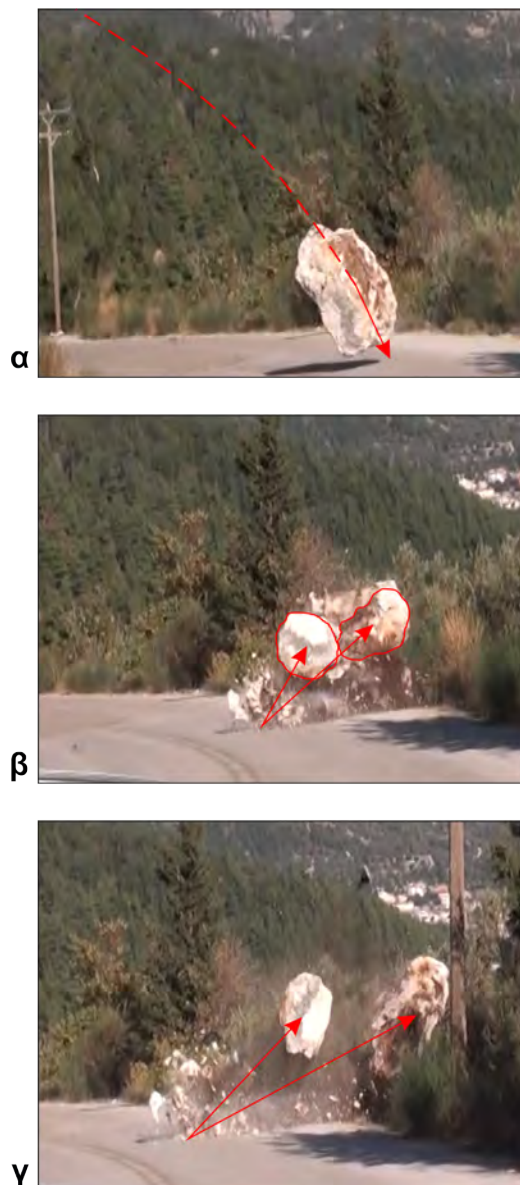
8.9 Θραύση τεμαχών κατά την πρόσκρουση

Η θραύση του τεμάχους είναι συνήθης σε μια φυσική κατάπτωση (Giacomini et al., 2009), ωστόσο αν και παρατηρήθηκε στην έρευνα αυτή, δεν αποτέλεσε αντικείμενο μελέτης. Γενικώς, τυχόν θραύση των τεμαχών δεν λαμβάνεται υπόψη ούτε στις πρακτικές εφαρμογές, καθώς κατά την αστοχία καταναλώνεται περισσότερη ενέργεια με συνέπεια η αναπήδηση να είναι μικρότερη. Έτσι, αποτελεί ευμενέστερη περίπτωση σε σχέση με την μη θραύση του τεμάχους.

Μετά την θραύση, η κίνηση των θραυσμάτων μπορεί να εξελιχθεί πάλι ως παραβολική τροχιά, κύλιση η και ολίσθηση. Όμως, η διασπορά των επιμέρους τεμαχών είναι σημαντική (Σχήμα 8.23), καθιστώντας αδύνατη την εκτίμηση της κατεύθυνσής τους. Περαιτέρω, η προσομοίωση της αναπήδησης παρουσιάζει πρόσθετες δυσκολίες. Η χρήση των συντελεστών αναπήδησης με τους κινηματικούς ορισμούς είναι προβληματική, καθώς κάθε θραύσμα έχει διαφορετική ταχύτητα.

Θεωρητικά, αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με τους ενεργειακούς συντελεστές αναπήδησης, εξετάζοντας την ενέργεια μετά την κρούση όλων των θραυσμάτων, με βάση την σχέση 8.9, που βασίζεται στην θεωρία κρούσεων της κλασικής μηχανικής. Ωστόσο απαιτείται η ανάκτησή των θραυσμάτων ώστε να μετρηθεί η μάζα τους, διαδικασία που είναι πρακτικώς αδύνατη στις δοκιμές πεδίου.

$$E_{COR} = \frac{KE_{trans,r}}{KE_{trans,i}} = \frac{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n m_i v_{r,i}^2}{\frac{1}{2} m v_i^2} \quad (8.9)$$

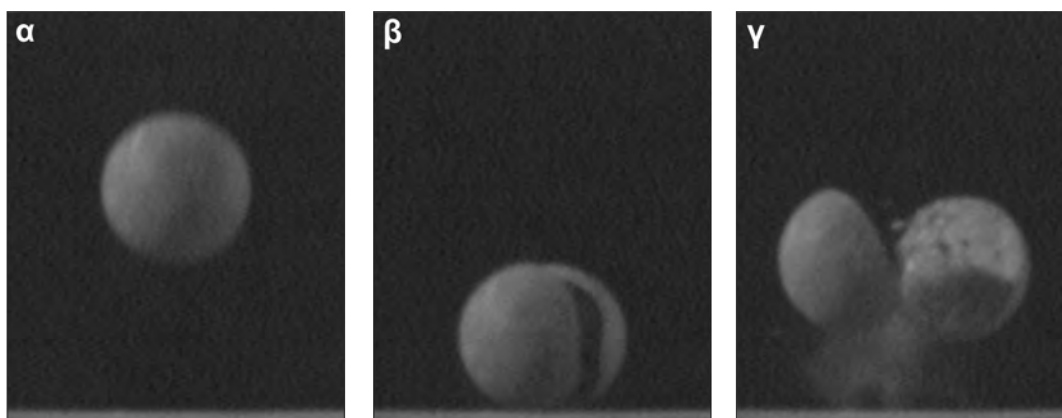


Σχήμα 8.23: Θραύση τεμάχους μετά από τον πρόσφατό σεισμό της Λευκάδας -Νοέμβριος 2015 (Απόσπασμα από βίντεο, πηγή: Αθ. Κατωπόδης - προσωπική επικοινωνία)

Θραύση παρατηρήθηκε στις πρώτες διερευνήσεις που πραγματοποιήθηκαν (Ενότητα 5.1), όπου τα τεμάχια που χρησιμοποιήθηκαν αρχικά ήταν κυβικά. Η θραύση γινόταν κυρίως στις γωνίες των δοκιμών, εξαιτίας της συγκέντρωσης τάσεων. Το γεγονός αυτό ήταν αποτρεπτικό για την εξέλιξη των δοκιμών, καθώς έπρεπε να διαμορφώνονται συνεχώς νέα δοκίμια, που είναι ιδιαιτέρως χρονοβόρα διαδικασία. Έτσι, λειάνθηκαν οι ακμές και οι γωνίες των τεμαχών, περιορίζοντας δραστικά τις παρατηρούμενες τοπικές αστοχίες.

Θραύση συνέβη και στις δοκιμές ελεύθερης πτώσης σφαιρικών δοκιμών σε οριζόντια επιφάνεια πρόσκρουσης (βλ. ενότητα 5.2.1), όταν το ύψος απελευθέρωσης ήταν μεγάλο. Στην διερεύνηση αυτή πραγματοποιήθηκαν αρχικά οι δοκιμές με τα τεχνητά υλικά (τσιμεντοειδές ένεμα και εποξειδική ρητίνη) και έπειτα οι δοκιμές με τα φυσικά υλικά.

Τα τεμάχια από εποξειδική ρητίνη απελευθερώθηκαν από ύψος έως 4.5m χωρίς να αστοχήσουν. Αντιθέτως, από το ύψος αυτό όλα τα τεμάχια από τσιμεντοειδές ένεμα θραύστηκαν. (Σχήμα 8.24). Η αστοχία συνέβη μετά από 2-3 ρίψεις κάθε δοκιμίου, όπου σε κάθε επανάληψη μέχρι την θραύση πρόκυπτε αισθητά μικρότερος συντελεστής αναπήδησης. Αυτό αποδίδεται στην ανάπτυξη και διάδοση των μικρορωγμών εντός του δοκιμίου, διαδικασία που καταναλώνει ενέργεια. Ωστόσο, μέχρι και την αστοχία, δεν ήταν μακροσκοπικά εμφανές κάποιο ίχνος αστοχίας στην επιφάνεια των δοκιμών.

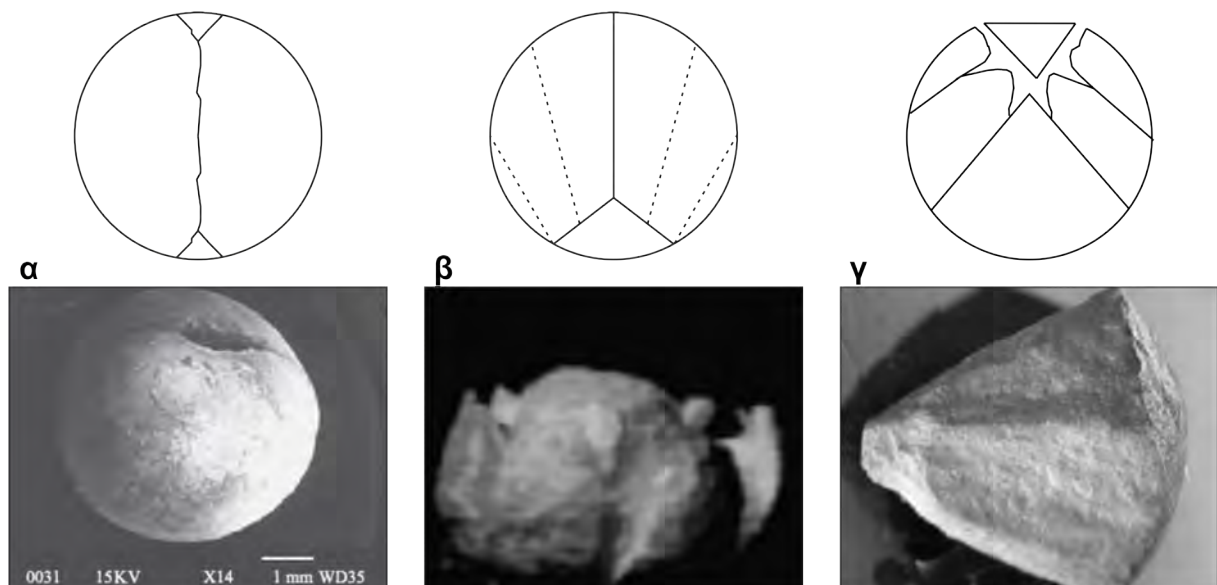


Σχήμα 8.24: Θραύση δοκιμίου από τσιμεντοειδές ένεμα, διαμέτρου 40mm, σε δοκιμή ελεύθερης πτώσης από ύψος 4.5m (χρόνος μεταξύ καταγραφών: 3/500s)

Γενικώς, η μορφή θραύσης ενός σφαιρικού δοκιμίου εξαρτάται από την ταχύτητα πρόσκρουσης (Salman et al., 2004). Διακρίνονται τρεις χαρακτηριστικές μορφές αστοχίας, που αντιστοιχούν σε μικρή, μέση και υψηλή ταχύτητα πρόσκρουσης (Σχήμα 8.25-α, β και γ αντίστοιχα). Ωστόσο τα όρια διαφοροποίησης δεν είναι σαφώς ορισμένα και εξαρτώνται από την διάμετρο-μάζα του τεμαχούς. Ενδεικτικά, για σφαιρικά τεμάχια αλουμινίου, τα πρώτα ίχνη θραύσης γίνονται εμφανή σε σφαίρα διαμέτρου 5mm για ταχύτητα πρόσκρουσης 15ms^{-1} , ενώ σε σφαίρα 0.4mm η αντίστοιχα ταχύτητα πρόσκρουσης ανέρχεται σε 100ms^{-1} (Gorham and Salman, 2005).

Στην περίπτωση της χαμηλής ταχύτητας, η θραύση του δοκιμίου γίνεται κάθετα στην επιφάνεια πρόσκρουσης και η σφαίρα διαχωρίζεται σε δυο σχεδόν ίσα τεμάχια. Στις κρούσεις μέσης ταχύτητας αρχικά σχηματίζονται δυο σφήνες, στο ζενίθ και το ναδίρ της σφαίρας, και στην συνέχεια διαχωρίζεται σε δυο επιμέρους τεμάχια, συμμετρικά ως προς την διεύθυνση της κρούσης. Τέλος, στην υψηλή ταχύτητα πρόσκρουσης, η θραύση καταστρέφει το μεγαλύτερο μέρος του δοκιμίου, αφήνοντας ανέπαφη μόλις μια σφήνα, αντιδιαμετρικά του σημείου επαφής.

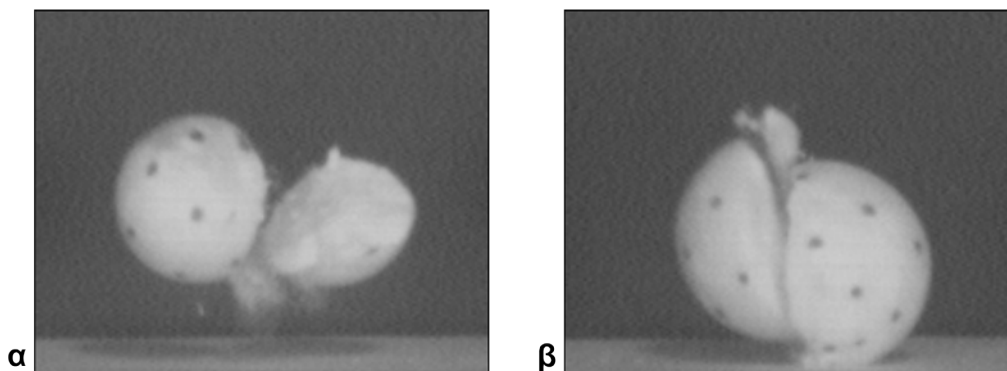
Εξετάζοντας την μορφή θραύσης, βάσει της προαναφερθείσας ποιοτικής ταξινόμησης, προκύπτει ότι η αστοχία αντιστοιχεί σε συνθήκες χαμηλής ταχύτητας. Περαιτέρω, ομοιάζει με την μορφή αστοχίας της δοκιμής θραύσης κατά γενέτειρα (Brazil test), συνεπώς δύναται να θεωρηθεί ότι το δοκίμιο αστοχεί εξαιτίας υπέρβασης της εφελκυστικής αντοχής του, κάθετα στην διεύθυνση της κρούσης.



Σχήμα 8.25: Χαρακτηριστικές μορφές αστοχίας σφαιρικών δοκιμίων σε κρούση (Salman et al., 2004), για: (α) μικρή, (β) μέση και (γ) υψηλή ταχύτητα πρόσκρουσης

Σύμφωνα με τους Salman et al. (1995) όταν η κρούση γίνεται υπό γωνία παρατηρούνται πάλι οι ίδιες μορφές θραύσης. Στις κρούσεις χαμηλής ταχύτητας τα τεμάχια δεν είναι πλέον συμμετρικά ως προς το κατακόρυφο επίπεδο. Επειδή τα όρια ταχυτήτων καθορίζονται από την κάθετη συνιστώσα της κίνησης, για δεδομένη ταχύτητα πρόσκρουσης, περιορίζονται οι αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις όσο η γωνία πρόσκρουσης αποκλίνει από τις 90°.

Ακολούθως πραγματοποιήθηκε η διερεύνηση με τα σφαιρικά τεμάχια μαρμάρου και ψαμμίτη. Βάσει των ανωτέρω, προηγήθηκαν οι δοκιμές παραβολικής ρίψης ώστε να αποφευχθεί τυχόν θραύση των δοκιμίων, καθώς δεν υπήρχε δυνατότητα αντικατάστασής τους. Εν τέλει, τα τεμάχια μαρμάρου αστόχησαν στις δοκιμές ελεύθερης πτώσης (Σχήμα 8.26), από ύψος απελευθέρωσης 180cm, παρουσιάζοντας αντίστοιχη συμπεριφορά και μορφή αστοχίας με τα τεμάχια από το τσιμεντοειδές ένεμα. Τα τεμάχια ψαμμίτη δεν αστόχησαν από το ύψος αυτό.



Σχήμα 8.26: Θραύση σφαιρικών τεμαχών μαρμάρου, διαμέτρου: (α) 27mm και (β) 34mm

Θραύση συνέβη σε αρκετές περιπτώσεις στις γωνίες των κυβικών τεμαχών από τσιμεντοειδές ένεμα, που χρησιμοποιήθηκαν στην τριδιάστατη διερεύνηση τόσο στο εργαστήριο όσο και στο πεδίο. Αυτό δεν αποτέλεσε πρόβλημα για την διεξαγωγή των δοκιμών, καθώς ήταν δυνατή η αναπαραγωγή μεγάλου πλήθους πανομοιότυπων δοκιμών με την χρήση των ειδικών εκμαγείων. Ενδεικτικά, για την διαμόρφωση των δοκιμών καταναλώθηκαν περισσότερα από 500kg πρώτης ύλης τσιμεντοειδούς ενέματος.

Επίσης, στο πεδίο παρατηρήθηκε ότι η θραύση των σφαιρικών δοκιμών πραγματοποιήθηκε ύστερα από λιγότερες επαναλήψεις από ότι στα κυβικά δοκίμια. Αυτό αποδίδεται στην βραχύτερη διάρκεια επαφής και στην μικρότερη έκταση της επιφάνειας επαφής, που έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη μεγαλύτερων τάσεων από ότι στα κυβικά δοκίμια. Στις περιπτώσεις αυτές, η μορφή της θραύσης ομοιάζει με αυτήν της χαμηλής ταχύτητας, όπου παρατηρήθηκε επίσης και μη συμμετρία των δυο επιμέρους τεμαχών (Σχήμα 7.29), σύμφωνα με την ποιοτική περιγραφή των Salman et al. (1995). Αντιθέτως, για τα ίδια χαρακτηριστικά πρόσκρουσης, η θραύση στα κυβικά δοκίμια περιορίστηκε κυρίως στις γωνίες τους.



Σχήμα 8.27: Θραύση σφαιρικού τεμάχου στο πεδίο

8.10 Σύνοψη

Τα αποτελέσματα της παρούσας πειραματικής διερεύνησης είναι σε καλή συμφωνία μεταξύ των διαφόρων διερευνήσεων που πραγματοποιήθηκαν, παρά το γεγονός ότι οι συνθήκες ήταν σημαντικά διαφοροποιημένες. Επίσης, συμβαδίζουν και με τα αναφερόμενα στην σχετική βιβλιογραφία, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις αναθεωρούν τα συμπεράσματά τους. Κυριότερα, απόρροια του μεγάλου πλήθους δοκιμών που εκτελέστηκαν, τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας συμπληρώνουν την υφιστάμενη γνώση και αποκαλύπτουν τις κρίσιμες παραμέτρους που επηρεάζουν την απόκρουση του τεμάχους στην κρούση.

Η καλύτερη ιδιότητα του πετρώματος για να συσχετισθεί με την αναπήδηση είναι η σκληρότητα που προσδιορίζεται με τη σφύρα Schmidt. Όσο μεγαλύτερη η σκληρότητα των υλικών, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η αναπήδηση. Επίσης, το μέγεθος της αναπήδησης επηρεάζεται και από την διαφοροποίηση της σκληρότητας της επιφάνειας πρόσκρουσης από αυτή του τεμάχους.

Η αναπήδηση καθορίζεται από την σφοδρότητα της κρούσης, που εξαρτάται από την μάζα του τεμάχους και την ταχύτητα πρόσκρουσης. Όσο εντείνεται η σφοδρότητα της κρούσης τόσο αυξάνουν οι αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις και άρα μειώνεται η αναπήδηση.

Η γωνία πρόσκρουσης επιδρά επίσης σημαντικά στην αναπήδηση με την μείωση της να προκαλεί αύξηση της διακύμανσης του καθέτου συντελεστή αναπήδησης και κατ' επέκταση της μεγίστης τιμής που μπορεί να λάβει, ενώ υπό συνθήκες δύναται να υπερβεί και την μονάδα.

Το σχήμα του τεμάχους επηρεάζει επιπρόσθετα την απόκριση στην κρούση. Γενικώς, στην περίπτωση της κάθετης κρούσης, τα σφαιρικά τεμάχη παρουσιάζουν μεγαλύτερο κάθετο συντελεστή αναπήδησης και μικρότερη διακύμανση συγκριτικά με τα γωνιώδη τεμάχη.

Αντιθέτως, η γωνιακή ταχύτητα δεν προκαλεί κάποια συστηματική διαφοροποίηση στην απόκριση του τεμάχους, ούτε όμως αιτιολογεί την διακύμανση των συντελεστών αναπήδησης. Συνεπώς, η συνεκτίμησή της δεν επιφέρει κάποιο όφελος για τον προσδιορισμό της τροχιάς που θα διαγράψει το τέμαχος μετά την κρούση.

Βάσει των ανωτέρω, για να θεωρηθεί ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης ως σταθερά του υλικού, ώστε να είναι ουσιαστική η πρόταση χαρακτηριστικών τιμών, θα πρέπει:

- να βασίζεται σε δοκιμές ελεύθερης πτώσης, καθώς έτσι απαλείφεται η επίδραση της γωνίας πρόσκρουσης.
- τα τεμάχη να είναι σφαιρικά και η επιφάνεια πρόσκρουσης λεία, ώστε να μην αντίκτυπο στην αναπήδηση η διαφοροποίηση της γεωμετρίας επαφής εξαιτίας του σχήματος
- η επιφάνεια πρόσκρουσης και το τέμαχος να είναι από το ίδιο υλικό και σε όμοια κατάσταση, καθώς η αναπήδηση καθορίζεται από την σκληρότητα τόσο της επιφάνειας πρόσκρουσης όσο και του τεμάχους
- να είναι σαφώς ορισμένη η σφοδρότητα της κρούσης

Αντιθέτως, ο επαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης λαμβάνει σχετικά σταθερές τιμές και δεν εμφανίζει κάποια αξιοσημείωτη μεταβολή, παρά το γεγονός ότι εξετάστηκε σημαντικός αριθμός παραμέτρων. Έτσι, δεν υφίσταται λόγος για την περαιτέρω εξέτασή του.

Όσον αφορά στην εκτροπή του τεμάχους μετά την κρούση, παρατηρήθηκε ότι το μέγεθός της είναι σημαντικό, συνεπώς πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό. Πιο συγκεκριμένα, το μέγεθος της εκτροπής αυξάνεται:

- όσο το σχήμα του τεμάχους γίνεται περισσότερο γωνιώδες
- όσο η κρούση γίνεται σε επιφάνεια με ηπιότερη κλίση
- όσο αυξάνεται η διαφορά διεύθυνσης μεταξύ της τροχιάς του τεμάχους πριν την κρούση και της φοράς μεγίστης κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης

Στις δοκιμές πεδίου η απόκριση των τεμαχών εμφανίζει ανάλογη συμπεριφορά και αντίστοιχα μεγέθη με τις δοκιμές που έγιναν στο εργαστήριο, παρά την σημαντική διαφοροποίηση της μεταξύ τους κλίμακας. Έτσι, οι εμπειρικές συσχετίσεις που θα προκύψουν από την εκτενή εργαστηριακή διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της έρευνας αυτής, δύναται να αναχθούν στην κλίμακα των φυσικών φαινομένων.

Οι μεθοδολογίες άκαμπτου σώματος δεν βρέθηκαν ικανές να περιγράψουν την απόκριση των τεμαχών που παρατηρήθηκε στο εργαστήριο. Τούτο αποδίδεται στην μη ικανοποίηση των παραδοχών βάσει των οποίων έχουν καταρτιστεί. Οι μεθοδολογίες αυτές αποτελούν εναλλακτική προσέγγιση της μεθόδου σημειακής μάζας για την προσομοίωση της αναπήδησης. Ωστόσο δεν φαίνεται να βελτιώνουν την δυνατότητα εκτίμησης της τροχιάς, συνεπώς απαιτείται περαιτέρω έρευνα στην κατεύθυνση αυτή.

Κεφάλαιο 9

Κατάρτιση Εμπειρικών Συσχετίσεων

Στο κεφάλαιο αυτό αξιοποιούνται τα αποτελέσματα των διερευνήσεων που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας, για την κατάρτιση εμπειρικών συσχετίσεων. Στόχος είναι η ενίσχυση των διαθέσιμων εργαλείων για την εκτίμηση των συντελεστών αναπήδησης και κατ' επέκταση η βελτίωση της ποιότητας πρόβλεψης της τροχιάς.

Έτσι, προτείνονται δυο μεθοδολογίες, μια για την εκτίμηση του καθέτου συντελεστή αναπήδησης και της διακύμανσης των τιμών και μια για τον προσδιορισμό της εκτροπής. Λόγω της αυξημένης τυχαιότητας του φαινομένου και της πληθώρας παραμέτρων που το επηρεάζουν, η προσέγγιση για την κατάρτιση των ακολούθων σχέσεων είναι φαινομενολογική.

9.1 Συσχέτιση συντελεστών αναπήδησης με την σκληρότητα

Για την κατάρτιση μια σχέσης που θα συνδέει τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού με τον συντελεστή αναπήδησης, χρησιμοποιείται η σκληρότητα που προσδιορίζεται από την σφύρα Schmidt. Από την πειραματική διερεύνηση (βλ. ενότητα 5.1) προέκυψε ότι η σκληρότητα περιγράφει την συμπεριφορά του συντελεστή αναπήδησης καλύτερα από τις υπόλοιπες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων.

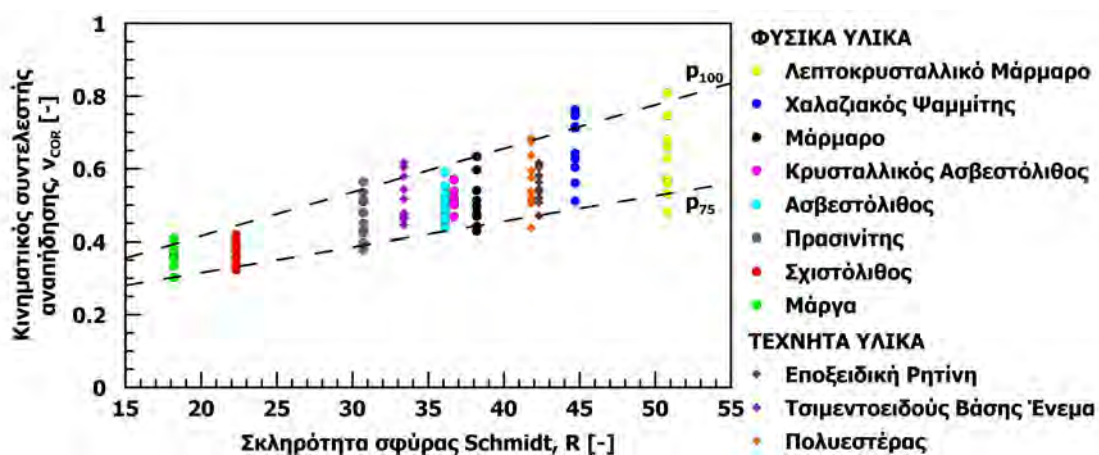
Ωστόσο, τα αποτελέσματα αυτά χαρακτηρίζονται, εν γένει, από σημαντική διακύμανση, που οφείλεται σε παραμέτρους όπως: η γωνία πρόσκρουσης, το σχήμα του τεμάχους, η τραχύτητα της επιφάνειας πρόσκρουσης κ.α. Συνεπώς, για να θεωρηθεί ο συντελεστής αναπήδησης ως ιδιότητα του υλικού, πρέπει αρχικά να απαλειφθούν οι παράμετροι που προκαλούν την διακύμανση των τιμών.

Έτσι, οι βέλτιστες δοκιμές για την κατάρτιση μιας εμπειρικής συσχέτισης του καθέτου συντελεστή αναπήδησης με την σκληρότητα του υλικού, είναι αυτές που πραγματοποιήθηκαν με σφαιρικά τεμάχια που ρίπτονταν με ελεύθερη πτώση σε οριζόντια επιφάνεια πρόσκρουσης. Άλλωστε, οι δοκιμές αυτές παρουσίασαν την καλύτερη επαναληψιμότητα, καθώς δεν επηρέαζαν οι παραπάνω παράμετροι. Ωστόσο, η αδυναμία απόκτησης ικανού αριθμού σφαιρικών δοκιμών από πετρώματα διαφορετικού τύπου, οδήγησε στην διενέργεια της βασικής

πειραματικής διερεύνησης που έγινε για την κατάρτιση της εν λόγω συσχέτισης, με τεμάχια κυβικού σχήματος με λειασμένες ακμές.

Στις δοκιμές ελεύθερης πτώσης (βλ. ενότητα 5.1.1), ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης ταυτίζεται με τον κινηματικό όταν η γωνία αναπήδησης ισούται με 90° και τον προσεγγίζει ικανοποιητικά για γωνίες αναπήδησης $> 65^\circ$, καθώς η διαφοροποίηση τους δεν υπερβαίνει το 10% (Σχήμα 5.3). Στα σφαιρικά τεμάχια η γωνία αναπήδησης ήταν στην συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων $> 85^\circ$, ωστόσο στα κυβικά παρατηρήθηκαν τιμές σε όλο το φάσμα των δυνατών γωνιών αναπήδησης, δηλαδή, από μηδέν έως και 90° . Έτσι, οι δοκιμές που παρουσιάστηκαν και αξιοποιήθηκαν στην εν λόγω ενότητα ήταν αυτές που εμφάνιζαν την μεγαλύτερη γωνία αναπήδησης, όπου πρακτικώς ταυτίζεται ο κάθετος με τον κινηματικό συντελεστή αναπήδησης και συγχρόνως ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης λαμβάνει την μεγαλύτερη τιμή του, υπό τις δεδομένες συνθήκες.

Στο σχήμα 9.1 παρατηρείται ότι οι ελάχιστες και οι μέγιστες τιμές του κινηματικού συντελεστή αναπήδησης συσχετίζονται γραμμικά με την σκληρότητα που προσδιορίζεται από την σφύρα Schmidt. Οι τιμές αυτές περιγράφουν το 75% και 100% αντίστοιχα της αθροιστικής συχνότητας των δοκιμών, ταξινομημένες κατά αύξουσα γωνία αναπήδησης. Έτσι, αποτελούν τις πιθανότητες μη υπέρβασης των αντίστοιχων τιμών του καθέτου (ή ισοδύναμα του κινηματικού) συντελεστή αναπήδησης.



Σχήμα 9.1: Σχέση κινηματικού συντελεστή αναπήδησης με την σκληρότητα κατά την σφύρα Schmidt. Αναπαρίστανται οι βέλτιστες ευθείες για την μέγιστη (p_{100}) και την ελάχιστη τιμή (p_{75}) του κινηματικού (ή ισοδύναμα του καθέτου) συντελεστή αναπήδησης από τις δοκιμές που αξιοποιήθηκαν

Στις πρακτικές εφαρμογές ο σχεδιασμός οφείλει να γίνεται για την δυσμενέστερη περίπτωση, ώστε να καλύπτεται κάθε πιθανή τροχιά. Έτσι χρησιμοποιούνται τα σημεία που αντιστοιχούν στο 100% της αθροιστικής συχνότητας κάθε σειράς δοκιμών, δηλαδή στην μέγιστη τιμή συντελεστή αναπήδησης που προσδιορίστηκε για κάθε υλικό.

Στη συνέχεια, εφαρμόστηκε η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων, με ανεξάρτητη μεταβλητή την σκληρότητα της σφύρας Schmidt και εξαρτημένη τον κινηματικό (ή ισοδύναμα τον κάθετο) συντελεστή αναπήδησης. Η σύνδεση των εν λόγω μεγεθών περιγράφεται από την σχέση:

$$v_{COR} = 0.0123R + 0.18 \quad (9.1)$$

όπου:

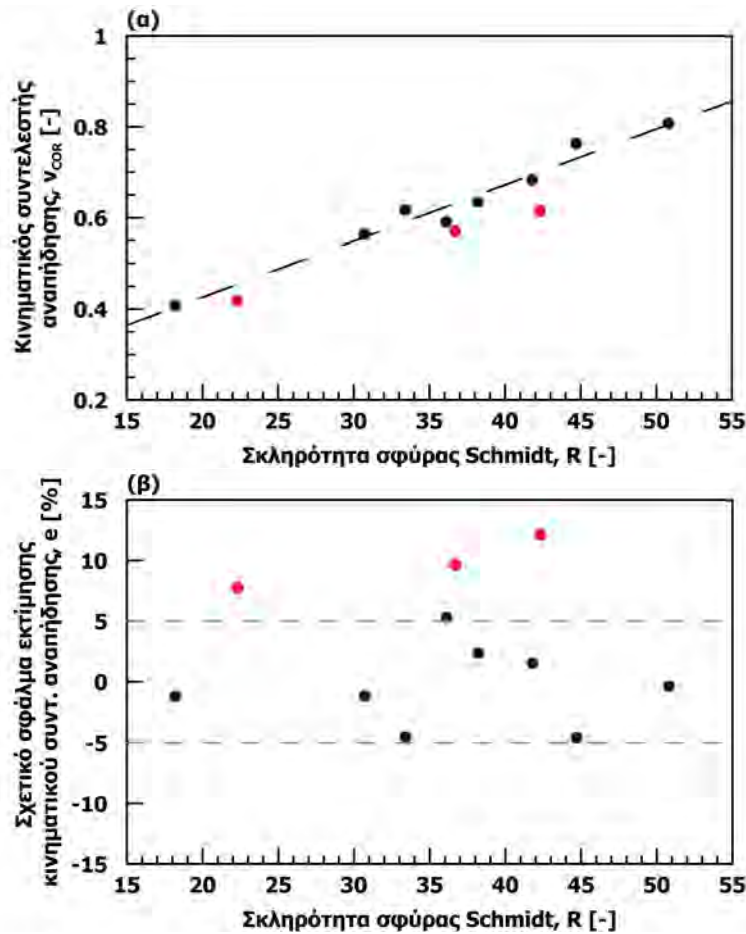
R η σκληρότητα κατά τη σφύρα Schmidt

Ο συντελεστής συσχέτισης (R^2) της παραπάνω σχέσης ισούται με 0.97, υποδεικνύοντας εξαιρετική συσχέτιση μεταξύ των μεγεθών που συνδέει. Ωστόσο, καταρτίστηκε αφαιρώντας τις τιμές του σχιστόλιθου, του κρυσταλλικού ασβεστόλιθου και της εποξειδικής ρητίνης καθώς αν και ακολουθούν την αυξητική του τάση που έχει ο συντελεστής αναπήδησης με την σκληρότητα του υλικού, εμφανίζουν ελαφρώς μικρότερες τιμές. Έτσι η σχέση περιγράφει καλύτερα τις μέγιστες τιμές που προσδιορίστηκαν στα υπόλοιπα υλικά και είναι υπέρ της ασφαλείας, αφού αποδίδονται εν τέλει μεγαλύτερες τιμές. Τούτο όμως δεν επηρεάζει σημαντικά τους συντελεστές της σχέσης ή τον συντελεστή συσχέτισης. Εάν είχαν συμπεριληφθεί όλες οι τιμές, ο συντελεστής συσχέτισης θα ήταν $R^2 = 0.91$, που είναι εξίσου ικανοποιητικός.

Στο σχήμα 9.2-α παρουσιάζονται τα εν λόγω σημεία και με διακεκομμένη γραμμή προβάλλεται η εκτίμηση του συντελεστή αναπήδησης που προκύπτει με την εφαρμογή της σχέσης 9.1. Τα δεδομένα που εξαιρέθηκαν από την κατάρτιση της σχέσης προβάλλονται με κόκκινα σημεία. Επίσης, στο Σχήμα 9.2-β παρουσιάζεται το σχετικό σφάλμα που προκύπτει στην εκτίμηση της μεγίστης τιμής του κινηματικού συντελεστή αναπήδησης μέσω της παραπάνω σχέσης.

Το σχετικό σφάλμα είναι περιορισμένο καθώς κυμαίνεται σε εύρος $\pm 5\%$, ενώ για τα υλικά που εξαιρέθηκαν το σφάλμα ανέρχεται σε περίπου 10% προς την πλευρά της ασφαλείας, δηλαδή υπερεκτιμώντας τον κινηματικό συντελεστή. Συνεπώς, η σχέση 9.1 περιγράφει ικανοποιητικά την αναπήδηση για τις υφιστάμενες συνθήκες κατά την εκτέλεση των δοκιμών.

Η κατάρτιση μιας σχέσης εκτίμησης των συντελεστών αναπήδησης από την σκληρότητα που προσδιορίζεται με την σφύρα Schmidt έχει σημαντικά πλεονεκτήματα. Η δοκιμή αυτή είναι οικονομική, εύκολη, ταχεία και τα αποτελέσματά της είναι άμεσα διαθέσιμα. Εκτελείται επί τόπου, με συνέπεια να λαμβάνονται υπόψη οι πραγματικές συνθήκες κάθε θέσης, αλλά κυρίως προσδιορίζεται η όποια διαφοροποίηση των ιδιοτήτων του πρανούς σε γειτνιάζουσες θέσεις, που οφείλεται στην αποσάθρωση ή σε άλλες αιτίες. Επιπρόσθετα είναι συμβατή θεωρητικά, καθώς το μηχανικό ανάλογο της σφύρας Schmidt (Σχήμα 4.27) ομοιάζει με αυτό της δοκιμής ελεύθερης πτώσης.



Σχήμα 9.2: Συσχέτιση του κινηματικού συντελεστή αναπήδησης με την σκληρότητα: (α) σημεία για την κατάρτιση της σχέσης και (β) σχετικό σφάλμα από την εφαρμογή της σχέσης 9.1

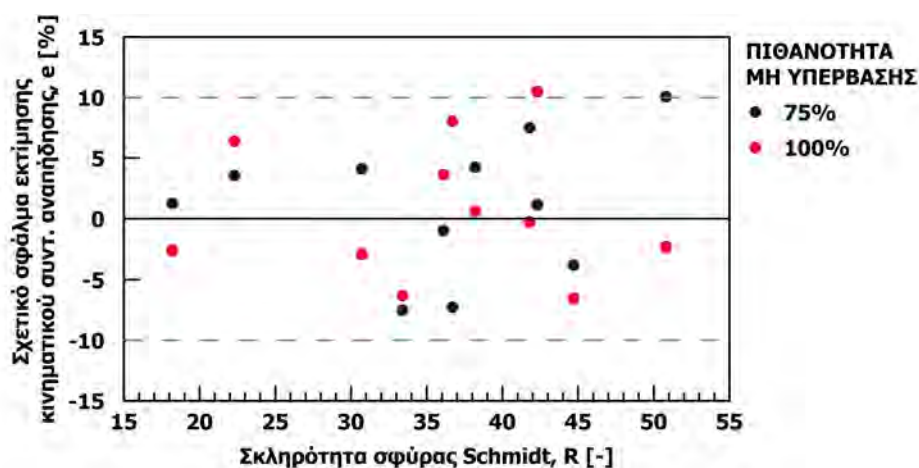
Περαιτέρω, είναι εφικτό η σχέση αυτή να λάβει πιθανοτικό χαρακτήρα, εισάγοντας το κάτω όριο των τιμών που αξιοποιήθηκαν και αντιστοιχούν σε πιθανότητα μη υπέρβασης 75%. Για τον σκοπό αυτό εφαρμόζεται εκ νέου η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων, όπου ως ανεξάρτητες μεταβλητές λαμβάνονται η σκληρότητα κατά την σφύρα Schmidt και η πιθανότητα μη υπέρβασης, ενώ ο κινηματικός (ή ισοδύναμα ο κάθετος) συντελεστής αναπήδησης αποτελεί την εξαρτημένη μεταβλητή. Η σχέση λαμβάνει την μορφή:

$$v_{COR} = [0.007 + (p - 0.75)0.02]R + 0.18 \tag{9.2}$$

όπου:

p η πιθανότητα μη υπέρβασης (εκφρασμένη στο διάστημα 0 έως 1)

Ο συντελεστής συσχέτισης της παραπάνω σχέσης είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικός ($R^2 = 0.94$), χωρίς να έχουν απαλειφθεί τιμές, όπως συνέβη για την κατάρτιση της προηγούμενης συσχέτισης. Το σχετικό σφάλμα κυμαίνεται σε εύρος $\pm 10\%$ (Σχήμα 9.3), είναι δηλαδή ελαφρώς μεγαλύτερο από ότι στη σχέση 9.1. Η αναπαράσταση της σχέσης 9.2 γίνεται στο σχήμα 9.1 με τις ευθείες p_{75} και p_{100} , όπου καθίσταται εμφανής η καλή συσχέτιση των εν λόγω μεγεθών.



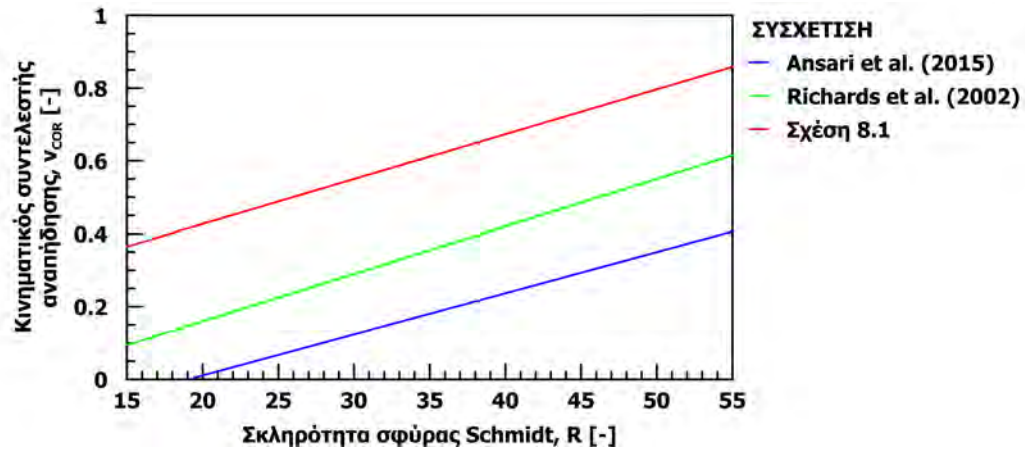
Σχήμα 9.3: Σχετικό σφάλμα εκτίμησης του κινηματικού συντελεστή αναπήδησης από την σκληρότητα της σφύρας Schmidt με εφαρμογή της σχέσης 9.2

Περαιτέρω, όταν η σχέση 9.2 χρησιμοποιηθεί για πιθανότητα μη υπέρβασης 100%, δηλαδή για τον μέγιστο συντελεστή αναπήδησης, τότε καταλήγει στην σχέση 9.1. Ο σταθερός όρος είναι ίσος με 0.18 και στις δύο σχέσεις, ενώ ο όρος $0.007 + (p - 0.75) \times 0.02$ ισούται με 0.012 που είναι παρόμοιος με τον αντίστοιχο όρο της σχέσης 9.1.

Η σχέση 9.2 δύναται να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του καθέτου ή του κινηματικού συντελεστή αναπήδησης για συγκεκριμένη πιθανότητα μη υπέρβασης (π.χ. 95%), ή για τον πιθανοτικό σχεδιασμό που αποτελεί ολόένα και την συχνότερη πρακτική στις μελέτες εφαρμογής των καταπτώσεων.

9.1.1 Σύγκριση με αντίστοιχες συσχετίσεις

Αντίστοιχες συσχετίσεις προτείνονται στην βιβλιογραφία από τους Richards et al. (2001) και τους Ansari et al. (2015), όπου λαμβάνεται υπόψη η κρούση μεταξύ υλικών με διαφορετική σκληρότητα. Επιπρόσθετα, στην σχέση των Richards et al. (2001) υπεισέρχεται και η κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης. Στο σχήμα 9.4, παρουσιάζονται οι εν λόγω συσχετίσεις μαζί με την σχέση 9.1 που αντιστοιχεί σε ποσοστό μη υπέρβασης 100%, δηλαδή στην μέγιστη τιμή του κινηματικού συντελεστή αναπήδησης. Για να είναι συγκρίσιμες μεταξύ τους οι σχέσεις, η κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης στη σχέση των Richards et al. (2001) λαμβάνεται ίση με μηδέν και οι σκληρότητες τεμάχους και της επιφάνειας πρόσκρουσης θεωρούνται ίσες.



Σχήμα 9.4: Σύγκριση με τις αντίστοιχες συσχετίσεις των Richards et al. (2001) και Ansari et al. (2015)

Παρατηρείται ότι και οι τρεις συσχετίσεις αποδίδουν παρόμοια τάση, δηλαδή την αύξηση του καθέτου συντελεστή αναπήδησης (ή ισοδύναμα του κινηματικού) με την αύξηση της σκληρότητας του υλικού. Επίσης, ο ρυθμός μεταβολής μεταξύ των σχέσεων πρακτικά ταυτίζεται, αφού οι γραμμές είναι σχεδόν παράλληλες. Όμως, υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση στο μέγεθος των συντελεστών. Πιο συγκεκριμένα, η σχέση 9.1 αποδίδει τις μεγαλύτερες τιμές και η σχέση των Ansari et al. (2015) τις μικρότερες.

Αυτό αποδίδεται στις διαφορετικές συνθήκες την στιγμή της κρούσης και ειδικότερα στην ταχύτητα πρόσκρουσης και την μάζα του τεμάχου, χαρακτηριστικά που καθορίζουν την σφοδρότητα της κρούσης. Στις δοκιμές των Richards et al. (2001) και Ansari et al. (2015), οι ρίψεις έγιναν από ύψος 1m, άρα η ταχύτητα πρόσκρουσης ήταν 4.4ms^{-1} και η διάμετρος των δοκιμίων ήταν από 4 έως 6cm, συνεπώς η μάζα τους ήταν μεταξύ 80 έως 280g. Στην παρούσα διερεύνηση η ρίψη έγινε από ύψος 80cm (δηλαδή $v_i = 4\text{ms}^{-1}$) και η μάζα των τεμαχίων ήταν περίπου 20g (θεωρώντας μέση πυκνότητα για όλα τα υλικά ίση με 2.5g/cm^3). Έτσι, η ορμή του τεμάχου κατά την πρόσκρουση ήταν περίπου 0.1kgms^{-1} , ενώ στις δοκιμές των Richards et al. (2001) και Ansari et al. (2015) κυμαίνεται από 0.35 έως 1.2kgms^{-1} . Συνεπώς, η σφοδρότητα της κρούσης ήταν σαφώς μικρότερη στην παρούσα διερεύνηση, με αποτέλεσμα η απόκριση του τεμάχου να είναι πλησιέστερα στην ελαστική περιοχή, όπου αντιστοιχούν υψηλότερες τιμές των συντελεστών αναπήδησης.

Συνεπώς, με βάση τις παραπάνω συσχετίσεις, συμπεραίνεται ότι πέραν της σκληρότητας του υλικού, η ταχύτητα κατά την πρόσκρουση και η μάζα του τεμάχου επιδρούν σημαντικά στις τιμές των συντελεστών αναπήδησης. Αυτό άλλωστε αποτέλεσε θέμα ειδικής διερεύνησης (βλ. ενότητα 5.2). Ακολούθως, παρουσιάζεται η συσχέτιση στην οποία συμπεριλαμβάνονται οι παραπάνω παράμετροι.

9.2 Συσχέτιση συντελεστή αναπήδησης με την ορμή πρόσκρουσης

Η ορμή πρόσκρουσης, δηλαδή το γινόμενο της μάζας του τεμάχους με την ταχύτητά του, περιγράφει με τον απλούστερο τρόπο την σφοδρότητα της κρούσης, που σύμφωνα με τα αναφερόμενα στα κεφάλαια 5 και 8, επιδρά σημαντικά στο μέγεθος του συντελεστή αναπήδησης. Επίσης, από την συσχέτιση του συντελεστή αναπήδησης με την σκληρότητα που προσδιορίζεται με τη σφύρα Schmidt (Σχέση 9.1), καθίσταται προφανές ότι και το είδος του υλικού επηρεάζει το μέγεθος του συντελεστή αναπήδησης.

Στις δοκιμές ελεύθερης πτώσης με σφαιρικά τεμάχια τα δοκίμια είχαν μεταβαλλόμενη διάμετρο, ώστε η απελευθέρωσή τους από το ίδιο ύψος να έχει ως αποτέλεσμα να διαφοροποίηση της ορμής πρόσκρουσης. Ωστόσο, στην εν λόγω διερεύνηση χρησιμοποιήθηκαν δυο μόνο φυσικά υλικά (μάρμαρο και ψαμμίτης) και δυο τεχνητά (τσιμεντοειδές ένεμα και εποξειδική ρητίνη), καθώς η δυνατότητα απόκτησης σφαιρικών τεμαχίων από φυσικά υλικά ήταν περιορισμένη.

Επισημαίνεται ότι στις δοκιμές ελεύθερης πτώσης με σφαιρικά τεμάχια το μέτρο της ταχύτητας ταυτίζεται με την κάθετη συνιστώσα της. Επίσης, ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης ταυτίζεται με τον κινηματικό, καθώς η γωνία αναπήδησης προσεγγίζει τις 90°. Έτσι, η ανάλυση που παρουσιάζεται ακολούθως, έχει εφαρμογή τόσο για τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης όσο και για τον κινηματικό.

Στο σχήμα 9.5 παρουσιάζονται τα ίδια δεδομένα που εξετάστηκαν στην ενότητα 5.2.1, αυτή τη φορά ως προς την ορμή του τεμάχους κατά την πρόσκρουση, αντί της ταχύτητας που χρησιμοποιήθηκε στην ενότητα 5.2.1 και στο σχήμα 5.22.

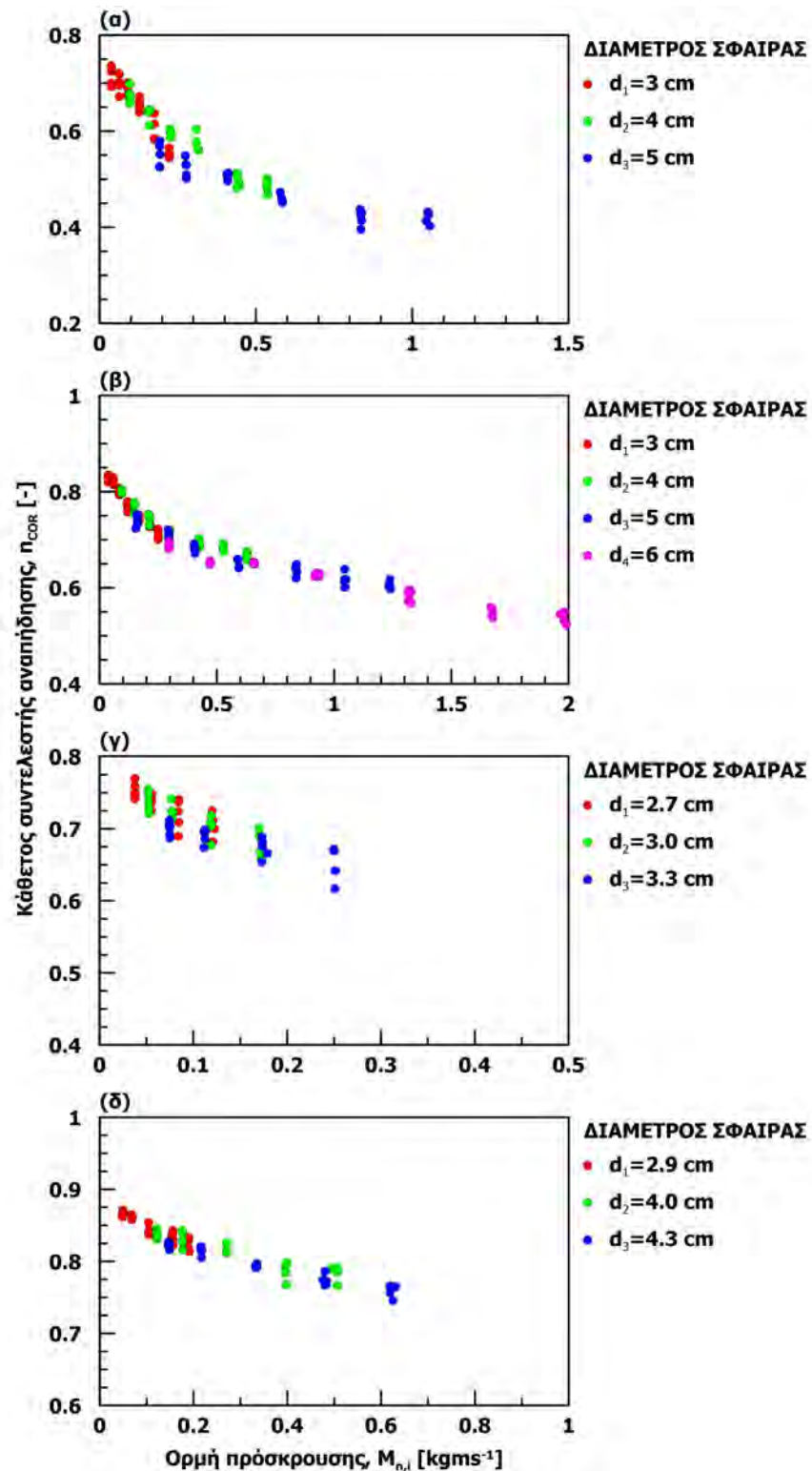
Από το σχήμα 9.5 παρατηρείται ότι οι τιμές του συντελεστή αναπήδησης ταυτίζονται όταν η ορμή κατά την πρόσκρουση είναι ίση, ανεξαρτήτως της μάζας ή της ταχύτητας του τεμάχους. Επίσης, η απομείωση του συντελεστή αναπήδησης εμφανίζει όμοια για όλα τα υλικά που εξετάστηκαν. Η τάση αυτή περιγράφεται από μια σχέση της μορφής:

$$n_{COR} = aM_{n,i}^b + 1 \quad (9.3)$$

όπου:

$M_{n,i}$ η ορμή του τεμάχους κατά την πρόσκρουση [$kgms^{-1}$]

a, b παράμετροι συσχέτισης



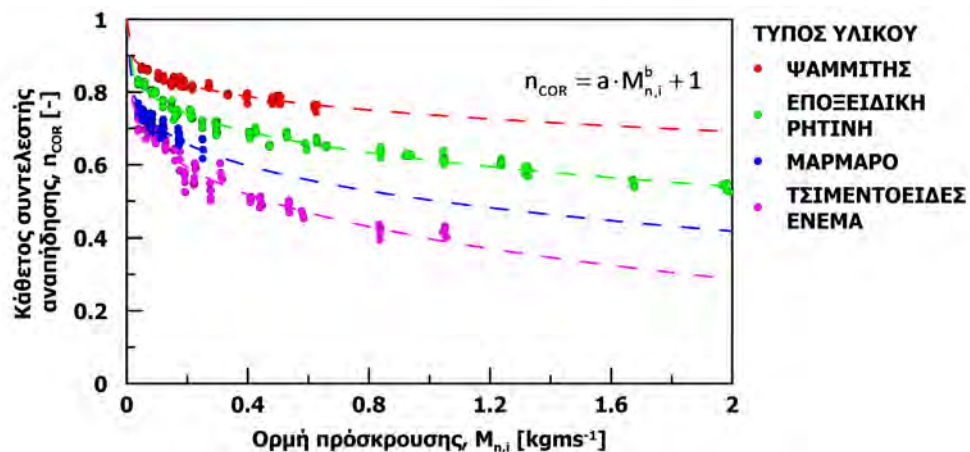
Σχήμα 9.5: Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της ορμής πρόσκρουσης για σφαιρικά δοκίμια διαφορετικής διαμέτρου από: (α) τσιμεντοειδές ένεμα, (β) εποξειδική ρητίνη, (γ) μάρμαρο και (δ) χαλαζιακό ψαμμίτη

Στην σχέση 9.3 επιλέχθηκε ο σταθερός όρος να ισούται με μονάδα ώστε να ικανοποιείται η απαίτηση από την θεωρία των κρούσεων, για την περίπτωση που η ταχύτητα πρόσκρουσης είναι μικρότερη της κρίσιμης ταχύτητας. Τότε η κρούση είναι ελαστική, δηλαδή ο συντελεστής αναπήδησης πρέπει να ισούται με μονάδα. Όπως έχει σχολιασθεί προηγουμένως (βλ. ενότητα 3.2.1.2), η κρίσιμη ταχύτητα στα βραχώδη υλικά είναι ιδιαίτερα μικρή, πρακτικώς μηδενική, για τις ταχύτητες που αφορούν το φαινόμενο των καταπτώσεων. Έτσι, η παραπάνω σχέση ισούται με μονάδα για μηδενική ταχύτητα πρόσκρουσης, καθιστώντας την συμβατή με τις θεωρητικές απαιτήσεις.

Για τον προσδιορισμό των παραμέτρων της σχέσης 9.3, βαθμονομείται κάθε υλικό ξεχωριστά με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 9.1, όπου σημαίνεται για κάθε υλικό και η σκληρότητά του κατά τη σφύρα Schmidt. Οι καμπύλες προσαρμογής κάθε υλικού παρουσιάζονται στο σχήμα 9.6.

Πίνακας 9.1: Παράμετροι συσχέτισης καθέτου συντελεστή αναπήδηση με την ορμή πρόσκρουσης από τις δοκιμές ελεύθερης πτώσης

Υλικό	R	a	b	R ²
Τσιμεντοειδές ένεμα	33.4	-0.602	0.243	0.924
Μάρμαρο	38.2	-0.407	0.23	0.673
Εποξειδική ρητίνη	42.3	-0.387	0.247	0.967
Χαλαζιακός Ψαμμίτης	44.7	-0.262	0.233	0.926



Σχήμα 9.6: Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της κάθετης συνιστώσας της ορμής κατά την πρόσκρουση του τεμάχους, αναλόγως του τύπου του υλικού

Παρατηρείται ότι η συσχέτιση για το μάρμαρο υστερεί ποιοτικά, καθώς ο συντελεστής συσχέτισης (R^2) είναι αρκετά μικρότερος συγκριτικά με τα υπόλοιπα υλικά (Πίνακας 9.1). Αυτό οφείλεται στον περιορισμένο αριθμό δοκιμών που έγιναν με το υλικό αυτό, αφού μετά από κάποιο ύψος τα δοκίμια του μαρμάρου θραύστηκαν κατά την κρούση (βλ. ενότητα 8.9). Παρόλα αυτά η μορφή της καμπύλης καθώς και οι τιμές των παραμέτρων της είναι στο πλαίσιο που καθορίζεται από τα άλλα υλικά.

Από τον πίνακα 9.1 παρατηρείται ότι η παράμετρος a είναι αντιστρόφως ανάλογη της σκληρότητας που προσδιορίζεται με την σφύρα Schmidt, καθιστώντας δυνατή την μεταξύ τους σύνδεση. Επίσης, η παράμετρος b εμφανίζει αμελητέα διακύμανση οπότε μπορεί να θεωρηθεί ως σταθερά.

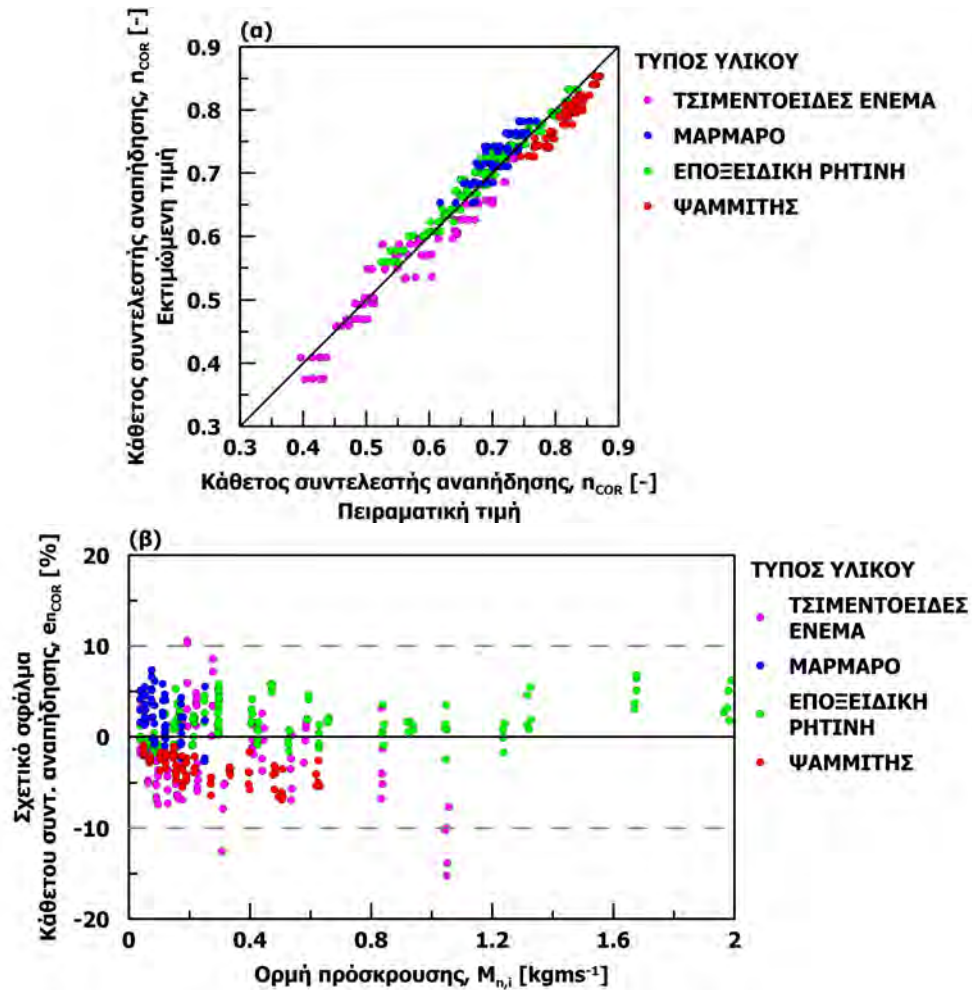
Η παράμετρος a προσεγγίστηκε μέσω γραμμικής σχέσης, καθώς στην ενότητα 8.1 προέκυψε ότι η μορφή αυτή περιγράφει ικανοποιητικά την σχέση του καθέτου (ή κινηματικού) συντελεστή αναπήδησης και της σκληρότητας. Ωστόσο, οι συντελεστές της σχέσης 9.3 διαφοροποιούνται λόγω των διαφορετικών συνοριακών συνθηκών. Εφαρμόζοντας την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων, η σχέση μεταξύ του καθέτου (ή του κινηματικού) συντελεστή αναπήδησης και της ορμής πρόσκρουσης, λαμβάνει την μορφή:

$$n_{COR} = (0.027R - 1.536)M_{n,i}^{0.244} + 1 \quad (9.4)$$

Στο σχήμα 9.7-α παρουσιάζεται σε διάγραμμα 1 προς 1, η τιμή του συντελεστή αναπήδησης που μετρήθηκε στο εργαστήριο συγκριτικά με αυτήν που εκτιμάται από την σχέση 9.4. Παρατηρείται ότι η εν λόγω σχέση περιγράφει ικανοποιητικά την αναπήδηση των τεμαχίων, αφού το σύνολο των δοκιμών προβάλλεται πέριξ της ευθείας 1 προς 1.

Περαιτέρω, με την εφαρμογή της σχέσης 9.4, το σχετικό σφάλμα εκτίμησης του συντελεστή αναπήδησης (Σχήμα 9.7-β), είναι μικρότερο από $\pm 10\%$ για την συντριπτική πλειοψηφία των δοκιμών (Σχήμα 9.7-β).

Ωστόσο, αν και το μέγεθος του σφάλματος είναι περιορισμένο, υπάρχει μια συστηματικότητα καθώς σε κάποια υλικά υποεκτιμάται ο συντελεστής αναπήδησης και σε άλλα υπερεκτιμάται. Η συστηματικότητα αυτή ενδεχομένως να οφείλεται στην επίδραση κάποιας ακόμη φυσικής ή μηχανικής παραμέτρου, αλλά δεν κατέστη εφικτός ο προσδιορισμός της. Άλλωστε, το σφάλμα που προκύπτει είναι ιδιαίτερος περιορισμένο, που συνεπάγεται ότι τυχόν επιπρόσθετη παράμετρος έχει δευτερεύουσα επίδραση και συνεπώς δεν κρίθηκε σκόπιμο να διερευνηθεί περαιτέρω.

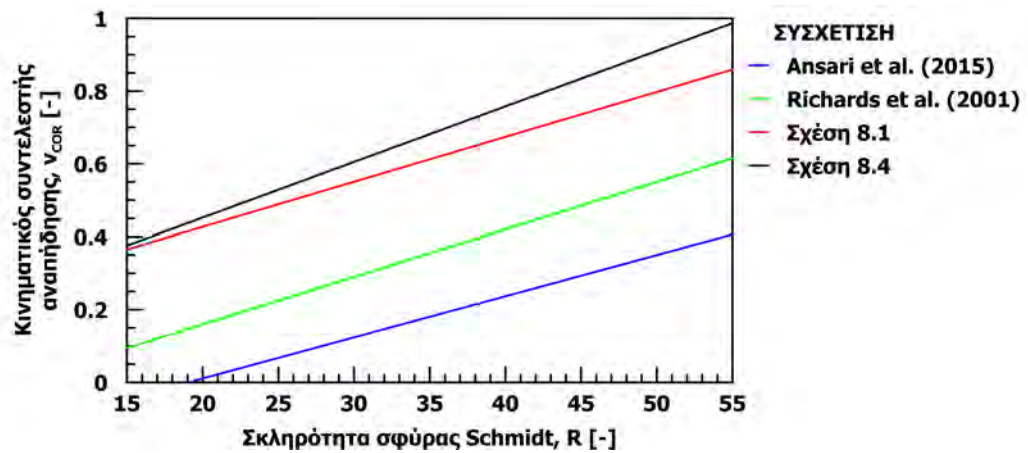


Σχήμα 9.7: Αξιολόγηση της σχέσης εκτίμησης του καθέτου συντελεστή αναπήδησης συναρτήσει της ορμής και της σκληρότητας του υλικού: (α) 1 προς 1 σύγκριση και (β) σχετικό σφάλμα από την εφαρμογή της σχέσης 9.4

9.2.1 Αξιολόγηση της συσχέτισης του συντελεστή αναπήδησης με τη σκληρότητα και την ορμή βάσει άλλων δοκιμών

Η συσχέτιση που προέκυψε στην ενότητα 9.1 είναι μεταξύ του καθέτου (ή του κινηματικού) συντελεστή αναπήδησης και της σκληρότητας του υλικού, ενώ, στην παρούσα ενότητα συμπεριλαμβάνεται και η επίδραση της ορμής του τεμάχους κατά την πρόσκρουση. Συνεπώς, εάν εφαρμοστεί η σχέση 9.4 με την ορμή πρόσκρουσης που υπήρχε στις δοκιμές από τις οποίες καταρτίστηκε η σχέση 9.1, καθίσταται εφικτή η σύγκριση των δυο αυτών συσχετίσεων.

Στο σχήμα 9.8 αναπαρίστανται οι παραπάνω συσχετίσεις, θεωρώντας ότι η ορμή πρόσκρουσης στην σχέση 9.4 ισούται με $0.085kgms^{-1}$. Η τιμή αυτή είναι η μέση ορμή πρόσκρουσης από όλα τα υλικά, καθώς το βάρος, η πυκνότητά και η ταχύτητα πρόσκρουσης παρουσιάζουν ελαφρά διαφοροποίηση μεταξύ των δοκιμών. Επιπρόσθετα, προβάλλονται και οι σχέσεις των Richards et al. (2001) και Ansari et al. (2015).



Σχήμα 9.8: Σύγκριση των συσχετίσεων 9.1, 9.4 και των αντίστοιχων σχέσεων από την βιβλιογραφία

Από το σχήμα 9.8 προκύπτει ότι οι σχέσεις 9.1 και 9.4 είναι μεταξύ τους συμβατές, καθώς εκτιμούν ανάλογο μέγεθος και εμφανίζουν παρόμοιο ρυθμό μεταβολής. Ωστόσο, υπάρχει μικρή διαφοροποίηση μεταξύ των κλίσεων των δυο ευθειών που οδηγεί στην αύξηση της απόκλισης σε υλικά με μεγαλύτερη σκληρότητα. Για ένα υλικό με σκληρότητα κατά την σφύρα Schmidt ίση 15 η διαφοροποίηση των δυο σχέσεων είναι πρακτικώς μηδενική, όμως ανέρχεται σε περίπου 12% για ένα υλικό με σκληρότητα 55. Ωστόσο, σε σχέση με την διακύμανση που έχουν οι τιμές της βιβλιογραφίας η διαφοροποίηση αυτή είναι αμελητέα. Μπορεί να οφείλεται είτε στην μαθηματική επεξεργασία που έγινε κατά την κατάρτιση των σχέσεων, είτε στις διαφορετικές συνθήκες που επικρατούν στις δυο αυτές διερευνήσεις, με βασικότερη το σχήμα του τεμάχους.

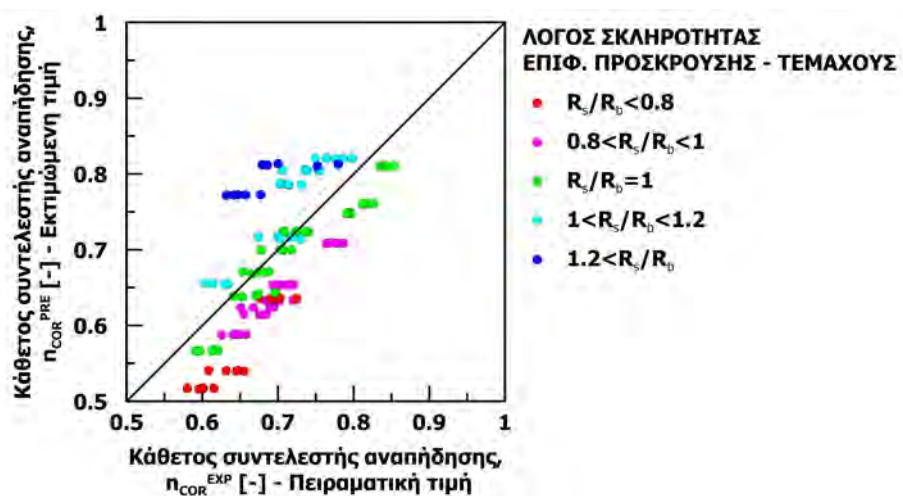
Ποιοτικά η σχέση 9.4 είναι συμβατή και με τις αντίστοιχες συσχετίσεις των Richards et al. (2001) και Ansari et al. (2015), καθώς προέκυψαν από δοκιμές όπου η ορμή πρόσκρουσης ήταν μεγαλύτερη και άρα αποδίδουν μικρότερες τιμές του συντελεστή αναπήδησης.

Επιπρόσθετα, η σχέση 9.4 είναι προτιμότερη επειδή περιλαμβάνει την επίδραση της ορμής πρόσκρουσης, ενώ συγχρόνως είναι περισσότερο αξιόπιστη καθώς προέρχεται από δεδομένα με πολύ καλύτερη επαναληψιμότητα.

9.3 Συνδυαστική επίδραση ορμής - τύπου υλικού

Από τις δυο παραπάνω ενότητες, καθίσταται σαφές ότι ο συντελεστής αναπήδησης επηρεάζεται τόσο από την σκληρότητα του υλικού όσο και από την ορμή την στιγμή της κρούσης. Ωστόσο, οι αντίστοιχες συσχετίσεις της βιβλιογραφίας περιλαμβάνουν και την περίπτωση κρούσης μεταξύ ανόμοιων υλικών. Έτσι, για να συνεκτιμηθεί η διαφορά των υλικών τεμάχους και επιφάνειας πρόσκρουσης, έγιναν παρόμοιες δοκιμές ελεύθερης πτώσης με τα σφαιρικά τεμάχη εναλλάσσοντας τις βάσεις πρόσκρουσης (βλ. ενότητα 5.2.3). Για την κατάρτιση μιας εμπειρικής σχέσης που θα περιλαμβάνει τις παραπάνω παραμέτρους, επιλέχτηκε να χρησιμοποιηθεί ως βάση η εμπειρική σχέση 9.4, αφού αποδίδει ικανοποιητικά την εξάρτηση από την ορμή πρόσκρουσης και την φύση του υλικού, όπως εκφράζεται από την σκληρότητά του.

Πλέον τα υλικά που μετέχουν στην κρούση έχουν διαφορετική σκληρότητα, οπότε η σκληρότητα της επιφάνειας πρόσκρουσης συμβολίζεται ως R_s (slab) και του τεμάχους ως R_b (block). Στο σχήμα 9.9 παρουσιάζονται στον οριζόντιο άξονα η τιμή του καθέτου συντελεστή αναπήδησης όπως προσδιορίστηκε πειραματικά (n_{COR}^{EXP}) και στον κατακόρυφο η εκτιμώμενη τιμή χρησιμοποιώντας την σχέση 9.4 (n_{COR}^{PRE}), όπου ως σκληρότητα λαμβάνεται η τιμή που αντιστοιχεί στην βάση (R_s). Τα δεδομένα είναι ομαδοποιημένα σύμφωνα με τον λόγο της σκληρότητας βάσης προς τεμάχους (R_s/R_b).

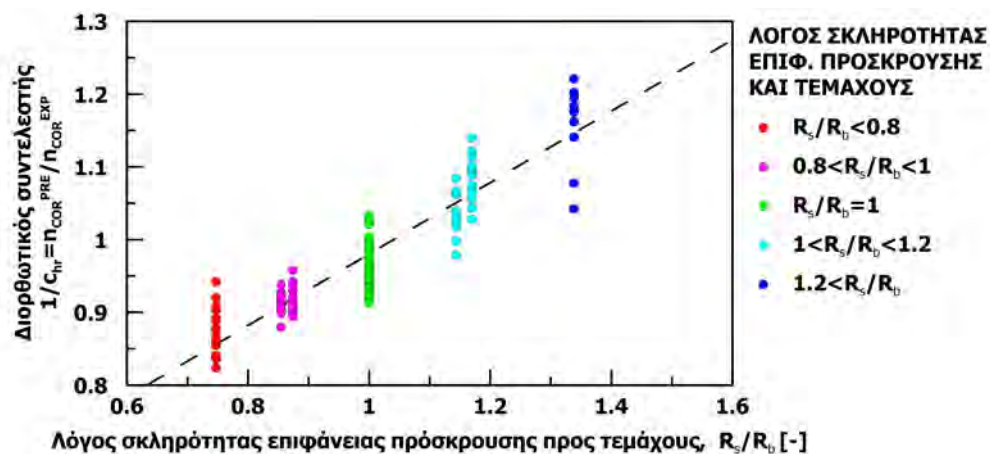


Σχήμα 9.9: Κάθετος συντελεστής αναπήδησης όπως προσδιορίστηκε πειραματικά συναρτήσε του εκτιμώμενου από την σχέση 9.4, χρησιμοποιώντας την σκληρότητα της βάσης. Τα δεδομένα είναι ομαδοποιημένα σύμφωνα με τον λόγο της σκληρότητας βάσης προς τεμάχους (R_s/R_b)

Προκύπτει ότι η εκτίμηση του καθέτου συντελεστή αναπήδησης με την εφαρμογή της σχέσης 9.4 δεν είναι ικανοποιητική όταν τα υλικά είναι ανόμοια. Όμως, η απόκλιση από την ευθεία 1 προς 1, δηλαδή το σφάλμα, σχετίζεται με τον λόγο της σκληρότητας των δυο υλικών. Όταν ο λόγος είναι μονάδα οι τιμές προβάλλονται πλησίον της ευθείας των 45°, που υποδηλώνει ταύτιση πειραματικής και εκτιμώμενης τιμής, κάτι αναμενόμενο αφού η σχέση 9.4 έχει καταρτιστεί για κρούσεις μεταξύ όμοιων υλικών. Στην περίπτωση που ο λόγος είναι μεγαλύ-

τερος της μονάδας, δηλαδή όταν η σκληρότητα της επιφάνειας πρόσκρουσης υπερβαίνει την σκληρότητα του τεμάχου, τότε η σχέση 9.4 αποδίδει συστηματικά μεγαλύτερες τιμές. Στην αντίθετη περίπτωση, δηλαδή όταν η σκληρότητα της επιφάνειας πρόσκρουσης είναι μικρότερη του τεμάχου, τότε η εκτιμώμενη τιμή είναι μικρότερη. Επιπρόσθετα, το μέγεθος της διαφοράς σχετίζεται με το μέγεθος του σφάλματος πρόβλεψης, αφού όσο μεγαλύτερος είναι λόγος των σκληροτήτων τόσο αυξάνει το σφάλμα, και αντίστροφα.

Η συστηματικότητα που εμφανίζει η απόκλιση της τιμής που προσδιορίζεται πειραματικά από αυτή που εκτιμάται με την σχέση 9.4, επιτρέπει την εφαρμογή διορθωτικού συντελεστή που θα εξαρτάται από τον λόγο της σκληρότητας των δυο υλικών. Στο σχήμα 9.10 προβάλλεται στον οριζόντιο άξονα ο λόγος της σκληρότητας των δυο υλικών και στον κατακόρυφο ο λόγος μεταξύ της τιμής του καθέτου συντελεστή αναπήδησης που προσδιορίστηκε πειραματικά και αυτής που εκτιμάται από την σχέση 9.4 όπως προκύπτει χρησιμοποιώντας την σκληρότητα της βάσης. Επί της ουσίας, ο λόγος αυτός αποτελεί διορθωτικό συντελεστή (c_{rh} – *correction relative hardness*) που αν εφαρμοστεί στην σχέση 9.4 θα έχει ως αποτέλεσμα την ταύτιση της πειραματικής τιμής με την εκτιμώμενη.



Σχήμα 9.10: Λόγος εκτιμώμενου καθέτου συντελεστή αναπήδησης προς αυτόν που προσδιορίστηκε πειραματικά σε σχέση με τον λόγο της σκληρότητας της βάσης προς του τεμάχου (R_s/R_b)

Από το σχήμα 9.10 παρατηρείται ότι ο διορθωτικός συντελεστής (c_{rh}) συνδέεται γραμμικά με τον λόγο των σκληροτήτων των δυο υλικών με την σχέση 9.5, με συντελεστή συσχέτισης $R^2 = 0.85$.

$$\frac{1}{c_{rh}} = 0.491 \frac{R_s}{R_b} + 0.489 \tag{9.5}$$

Ο συντελεστής διόρθωσης θα πρέπει να ισούται με την μονάδα όταν το υλικό της βάσης πρόσκρουσης έχει την ίδια σκληρότητα με το υλικό του τεμάχου. Για να ικανοποιηθεί αυτή η απαίτηση, στρογγυλοποιούνται οι δυο όροι της σχέσης 9.5, αμφότεροι στο 0.5, λαμβάνοντας την ακόλουθη μορφή:

$$\frac{1}{c_{rh}} = \frac{R_s + R_b}{2R_b} \tag{9.6}$$

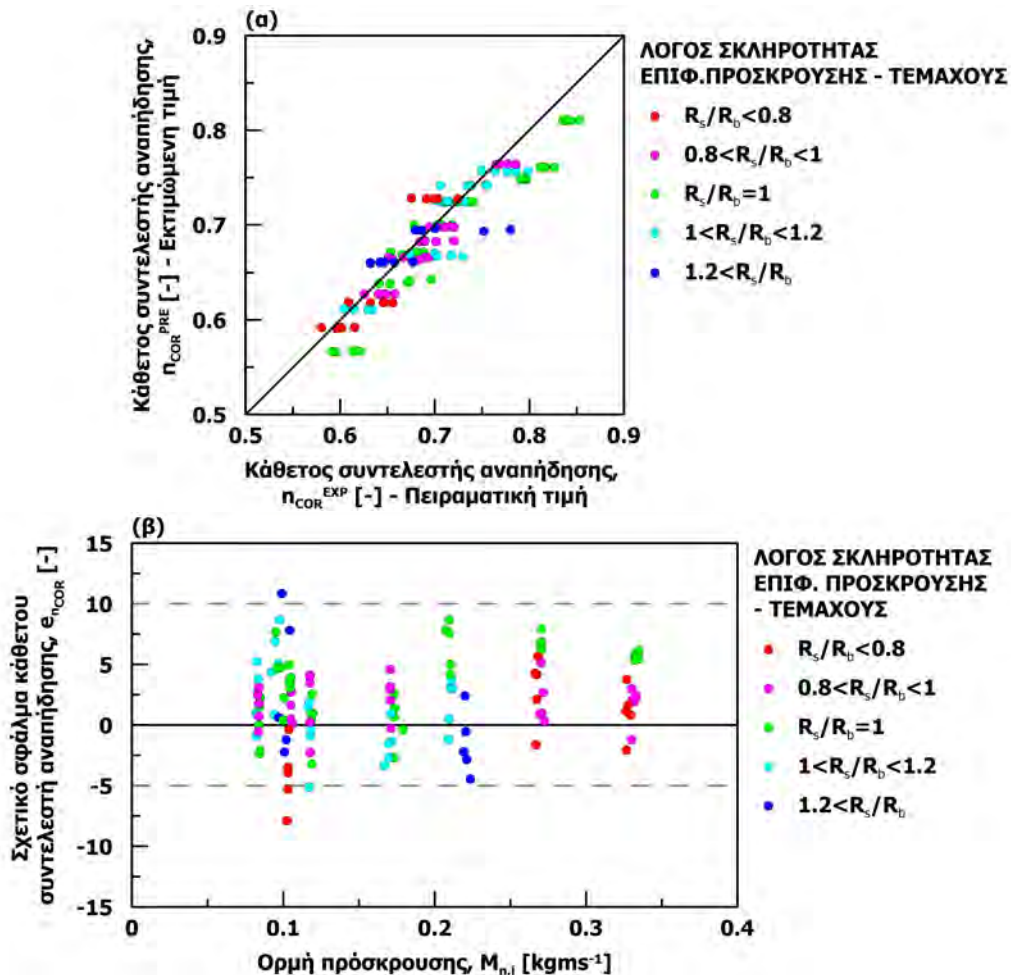
Πλέον με την προσθήκη του διορθωτικού συντελεστή, η σχέση 9.4 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του καθέτου συντελεστή αναπήδησης όταν το υλικό της βάσης είναι διαφορετικό από αυτό του τεμάχου ως εξής:

$$n_{COR} = \frac{2R_b}{R_s + R_b} \left[(0.027R_s - 1.536)M_{n,i}^{0.244} + 1 \right] \quad (9.7)$$

ή ισοδύναμα:

$$n_{COR} = c_{rh} n_{COR}^{PRE} \quad (9.8)$$

Με την χρήση της σχέσης 9.8 η εκτιμώμενη τιμή του καθέτου συντελεστή αναπήδησης είναι σημαντικά βελτιωμένη συγκριτικά με αυτή που επιτυγχάνεται χωρίς τον διορθωτικό συντελεστή (Σχήμα 9.11-α). Εξίσου ικανοποιητικό είναι το σχετικό σφάλμα στην πρόβλεψη του συντελεστή αναπήδησης, καθώς είναι περιορισμένο σε εύρος από -5 έως < 10% (Σχήμα 9.11-β).



Σχήμα 9.11: Αξιολόγηση της σχέσης εκτίμησης του καθέτου συντελεστή αναπήδησης συναρτήσει της ορμής πρόσκρουσης για κρούση μεταξύ υλικών διαφορετικής σκληρότητας: (α) 1 προς 1 σύγκριση και (β) σχετικό σφάλμα

9.3.1 Συνεκτίμηση της αποσάθρωσης της επιφάνειας πρόσκρουσης

Στην ενότητα 5.4.1 παρουσιάστηκε η διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της επίδρασης που έχει η αποσάθρωση της επιφάνειας πρόσκρουσης στους συντελεστές αναπήδησης. Εκτελέστηκαν δοκιμές ελεύθερης πτώσης από ύψος $h_d = 60\text{cm}$ με σφαιρικά τεμάχια από τσιμεντοειδές ένεμα ($R_s = 33.4$) και διάμετρο $d = 30\text{mm}$, τα οποία προσέκρουαν σε επιφάνειες σχιστολίθου με διαφορετικό βαθμό τραχύτητας. Γενικώς, παρατηρήθηκε ότι ο κάθετος (ή ο κινηματικός) συντελεστής αναπήδησης μειώνεται όσο εντείνεται η αποσάθρωση της επιφάνειας πρόσκρουσης. Η ποιοτική περιγραφή της αποσάθρωσης μπορεί να ποσοτικοποιηθεί μέσω της σκληρότητας που προσδιορίζεται με τη σφύρα Schmidt (Z. Paradopoulos and Marinou, 1992).

Πλέον, με την σχέση 9.8 είναι εφικτός ο προσδιορισμός της επίδρασης που έχει η αποσάθρωση στον συντελεστή αναπήδησης, καθώς σε αυτήν συνεκτιμάται η επίδραση της σκληρότητας τεμάχους και βάσης καθώς και της ορμής πρόσκρουσης.

Στον πίνακα 9.2 παρατίθενται για κάθε σειρά δοκιμών, που αφορούν επιφάνειες πρόσκρουσης διαφορετικού βαθμού αποσάθρωσης, ο ποιοτικός χαρακτηρισμός της αποσάθρωσης (Barton, 1978) και η αντίστοιχη σκληρότητα, οι συντελεστές αναπήδησης που προσδιορίστηκαν πειραματικά (βλ. ενότητα 5.4.1) και αυτοί από την εφαρμογή της σχέσης 9.8, καθώς επίσης και το μεταξύ τους σχετικό σφάλμα.

Πίνακας 9.2: Συνεκτίμηση του βαθμού αποσάθρωσης της επιφάνειας πρόσκρουσης με την σχέση 9.8

Επιφάνεια πρόσκρουσης Βαθμός αποσάθρωσης	Σκληρότητα $R_s[-]$	Συντελεστής αναπήδησης		Σχετικό σφάλμα $e_{n,COR}[\%]$
		Πείραμα $n_{COR}^{EXP}[-]$	Σχέση 9.8 $n_{COR}^{PRE}[-]$	
I	36.2	0.648	0.653	0.83
III	20	0.544	0.539	-0.92
IV	16.3	0.478	0.506	5.59

Το σχετικό σφάλμα είναι ιδιαίτερα περιορισμένο καθώς στη χειρότερη περίπτωση ισούται με 5.6%, βρίσκεται εντός του εύρους σφάλματος που εμπεριέχει η εμπειρική αυτή συσχέτιση (Σχήμα 9.11-β). Συνεπώς, επαληθεύεται η εν λόγω σχέση και αποδεικνύεται πειραματικά ότι είναι ικανή να περιγράψει και την επίδραση της αποσάθρωσης. Τούτο είναι εύλογο καθώς η αποσάθρωση συνδέεται άμεσα την σκληρότητα της σφύρας Schmidt που χρησιμοποιείται στη σχέση αυτή.

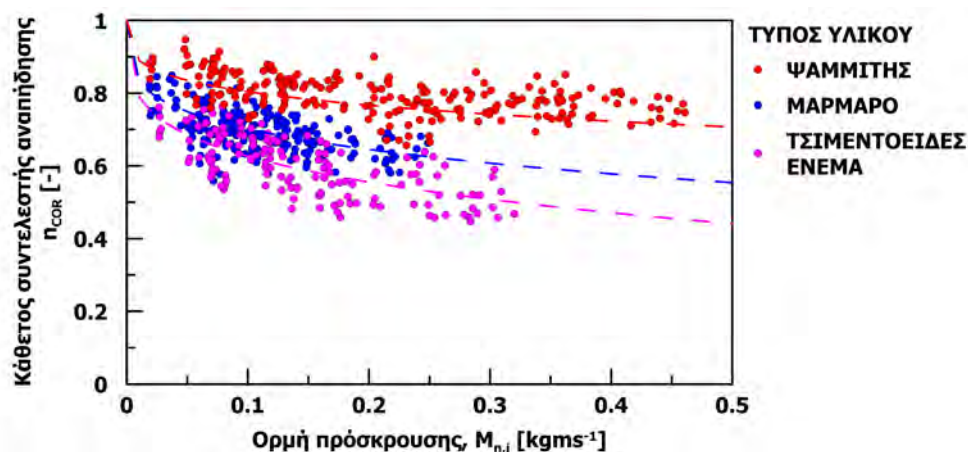
9.4 Επίδραση γωνίας πρόσκρουσης

Γενικώς, από το σύνολο των διερευνήσεων παρατηρήθηκε ότι το μέγεθος του καθέτου συντελεστή αναπήδησης μεταβάλλεται με την γωνία πρόσκρουσης όταν το τέμαχος δεν είναι σφαιρικό και η κρούση γίνεται υπό γωνία. Πιο συγκεκριμένα, λαμβάνει μικρότερες τιμές όταν η γωνία πρόσκρουσης προσεγγίζει τις 90° και μπορεί, υπό προϋποθέσεις, να υπερβαίνει την μονάδα όταν η κρούση γίνεται με μικρή γωνία, ως προς την επιφάνεια πρόσκρουσης. Η συμπεριφορά αυτή, είναι περισσότερο διακριτή στις μέγιστες τιμές του καθέτου συντελεστή αναπήδησης, που αποτελούν τις κρίσιμες τιμές για την διαστασιολόγηση των μέτρων αντιμετώπισης (βλ. κεφάλαιο 5). Ακολούθως, παρουσιάζεται μια εμπειρική μεθοδολογία για την εκτίμηση του εύρους τιμών που λαμβάνει ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης, βασιζόμενη στα αποτελέσματα του εργαστηριακού σκέλους της έρευνας αυτής.

9.4.1 Προσδιορισμός της μέγιστης τιμής του καθέτου συντελεστή αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης

9.4.1.1 Εξέταση δοκιμών παραβολικής ρίψης με σφαιρικά τεμάχια

Αρχικά εξετάζονται τα δεδομένα των δοκιμών παραβολικής ρίψης με σφαιρικά τεμάχια, που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 5.2.2, ως προς την ορμή που έχει το τέμαχος κατά την πρόσκρουση. Χρησιμοποιείται ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης και ο υπολογισμός της ορμής γίνεται με την κάθετη (ως προς την επιφάνεια πρόσκρουσης) συνιστώσα της ταχύτητας, αφού, όπως προέκυψε στην ενότητα 5.2.2.1.3, ο κινηματικός συντελεστής αναπήδησης δεν περιγράφει ικανοποιητικά την απόκριση του τεμάχους όταν η πρόσκρουση γίνεται υπό γωνία.

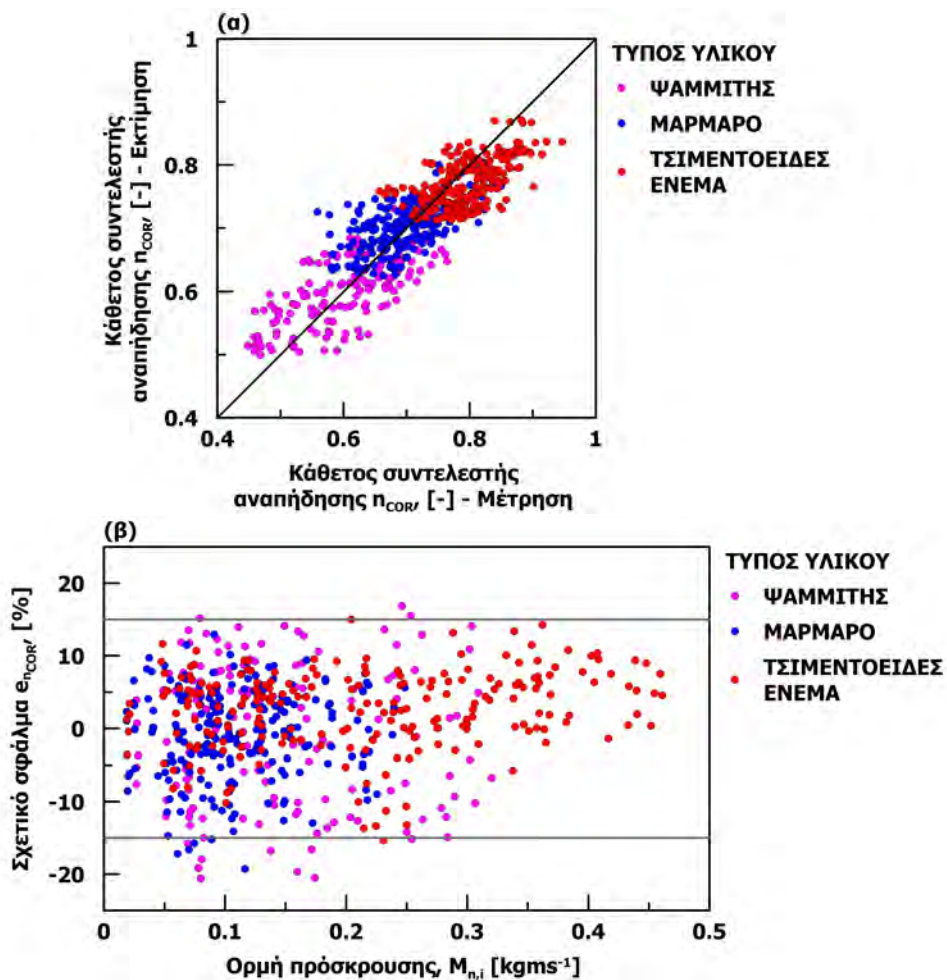


Σχήμα 9.12: Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της κάθετης συνιστώσας της ορμής από τις δοκιμές παραβολικής ρίψης με σφαιρικά τεμάχια

Στο σχήμα 9.12 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τα τρία υλικά που εξεταστήκαν. Για κάθε υλικό, είναι επίσης χαραγμένη η καμπύλη που προέρχεται από την σχέση 9.4, καθώς οι

δοκιμές αυτές έχουν γίνει μεταξύ τεμάχους και βάσης πρόσκρουσης από ίδιο υλικό, άρα ίσης σκληρότητας.

Παρατηρείται ότι η εμπειρική σχέση 9.4 περιγράφει ικανοποιητικά την εξάρτηση του καθέτου συντελεστή αναπήδησης εξαιτίας της μεταβολής της ορμής πρόσκρουσης και για την περίπτωση κρούσης υπό γωνία. Αν και τα αποτελέσματα εμφανίζουν μεγαλύτερη διακύμανση συγκριτικά με τις δοκιμές ελεύθερης πτώσης (βλ. σχήμα 9.6), η σύγκριση των αποτελεσμάτων είναι ομοιόμορφη και το σφάλμα στην εκτίμηση του συντελεστή ανέρχεται στο $\pm 15\%$ (Σχήμα 9.13, α και β αντίστοιχα).



Σχήμα 9.13: Αξιολόγηση της σχέσης εκτίμησης του καθέτου συντελεστή αναπήδησης συναρτήσει της ορμής πρόσκρουσης για κρούση υπό γωνία: (α) σύγκριση εμπειρικής σχέσης με τα πειραματικά δεδομένα και (β) σχετικό σφάλμα

Συνεπώς, καθίσταται προφανές ότι η εμπειρική σχέση προσαρμογής του καθέτου συντελεστή αναπήδησης συναρτήσει της ορμής πρόσκρουσης και της σκληρότητας του υλικού (Σχέση 9.4) περιγράφει ικανοποιητικά την αναπήδηση σφαιρικών τεμαχών και στην περίπτωση που η κρούση γίνεται υπό γωνία. Ως εκ τούτου, συμπεραίνεται ότι η γωνία πρόσκρουσης δεν επηρεάζει τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης, όταν το τέμαχος είναι σφαιρικό.

9.4.1.2 Εξέταση δοκιμών παραβολικής ρίψης με κυβικά τεμάχια με λειασμένες ακμές

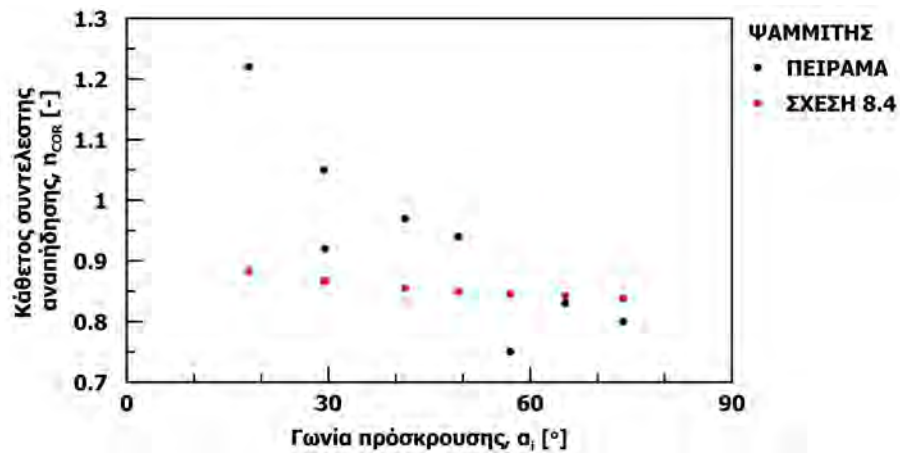
Στην ενότητα 5.1.2 παρουσιάστηκαν οι δοκιμές παραβολικής ρίψης με τεμάχια που είχαν λειασμένες ακμές από πέντε διαφορετικά γεωυλικά. Από την διερεύνηση αυτή, προέκυψε ότι ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης αυξάνεται σημαντικά με την μείωση της γωνίας πρόσκρουσης (Σχήμα 5.10) και το μέγεθος του καθέτου συντελεστή αναπήδησης σχετίζεται με τον τύπο του υλικού (βλ. ποιοτική συσχέτιση 5.2).

Στις δοκιμές αυτές ο μηχανισμός απελευθέρωσης των τεμαχίων ρυθμίστηκε ώστε το μέτρο της ταχύτητας πρόσκρουσης να είναι παρόμοιο μεταξύ των διαφόρων σειρών δοκιμών. Έτσι, με την μεταβολή της γωνίας πρόσκρουσης, διαφοροποιείται η κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας πρόσκρουσης και κατ' επέκταση της ορμής πρόσκρουσης, που χρησιμοποιείται στην σχέση 9.4 καθορίζοντας το μέγεθος του καθέτου συντελεστή αναπήδησης.

Πιο συγκεκριμένα, από τα εν λόγω δεδομένα παρατηρείται ότι η μείωση της γωνίας πρόσκρουσης οδηγεί στην αύξηση του καθέτου συντελεστή αναπήδησης (βλ. σχήμα 5.10). Τούτο, είναι ποιοτικώς σύμφωνο με την σχέση 9.4, καθώς για σταθερή μάζα τεμαχίου και μέτρο της ταχύτητας πρόσκρουσης, η μείωση της γωνίας πρόσκρουσης έχει ως αποτέλεσμα τον περιορισμό της κάθετης συνιστώσας της ταχύτητας πρόσκρουσης, άρα και της ορμής. Οπότε εφαρμόζοντας την σχέση 9.4, ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης αυξάνεται με την μείωση της γωνίας πρόσκρουσης. Συνεπώς τα αποτελέσματα αυτά πρέπει να προσαρμοστούν στην κάθετη συνιστώσα της ορμής πρόσκρουσης, ώστε μετέπειτα να αξιολογηθεί η επίδραση της γωνίας πρόσκρουσης.

Επειδή οι δοκιμές χαρακτηρίζονται από αυξημένη διασπορά, χρησιμοποιείται στην αξιολόγηση η μεγαλύτερη τιμή του καθέτου συντελεστή αναπήδησης που προέκυψε από κάθε σειρά δοκιμών. Έτσι, εξετάζεται η δυσμενέστερη περίπτωση τροχιάς, δηλαδή η κρίσιμη για την διαστασιολόγηση των μέτρων αντιμετώπισης.

Ωστόσο, προσαρμόζοντας την μέγιστη τιμή του καθέτου συντελεστή αναπήδησης στην κάθετη συνιστώσα της ορμής πρόσκρουσης, παρατηρείται ότι η επίδραση της γωνίας πρόσκρουσης είναι σημαντική. Ενδεικτικά, η διαφοροποίηση της τιμής του καθέτου συντελεστή αναπήδησης που προσδιορίστηκε πειραματικά με αυτόν που εκτιμάται από την σχέση 9.4, παρουσιάζεται στο σχήμα 9.14 για τις δοκιμές με τεμάχια χαλαζιακού ψαμμίτη. Όπως παρατηρείται, η διαφοροποίηση στον κάθετο συντελεστή αναπήδησης είναι περιορισμένη για γωνίες πρόσκρουσης κοντά στις 90° αλλά αυξάνεται σημαντικά με την μείωσή της. Τούτο ισχύει και για τα υπόλοιπα υλικά που εξετάστηκαν στην εν λόγω διερεύνηση.



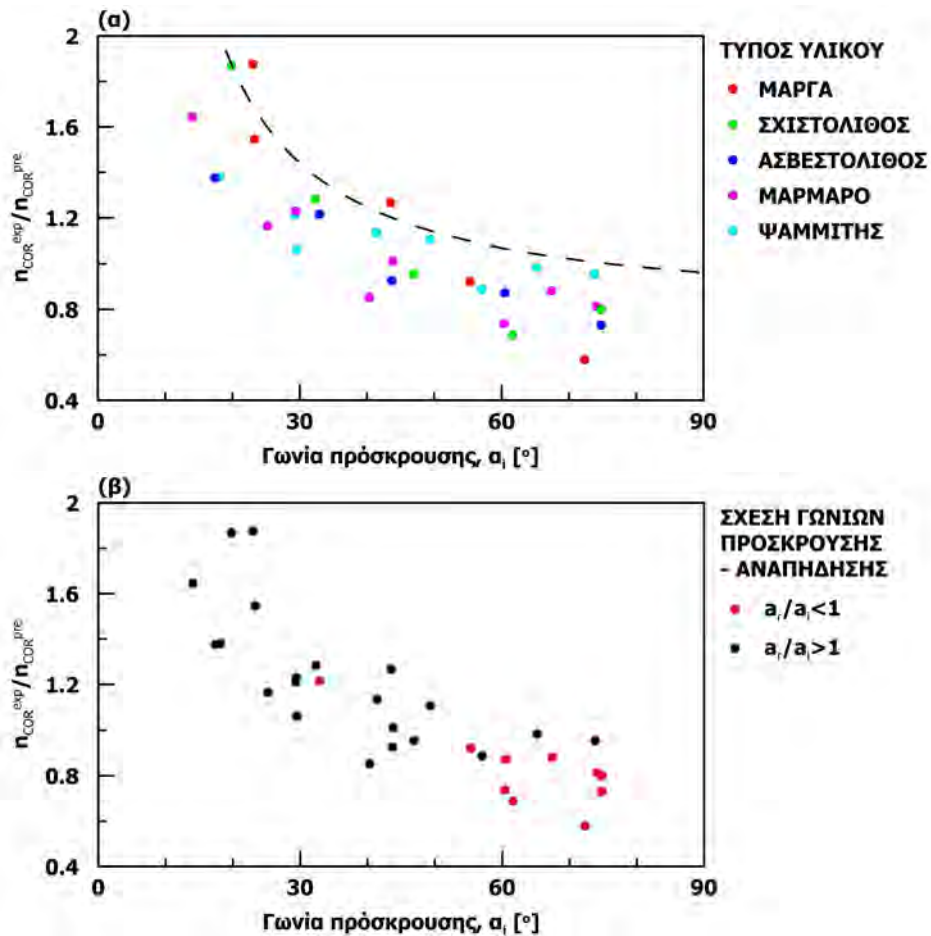
Σχήμα 9.14: Σύγκριση της τιμής του κάθετου συντελεστή αναπήδησης που προσδιορίστηκε πειραματικά με την εκτιμώμενη από την σχέση 9.4 συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης

Στο σχήμα 9.15-α αναπαρίσταται ο λόγος $n_{COR}^{exp}/n_{COR}^{pre}$ από κάθε σειρά δοκιμών, με τα σημεία ομαδοποιημένα σύμφωνα με το είδος του υλικού και στο σχήμα σχήμα 9.15-β αποτυπώνονται τα ίδια σημεία ομαδοποιημένα με τον λόγο των γωνιών αναπήδησης προς πρόσκρουσης (α_r/α_i). Ο λόγος $n_{COR}^{exp}/n_{COR}^{pre}$ εκφράζει την διαφοροποίηση της πειραματικής τιμής (n_{COR}^{exp}) από αυτή που εκτιμάται με την εφαρμογή της σχέσης 9.4.

Παρατηρείται πως στην συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων, ο λόγος $n_{COR}^{exp}/n_{COR}^{pre}$ είναι μεγαλύτερος της μονάδας όταν ο λόγος α_r/α_i είναι επίσης μεγαλύτερος της μονάδας. Έτσι, η σχέση μεταξύ του κάθετου συντελεστή αναπήδησης που προσδιορίστηκε πειραματικά με αυτόν που εκτιμάται από την σχέση 9.4, εξαρτάται πρωτίστως από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κρούσης παρά από την φύση του υλικού. Συνεπώς, στοχεύοντας στον προσδιορισμό της δυσμενέστερης περίπτωσης, σχεδιάζεται η περιβάλλουσα για το σύνολο των σημείων, ώστε να ποσοτικοποιηθεί η μέγιστη τιμή του λόγου $n_{COR}^{exp}/n_{COR}^{pre}$ συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης (διακεκομμένη καμπύλη στο σχήμα 9.15-α). Η περιβάλλουσα περιγράφεται ικανοποιητικά από μια σχέση της μορφής:

$$\frac{n_{COR}^{exp}}{n_{COR}^{pre}} = a\alpha_i^b + c \tag{9.9}$$

Δεδομένου ότι η εξίσωση της μορφής 9.9 μπορεί να αποδώσει τιμές μεγαλύτερες της μονάδας όταν η κρούση γίνεται περισσότερο εφαιπτομενική, είναι εφικτός ο προσδιορισμός τιμών μεγαλύτερων της μονάδας για τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης σε μικρές γωνίες πρόσκρουσης. Τέτοιες τιμές έχουν παρουσιασθεί τόσο στην παρούσα έρευνα όσο και σε άλλες πειραματικές εργασίες (βλ. ενότητα 8.3)



Σχήμα 9.15: Λόγος πειραματικής προς εκτιμώμενης τιμής του καθέτου συντελεστή αναπήδησης, συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης: (α) σύμφωνα με το είδος του υλικού και (β) σύμφωνα με τον λόγο των γωνιών πρόσκρουσης προς αναπήδησης

Επί της ουσίας, ο λόγος αυτός αποτελεί διορθωτικό συντελεστή (Σχέση 9.10), που εφόσον εφαρμοστεί στην σχέση 9.4, έχει ως αποτέλεσμα την ταύτιση των μεγίστων τιμών που προσδιορίστηκαν πειραματικά με αυτές που εκτιμώνται με την σχέση 9.4, συμπεριλαμβάνοντας έτσι την επίδραση της γωνίας πρόσκρουσης.

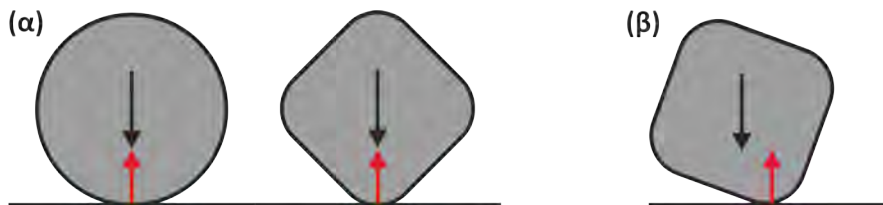
$$c_{ai} = \frac{n_{COR}^{exp}}{n_{COR}^{pre}} \tag{9.10}$$

όπου:

c_{ai} διορθωτικός συντελεστής γωνίας πρόσκρουσης

Στις δοκιμές ελεύθερης πτώσης με σφαιρικά τεμάχια, ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης λαμβάνει αντίστοιχες τιμές με τις μέγιστες που προσδιορίζονται από τα κυβικά τεμάχια με λειασμένες ακμές, όπως παρουσιάστηκε στην ενότητα 9.2.1 και στη σύγκριση των σχέσεων 9.1 και 9.4 που γίνεται στο σχήμα 9.8. Συνεπώς, ο διορθωτικός συντελεστής γωνίας πρόσκρουσης (c_{ai}) οφείλει να προσεγγίζει την μονάδα στην κάθετη κρούση, όπως άλλωστε συμβαίνει στην περιβάλλουσα που αναπαρίσταται στο σχήμα 9.15-α.

Έτσι, για να παρατηρηθεί η μέγιστη τιμή του καθέτου συντελεστή αναπήδησης στα κυβικά τεμάχια με λειασμένες ακμές, θα πρέπει η γεωμετρία επαφής που διαμορφώνεται κατά την κρούση να ομοιάζει με αυτήν των σφαιρικών τεμαχίων. Τούτο, συμβαίνει όταν το σημείο επαφής και το κέντρο βάρους του τεμαχίου βρίσκονται επί της καθέτου στην επιφάνεια πρόσκρουσης (Σχήμα 9.16-α). Αντιθέτως, όταν δεν ικανοποιείται αυτή η συνθήκη, που αποτελεί την συνήθη περίπτωση, η αναδιάταξη του τεμαχίου στην επιφάνεια πρόσκρουσης επιφέρει μεγαλύτερες απώλειες ενέργειας και άρα η κρούση περιγράφεται από μικρότερο συντελεστή αναπήδησης (Σχήμα 9.16-β).



Σχήμα 9.16: Γεωμετρία επαφής σφαιρικού τεμαχίου και κυβικού με λειασμένες ακμές

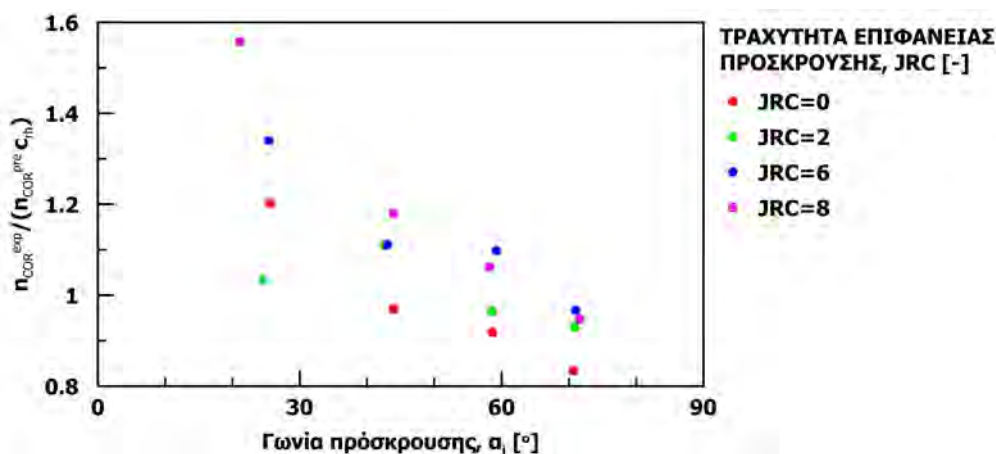
9.4.1.3 Εξέταση δοκιμών παραβολικής ρίψης με σφαιρικά και πολυεδρικά τεμάχια

Στην ενότητα αυτή εξετάζεται η σχέση του καθέτου συντελεστή αναπήδησης με την γωνία πρόσκρουσης, χρησιμοποιώντας τις δοκιμές που έγιναν για την διερεύνηση της επίδρασης που έχει η τραχύτητα της επιφάνειας πρόσκρουσης (βλ. ενότητα 5.4.2). Υπενθυμίζεται ότι στις εν λόγω δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν σφαιρικά τεμάχια από τσιμεντοειδές ένεμα ($R_b = 33.4$) και πολυεδρικά τεμάχια από μάρμαρο ($R_b = 38.2$), τα οποία βάλλονταν σε επιφάνειες πρόσκρουσης μαρμάρου ($R_s = 38.2$) με διαφορετικό βαθμό τραχύτητας.

Στις δοκιμές με τα σφαιρικά τεμάχια προέκυψε ότι ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης μειώνεται με την αύξηση της γωνίας πρόσκρουσης (Σχήμα 5.50). Παρόμοια συμπεριφορά εμφάνισαν και τα πολυεδρικά τεμάχια, όμως η διασπορά των τιμών του καθέτου συντελεστή αναπήδησης ήταν αυξημένη.

Όπως έχει παρουσιαστεί στο κεφάλαιο αυτό, το μέγεθος του καθέτου συντελεστή αναπήδησης εξαρτάται από την κάθετη συνιστώσα της ορμής πρόσκρουσης και τον τύπο του υλικού. Έτσι, για την απαλοιφή των παραμέτρων αυτών εφαρμόζεται η σχέση 9.8, καθώς η σκληρότητα της βάσης διαφοροποιείται από αυτήν του τεμαχίου. Συνεπώς, τυχόν διαφοροποίηση της εκτιμώμενης τιμής από αυτή που προσδιορίστηκε πειραματικά, αποδίδεται στην επίδραση της γωνίας πρόσκρουσης.

Για τα σφαιρικά τεμάχια, ο διορθωτικός συντελεστής γωνίας πρόσκρουσης ($c_{\alpha i} = n_{COR}^{exp}/n_{COR}^{pre}$) αναπαρίσταται στο σχήμα 9.17 ως προς την γωνία πρόσκρουσης, με τις τιμές ταξινομημένες σύμφωνα με την τραχύτητα της επιφάνειας πρόσκρουσης.



Σχήμα 9.17: Λόγος πειραματικής προς εκτιμώμενης τιμής του καθέτου συντελεστή αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης για σφαιρικά τεμάχια σε επιφάνειες πρόσκρουσης με διαφορετικό βαθμό τραχύτητας

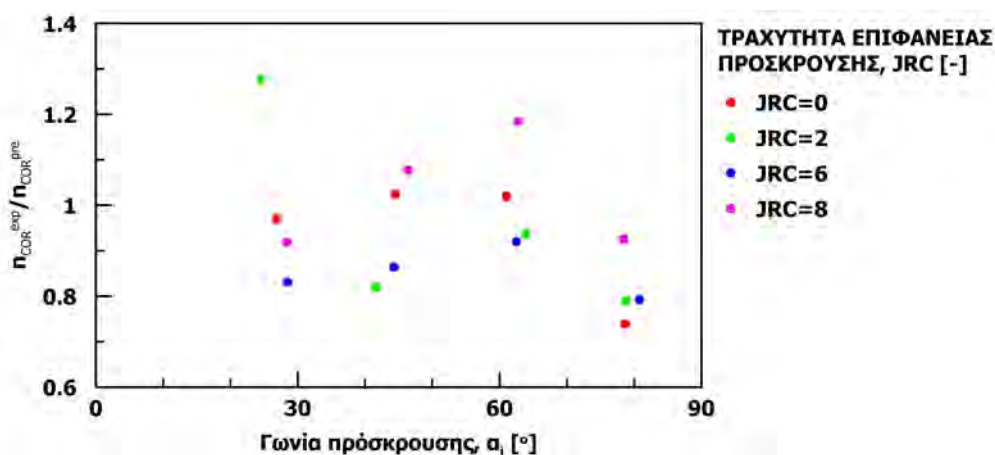
Από το σχήμα αυτό, παρατηρούνται τα εξής:

- όταν η γωνία πρόσκρουσης προσεγγίζει τις 90° ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης λαμβάνει παρόμοιες τιμές με αυτές που εκτιμώνται από την σχέση 9.8 ανεξαρτήτως της τραχύτητας της επιφάνειας πρόσκρουσης. Συνεπώς, για την περίπτωση αυτή, ο διορθωτικός συντελεστής της γωνίας πρόσκρουσης τείνει στην μονάδα
- για τραχύτητα της επιφάνειας πρόσκρουσης JRC έως 2, δηλαδή σε σχεδόν λείες επίπεδες επιφάνειες, δεν προκύπτει σημαντική διαφοροποίηση του διορθωτικού συντελεστή $c_{\alpha i}$ με την γωνία πρόσκρουσης. Τούτο είναι σε συμφωνία με την συμπεριφορά των σφαιρικών τεμαχίων (ενότητα 9.4.1.1) σε λεία επιφάνεια πρόσκρουσης. Συνεπώς η περιορισμένη τραχύτητα δεν φαίνεται να επηρεάζει περαιτέρω τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης
- η διόρθωση που γίνεται στον συντελεστή αναπήδησης εξαιτίας της διαφοροποίησης του υλικού της επιφάνειας πρόσκρουσης και του τεμάχους, εφαρμόζεται ικανοποιητικά και για την περίπτωση της κρούσης υπό γωνία
- όσο εντείνεται η τραχύτητα της επιφάνειας πρόσκρουσης, αυξάνεται η διαφορά μεταξύ πειραματικής και εκτιμώμενης τιμής και άρα του διορθωτικού συντελεστή της γωνίας πρόσκρουσης. Συνεπώς, η μη κανονικότητα της γεωμετρίας επαφής, που οφείλεται στην περίπτωση αυτή στην τραχύτητα της επιφάνειας, έχει αντίκτυπο στο μέγεθος του καθέτου συντελεστή αναπήδησης.

Στα πολυεδρικά τεμάχια, η διασπορά των τιμών είναι ιδιαίτερως αυξημένη καθώς επενεργούν συγχρόνως δυο παράμετροι που προκαλούν διαφοροποίηση της γεωμετρίας επαφής: το

σχήμα του τεμάχους και η τραχύτητα της επιφάνειας. Ωστόσο, η μεταβολή του διορθωτικού συντελεστή της γωνίας πρόσκρουσης εμφανίζει αντίστοιχη τάση με αυτήν των κυβικών δοκιμών με λειασμένες ακμές, δηλαδή αυξάνεται με την μείωση της γωνίας πρόσκρουσης (Σχήμα 9.18).

Όμως, για γωνία πρόσκρουσης 90° ο διορθωτικός συντελεστής της γωνίας πρόσκρουσης δεν προσεγγίζει την μονάδα, αλλά χαμηλότερη τιμή (περίπου 0.9). Συνεπώς κατά την διάρκεια της επαφής και της αναδιάταξης του τεμάχους η απώλεια ενέργειας είναι περισσότερη.

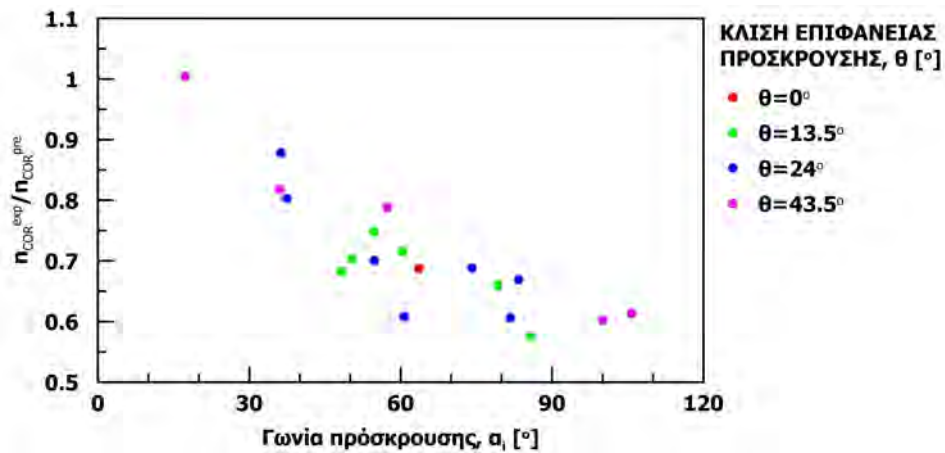


Σχήμα 9.18: Λόγος πειραματικής προς εκτιμώμενης τιμής του καθέτου συντελεστή αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης για πολυεδρικά τεμάχια σε επιφάνειες διαφορετικής τραχύτητας

9.4.1.4 Εξέταση δοκιμών παραβολικής ρίψης με κυβικά τεμάχια

Αντιστοίχως με τα παραπάνω, αξιοποιούνται και οι δοκιμές με κυβικά τεμάχια που έγιναν με τριδιάστατη καταγραφή και επεξεργασία της κίνησης στο εργαστήριο (βλ. ενότητα 6.2). Υπενθυμίζεται ότι στις δοκιμές αυτές πραγματοποιήθηκαν αρκετές επαναλήψεις, με παραβολική ρίψη σε οριζόντια επιφάνεια πρόσκρουσης και σε επιφάνειες με 3 διαφορετικές κλίσεις, μεταβάλλοντας της διεύθυνση της τροχιάς πριν την κρούση σε σχέση με την φορά μέγιστης κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης. Έτσι, μεταξύ αυτών μεταβάλλεται η γωνία πρόσκρουσης και η κάθετη συνιστώσα της ορμής πρόσκρουσης, ενώ στις δοκιμές σε αντίρροπη επιφάνεια έχουν εξετασθεί και γωνίες πρόσκρουσης μεγαλύτερες των 90° .

Η προσαρμογή του καθέτου συντελεστή αναπήδησης στην κάθετη συνιστώσα της ορμής πρόσκρουσης γίνεται με βάση την σχέση 9.4, καθώς η κρούση συμβαίνει μεταξύ τεμαχών και βάσεων πρόσκρουσης από το ίδιο υλικό. Όπως προηγουμένως, χρησιμοποιήθηκε η μέγιστη τιμή του καθέτου συντελεστή αναπήδησης από κάθε σειρά δοκιμών. Η μεταβολή του διορθωτικού συντελεστή γωνίας πρόσκρουσης παρουσιάζεται στο σχήμα 9.19.



Σχήμα 9.19: Λόγος πειραματικής προς εκτιμώμενης τιμής του καθέτου συντελεστή αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης για κυβικά τεμάχια

Παρατηρείται πως η μεταβολή του διορθωτικού συντελεστή της γωνίας πρόσκρουσης είναι ενιαία και ανεξάρτητη της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης. Τούτο συνηγορεί στο συμπέρασμα ότι η κρίσιμη παράμετρος που ελέγχει τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης είναι η γωνία πρόσκρουσης και όχι η κλίση της επιφάνειας. Επίσης, η μεταβολή του λόγου διορθωτικού συντελεστή της γωνίας πρόσκρουσης εμφανίζει αντίστοιχη μορφή με αυτή από τις προηγούμενες διερευνήσεις, δηλαδή αυξάνεται με την μείωση της γωνίας πρόσκρουσης. Ωστόσο, για γωνία πρόσκρουσης 90° προσεγγίζει τιμή μικρότερη της μονάδας, περίπου 0.65, δηλαδή η αναπήδηση ενός κυβικού τεμάχους μετά από κάθετη κρούση θα είναι πάντα μικρότερη από ότι του σφαιρικού.

9.4.2 Σύνδεση του μέγιστου συντελεστή αναπήδησης με την γωνία πρόσκρουσης και το σχήμα του τεμάχους

Στην προηγούμενη ενότητα προσδιορίστηκε η μεταβολή του λόγου $n_{COR}^{exp}/n_{COR}^{pre}$ συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης για τεμάχια σχήματος σφαιρικού, κυβικού με λειασμένες ακμές, πολυεδρικού και κυβικού.

Αρχικά, για τα σφαιρικά τεμάχια η σχέση 9.4, ή η σχέση 9.8 όταν η κρούση γίνεται μεταξύ διαφορετικών υλικών, είναι ικανή να περιγράψει ως έχει την αναπήδηση και στην περίπτωση που η κρούση γίνεται υπό γωνία.

Στα γωνιώδη τεμάχια παρατηρείται μια συστηματική μεταβολή του λόγου $n_{COR}^{exp}/n_{COR}^{pre}$ ως προς την γωνία πρόσκρουσης, συνεπώς η μορφή της σχέσης που περιγράφει την μεταβολή αυτή δεν εξαρτάται από το σχήμα του τεμάχους. Ωστόσο, διαφοροποιούνται οι συντελεστές της ανάλογα με το σχήμα του τεμάχους.

Η γωνία των 90° θεωρείται ως η χαρακτηριστική γωνία καθώς περιγράφει την κάθετη κρούση, όπου δεν υπεισέρχεται επίδραση από την γωνία πρόσκρουσης και η αναπήδηση ελέγχεται αποκλειστικά από την ορμή πρόσκρουσης και τον τύπο του υλικού, για τα οποία και έχει

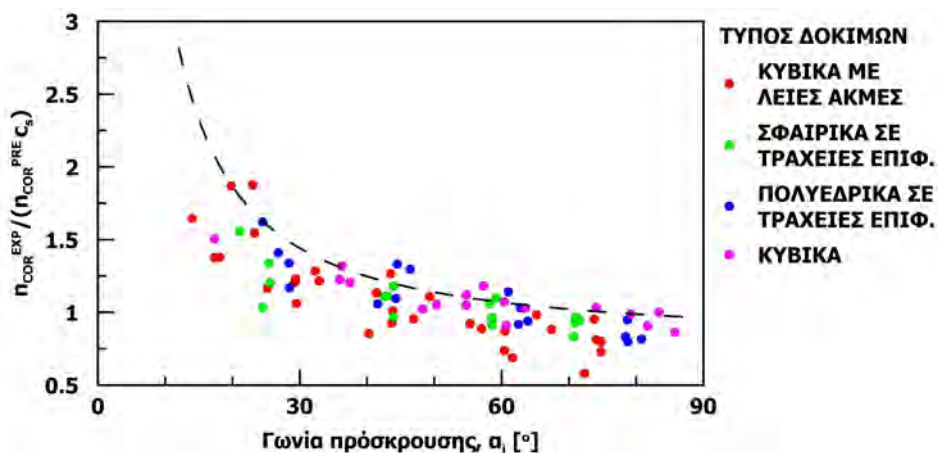
καταρτισθεί μια ικανοποιητική συσχέτιση. Άλλωστε, σύμφωνα με τα συμπεράσματα του κεφαλαίου 8, ο συντελεστής αναπήδησης δύναται να θεωρηθεί ως σταθερά του υλικού μόνο όταν προέρχεται από δοκιμές ελεύθερης πτώσης με σαφώς ορισμένη ορμή πρόσκρουσης.

Ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης που προσδιορίζεται από την σχέση 9.4 αντιστοιχεί σε σφαιρικά τεμάχια, που δεν υπεισέρχεται επίδραση σχήματος. Ο διορθωτικός συντελεστής γωνίας πρόσκρουσης προσεγγίζει την μονάδα στα κυβικά τεμάχια με τις λειασμένες ακμές, ισούται με περίπου 0.9 στα πολυεδρικά τεμάχια και περίπου 0.65 στα κυβικά. Έτσι, η μεταβολή της γεωμετρίας επαφής, που οφείλεται στο σχήμα του τεμάχους, οδηγεί στην μείωση του καθέτου συντελεστή αναπήδησης και εντείνεται με την αύξηση της γωνιότητας του τεμάχους. Σε συμφωνία με τα παραπάνω, οι Richards et al. (2001) αναφέρουν ότι ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης ακανόνιστων τεμαχίων κυμαίνεται στο 1/3 των σφαιρικών.

Με σκοπό την κατάρτιση μια ενιαίας σχέσης για τον προσδιορισμό του διορθωτικού συντελεστή της γωνίας πρόσκρουσης, χρησιμοποιείται ένας νέος διορθωτικός συντελεστής που εξαρτάται από το σχήμα του τεμάχους (c_s). Προκύπτει από το απαιτούμενο ποσό που πρέπει να διαιρεθεί η σχέση 9.4 (ή η σχέση 9.8 όταν πρόκειται για κρούση μεταξύ διαφορετικών υλικών), ώστε ο διορθωτικός συντελεστής της γωνίας πρόσκρουσης να ισούται με μονάδα όταν η πρόσκρουση του τεμάχους γίνεται υπό 90°.

Στο σχήμα 9.20, παρουσιάζονται όλα τα σημεία που συμπεριλαμβάνονται στα σχήματα 9.15 έως 9.19, προσαρμοσμένα με τους συντελεστές σχήματος που παρουσιάζονται στον πίνακα 9.3. Έτσι, οι τιμές του λόγου $n_{COR}^{exp}/n_{COR}^{pre}$ προσεγγίζουν την μονάδα όταν η γωνία πρόσκρουσης τείνει στις 90°, αυξάνονται εκθετικά με την μείωση της γωνίας πρόσκρουσης και περιγράφονται ικανοποιητικά από την σχέση:

$$\frac{n_{COR}^{exp}}{n_{COR}^{pre}} = (45\alpha_i^{-1.25} + 0.8) c_s \tag{9.11}$$



Σχήμα 9.20: Λόγος πειραματικής προς εκτιμώμενης τιμής του καθέτου συντελεστή αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης, διορθωμένος βάσει του σχήματος του τεμάχους

Πίνακας 9.3: Συντελεστές σχήματος, c_s

Σχήμα τεμάχους	Συντ. σχήματος, c_s
σφαιρικό	1
στρογγυλεμένο	1
πολυεδρικό	0.9
κυβικό	0.65

Τα κυβικά τεμάχη με λειασμένες ακμές θεωρούνται ως στρογγυλεμένα και ο συντελεστής σχήματος που λαμβάνουν ισούται με των σφαιρικών, καθώς όπως σχολιάσθηκε προηγουμένως, η γεωμετρία επαφής δύναται να ομοιάζει μεταξύ τους.

Έτσι, η μέγιστη τιμή του καθέτου συντελεστή αναπήδησης συναρτήσκει της γωνίας πρόσκρουσης, του σχήματος, του είδους του υλικού και της ορμής πρόσκρουσης προκύπτει από την σχέση:

$$n_{COR}^{max} = c_s c_{\alpha_i} n_{COR} \quad (9.12)$$

Ενώ στην περίπτωση που το τέμαχος και η επιφάνεια πρόσκρουσης είναι από διαφορετικά μεταξύ τους υλικά, η σχέση λαμβάνει την μορφή:

$$n_{COR}^{max} = c_s c_{\alpha_i} c_{rh} n_{COR} \quad (9.13)$$

όπου:

n_{COR}^{max} μέγιστη τιμή καθέτου συντελεστή αναπήδησης

c_s διορθωτικός συντελεστής σχήματος τεμάχους (Πίνακας 9.3)

c_{α_i} διορθωτικός συντελεστής γωνίας πρόσκρουσης (Σχέση 9.11)

c_{rh} διορθωτικός συντελεστής σχετικής σκληρότητας (Σχέση 9.6)

n_{COR} κάθετος συντελεστής αναπήδησης για σφαιρικά τεμάχη (Σχέση 9.4)

9.4.2.1 Αξιολόγηση της μεθοδολογίας προσδιορισμού του μεγίστου συντελεστή αναπήδησης με τις δοκιμές πεδίου

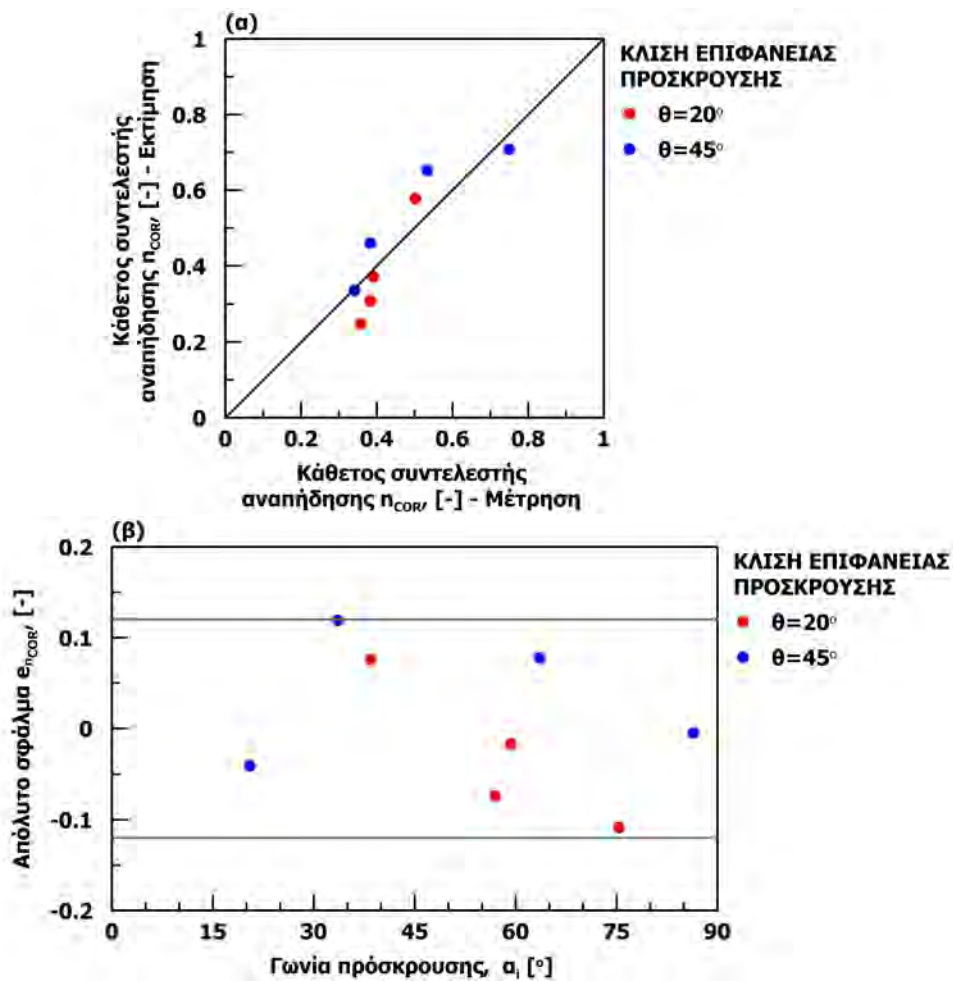
Όπως παρουσιάστηκε στην ενότητα 8.6, οι τάσεις που περιγράφουν τους συντελεστές αναπήδησης και τα μεγέθη που λαμβάνουν είναι παρόμοια μεταξύ των εργαστηριακών και των επιτόπου δοκιμών. Έτσι, τα αναφερόμενα στην παρούσα ενότητα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση των συντελεστών σε μεγαλύτερη κλίμακα.

Για να επιτευχθεί αυτό αρκεί, η αδιαστατοποίηση των σχέσεων 9.4 και 9.8 όταν πρόκειται για κρούση μεταξύ διαφορετικών υλικών. Εισάγοντας την ορμή αναφοράς (M_{ref}), η σχέση 9.8 γίνεται:

$$n_{COR} = (0.027R - 1.536) \left(\frac{M_{n,i}}{M_{ref}} \right)^{0.244} + 1 \quad (9.14)$$

Το μέγεθος της ορμής αναφοράς μπορεί να εκτιμηθεί από τις δοκιμές πεδίου που εκτελέστηκαν στο Πεντελικό όρος, εφαρμόζοντας την σχέση 9.8 αντίστροφα. Η σχέση αυτή χρησιμοποιείται επειδή τα τεμάχια ήταν από διαφορετικό υλικό από ότι η επιφάνεια πρόσκρουσης. Έτσι, ο διορθωτικός συντελεστής σχετικής σκληρότητας ισούται με $c_{rh} = 0.874$ (Σχέση 9.6 όπου $R_s = 43$ και $R_b = 33.4$). Στις εν λόγω δοκιμές τα τεμάχια ήταν κυβικά, οπότε ο διορθωτικός συντελεστής σχήματος ισούται με $c_s = 0.65$ (Πίνακας 9.3). Τέλος, ο διορθωτικός συντελεστής γωνίας πρόσκρουσης (c_{ai} - σχέση 9.11) λαμβάνει τιμές από 1 έως 1.8, ανάλογα με τις συνθήκες της εκάστοτε δοκιμής.

Με βάσει τις τιμές των παραμέτρων που αναφέρονται παραπάνω, προσδιορίζεται η ορμή αναφοράς M_{ref} για την οποία οι μέγιστες τιμές του καθέτου συντελεστή αναπήδησης που μετρήθηκαν στο πεδίο προσεγγίζουν αυτές που εκτιμώνται με την σχέση 9.14. Για τα εν λόγω δεδομένα, η M_{ref} ισούται με $37kgms^{-1}$. Εφαρμόζοντας την σχέση 9.14 με την τιμή αυτή και τους διορθωτικούς συντελεστές, είναι εφικτή η σύγκριση της εκτιμώμενης τιμής με αυτή που προσδιορίστηκε πειραματικά και του αντίστοιχου σφάλματος (Σχήμα 9.21).

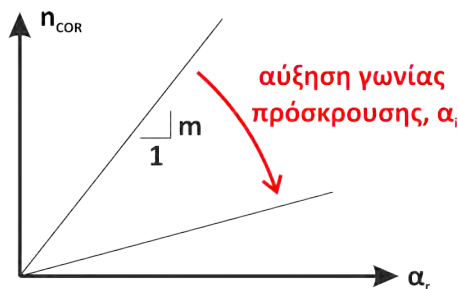


Σχήμα 9.21: Αξιολόγηση της μεθοδολογίας προσδιορισμού του μεγίστου συντελεστή αναπήδησης με τις δοκιμές πεδίου: (α) 1 προς 1 σύγκριση και (β) απόλυτο σφάλμα

Τα σημεία προβάλλονται περίξ της ευθείας 1 προς 1, υποδεικνύοντας την καλή εκτίμηση του κάθετου συντελεστή αναπήδησης που επιτυγχάνεται με την σχέση 9.14. Το απόλυτο σφάλμα δεν υπερβαίνει το 0.12, που είναι ικανοποιητικό συγκριτικά με την αυξημένη διασπορά των τιμών που συναντώνται στην βιβλιογραφία. Έτσι, η σχέση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ανεξαρτήτως κλίμακας εφόσον προσδιοριστεί η ορμή αναφοράς για την διάσταση που εξετάζεται.

9.4.3 Προσδιορισμός του εύρους τιμών του κάθετου συντελεστή αναπήδησης βάσει των γωνιών πρόσκρουσης και αναπήδησης

Στην παρουσίαση των δοκιμών παραβολικής ρίψης (κεφάλαια 5, 6 και 7), παρατηρήθηκε ότι ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης συνδέεται με την γωνία αναπήδησης μέσω μιας ευθείας που διέρχεται από την αρχή των αξόνων (Σχήμα 9.22). Επίσης, προέκυψε ότι η κλίση (m) της ευθείας αυτής σχετίζεται με την γωνία πρόσκρουσης, πιο συγκεκριμένα μειώνεται με την αύξηση της γωνίας πρόσκρουσης.



Σχήμα 9.22: Σχέση κάθετου συντελεστή αναπήδησης με την γωνία αναπήδησης για κρούση υπό γωνία

Η κατανομή των σημείων επί των εν λόγω ευθειών εξαρτάται από το σχήμα του τεμάχους. Στην περίπτωση που το τεμάχος είναι σφαιρικό, η γωνία αναπήδησης κυμαίνεται από 0.8 έως 1 της γωνίας πρόσκρουσης, ενώ όταν είναι διαφορετικού σχήματος η γωνία αναπήδησης μπορεί να είναι από 0 έως και μεγαλύτερη της γωνίας πρόσκρουσης.

Για κάθε σειρά δοκιμών παραβολικής ρίψης έγινε ομαδοποίηση των δεδομένων σε κλάσεις πλάτους 10^0 ως προς την γωνία πρόσκρουσης και προσδιορίστηκε ο σταθερός όρος της σχέσης 9.16 με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, εξαναγκάζοντας την ευθεία να διέρχεται από την αρχή των αξόνων. Ως γνωστόν, ο σταθερός όρος της σχέσης 9.16 περιγράφει την κλίση της ευθείας.

$$n_{COR} = m\alpha_r \quad (9.15)$$

Στον πίνακα 9.4 παρατίθενται οι σειρές δοκιμών και οι συντελεστές κλίσης m κάθε κλάσης. Τα σημεία αυτά αναπαρίστανται στο σχήμα 9.23 από όπου καθίστανται εμφανή τα εξής:

- η κλίση (m) εμφανίζει ασυμπτωτική τάση ως προς τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης όταν η γωνία πρόσκρουσης τείνει στο μηδέν και προσεγγίζει το μηδέν όταν η γωνία πρόσκρουσης είναι κάθετη

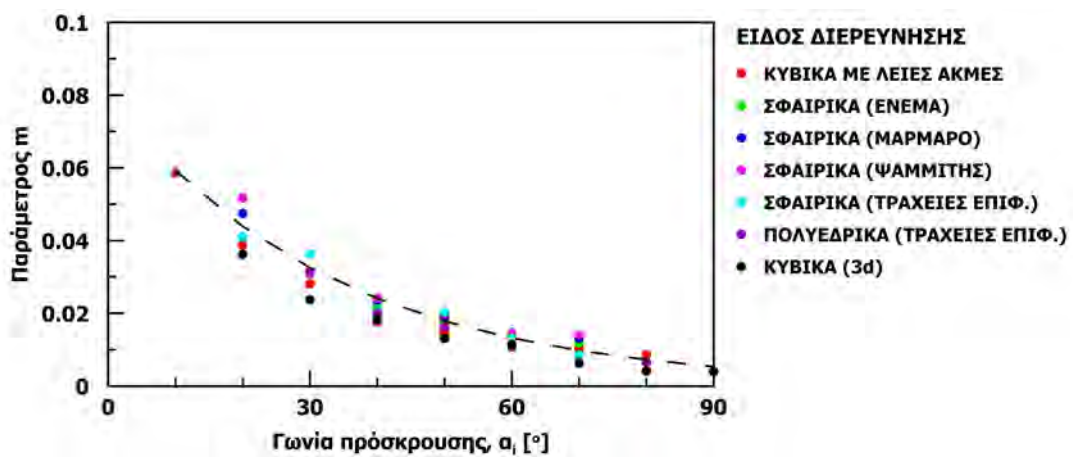
- η σχέση της γωνίας πρόσκρουσης με την παράμετρο m δεν εξαρτάται από το σχήμα του τεμάχους, την ορμή πρόσκρουσης, το είδος του πετρώματος ή την κατάσταση της επιφάνειας πρόσκρουσης, καθώς τα σημεία προβάλλονται επί ευθειών παρόμοιας κλίσης για κάθε κλάση γωνίας πρόσκρουσης ανεξαρτήτως της διερεύνησης από την οποία προέρχονται, που οι προαναφερθέντες παράμετροι διαφοροποιούνται αισθητά

Η μεταβολή της παραμέτρου m με την γωνία πρόσκρουσης περιγράφεται ικανοποιητικά ($R^2 = 0.93$) από την σχέση (διακεκομμένη καμπύλη στο σχήμα 9.23):

$$m = 0.08e^{-0.03\alpha_i} \tag{9.16}$$

Πίνακας 9.4: Κλίση ευθειών $a_r - n_{COR}$ συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης

Είδος διερεύνησης	Γωνία πρόσκρουσης, α_i , [°] - κέντρο κλάσης								
	10	20	30	40	50	60	70	80	90
κυβικά με λειασμένες ακμές	0.059	0.039	0.028	0.018	0.015	0.011	0.01	0.009	-
σφαιρικά (τσιμεντοειδές ένεμα)	-	0.031	0.022	0.017	0.013	0.012	-	-	-
σφαιρικά (μάρμαρο)	-	0.048	0.032	0.024	0.019	0.014	0.013	-	-
σφαιρικά (ψαμμίτης)	-	0.052	0.032	0.024	0.02	0.015	0.014	-	-
σφαιρικά σε τραχείες επιφάνειες	-	0.041	0.036	0.021	0.02	0.013	0.009	-	-
πολυεδρικά σε τραχείες επιφάνειες	-	0.031	0.02	0.016	0.011	-	0.007	-	-
κυβικά (τριδιάστατη ανάλυση)	-	0.036	0.024	0.018	0.013	0.011	0.006	0.004	0.004



Σχήμα 9.23: Κλίση ευθειών $a_r - n_{COR}$ συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης από το σύνολο των δοκιμών παραβολικής ρίψης που εκτελέστηκαν στο εργαστήριο

Βάσει των παραπάνω, μπορεί να προσδιοριστεί η σχέση μεταξύ του καθέτου συντελεστή αναπήδησης και της γωνίας αναπήδησης για δεδομένη γωνία πρόσκρουσης. Έτσι μπορεί να υπολογιστεί το μέτρο της ταχύτητας μετά την κρούση. Πιο συγκεκριμένα, η κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας, μετά την κρούση, ισούται με:

$$v_{n,r} = n_{COR}v_{n,i} \tag{9.17}$$

όποτε το μέτρο της ταχύτητας θα είναι:

$$v_r = v_{n,r} \sin \alpha_r \quad (9.18)$$

Συνεπώς με την εφαρμογή των κατάλληλων σχέσεων δύναται πλέον να προσδιοριστεί η εφαπτομενική συνιστώσα της ταχύτητας και ο αντίστοιχος συντελεστής αναπήδησης. Οπότε η διαγραφόμενη τροχιά μπορεί να προσδιοριστεί πλήρως με τις κλασσικές εξισώσεις της κίνησης.

Τα παραπάνω προϋποθέτουν ότι τα χαρακτηριστικά της τροχιάς πριν την κρούση είναι γνωστά, ειδικότερα η ταχύτητα και η γωνία πρόσκρουσης. Τα στοιχεία αυτά υπαγορεύονται από τις αρχικές συνθήκες του προβλήματος και ως εκ τούτου δύνανται να εκτιμηθούν ικανοποιητικά. Πιο συγκεκριμένα, η γωνία πρόσκρουσης εξαρτάται από την κλίση και την φορά μέγιστης κλίσης του πρανούς, που ως μορφολογικά χαρακτηριστικά είναι γνωστά στις πρακτικές εφαρμογές. Η ταχύτητα πρόσκρουσης εξαρτάται από την ταχύτητα και την γωνία βολής, που καθορίζονται από την θέση του επισφαλούς τεμάχους στο πρανές και το αίτιο έναρξης της κατάπτωσης.

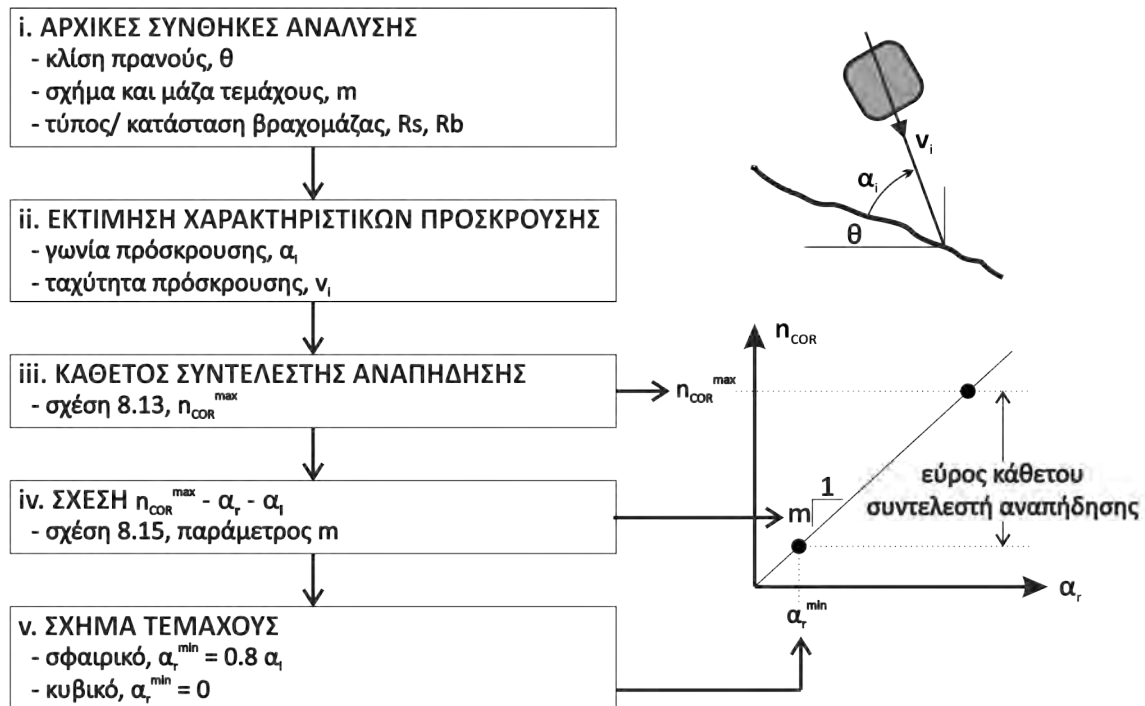
Έτσι, για τον προσδιορισμό του εύρους των πιθανών τιμών του καθέτου συντελεστή αναπήδησης σε δεδομένες συνθήκες πρόσκρουσης, χρειάζονται η ελάχιστη τιμή της γωνίας αναπήδησης και η μέγιστη τιμή του καθέτου συντελεστή αναπήδησης.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η ελάχιστη τιμή της γωνίας αναπήδησης εξαρτάται από το σχήμα του τεμάχους. Για σφαιρικό τέμαχος είναι περίπου 0.8, ενώ για τα υπόλοιπα σχήματα μπορεί να είναι μηδέν, που σημαίνει ότι η κίνηση μετατρέπεται σε κύλιση ή ολίσθηση.

Η μέγιστη τιμή του καθέτου συντελεστή αναπήδησης συναρτήσει της γωνία πρόσκρουσης εξαρτάται πάλι από σχήμα του τεμάχους, αλλά και από πληθώρα παραμέτρων όπως αναφέρθηκε διεξοδικά στην ενότητα 9.4.2 όπου και παρατίθενται οι κατάλληλες εμπειρικές σχέσεις για το προσδιορισμό της.

Βάσει των ανωτέρω, η μεθοδολογία προσδιορισμού της διακύμανσης του καθέτου συντελεστή αναπήδησης αποτελείται από τα παρακάτω στάδια και αναπαρίσταται με την βοήθεια του σχήματος 9.24

- i Γενικά στοιχεία του προβλήματος
- ii Εκτίμηση της γωνίας και της ταχύτητας πρόσκρουσης, σύμφωνα με τις εκάστοτε συνθήκες κάθε προβλήματος
- iii Προσδιορισμός της μέγιστης τιμής του καθέτου συντελεστή αναπήδησης με την εφαρμογή της σχέσης 9.13
- iv Προσδιορισμός της παραμέτρου m από την σχέση 9.16, για την εκτιμώμενη γωνία πρόσκρουσης
- v Εκτίμηση της ελάχιστης γωνίας αναπήδησης βάσει του σχήματος του τεμάχους



Σχήμα 9.24: Βήματα για τον προσδιορισμό του εύρους τιμών του κάθετου συντελεστή αναπήδησης και των αντιστοίχων γωνιών αναπήδησης

Έτσι, οι πιθανές τιμές που μπορεί να λάβει ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης κυμαίνονται από αυτήν που αντιστοιχεί στην ελάχιστη γωνία αναπήδησης έως την μέγιστη τιμή του που προσδιορίζεται στο στάδιο ii. Στο εύρος αυτό, όλες οι τιμές είναι εξίσου πιθανές, καθώς δεν παρατηρήθηκε ενδιαμέσως κάποια συστηματικότητα στην κατανομή των τιμών του κάθετου συντελεστή αναπήδησης στις αντίστοιχες πειραματικές διερευνήσεις.

9.5 Εκτίμηση της πλευρικής εκτροπής

Η εκτροπή (e) ορίζεται ως η διεδρη γωνία που σχηματίζεται μεταξύ των κατακόρυφων επιπέδων που περιέχουν την τροχιά πριν και μετά την κρούση. Γενικώς, έχει παρατηρηθεί τόσο σε πραγματικές καταπτώσεις όσο και σε δοκιμές πεδίου ότι το μέγεθός της μπορεί να είναι ιδιαίτερα σημαντικό. Ωστόσο, τα διαθέσιμα εργαλεία για την εκτίμησή της είναι περιορισμένα και υπολείπονται τεκμηρίωσης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η συντριπτική πλειοψηφία των δοκιμών έχουν αναλυθεί στον διδιάστατο χώρο, κυρίως εξαιτίας της δυσκολίας ανακατασκευής της τροχιάς στις τρεις διαστάσεις. Έτσι, η πλειονότητα των λογισμικών που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των τροχιών είναι στις δυο διαστάσεις με συνέπεια να μην λαμβάνεται υπόψη στις μελέτες καταπτώσεων.

9.5.1 Κατάρτιση εμπειρικής μεθοδολογίας πρόβλεψης της εκτροπής

Πέραν των ποιοτικών συμπερασμάτων που αναφέρθηκαν στην ενότητα 8.8, τα αποτελέσματα δύναται να αξιοποιηθούν στην κατάρτιση μιας εμπειρικής μεθόδου για την εκτίμηση της εκτροπής συναρτήσει της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης και της διαφοράς διεύθυνσης.

Η κατάρτιση της μεθοδολογίας επιτυγχάνεται αξιοποιώντας τα δεδομένα της εργαστηριακής διερεύνησης και ακολούθως ελέγχεται η εγκυρότητά της βάσει των δοκιμών πεδίου. Στο εργαστήριο πραγματοποιήθηκαν δοκιμές παραβολικής ρίψης με σφαιρικά και κυβικά τεμάχια που προσέκρουσαν σε λείες επιφάνειες πρόσκρουσης υπό μεταβαλλόμενη κλίση και διαφορά διεύθυνσης.

Γενικώς, η απόκριση των σφαιρικών τεμαχίων ήταν επαναλαμβανόμενη, η εκτροπή τους ήταν περιορισμένη και ελάχιστα εξαρτώμενη από την διαφορά διεύθυνσης. Αντιθέτως, στα κυβικά τεμάχια το μέγεθος της εκτροπής ήταν σημαντικό και η εξάρτησή της από την διαφορά διεύθυνσης έντονη.

Επίσης, το σφαιρικό σχήμα απέχει σημαντικά από το σχήμα των φυσικών τεμαχίων που συναντώνται στις καταπτώσεις, τα οποία είναι ως επί το πλείστον γωνιώδη. Περαιτέρω, τα φυσικά τεμάχια αντιπροσωπεύονται καλύτερα από κυβικά δοκίμια, όπως προέκυψε από τις αρχικές διερευνήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο και στο πεδίο με την τριδιάστατη καταγραφή και ανάλυση. Έτσι, πραγματοποιήθηκαν σημαντικά περισσότερες δοκιμές με τα κυβικά τεμάχια και η κατάρτιση της μεθοδολογίας που παρουσιάζεται παρακάτω βασίζεται σε αυτές.

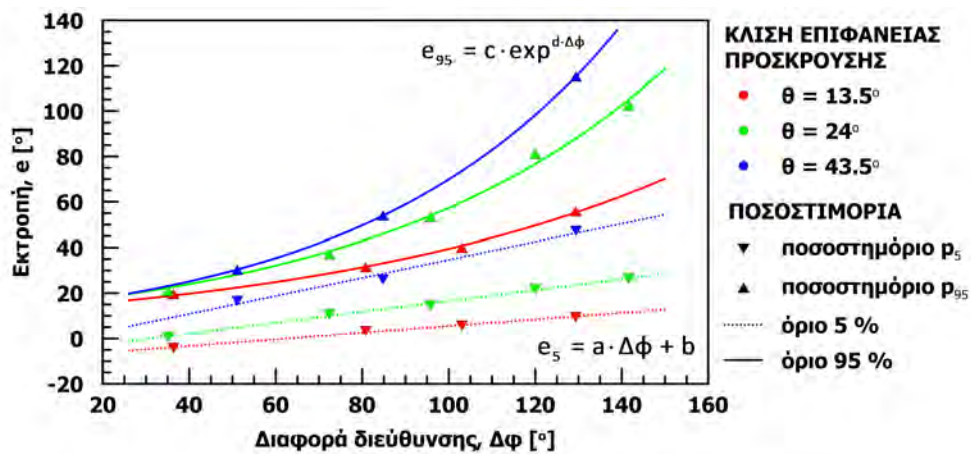
Στην ενότητα 6.2.3.3.5 παρουσιάστηκε η σχέση που έχει η εκτροπή με την διαφορά διεύθυνσης (Σχήμα 6.50). Γενικώς αυξάνεται με την αύξηση της διαφοράς διεύθυνσης και εξαρτάται από την κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης. Στην παρούσα έρευνα χρησιμοποιείται κυρίως η γωνία πρόσκρουσης για την περιγραφή των αρχικών συνθηκών της κρούσης. Ωστόσο για την κατάρτιση της μεθοδολογίας που ακολουθεί, χρησιμοποιείται η κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης καθώς σε συνδυασμό με την διαφορά διεύθυνσης καταλήγουν στην φαινόμενη κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης ως προς το κατακόρυφο επίπεδο που εμπεριέχει την κίνηση πριν την κρούση και άρα εμμέσως στην γωνία πρόσκρουσης. Επίσης, η έκφραση βάσει της κλίσης είναι πρακτικότερη καθώς αποτελεί μορφολογικό χαρακτηριστικό που προσδιορίζεται εύκολα και απλά σε οποιαδήποτε πρακτική εφαρμογή.

Δεδομένου ότι το εύρος της εκτροπής για κάθε σειρά δοκιμών είναι σημαντικό και περιγράφεται μόνο από την ομοιόμορφη κατανομή (βλ. σχήμα 6.51), η έκφραση της εκτροπής με την μέση τιμή θα απέκρυπτε την βαρύνουσα για το σχεδιασμό πληροφορία της πλευρικής διασποράς. Έτσι, χρησιμοποιήθηκαν τα άνω και κάτω όρια τιμών της εκτροπής για κάθε σειρά δοκιμών, εκφρασμένα βάσει των αντίστοιχων ποσοστημορίων.

Το ποσοστημόριο (p_a) είναι η τιμή ενός μεγέθους για την οποία το $a\%$ των παρατηρήσεων είναι μικρότερες και οι υπόλοιπες μεγαλύτερες. Αποτελεί μέτρο θέσης της μεταβλητής και

είναι ιδιαίτερα χρήσιμο όταν οι ανώτερες ή οι κατώτερες τιμές της είναι άγνωστες. Προσδιορίζεται από την καμπύλη των σχετικών αθροιστικών συχνοτήτων ως η τιμή που αντιστοιχεί στο $a\%$ αυτής. Για την κατάρτιση της εν λόγω εμπειρικής μεθόδου χρησιμοποιήθηκαν τα ποσοστημόρια του 5 και 95% για κάθε σειρά δοκιμών, τα οποία συμβολίζονται ως p_5 και p_{95} αντίστοιχα.

Στο σχήμα 9.25 απεικονίζονται τα εν λόγω ποσοστημόρια ομαδοποιημένα σύμφωνα με την κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης και στους πίνακες 9.5 και 9.6 παρατίθενται οι τιμές των ποσοστημορίων p_5 και p_{95} αντίστοιχα.



Σχήμα 9.25: Όρια εκτροπής συναρτήσει της διαφοράς διεύθυνσης

Επίσης, στο σχήμα 9.25 παρουσιάζονται οι βέλτιστες καμπύλες που συνδέουν την διαφορά διεύθυνσης με την εκτροπή για κάθε κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης. Το κάτω όριο περιγράφεται από ευθεία γραμμή (Σχέση 9.19) και το άνω όριο από εκθετική σχέση της μορφής 9.20.

$$e_5 = a\Delta\varphi + b \tag{9.19}$$

$$e_{95} = c \exp^{d\Delta\varphi} \tag{9.20}$$

όπου:

e_5 το κάτω όριο της εκτροπής

e_{95} το άνω όριο της εκτροπής

$\Delta\varphi$ η διαφορά διεύθυνσης μεταξύ της τροχιάς πριν την κρούση και της φοράς μεγίστης κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης

Οι συντελεστές των δύο αυτών σχέσεων προσδιοριστήκαν με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων και παρουσιάζονται στον πίνακα 9.5 για το κάτω όριο και στον πίνακα 9.6 για το άνω όριο.

Πίνακας 9.5: Παράμετροι συσχέτισης κάτω ορίου εκτροπής (ποσοστημόριο ρ_5)

Κλίση $\theta [^\circ]$	Διαφ. διεύθυνσης $\Delta\phi [^\circ]$	Εκτροπή $e [^\circ]$	Παράμετρος		Συντ. Συσχέτισης $R [-]$
			a	b	
13.5	36.3	-4.1	0.14	-9.1	0.99
	80.8	2.3			
	103	5.8			
	129.4	9.5			
24	35	0.8	0.24	-7.4	0.99
	72.3	10.7			
	95.8	14.6			
	120	21.7			
	141.5	26.4			
43.5	51	16.6	0.39	-5	0.98
	84.8	26.1			
	129.4	47.3			

Τα ποιοτικά συμπεράσματα επαληθεύονται από τις τιμές των παραμέτρων που λαμβάνουν οι συντελεστές της γραμμικής σχέσης που περιγράφει το κάτω όριο. Πιο συγκεκριμένα, η κλίση των ευθειών (παράμετρος a) συνδέεται με τον ρυθμό μεταβολής της εκτροπής, ο οποίος αυξάνεται με την αύξηση της κλίσης του επιπέδου πρόσκρουσης. Ο σταθερός όρος (παράμετρος b) αυξάνεται όσο πιο απότομη γίνεται η κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης, δηλαδή για δεδομένη διαφορά διεύθυνσης η εκτροπή είναι μεγαλύτερη, που σημαίνει ότι εντείνεται η κατευθυντικότητα που ασκεί η επιφάνεια πρόσκρουσης.

Πίνακας 9.6: Παράμετροι συσχέτισης άνω ορίου εκτροπής (ποσοστημόριο ρ_9)

Κλίση $\theta [^\circ]$	Διαφ. διεύθυνσης $\Delta\phi [^\circ]$	Εκτροπή $e [^\circ]$	Παράμετρος		Συντ. Συσχέτισης $R [-]$
			c	d	
13.5	36.3	19.6	12.5	0.011	0.99
	80.8	31.5			
	103	39.9			
	129.4	55.8			
24	35	21.1	13.4	0.014	0.99
	72.3	37.3			
	95.8	53.3			
	120	81.2			
	141.5	102.6			
43.5	51	30.3	12.7	0.017	1
	84.8	54			
	129.4	115.4			

Για το άνω όριο, η τιμή της παραμέτρου c δεν παρουσιάζει σημαντική διακύμανση, έτσι μπορεί να θεωρηθεί ως σταθερή και ανεξάρτητη της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης. Η παράμετρος d αυξάνεται όσο η κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης γίνεται πιο απότομη, που συνεπάγεται ότι το μέγεθος της εκτροπής είναι μεγαλύτερο για δεδομένη διαφορά διεύθυνσης. Δηλαδή η κατευθυντικότητα που ασκεί η επιφάνεια πρόσκρουσης είναι ισχυρότερη με την αύξηση της κλίσης της και για το άνω όριο της εκτροπής.

Βάσει των ανωτέρω, η κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης σχετίζεται με τις τιμές που λαμβάνουν οι συντελεστές των καμπύλων συσχέτισης που παρουσιάζονται στο σχήμα 9.25. Έτσι, για την κατάρτιση της εμπειρικής μεθόδου πρόβλεψης του εύρους της εκτροπής, οι παράμετροι a , b και d , προσεγγίζονται από τις βέλτιστες ευθείες που τις συνδέουν με την κλίση (σχέσεις 9.21). Στο σχήμα 9.26 παρουσιάζονται γραφικά οι εν λόγω συσχετίσεις, όπως προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων. Τέλος, η παράμετρος c λαμβάνεται ως σταθερά αφού παρουσιάζει μικρή μεταβλητότητα (τυπική απόκλιση προς μέσο όρο), πιο συγκεκριμένα ίση με 3%.

Οι σχέσεις αυτές είναι:

$$\begin{aligned} a &= 0.008\vartheta + 0.035 \\ b &= 0.136\vartheta - 10.83 \\ d &= 0.0002\vartheta + 0.0095 \end{aligned} \quad (9.21)$$

Για την κατάρτιση των τελικών εξισώσεων αντικαθίστανται οι συντελεστές των σχέσεων 9.19 και 9.20 από τις αντίστοιχες εξισώσεις των βέλτιστων ευθειών (σχέσεις 9.21) και προσαρμόζονται ώστε να εμφανίζουν απλούστερη μορφή. Έτσι, το κάτω όριο προσδιορίζεται από την εξίσωση 9.22 και το άνω όριο από την 9.23.

$$e_5 = \frac{\vartheta \Delta\varphi}{100} + 0.13\vartheta - 10.8 \quad (9.22)$$

και

$$e_{95} = 12 \exp^{\Delta\varphi(0.0002\vartheta - 0.01)} \quad (9.23)$$

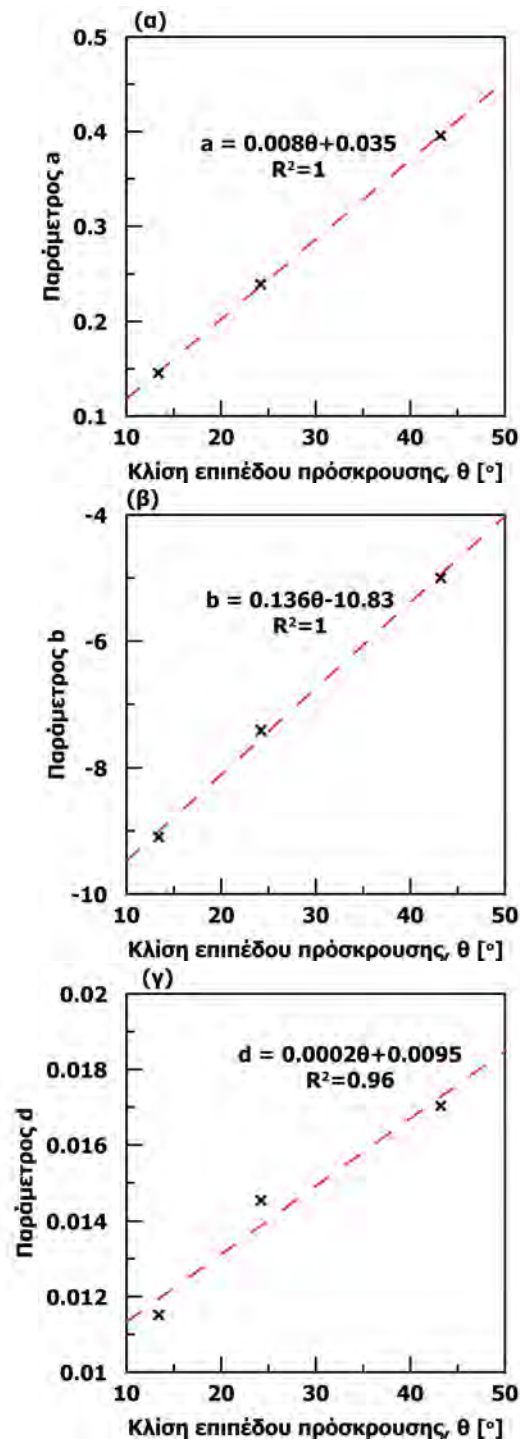
όπου:

e_5 το κάτω όριο της εκτροπής

e_{95} ο άνω όριο της εκτροπής

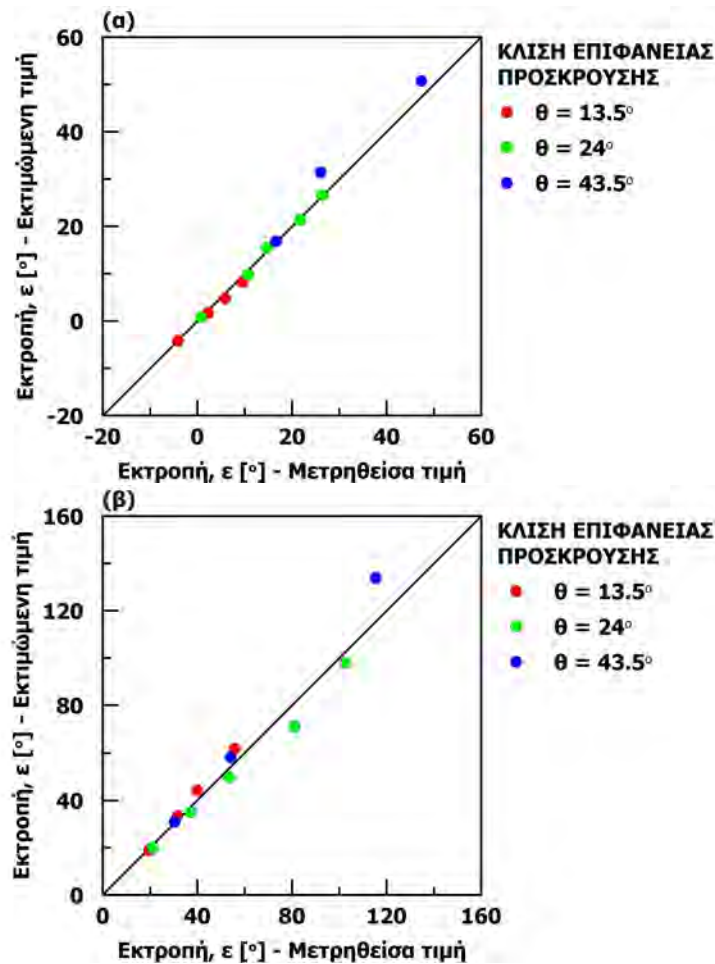
ϑ η κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης

$\Delta\varphi$ η διαφορά διεύθυνσης μεταξύ της τροχιάς πριν την κρούση και της φοράς μεγίστης κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης



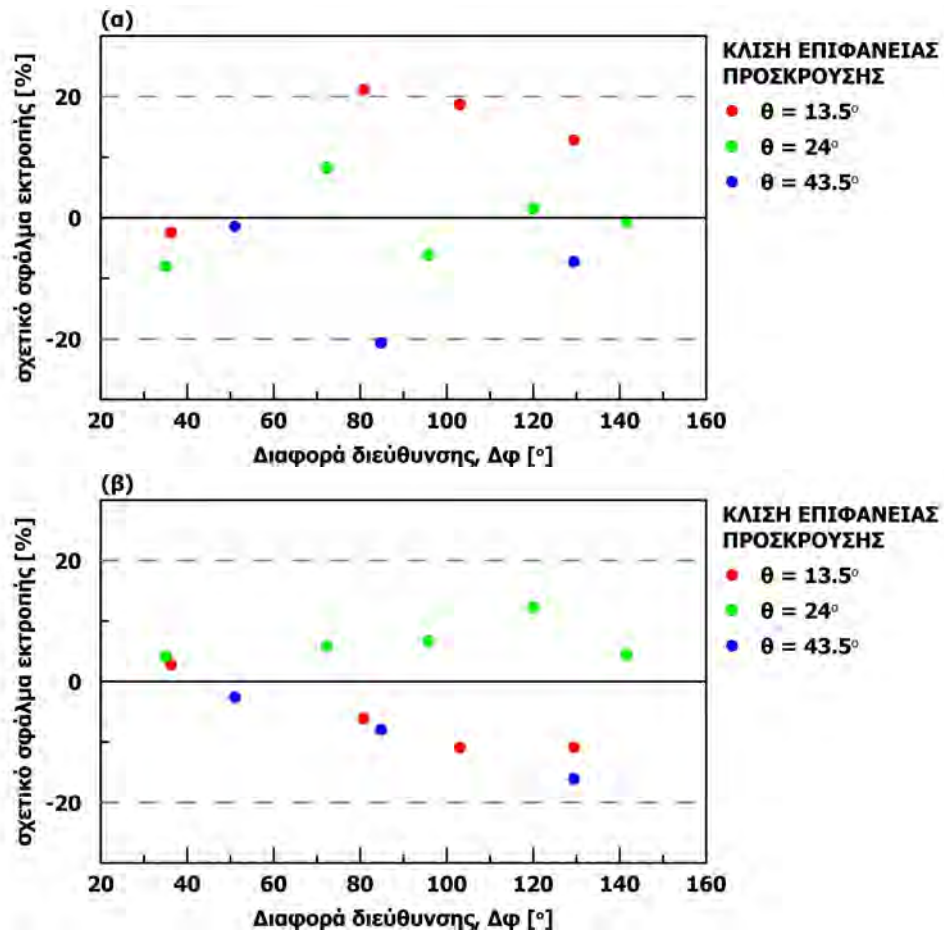
Σχήμα 9.26: Προσδιορισμός συντελεστών συσχέτισης ορίων εκτροπής: (α) παράμετρος a , (β) παράμετρος b και (γ) παράμετρος c

Η αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθοδολογίας γίνεται με την σύγκριση των τιμών που προσδιορίζονται από τις τελικές εξισώσεις με αυτές που μετρήθηκαν κατά την πειραματική διερεύνηση. Με την βοήθεια του σχήματος 9.27, παρατηρείται ότι οι τιμές προβάλλονται πολύ κοντά στην ευθεία 1 προς 1, υποδηλώνοντας ταύτιση πρακτικώς του κάτω και του άνω ορίου με τις εξισώσεις 9.22 και 9.23 αντίστοιχα.



Σχήμα 9.27: Αξιολόγηση της εξίσωσης προσδιορισμού των ορίων εκτροπής: (α) κάτω όριο και (β) άνω όριο

Το σχετικό σφάλμα προσδιορισμού των ορίων παρουσιάζεται στο σχήμα 9.28, συναρτήσει της διαφοράς διεύθυνσης. Περιορίζεται στο $\pm 20\%$ για το κάτω όριο και είναι λίγο μικρότερο για το όριο του 95% της εκτροπής, ενώ δεν προκύπτει κάποια μεταβολή με την διαφορά διεύθυνσης. Ειδικά για το κάτω όριο, οι τιμές του σχετικού σφάλματος είναι διογκωμένες καθώς προσδιορίζεται η διαφοροποίηση από ιδιαίτερα μικρές τιμές εκτροπής. Δηλαδή, στην περίπτωση του σχετικού σφάλματος 21% στο κάτω όριο (βλ. σχήμα 9.28), η εκτροπή ισούται με 2.25° και άρα η απόκλιση μεταξύ εκτιμώμενης και μετρηθείσας τιμής είναι μικρότερη από 0.5° , που πρακτικώς είναι ασήμαντη. Βάσει των ανωτέρω, η προτεινόμενη εμπειρική μεθοδολογία παρουσιάζει ικανοποιητική ακρίβεια.

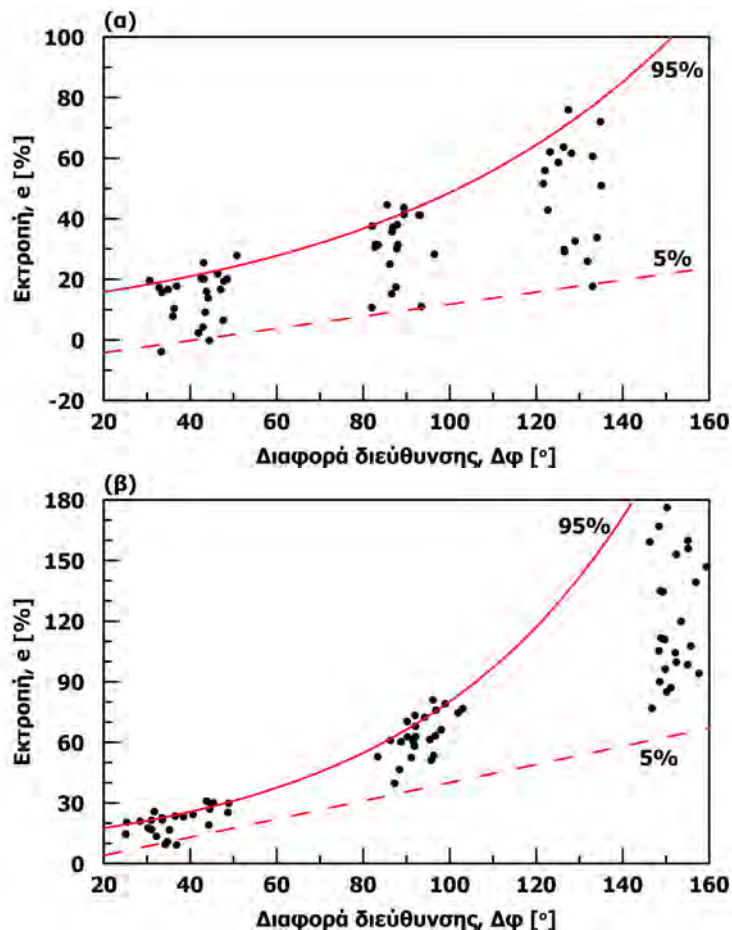


Σχήμα 9.28: Σχετικό σφάλμα στις τιμές της πρόβλεψης της μεθοδολογίας προσδιορισμού ορίων εκτροπής: (α) κάτω όριο και (β) άνω όριο

9.5.2 Αξιολόγηση μεθοδολογίας εκτίμησης της εκτροπής με τα δεδομένα της επιτόπου διερεύνησης

Αντίστοιχες δοκιμές εκτελέστηκαν και στο πεδίο, σε δυο σχετικά λείες επιφάνειες πρόσκρουσης μαρμάρου με κλίση 20° και 45° (βλ. ενότητα 7.3). Τα τεμάχια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν κυβικά με ακμή 15cm κατασκευασμένα από το ένεμα τσιμεντοειδούς βάσης. Η απελευθέρωση των τεμαχίων πραγματοποιήθηκε με το χέρι, καθώς δεν ήταν εφικτή η κατασκευή διάταξης για την ελεγχόμενη απελευθέρωσή τους. Τούτο είχε ως συνέπεια την αυξημένη διασπορά της διεύθυνση της τροχιάς πριν την κρούση και συνεπώς ο προσδιορισμός των ποσοτιμών της εκτροπής για κάθε σειρά δοκιμών καθίσταται προβληματικός. Εντούτοις, η αξιολόγηση των σχέσεων 9.22 και 9.23 πραγματοποιείται για το σύνολο των δοκιμών, μέσω των περιβαλλουσών καμπύλων.

Στο σχήμα 9.29 παρουσιάζεται η εκτροπή συναρτήσει της διαφοράς διεύθυνσης, για τις επιφάνειες πρόσκρουσης με κλίση 20° και 45° αντίστοιχα. Επίσης, είναι σχεδιασμένα τα όρια της εκτροπής που αντιστοιχούν στο 5% (διακεκομμένη γραμμή) και στο 95% (συνεχής γραμμή), όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των σχέσεων (9.22 και 9.23 με την εκάστοτε κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης.



Σχήμα 9.29: Αξιολόγηση της μεθοδολογίας εκτίμησης της εκτροπής συναρτήσει της διαφοράς διεύθυνσης με βάση τις δοκιμές πεδίου, σε επιφάνεια πρόσκρουσης με κλίση: (α) 20° και (β) 45°

Γενικώς, τα σημεία προβάλλονται εντός των ορίων που προσδιορίζονται από την εμπειρική μεθοδολογία εκτίμησης της εκτροπής. Για το πρανές με κλίση 20° , εκτός του κάτω ορίου προβάλλεται το 5% των δεδομένων και εκτός του άνω ορίου το 10% αυτών. Στο πρανές κλίσης 45° τα αντίστοιχα ποσοστά είναι 3 και 11%, ωστόσο στις δοκιμές με μεγάλη διαφορά διεύθυνσης φαίνεται τα όρια να είναι κάπως συντηρητικά. Σε κάθε περίπτωση πάντως, το μέγιστο απόλυτο σφάλμα είναι λιγότερο από 5° , συνεπώς η μεθοδολογία αυτή περιγράφει ικανοποιητικά και την εκτροπή των δοκιμών πεδίου. Έτσι, συμπεραίνεται ότι η εκτροπή είναι ανεξάρτητη της κλίμακας εκτέλεσης των δοκιμών, συνεπώς είναι εφικτή η χρήση της σε πρακτικές εφαρμογές καταπτώσεων.

9.6 Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό καταρτίστηκαν δυο εμπειρικές μεθοδολογίες με σκοπό την βελτίωση της ικανότητας πρόβλεψης της τροχιάς στις καταπτώσεις βράχων. Τα δεδομένα προέρχονται από την εκτενέστατη πειραματική διερεύνηση που εκπονήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας. Η προσέγγιση για την κατάρτιση των σχέσεων είναι κυρίως φαινομενολογική, δηλαδή αρχικώς προσδιορίζονται οι κρισιμότερες παράμετροι που επιδρούν στο υπό μελέτη φαινόμενο, συστηματοποιείται ο τρόπος που επιδρούν και εν συνεχεία εκφράζεται μέσω στατιστικών συσχετίσεων για την σύνδεσή τους με τα υπό εξέταση μεγέθη.

Η πρώτη μεθοδολογία αφορά στην εκτίμηση του καθέτου συντελεστή αναπήδησης συναρτήσει της σκληρότητας των υλικών που μετέχουν στην κρούση καθώς επίσης και της σφοδρότητας της κρούσης, που εκφράζεται μέσω της ταχύτητας πρόσκρουσης και της μάζας του τεμάχους. Η σχέση αυτή μπορεί να αξιοποιηθεί για την κατάρτιση χαρακτηριστικών τιμών του καθέτου συντελεστή αναπήδησης, όταν το τέμαχος είναι σφαιρικό και η κρούση γίνεται με ελεύθερη πτώση, εφόσον καθορίζεται σαφώς η σφοδρότητα της κρούσης.

Όταν η κρούση γίνεται υπό γωνία και το τέμαχος είναι γωνιώδες, ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης εμφανίζει σημαντική διακύμανση που εξαρτάται από τον προσανατολισμό του τεμάχους κατά την επαφή. Έτσι, υπό παρόμοιες συνθήκες πρόσκρουσης, αλλά με διαφορετική γεωμετρία επαφής, είναι εφικτός ο προσδιορισμός τιμών από μηδέν έως και μεγαλύτερες της μονάδας. Βάσει των παρατηρήσεων των πειραματικών δεδομένων καταρτίστηκε μια σχέση για την εκτίμηση της μεγίστης τιμής του καθέτου συντελεστή αναπήδησης, συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης και μια για το εύρος τιμών που λαμβάνει συναρτήσει της γωνίας αναπήδησης. Συνδέοντας τις δυο αυτές συσχετίσεις, μέσω διορθωτικών συντελεστών, με την απόκριση των σφαιρικών τεμαχών, είναι εφικτός ο προσδιορισμός των κινηματικών χαρακτηριστικών μετά την κρούση (ταχύτητα αποχωρισμού και γωνία αναπήδησης), και κατ' επέκταση, της τροχιάς του τεμάχους μετά την κρούση μέσω των κλασικών εξισώσεων κίνησης.

Στην συνέχεια, αξιοποιώντας της δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν με τριδιάστατη επεξεργασία της κίνησης, καταρτίστηκε μια μεθοδολογία προσδιορισμού του εύρους της εκτροπής, συναρτήσει της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης και της διαφοράς διεύθυνσης της τροχιάς με την φορά μεγίστης κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης. Στην συνέχεια ελέγχθηκε η εγκυρότητά της βάσει των δοκιμών πεδίου.

Γενικώς, οι προτεινόμενες συσχετίσεις είναι στατιστικά ικανοποιητικές και περιγράφουν συστηματικά τις συμπεριφορές που παρατηρήθηκαν στις αντίστοιχες δοκιμές που εκτελέστηκαν. Έτσι, είναι ικανές να αποτελέσουν ένα χρήσιμο εργαλείο για την καλύτερη εκτίμηση της τροχιάς και άρα τον ορθολογικότερο σχεδιασμό των μέτρων αντιμετώπισής έναντι των καταπτώσεων.

Κεφάλαιο 10

Συμπεράσματα - Προτάσεις

10.1 Ανακεφαλαίωση βασικών συμπερασμάτων

Ποιοτικά χαρακτηριστικά αναπήδησης

Εκκινώντας από την κρούση σε μια διάσταση, δηλαδή από την περίπτωση της ελεύθερης πτώσης τεμαχών βράχου, τα σημαντικότερα συμπεράσματα της παρούσας έρευνας έχουν ως εξής:

- Το μέγεθος της αναπήδησης σχετίζεται καλύτερα με τη σκληρότητα που προσδιορίζεται από τη σφύρα Schmidt. Γενικώς, η αναπήδηση είναι μεγαλύτερη σε σκληρότερα υλικά, ενώ όταν η κρούση γίνεται μεταξύ ανόμοιων υλικών τότε η σκληρότητα της επιφάνειας πρόσκρουσης έχει σημαντικότερη επίδραση από αυτήν του τεμάχους. Επίσης, μέσω της σκληρότητας της επιφάνειας πρόσκρουσης δύναται να ληφθεί υπόψη και η επίδραση της αποσάθρωσης
- Η αναπήδηση εξαρτάται από την ένταση της κρούσης, καθώς αυτή καθορίζει την έκταση των παραμορφώσεων και κατ' επέκταση την απώλεια ενέργειας. Έτσι, η αύξηση είτε της μάζας του τεμάχους είτε της ταχύτητας πρόσκρουσης οδηγούν στον περιορισμό της αναπήδησης
- Η ορμή, δηλαδή το γινόμενο της μάζας με την ταχύτητα πρόσκρουσης, περιγράφει ικανοποιητικά την επίδραση που έχει η σφοδρότητα της κρούσης στην αναπήδηση
- Η ύπαρξη εδαφικής επικάλυψης της βραχώδους επιφάνειας πρόσκρουσης προκαλεί περιορισμό της αναπήδησης, με το πάχος της στρώσης, τη σύσταση και την κατάσταση του υλικού επικάλυψης να καθορίζουν το μέγεθος της. Η αύξηση του πάχους της στρώσης περιορίζει την αναπήδηση. Σε ξηρή κατάσταση, η αναπήδηση είναι μικρότερη στα χονδρόκοκκα υλικά από ό,τι στα λεπτόκοκκα. Ωστόσο, αν πρόκειται για αργιλική στρώση, η αύξηση της περιεκτικότητας σε νερό έχει ως αποτέλεσμα το υλικό να γίνεται υδαρές, συνεπώς παραμορφώνεται περισσότερο, οπότε περιορίζεται η αναπήδηση

- Όταν το σχήμα του τεμάχους είναι σφαιρικό, η διαγραφόμενη τροχιά μετά την κρούση αποκλίνει ελάχιστα από την κατακόρυφο και το ύψος αναπήδησης είναι, εν γένει, επαναλήψιμο. Όμως, όταν το σχήμα του τεμάχους είναι γωνιώδες, η τροχιά του μετά την κρούση καθορίζεται από την γεωμετρία επαφής και μπορεί να έχει οποιαδήποτε γωνία σε σχέση με την κατακόρυφο. Ωστόσο, όταν η τροχιά της αναπήδησης είναι σχεδόν κατακόρυφη, τότε το μέγεθός της προσεγγίζει αυτό των σφαιρικών τεμαχών, ενώ στις υπόλοιπες περιπτώσεις είναι μικρότερο

Στην συνήθη περίπτωση, η τροχιά του τεμάχους πριν την κρούση σχηματίζει γωνία με την επιφάνεια πρόσκρουσης, καθιστώντας το πρόβλημα διδιάστατο.

- Η αναπήδηση εξακολουθεί να είναι μεγαλύτερη στα σκληρότερα υλικά, αλλά η διακύμανσή της καθορίζεται κυρίως από την γωνία πρόσκρουσης και το σχήμα του τεμάχους
- Στα σφαιρικά τεμάχη, το μέγεθος της αναπήδησης συνδέεται με την κάθετη συνιστώσα της ορμής ως προς την επιφάνεια πρόσκρουσης. Όπως και στην ελεύθερη πτώση, η αύξηση της ορμής πρόσκρουσης έχει ως αποτέλεσμα τον περιορισμό της αναπήδησης.
- Στα γωνιώδη τεμάχη, όσο μειώνεται η γωνία πρόσκρουσης αυξάνεται η διακύμανση των χαρακτηριστικών της τροχιάς μετά την κρούση, δηλαδή του μεγέθους της ταχύτητας και της γωνίας αναπήδησης
- Η τραχύτητα της επιφάνειας πρόσκρουσης έχει παρόμοια επίδραση στην διαγραφόμενη τροχιά με το σχήμα του τεμάχους
- Τόσο το σχήμα του τεμάχους όσο και η τραχύτητα της επιφάνειας πρόσκρουσης καθορίζουν την γεωμετρία επαφής. Συνεπώς, η μη κανονικότητα του σχήματος και της επιφάνειας πρόσκρουσης έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της διακύμανσης που έχει η διεύθυνση της τροχιάς μετά την κρούση. Έτσι, η γεωμετρία επαφής θεωρείται ως η σημαντικότερη αιτία που προκαλεί την τυχαιότητα της τροχιάς μετά την πρόσκρουση
- Η γωνιακή ταχύτητα του τεμάχους δεν φάνηκε να επηρεάζει την αναπήδηση, τουλάχιστον στην μακροσκοπική προσέγγιση που ακολουθήθηκε στην παρούσα έρευνα. Ωστόσο, εφόσον μελετηθεί διεξοδικά η επίδραση της γεωμετρίας επαφής, αναμένεται η επίδρασή της να είναι ευκρινής

Τέλος, εξετάζοντας την τροχιά στις τρεις διαστάσεις, προκύπτει ότι η εκτροπή του τεμάχους, από το κατακόρυφο επίπεδο κίνησης πριν την κρούση, μπορεί να έχει σημαντικό μέγεθος και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό. Το μέγεθος της εκτροπής καθορίζεται από το σχήμα του τεμάχους, την κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης και τον σχετικό προσανατολισμό μεταξύ της τροχιάς και της επιφάνειας πρόσκρουσης. Πιο συγκεκριμένα, η εκτροπή αυξάνεται:

- με την αύξηση της γωνιότητας του τεμάχους. Γενικώς, τα σφαιρικά τεμάχη εμφανίζουν αμελητέα εκτροπή και στα κυβικά τεμάχη το μέγεθός της είναι σημαντικό

- με την μείωση της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης
- με την αύξηση της διαφοράς διεύθυνσης μεταξύ της τροχιάς πριν την κρούση και την φορά μέγιστης κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης

Συντελεστές αναπήδησης

Η εκτίμηση της τροχιάς που θα διαγράψει ένα τέμαχος μετά την κρούση γίνεται με τους συντελεστές αναπήδησης, που περιγράφουν την μεταβολή των κινηματικών χαρακτηριστικών εξαιτίας της κρούσης.

Ο κάθετος (n_{COR}) και ο εφαπτομενικός (t_{COR}) συντελεστές αναπήδησης περιγράφουν το ποσοστό της ταχύτητας που διατηρείται μετά την κρούση, κατά την κάθετη και εφαπτομενική διεύθυνση σε σχέση με την επιφάνεια πρόσκρουσης και αποτελούν τον πιο διαδεδομένο ορισμό. Ωστόσο, συναντώνται ορισμοί των συντελεστών αναπήδησης που βασίζονται στο μέτρο της ταχύτητας (κινηματικός - v_{COR}) και στην μεταθετική ή την ολική κινητική ενέργεια (ενεργειακός - E_{COR} και ολικός ενεργειακός TE_{COR} αντίστοιχα). Αξιολογώντας του ορισμούς αυτούς, προέκυψαν τα εξής:

- ο κινηματικός συντελεστής αναπήδησης εμφανίζει την μικρότερη διακύμανση συγκριτικά με τους υπόλοιπους ορισμούς. Ωστόσο, δεν μπορεί να περιγράψει ικανοποιητικά την επίδραση της σφοδρότητας της κρούσης υπό γωνία (καθώς εξαρτάται από την κάθετη συνιστώσα της)
- ο ενεργειακός συντελεστής αναπήδησης έχει αντίστοιχη συμπεριφορά με τον κινηματικό, κάτι εύλογο αφού ισούται με την τετραγωνική του ρίζα. Έτσι, με την χρήση του ενεργειακού συντελεστή αναπήδησης δεν επιτυγχάνεται καλύτερη εκτίμηση – πρόβλεψη της διαγραφόμενης τροχιάς συγκριτικά με τον κινηματικό συντελεστή αναπήδησης
- ο ολικός ενεργειακός συντελεστής αναπήδησης εμφανίζει παρόμοιες τάσεις με τον ενεργειακό και τα μεγέθη τους διαφοροποιούνται ελάχιστα. Σε κάθε περίπτωση, συνεκτιμώντας την ενέργεια που οφείλεται στην γωνιακή ταχύτητα του τεμάχους, ο συντελεστής αναπήδησης προκύπτει ελαφρώς μεγαλύτερος. Έτσι, η συνεκτίμηση της γωνιακής ταχύτητας στους συντελεστές αναπήδησης δεν φαίνεται να προσφέρει κάποιο όφελος ως προς την ποιότητα πρόβλεψης της τροχιάς
- ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης, παρά την αυξημένη διακύμανση των τιμών που λαμβάνει, αποτελεί τον καλύτερο και συγχρόνως τον απλούστερο τρόπο για την προσομοίωση της κρούσης, καθώς στις τιμές που λαμβάνει αποτυπώνεται με συστηματικό τρόπο η επίδραση των κυριότερων παραμέτρων που επηρεάζουν την αναπήδηση
- ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης, που συνοδεύει τον κάθετο στην προσομοίωση της κρούσης, δεν εμφανίζει ευαισθησία σε καμία από τις παραμέτρους που εξε-

τάστηκαν, λαμβάνοντας στην συντριπτική πλειοψηφία των δοκιμών σταθερή τιμή με περιορισμένη διακύμανση

Γενικώς, η κρούση επηρεάζεται από πολλές παραμέτρους, οπότε η θεώρηση των συντελεστών αναπήδησης ως σταθερές υλικού αποτελεί ιδιαιτέρως απλουστευτική παραδοχή. Έτσι, η πρόταση χαρακτηριστικών τιμών και η επιλογή από αυτές για την προσομοίωση των καταπτώσεων, βάσει του τύπου του πετρώματος που αποτελεί συνήθη πρακτική, είναι προβληματική.

Επίδραση κλίμακας

Από την συγκριτική αξιολόγηση των δοκιμών που εκτελέστηκαν στο εργαστήριο και στο πεδίο προέκυψε πως τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της τροχιάς είναι παρόμοια, ανεξαρτήτως κλίμακας. Επίσης, ομοιάζουν οι τάσεις που περιγράφουν τους συντελεστές αναπήδησης και οι τιμές που λαμβάνουν. Περαιτέρω, αξιοποιώντας αποτελέσματα άλλων ερευνών, η κλίμακα των οποίων διαφέρει σημαντικά, παρατηρούνται παρόμοιες τάσεις και τιμές για τους συντελεστές αναπήδησης. Έτσι, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα συμπεράσματα και οι συσχετίσεις της εργαστηριακής διερεύνησης για την πρόβλεψη της τροχιάς σε περιστατικά μεγαλύτερης κλίμακας.

Εμπειρικές συσχετίσεις

Από την πειραματική διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα έρευνα, καταρτίστηκε μια εμπειρική σχέση για την εκτίμηση του καθέτου συντελεστή αναπήδησης, συναρτήσει της σκληρότητας των υλικών και της σφοδρότητας της κρούσης, που εκφράζεται μέσω της ταχύτητας πρόσκρουσης και της μάζας του τεμάχους. Η σχέση αυτή μπορεί να αξιοποιηθεί για την κατάρτιση χαρακτηριστικών τιμών του καθέτου συντελεστή αναπήδησης, όταν το τεμάχος είναι σφαιρικό και η κρούση γίνεται με ελεύθερη πτώση, εφόσον καθορίζεται σαφώς η σφοδρότητα της κρούσης.

Όταν η κρούση γίνεται υπό γωνία και το σχήμα του τεμάχους δεν είναι σφαιρικό, ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης εμφανίζει σημαντική διακύμανση που εξαρτάται από τον προσανατολισμό του τεμάχους κατά την επαφή. Έτσι, υπό παρόμοιες συνθήκες πρόσκρουσης, αλλά με διαφορετική γεωμετρία επαφής, είναι εφικτός ο προσδιορισμός τιμών από μηδέν έως και μεγαλύτερες της μονάδας. Για την εκτίμηση των τιμών αυτών, καταρτίστηκε μια σχέση για τον προσδιορισμό της μεγίστης τιμής του καθέτου συντελεστή αναπήδησης, συναρτήσει της γωνίας πρόσκρουσης και μια σχέση για τον προσδιορισμό του εύρους τιμών συναρτήσει της γωνίας αναπήδησης. Συνδέοντας τις δυο αυτές σχέσεις, μέσω διορθωτικών συντελεστών, με την απόκριση των σφαιρικών τεμαχών, καθίσταται εφικτή η εκτίμηση των κινηματικών χαρακτηριστικών του τεμάχους μετά την κρούση, και κατ' επέκταση της διαγραφόμενης τροχιάς του τεμάχους.

Επιπρόσθετα καταρτίστηκε μια μεθοδολογία προσδιορισμού του εύρους της εκτροπής, συναρτήσει της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης και της διαφοράς διεύθυνσης της τροχιάς με την φορά μεγίστης κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης.

Σχόλια για την μελέτη της αναπήδησης μέσω πειραματικών δοκιμών

Γενικώς, η εκτέλεση μιας δοκιμής αναπήδησης στο εργαστήριο είναι εύκολο να πραγματοποιηθεί, καθώς αρκεί η απελευθέρωση ενός τεμάχους σε μια βάση πρόσκρουσης. Πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα ώστε η βάση πρόσκρουσης να είναι επαρκώς στερεωμένη, για την αποφυγή πρόσθετης απώλειας ενέργειας από την μετακίνησή της εξαιτίας της κρούσης.

Ωστόσο, επειδή η κίνηση του τεμάχους (προσέγγιση – κρούση – απομάκρυνση) ολοκληρώνεται σε ιδιαιτέρως σύντομο χρονικό διάστημα, η καταγραφή πρέπει να γίνεται με φωτομηχανές ταχείας λήψεως. Έτσι, είναι γνωστές περισσότερες θέσεις του τεμάχους, αυξάνοντας την ακρίβεια ανακατασκευής της τροχιάς, προσδιορισμού των ταχυτήτων πρόσκρουσης και αναπήδησης και άρα των συντελεστών αναπήδησης.

Η αναγνώριση του τεμάχους και άρα ο εντοπισμός της θέσης του μέσω τεχνικών μηχανικής όρασης αυξάνει δραστικά την ακρίβεια και περιορίζει τον απαιτούμενο χρόνο επεξεργασίας, συγκριτικά με τον χειροκίνητο εντοπισμό του τεμάχους. Η ενσωμάτωση τεχνικών μηχανικής όρασης στην επεξεργασία της τροχιάς για εφαρμογές καταπτώσεων βράχων συνιστά καινοτόμο συνεισφορά της παρούσας έρευνας στην πειραματική διερεύνηση των καταπτώσεων.

Το βασικό πλεονέκτημα με την αυτοματοποιημένη αναγνώριση του τεμάχους είναι η δυνατότητα εκτέλεσης μεγάλου πλήθους δοκιμών, που είναι απαραίτητη για την μελέτη ενός φαινομένου με τόσο μεγάλη τυχαιότητα.

Με την ενσωμάτωση στερεο-φωτογραμμετρικών μεθόδων είναι εφικτή η ανακατασκευή της τροχιάς στον χώρο. Έτσι, μπορεί να προσδιορισθεί η εκτροπή του τεμάχους εξαιτίας της κρούσης, που σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας είναι, υπό συνθήκες, σημαντική. Περαιτέρω, με την ανακατασκευή του τεμάχους στον χώρο, είναι δυνατός ο πλήρης προσδιορισμός της περιστροφικής συνιστώσας της κίνησης στις τρεις διαστάσεις. Αν και στο πρόσφατο παρελθόν έχει παρουσιασθεί ανακατασκευή της τροχιάς στον χώρο μέσω αντίστοιχων μεθόδων, η ανακατασκευή του σχήματος του τεμάχους επιτεύχθηκε για πρώτη φορά στην παρούσα έρευνα.

Οι τεχνικές καταγραφής και επεξεργασίας που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο της έρευνας αυτής, μπορούν να εφαρμοσθούν στο εργαστήριο και στο πεδίο, με ελάχιστες τροποποιήσεις, για την καταγραφή τεμαχών οποιουδήποτε σχήματος. Ωστόσο, βαρύνουσα σημασία για την επιτυχή εφαρμογή των τεχνικών αυτών, έχει η σωστή σήμανση των τεμαχών και ο έλεγχος του φωτισμού, ώστε να μπορεί ο αλγόριθμος να αναγνωρίσει σωστά την θέση του τεμάχους.

Το σημαντικότερο στοιχείο για την εξέλιξη της έρευνας των καταπτώσεων μέσω πειραματικών διερεύνσεων, είναι η προδιαγραφή των ελάχιστων δεδομένων – αποτελεσμάτων που πρέπει να αναφέρονται. Όπως σχολιάσθηκε εκτενώς στην παρούσα έρευνα, η αναπήδηση

εξαρτάται από πληθώρα παραμέτρων. Συνεπώς για να είναι δυνατή η σύγκριση μεταξύ ερευνητών και η επιλογή χαρακτηριστικών τιμών των συντελεστών αναπήδησης θα πρέπει να περιγράφονται με σαφήνεια οι αρχικές συνθήκες κάθε πειράματος, αντί να παρατίθεται απλώς η τιμή του συντελεστή αναπήδησης. Έτσι, απαραίτητο είναι να αναφέρονται τα εξής:

- για το πίπτον τέμαχος:
 - ο τύπος του πετρώματος και η σκληρότητα κατά τη σφύρα Schmidt
 - το σχήμα, το μέγεθος και η μάζα του
- για την επιφάνεια πρόσκρουσης:
 - ο τύπος του πετρώματος και η σκληρότητα κατά τη σφύρα Schmidt
 - η κλίση
 - η τραχύτητα – κυματισμός
- για τα χαρακτηριστικά της κίνησης:
 - το μέτρο της ταχύτητας και η γωνία πριν και μετά την πρόσκρουση
 - η γωνιακή ταχύτητα, εφόσον έχει προσδιορισθεί
 - η διαφορά διεύθυνσης και η εκτροπή

Τέλος, για τους συντελεστές αναπήδησης θα πρέπει να γίνεται σαφής αναφορά του ορισμού με τον οποίο έχουν προσδιορισθεί και να παρουσιάζονται επίσης οι ελάχιστες και μέγιστες τιμές τους.

Εφόσον τα αποτελέσματα των δοκιμών, πεδίου ή εργαστηρίου, παρουσιάζονται όπως προδιαγράφεται παραπάνω, η πειραματική διαδικασία θα είναι αρκούντως τυποποιημένη, υπό την έννοια ότι θα υπάρχουν κοινά σημεία αναφοράς μεταξύ διαφορετικών διερευνήσεων.

Στο πλαίσιο αυτό, η δημιουργία βάσης δεδομένων συντελεστών αναπήδησης δύναται να αποτελέσει χρήσιμο εργαλείο για την επιλογή χαρακτηριστικών τιμών, αναλόγως των εκάστοτε συνθηκών. Το εκτενές παράρτημα που συνοδεύει την παρούσα έρευνα σκοπεύει στο να αποτελέσει την απαρχή μιας τέτοιας βάσης δεδομένων.

10.2 Πρωτότυπη συμβολή

Η διδακτορική διατριβή πραγματεύεται ένα φαινόμενο που έχει αποτελέσει αντικείμενο έρευνας για αρκετούς ερευνητές στο παρελθόν, οι οποίοι κατέδειξαν τους μηχανισμούς που διέπουν το πρόβλημα και κατήρτισαν μεθόδους για την πρόβλεψη της τροχιάς. Ωστόσο, το φαινόμενο έχει σημαντική αβεβαιότητα και οι μέχρι τώρα προσεγγίσεις έχουν βασισθεί σε περιορισμένο αριθμό πειραματικών αποτελεσμάτων και στην εμπειρία, με αποτέλεσμα ο τρόπος αντιμετώπισης να είναι ιδιαίτερα απλουστευμένος, σημαντικές παράμετροι που επιδρούν να

μην λαμβάνονται υπόψη και συχνά να υπάρχουν αντικρουόμενες απόψεις και συμπεράσματα για τον τρόπο που επιδρούν. Η πρωτότυπη συμβολή της παρούσας έρευνας έγκειται στα εξής:

- στην ανάπτυξη πειραματικών διατάξεων, συνεπικουρούμενες από μεθόδους καταγραφής και επεξεργασίας της τροχιάς, που προσδίδουν σημαντικά αυξημένα ακρίβεια και απαιτούν λιγότερο χρόνο σε σχέση με τις υφιστάμενες μεθοδολογίες. Έτσι, καθίσταται δυνατή η εις βάθος μελέτη της αναπήδησης των βραχοτεμαχών
- στην εκτέλεση σημαντικού πλήθους δοκιμών υπό διαφορετικές συνθήκες, επιτρέποντας τον καθορισμό των κρίσιμων παραμέτρων που επιδρούν στην αναπήδηση
- στην παραγωγή πρωτογενών δεδομένων αναφορικά με την απόκριση του τεμάχους στην αναπήδηση, που είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν για την βαθμονόμηση λογισμικών καταπτώσεων και να αποτελέσουν την απαρχή μιας βάσης δεδομένων συντελεστών αναπήδησης
- στην κατάρτιση εμπειρικών συσχετίσεων για την εκτίμηση των συντελεστών αναπήδησης, της διακύμανσής τους καθώς και της εκτροπής που έχει η τροχιά εξαιτίας της κρούσης.

10.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Η επέκταση της έρευνας επί του αντικειμένου δύναται να προσανατολισθεί προς δύο κατευθύνσεις, αφενός στην συμπλήρωση της παρούσας έρευνας και αφετέρου στη επεξεργασία των αποτελεσμάτων με διαφορετικές προσεγγίσεις.

Απαραίτητη συμπλήρωση είναι η εξέταση τεμαχών μη κανονικού και τυχαίου σχήματος, που άλλωστε συναντώνται στις πραγματικές καταστάσεις. Επίσης, απαραίτητη κρίνεται η διενέργεια δοκιμών σε μεγαλύτερη κλίμακα, που θα προσεγγίζει την πραγματική, ώστε να είναι εφικτή η γενίκευση των συμπερασμάτων της παρούσας έρευνας.

Η εξέταση των παραπάνω θα είναι σαφώς ευχερέστερη στο προσεχές μέλλον, με την αξιοποίηση τεχνολογιών αιχμής στην καταγραφή της κίνησης. Το σχήμα του τεμάχους αντικατοπτρίζεται στην τροχιά, κυρίως μέσω της τυχειότητας της κίνησης, που αποδίδεται στην διαφοροποίηση της γεωμετρίας επαφής μεταξύ των επαναλήψεων. Έτσι, ο προσδιορισμός της γεωμετρίας επαφής καθίσταται σημαντικός, ωστόσο απαιτεί την χρήση φωτομηχανών με μεγάλη ταχύτητα λήψης, ώστε να καταγραφεί η εξέλιξη της κίνησης κατά την επαφή. Συγχρόνως απαιτείται υψηλή ανάλυση καταγραφής για την επίτευξη ικανοποιητικής ακρίβειας. Πλέον, είναι διαθέσιμες φωτομηχανές υψηλής ευκρίνειας (FullHD) με ταχύτητα καταγραφής 2000fps, που αυξάνεται μειούμενης της ανάλυσης. Με μια τέτοια φωτομηχανή είναι δυνατή η απόκτηση πληροφορίας αναφορικά με τις πολύπλοκες διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά την ιδιαιτέρως βραχεία διάρκεια της επαφής.

Για την εκτέλεση δοκιμών στο πεδίο, προσφέρεται η αξιοποίηση μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων (UAVs – Unmanned Aerial Vehicles), γνωστά ως drones. Εφόσον είναι εφικτή

η εγκατάσταση δυο βαθμονομημένων φωτομηχανών, υψηλής ταχύτητας και ευκρίνειας, τότε η πραγματοποίηση δοκιμών σε φυσική κλίμακα γίνεται ιδιαιτέρως εύκολη. Έτσι, δεν υπεισέρχεται στο πείραμα καμία παραδοχή ή απλοποίηση εξαιτίας διαδικαστικών ζητημάτων εκτέλεσης των δοκιμών, αποδίδοντας την πραγματική κατάσταση. Η εξέλιξη της τεχνολογίας των drones και των φωτομηχανών είναι τόσο ραγδαία, ώστε τούτο θα είναι συντόμως πραγματοποιήσιμο.

Περαιτέρω, πρόσφορο αντικείμενο για την επέκταση της έρευνας αποτελεί η πειραματική διερεύνηση σε επιφάνειες πρόσκρουσης καλυμμένες με εδαφικό υλικό και ειδικότερα αργιλικό, καθώς δεν υπάρχουν ικανοποιητικά στοιχεία την σχετική βιβλιογραφία. Η ποιοτική διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας καταδεικνύει συστηματικές τάσεις που δύνανται να ποσοτικοποιηθούν.

Όσον αφορά στην προσομοίωση των καταπτώσεων και στην επιλογή ορθολογικών τιμών για τους συντελεστές αναπήδησης, είναι δυνατή η σύνταξη κώδικα που θα βασίζεται σε νευρωνικά δίκτυα και μεθόδους τεχνητής νοημοσύνης, αξιοποιώντας τα πρωτογενή δεδομένα της παρούσας έρευνας. Τα νευρωνικά δίκτυα είναι αφηρημένα μαθηματικά κατασκευάσματα που χρησιμοποιούνται για την επίλυση ιδιαίτερα πολύπλοκων μαθηματικών προβλημάτων. Το κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η ικανότητα μάθησης που επιτυγχάνεται μέσω επαναληπτικής προσέγγισης του εκάστοτε προβλήματος. Έτσι, το σημαντικό πλήθος δεδομένων από την παρούσα έρευνα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκπαίδευση του αλγορίθμου. Οι αρχικές συνθήκες των δοκιμών καθορίζουν τους νευρώνες εισόδου και τροφοδοτούν τους υπολογιστικούς νευρώνες που εκπαιδεύονται ώστε να υπάρξει ταύτιση της πληροφορίας των νευρώνων εξόδου με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα.

Επίσης, μια πιο αυστηρή προσέγγιση του ζητήματος μπορεί να επιτευχθεί μέσω της μεθόδου διακριτών στοιχείων. Στη μέθοδο αυτή, η γεωμετρία του προβλήματος διακριτοποιείται μέσω μικροσκοπικών σφαιριδίων και η μηχανική απόκριση του συστήματος καθορίζεται από τις δυνάμεις βαρύτητας τριβής, επαφής και συνοχής μεταξύ των σφαιριδίων, μέσω κατάλληλα βαθμονομημένων καταστατικών νόμων. Τα δεδομένα της παρούσας έρευνας είναι ικανά να χρησιμοποιηθούν για την βαθμονόμηση των καταστατικών αυτών νόμων, επιτρέποντας έτσι την προσομοίωση συνθέτων σχημάτων και επιφανειών πρόσκρουσης. Το υπολογιστικό βήμα είναι χρονικά εξαρτώμενο και καθορίζεται από τον χρήστη, συνεπώς δύναται να μελετηθεί και η απόκριση του τεμάχους κατά την σύντομη διάρκεια της επαφής. Ωστόσο μια τέτοια προσέγγιση είναι αμιγώς αιτιοκρατική και αντιμετωπίζει το πρόβλημα σε μικροσκοπική κλίμακα, συνεπώς ενδεχομένως να είναι υπερβολή η περιγραφή με τον τρόπο αυτό ενός πρακτικού προβλήματος με πολλές και ευμετάβλητες παραμέτρους.

Τέλος, δύναται να αξιοποιηθούν οι μέθοδοι καταγραφής και επεξεργασίας της εικόνας ως μετρητικές διατάξεις στις συνήθεις δοκιμές γεωτεχνικής μηχανικής. Η ραγδαία ανάπτυξη των τεχνικών μηχανικής όρασης και των φωτομηχανών, επιτρέπει την απόκτηση πληροφορίας ολοένα και καλύτερης ποιότητας και ακρίβειας. Βασικό πλεονέκτημα είναι το περιορισμένο κόστος μιας τέτοιας μετρητικής διάταξης συγκριτικά με τις υφιστάμενες διατάξεις. Επίσης, η

πληροφορία αφορά το σύνολο του δοκιμίου αντί της μεταβολής μήκους σε κάποια προκαθορισμένη διεύθυνση. Γενικώς, η έρευνα στον κλάδο αυτό βρίσκεται ήδη σε εξέλιξη και πιθανολογείται πως η αντικατάσταση του εξοπλισμού μέτρησης είναι θέμα ολίγων ετών.

Πρόδρομες Δημοσιεύσεις

Οι δημοσιεύσεις του ερευνητικού έργου που βασίζονται στην παρούσα έρευνα συνοψίζονται ακολούθως (επισημαίνεται ότι στο κυρίως κείμενο της διδακτορικής διατριβής δεν γίνεται αναφορά σε αυτές):

- 1 Στο διεθνές περιοδικό International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences το **2012** δημοσιεύτηκε το άρθρο: «Geotechnical and kinematic parameters affecting the coefficients of restitution for rock fall analysis» [v.54, p.103-113]. Η δημοσίευση αυτή έχει τύχει ευρείας αποδοχής από την επιστημονική κοινότητα, συγκεντρώνοντας μέχρι σήμερα αρκετές ετεροαναφορές (Scopus:21 & Google Scholar:42) και βραβεύθηκε με το Θωμαΐδειο βραβείο ΕΜΠ του έτους 2012.
- 2 Στο 13^ο Διεθνές Συνέδριο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας στα Χανιά τον Σεπτέμβριο του **2013**, παρουσιάσθηκε η εργασία: «Rockfalls: Influence of Rock Hardness on the Trajectory of Falling Rock Blocks» [Bulletin of the Geological Society of Greece XLVII, v.3, p.1684-1693].
- 3 Στο διεθνές συμπόσιο EUROCK 2013 της Διεθνούς Ένωσης Βραχομηχανικής ISRM, που πραγματοποιήθηκε στο Βρότσλαβ της Πολωνίας (Σεπτέμβριος **2013**), παρουσιάσθηκε η εργασία: «Rockfall: Scaling Factors for the Coefficient of Restitution» [Proceedings of EUROCK2013, p.195-200]. Η εργασία αυτή βραβεύθηκε από την ISRM ως η δεύτερη καλύτερη συνεισφορά νέου επιστήμονα καθώς και με το Θωμαΐδειο βραβείο ΕΜΠ του έτους 2013.
- 4 Στο Ευρωπαϊκό συνέδριο νέων Γεωτεχνικών Μηχανικών της Διεθνούς Ένωσης Εδαφομηχανικής και Γεωτεχνικής Μηχανικής (ISSMGE) που έγινε στην Βαρκελώνη της Ισπανίας τον Σεπτέμβριο του **2014**, παρουσιάσθηκε η εργασία: «Rockfall Experimental Investigation in the 3D space», εκπροσωπώντας την χώρα μας, μετά από διαγωνισμό που έγινε για την επιλογή του καλύτερου άρθρου μεταξύ των νέων Ελλήνων γεωτεχνικών μηχανικών.
- 5-6 Στο 12^ο Διεθνές συνέδριο της Διεθνούς Ένωσης Τεχνικής Γεωλογίας (IAEG) στο Τορίνο της Ιταλίας τον Σεπτέμβριο του **2014**, παρουσιάσθηκαν οι εργασίες: «Rockfalls: Experimental Investigation of the Effect of Surface Weathering on the Coefficients of Restitution» [v.2.

p.2041-2044] και «Effect of Forest Presence on Rockfall Trajectory. An Example from Greece» [v.2, p.1899-1903].

- 7-9** Στο 7^ο Πανελλήνιο συνέδριο της Ελληνικής Επιστημονικής Εταιρείας Εδαφομηχανικής και Γεωτεχνικής Μηχανικής στην Αθήνα τον Νοέμβριο του **2014**, παρουσιάστηκαν οι εργασίες: «Θεωρητική και Πειραματική Διερεύνηση των Συντελεστών Αναπήδησης στις Καταπτώσεις Βράχων», «Διερεύνηση της Επίδρασης του Σχήματος Τεμαχών στις Καταπτώσεις Βράχων» και «Εκτίμηση Επικινδυνότητας έναντι Καταπτώσεων Βράχων μέσω Τριδιάστατης Ανάλυσης». Επίσης, στο πλαίσιο του συνεδρίου έγινε ειδική συνεδρία για το θέμα των βραχοπτώσεων, όπου τα σημαντικότερα συμπεράσματα της παρούσας έρευνας παρουσιάσθηκαν σε προσκεκλημένη ομιλία.
- 10** Τέλος, τον Μάρτιο του **2016** δημοσιεύτηκε στο διεθνές περιοδικό Rock Mechanics and Rock Engineering η εργασία «Empirical model for predicting rockfall trajectory direction» [v.49, p.927-941].

Βιβλιογραφία

- Agliardi, F and GB Crosta (2003). “High resolution three-dimensional numerical modelling of rockfalls”. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 40.4, pp. 455–471.
- Agliardi, F, GB Crosta, and P Frattini (2009). “Integrating rockfall risk assessment and countermeasure design by 3D modelling techniques”. In: *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9.4, pp. 1059–1073.
- Ambraseys, NN and JA Jackson (1990). “Seismicity and associated strain of central Greece between 1890 and 1988”. In: *Geophysical Journal International* 101.3, pp. 663–708.
- Andrew, R, H Hume, R Bartingale, A Rock, and R Zhang (2012). *CRSP-3D user’s manual—Colorado Rockfall Simulation Program*.
- Ansari, MK, M Ahmad, R Singh, and TN Singh (2014). “Rockfall hazard assessment at Ajanta Cave, Aurangabad, Maharashtra, India”. In: *Arabian Journal of Geosciences* 7.5, pp. 1773–1780.
- (2015). “Correlation between Schmidt hardness and coefficient of restitution of rocks”. In: *Journal of African Earth Sciences* 104, pp. 1–5.
- Antoniou, AA and E Lekkas (2010). “Rockfall susceptibility map for Athinios port, Santorini island, Greece”. In: *Geomorphology* 118.1, pp. 152–166.
- Aryaei, A, K Hashemnia, and K Jafarpur (2010). “Experimental and numerical study of ball size effect on restitution coefficient in low velocity impacts”. In: *International Journal of Impact Engineering* 37.10, pp. 1037–1044.
- Aydin, A (2008). “ISRM suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: revised version”. In: *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014*. Springer, pp. 25–33.
- Aydin, A and A Basu (2005). “The Schmidt hammer in rock material characterization”. In: *Engineering Geology* 81.1, pp. 1–14.
- Azzoni, A and MH De Freitas (1995). “Experimentally gained parameters, decisive for rock fall analysis”. In: *Rock Mechanics and Rock Engineering* 28.2, pp. 111–124.
- Azzoni, A, G La Barbera, and A Zaninetti (1995). “Analysis and prediction of rockfalls using a mathematical model”. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 32.7, pp. 709–724.

- Azzoni, A, PP Rossi, E Drigo, GP Giani, and A Zaninetti (1992). *In situ observation of rockfall analysis parameters*. Istituto sperimentale modelli e strutture.
- Barton, N (1973). "Review of a new shear-strength criterion for rock joints". In: *Engineering Geology* 7.4, pp. 287–332.
- Barton, N et al. (1978). "Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses". In: *ISRM, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 15.6.
- Bieniawski, ZT and MJ Bernede (1979). "Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials: Part 1. Suggested method for determining deformability of rock materials in uniaxial compression". In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 16.2, pp. 138–140.
- Bieniawski, ZT and I Hawkes (1978). "Suggested methods for determining tensile strength of rock materials". In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 15.3, pp. 99–103.
- Bouguet, JY (2004). *Camera calibration toolbox for matlab*. Tech. rep. www.vision.caltech.edu.
- Bourrier, F, L Dorren, F Nicot, F Berger, and F Darve (2009). "Toward objective rockfall trajectory simulation using a stochastic impact model". In: *Geomorphology* 110.3, pp. 68–79.
- Bourrier, F and O Hungr (2011). "Rockfall dynamics: a critical review of collision and rebound models". In: *Rockfall Engineering*, pp. 175–209.
- Bozzolo, D and R Pamini (1986). "Simulation of rock falls down a valley side". In: *Acta Mechanica* 63.1-4, pp. 113–130.
- Bozzolo, D, R Pamini, and K Hutter (1988). "Rockfall analysis—a mathematical model and its test with field data". In: *Proc. 5th Int. Symposium on Landslides, Lausanne, Switzerland*. Vol. 1, pp. 555–563.
- Broili, L (1977). "Relations between scree slope morphometry and dynamics of accumulation processes". In: *Meeting on Rockfall dynamics and protective works effectiveness*, pp. 11–23.
- Brown, DC (1966). "Decentering distortion of lenses". In: *Photometric Engineering* 32.3, pp. 444–462.
- Buckingham, E (1914). "On physically similar systems; illustrations of the use of dimensional equations". In: *Physical Review* 4.4, p. 345.
- Budetta, P and A Santo (1994). "Morphostructural evolution and related kinematics of rockfalls in Campania (southern Italy): A case study". In: *Engineering Geology* 36.3, pp. 197–210.
- Buzzi, O, A Giacomini, and M Spadari (2012). "Laboratory investigation on high values of restitution coefficients". In: *Rock Mechanics and Rock Engineering* 45.1, pp. 35–43.
- Cagnoli, B and M Manga (2003). "Pumice-pumice collisions and the effect of the impact angle". In: *Geophysical research letters* 30.12.
- Camponuovo, G (1977). "ISMES experience on the model of St. Martino". In: *Meeting on Rockfall dynamics and protective works effectiveness*, pp. 25–38.
- Canny, J (1986). "A computational approach to edge detection". In: *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* 6, pp. 679–698.

- Challis, JH (1995). "A procedure for determining rigid body transformation parameters". In: *Journal of Biomechanics* 28.6, pp. 733–737.
- Chau, KT, RHC Wong, and CF Lee (1998). "Rockfall problems in Hong Kong and some new experimental results for coefficients of restitution". In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 35.4, pp. 662–663.
- Chau, KT, RHC Wong, and JJ Wu (2002). "Coefficient of restitution and rotational motions of rockfall impacts". In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 39.1, pp. 69–77.
- Chau, KT, RHC Wong, J Liu, JJ Wu, CF Lee, et al. (1999). "Shape effects on the coefficient of restitution during rockfall impacts". In: *9th ISRM Congress*. International Society for Rock Mechanics.
- Chen, H, RH Chen, and TH Huang (1994). "An application of an analytical model to a slope subject to rockfalls". In: *Bulletin of the Association of Engineering Geologists* 31.4, pp. 447–458.
- Christaras, B, G Papathanassiou, K Vouvalidis, and S Pavlides (2010). "Preliminary results regarding the rock falls of December 17, 2009 at Tempi, Greece". In: *12th International Congress of the Geological Society of Greece*, pp. 1120–1130.
- Coe, JA and EL Harp (2007). "Influence of tectonic folding on rockfall susceptibility, American Fork Canyon, Utah, USA". In: *Natural Hazards and Earth System Science* 7.1, pp. 1–14.
- Crosta, GB and F Agliardi (2004). "Parametric evaluation of 3D dispersion of rockfall trajectories". In: *Natural Hazards and Earth System Science* 4.4, pp. 583–598.
- Descoedres, F, TH Zimmermann, et al. (1987). "Three-dimensional dynamic calculation of rockfalls". In: *6th ISRM Congress*. International Society for Rock Mechanics.
- Dorren, LKA (2015). *Rockyfor3D (v5.2) revealed - Transparent description of the complete 3D rockfall model*. Tech. rep. www.ecorisq.org.
- Dorren, LKA, F Berger, C le Hir, E Mermin, and P Tardif (2005). "Mechanisms, effects and management implications of rockfall in forests". In: *Forest Ecology and Management* 215.1, pp. 183–195.
- Dorren, LKA, F Berger, and US Putters (2006). "Real-size experiments and 3-D simulation of rockfall on forested and non-forested slopes". In: *Natural Hazards and Earth System Science* 6.1, pp. 145–153.
- Dudt, JP and B Heidenreich (2001). "Treatment of the uncertainty in a three-dimensional numerical simulation model for rock falls". In: *International Conference on Landslides: Causes, Impacts and Countermeasures*, pp. 507–514.
- Durda, DD, N Movshovitz, DC Richardson, E Asphaug, A Morgan, AR Rawlings, and C Vest (2011). "Experimental determination of the coefficient of restitution for meter-scale granite spheres". In: *Icarus* 211.1, pp. 849–855.
- ETAG, EOTA (2008). "27, Guideline for European technical approval of falling rock protection kits". In: *European Organisation of Technical Assessment*.

- Evans, SG and O Hungr (1993). "The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes". In: *Canadian Geotechnical Journal* 30.4, pp. 620–636.
- Fairhurst, CE and JA Hudson (1999). "Draft ISRM suggested method for the complete stress-strain curve for intact rock in uniaxial compression". In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 36.3, pp. 279–289.
- Ferrari, F, GP Giani, and T Apuani (2013). "Why can rockfall normal restitution coefficient be higher than one". In: *Rendiconti Online Societa Geologica Italiana* 24, pp. 122–124.
- Fitzgibbon, A, M Pilu, and RB Fisher (1999). "Direct least square fitting of ellipses". In: *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* 21.5, pp. 476–480.
- Fornaro, M, M Nebbia, and D Peila (1990). "Block falls on rock slopes. Application of a numerical simulation program to some real cases". In: *Proceedings of 6th international IAEG congress*. BALKEMA.
- Franklin, JA (1985). "Suggested method for determining point load strength". In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. Vol. 22. 2, pp. 51–60.
- Giacchetti, G and A Grimod (2015). "Rockfall Mitigation Using Simple Drapery System: Design Approach". In: *Engineering Geology for Society and Territory-Volume 2*. Springer, pp. 1881–1884.
- Giacomini, A, O Buzzi, B Renard, and GP Giani (2009). "Experimental studies on fragmentation of rock falls on impact with rock surfaces". In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 46.4, pp. 708–715.
- Giacomini, A, K Thoeni, C Lambert, S Booth, and SW Sloan (2012). "Experimental study on rockfall drapery systems for open pit highwalls". In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 56, pp. 171–181.
- Giani, GP (1992). *Rock slope stability analysis*. CRC Press.
- Giani, GP, A Giacomini, M Migliazza, and A Segalini (2004). "Experimental and theoretical studies to improve rock fall analysis and protection work design". In: *Rock Mechanics and Rock Engineering* 37.5, pp. 369–389.
- Goldsmith, W (1960). *Impact: The theory and physical behavior of colliding solids*. Arnold.
- Gorham, DA and AD Salman (2005). "The failure of spherical particles under impact". In: *Wear* 258.1, pp. 580–587.
- Guzzetti, F, G Crosta, R Detti, and F Agliardi (2002). "STONE: a computer program for the three-dimensional simulation of rock-falls". In: *Computers & Geosciences* 28.9, pp. 1079–1093.
- Guzzetti, F, P Reichenbach, and GF Wieczorek (2003). "Rockfall hazard and risk assessment in the Yosemite Valley, California, USA". In: *Natural Hazards and Earth System Science* 3.6, pp. 491–503.
- Habib, P (1977). "Note sur le rebondissement des blocs rocheux". In: *Rockfall dynamics and protective works effectiveness, ISMES publication* 90, pp. 123–125.

- Heidenreich, B (2004). “Small-and half-scale experimental studies of rockfall impacts on sandy slopes”. PhD thesis. EPFL.
- Hobbs, DW (1964). “The tensile strength of rocks”. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. Vol. 1. 3. Elsevier, pp. 385–396.
- Hoek, E (1987). “Rockfall: a program in basic for the analysis of rockfalls from slopes”. In: *Department of Civil Engineering, University of Toronto, Toronto*.
- Hoek, E and JD Bray (1981). *Rock slope engineering*. CRC Press.
- Hsu, KJ (2004). *Physics of sedimentology*. Berlin, Springer.
- Hudson, JA (1989). *Rock mechanics principles in engineering practice*.
- Hungr, O and SG Evans (1988). “Engineering evaluation of fragmental rockfall hazards”. In: *5th International symposium on landslides*. Vol. 1, pp. 685–690.
- Imre, B, S Räsänen, and SM Springman (2008). “A coefficient of restitution of rock materials”. In: *Computers & Geosciences* 34.4, pp. 339–350.
- Jaboyedoff, M, JP Dudt, and V Labiouse (2005). “An attempt to refine rockfall hazard zoning based on the kinetic energy, frequency and fragmentation degree”. In: *Natural Hazards and Earth System Science* 5.5, pp. 621–632.
- Johnson, KL (1985). *Contact Mechanics*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Jones, CL, JD Higgins, and RD Andrew (2000). *Colorado Rockfall Simulation Program: Version 4.0 (for Windows)*.
- Kamijo, A, S Onda, H Masuya, and Y Tanaka (2000). “Fundamental test on restitution coefficient and frictional coefficient of rock fall”. In: *5th Symposium on Impact Problems in Civil Engineering*, pp. 83–86.
- Kawahara, S and T Muro (1999). “Effect of soil slope gradient on motion of rockfall”. In: *International Symposium on Slope Stability Engineering*. Vol. 2, pp. 1343–1348.
- Kobayashi, Y, EL Harp, and T Kagawa (1990). “Simulation of rockfalls triggered by earthquakes”. In: *Rock Mechanics and Rock Engineering* 23.1, pp. 1–20.
- Koukis, G, G Tsiambaos, and N Sabatakakis (1994). “Slope movements in the Greek territory: A statistical approach”. In: *Proceedings of 7th international IAEG congress, Balkema, Rotterdam*, pp. 4621–4628.
- Labiouse, V and F Descoeurdes (1999). “Possibilities and difficulties in predicting rockfall trajectories”. In: *Proceeding of the Joint Japan-Swiss Scientific Seminar on Impact Load by Rockfalls and Design of protection Structures, Kanazawa, Japan*. Vol. 47.
- Labiouse, V and B Heidenreich (2009). “Half-scale experimental study of rockfall impacts on sandy slopes”. In: *Natural Hazards and Earth System Science* 9.6, pp. 1981–1993.
- Lambert, S and F Nicot (2013). *Rockfall Engineering*. John Wiley & Sons.
- Lambert, S, F Nicot, and P Gotteland (2015). “Kinematic response of an impacted rockfall protection embankment”. In: *Engineering Geology for Society and Territory-Volume 2*. Springer, pp. 1855–1858.

- Lan, H, DC Martin, and CH Lim (2007). "RockFall analyst: a GIS extension for three-dimensional and spatially distributed rockfall hazard modeling". In: *Computers & Geosciences* 33.2, pp. 262–279.
- Langhaar, HL (1951). *Dimensional analysis and theory of models*. Vol. 2. Wiley New York.
- Lee, K and G Elliott (1998). "Rockfall: Application of Computer Simulation to Design of Preventive Measures". In: *Planning, Design and Implementation of Debris Flow and Rockfall Hazards Mitigation Measures, Association of Geo-Technical Specialists & Hong Kong Institution of Engineers, Hong Kong*.
- Lied, K (1977). "Rockfall problems in Norway". In: *ISMES Publication* 90, pp. 51–53.
- Massey J, Frank J (1951). "The Kolmogorov-Smirnov test for goodness of fit". In: *Journal of the American Statistical Association* 46.253, pp. 68–78.
- Massey, CI, MJ MacSaveney, and L Richards (2015). "Characteristics of Some Rockfalls Triggered by the 2010/2011 Canterbury Earthquake Sequence, New Zealand". In: *Engineering Geology for Society and Territory-Volume 2*. Springer, pp. 1943–1948.
- McCarroll, D (1991). "The Schmidt hammer, weathering and rock surface roughness". In: *Earth Surface Processes and Landforms* 16.5, pp. 477–480.
- Muhunthan, B, S Shu, N Sasiharan, OA Hattamleh, TC Badger, SM Lowell, and JD Duffy (2005). *Analysis and design of wire mesh/cable net slope protection*. Washington State Department of Transportation.
- Murata, S and H Shibuya (1997). "Measurement of impact loads on the rockfall prevention walls and speed of falling rocks using a middle size slope model". In: *2nd Asia-Pacific Conference on Shock & Impact Loads on Structures*, pp. 383–393.
- Papadopoulos, GA, G Drakatos, D Papanastassiou, I Kalogeras, and G Stavrakakis (2000). "Preliminary results about the catastrophic earthquake of 7 September 1999 in Athens, Greece". In: *Seismological Research Letters* 71.3, pp. 318–329.
- Papadopoulos, Z and P Marinos (1992). "On the anisotropy of the Athenian schist and its relation to weathering". In: *Bulletin of the International Association of Engineering Geology* 45.1, pp. 111–116.
- Papathanassiou, G, V Marinos, D Vogiatzis, and S Valkaniotis (2013). "A rock fall analysis study in Parnassos area, Central Greece". In: *Landslide Science and Practice*. Springer, pp. 67–72.
- Paronuzzi, P (2009). "Field evidence and kinematical back-analysis of block rebounds: the lavone rockfall, Northern Italy". In: *Rock Mechanics and Rock Engineering* 42.5, pp. 783–813.
- Paronuzzi, P and E Artini (1999). "Un nuovo programma in ambiente Windows per la modellazione della caduta massi". In: *Geologia Tecnica e Ambientale* 1.99, pp. 13–24.
- Peng, B (2000). "Rockfall trajectory analysis: Parameter determination and application". In: Petje, U, M Ribičič, and M Mikoš (2005). "Computer Simulation of Stone Falls and Rockfalls". In: *Geografski Zbornik/Acta Geographica Slovenica* 45.2.
- Pfeiffer, TJ and TD Bowen (1989). "Computer simulation of rockfalls". In: *Bulletin of the Association of Engineering Geologists* 26.1, pp. 135–146.

- Pfeiffer, TJ, JD Higgins, RD Andrew, RK Barrett, and RB Beck (1993). *Colorado Rockfall Simulation Program: Version 3.0 User's Manual*. Vol. 1. Colorado Department of Transportation.
- Pierson, LA, CF Gullixson, and RG Chassie (2001). *Rockfall catchment area design guide*. Tech. rep. Oregon Department of Transportation, Research Group.
- Piteau, D and R Clayton (1977). "Discussion of paper Computerized design of rock slopes using interactive graphics for the input and output of geometrical databy Cundall, P". In: *Proceedings of the 16th Symposium on Rock Mechanics, Minneapolis, USA*, pp. 62–63.
- Rammer, W, M Brauner, LKA Dorren, F Berger, and MJ Lexer (2010). "Evaluation of a 3-D rockfall module within a forest patch model". In: *Natural Hazards and Earth System Sciences* 10.4, p–699.
- Rayudu, DNP (1997). "Computer simulation of rockfalls-application to rockfalls at Fox Glacier, West Coast, New Zealand". PhD thesis. Lincoln University.
- Richards, LR, B Peng, and DH Bell (2001). "Laboratory and field evaluation of the normal coefficient of restitution for rocks". In: *Proceedings of Eurock*, pp. 149–56.
- Ritchie, Arthur M (1963). "Evaluation of rockfall and its control". In: *Highway research record* 17.
- Robotham, ME, H Wang, and G Walton (1995). "Assessment of risk from rockfall from active and abandoned quarry slopes". In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*. Vol. 5. 32, 237A.
- RocScience (2003). *Advanced Tutorial: Determining Input Parameters for A RocFall Analysis*. www.rocscience.com.
- Ronco, C, C Oggeri, and D Peila (2009). "Design of reinforced ground embankments used for rockfall protection". In: *Natural Hazards and Earth System Science* 9.4, pp. 1189–1199.
- Rummel, F and WL Vanheerden (1978). "Suggested methods for determining sound-velocity". In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 15.2, pp. 53–58.
- Sabatakakis, N, N Depountis, and N Vagenas (2015). "Evaluation of Rockfall Restitution Coefficients". In: *Engineering Geology for Society and Territory-Volume 2*. Springer, pp. 2023–2026.
- Salman, AD, DA Gorham, and A Verba (1995). "A study of solid particle failure under normal and oblique impact". In: *Wear* 186, pp. 92–98.
- Salman, AD, GK Reynolds, JS Fu, YS Cheong, CA Biggs, MJ Adams, DA Gorham, J Lukenics, and MJ Hounslow (2004). "Descriptive classification of the impact failure modes of spherical particles". In: *Powder Technology* 143, pp. 19–30.
- Saroglou, H (2013). "Rockfall hazard in Greece". In: *Bulletin of the Geological Society of Greece XLVII*.
- Saroglou, H, V Marinos, P Marinos, and G Tsiambaos (2012). "Rockfall hazard and risk assessment: an example from a high promontory at the historical site of Monemvasia, Greece". In: *Natural Hazards and Earth System Sciences* 12.6, pp. 1823–1836.

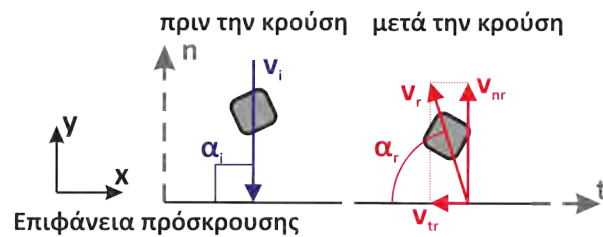
- Schellenberg, K (2009). "On the design of rockfall protection galleries". PhD thesis. Swiss Federal Institute of Technology Zurich.
- Scioldo, G (1991). "ISOMAP and ROTOMAP, 3D surface modelling and rockfall analysis". In: *Geo and Soft, Torino*.
- Sofianos, AI, CV Constantinidis, J Christodoulis, and AG Anagnostopoulos (1988). "Rockfall analysis at the ancient region of Argos". In: *The engineering geology of ancient works, monuments and historical sites. Preservation and protection-Volume 2*. Pp. 213–216.
- Spadari, M, A Giacomini, O Buzzi, S Fityus, and GP Giani (2012). "In situ rockfall testing in new South Wales, Australia". In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 49, pp. 84–93.
- Spang, RM et al. (1987). "Protection against rockfall-stepchild in the design of rock slopes". In: *6th ISRM Congress*. International Society for Rock Mechanics.
- Statham, I (1976). "A scree slope rockfall model". In: *Earth Surface Processes* 1.1, pp. 43–62.
- (1979). "A simple dynamic model of rockfall: some theoretical principles and model and field experiments". In: *ISMES: International Colloquium on Physical and Geomechanical Models*, pp. 237–258.
- Stevens, WD (1998). "RocFall, a tool for probabilistic analysis, design of remedial measures and prediction of rockfalls". In: *National Library of Canada= Bibliothèque nationale du Canada*.
- Stronge, WJ (2004). *Impact mechanics*. Cambridge university press.
- Topal, T, M Akin, and AU Ozden (2006). "Analysis and evaluation of rockfall hazard around Afyon Castle, Turkey". In: *Proceedings of the 10th international congress IAEG*.
- Turner, AK and RL Schuster (2012). *Rockfall: Characterization and Control*. Transport Research Board of the National academies.
- Ulusay, R and JA Hudson (2007). *The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006*. International Society for Rock Mechanics, Commission on Testing Methods.
- Umbach, D and KN Jones (2003). "A few methods for fitting circles to data". In: *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on* 52.6, pp. 1881–1885.
- Urciuoli, G (1988). "Sperimentazione sulla caduta di blocchi lungo un pendio nella formazione calcareodolomitica della penisola sorrentina". In: *Convengo sul tema: Cartografia e monitoraggio dei movimenti franosi*, pp. 35–54.
- Ushiro, T, S Shinohara, K Tanida, and N Yagi (2000). "A study on the motion of rockfalls on slopes". In: *Proceedings of the 5th symposium on impact problems in civil engineering*, pp. 91–96.
- Varnes, DJ (1978). "Slope movement types and processes". In: *Transportation Research Board Special Report* 176.
- Vijayakumar, S, T Yacoub, M Ranjram, JH Curran, et al. (2012). "Effect of rockfall shape on normal coefficient of restitution". In: *46th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*. American Rock Mechanics Association.

- Voight, B and WG Pariseau (1978). *Rockslides and avalanches: an introduction*. Elsevier.
- Wong, RHC, K Ho, and KT Chau (1999). "Experimental study for rockfall simulation". In: *Construction challenges into the next century*, pp. 92–97.
- Wu, JJ (1985). *Rockfall evaluation by computer simulation*. Transportation Research Board.
- Wyllie, DC (2014a). "Calibration of rock fall modeling parameters". In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 67, pp. 170–180.
- (2014b). *Rock fall engineering*. CRC Press.
- Yoganandan, N, FA Pintar, A Sances, PR Walsh, CL Ewing, DJ Thomas, and RG Snyder (1995). "Biomechanics of skull fracture". In: *Journal of Neurotrauma* 12.4, pp. 659–668.
- Γκαζέτας, Γ, Σ Καβουνίδης, Δ Ρόζος, and Γ Τσιαμπάος (2010). *Πόρισμα επιτροπής εμπειρογνομόνων για τις καταπτώσεις στα Τέμπη*. Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος.
- ΚΕΔΕ (1986). *Προδιαγραφές εργαστηριακών δοκιμών εδαφομηχανικής*. Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων.
- Κωνσταντίνου, Μ (2013). "Πειραματική Διερεύνηση της ανισότροπης συμπεριφοράς μη συνκτικών εδαφών σε στρεπτική διάτμηση". PhD thesis. ΕΜΠ.
- Παπαζάχος, Β and Κ Παπαζάχου (1989). *Οι Σεισμοί της Ελλάδος*. Εκδόσεις Ζήτη.
- Σακελλαρίου, Μ, Σ Κοζάνης, and Σ Γουλάκος (1995). "Το πρόβλημα των Καταπτώσεων Βραχοτεμαχίων και η αντιμετώπιση του σε Συγκοινωνιακά Έργα". In: *Πρακτικά 1ου πανελληνίου συνεδρίου οδοποιίας*.
- Σαρόγλου, Χ, Ε Μπεκρή, and Γ Τσιαμπάος (2010). "Προσδιορισμός κρίσιμων παραμέτρων γεωλογικών σχηματισμών για την προσομοίωση της πτώσης βραχωδών τεμαχίων σε πρανή". In: *Πρακτικά 6ου Πανελληνίου Συνεδρίου Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής*.
- Σοφιανός, ΑΙ and ΠΠ Νομικός (2009). *Στοιχεία Μηχανικής των Πετρωμάτων, Σημειώσεις Διαλέξεων*. Εκδόσεις ΕΜΠ.
- Τσιαμπάος, Γ (2015). *Βραχομηχανική - Σήραγγες, Σημειώσεις Διαλέξεων*. Εκδόσεις ΕΜΠ.
- Χαραλάμπους, Σ (2006). *Προγραμματισμός ελέγχου αστοχίας έναντι σφήνας και κατάπτωσης βραχοτεμαχίου σε περιβάλλον ΓΣΠ*. Μεταπτυχιακή Εργασία, Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ.
- Χαραλάμπους, Σ, Ι Καλογεράς, Ι Στρατάκος, and Μ Σακελλαρίου (2008). "Μεθοδολογία τριδιάστατης ανάλυσης βραχοπτώσεων λόγω σεισμού. Εφαρμογή στον σεισμό της Λευκάδας 14/08/2003 - M=6.2". In: *Πρακτικά 3ου Πανελληνίου Συνεδρίου Αντισεισμικής Μηχανικής και Τεχνικής Σεισμολογίας*.

Παραρτήματα

Παράρτημα 1

Ελεύθερη πτώση κυβικών τεμαχίων με λειασμένες ακμές



1.1 Λεπτοκρυσταλλικό Μάρμαρο

α/α	v_{yi} [ms^{-1}]	v_{yr} [ms^{-1}]	v_{xr} [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-3.98	2.10	0.29	2.12	82.0	0.53	0.53
2	-3.98	2.38	-0.76	2.50	72.4	0.63	0.60
3	-3.89	3.15	0.03	3.15	89.5	0.81	0.81
4	-4.03	2.99	-0.37	3.01	82.9	0.75	0.74
5	-3.96	2.61	-0.28	2.62	83.8	0.66	0.66
6	-4.16	2.24	-0.80	2.38	70.3	0.57	0.54
7	-3.87	2.16	0.21	2.17	84.5	0.56	0.56
8	-4.01	1.84	-0.58	1.93	72.4	0.48	0.46
9	-3.94	2.61	0.63	2.68	76.5	0.68	0.66
10	-3.99	2.86	0.84	2.98	73.7	0.75	0.72
\bar{x}	-3.98	2.49	-0.08	2.55	78.8	0.64	0.63
s	0.08	0.42	0.57	0.41	6.5	0.11	0.11
min	-4.16	1.84	-0.80	1.93	70.3	0.48	0.46
max	-3.87	3.15	0.84	3.15	89.5	0.81	0.81

1.2 Χαλαζιακός Ψαμμίτης

α/α	v_{yi} [ms^{-1}]	v_{yr} [ms^{-1}]	v_{xr} [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-4.16	3.11	0.19	3.12	86.5	0.75	0.75
2	-4.11	2.48	0.07	2.48	88.4	0.60	0.60
3	-4.19	2.68	0.22	2.69	85.4	0.64	0.64
4	-4.19	2.95	-0.47	2.99	81.0	0.71	0.70
5	-4.21	3.19	-0.38	3.21	83.1	0.76	0.76
6	-4.19	2.99	-0.26	3.00	85.0	0.72	0.71
7	-4.11	2.58	0.01	2.58	89.8	0.63	0.63
8	-4.19	2.32	0.38	2.35	80.8	0.56	0.55
9	-4.18	2.12	-0.28	2.14	82.5	0.51	0.51
10	-4.19	3.10	-0.42	3.13	82.4	0.75	0.74
\bar{x}	-4.17	2.75	-0.10	2.77	84.5	0.66	0.66
s	0.04	0.37	0.30	0.37	3.1	0.09	0.09
min	-4.21	2.12	-0.47	2.14	80.8	0.51	0.51
max	-4.11	3.19	0.38	3.21	89.8	0.76	0.76

1.3 Μάρμαρο

α/α	v_{yi} [ms^{-1}]	v_{yr} [ms^{-1}]	v_{xr} [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-4.15	1.64	1.05	1.95	57.3	0.47	0.40
2	-4.13	2.58	-0.46	2.62	80.0	0.63	0.62
3	-4.15	2.42	-0.54	2.48	77.5	0.60	0.58
4	-4.14	1.96	-0.82	2.12	67.3	0.51	0.47
5	-4.19	1.81	0.86	2.00	64.6	0.48	0.43
6	-4.14	1.72	-0.43	1.77	75.9	0.43	0.42
7	-4.17	1.84	-0.70	1.97	69.1	0.47	0.44
8	-4.10	2.21	-0.14	2.21	86.5	0.54	0.54
9	-4.14	1.78	1.02	2.05	60.2	0.50	0.43
10	-4.13	1.75	0.52	1.83	73.5	0.44	0.42
\bar{x}	-4.14	1.97	0.04	2.10	71.2	0.51	0.48
s	0.02	0.32	0.75	0.27	9.1	0.07	0.08
min	-4.19	1.64	-0.82	1.77	57.4	0.43	0.40
max	-4.10	2.58	1.05	2.62	86.5	0.63	0.62

1.4 Κρυσταλλικός Ασβεστόλιθος

α/α	v_{yi} [ms^{-1}]	v_{yr} [ms^{-1}]	v_{xr} [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-3.90	2.10	-0.04	2.10	88.9	0.54	0.54
2	-3.99	2.22	0.50	2.28	77.5	0.57	0.56
3	-3.91	1.99	-0.01	1.99	89.6	0.51	0.51
4	-4.04	2.03	-0.40	2.07	78.8	0.51	0.50
5	-4.05	2.01	0.65	1.97	72.1	0.52	0.50
6	-3.93	1.98	0.13	1.98	86.2	0.50	0.50
7	-3.91	1.90	-0.53	1.97	74.4	0.50	0.49
8	-3.96	1.75	-0.61	1.86	70.7	0.47	0.44
9	-3.94	2.15	0.63	2.24	73.8	0.57	0.55
10	-4.06	2.02	0.21	2.03	84.0	0.50	0.50
\bar{x}	-3.97	2.02	0.05	2.05	79.6	0.52	0.51
s	0.06	0.13	0.46	0.13	7.1	0.03	0.03
min	-4.06	1.75	-0.61	1.86	70.7	0.47	0.44
max	-3.90	2.22	0.65	2.28	89.6	0.57	0.56

1.5 Ασβεστόλιθος

α/α	v_{yi} [ms^{-1}]	v_{yr} [ms^{-1}]	v_{xr} [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-4.18	1.84	-0.54	1.92	73.8	0.46	0.44
2	-4.16	2.00	0.14	2.01	85.9	0.48	0.48
3	-4.18	2.03	0.11	2.03	86.8	0.49	0.49
4	-4.20	1.94	0.21	1.63	83.9	0.46	0.46
5	-4.16	2.18	-0.33	2.13	81.5	0.53	0.52
6	-4.19	2.08	-0.23	2.09	83.6	0.50	0.50
7	-4.20	2.32	-0.06	1.57	88.6	0.55	0.55
8	-4.19	2.11	-0.44	2.40	78.2	0.51	0.50
9	-4.18	1.80	0.31	1.83	80.2	0.44	0.43
10	-4.17	2.43	0.41	2.46	80.5	0.59	0.58
\bar{x}	-4.18	2.07	-0.04	2.01	82.3	0.50	0.50
s	0.01	0.20	0.33	0.29	4.4	0.05	0.05
min	-4.20	1.80	-0.54	1.57	73.8	0.44	0.43
max	-4.16	2.43	0.41	2.46	88.6	0.59	0.58

1.6 Πρασινίτης

α/α	v_{yi} [ms^{-1}]	v_{yr} [ms^{-1}]	v_{xr} [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-4.01	1.47	0.38	1.52	75.7	0.38	0.37
2	-3.97	1.65	-0.46	1.71	74.4	0.43	0.41
3	-4.01	1.59	-0.61	1.70	69.1	0.42	0.40
4	-4.00	2.04	-0.65	2.14	72.4	0.54	0.51
5	-3.94	1.50	-0.43	1.56	74.2	0.40	0.38
6	-4.05	2.27	0.25	2.29	83.8	0.56	0.56
7	-4.03	1.78	0.35	1.81	79.0	0.45	0.44
8	-3.98	1.99	-0.41	2.03	78.3	0.51	0.50
9	-3.96	1.88	-0.22	1.90	83.5	0.48	0.48
10	-4.02	2.04	0.25	2.06	83.1	0.51	0.51
\bar{x}	-4.00	1.82	-0.16	1.87	77.4	0.47	0.46
s	0.03	0.27	0.41	0.26	5.1	0.06	0.06
min	-4.05	1.47	-0.65	1.52	69.1	0.38	0.37
max	-3.94	2.27	0.38	2.29	83.8	0.56	0.56

1.7 Σχιστόλιθος

α/α	v_{yi} [ms^{-1}]	v_{yr} [ms^{-1}]	v_{xr} [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-4.04	1.26	0.36	1.31	74.2	0.32	0.31
2	-4.10	1.57	-0.49	1.65	72.6	0.40	0.38
3	-4.15	1.30	0.53	1.40	68.0	0.34	0.31
4	-4.02	1.26	0.71	1.45	60.6	0.36	0.31
5	-4.12	1.28	0.38	1.34	73.5	0.32	0.31
6	-4.11	1.33	0.21	1.35	81.0	0.33	0.32
7	-4.14	1.57	0.36	1.61	77.3	0.39	0.38
8	-4.05	1.47	0.41	1.52	74.6	0.38	0.36
9	-4.06	1.30	0.59	1.43	65.6	0.35	0.32
10	-4.09	1.46	0.90	1.71	58.4	0.42	0.36
\bar{x}	-4.09	1.38	0.39	1.48	70.6	0.36	0.34
s	0.04	0.13	0.37	0.14	7.3	0.03	0.03
min	-4.15	1.26	-0.49	1.31	58.4	0.32	0.31
max	-4.02	1.57	0.90	1.71	81.0	0.42	0.38

1.8 Μάργα

α/α	v_{yi} [ms^{-1}]	v_{yr} [ms^{-1}]	v_{xr} [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-4.16	1.39	-0.75	1.58	61.7	0.38	0.33
2	-4.22	1.52	0.20	1.53	82.5	0.36	0.36
3	-4.18	1.39	0.60	1.51	66.7	0.36	0.33
4	-4.13	1.46	-0.85	1.69	59.9	0.41	0.35
5	-4.21	1.51	-0.53	1.60	70.8	0.38	0.36
6	-4.21	1.45	-0.42	1.51	73.7	0.36	0.34
7	-4.10	1.45	0.15	1.46	84.2	0.36	0.35
8	-4.12	1.09	0.61	1.25	60.6	0.30	0.26
9	-4.15	1.22	0.66	1.39	61.7	0.33	0.29
10	-4.14	1.54	0.32	1.57	78.2	0.38	0.37
\bar{x}	-4.16	1.40	0.00	1.51	70.0	0.36	0.34
s	0.04	0.14	0.58	0.12	9.3	0.03	0.03
min	-4.22	1.09	-0.85	1.25	59.9	0.30	0.26
max	-4.10	1.54	0.66	1.69	84.2	0.41	0.37

1.9 Εποξειδική ρητίνη

α/α	v_{yi} [ms^{-1}]	v_{yr} [ms^{-1}]	v_{xr} [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-3.76	1.93	0.33	1.96	80.3	0.52	0.51
2	-3.87	2.37	-0.12	2.37	87.2	0.61	0.61
3	-4.01	2.30	-0.88	2.47	69.1	0.62	0.57
4	-3.82	1.98	-0.53	2.05	75.1	0.54	0.52
5	-3.76	1.76	0.14	1.77	85.4	0.47	0.47
6	-3.91	1.85	0.72	1.98	68.7	0.51	0.47
7	-3.71	2.17	0.54	2.24	76.0	0.60	0.59
8	-3.85	2.23	0.14	2.24	86.4	0.58	0.58
9	-3.67	2.03	0.40	2.07	78.9	0.56	0.55
10	-3.99	2.09	-0.58	2.17	74.6	0.54	0.52
\bar{x}	-3.83	2.07	0.02	2.13	78.2	0.56	0.54
s	0.11	0.20	0.53	0.21	6.7	0.05	0.05
min	-4.01	1.76	-0.88	1.77	68.7	0.47	0.47
max	-3.67	2.37	0.72	2.47	87.2	0.62	0.61

1.10 Τσιμεντοειδές ένεμα

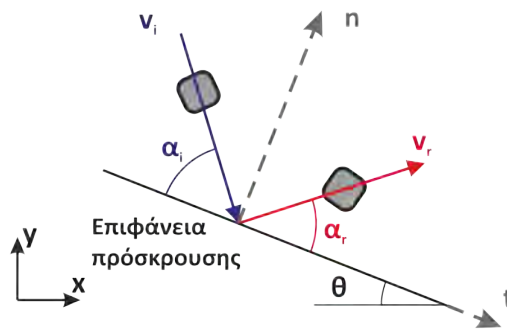
α/α	v_{yi} [ms ⁻¹]	v_{yr} [ms ⁻¹]	v_{xr} [ms ⁻¹]	v_r [ms ⁻¹]	α_r [°]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-3.87	1.68	-0.66	1.81	68.7	0.47	0.44
2	-3.89	1.69	-0.36	1.73	77.9	0.44	0.43
3	-4.00	2.05	-0.29	2.07	82.1	0.52	0.51
4	-4.07	1.92	0.24	1.94	82.9	0.48	0.47
5	-3.99	2.16	-0.12	2.17	87.0	0.54	0.54
6	-3.93	1.83	-0.44	1.88	76.3	0.48	0.46
7	-3.86	2.21	-0.74	2.33	71.5	0.60	0.57
8	-3.85	2.38	0.04	2.38	89.2	0.62	0.62
9	-4.03	2.33	-0.06	2.33	88.6	0.58	0.58
10	-3.79	1.72	-0.31	1.75	79.8	0.46	0.45
\bar{x}	-3.93	2.00	-0.27	2.04	80.4	0.52	0.51
s	0.09	0.27	0.30	0.25	6.9	0.06	0.07
min	-4.07	1.68	-0.74	1.73	68.7	0.44	0.43
max	-3.79	2.38	0.24	2.38	89.2	0.62	0.62

1.11 Πολυεστέρας με χαλαζιακή άμμο

α/α	v_{yi} [ms ⁻¹]	v_{yr} [ms ⁻¹]	v_{xr} [ms ⁻¹]	v_r [ms ⁻¹]	α_r [°]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-3.81	2.09	-0.66	2.19	72.6	0.58	0.55
2	-3.86	1.91	-0.36	1.95	79.2	0.50	0.50
3	-3.98	2.03	-0.29	2.05	82.0	0.51	0.51
4	-4.00	1.73	0.24	1.75	82.2	0.44	0.43
5	-3.90	2.66	-0.12	2.67	87.5	0.68	0.68
6	-3.99	2.50	-0.44	2.54	79.9	0.64	0.63
7	-3.91	2.21	-0.74	2.33	71.4	0.59	0.56
8	-3.96	2.06	0.04	2.06	89.0	0.52	0.52
9	-3.89	2.62	-0.06	2.62	88.7	0.67	0.67
10	-3.89	2.06	-0.31	2.09	81.5	0.54	0.53
\bar{x}	-3.92	2.19	-0.27	2.22	81.4	0.57	0.56
s	0.06	0.31	0.30	0.31	6.1	0.08	0.08
min	-4.00	1.73	-0.74	1.75	71.4	0.44	0.43
max	-3.81	2.66	0.24	2.67	89.0	0.68	0.68

Παράρτημα 2

Παραβολική ρίψη κυβικών τεμαχών με λειασμένες ακμές από ψαμμίτη



2.1 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 0^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]
1	2.80	2.22	73.8	75.7	0.79	0.80	0.70
2	2.92	2.07	73.4	49.0	0.71	0.56	1.63
3	2.62	1.29	70.5	58.9	0.49	0.45	0.76
4	2.62	1.97	69.5	67.7	0.75	0.74	0.82
5	2.76	1.75	69.7	53.0	0.63	0.54	1.10
6	2.74	1.75	72.6	58.2	0.64	0.57	1.13
7	2.83	2.16	77.0	59.8	0.76	0.68	1.70
\bar{x}	2.76	1.89	72.4	60.3	0.68	0.62	1.12
s	0.10	0.30	2.5	8.3	0.10	0.11	0.38
min	2.62	1.29	69.5	49.0	0.49	0.45	0.70
max	2.92	2.22	77.0	75.7	0.79	0.80	1.70

2.2 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 15^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]	t_{COR} [-]
1	2.78	1.79	55.2	41.2	0.64	0.52	0.85
2	2.65	1.89	57.0	62.0	0.71	0.75	0.62
3	2.58	1.88	59.3	56.3	0.73	0.70	0.79
4	2.89	2.01	56.9	42.1	0.70	0.56	0.95
5	2.63	1.70	61.2	38.7	0.65	0.46	1.05
6	2.67	1.86	62.6	43.4	0.70	0.54	1.10
7	2.70	1.94	56.8	42.6	0.72	0.58	0.97
\bar{x}	2.70	1.87	58.4	46.6	0.69	0.59	0.90
s	0.10	0.09	2.5	8.2	0.03	0.09	0.15
min	2.58	1.70	55.2	38.7	0.64	0.46	0.62
max	2.89	2.01	62.6	62.0	0.73	0.75	1.10

2.3 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 30^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]	t_{COR} [-]
1	2.42	1.97	42.6	33.3	0.82	0.66	0.93
2	2.64	2.11	43.3	40.0	0.80	0.75	0.84
3	2.43	1.81	44.0	35.9	0.75	0.63	0.84
4	2.60	2.09	42.5	39.8	0.80	0.76	0.84
5	2.60	2.15	41.4	51.0	0.83	0.97	0.70
6	2.63	2.30	40.7	38.3	0.87	0.83	0.90
7	2.63	2.12	40.7	40.2	0.81	0.80	0.81
\bar{x}	2.56	2.08	42.2	39.8	0.81	0.77	0.84
s	0.09	0.14	1.2	5.1	0.03	0.10	0.07
min	2.42	1.81	40.7	33.3	0.75	0.63	0.70
max	2.64	2.30	44.0	51.0	0.87	0.97	0.93

2.4 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 45^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]	t_{COR} [-]
1	2.62	2.26	24.8	17.4	0.86	0.61	0.91
2	2.46	2.15	25.0	24.1	0.88	0.85	0.88
3	2.76	2.27	24.8	26.1	0.82	0.86	0.81
4	2.65	2.12	28.9	27.5	0.80	0.77	0.81
5	2.49	2.34	27.0	26.5	0.94	0.92	0.94
6	2.75	2.32	27.5	20.5	0.84	0.64	0.89
7	2.40	2.22	29.3	33.7	0.92	1.05	0.88
\bar{x}	2.59	2.24	26.8	25.1	0.87	0.81	0.87
s	0.13	0.07	1.8	4.8	0.05	0.14	0.04
min	2.40	2.12	24.8	17.4	0.80	0.61	0.81
max	2.76	2.34	29.3	33.7	0.94	1.05	0.94

2.5 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 0^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]	t_{COR} [-]
1	2.62	2.08	65.2	70.7	0.79	0.83	0.63
2	2.70	2.14	68.8	67.4	0.79	0.78	0.84
3	2.47	1.60	63.1	68.3	0.64	0.67	0.53
4	2.72	2.04	65.4	62.6	0.75	0.73	0.83
5	2.74	1.93	72.4	40.1	0.70	0.48	1.78
6	2.51	1.93	61.3	24.1	0.77	0.36	1.46
7	2.40	1.77	68.5	62.0	0.74	0.70	0.95
\bar{x}	2.60	1.93	66.4	56.5	0.74	0.65	1.00
s	0.12	0.17	3.5	16.2	0.05	0.16	0.42
min	2.40	1.60	61.3	24.1	0.64	0.36	0.53
max	2.74	2.14	72.4	70.7	0.79	0.83	1.78

2.6 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 15^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]	t_{COR} [-]
1	2.42	2.11	51.1	54.2	0.87	0.91	0.81
2	2.68	1.80	51.4	27.9	0.67	0.40	0.95
3	2.64	2.15	45.3	45.3	0.81	0.81	0.81
4	2.55	1.84	49.8	32.1	0.72	0.50	0.95
5	2.53	2.03	54.3	42.0	0.80	0.66	1.02
6	2.65	2.22	49.3	58.2	0.84	0.94	0.68
7	2.65	2.07	51.0	47.6	0.78	0.74	0.84
\bar{x}	2.59	2.03	50.3	43.9	0.78	0.71	0.86
s	0.09	0.15	2.5	10.2	0.06	0.19	0.11
min	2.42	1.80	45.3	27.9	0.67	0.40	0.68
max	2.68	2.22	54.3	58.2	0.87	0.94	1.02

2.7 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 30^\circ$

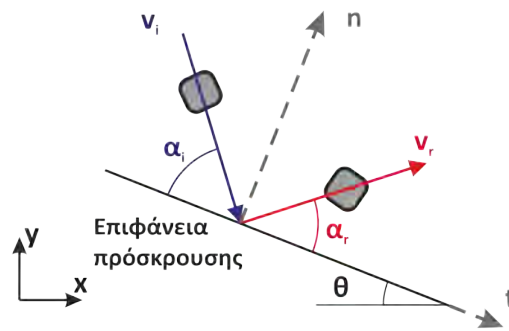
α/α	v_i [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]	t_{COR} [-]
1	2.45	2.17	36.0	29.7	0.89	0.75	0.95
2	2.55	1.73	33.3	25.7	0.68	0.54	0.73
3	2.06	1.39	36.0	33.5	0.67	0.63	0.69
4	2.32	2.12	38.9	38.6	0.91	0.91	0.91
5	2.41	2.07	36.1	28.7	0.86	0.70	0.93
6	2.45	1.96	34.1	24.3	0.80	0.59	0.88
7	2.49	2.03	29.5	33.7	0.82	0.92	0.78
\bar{x}	2.39	1.92	34.8	30.6	0.80	0.72	0.84
s	0.15	0.26	2.7	4.6	0.09	0.14	0.10
min	2.06	1.39	29.5	24.3	0.67	0.54	0.69
max	2.55	2.17	38.9	38.6	0.91	0.92	0.95

2.8 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 45^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]
1	2.56	2.59	21.6	24.1	1.01	1.12	0.99
2	2.35	2.13	17.4	17.2	0.91	0.89	0.91
3	2.20	2.17	18.1	22.7	0.99	1.22	0.96
4	2.30	2.19	19.7	14.5	0.95	0.71	0.98
5	2.47	2.34	22.5	16.4	0.95	0.70	0.99
6	2.24	1.99	19.3	26.4	0.89	1.20	0.84
7	2.38	2.15	22.2	21.0	0.90	0.85	0.91
\bar{x}	2.36	2.22	20.1	20.3	0.94	0.96	0.94
s	0.12	0.18	1.9	4.1	0.04	0.21	0.05
min	2.20	1.99	17.4	14.5	0.89	0.70	0.84
max	2.56	2.59	22.5	26.4	1.01	1.22	0.99

Παράρτημα 3

Παραβολική ρίψη κυβικών τεμαχίων με λειασμένες ακμές από μαρμάρο



3.1 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 0^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]
1	3.01	1.77	75.6	70.5	0.59	0.57	0.79
2	2.92	1.83	74.9	39.2	0.63	0.41	1.87
3	3.04	1.74	75.2	43.9	0.57	0.41	1.62
4	2.96	1.73	73.9	44.4	0.58	0.43	1.50
5	2.98	2.00	74.1	61.2	0.67	0.61	1.17
\bar{x}	2.98	1.82	74.7	51.8	0.61	0.49	1.39
s	0.04	0.10	0.6	11.9	0.04	0.09	0.37
min	2.92	1.73	73.9	39.2	0.57	0.41	0.79
max	3.04	2.00	75.6	70.5	0.67	0.61	1.87

3.2 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 15^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]
1	2.87	1.64	60.4	58.9	0.57	0.56	0.60
2	2.98	1.74	58.9	38.7	0.58	0.43	0.88
3	2.57	1.30	56.3	41.9	0.50	0.40	0.68
4	2.76	1.60	58.3	33.5	0.58	0.37	0.92
5	2.85	1.32	58.0	48.1	0.46	0.40	0.58
\bar{x}	2.81	1.52	58.4	44.2	0.54	0.43	0.73
s	0.14	0.18	1.3	8.7	0.05	0.07	0.14
min	2.57	1.30	56.3	33.5	0.46	0.37	0.58
max	2.98	1.74	60.4	58.9	0.58	0.56	0.92

3.3 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 30^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]
1	2.97	1.86	40.3	43.2	0.63	0.66	0.60
2	2.81	1.86	38.8	29.3	0.66	0.52	0.74
3	2.99	1.95	43.0	33.0	0.65	0.52	0.75
4	2.99	1.86	38.6	33.1	0.62	0.55	0.67
5	2.86	1.91	34.5	30.2	0.67	0.59	0.70
\bar{x}	2.92	1.89	39.0	33.8	0.65	0.57	0.69
s	0.07	0.04	2.8	5.0	0.02	0.05	0.05
min	2.81	1.86	34.5	29.3	0.62	0.52	0.60
max	2.99	1.95	43.0	43.2	0.67	0.66	0.75

3.4 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 45^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]
1	2.65	2.08	23.4	24.2	0.78	0.81	0.78
2	2.92	2.50	26.2	25.8	0.86	0.84	0.86
3	2.80	2.36	25.2	28.2	0.84	0.93	0.82
4	3.38	2.36	22.7	27.4	0.70	0.83	0.67
5	2.74	2.62	18.9	16.9	0.96	0.86	0.97
\bar{x}	2.90	2.38	23.3	24.5	0.83	0.85	0.82
s	0.26	0.18	2.5	4.0	0.09	0.04	0.10
min	2.65	2.08	18.9	16.9	0.70	0.81	0.67
max	3.38	2.62	26.2	28.2	0.96	0.93	0.97

3.5 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 0^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]
1	2.44	1.90	63.0	36.8	0.78	0.52	1.38
2	2.89	1.74	69.5	28.2	0.60	0.30	1.51
3	2.73	1.82	63.9	45.6	0.67	0.53	1.06
4	2.66	1.87	67.4	61.9	0.70	0.67	0.86
5	2.90	1.98	69.5	38.3	0.68	0.45	1.53
\bar{x}	2.72	1.86	66.7	42.2	0.69	0.49	1.27
s	0.17	0.08	2.7	11.3	0.06	0.12	0.26
min	2.44	1.74	63.0	28.2	0.60	0.30	0.86
max	2.90	1.98	69.5	61.9	0.78	0.67	1.53

3.6 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 15^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]
1	2.62	1.84	48.1	38.2	0.70	0.58	0.82
2	2.29	1.47	46.3	24.2	0.64	0.36	0.85
3	2.47	1.92	46.0	25.0	0.77	0.45	1.01
4	2.52	1.73	46.6	49.0	0.69	0.71	0.66
5	2.89	1.88	43.8	56.3	0.65	0.78	0.50
\bar{x}	2.56	1.77	46.2	38.5	0.69	0.58	0.77
s	0.20	0.16	1.4	12.8	0.05	0.16	0.17
min	2.29	1.47	43.8	24.2	0.64	0.36	0.50
max	2.89	1.92	48.1	56.3	0.77	0.78	1.01

3.7 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 30^\circ$

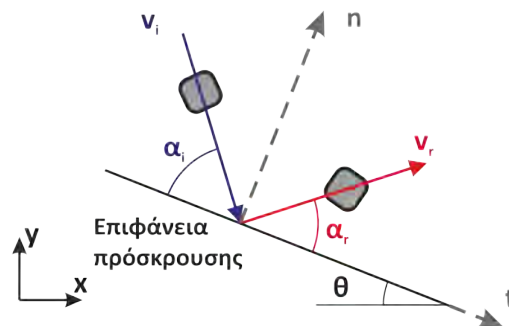
α/α	v_i [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]
1	2.34	1.83	30.5	38.4	0.78	0.95	0.71
2	2.34	2.02	35.7	36.0	0.86	0.87	0.86
3	2.36	1.80	32.9	28.9	0.76	0.68	0.80
4	2.47	2.08	29.4	34.6	0.84	0.98	0.80
5	2.50	1.82	26.9	30.8	0.73	0.82	0.70
\bar{x}	2.40	1.91	31.1	33.7	0.79	0.86	0.77
s	0.07	0.12	3.0	3.5	0.05	0.11	0.06
min	2.34	1.80	26.9	28.9	0.73	0.68	0.70
max	2.50	2.08	35.7	38.4	0.86	0.98	0.86

3.8 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 45^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]
1	2.86	2.33	18.0	18.4	0.82	0.83	0.81
2	2.65	2.12	14.0	24.3	0.80	1.36	0.75
3	2.83	2.55	16.1	17.9	0.90	1.00	0.89
4	2.93	2.07	16.0	18.4	0.71	0.81	0.70
5	2.74	2.50	13.1	12.1	0.91	0.84	0.92
\bar{x}	2.80	2.31	15.4	18.2	0.83	0.97	0.81
s	0.10	0.20	1.7	3.9	0.07	0.21	0.08
min	2.65	2.07	13.1	12.1	0.71	0.81	0.70
max	2.93	2.55	18.0	24.3	0.91	1.36	0.92

Παράρτημα 4

Παραβολική ρίψη κυβικών τεμαχών με λειασμένες ακμές από ασβεστόλιθο



4.1 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 0^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]
1	3.64	1.85	78.3	53.6	0.51	0.42	1.49
2	3.83	1.83	74.4	48.3	0.48	0.37	1.18
3	3.70	1.89	76.2	54.9	0.51	0.43	1.24
4	3.80	1.82	78.2	53.5	0.48	0.39	1.38
5	3.88	1.97	74.5	35.3	0.51	0.30	1.55
6	3.69	1.94	75.4	61.3	0.53	0.48	1.00
7	3.82	2.23	74.8	58.0	0.58	0.51	1.18
\bar{x}	3.77	1.93	76.0	52.1	0.51	0.41	1.29
s	0.08	0.13	1.5	7.8	0.03	0.06	0.18
min	3.64	1.82	74.4	35.3	0.48	0.30	1.00
max	3.88	2.23	78.3	61.3	0.58	0.51	1.55

4.2 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 15^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]
1	3.60	2.36	60.5	55.7	0.66	0.62	0.75
2	3.75	2.65	59.0	43.8	0.71	0.57	0.99
3	3.58	2.21	58.9	34.7	0.62	0.41	0.98
4	3.73	2.21	59.4	35.4	0.59	0.40	0.95
5	3.61	2.28	63.7	53.0	0.63	0.56	0.86
6	3.66	2.24	61.4	38.1	0.61	0.43	1.01
7	3.64	2.20	59.6	26.7	0.61	0.32	1.07
\bar{x}	3.65	2.31	60.4	41.1	0.63	0.47	0.94
s	0.06	0.15	1.6	9.7	0.04	0.10	0.10
min	3.58	2.20	58.9	26.7	0.59	0.32	0.75
max	3.75	2.65	63.7	55.7	0.71	0.62	1.07

4.3 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 30^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]
1	3.56	2.51	45.3	26.5	0.71	0.45	0.89
2	3.51	2.61	42.9	33.3	0.74	0.60	0.85
3	3.58	2.54	44.1	29.6	0.71	0.50	0.86
4	3.47	2.37	45.1	34.9	0.68	0.55	0.80
5	3.75	2.46	43.7	44.6	0.66	0.67	0.65
6	3.65	2.63	43.4	28.6	0.72	0.50	0.87
7	3.63	2.36	44.9	31.5	0.65	0.48	0.79
\bar{x}	3.59	2.50	44.2	32.7	0.70	0.54	0.81
s	0.09	0.10	0.9	5.5	0.03	0.07	0.08
min	3.47	2.36	42.9	26.5	0.65	0.45	0.65
max	3.75	2.63	45.3	44.6	0.74	0.67	0.89

4.4 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 45^\circ$

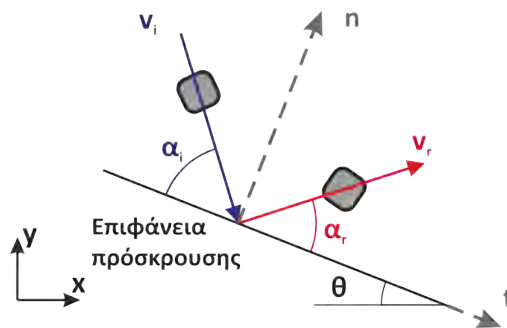
α/α	v_i [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]	t_{COR} [-]
1	3.25	2.93	33.0	31.7	0.90	0.87	0.91
2	3.29	2.81	31.5	25.5	0.85	0.70	0.90
3	3.24	3.04	32.9	32.0	0.94	0.91	0.95
4	3.51	2.51	30.5	26.5	0.72	0.63	0.75
5	3.56	2.63	30.2	31.5	0.74	0.77	0.73
6	3.40	2.56	30.6	25.7	0.75	0.64	0.79
7	3.54	2.78	30.2	22.9	0.78	0.61	0.84
\bar{x}	3.40	2.75	31.3	27.9	0.81	0.73	0.84
s	0.13	0.18	1.1	3.4	0.08	0.11	0.08
min	3.24	2.51	30.2	22.9	0.72	0.61	0.73
max	3.56	3.04	33.0	32.0	0.94	0.91	0.95

4.5 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 45^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]	t_{COR} [-]
1	2.68	2.16	17.6	18.1	0.81	0.83	0.80
2	2.56	2.14	21.3	22.5	0.84	0.88	0.83
3	2.66	2.10	21.8	21.2	0.79	0.77	0.79
4	2.67	2.42	17.4	21.1	0.91	1.09	0.89
5	2.80	2.33	20.7	21.6	0.83	0.87	0.83
6	2.56	2.19	20.8	21.7	0.86	0.89	0.85
7	2.57	2.17	19.3	23.6	0.84	1.02	0.82
\bar{x}	2.64	2.22	19.9	21.4	0.84	0.91	0.83
s	0.08	0.11	1.7	1.6	0.04	0.10	0.03
min	2.56	2.10	17.4	18.1	0.79	0.77	0.79
max	2.80	2.42	21.8	23.6	0.91	1.09	0.89

Παράρτημα 5

Παραβολική ρίψη κυβικών τεμαχών με λειασμένες ακμές από σχιστόλιθο



5.1 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 0^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]
1	3.69	2.27	79.1	22.8	0.62	0.24	2.99
2	3.78	2.09	77.5	27.7	0.55	0.26	2.25
3	3.69	1.64	74.8	65.1	0.45	0.42	0.71
4	3.49	2.19	77.2	22.0	0.63	0.24	2.64
5	3.65	1.83	76.0	27.0	0.50	0.23	1.85
6	3.79	2.09	77.5	42.5	0.55	0.38	1.88
7	3.62	2.23	74.3	32.0	0.62	0.34	1.93
\bar{x}	3.67	2.05	76.6	34.1	0.56	0.30	2.04
s	0.09	0.21	1.6	14.1	0.06	0.07	0.67
min	3.49	1.64	74.3	22.0	0.45	0.23	0.71
max	3.79	2.27	79.1	65.1	0.63	0.42	2.99

5.2 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 15^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]
1	3.77	2.22	60.1	20.0	0.59	0.23	1.11
2	3.66	2.22	61.6	32.7	0.61	0.37	1.07
3	3.64	2.02	61.8	19.1	0.55	0.21	1.11
4	3.64	1.82	59.6	33.3	0.50	0.32	0.83
5	3.42	1.33	62.8	43.8	0.39	0.30	0.62
6	3.52	1.83	62.3	24.2	0.52	0.24	1.02
7	3.82	1.41	61.2	58.9	0.37	0.36	0.40
\bar{x}	3.64	1.84	61.4	33.1	0.50	0.29	0.88
s	0.13	0.33	1.1	13.2	0.09	0.06	0.26
min	3.42	1.33	59.6	19.1	0.37	0.21	0.40
max	3.82	2.22	62.8	58.9	0.61	0.37	1.11

5.3 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 30^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]
1	3.77	1.86	47.8	49.8	0.49	0.51	0.47
2	3.67	2.16	46.7	36.3	0.59	0.48	0.69
3	3.70	2.66	46.2	19.1	0.72	0.33	0.98
4	3.61	2.39	48.3	22.9	0.66	0.35	0.92
5	3.76	2.51	46.9	23.0	0.67	0.36	0.90
6	3.71	2.01	47.2	38.9	0.54	0.46	0.62
7	3.76	1.90	46.9	50.1	0.51	0.53	0.47
\bar{x}	3.71	2.21	47.1	34.3	0.60	0.43	0.72
s	0.05	0.29	0.6	12.0	0.08	0.08	0.20
min	3.61	1.86	46.2	19.1	0.49	0.33	0.47
max	3.77	2.66	48.3	50.1	0.72	0.53	0.98

5.4 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 45^\circ$

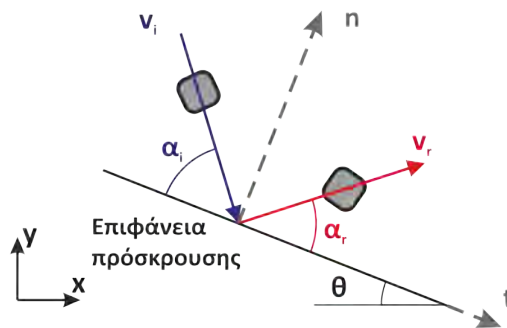
α/α	v_i [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]	t_{COR} [-]
1	3.60	2.73	31.3	29.4	0.76	0.72	0.77
2	3.60	2.48	32.3	35.8	0.69	0.76	0.66
3	3.48	2.39	31.7	30.8	0.69	0.67	0.69
4	3.73	2.29	30.8	27.9	0.61	0.56	0.63
5	3.36	2.55	32.8	30.1	0.76	0.70	0.78
6	3.64	2.43	29.5	22.8	0.67	0.53	0.71
7	3.56	2.45	31.9	24.4	0.69	0.54	0.74
\bar{x}	3.57	2.47	31.5	28.7	0.70	0.64	0.71
s	0.11	0.13	1.0	4.0	0.05	0.09	0.05
min	3.36	2.29	29.5	22.8	0.61	0.53	0.63
max	3.73	2.73	32.8	35.8	0.76	0.76	0.78

5.5 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 45^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]	t_{COR} [-]
1	2.69	2.37	19.1	22.9	0.88	1.05	0.86
2	2.76	2.49	22.1	23.7	0.90	0.96	0.89
3	2.68	2.14	19.9	22.3	0.80	0.89	0.79
4	2.57	2.18	19.8	29.7	0.85	1.24	0.78
5	2.62	2.00	20.3	33.4	0.76	1.21	0.68
6	2.56	2.22	20.4	18.7	0.87	0.80	0.88
7	2.43	2.35	19.7	22.3	0.96	1.09	0.95
\bar{x}	2.62	2.25	20.2	24.7	0.86	1.03	0.83
s	0.10	0.15	0.9	4.7	0.06	0.15	0.08
min	2.43	2.00	19.1	18.7	0.76	0.80	0.68
max	2.76	2.49	22.1	33.4	0.96	1.24	0.95

Παράρτημα 6

Παραβολική ρίψη κυβικών τεμαχίων με λειασμένες ακμές από μάρμα



6.1 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 0^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]
1	2.74	1.45	75.6	18.6	0.53	0.17	2.02
2	2.91	1.51	74.5	27.0	0.52	0.25	1.73
3	2.87	1.50	70.8	24.3	0.52	0.23	1.45
4	2.78	1.71	68.6	14.8	0.62	0.17	1.63
5	3.11	1.61	72.3	32.1	0.52	0.29	1.44
6	2.85	1.51	69.9	27.0	0.53	0.26	1.38
7	2.88	1.67	72.9	27.4	0.58	0.28	1.75
\bar{x}	2.88	1.57	72.1	24.5	0.55	0.24	1.63
s	0.11	0.09	2.3	5.4	0.04	0.05	0.21
min	2.74	1.45	68.6	14.8	0.52	0.17	1.38
max	3.11	1.71	75.6	32.1	0.62	0.29	2.02

6.2 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 15^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]
1	2.79	1.72	54.9	32.3	0.62	0.40	0.91
2	2.75	1.74	53.8	19.9	0.63	0.27	1.01
3	2.77	1.53	56.5	37.1	0.55	0.40	0.80
4	2.77	1.70	53.9	22.9	0.61	0.29	0.96
5	2.86	1.78	56.9	32.1	0.62	0.40	0.96
6	2.77	1.57	55.3	45.1	0.57	0.49	0.70
7	2.67	1.67	54.2	19.3	0.62	0.25	1.01
\bar{x}	2.77	1.67	55.1	29.8	0.60	0.36	0.91
s	0.05	0.08	1.1	8.9	0.03	0.08	0.11
min	2.67	1.53	53.8	19.3	0.55	0.25	0.70
max	2.86	1.78	56.9	45.1	0.63	0.49	1.01

6.3 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 30^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]
1	2.63	1.61	40.0	41.1	0.61	0.62	0.60
2	2.67	1.60	41.2	30.7	0.60	0.46	0.68
3	2.71	1.83	38.1	30.3	0.68	0.55	0.74
4	2.53	1.55	43.5	52.5	0.61	0.71	0.52
5	2.51	1.24	41.0	38.2	0.50	0.47	0.52
6	2.54	2.00	39.4	19.9	0.79	0.42	0.96
7	2.66	1.66	40.5	32.6	0.62	0.52	0.69
\bar{x}	2.61	1.64	40.5	35.0	0.63	0.54	0.67
s	0.07	0.22	1.6	9.5	0.08	0.09	0.14
min	2.51	1.24	38.1	19.9	0.50	0.42	0.52
max	2.71	2.00	43.5	52.5	0.79	0.71	0.96

6.4 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 45^\circ$

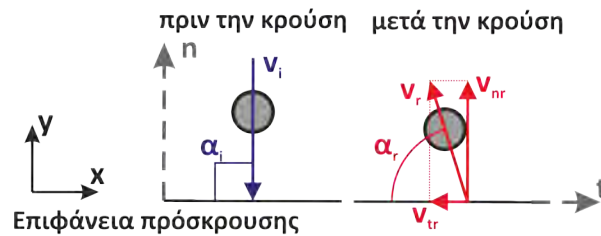
α/α	v_i [ms ⁻¹]	v_r [ms ⁻¹]	α_i [°]	α_r [°]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]	t_{COR} [-]
1	2.52	1.49	23.6	28.7	0.59	0.71	0.57
2	2.57	1.87	25.8	22.7	0.73	0.64	0.74
3	2.67	1.92	26.3	26.9	0.72	0.73	0.72
4	2.56	1.99	24.6	22.0	0.78	0.70	0.79
5	2.60	1.79	25.8	27.8	0.69	0.74	0.68
6	2.58	1.72	23.3	34.3	0.67	0.95	0.60
7	2.57	1.81	29.3	28.7	0.70	0.69	0.71
\bar{x}	2.58	1.80	25.5	27.3	0.70	0.74	0.69
s	0.04	0.15	1.9	3.8	0.05	0.09	0.07
min	2.52	1.49	23.3	22.0	0.59	0.64	0.57
max	2.67	1.99	29.3	34.3	0.78	0.95	0.79

6.5 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 45^\circ$

α/α	v_i [ms ⁻¹]	v_r [ms ⁻¹]	α_i [°]	α_r [°]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]	t_{COR} [-]
1	2.72	2.46	23.6	28.4	0.91	1.08	0.87
2	2.91	2.21	23.4	34.8	0.76	1.09	0.68
3	2.54	2.26	24.7	16.1	0.89	0.59	0.94
4	2.64	2.16	23.0	33.4	0.82	1.15	0.74
5	2.59	2.46	24.2	21.7	0.95	0.86	0.97
6	2.74	2.02	18.9	27.3	0.74	1.05	0.69
7	2.67	2.01	21.3	22.0	0.75	0.77	0.75
\bar{x}	2.69	2.23	22.7	26.2	0.83	0.94	0.81
s	0.11	0.17	1.9	6.2	0.08	0.19	0.11
min	2.54	2.01	18.9	16.1	0.74	0.59	0.68
max	2.91	2.46	24.7	34.8	0.95	1.15	0.97

Παράρτημα 7

Ελεύθερη πτώση σφαιρικών τεμαχίων από ένεμα τσιμεντοειδούς βάσης



7.1 Διάμετρος σφαίρας $d = 3\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 10\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-1.32	0.95	0.04	0.95	87.6	0.72	0.72
2	-1.32	0.92	-0.02	0.92	88.5	0.70	0.70
3	-1.32	0.91	0.04	0.91	87.2	0.69	0.69
4	-1.32	0.97	-0.02	0.97	89.0	0.74	0.74
5	-1.32	0.96	0.08	0.97	85.5	0.73	0.73
\bar{x}	-1.32	0.94	0.02	0.94	87.6	0.72	0.72
s	0.00	0.02	0.04	0.02	1.2	0.02	0.02
min	-1.32	0.91	-0.02	0.91	85.6	0.69	0.69
max	-1.32	0.97	0.08	0.97	89.0	0.74	0.74

7.2 Διάμετρος σφαίρας $d = 3\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 25\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-2.21	1.48	-0.02	1.48	89.3	0.67	0.67
2	-2.21	1.59	0.01	1.59	89.6	0.72	0.72
3	-2.21	1.55	-0.06	1.55	87.9	0.70	0.70
4	-2.20	1.59	0.01	1.59	89.5	0.72	0.72
5	-2.20	1.53	-0.01	1.53	89.5	0.70	0.70
\bar{x}	-2.20	1.55	-0.01	1.55	89.2	0.70	0.70
s	0.00	0.04	0.03	0.04	0.7	0.02	0.02
min	-2.21	1.48	-0.06	1.48	87.86	0.67	0.67
max	-2.20	1.59	0.01	1.59	89.61	0.72	0.72

7.3 Διάμετρος σφαίρας $d = 3\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 50\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-3.15	2.17	0.13	2.18	86.5	0.69	0.69
2	-3.15	2.18	0.06	2.18	88.4	0.69	0.69
3	-3.15	2.13	0.11	2.13	86.9	0.68	0.67
4	-3.15	2.21	0.08	2.21	87.9	0.70	0.70
5	-3.15	2.21	0.08	2.21	88.0	0.70	0.70
\bar{x}	-3.15	2.18	0.09	2.18	87.5	0.69	0.69
s	0.00	0.03	0.03	0.03	0.7	0.01	0.01
min	-3.15	2.13	0.06	2.13	86.47	0.68	0.67
max	-3.15	2.21	0.13	2.21	88.38	0.70	0.70

7.4 Διάμετρος σφαίρας $d = 3\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 100\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-4.49	2.87	0.05	2.87	89.0	0.64	0.64
2	-4.50	2.98	0.00	2.98	90.0	0.66	0.66
3	-4.49	2.93	0.10	2.93	88.1	0.65	0.65
4	-4.50	2.91	-0.17	2.92	86.7	0.65	0.65
5	-4.49	3.02	0.10	3.02	88.2	0.67	0.67
\bar{x}	-4.49	2.94	0.02	2.95	88.4	0.66	0.66
s	0.00	0.05	0.10	0.05	1.1	0.01	0.01
min	-4.50	2.87	-0.17	2.87	86.74	0.64	0.64
max	-4.49	3.02	0.10	3.02	89.96	0.67	0.67

7.5 Διάμετρος σφαίρας $d = 3\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 200\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]
1	-6.17	3.60	-0.23	3.60	86.3	0.58	0.58
2	-6.16	3.60	0.00	3.60	89.9	0.58	0.58
3	-6.20	3.63	0.06	3.63	89.1	0.59	0.59
4	-6.19	3.80	0.17	3.80	87.5	0.61	0.61
5	-6.18	3.94	0.07	3.94	89.1	0.64	0.64
\bar{x}	-6.18	3.71	0.01	3.72	88.4	0.60	0.60
s	0.01	0.14	0.13	0.13	1.3	0.02	0.02
min	-6.20	3.60	-0.23	3.60	86.26	0.58	0.58
max	-6.16	3.94	0.17	3.94	89.94	0.64	0.64

7.6 Διάμετρος σφαίρας $d = 3\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 300\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]
1	-7.78	4.26	-0.48	4.29	83.6	0.55	0.55
2	-7.83	4.42	-0.25	4.43	86.8	0.57	0.56
3	-7.83	4.26	0.16	4.26	87.9	0.54	0.54
4	-7.85	4.28	-0.34	4.30	85.5	0.55	0.55
5	-7.85	4.33	-0.13	4.33	88.3	0.55	0.55
\bar{x}	-7.83	4.31	-0.21	4.32	86.4	0.55	0.55
s	0.02	0.06	0.21	0.06	1.7	0.01	0.01
min	-7.85	4.26	-0.48	4.26	83.63	0.54	0.54
max	-7.78	4.42	0.16	4.43	88.29	0.57	0.56

7.7 Διάμετρος σφαίρας $d = 4\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 10\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]
1	-1.40	0.92	-0.01	0.92	89.4	0.68	0.66
2	-1.40	0.98	0.07	0.98	85.7	0.70	0.70
3	-1.40	0.95	0.03	0.95	88.3	0.68	0.67
4	-1.40	0.93	0.01	0.93	89.1	0.67	0.67
5	-1.40	0.92	-0.05	0.92	86.8	0.66	0.66
\bar{x}	-1.40	0.94	0.01	0.94	87.9	0.68	0.67
s	0.00	0.02	0.04	0.02	1.4	0.01	0.01
min	-1.40	0.92	-0.05	0.92	85.70	0.66	0.66
max	-1.40	0.98	0.07	0.98	89.42	0.70	0.70

7.8 Διάμετρος σφαίρας $d = 4\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 25\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-2.31	1.41	0.03	1.41	89.0	0.61	0.61
2	-2.22	1.42	0.03	1.42	89.0	0.64	0.64
3	-2.28	1.47	-0.06	1.47	87.6	0.65	0.64
4	-2.35	1.51	0.11	1.52	86.0	0.64	0.64
5	-2.33	1.58	0.06	1.58	87.8	0.64	0.64
\bar{x}	-2.30	1.48	0.03	1.48	87.9	0.64	0.64
s	0.04	0.06	0.05	0.06	1.1	0.01	0.01
min	-2.35	1.41	-0.06	1.41	86.02	0.61	0.61
max	-2.22	1.58	0.11	1.58	88.99	0.65	0.64

7.9 Διάμετρος σφαίρας $d = 4\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 50\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-3.29	1.95	0.04	1.95	88.8	0.59	0.59
2	-3.26	1.91	0.04	1.91	88.8	0.59	0.59
3	-3.25	1.95	0.11	1.95	86.8	0.60	0.60
4	-3.23	1.96	0.01	1.96	89.7	0.60	0.61
5	-3.28	1.96	0.01	1.96	89.7	0.60	0.60
\bar{x}	-3.26	1.95	0.04	1.95	88.8	0.60	0.60
s	0.02	0.02	0.04	0.02	1.1	0.01	0.01
min	-3.29	1.91	0.01	1.91	86.77	0.59	0.59
max	-3.23	1.96	0.11	1.96	89.71	0.60	0.61

7.10 Διάμετρος σφαίρας $d = 4\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 100\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-4.48	2.58	-0.16	2.59	86.6	0.58	0.58
2	-4.56	2.55	0.15	2.56	86.7	0.56	0.56
3	-4.51	2.54	-0.07	2.54	88.5	0.56	0.56
4	-4.45	2.69	-0.02	2.69	89.7	0.60	0.60
5	-4.48	2.59	0.01	2.60	88.7	0.58	0.58
\bar{x}	-4.50	2.59	-0.02	2.59	88.0	0.58	0.58
s	0.04	0.05	0.10	0.05	1.2	0.02	0.02
min	-4.56	2.54	-0.16	2.54	86.57	0.56	0.56
max	-4.45	2.69	0.15	2.69	89.68	0.60	0.60

7.11 Διάμετρος σφαίρας $d = 4\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 200\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]
1	-6.45	3.12	-0.38	3.15	83.1	0.49	0.48
2	-6.41	3.17	0.19	3.18	86.6	0.50	0.50
3	-6.36	3.25	0.27	3.26	85.3	0.51	0.51
4	-6.33	3.21	0.21	3.21	86.2	0.51	0.51
5	-6.34	3.05	0.18	3.05	86.7	0.48	0.48
\bar{x}	-6.38	3.16	0.09	3.17	85.6	0.50	0.50
s	0.05	0.07	0.24	0.07	1.3	0.01	0.01
min	-6.45	3.05	-0.38	3.05	83.08	0.48	0.48
max	-6.33	3.25	0.27	3.26	86.71	0.51	0.51

7.12 Διάμετρος σφαίρας $d = 4\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 300\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]
1	-7.84	3.67	0.16	3.67	87.6	0.47	0.47
2	-7.81	3.91	0.29	3.92	85.7	0.50	0.50
3	-7.81	3.75	0.29	3.76	85.6	0.48	0.48
4	-7.78	3.78	0.18	3.79	87.3	0.49	0.49
5	-7.84	3.88	0.15	3.89	87.8	0.50	0.50
\bar{x}	-7.81	3.80	0.21	3.80	86.8	0.49	0.49
s	0.02	0.09	0.06	0.09	0.9	0.01	0.01
min	-7.84	3.67	0.15	3.67	85.63	0.47	0.47
max	-7.78	3.91	0.29	3.92	87.75	0.50	0.50

7.13 Διάμετρος σφαίρας $d = 5\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 10\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]
1	-1.43	0.81	0.09	0.81	83.6	0.57	0.57
2	-1.44	0.75	0.09	0.75	83.2	0.52	0.52
3	-1.43	0.75	0.02	0.75	88.7	0.53	0.53
4	-1.43	0.83	-0.03	0.83	87.6	0.58	0.58
5	-1.43	0.79	-0.04	0.79	87.2	0.55	0.55
\bar{x}	-1.43	0.79	0.03	0.79	86.1	0.55	0.55
s	0.00	0.03	0.06	0.03	2.3	0.02	0.02
min	-1.44	0.75	-0.04	0.75	83.16	0.52	0.52
max	-1.43	0.83	0.09	0.83	88.68	0.58	0.58

7.14 Διάμετρος σφαίρας $d = 5\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 25\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-2.08	1.04	0.03	1.04	88.2	0.50	0.50
2	-2.08	1.06	0.06	1.06	86.9	0.51	0.51
3	-2.06	1.13	0.00	1.13	89.9	0.55	0.55
4	-2.07	1.10	-0.01	1.10	89.5	0.53	0.53
5	-2.09	1.11	-0.01	1.11	89.5	0.53	0.53
\bar{x}	-2.08	1.09	0.01	1.09	88.8	0.52	0.52
s	0.01	0.03	0.03	0.03	1.1	0.02	0.02
min	-2.09	1.04	-0.01	1.04	86.92	0.50	0.50
max	-2.06	1.13	0.06	1.13	89.90	0.55	0.55

7.15 Διάμετρος σφαίρας $d = 5\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 50\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-3.07	1.55	0.05	1.55	88.2	0.51	0.50
2	-3.09	1.58	0.03	1.58	89.0	0.51	0.51
3	-3.07	1.52	0.13	1.53	85.0	0.50	0.49
4	-3.06	1.56	0.05	1.56	88.3	0.51	0.51
5	-3.06	1.56	0.05	1.56	88.3	0.51	0.51
\bar{x}	-3.07	1.55	0.06	1.56	87.8	0.51	0.51
s	0.01	0.02	0.04	0.02	1.4	0.01	0.01
min	-3.09	1.52	0.03	1.53	84.97	0.50	0.49
max	-3.06	1.58	0.13	1.58	89.02	0.51	0.51

7.16 Διάμετρος σφαίρας $d = 5\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 100\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-4.38	1.99	0.03	1.99	89.1	0.45	0.45
2	-4.39	1.98	0.07	1.99	87.9	0.45	0.45
3	-4.37	2.01	0.17	2.01	85.2	0.46	0.46
4	-4.33	2.05	0.10	2.05	87.2	0.47	0.47
5	-4.39	2.59	0.01	2.02	88.7	0.46	0.46
\bar{x}	-4.37	2.12	0.08	2.01	87.6	0.46	0.46
s	0.02	0.24	0.06	0.02	1.4	0.01	0.05
min	-4.39	1.98	0.01	1.99	85.16	0.45	0.45
max	-4.33	2.59	0.17	2.05	89.14	0.47	0.47

7.17 Διάμετρος σφαίρας $d = 5\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 200\text{cm}$

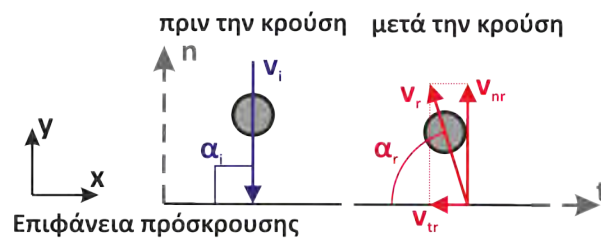
α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]
1	-6.26	2.65	0.25	2.67	84.0	0.43	0.42
2	-6.29	2.70	-0.05	2.70	88.7	0.43	0.43
3	-6.28	2.60	0.14	2.60	86.2	0.41	0.41
4	-6.27	2.48	0.09	2.48	87.6	0.40	0.40
5	-6.26	2.73	0.00	2.73	90.0	0.44	0.44
\bar{x}	-6.27	2.63	0.09	2.64	87.3	0.42	0.42
s	0.01	0.09	0.11	0.09	2.1	0.01	0.01
min	-6.29	2.48	-0.05	2.48	83.98	0.40	0.40
max	-6.26	2.73	0.25	2.73	89.95	0.44	0.44

7.18 Διάμετρος σφαίρας $d = 5\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 300\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]
1	-7.77	3.22	0.14	3.22	87.5	0.41	0.41
2	-7.86	3.14	-0.38	3.17	83.2	0.40	0.40
3	-7.78	3.18	0.46	3.22	81.8	0.41	0.41
4	-7.81	3.33	-0.55	3.38	80.7	0.43	0.43
5	-7.83	3.27	-0.69	3.34	78.1	0.43	0.42
\bar{x}	-7.81	3.23	-0.20	3.26	82.2	0.42	0.41
s	0.03	0.07	0.43	0.08	3.1	0.01	0.01
min	-7.86	3.14	-0.69	3.17	78.06	0.40	0.40
max	-7.77	3.33	0.46	3.38	87.50	0.43	0.43

Παράρτημα 8

Ελεύθερη πτώση σφαιρικών τεμαχίων από εποξειδική ρητίνη



8.1 Διάμετρος σφαίρας $d = 3\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 10\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-1.41	1.15	-0.03	1.15	88.5	0.82	0.82
2	-1.40	1.17	0.01	1.17	89.5	0.84	0.84
3	-1.41	1.15	0.02	1.15	89.0	0.82	0.82
4	-1.41	1.17	-0.01	1.17	89.4	0.83	0.83
5	-1.40	1.16	-0.01	1.16	89.5	0.82	0.82
\bar{x}	-1.40	1.16	0.00	1.16	89.2	0.83	0.83
s	0.00	0.01	0.02	0.01	0.4	0.01	0.01
min	-1.41	1.15	-0.03	1.15	88.5	0.82	0.82
max	-1.40	1.17	0.02	1.17	89.5	0.84	0.84

8.2 Διάμετρος σφαίρας $d = 3\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 25\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-2.19	1.80	-0.03	1.80	88.9	0.82	0.82
2	-2.19	1.81	0.01	1.81	89.7	0.83	0.83
3	-2.19	1.81	0.09	1.81	87.2	0.83	0.83
4	-2.19	1.79	-0.01	1.79	89.6	0.82	0.82
5	-2.19	1.79	0.07	1.80	87.7	0.82	0.82
\bar{x}	-2.19	1.80	0.02	1.80	88.6	0.82	0.82
s	0.00	0.01	0.05	0.01	1.0	0.01	0.01
min	-2.19	1.79	-0.03	1.79	87.2	0.82	0.82
max	-2.19	1.81	0.09	1.81	89.7	0.83	0.83

8.3 Διάμετρος σφαίρας $d = 3\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 50\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-3.09	2.50	-0.02	2.50	89.7	0.81	0.81
2	-3.10	2.46	0.01	2.46	89.8	0.79	0.79
3	-3.10	2.48	0.00	2.48	90.0	0.80	0.80
4	-3.09	2.49	0.07	2.49	88.4	0.80	0.80
5	-3.10	2.49	0.07	2.49	88.4	0.80	0.80
\bar{x}	-3.10	2.48	0.03	2.48	89.2	0.80	0.80
s	0.00	0.01	0.04	0.01	0.7	0.00	0.00
min	-3.10	2.46	-0.02	2.46	88.4	0.79	0.79
max	-3.09	2.50	0.07	2.50	90.0	0.81	0.81

8.4 Διάμετρος σφαίρας $d = 3\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 100\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-4.45	3.43	0.14	3.43	87.7	0.77	0.77
2	-4.44	3.35	0.24	3.36	86.0	0.76	0.76
3	-4.44	3.46	0.08	3.46	88.6	0.78	0.78
4	-4.45	3.38	0.15	3.38	87.5	0.76	0.76
5	-4.44	3.44	0.09	3.45	88.4	0.78	0.78
\bar{x}	-4.44	3.41	0.14	3.42	87.7	0.77	0.77
s	0.01	0.04	0.05	0.04	0.9	0.01	0.01
min	-4.45	3.35	0.08	3.36	86.0	0.76	0.76
max	-4.44	3.46	0.24	3.46	88.6	0.78	0.78

8.5 Διάμετρος σφαίρας $d = 3\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 200\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]
1	-6.28	4.70	0.09	4.70	88.9	0.75	0.75
2	-6.25	4.70	0.05	4.70	89.4	0.75	0.75
3	-6.25	4.63	0.00	4.63	90.0	0.74	0.74
4	-6.25	4.60	0.31	4.61	86.1	0.74	0.74
5	-6.28	4.66	0.15	4.66	88.1	0.74	0.74
\bar{x}	-6.26	4.66	0.12	4.66	88.5	0.74	0.74
s	0.01	0.04	0.11	0.04	1.3	0.01	0.01
min	-6.28	4.60	0.00	4.61	86.1	0.74	0.74
max	-6.25	4.70	0.31	4.70	90.0	0.75	0.75

8.6 Διάμετρος σφαίρας $d = 3\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 300\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]
1	-8.10	5.86	-0.69	5.90	83.3	0.73	0.72
2	-7.96	5.78	-0.19	5.79	88.1	0.73	0.73
3	-8.07	5.91	-0.02	5.91	89.8	0.73	0.73
4	-7.94	5.80	-0.25	5.80	87.5	0.73	0.73
5	-7.98	5.81	-0.25	5.82	87.5	0.73	0.73
\bar{x}	-8.01	5.83	-0.28	5.84	87.3	0.73	0.73
s	0.06	0.05	0.22	0.05	2.1	0.00	0.00
min	-8.10	5.78	-0.69	5.79	83.3	0.73	0.72
max	-7.94	5.91	-0.02	5.91	89.8	0.73	0.73

8.7 Διάμετρος σφαίρας $d = 3\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 450\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]
1	-9.27	6.62	-0.97	6.70	81.7	0.72	0.71
2	-9.29	6.69	0.58	6.71	85.0	0.72	0.72
3	-9.31	6.52	-0.32	6.53	87.2	0.70	0.70
4	-9.31	6.65	-0.15	6.66	88.7	0.72	0.71
5	-9.30	6.56	-0.15	6.56	88.7	0.71	0.71
\bar{x}	-9.29	6.61	-0.20	6.63	86.3	0.71	0.71
s	0.01	0.06	0.49	0.07	2.7	0.01	0.01
min	-9.31	6.52	-0.97	6.53	81.7	0.70	0.70
max	-9.27	6.69	0.58	6.71	88.7	0.72	0.72

8.8 Διάμετρος σφαίρας $d = 4\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 10\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-1.40	1.12	0.06	1.12	86.9	0.80	0.80
2	-1.40	1.12	0.04	1.12	88.1	0.80	0.80
3	-1.40	1.12	-0.01	1.12	89.3	0.80	0.80
4	-1.40	1.12	-0.08	1.13	85.8	0.80	0.80
5	-1.40	1.12	-0.04	1.12	88.1	0.80	0.80
\bar{x}	-1.40	1.12	-0.01	1.12	87.6	0.80	0.80
s	0.00	0.00	0.05	0.00	1.2	0.00	0.00
min	-1.40	1.12	-0.08	1.12	85.8	0.80	0.80
max	-1.40	1.12	0.06	1.13	89.3	0.80	0.80

8.9 Διάμετρος σφαίρας $d = 4\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 25\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-2.19	1.69	0.05	1.70	88.4	0.77	0.77
2	-2.20	1.71	-0.07	1.71	87.6	0.78	0.78
3	-2.19	1.66	-0.05	1.66	88.1	0.76	0.76
4	-2.20	1.66	0.01	1.66	89.6	0.76	0.76
5	-2.19	1.66	0.00	1.66	89.8	0.75	0.75
\bar{x}	-2.20	1.68	-0.01	1.68	88.7	0.76	0.76
s	0.00	0.02	0.04	0.02	0.9	0.01	0.01
min	-2.20	1.66	-0.07	1.66	87.6	0.75	0.75
max	-2.19	1.71	0.05	1.71	89.8	0.78	0.78

8.10 Διάμετρος σφαίρας $d = 4\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 50\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-3.15	2.37	0.08	2.37	88.0	0.75	0.75
2	-3.16	2.31	0.07	2.31	88.2	0.73	0.73
3	-3.20	2.38	-0.02	2.38	89.6	0.74	0.74
4	-3.12	2.35	0.00	2.35	89.9	0.75	0.75
5	-3.14	2.36	0.05	2.36	88.9	0.75	0.75
\bar{x}	-3.15	2.35	0.04	2.35	88.9	0.75	0.75
s	0.03	0.02	0.04	0.02	0.8	0.01	0.01
min	-3.20	2.31	-0.02	2.31	88.0	0.73	0.73
max	-3.12	2.38	0.08	2.38	89.9	0.75	0.75

8.11 Διάμετρος σφαίρας $d = 4\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 100\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]
1	-4.46	3.21	-0.03	3.21	89.5	0.72	0.72
2	-4.43	3.10	-0.13	3.10	87.6	0.70	0.70
3	-4.45	3.06	-0.09	3.06	88.4	0.69	0.69
4	-4.43	3.18	0.01	3.18	89.8	0.72	0.72
5	-4.44	3.08	0.01	3.08	89.8	0.69	0.69
\bar{x}	-4.44	3.13	-0.04	3.13	89.0	0.70	0.70
s	0.01	0.06	0.06	0.06	0.9	0.01	0.01
min	-4.46	3.06	-0.13	3.06	87.6	0.69	0.69
max	-4.43	3.21	0.01	3.21	89.8	0.72	0.72

8.12 Διάμετρος σφαίρας $d = 4\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 200\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]
1	-6.27	4.33	0.24	4.33	86.8	0.69	0.69
2	-6.33	4.34	0.16	4.34	87.9	0.69	0.69
3	-6.29	4.40	0.20	4.40	87.4	0.70	0.70
4	-6.29	4.42	0.12	4.43	88.4	0.70	0.70
5	-6.32	4.38	0.06	4.38	89.3	0.69	0.69
\bar{x}	-6.30	4.37	0.16	4.38	87.9	0.69	0.69
s	0.02	0.04	0.06	0.04	0.9	0.01	0.01
min	-6.33	4.33	0.06	4.33	86.8	0.69	0.69
max	-6.27	4.42	0.24	4.43	89.3	0.70	0.70

8.13 Διάμετρος σφαίρας $d = 4\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 300\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]
1	-7.83	5.42	0.04	5.42	89.6	0.69	0.69
2	-7.81	5.32	0.40	5.33	85.7	0.68	0.68
3	-7.84	5.30	-0.03	5.30	89.6	0.68	0.68
4	-7.80	5.35	-0.37	5.36	86.0	0.69	0.69
5	-7.87	5.32	-0.12	5.32	88.7	0.68	0.68
\bar{x}	-7.83	5.34	-0.02	5.35	87.9	0.68	0.68
s	0.02	0.04	0.25	0.04	1.7	0.01	0.01
min	-7.87	5.30	-0.37	5.30	85.7	0.68	0.68
max	-7.80	5.42	0.40	5.42	89.6	0.69	0.69

8.14 Διάμετρος σφαίρας $d = 4\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 450\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-9.30	6.26	-0.13	6.26	88.9	0.67	0.67
2	-9.30	6.28	0.31	6.29	87.2	0.68	0.67
3	-9.31	6.13	0.17	6.13	88.4	0.66	0.66
4	-9.30	6.25	-0.18	6.25	88.4	0.67	0.67
5	-9.30	6.18	-0.18	6.18	88.4	0.66	0.66
\bar{x}	-9.30	6.22	0.00	6.22	88.2	0.67	0.67
s	0.00	0.06	0.20	0.06	0.6	0.01	0.01
min	-9.31	6.13	-0.18	6.13	87.2	0.66	0.66
max	-9.30	6.28	0.31	6.29	88.9	0.68	0.67

8.15 Διάμετρος σφαίρας $d = 5\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 10\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-1.20	0.89	0.05	0.90	86.8	0.75	0.71
2	-1.19	0.90	0.05	0.90	86.6	0.75	0.75
3	-1.21	0.88	0.03	0.88	88.2	0.73	0.70
4	-1.16	0.84	0.01	0.84	89.4	0.72	0.69
5	-1.20	0.88	0.03	0.88	88.3	0.74	0.70
\bar{x}	-1.19	0.88	0.03	0.88	87.9	0.74	0.71
s	0.02	0.02	0.02	0.02	1.1	0.01	0.02
min	-1.21	0.84	0.01	0.84	86.6	0.72	0.69
max	-1.16	0.90	0.05	0.90	89.4	0.75	0.75

8.16 Διάμετρος σφαίρας $d = 5\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 25\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-2.20	1.57	0.05	1.57	88.3	0.71	0.71
2	-2.19	1.58	0.08	1.58	87.1	0.72	0.72
3	-2.21	1.57	-0.05	1.57	88.0	0.71	0.71
4	-2.20	1.57	0.06	1.57	87.8	0.71	0.71
5	-2.19	1.54	0.06	1.55	87.9	0.70	0.70
\bar{x}	-2.20	1.56	0.04	1.57	87.8	0.71	0.71
s	0.01	0.01	0.05	0.01	0.4	0.01	0.01
min	-2.21	1.54	-0.05	1.55	87.1	0.70	0.70
max	-2.19	1.58	0.08	1.58	88.3	0.72	0.72

8.17 Διάμετρος σφαίρας $d = 5\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 50\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]
1	-3.05	2.08	0.09	2.08	87.4	0.68	0.68
2	-3.03	2.06	-0.07	2.06	88.1	0.68	0.68
3	-3.02	2.09	0.03	2.09	89.1	0.69	0.69
4	-3.03	2.08	-0.14	2.09	86.3	0.69	0.69
5	-3.05	2.05	-0.05	2.05	88.6	0.67	0.67
\bar{x}	-3.04	2.07	-0.03	2.07	87.9	0.68	0.68
s	0.01	0.01	0.08	0.02	1.0	0.01	0.01
min	-3.05	2.05	-0.14	2.05	86.3	0.67	0.67
max	-3.02	2.09	0.09	2.09	89.1	0.69	0.69

8.18 Διάμετρος σφαίρας $d = 5\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 100\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]
1	-4.40	2.90	0.12	2.90	87.6	0.66	0.66
2	-4.40	2.90	0.00	2.90	90.0	0.66	0.66
3	-4.44	2.86	0.08	2.86	88.4	0.64	0.64
4	-4.43	2.84	0.11	2.84	87.7	0.64	0.64
5	-4.41	2.90	0.18	2.91	86.5	0.66	0.66
\bar{x}	-4.42	2.88	0.10	2.88	88.0	0.65	0.65
s	0.02	0.03	0.06	0.03	1.1	0.01	0.01
min	-4.44	2.84	0.00	2.84	86.5	0.64	0.64
max	-4.40	2.90	0.18	2.91	90.0	0.66	0.66

8.19 Διάμετρος σφαίρας $d = 5\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 200\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]
1	-6.26	4.00	0.17	4.00	87.5	0.64	0.64
2	-6.28	4.07	0.16	4.08	87.7	0.65	0.65
3	-6.29	3.98	0.12	3.98	88.3	0.63	0.63
4	-6.24	4.00	0.17	4.00	87.6	0.64	0.64
5	-6.26	3.88	0.07	3.88	88.9	0.62	0.62
\bar{x}	-6.27	3.99	0.14	3.99	88.0	0.64	0.64
s	0.01	0.06	0.04	0.06	0.5	0.01	0.01
min	-6.29	3.88	0.07	3.88	87.5	0.62	0.62
max	-6.24	4.07	0.17	4.08	88.9	0.65	0.65

8.20 Διάμετρος σφαίρας $d = 5\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 300\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-7.81	4.99	-0.14	4.99	88.4	0.64	0.64
2	-7.83	4.71	0.06	4.71	89.3	0.60	0.60
3	-7.85	4.83	0.34	4.85	85.9	0.62	0.62
4	-7.81	4.82	-0.15	4.82	88.2	0.62	0.62
5	-7.81	4.78	-0.34	4.80	86.0	0.61	0.61
\bar{x}	-7.82	4.83	-0.05	4.83	87.6	0.62	0.62
s	0.02	0.09	0.23	0.09	1.4	0.01	0.01
min	-7.85	4.71	-0.34	4.71	85.9	0.60	0.60
max	-7.81	4.99	0.34	4.99	89.3	0.64	0.64

8.21 Διάμετρος σφαίρας $d = 5\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 450\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-9.27	5.73	0.13	5.73	88.7	0.62	0.62
2	-9.29	5.55	0.08	5.56	89.1	0.60	0.60
3	-9.24	5.57	0.12	5.57	88.8	0.60	0.60
4	-9.25	5.63	0.05	5.63	89.5	0.61	0.61
5	-9.26	5.63	0.17	5.63	88.3	0.61	0.61
\bar{x}	-9.26	5.62	0.11	5.62	88.9	0.61	0.61
s	0.02	0.06	0.04	0.06	0.4	0.01	0.01
min	-9.29	5.55	0.05	5.56	88.3	0.60	0.60
max	-9.24	5.73	0.17	5.73	89.5	0.62	0.62

8.22 Διάμετρος σφαίρας $d = 6\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 10\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-1.38	0.96	0.01	0.96	89.5	0.70	0.70
2	-1.38	0.95	0.00	0.95	89.9	0.69	0.69
3	-1.38	0.95	0.01	0.95	89.6	0.69	0.69
4	-1.38	0.96	0.00	0.96	89.8	0.69	0.69
5	-1.39	0.94	0.01	0.94	89.1	0.68	0.68
\bar{x}	-1.38	0.95	0.01	0.95	89.6	0.69	0.69
s	0.00	0.01	0.01	0.01	0.3	0.01	0.01
min	-1.39	0.94	0.00	0.94	89.1	0.68	0.68
max	-1.38	0.96	0.01	0.96	89.9	0.70	0.70

8.23 Διάμετρος σφαίρας $d = 6\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 25\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]
1	-2.20	1.43	0.01	1.43	89.4	0.65	0.65
2	-2.20	1.44	0.04	1.44	88.3	0.65	0.65
3	-2.21	1.45	0.06	1.45	87.8	0.66	0.66
4	-2.21	1.43	0.02	1.43	89.3	0.65	0.65
5	-2.20	1.43	0.02	1.44	89.3	0.65	0.65
\bar{x}	-2.20	1.44	0.03	1.44	88.8	0.65	0.65
s	0.00	0.01	0.02	0.01	0.6	0.00	0.00
min	-2.21	1.43	0.01	1.43	87.8	0.65	0.65
max	-2.20	1.45	0.06	1.45	89.4	0.66	0.66

8.24 Διάμετρος σφαίρας $d = 6\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 50\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]
1	-3.09	2.00	0.04	2.00	88.8	0.65	0.65
2	-3.09	2.00	0.02	2.00	89.3	0.65	0.65
3	-3.07	2.01	0.03	2.01	89.0	0.65	0.65
4	-3.07	2.00	0.04	2.00	88.8	0.65	0.65
5	-3.08	2.01	0.05	2.01	88.5	0.65	0.65
\bar{x}	-3.08	2.00	0.04	2.00	88.9	0.65	0.65
s	0.01	0.00	0.01	0.00	0.3	0.00	0.00
min	-3.09	2.00	0.02	2.00	88.5	0.65	0.65
max	-3.07	2.01	0.05	2.01	89.3	0.65	0.65

8.25 Διάμετρος σφαίρας $d = 6\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 100\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]
1	-4.39	2.74	0.11	2.74	87.7	0.62	0.62
2	-4.34	2.70	0.16	2.70	86.6	0.62	0.62
3	-4.30	2.68	0.11	2.68	87.7	0.62	0.62
4	-4.39	2.75	0.23	2.76	85.1	0.63	0.63
5	-4.32	2.73	0.08	2.73	88.2	0.63	0.63
\bar{x}	-4.35	2.72	0.14	2.72	87.1	0.63	0.63
s	0.04	0.03	0.05	0.03	1.1	0.00	0.00
min	-4.39	2.68	0.08	2.68	85.1	0.62	0.62
max	-4.30	2.75	0.23	2.76	88.2	0.63	0.63

8.26 Διάμετρος σφαίρας $d = 6\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 200\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-6.15	3.52	0.33	3.53	84.7	0.57	0.57
2	-6.22	3.63	0.46	3.66	82.8	0.59	0.58
3	-6.21	3.50	0.45	3.53	82.6	0.57	0.56
4	-6.19	3.66	0.43	3.69	83.4	0.60	0.59
5	-6.15	3.64	0.34	3.65	84.7	0.59	0.59
\bar{x}	-6.18	3.59	0.40	3.61	83.6	0.58	0.58
s	0.03	0.07	0.06	0.07	0.9	0.01	0.01
min	-6.22	3.50	0.33	3.53	82.6	0.57	0.56
max	-6.15	3.66	0.46	3.69	84.7	0.60	0.59

8.27 Διάμετρος σφαίρας $d = 6\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 300\text{cm}$

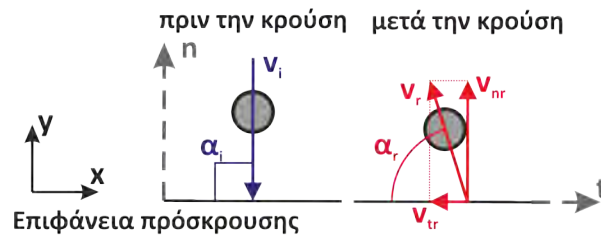
α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-7.81	4.37	-0.07	4.38	89.0	0.56	0.56
2	-7.84	4.23	0.07	4.23	89.0	0.54	0.54
3	-7.85	4.28	-0.34	4.30	85.5	0.55	0.55
4	-7.82	4.34	-0.18	4.35	87.6	0.56	0.56
5	-7.85	4.22	-0.07	4.22	89.1	0.54	0.54
\bar{x}	-7.83	4.29	-0.12	4.29	88.1	0.55	0.55
s	0.01	0.06	0.14	0.06	1.4	0.01	0.01
min	-7.85	4.22	-0.34	4.22	85.5	0.54	0.54
max	-7.81	4.37	0.07	4.38	89.1	0.56	0.56

8.28 Διάμετρος σφαίρας $d = 6\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 450\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-9.28	5.10	-0.14	5.10	88.5	0.55	0.55
2	-9.20	5.01	-0.27	5.01	86.9	0.55	0.54
3	-9.31	4.87	0.31	4.88	86.4	0.52	0.52
4	-9.25	5.01	0.07	5.01	89.2	0.54	0.54
5	-9.27	4.92	-0.16	4.92	88.2	0.53	0.53
\bar{x}	-9.26	4.98	-0.04	4.99	87.8	0.54	0.54
s	0.04	0.08	0.21	0.08	1.0	0.01	0.01
min	-9.31	4.87	-0.27	4.88	86.4	0.52	0.52
max	-9.20	5.10	0.31	5.10	89.2	0.55	0.55

Παράρτημα 9

Ελεύθερη πτώση σφαιρικών τεμαχίων από μάρμαρο



9.1 Διάμετρος σφαίρας $d = 2.7\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 12.5\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-1.34	0.99	0.01	0.99	89.2	0.74	0.74
2	-1.34	1.03	-0.07	1.03	86.2	0.77	0.77
3	-1.34	1.01	-0.01	1.01	89.2	0.76	0.76
4	-1.34	1.01	0.03	1.01	88.1	0.75	0.75
5	-1.34	1.00	0.00	1.00	89.7	0.74	0.74
\bar{x}	-1.34	1.01	-0.01	1.01	88.5	0.75	0.75
s	0.00	0.01	0.03	0.01	1.3	0.01	0.01
min	-1.34	0.99	-0.07	0.99	86.2	0.74	0.74
max	-1.34	1.03	0.03	1.03	89.7	0.77	0.77

9.2 Διάμετρος σφαίρας $d = 2.7\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 25\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-1.97	1.47	-0.02	1.47	89.2	0.74	0.74
2	-1.96	1.42	-0.04	1.43	88.4	0.73	0.73
3	-1.96	1.46	-0.02	1.46	89.4	0.75	0.75
4	-1.97	1.45	0.08	1.46	86.8	0.74	0.74
5	-1.97	1.47	-0.04	1.47	88.4	0.75	0.75
\bar{x}	-1.97	1.46	-0.01	1.46	88.4	0.74	0.74
s	0.01	0.02	0.05	0.02	0.9	0.01	0.01
min	-1.97	1.42	-0.04	1.43	86.8	0.73	0.73
max	-1.96	1.47	0.08	1.47	89.4	0.75	0.75

9.3 Διάμετρος σφαίρας $d = 2.7\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 50\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-3.02	2.23	0.03	2.23	89.3	0.74	0.74
2	-3.01	2.07	-0.08	2.07	87.8	0.69	0.69
3	-3.00	2.21	-0.16	2.21	86.0	0.74	0.74
4	-3.02	2.14	-0.01	2.14	89.6	0.71	0.71
5	-2.99	2.16	0.02	2.16	89.6	0.72	0.72
\bar{x}	-3.00	2.16	-0.04	2.16	88.4	0.72	0.72
s	0.01	0.06	0.07	0.06	1.4	0.02	0.02
min	-3.02	2.07	-0.16	2.07	86.0	0.69	0.69
max	-2.99	2.23	0.03	2.23	89.6	0.74	0.74

9.4 Διάμετρος σφαίρας $d = 2.7\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 100\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-4.29	3.05	-0.25	3.06	85.3	0.71	0.71
2	-4.28	3.09	-0.23	3.10	85.8	0.73	0.72
3	-4.31	3.02	-0.16	3.02	86.9	0.70	0.70
4	-4.30	2.92	-0.26	2.93	85.0	0.68	0.68
5	-4.36	3.04	-0.22	3.05	85.9	0.70	0.70
\bar{x}	-4.31	3.02	-0.22	3.03	85.8	0.70	0.70
s	0.03	0.06	0.03	0.06	0.7	0.01	0.01
min	-4.36	2.92	-0.26	2.93	85.0	0.68	0.68
max	-4.28	3.09	-0.16	3.10	86.9	0.73	0.72

9.5 Διάμετρος σφαίρας $d = 3\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 12.5\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]
1	-1.32	0.97	0.05	0.97	86.9	0.74	0.74
2	-1.32	0.96	0.01	0.96	89.6	0.73	0.73
3	-1.33	0.96	0.00	0.96	89.8	0.72	0.72
4	-1.31	0.99	-0.02	0.99	88.7	0.75	0.75
5	-1.32	0.98	-0.05	0.98	87.1	0.75	0.75
\bar{x}	-1.32	0.97	0.00	0.97	88.4	0.74	0.74
s	0.01	0.01	0.03	0.01	1.2	0.01	0.01
min	-1.33	0.96	-0.05	0.96	86.9	0.72	0.72
max	-1.31	0.99	0.05	0.99	89.8	0.75	0.75

9.6 Διάμετρος σφαίρας $d = 3\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 25\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]
1	-1.98	1.43	-0.01	1.43	89.6	0.72	0.72
2	-1.94	1.44	0.01	1.44	89.8	0.74	0.74
3	-1.94	1.38	0.06	1.38	87.7	0.71	0.71
4	-1.94	1.41	0.01	1.41	89.4	0.72	0.72
5	-1.95	1.39	0.07	1.39	87.1	0.71	0.71
\bar{x}	-1.95	1.41	0.03	1.41	88.7	0.72	0.72
s	0.02	0.02	0.03	0.02	1.1	0.01	0.01
min	-1.98	1.38	-0.01	1.38	87.1	0.71	0.71
max	-1.94	1.44	0.07	1.44	89.8	0.74	0.74

9.7 Διάμετρος σφαίρας $d = 3\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 50\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]
1	-3.02	2.13	0.03	2.13	89.2	0.71	0.71
2	-2.99	2.12	-0.14	2.12	86.2	0.71	0.71
3	-3.00	2.04	-0.02	2.04	89.5	0.68	0.68
4	-3.00	2.11	-0.08	2.11	87.9	0.70	0.70
5	-3.01	2.16	0.06	2.16	88.4	0.72	0.72
\bar{x}	-3.00	2.11	-0.03	2.11	88.2	0.70	0.70
s	0.01	0.04	0.07	0.04	1.2	0.01	0.01
min	-3.02	2.04	-0.14	2.04	86.2	0.68	0.68
max	-2.99	2.16	0.06	2.16	89.5	0.72	0.72

9.8 Διάμετρος σφαίρας $d = 3\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 100\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-4.32	2.98	-0.09	2.98	88.2	0.69	0.69
2	-4.34	2.86	0.02	2.86	89.7	0.66	0.66
3	-4.33	2.98	-0.04	2.98	89.1	0.69	0.69
4	-4.30	3.01	-0.09	3.01	88.3	0.70	0.70
5	-4.32	2.89	-0.05	2.89	89.0	0.67	0.67
\bar{x}	-4.32	2.95	-0.05	2.95	88.9	0.68	0.68
s	0.01	0.06	0.04	0.06	0.6	0.01	0.01
min	-4.34	2.86	-0.09	2.86	88.2	0.66	0.66
max	-4.30	3.01	0.02	3.01	89.7	0.70	0.70

9.9 Διάμετρος σφαίρας $d = 3.4\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 12.5\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-1.29	0.92	0.00	0.92	89.9	0.71	0.71
2	-1.29	0.91	0.01	0.91	89.5	0.70	0.70
3	-1.30	0.90	-0.04	0.90	87.2	0.69	0.69
4	-1.30	0.89	0.05	0.89	86.6	0.69	0.69
5	-1.30	0.92	0.02	0.92	88.6	0.70	0.70
\bar{x}	-1.30	0.91	0.01	0.91	88.4	0.70	0.70
s	0.01	0.01	0.03	0.01	1.3	0.01	0.01
min	-1.30	0.89	-0.04	0.89	86.6	0.69	0.69
max	-1.29	0.92	0.05	0.92	89.9	0.71	0.71

9.10 Διάμετρος σφαίρας $d = 3.4\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 25\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-1.93	1.30	0.05	1.30	87.7	0.67	0.67
2	-1.95	1.34	-0.03	1.34	88.9	0.69	0.69
3	-1.96	1.36	-0.01	1.36	89.6	0.70	0.70
4	-1.93	1.35	0.01	1.35	89.4	0.70	0.70
5	-1.95	1.36	0.01	1.36	89.4	0.70	0.70
\bar{x}	-1.94	1.34	0.01	1.34	89.0	0.69	0.69
s	0.01	0.02	0.03	0.02	0.7	0.01	0.01
min	-1.96	1.30	-0.03	1.30	87.7	0.67	0.67
max	-1.93	1.36	0.05	1.36	89.6	0.70	0.70

9.11 Διάμετρος σφαίρας $d = 3.4\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 50\text{cm}$

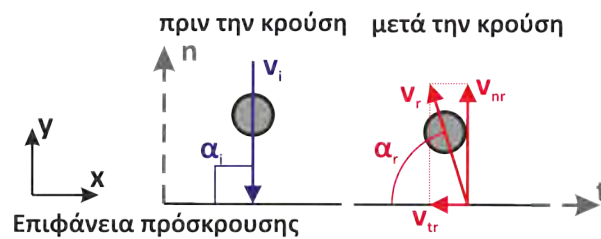
α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]
1	-3.00	1.96	-0.07	1.97	88.0	0.65	0.65
2	-3.01	2.03	0.04	2.03	88.9	0.68	0.68
3	-3.01	2.07	-0.03	2.07	89.1	0.69	0.69
4	-3.01	2.05	-0.08	2.05	87.8	0.68	0.68
5	-3.11	2.07	0.05	2.07	88.5	0.67	0.67
\bar{x}	-3.03	2.04	-0.02	2.04	88.5	0.67	0.67
s	0.04	0.04	0.05	0.04	0.5	0.01	0.01
min	-3.11	1.96	-0.08	1.97	87.8	0.65	0.65
max	-3.00	2.07	0.05	2.07	89.1	0.69	0.69

9.12 Διάμετρος σφαίρας $d = 3.4\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 100\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]
1	-4.34	2.91	-0.09	2.91	88.2	0.67	0.67
2	-4.36	2.79	-0.17	2.80	86.5	0.64	0.64
3	-4.34	2.90	-0.23	2.91	85.6	0.67	0.67
4	-4.35	2.68	-0.21	2.69	85.4	0.62	0.62
5	-4.33	2.90	-0.10	2.91	88.0	0.67	0.67
\bar{x}	-4.35	2.84	-0.16	2.84	86.7	0.65	0.65
s	0.01	0.09	0.06	0.09	1.2	0.02	0.02
min	-4.36	2.68	-0.23	2.69	85.4	0.62	0.62
max	-4.33	2.91	-0.09	2.91	88.2	0.67	0.67

Παράρτημα 10

Ελεύθερη πτώση σφαιρικών τεμαχίων από ψαμμίτη



10.1 Διάμετρος σφαίρας $d = 2.8\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 12.5\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-1.44	1.25	0.06	1.26	87.1	0.87	0.87
2	-1.46	1.25	0.19	1.26	81.5	0.87	0.86
3	-1.44	1.25	0.07	1.25	86.6	0.87	0.87
4	-1.42	1.22	0.03	1.22	88.5	0.86	0.86
5	-1.43	1.24	-0.04	1.24	88.1	0.86	0.86
\bar{x}	-1.44	1.24	0.06	1.25	86.4	0.87	0.86
s	0.01	0.01	0.07	0.01	2.5	0.00	0.00
min	-1.46	1.22	-0.04	1.22	81.5	0.86	0.86
max	-1.42	1.25	0.19	1.26	88.5	0.87	0.87

10.2 Διάμετρος σφαίρας $d = 2.8\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 25\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-2.03	1.75	-0.03	1.75	88.9	0.86	0.86
2	-2.01	1.73	0.03	1.74	89.0	0.86	0.86
3	-2.04	1.76	-0.01	1.76	89.7	0.86	0.86
4	-2.02	1.74	-0.05	1.74	88.2	0.86	0.86
5	-2.03	1.74	-0.05	1.75	88.2	0.86	0.86
\bar{x}	-2.03	1.74	-0.02	1.74	88.8	0.86	0.86
s	0.01	0.01	0.03	0.01	0.6	0.00	0.00
min	-2.04	1.73	-0.05	1.74	88.2	0.86	0.86
max	-2.01	1.76	0.03	1.76	89.7	0.86	0.86

10.3 Διάμετρος σφαίρας $d = 2.8\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 50\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-3.09	2.59	0.07	2.59	88.4	0.84	0.84
2	-3.08	2.58	0.16	2.58	86.5	0.84	0.84
3	-3.07	2.58	0.00	2.58	89.9	0.84	0.84
4	-3.09	2.61	0.02	2.61	89.6	0.84	0.84
5	-3.07	2.62	-0.13	2.62	87.1	0.85	0.85
\bar{x}	-3.08	2.59	0.02	2.60	88.3	0.84	0.84
s	0.01	0.02	0.10	0.02	1.3	0.01	0.01
min	-3.09	2.58	-0.13	2.58	86.5	0.84	0.84
max	-3.07	2.62	0.16	2.62	89.9	0.85	0.85

10.4 Διάμετρος σφαίρας $d = 2.8\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 100\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-4.59	3.87	0.10	3.87	88.5	0.84	0.84
2	-4.53	3.79	-0.08	3.79	88.8	0.84	0.84
3	-4.59	3.85	-0.11	3.85	88.4	0.84	0.84
4	-4.60	3.82	-0.13	3.82	88.0	0.83	0.83
5	-4.60	3.78	-0.15	3.78	87.7	0.82	0.82
\bar{x}	-4.58	3.82	-0.07	3.82	88.3	0.83	0.83
s	0.03	0.03	0.09	0.03	0.4	0.01	0.01
min	-4.60	3.78	-0.15	3.78	87.7	0.82	0.82
max	-4.53	3.87	0.10	3.87	88.8	0.84	0.84

10.5 Διάμετρος σφαίρας $d = 2.8\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 180\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]
1	-5.58	4.62	0.08	4.63	89.0	0.83	0.83
2	-5.58	4.65	0.05	4.65	89.4	0.83	0.83
3	-5.63	4.55	0.53	4.59	83.3	0.81	0.81
4	-5.58	4.52	-0.61	4.57	82.4	0.82	0.81
5	-5.58	4.62	-0.36	4.64	85.6	0.83	0.83
\bar{x}	-5.59	4.60	-0.06	4.61	85.9	0.83	0.82
s	0.02	0.05	0.39	0.03	2.9	0.01	0.01
min	-5.63	4.52	-0.61	4.57	82.4	0.81	0.81
max	-5.58	4.65	0.53	4.65	89.4	0.83	0.83

10.6 Διάμετρος σφαίρας $d = 3.9\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 12.5\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]
1	-1.40	1.18	0.10	1.18	85.0	0.84	0.84
2	-1.39	1.17	0.04	1.17	87.8	0.84	0.84
3	-1.40	1.16	0.03	1.16	88.3	0.83	0.83
4	-1.40	1.16	0.03	1.16	88.6	0.83	0.83
5	-1.40	1.17	0.08	1.17	86.3	0.83	0.83
\bar{x}	-1.40	1.17	0.06	1.17	87.2	0.84	0.84
s	0.00	0.00	0.03	0.01	1.4	0.01	0.00
min	-1.40	1.16	0.03	1.16	85.0	0.83	0.83
max	-1.39	1.18	0.10	1.18	88.6	0.84	0.84

10.7 Διάμετρος σφαίρας $d = 3.9\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 25\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]
1	-2.02	1.67	-0.05	1.67	88.4	0.83	0.83
2	-2.03	1.68	0.00	1.68	90.0	0.83	0.83
3	-2.03	1.70	0.13	1.70	85.8	0.84	0.84
4	-2.02	1.70	0.01	1.70	89.7	0.84	0.84
5	-2.03	1.66	0.09	1.66	87.0	0.82	0.81
\bar{x}	-2.03	1.68	0.03	1.68	88.2	0.83	0.83
s	0.00	0.02	0.06	0.02	1.6	0.01	0.01
min	-2.03	1.66	-0.05	1.66	85.8	0.82	0.81
max	-2.02	1.70	0.13	1.70	90.0	0.84	0.84

10.8 Διάμετρος σφαίρας $d = 3.9\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 50\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-3.10	2.53	-0.15	2.53	86.6	0.82	0.82
2	-3.10	2.54	-0.05	2.54	89.0	0.82	0.82
3	-3.10	2.53	0.08	2.54	88.3	0.82	0.82
4	-3.11	2.52	0.06	2.52	88.6	0.81	0.81
5	-3.11	2.57	-0.05	2.57	88.9	0.83	0.83
\bar{x}	-3.11	2.54	-0.02	2.54	88.3	0.82	0.82
s	0.00	0.02	0.08	0.02	0.9	0.00	0.00
min	-3.11	2.52	-0.15	2.52	86.6	0.81	0.81
max	-3.10	2.57	0.08	2.57	89.0	0.83	0.83

10.9 Διάμετρος σφαίρας $d = 3.9\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 100\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-4.57	3.51	0.04	3.51	89.3	0.77	0.77
2	-4.54	3.60	-0.04	3.60	89.4	0.79	0.79
3	-4.56	3.57	0.09	3.58	88.5	0.78	0.78
4	-4.58	3.66	0.05	3.66	89.3	0.80	0.80
5	-4.53	3.55	0.14	3.56	87.7	0.78	0.78
\bar{x}	-4.56	3.58	0.06	3.58	88.8	0.79	0.79
s	0.02	0.05	0.06	0.05	0.7	0.01	0.01
min	-4.58	3.51	-0.04	3.51	87.7	0.77	0.77
max	-4.53	3.66	0.14	3.66	89.4	0.80	0.80

10.10 Διάμετρος σφαίρας $d = 3.9\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 180\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-5.81	4.46	0.14	4.46	88.1	0.77	0.77
2	-5.67	4.48	-0.26	4.48	86.7	0.79	0.79
3	-5.79	4.58	-0.16	4.58	88.0	0.79	0.79
4	-5.80	4.55	-0.18	4.55	87.8	0.79	0.78
5	-5.83	4.59	0.28	4.60	86.5	0.79	0.79
\bar{x}	-5.78	4.53	-0.03	4.54	87.4	0.78	0.78
s	0.06	0.05	0.21	0.05	0.7	0.01	0.01
min	-5.83	4.46	-0.26	4.46	86.5	0.77	0.77
max	-5.67	4.59	0.28	4.60	88.1	0.79	0.79

10.11 Διάμετρος σφαίρας $d = 4.3\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 12.5\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]
1	-1.40	1.14	0.05	1.14	87.3	0.82	0.82
2	-1.37	1.13	0.03	1.13	88.4	0.82	0.82
3	-1.38	1.14	0.06	1.14	86.8	0.83	0.83
4	-1.41	1.16	0.07	1.16	86.7	0.82	0.82
5	-1.40	1.15	0.05	1.15	87.6	0.82	0.82
\bar{x}	-1.39	1.14	0.05	1.15	87.4	0.82	0.82
s	0.01	0.01	0.01	0.01	0.6	0.00	0.00
min	-1.41	1.13	0.03	1.13	86.7	0.82	0.82
max	-1.37	1.16	0.07	1.16	88.4	0.83	0.83

10.12 Διάμετρος σφαίρας $d = 4.3\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 25\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]
1	-2.04	1.65	0.03	1.65	88.8	0.81	0.81
2	-2.04	1.67	0.02	1.67	89.2	0.82	0.82
3	-2.06	1.68	0.07	1.68	87.4	0.82	0.81
4	-2.03	1.66	0.01	1.66	89.6	0.82	0.82
5	-2.03	1.66	0.10	1.67	86.4	0.82	0.82
\bar{x}	-2.04	1.66	0.05	1.66	88.3	0.82	0.81
s	0.01	0.01	0.04	0.01	1.2	0.01	0.00
min	-2.06	1.65	0.01	1.65	86.4	0.81	0.81
max	-2.03	1.68	0.10	1.68	89.6	0.82	0.82

10.13 Διάμετρος σφαίρας $d = 4.3\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 50\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]
1	-3.13	2.49	0.03	2.49	89.2	0.79	0.79
2	-3.16	2.52	0.05	2.52	89.0	0.80	0.80
3	-3.14	2.49	-0.09	2.49	87.9	0.79	0.79
4	-3.16	2.50	0.06	2.50	88.6	0.79	0.79
5	-3.13	2.48	0.00	2.48	90.0	0.79	0.79
\bar{x}	-3.14	2.49	0.01	2.50	88.9	0.79	0.79
s	0.01	0.01	0.05	0.01	0.7	0.00	0.00
min	-3.16	2.48	-0.09	2.48	87.9	0.79	0.79
max	-3.13	2.52	0.06	2.52	90.0	0.80	0.80

10.14 Διάμετρος σφαίρας $d = 4.3\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 100\text{cm}$

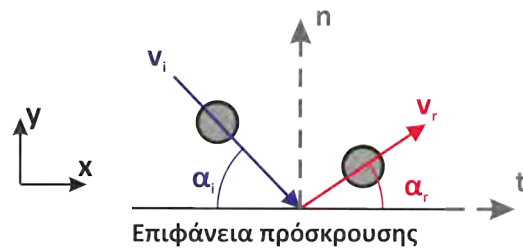
α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-4.57	3.52	-0.16	3.53	87.4	0.77	0.77
2	-4.54	3.48	0.00	3.48	89.9	0.77	0.77
3	-4.56	3.50	-0.15	3.50	87.5	0.77	0.77
4	-4.49	3.48	0.06	3.48	89.1	0.77	0.77
5	-4.53	3.56	-0.02	3.56	89.6	0.79	0.79
\bar{x}	-4.54	3.51	-0.06	3.51	88.7	0.77	0.77
s	0.03	0.03	0.09	0.03	1.1	0.01	0.01
min	-4.57	3.48	-0.16	3.48	87.4	0.77	0.77
max	-4.49	3.56	0.06	3.56	89.9	0.79	0.79

10.15 Διάμετρος σφαίρας $d = 4.3\text{cm}$ και ύψος ρίψης $h_d = 180\text{cm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-5.89	4.49	-0.18	4.49	87.7	0.76	0.76
2	-5.90	4.40	0.13	4.40	88.3	0.75	0.75
3	-5.84	4.42	-0.04	4.42	89.5	0.76	0.76
4	-5.95	4.54	0.27	4.55	86.6	0.76	0.76
5	-5.84	4.47	0.07	4.47	89.1	0.77	0.77
\bar{x}	-5.88	4.46	0.05	4.47	88.2	0.76	0.76
s	0.04	0.05	0.15	0.05	1.0	0.01	0.01
min	-5.95	4.40	-0.18	4.40	86.6	0.75	0.75
max	-5.84	4.54	0.27	4.55	89.5	0.77	0.77

Παράρτημα 11

Παραβολική ρίψη σφαιρικών τεμαχίων από ένεμα τσιμεντοειδούς βάσης



11.1 Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 3.0\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 56^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	2.90	55.1	2.15	38.9	0.57	1.01	0.74
2	3.02	56.6	2.09	45.3	0.59	0.89	0.69
3	2.95	54.8	2.18	40.5	0.59	0.97	0.74
4	2.96	55.3	2.22	39.5	0.58	1.01	0.75
5	2.91	56.7	2.33	38.1	0.59	1.15	0.80
\bar{x}	2.95	55.7	2.19	40.4	0.58	1.01	0.74
s	0.04	0.8	0.08	2.5	0.01	0.08	0.03
min	2.90	54.8	2.09	38.1	0.57	0.89	0.69
max	3.02	56.7	2.33	45.3	0.59	1.15	0.80

11.2 Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 3.6\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 51^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	3.57	50.2	2.75	32.3	0.54	1.02	0.77
2	3.56	50.9	2.75	33.5	0.55	1.02	0.77
3	3.61	50.6	2.72	36.1	0.57	0.96	0.75
4	3.49	49.9	2.61	33.8	0.54	0.97	0.75
5	3.61	51.2	2.74	35.2	0.56	0.99	0.76
\bar{x}	3.57	50.6	2.71	34.2	0.55	0.99	0.76
s	0.04	0.5	0.05	1.3	0.01	0.03	0.01
min	3.49	49.9	2.61	32.3	0.54	0.96	0.75
max	3.61	51.2	2.75	36.1	0.57	1.02	0.77

11.3 Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 3.7\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 47^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	3.70	47.2	3.28	35.0	0.69	1.07	0.88
2	3.67	44.8	3.21	33.6	0.69	1.03	0.87
3	3.67	48.8	3.22	36.1	0.69	1.08	0.88
4	3.73	46.5	3.25	39.5	0.76	0.98	0.87
5	3.80	49.5	3.20	41.8	0.74	0.97	0.84
\bar{x}	3.71	47.4	3.23	37.2	0.71	1.02	0.87
s	0.05	1.7	0.03	3.0	0.03	0.05	0.01
min	3.67	44.8	3.20	33.6	0.69	0.97	0.84
max	3.80	49.5	3.28	41.8	0.76	1.08	0.88

11.4 Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 2.6\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 42^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	2.58	41.4	2.26	33.2	0.72	0.98	0.88
2	2.64	42.5	2.24	29.6	0.62	1.00	0.85
3	2.68	41.4	2.30	31.1	0.67	0.98	0.86
4	2.56	40.8	2.24	32.9	0.73	0.97	0.87
5	2.58	42.6	2.17	29.5	0.61	0.99	0.84
\bar{x}	2.61	41.7	2.24	31.3	0.67	0.98	0.86
s	0.04	0.7	0.04	1.6	0.05	0.01	0.01
min	2.56	40.8	2.17	29.5	0.61	0.97	0.84
max	2.68	42.6	2.30	33.2	0.73	1.00	0.88

11.5 Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 2.1\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 26^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	2.16	25.5	1.98	19.0	0.69	0.96	0.92
2	2.08	27.7	1.92	20.7	0.70	0.97	0.92
3	2.11	26.1	2.00	20.0	0.74	0.99	0.95
4	2.08	26.0	1.99	20.4	0.76	1.00	0.96
5	2.09	26.1	1.95	18.7	0.68	0.99	0.94
\bar{x}	2.10	26.3	1.97	19.7	0.71	0.98	0.94
s	0.03	0.7	0.03	0.8	0.03	0.01	0.02
min	2.08	25.5	1.92	18.7	0.68	0.96	0.92
max	2.16	27.7	2.00	20.7	0.76	1.00	0.96

11.6 Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 3.9\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 32^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	3.97	33.3	3.57	27.5	0.76	0.95	0.90
2	3.69	33.6	3.69	20.2	0.62	1.13	1.00
3	3.88	31.4	3.58	23.5	0.71	0.99	0.92
4	3.68	30.0	3.70	21.5	0.74	1.08	1.00
5	4.09	32.6	3.59	26.1	0.72	0.94	0.88
\bar{x}	3.86	32.2	3.63	23.8	0.71	1.02	0.94
s	0.16	1.3	0.05	2.7	0.05	0.07	0.05
min	3.68	30.0	3.57	20.2	0.62	0.94	0.88
max	4.09	33.6	3.70	27.5	0.76	1.13	1.00

11.7 Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.6\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 33^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	4.92	31.6	4.38	23.0	0.66	0.96	0.89
2	4.66	34.6	4.23	25.0	0.68	1.00	0.91
3	4.64	31.2	4.46	20.1	0.64	1.05	0.96
4	4.54	31.8	4.49	23.9	0.76	1.06	0.99
5	4.47	34.2	4.42	23.4	0.70	1.10	0.99
\bar{x}	4.65	32.7	4.39	23.1	0.69	1.04	0.95
s	0.15	1.4	0.09	1.6	0.04	0.05	0.04
min	4.47	31.2	4.23	20.1	0.64	0.96	0.89
max	4.92	34.6	4.49	25.0	0.76	1.10	0.99

11.8 Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.1\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 30^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	5.21	31.6	5.15	22.0	0.71	1.08	0.99
2	5.19	33.9	4.92	22.8	0.66	1.05	0.95
3	4.97	28.2	4.65	20.3	0.69	1.00	0.94
4	5.30	27.2	5.09	20.8	0.74	1.01	0.96
5	4.98	31.8	4.87	21.3	0.68	1.07	0.98
\bar{x}	5.13	30.5	4.94	21.4	0.70	1.04	0.96
s	0.13	2.5	0.17	0.9	0.03	0.03	0.02
min	4.97	27.2	4.65	20.3	0.66	1.00	0.94
max	5.30	33.9	5.15	22.8	0.74	1.08	0.99

11.9 Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.5\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 45^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	4.52	45.7	4.03	34.5	0.71	1.05	0.89
2	4.55	44.1	4.05	30.9	0.66	1.06	0.89
3	4.54	45.0	4.27	31.0	0.69	1.14	0.94
4	4.57	44.5	4.14	33.9	0.72	1.05	0.91
5	4.54	44.1	4.03	29.8	0.63	1.07	0.89
\bar{x}	4.55	44.7	4.10	32.0	0.68	1.08	0.90
s	0.02	0.6	0.09	1.9	0.03	0.03	0.02
min	4.52	44.1	4.03	29.8	0.63	1.05	0.89
max	4.57	45.7	4.27	34.5	0.72	1.14	0.94

11.10 Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.2\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 43^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	5.27	42.0	4.66	28.1	0.62	1.05	0.88
2	5.28	42.3	4.71	30.8	0.68	1.04	0.89
3	5.32	42.0	4.65	31.0	0.67	1.01	0.87
4	5.15	43.9	4.95	28.3	0.66	1.17	0.96
5	5.18	42.8	4.77	31.2	0.70	1.07	0.92
\bar{x}	5.24	42.6	4.75	29.9	0.67	1.07	0.91
s	0.07	0.7	0.11	1.4	0.03	0.06	0.03
min	5.15	42.0	4.65	28.1	0.62	1.01	0.87
max	5.32	43.9	4.95	31.2	0.70	1.17	0.96

11.11 Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 6.0\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 42^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	6.06	41.9	5.47	27.3	0.62	1.08	0.90
2	6.02	42.3	5.49	29.4	0.67	1.07	0.91
3	5.94	41.7	5.54	28.6	0.67	1.10	0.93
4	6.15	41.2	5.19	29.9	0.64	0.97	0.84
5	6.01	42.5	5.07	28.4	0.60	1.01	0.84
\bar{x}	6.04	41.9	5.35	28.7	0.64	1.05	0.89
s	0.07	0.4	0.19	0.9	0.03	0.05	0.04
min	5.94	41.2	5.07	27.3	0.60	0.97	0.84
max	6.15	42.5	5.54	29.9	0.67	1.10	0.93

11.12 Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.0\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 48^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	4.91	45.6	4.18	31.2	0.62	1.04	0.85
2	4.77	43.9	4.57	29.7	0.68	1.16	0.96
3	5.14	49.7	4.12	34.6	0.60	1.02	0.80
4	4.93	48.0	4.36	31.9	0.63	1.12	0.88
5	5.04	51.7	4.21	32.9	0.58	1.13	0.83
\bar{x}	4.96	47.8	4.29	32.1	0.62	1.09	0.87
s	0.12	2.8	0.16	1.7	0.04	0.05	0.05
min	4.77	43.9	4.12	29.7	0.58	1.02	0.80
max	5.14	51.7	4.57	34.6	0.68	1.16	0.96

11.13 Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 6.0\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 48^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	6.33	49.6	4.64	34.2	0.54	0.94	0.73
2	5.80	48.9	4.88	30.8	0.57	1.10	0.84
3	5.59	43.0	5.26	31.2	0.72	1.10	0.94
4	6.16	48.7	4.93	32.3	0.57	1.02	0.80
5	5.92	47.8	4.98	28.0	0.53	1.11	0.84
\bar{x}	5.96	47.6	4.94	31.3	0.59	1.05	0.83
s	0.26	2.4	0.20	2.0	0.07	0.07	0.07
min	5.59	43.0	4.64	28.0	0.53	0.94	0.73
max	6.33	49.6	5.26	34.2	0.72	1.11	0.94

11.14 Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 6.6\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 48^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	6.49	46.1	5.35	24.9	0.48	1.08	0.82
2	7.16	49.4	5.45	31.2	0.52	1.00	0.76
3	6.29	46.6	5.61	27.0	0.56	1.16	0.89
4	6.48	52.0	5.52	39.2	0.68	1.07	0.85
5	6.75	45.5	5.24	29.6	0.54	0.96	0.78
\bar{x}	6.63	47.9	5.43	30.4	0.56	1.05	0.82
s	0.30	2.4	0.13	4.9	0.07	0.07	0.05
min	6.29	45.5	5.24	24.9	0.48	0.96	0.76
max	7.16	52.0	5.61	39.2	0.68	1.16	0.89

11.15 Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.7\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 65^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	4.51	64.3	3.42	49.9	0.64	1.12	0.76
2	4.71	65.1	3.60	52.1	0.67	1.12	0.77
3	4.79	65.4	3.56	51.5	0.64	1.11	0.74
4	4.54	65.5	3.58	50.9	0.67	1.20	0.79
5	4.81	66.3	3.72	47.9	0.63	1.29	0.77
\bar{x}	4.67	65.3	3.58	50.5	0.65	1.17	0.77
s	0.13	0.7	0.10	1.5	0.02	0.07	0.01
min	4.51	64.3	3.42	47.9	0.63	1.11	0.74
max	4.81	66.3	3.72	52.1	0.67	1.29	0.79

11.16 Διάμετρος $d = 4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 3.0\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 55^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	3.08	55.9	2.08	42.2	0.55	0.89	0.68
2	3.09	56.5	2.12	36.6	0.49	1.00	0.69
3	2.93	55.3	2.15	35.6	0.52	1.05	0.73
4	2.96	54.2	2.13	33.1	0.48	1.03	0.72
5	3.03	54.5	2.30	40.8	0.61	0.99	0.76
\bar{x}	3.02	55.3	2.16	37.7	0.53	0.99	0.72
s	0.07	0.8	0.08	3.4	0.05	0.05	0.03
min	2.93	54.2	2.08	33.1	0.48	0.89	0.68
max	3.09	56.5	2.30	42.2	0.61	1.05	0.76

11.17 Διάμετρος $d = 4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 3.5\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 51^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	3.48	49.6	2.69	26.9	0.46	1.07	0.77
2	3.43	49.8	2.59	28.6	0.47	1.03	0.76
3	3.42	52.7	2.49	37.5	0.56	0.95	0.73
4	3.55	51.4	2.58	32.3	0.50	0.98	0.73
5	3.43	50.6	2.60	30.5	0.50	1.03	0.76
\bar{x}	3.46	50.8	2.59	31.2	0.50	1.01	0.75
s	0.05	1.1	0.07	3.7	0.03	0.04	0.02
min	3.42	49.6	2.49	26.9	0.46	0.95	0.73
max	3.55	52.7	2.69	37.5	0.56	1.07	0.77

11.18 Διάμετρος $d = 4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.7\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 65^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	3.46	44.9	2.99	29.1	0.59	1.07	0.86
2	3.29	50.0	2.80	31.6	0.58	1.13	0.85
3	3.43	43.9	3.00	29.3	0.62	1.06	0.87
4	3.41	46.2	2.88	32.8	0.63	1.03	0.84
5	3.38	47.9	2.90	31.4	0.60	1.09	0.86
\bar{x}	3.40	46.6	2.91	30.8	0.61	1.07	0.86
s	0.06	2.2	0.08	1.4	0.02	0.03	0.01
min	3.29	43.9	2.80	29.1	0.58	1.03	0.84
max	3.46	50.0	3.00	32.8	0.63	1.13	0.87

11.19 Διάμετρος $d = 4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 3.4\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 47^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	2.59	41.7	2.25	24.8	0.55	1.05	0.87
2	2.62	40.3	2.23	28.9	0.63	0.98	0.85
3	2.63	41.0	2.18	28.8	0.61	0.96	0.83
4	2.65	40.4	2.18	30.6	0.65	0.93	0.82
5	2.62	41.9	2.23	32.8	0.69	0.96	0.85
\bar{x}	2.62	41.1	2.21	29.2	0.63	0.98	0.84
s	0.02	0.6	0.03	2.6	0.05	0.04	0.02
min	2.59	40.3	2.18	24.8	0.55	0.93	0.82
max	2.65	41.9	2.25	32.8	0.69	1.05	0.87

11.20 Διάμετρος $d = 4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 2.2\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 28^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	2.16	29.0	2.16	17.2	0.61	1.09	1.00
2	2.18	26.9	2.11	19.6	0.72	1.02	0.97
3	2.17	27.8	2.11	17.5	0.63	1.04	0.97
4	2.19	28.9	2.16	17.6	0.62	1.07	0.99
5	2.19	28.0	2.12	17.4	0.62	1.05	0.97
\bar{x}	2.18	28.1	2.13	17.9	0.64	1.06	0.98
s	0.01	0.8	0.02	0.9	0.04	0.02	0.01
min	2.16	26.9	2.11	17.2	0.61	1.02	0.97
max	2.19	29.0	2.16	19.6	0.72	1.09	1.00

11.21 Διάμετρος $d = 4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 3.8\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 34^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	3.88	37.2	3.36	23.4	0.57	1.00	0.87
2	3.72	33.8	3.38	18.2	0.51	1.04	0.91
3	3.74	34.2	3.40	22.6	0.62	1.02	0.91
4	3.76	32.9	3.49	18.5	0.54	1.05	0.93
5	3.85	30.5	3.66	21.3	0.68	1.03	0.95
\bar{x}	3.79	33.7	3.46	20.8	0.58	1.03	0.91
s	0.06	2.1	0.11	2.1	0.06	0.02	0.03
min	3.72	30.5	3.36	18.2	0.51	1.00	0.87
max	3.88	37.2	3.66	23.4	0.68	1.05	0.95

11.22 Διάμετρος $d = 4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.5\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 33^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	4.55	32.0	4.08	18.1	0.53	1.00	0.90
2	4.51	32.2	4.07	23.3	0.67	0.98	0.90
3	4.41	34.2	4.09	23.6	0.66	1.03	0.93
4	4.35	33.3	4.23	21.0	0.64	1.09	0.97
5	4.58	32.4	4.10	19.8	0.57	1.00	0.89
\bar{x}	4.48	32.8	4.12	21.2	0.61	1.02	0.92
s	0.09	0.8	0.06	2.1	0.06	0.04	0.03
min	4.35	32.0	4.07	18.1	0.53	0.98	0.89
max	4.58	34.2	4.23	23.6	0.67	1.09	0.97

11.23 Διάμετρος $d = 4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.1\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 32^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	5.21	32.6	4.75	19.0	0.55	1.02	0.91
2	5.06	32.9	4.66	17.7	0.52	1.04	0.92
3	4.93	35.3	4.49	18.4	0.50	1.06	0.91
4	5.28	30.3	4.85	20.4	0.64	1.00	0.92
5	5.12	31.1	4.75	17.9	0.55	1.03	0.93
\bar{x}	5.12	32.4	4.70	18.7	0.55	1.03	0.92
s	0.12	1.7	0.12	1.0	0.05	0.02	0.01
min	4.93	30.3	4.49	17.7	0.50	1.00	0.91
max	5.28	35.3	4.85	20.4	0.64	1.06	0.93

11.24 Διάμετρος $d = 4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.4\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 44^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	4.38	44.5	3.90	27.0	0.58	1.11	0.89
2	4.43	44.4	4.01	26.8	0.58	1.13	0.91
3	4.29	47.2	3.94	23.0	0.49	1.24	0.92
4	4.51	43.1	3.72	25.0	0.51	1.02	0.83
5	4.51	42.7	3.85	23.1	0.49	1.07	0.85
\bar{x}	4.42	44.4	3.88	25.0	0.53	1.12	0.88
s	0.08	1.6	0.10	1.7	0.04	0.07	0.03
min	4.29	42.7	3.72	23.0	0.49	1.02	0.83
max	4.51	47.2	4.01	27.0	0.58	1.24	0.92

11.25 Διάμετρος $d = 4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.2\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 43^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	5.11	42.9	4.58	28.3	0.62	1.08	0.90
2	5.16	43.7	4.16	25.1	0.49	1.01	0.81
3	5.15	41.4	4.71	23.4	0.55	1.12	0.91
4	5.31	43.2	4.53	26.5	0.56	1.05	0.85
5	5.09	43.9	4.50	26.9	0.58	1.09	0.88
\bar{x}	5.16	43.0	4.50	26.0	0.56	1.07	0.87
s	0.08	0.9	0.18	1.7	0.04	0.04	0.04
min	5.09	41.4	4.16	23.4	0.49	1.01	0.81
max	5.31	43.9	4.71	28.3	0.62	1.12	0.91

11.26 Διάμετρος $d = 4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.8\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 41^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	5.39	43.4	3.93	37.0	0.64	0.80	0.73
2	5.04	48.0	3.99	27.6	0.49	1.05	0.79
3	5.20	47.4	3.82	27.3	0.46	0.96	0.73
4	4.65	50.6	3.75	33.6	0.58	1.06	0.81
5	5.25	45.7	3.85	26.9	0.46	0.94	0.73
\bar{x}	5.11	47.0	3.87	30.5	0.53	0.96	0.76
s	0.25	2.4	0.08	4.1	0.07	0.09	0.03
min	4.65	43.4	3.75	26.9	0.46	0.80	0.73
max	5.39	50.6	3.99	37.0	0.64	1.06	0.81

11.27 Διάμετρος $d = 4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.1\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 47^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	5.39	43.4	3.93	37.0	0.64	0.80	0.73
2	5.04	48.0	3.99	27.6	0.49	1.05	0.79
3	5.20	47.4	3.82	27.3	0.46	0.96	0.73
4	4.65	50.6	3.75	33.6	0.58	1.06	0.81
5	5.25	45.7	3.85	26.9	0.46	0.94	0.73
\bar{x}	5.11	47.0	3.87	30.5	0.53	0.96	0.76
s	0.25	2.4	0.08	4.1	0.07	0.09	0.03
min	4.65	43.4	3.75	26.9	0.46	0.80	0.73
max	5.39	50.6	3.99	37.0	0.64	1.06	0.81

11.28 Διάμετρος $d = 4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.5\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 50^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	5.61	50.0	4.65	26.5	0.48	1.15	0.83
2	5.50	50.6	4.46	26.0	0.46	1.15	0.81
3	5.46	49.5	4.58	28.0	0.52	1.14	0.84
4	5.56	50.1	4.66	24.3	0.45	1.19	0.84
5	5.44	50.4	4.52	25.6	0.47	1.18	0.83
\bar{x}	5.51	50.1	4.57	26.1	0.48	1.16	0.83
s	0.07	0.4	0.08	1.2	0.02	0.02	0.01
min	5.44	49.5	4.46	24.3	0.45	1.14	0.81
max	5.61	50.6	4.66	28.0	0.52	1.19	0.84

11.29 Διάμετρος $d = 4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 6.4\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 46^\circ$

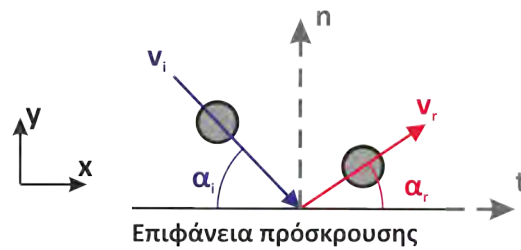
α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	6.30	44.1	5.29	25.5	0.52	1.06	0.84
2	6.44	45.2	5.26	30.8	0.59	1.00	0.82
3	6.12	47.9	5.10	30.5	0.57	1.07	0.83
4	6.54	44.8	5.01	25.0	0.46	0.98	0.77
5	6.42	46.4	5.31	27.7	0.53	1.06	0.83
\bar{x}	6.36	45.7	5.19	27.9	0.53	1.03	0.82
s	0.14	1.3	0.12	2.4	0.05	0.04	0.03
min	6.12	44.1	5.01	25.0	0.46	0.98	0.77
max	6.54	47.9	5.31	30.8	0.59	1.07	0.84

11.30 Διάμετρος $d = 4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.8\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 67^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	4.67	66.8	3.10	46.3	0.52	1.16	0.66
2	4.79	65.3	3.22	39.3	0.47	1.24	0.67
3	5.11	70.3	2.94	50.0	0.47	1.10	0.58
4	4.85	69.6	3.11	45.2	0.49	1.30	0.64
5	4.38	64.7	2.63	44.4	0.47	1.00	0.60
\bar{x}	4.76	67.3	3.00	45.1	0.48	1.16	0.63
s	0.24	2.3	0.20	3.5	0.02	0.10	0.04
min	4.38	64.7	2.63	39.3	0.47	1.00	0.58
max	5.11	70.3	3.22	50.0	0.52	1.30	0.67

Παράρτημα 12

Παραβολική ρίψη σφαιρικών τεμαχίων από μάρμαρο



12.1 Διάμετρος $d = 2.7\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 2.7\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 55^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	2.71	54.5	2.23	45.6	0.72	1.00	0.83
2	2.66	53.6	2.20	42.8	0.70	1.02	0.83
3	2.68	55.0	2.33	46.8	0.77	1.04	0.87
4	2.68	53.7	2.22	45.7	0.74	0.98	0.83
5	2.62	55.9	2.19	38.4	0.63	1.17	0.84
\bar{x}	2.67	54.5	2.23	43.9	0.71	1.04	0.84
s	0.03	0.8	0.05	3.0	0.05	0.07	0.02
min	2.62	53.6	2.19	38.4	0.63	0.98	0.83
max	2.71	55.9	2.33	46.8	0.77	1.17	0.87

12.2 Διάμετρος $d = 2.7\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 3.1\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 49^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	3.20	49.3	2.84	40.3	0.76	1.04	0.89
2	3.15	48.4	2.89	38.6	0.77	1.08	0.92
3	3.19	49.2	2.78	42.7	0.78	0.98	0.87
4	3.07	47.7	2.78	38.6	0.76	1.05	0.91
5	3.15	49.0	2.77	42.4	0.79	0.99	0.88
\bar{x}	3.15	48.7	2.81	40.5	0.77	1.03	0.89
s	0.05	0.6	0.05	1.8	0.01	0.04	0.02
min	3.07	47.7	2.77	38.6	0.76	0.98	0.87
max	3.20	49.3	2.89	42.7	0.79	1.08	0.92

12.3 Διάμετρος $d = 2.7\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 3.3\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 45^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	3.23	42.8	3.05	34.3	0.78	1.06	0.94
2	3.33	45.7	2.95	32.6	0.67	1.07	0.89
3	3.39	47.5	2.98	35.5	0.69	1.06	0.88
4	3.12	46.7	2.95	32.7	0.70	1.16	0.95
5	3.27	42.5	3.09	33.9	0.78	1.06	0.94
\bar{x}	3.27	45.0	3.00	33.8	0.72	1.08	0.92
s	0.09	2.0	0.05	1.1	0.05	0.04	0.03
min	3.12	42.5	2.95	32.6	0.67	1.06	0.88
max	3.39	47.5	3.09	35.5	0.78	1.16	0.95

12.4 Διάμετρος $d = 2.7\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 2.4\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 37^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	2.38	37.2	2.18	30.3	0.76	0.99	0.92
2	2.38	37.8	2.14	31.3	0.76	0.97	0.90
3	2.37	37.7	2.18	31.3	0.78	0.99	0.92
4	2.36	36.8	2.18	29.6	0.76	1.00	0.92
5	2.35	36.8	2.21	31.8	0.83	1.00	0.94
\bar{x}	2.37	37.3	2.18	30.8	0.78	0.99	0.92
s	0.01	0.4	0.02	0.8	0.03	0.01	0.01
min	2.35	36.8	2.14	29.6	0.76	0.97	0.90
max	2.38	37.8	2.21	31.8	0.83	1.00	0.94

12.5 Διάμετρος $d = 2.7\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 1.9\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 21^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	1.90	20.8	1.86	17.1	0.81	1.00	0.98
2	1.89	22.4	1.81	17.4	0.75	0.99	0.96
3	1.98	22.4	1.80	18.3	0.75	0.94	0.91
4	1.91	20.5	1.84	17.4	0.82	0.99	0.97
5	1.93	21.2	1.84	16.3	0.74	0.98	0.95
\bar{x}	1.92	21.5	1.83	17.3	0.78	0.98	0.95
s	0.03	0.8	0.02	0.6	0.03	0.02	0.02
min	1.89	20.5	1.80	16.3	0.74	0.94	0.91
max	1.98	22.4	1.86	18.3	0.82	1.00	0.98

12.6 Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 2.7\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 55^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	2.71	54.6	2.25	43.8	0.71	1.03	0.83
2	2.71	54.3	2.21	47.7	0.74	0.94	0.82
3	2.62	55.7	2.23	43.4	0.71	1.09	0.85
4	2.72	55.4	2.25	45.4	0.72	1.02	0.83
5	2.67	54.0	2.26	41.8	0.70	1.08	0.85
\bar{x}	2.69	54.8	2.24	44.4	0.71	1.03	0.83
s	0.04	0.6	0.02	2.0	0.02	0.05	0.01
min	2.62	54.0	2.21	41.8	0.70	0.94	0.82
max	2.72	55.7	2.26	47.7	0.74	1.09	0.85

12.7 Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 3.1\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 50^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	3.13	50.7	2.71	41.1	0.74	1.03	0.87
2	3.07	48.5	2.59	34.7	0.64	1.04	0.84
3	3.11	49.4	2.69	41.1	0.75	1.00	0.87
4	3.13	50.5	2.77	39.9	0.74	1.07	0.88
5	3.13	50.8	2.75	39.5	0.72	1.07	0.88
\bar{x}	3.11	50.0	2.70	39.3	0.72	1.04	0.87
s	0.02	0.9	0.06	2.3	0.04	0.03	0.01
min	3.07	48.5	2.59	34.7	0.64	1.00	0.84
max	3.13	50.8	2.77	41.1	0.75	1.07	0.88

12.8 Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 3.3\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 44^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	3.26	43.6	3.03	32.0	0.72	1.09	0.93
2	3.25	43.9	3.02	31.0	0.69	1.10	0.93
3	3.24	44.8	3.04	35.3	0.77	1.08	0.94
4	3.31	43.9	2.97	32.9	0.70	1.05	0.90
5	3.28	44.0	3.04	33.4	0.73	1.08	0.93
\bar{x}	3.27	44.0	3.02	32.9	0.72	1.08	0.92
s	0.03	0.4	0.03	1.4	0.03	0.02	0.01
min	3.24	43.6	2.97	31.0	0.69	1.05	0.90
max	3.31	44.8	3.04	35.3	0.77	1.10	0.94

12.9 Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 2.4\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 36^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	2.38	36.0	2.19	27.1	0.72	1.01	0.92
2	2.38	39.0	2.14	31.3	0.74	0.99	0.90
3	2.36	35.5	2.18	25.2	0.68	1.03	0.92
4	2.37	34.8	2.16	25.8	0.70	1.00	0.91
5	2.33	36.4	2.18	30.4	0.80	1.00	0.93
\bar{x}	2.36	36.3	2.17	28.0	0.73	1.01	0.92
s	0.02	1.4	0.02	2.4	0.04	0.01	0.01
min	2.33	34.8	2.14	25.2	0.68	0.99	0.90
max	2.38	39.0	2.19	31.3	0.80	1.03	0.93

12.10 Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 1.9\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 19^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	1.94	19.3	1.87	15.6	0.79	0.99	0.97
2	1.85	19.7	1.86	16.4	0.85	1.02	1.01
3	1.92	19.8	1.89	14.9	0.75	1.01	0.98
4	1.87	19.4	1.81	16.2	0.82	0.99	0.97
5	1.92	19.3	1.86	16.1	0.82	0.98	0.97
\bar{x}	1.90	19.5	1.86	15.9	0.80	1.00	0.98
s	0.04	0.2	0.03	0.6	0.03	0.02	0.01
min	1.85	19.3	1.81	14.9	0.75	0.98	0.97
max	1.94	19.8	1.89	16.4	0.85	1.02	1.01

12.11 Διάμετρος $d = 3.4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 2.7\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 55^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	2.73	54.2	2.27	44.6	0.72	1.01	0.83
2	2.72	54.7	2.21	41.6	0.66	1.05	0.81
3	2.71	55.0	2.19	44.4	0.69	1.00	0.81
4	2.72	55.5	2.15	49.1	0.73	0.92	0.79
5	2.72	54.1	2.17	43.0	0.67	0.99	0.80
\bar{x}	2.72	54.7	2.20	44.5	0.69	1.00	0.81
s	0.01	0.5	0.04	2.5	0.03	0.05	0.01
min	2.71	54.1	2.15	41.6	0.66	0.92	0.79
max	2.73	55.5	2.27	49.1	0.73	1.05	0.83

12.12 Διάμετρος $d = 3.4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 3.2\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 50^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	3.18	50.5	2.71	39.1	0.70	1.04	0.85
2	3.13	48.7	2.56	34.4	0.62	1.03	0.82
3	3.15	50.6	2.75	40.9	0.74	1.04	0.87
4	3.13	50.7	2.76	39.6	0.72	1.07	0.88
5	3.17	49.6	2.66	36.0	0.65	1.05	0.84
\bar{x}	3.15	50.0	2.69	38.0	0.68	1.04	0.85
s	0.02	0.8	0.07	2.4	0.05	0.01	0.02
min	3.13	48.7	2.56	34.4	0.62	1.03	0.82
max	3.18	50.7	2.76	40.9	0.74	1.07	0.88

12.13 Διάμετρος $d = 3.4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 3.3\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 44^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	3.31	43.1	3.07	30.4	0.69	1.09	0.93
2	3.28	44.7	2.97	30.7	0.66	1.10	0.91
3	3.29	44.2	3.00	33.3	0.72	1.07	0.91
4	3.28	44.5	3.02	32.1	0.70	1.09	0.92
5	3.22	44.7	3.00	30.7	0.68	1.13	0.93
\bar{x}	3.27	44.3	3.01	31.4	0.69	1.10	0.92
s	0.03	0.6	0.03	1.1	0.02	0.02	0.01
min	3.22	43.1	2.97	30.4	0.66	1.07	0.91
max	3.31	44.7	3.07	33.3	0.72	1.13	0.93

12.14 Διάμετρος $d = 3.4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 2.4\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 37^\circ$

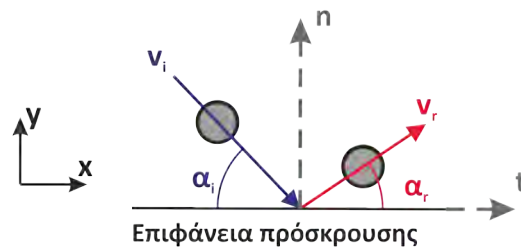
α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	2.37	35.8	2.18	28.6	0.75	0.99	0.92
2	2.40	38.2	2.16	29.5	0.72	1.00	0.90
3	2.37	35.8	2.21	25.8	0.69	1.04	0.93
4	2.38	36.0	2.20	27.7	0.73	1.01	0.93
5	2.40	37.8	2.20	27.5	0.69	1.03	0.92
\bar{x}	2.38	36.7	2.19	27.8	0.72	1.01	0.92
s	0.01	1.1	0.02	1.2	0.02	0.02	0.01
min	2.37	35.8	2.16	25.8	0.69	0.99	0.90
max	2.40	38.2	2.21	29.5	0.75	1.04	0.93

12.15 Διάμετρος $d = 3.4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 2.0\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 20^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	1.94	19.4	1.86	17.2	0.85	0.97	0.95
2	1.96	18.9	1.89	15.6	0.80	0.99	0.97
3	1.96	21.2	1.86	17.3	0.78	0.98	0.95
4	1.95	18.3	1.86	16.1	0.84	0.97	0.95
5	1.94	23.5	1.88	17.1	0.71	1.01	0.96
\bar{x}	1.95	20.3	1.87	16.6	0.80	0.98	0.96
s	0.01	1.9	0.01	0.7	0.05	0.01	0.01
min	1.94	18.3	1.86	15.6	0.71	0.97	0.95
max	1.96	23.5	1.89	17.3	0.85	1.01	0.97

Παράρτημα 13

Παραβολική ρίψη σφαιρικών τεμαχίων από ψαμμίτη



13.1 Διάμετρος $d = 2.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 2.7\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 51^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	2.65	51.8	2.38	43.0	0.78	1.06	0.90
2	2.69	50.8	2.54	46.8	0.88	1.02	0.94
3	2.66	50.3	2.29	42.8	0.76	0.99	0.86
4	2.72	48.4	2.39	46.3	0.85	0.91	0.88
5	2.55	55.3	2.48	46.9	0.86	1.17	0.97
\bar{x}	2.65	51.3	2.41	45.2	0.83	1.03	0.91
s	0.06	2.3	0.09	1.9	0.05	0.09	0.04
min	2.55	48.4	2.29	42.8	0.76	0.91	0.86
max	2.72	55.3	2.54	46.9	0.88	1.17	0.97

13.2 Διάμετρος $d = 2.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 3.1\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 47^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	2.98	45.1	2.83	42.0	0.90	1.00	0.95
2	3.09	46.8	2.91	45.0	0.91	0.97	0.94
3	3.05	46.7	2.60	44.7	0.83	0.89	0.86
4	3.15	46.5	2.72	42.0	0.80	0.93	0.86
5	3.16	48.9	2.89	45.8	0.87	0.97	0.91
\bar{x}	3.08	46.8	2.79	43.9	0.86	0.95	0.90
s	0.07	1.2	0.11	1.6	0.04	0.04	0.04
min	2.98	45.1	2.60	42.0	0.80	0.89	0.86
max	3.16	48.9	2.91	45.8	0.91	1.00	0.95

13.3 Διάμετρος $d = 2.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 3.9\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 48^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	3.78	47.4	3.41	42.7	0.83	0.98	0.90
2	4.02	48.2	3.43	40.2	0.74	0.98	0.85
3	3.91	49.4	3.46	38.9	0.73	1.06	0.88
4	3.85	48.9	3.54	39.9	0.78	1.07	0.92
5	3.74	47.1	3.42	43.5	0.86	0.97	0.91
\bar{x}	3.86	48.2	3.45	41.0	0.79	1.01	0.89
s	0.10	0.9	0.05	1.8	0.05	0.04	0.02
min	3.74	47.1	3.41	38.9	0.73	0.97	0.85
max	4.02	49.4	3.54	43.5	0.86	1.07	0.92

13.4 Διάμετρος $d = 2.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 2.4\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 36^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	2.40	37.9	2.25	36.3	0.90	0.96	0.94
2	2.46	35.5	2.35	35.2	0.95	0.96	0.95
3	2.36	37.9	2.26	34.0	0.88	1.01	0.96
4	2.46	36.3	2.33	29.9	0.80	1.02	0.95
5	2.45	34.8	2.33	33.7	0.92	0.96	0.95
\bar{x}	2.42	36.5	2.30	33.8	0.89	0.98	0.95
s	0.04	1.2	0.04	2.2	0.05	0.03	0.01
min	2.36	34.8	2.25	29.9	0.80	0.96	0.94
max	2.46	37.9	2.35	36.3	0.95	1.02	0.96

13.5 Διάμετρος $d = 2.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 1.9\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 18^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	1.92	17.2	1.94	14.2	0.84	1.03	1.01
2	1.90	19.3	1.86	17.4	0.88	0.99	0.98
3	1.89	18.7	1.92	15.8	0.86	1.03	1.02
4	1.92	16.6	1.94	14.5	0.88	1.02	1.01
5	1.92	19.0	1.96	16.6	0.90	1.04	1.02
\bar{x}	1.91	18.2	1.92	15.7	0.87	1.02	1.01
s	0.01	1.1	0.04	1.2	0.02	0.02	0.01
min	1.89	16.6	1.86	14.2	0.84	0.99	0.98
max	1.92	19.3	1.96	17.4	0.90	1.04	1.02

13.6 Διάμετρος $d = 3.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 2.7\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 51^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	2.63	51.8	2.59	37.7	0.77	1.26	0.99
2	2.86	53.1	2.43	43.4	0.73	1.03	0.85
3	2.49	54.2	2.35	46.0	0.84	1.12	0.94
4	2.67	48.3	2.33	47.1	0.86	0.90	0.87
5	2.72	46.5	2.37	43.2	0.82	0.92	0.87
\bar{x}	2.67	50.8	2.41	43.5	0.80	1.05	0.90
s	0.12	2.9	0.10	3.3	0.05	0.13	0.05
min	2.49	46.5	2.33	37.7	0.73	0.90	0.85
max	2.86	54.2	2.59	47.1	0.86	1.26	0.99

13.7 Διάμετρος $d = 3.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 3.3\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 48^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	3.25	47.9	2.78	37.1	0.69	1.02	0.86
2	3.33	48.4	2.93	37.0	0.71	1.06	0.88
3	3.47	47.3	3.18	36.9	0.75	1.08	0.92
4	3.28	45.7	2.82	41.0	0.79	0.93	0.86
5	3.42	49.2	2.95	41.4	0.75	0.99	0.86
\bar{x}	3.35	47.7	2.93	38.7	0.74	1.02	0.88
s	0.08	1.2	0.14	2.1	0.03	0.05	0.02
min	3.25	45.7	2.78	36.9	0.69	0.93	0.86
max	3.47	49.2	3.18	41.4	0.79	1.08	0.92

13.8 Διάμετρος $d = 3.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 3.5\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 45^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	3.32	44.8	3.22	32.8	0.75	1.15	0.97
2	3.70	44.8	3.36	37.6	0.79	1.01	0.91
3	3.64	46.8	2.99	35.6	0.66	0.98	0.82
4	3.46	44.7	3.30	35.1	0.78	1.10	0.96
5	3.34	44.7	3.36	38.9	0.90	1.10	1.01
\bar{x}	3.49	45.1	3.25	36.0	0.77	1.07	0.93
s	0.15	0.8	0.14	2.1	0.08	0.06	0.06
min	3.32	44.7	2.99	32.8	0.66	0.98	0.82
max	3.70	46.8	3.36	38.9	0.90	1.15	1.01

13.9 Διάμετρος $d = 3.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 2.5\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 36^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	2.48	36.4	2.28	31.3	0.80	0.97	0.92
2	2.45	37.0	2.28	31.8	0.81	0.99	0.93
3	2.45	36.5	2.27	30.9	0.80	0.98	0.92
4	2.45	36.4	2.28	32.6	0.85	0.97	0.93
5	2.47	36.0	2.31	31.1	0.82	0.99	0.94
\bar{x}	2.46	36.5	2.28	31.5	0.82	0.98	0.93
s	0.01	0.3	0.02	0.6	0.02	0.01	0.01
min	2.45	36.0	2.27	30.9	0.80	0.97	0.92
max	2.48	37.0	2.31	32.6	0.85	0.99	0.94

13.10 Διάμετρος $d = 3.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 1.9\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 19^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	1.94	20.6	1.93	17.4	0.85	1.01	0.99
2	1.91	20.1	1.93	15.1	0.77	1.04	1.01
3	1.92	20.2	1.91	15.7	0.78	1.02	1.00
4	1.95	18.0	1.91	16.1	0.88	0.99	0.98
5	1.90	18.0	1.93	15.5	0.88	1.03	1.02
\bar{x}	1.92	19.4	1.92	16.0	0.83	1.02	1.00
s	0.02	1.1	0.01	0.8	0.05	0.02	0.01
min	1.90	18.0	1.91	15.1	0.77	0.99	0.98
max	1.95	20.6	1.93	17.4	0.88	1.04	1.02

13.11 Διάμετρος $d = 4.3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 2.8\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 50^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	2.79	49.3	2.24	39.3	0.67	0.95	0.80
2	2.98	52.5	2.28	43.5	0.67	0.91	0.77
3	2.63	50.6	2.46	43.6	0.83	1.07	0.93
4	2.85	50.5	2.42	40.4	0.71	1.02	0.85
5	2.71	48.4	2.30	36.2	0.67	1.03	0.85
\bar{x}	2.79	50.3	2.34	40.6	0.71	1.00	0.84
s	0.12	1.4	0.08	2.8	0.06	0.06	0.06
min	2.63	48.4	2.24	36.2	0.67	0.91	0.77
max	2.98	52.5	2.46	43.6	0.83	1.07	0.93

13.12 Διάμετρος $d = 4.3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 3.3\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 45^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	3.20	43.1	2.94	35.2	0.78	1.03	0.92
2	3.25	42.5	2.62	34.9	0.68	0.89	0.80
3	3.27	47.8	3.24	33.7	0.74	1.23	0.99
4	3.27	46.0	2.83	34.5	0.68	1.03	0.87
5	3.40	45.0	3.04	36.6	0.75	1.02	0.89
\bar{x}	3.28	44.9	2.93	35.0	0.73	1.04	0.90
s	0.07	1.9	0.21	0.9	0.04	0.11	0.06
min	3.20	42.5	2.62	33.7	0.68	0.89	0.80
max	3.40	47.8	3.24	36.6	0.78	1.23	0.99

13.13 Διάμετρος $d = 4.3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 3.7\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 45^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	3.70	44.8	3.34	34.8	0.73	1.04	0.90
2	3.79	41.6	3.45	34.8	0.78	1.00	0.91
3	3.73	47.2	3.36	36.0	0.72	1.07	0.90
4	3.67	42.3	3.44	35.1	0.80	1.04	0.94
5	3.76	48.8	3.33	39.6	0.75	1.04	0.89
\bar{x}	3.73	44.9	3.39	36.1	0.76	1.04	0.91
s	0.04	2.8	0.05	1.8	0.03	0.02	0.02
min	3.67	41.6	3.33	34.8	0.72	1.00	0.89
max	3.79	48.8	3.45	39.6	0.80	1.07	0.94

13.14 Διάμετρος $d = 4.3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 2.5\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 36^\circ$

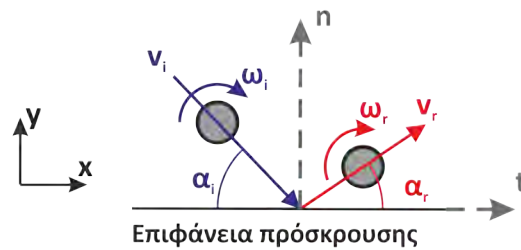
α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	2.50	35.6	2.34	29.2	0.78	1.00	0.93
2	2.47	36.6	2.32	31.6	0.82	1.00	0.94
3	2.49	35.5	2.29	31.6	0.83	0.96	0.92
4	2.49	36.4	2.31	29.4	0.77	1.00	0.93
5	2.47	37.8	2.27	32.8	0.82	0.98	0.92
\bar{x}	2.48	36.4	2.31	30.9	0.80	0.99	0.93
s	0.01	0.8	0.02	1.4	0.03	0.02	0.01
min	2.47	35.5	2.27	29.2	0.77	0.96	0.92
max	2.50	37.8	2.34	32.8	0.83	1.00	0.94

13.15 Διάμετρος $d = 4.3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 2.0\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 20^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	2.00	19.2	1.96	16.9	0.87	0.99	0.98
2	1.94	21.3	1.90	19.4	0.90	0.99	0.98
3	1.97	20.5	1.92	18.0	0.86	0.99	0.97
4	2.01	19.4	1.96	15.8	0.80	1.00	0.98
5	1.97	20.2	1.94	17.9	0.88	1.00	0.99
\bar{x}	1.98	20.1	1.94	17.6	0.86	0.99	0.98
s	0.03	0.8	0.02	1.2	0.03	0.00	0.00
min	1.94	19.2	1.90	15.8	0.80	0.99	0.97
max	2.01	21.3	1.96	19.4	0.90	1.00	0.99

Παράρτημα 14

Παραβολική ρίψη σφαιρικών τεμαχίων από μάρμαρο
 συνεκτίμηση περιστροφικής ταχύτητας



14.1 Διάμετρος $d = 2.7\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.2\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 65^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	4.12	65.9	169.4	3.17	47.5	159.4	0.62	1.27	0.77
2	4.12	63.6	150.4	3.22	48.1	143.1	0.65	1.18	0.78
3	4.17	64.2	173.4	3.37	52.7	137.7	0.71	1.12	0.81
4	4.20	65.2	188.6	3.61	53.6	135.2	0.76	1.21	0.86
5	4.19	66.1	164.9	3.22	50.3	123.9	0.65	1.21	0.77
\bar{x}	4.16	65.0	169.3	3.32	50.5	139.9	0.68	1.20	0.80
s	0.04	1.0	12.4	0.16	2.4	11.6	0.05	0.05	0.03
min	4.12	63.6	150.4	3.17	47.5	123.9	0.62	1.12	0.77
max	4.20	66.1	188.6	3.61	53.6	159.4	0.76	1.27	0.86

14.2 Διάμετρος $d = 2.7\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 3.5\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 32^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	3.41	31.6	238.7	3.32	26.1	238.4	0.82	1.03	0.98
2	3.55	32.0	227.7	3.27	22.0	240.1	0.65	1.00	0.92
3	3.50	31.0	232.1	3.31	22.6	220.1	0.71	1.02	0.95
4	3.50	31.8	245.0	3.34	23.2	222.6	0.71	1.03	0.96
5	3.45	32.5	286.5	3.32	22.0	226.3	0.67	1.06	0.96
\bar{x}	3.48	31.8	246.0	3.31	23.2	229.5	0.71	1.03	0.95
s	0.05	0.5	21.1	0.03	1.5	8.2	0.06	0.02	0.02
min	3.41	31.0	227.7	3.27	22.0	220.1	0.65	1.00	0.92
max	3.55	32.5	286.5	3.34	26.1	240.1	0.82	1.06	0.98

14.3 Διάμετρος $d = 2.7\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.2\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 31^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	4.16	31.1	292.1	3.99	19.1	285.8	0.61	1.06	0.96
2	4.28	31.9	314.4	4.04	21.6	274.6	0.66	1.04	0.95
3	4.22	32.5	289.6	3.93	24.9	285.0	0.73	1.00	0.93
4	4.17	29.1	345.3	4.07	20.7	297.7	0.71	1.05	0.98
5	4.31	31.9	307.8	4.09	22.0	310.2	0.67	1.04	0.95
\bar{x}	4.23	31.3	309.8	4.03	21.6	290.7	0.68	1.04	0.95
s	0.06	1.2	20.1	0.06	1.9	12.2	0.04	0.02	0.02
min	4.16	29.1	289.6	3.93	19.1	274.6	0.61	1.00	0.93
max	4.31	32.5	345.3	4.09	24.9	310.2	0.73	1.06	0.98

14.4 Διάμετρος $d = 2.7\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.9\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 30^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	4.87	28.9	354.3	4.70	21.1	313.8	0.72	1.03	0.96
2	4.85	29.6	336.5	4.63	19.5	317.0	0.64	1.03	0.95
3	4.79	29.1	340.4	4.69	21.3	314.2	0.73	1.04	0.98
4	4.90	31.4	339.6	4.70	17.7	325.3	0.56	1.07	0.96
5	4.87	30.0	364.3	4.80	24.7	318.8	0.82	1.03	0.99
\bar{x}	4.86	29.8	347.0	4.70	20.8	317.8	0.69	1.04	0.97
s	0.03	0.9	10.6	0.05	2.3	4.2	0.09	0.02	0.01
min	4.79	28.9	336.5	4.63	17.7	313.8	0.56	1.03	0.95
max	4.90	31.4	364.3	4.80	24.7	325.3	0.82	1.07	0.99

14.5 Διάμετρος $d = 2.7\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.3\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 41^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	4.22	41.4	253.1	3.82	31.8	191.2	0.72	1.02	0.90
2	4.22	41.9	266.0	3.96	33.0	222.5	0.76	1.06	0.94
3	4.19	42.6	263.4	3.90	32.7	211.2	0.74	1.07	0.93
4	4.30	38.2	291.2	3.89	25.3	243.6	0.62	1.04	0.90
5	4.32	41.2	275.8	3.95	29.0	204.8	0.67	1.06	0.91
\bar{x}	4.25	41.1	269.9	3.90	30.3	214.7	0.70	1.05	0.92
s	0.05	1.5	12.9	0.05	2.9	17.6	0.05	0.02	0.01
min	4.19	38.2	253.1	3.82	25.3	191.2	0.62	1.02	0.90
max	4.32	42.6	291.2	3.96	33.0	243.6	0.76	1.07	0.94

14.6 Διάμετρος $d = 2.7\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.0\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 40^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	5.06	39.8	349.4	4.74	33.8	283.5	0.81	1.01	0.94
2	4.90	38.8	354.3	4.69	25.7	301.1	0.66	1.11	0.96
3	4.98	41.3	326.9	4.74	30.2	274.9	0.72	1.09	0.95
4	5.00	40.6	341.6	4.68	29.3	287.3	0.70	1.07	0.94
5	5.05	39.6	345.9	4.66	28.2	274.9	0.68	1.06	0.92
\bar{x}	5.00	40.0	343.6	4.70	29.4	284.3	0.72	1.07	0.94
s	0.06	0.8	9.3	0.03	2.7	9.7	0.05	0.03	0.01
min	4.90	38.8	326.9	4.66	25.7	274.9	0.66	1.01	0.92
max	5.06	41.3	354.3	4.74	33.8	301.1	0.81	1.11	0.96

14.7 Διάμετρος $d = 2.7\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.6\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 40^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	5.51	38.8	442.5	5.29	26.4	329.1	0.68	1.10	0.96
2	5.73	41.0	446.7	5.44	30.9	323.5	0.74	1.08	0.95
3	5.54	41.7	394.2	5.20	26.6	334.2	0.63	1.12	0.94
4	5.68	40.4	425.3	5.38	28.3	317.3	0.69	1.09	0.95
5	5.69	40.3	441.0	5.40	26.1	358.2	0.64	1.12	0.95
\bar{x}	5.63	40.4	430.0	5.34	27.6	332.5	0.68	1.10	0.95
s	0.09	0.9	19.3	0.09	1.8	14.1	0.04	0.02	0.01
min	5.51	38.8	394.2	5.20	26.1	317.3	0.63	1.08	0.94
max	5.73	41.7	446.7	5.44	30.9	358.2	0.74	1.12	0.96

14.8 Διάμετρος $d = 2.7\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.4\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 48^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	4.40	47.6	290.9	4.06	33.2	215.4	0.69	1.15	0.92
2	4.45	49.2	299.2	4.18	34.9	228.7	0.71	1.18	0.94
3	4.33	46.0	294.8	4.06	33.8	260.4	0.72	1.12	0.94
4	4.37	47.8	311.9	4.05	35.8	226.4	0.73	1.12	0.93
5	4.35	47.7	285.0	4.10	35.1	259.7	0.73	1.15	0.94
\bar{x}	4.38	47.7	296.4	4.09	34.6	238.1	0.72	1.14	0.93
s	0.04	1.0	9.1	0.05	0.9	18.5	0.02	0.02	0.01
min	4.33	46.0	285.0	4.05	33.2	215.4	0.69	1.12	0.92
max	4.45	49.2	311.9	4.18	35.8	260.4	0.73	1.18	0.94

14.9 Διάμετρος $d = 2.7\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.1\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 46^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	5.16	47.1	408.7	4.80	32.7	280.0	0.69	1.15	0.93
2	5.09	46.7	359.7	4.83	31.0	273.3	0.67	1.19	0.95
3	5.15	46.7	387.4	4.68	31.5	298.6	0.65	1.13	0.91
4	5.14	46.3	379.9	5.05	34.9	277.0	0.78	1.16	0.98
5	5.08	44.3	400.7	4.89	30.2	305.1	0.69	1.16	0.96
\bar{x}	5.12	46.2	387.3	4.85	32.1	286.8	0.70	1.16	0.95
s	0.03	1.0	17.1	0.12	1.7	12.6	0.04	0.02	0.03
min	5.08	44.3	359.7	4.68	30.2	273.3	0.65	1.13	0.91
max	5.16	47.1	408.7	5.05	34.9	305.1	0.78	1.19	0.98

14.10 Διάμετρος $d = 2.7\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.9\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 45^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	5.97	45.3	436.9	5.66	33.7	316.1	0.74	1.12	0.95
2	5.86	45.6	399.4	5.45	35.7	300.1	0.76	1.08	0.93
3	5.95	46.1	416.2	5.54	31.0	328.3	0.67	1.15	0.93
4	5.80	44.2	429.5	5.81	31.4	299.8	0.75	1.19	1.00
5	5.85	44.9	442.7	5.74	31.7	327.1	0.73	1.18	0.98
\bar{x}	5.89	45.2	424.9	5.64	32.7	314.3	0.73	1.14	0.96
s	0.06	0.7	15.6	0.13	1.8	12.4	0.03	0.04	0.03
min	5.80	44.2	399.4	5.45	31.0	299.8	0.67	1.08	0.93
max	5.97	46.1	442.7	5.81	35.7	328.3	0.76	1.19	1.00

14.11 Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.2\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 65^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	4.17	64.7	169.4	3.17	48.6	159.4	0.63	1.18	0.76
2	4.17	65.1	150.4	3.31	49.3	143.1	0.66	1.23	0.79
3	4.23	64.6	173.4	3.31	53.2	137.7	0.69	1.09	0.78
4	4.24	66.3	188.6	3.29	52.0	135.2	0.67	1.19	0.78
5	4.13	66.1	164.9	3.19	46.1	123.9	0.61	1.32	0.77
\bar{x}	4.19	65.4	169.3	3.26	49.9	139.9	0.65	1.20	0.78
s	0.04	0.7	12.4	0.06	2.5	11.6	0.03	0.08	0.01
min	4.13	64.6	150.4	3.17	46.1	123.9	0.61	1.09	0.76
max	4.24	66.3	188.6	3.31	53.2	159.4	0.69	1.32	0.79

14.12 Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 3.5\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 31^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	3.49	31.4	238.7	3.31	22.6	238.4	0.70	1.03	0.95
2	3.39	30.3	227.7	3.31	21.0	240.1	0.70	1.06	0.98
3	3.51	30.3	232.1	3.34	19.3	220.1	0.62	1.04	0.95
4	3.48	30.9	245.0	3.29	21.9	222.6	0.69	1.02	0.94
5	3.52	33.3	286.5	3.36	19.5	226.3	0.58	1.07	0.95
\bar{x}	3.48	31.2	246.0	3.32	20.9	229.5	0.66	1.04	0.96
s	0.05	1.1	21.1	0.02	1.3	8.2	0.05	0.02	0.01
min	3.39	30.3	227.7	3.29	19.3	220.1	0.58	1.02	0.94
max	3.52	33.3	286.5	3.36	22.6	240.1	0.70	1.07	0.98

14.13 Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.3\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 31^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	4.35	32.4	292.1	4.08	23.5	285.8	0.70	1.02	0.94
2	4.27	31.6	314.4	4.09	24.0	274.6	0.75	1.03	0.96
3	4.27	29.0	289.6	4.13	19.1	285.0	0.65	1.04	0.97
4	4.29	29.3	345.3	4.17	20.5	297.7	0.70	1.04	0.97
5	4.33	31.2	307.8	4.06	21.0	310.2	0.65	1.02	0.94
\bar{x}	4.30	30.7	309.8	4.11	21.6	290.7	0.69	1.03	0.95
s	0.03	1.3	20.1	0.04	1.9	12.2	0.04	0.01	0.02
min	4.27	29.0	289.6	4.06	19.1	274.6	0.65	1.02	0.94
max	4.35	32.4	345.3	4.17	24.0	310.2	0.75	1.04	0.97

14.14 Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.8\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 30^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	4.63	29.0	354.3	4.50	17.9	313.8	0.62	1.06	0.97
2	4.90	30.2	336.5	4.84	18.8	317.0	0.63	1.08	0.99
3	4.99	29.2	340.4	4.78	19.9	314.2	0.67	1.03	0.96
4	4.71	30.9	339.6	4.58	22.6	325.3	0.73	1.05	0.97
5	4.79	29.4	364.3	4.70	21.8	318.8	0.74	1.05	0.98
\bar{x}	4.80	29.8	347.0	4.68	20.2	317.8	0.68	1.05	0.97
s	0.13	0.7	10.6	0.12	1.8	4.2	0.05	0.02	0.01
min	4.63	29.0	336.5	4.50	17.9	313.8	0.62	1.03	0.96
max	4.99	30.9	364.3	4.84	22.6	325.3	0.74	1.08	0.99

14.15 Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.2\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 41^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	4.20	40.5	253.1	3.93	25.6	191.2	0.62	1.11	0.94
2	4.20	40.1	266.0	3.93	24.9	222.5	0.61	1.11	0.93
3	4.23	41.2	263.4	3.85	29.5	211.2	0.68	1.05	0.91
4	4.22	42.1	291.2	3.85	30.4	243.6	0.69	1.06	0.91
5	4.29	42.0	275.8	3.90	31.7	204.8	0.71	1.04	0.91
\bar{x}	4.23	41.2	269.9	3.89	28.4	214.7	0.66	1.07	0.92
s	0.03	0.8	12.9	0.04	2.7	17.6	0.04	0.03	0.01
min	4.20	40.1	253.1	3.85	24.9	191.2	0.61	1.04	0.91
max	4.29	42.1	291.2	3.93	31.7	243.6	0.71	1.11	0.94

14.16 Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.9\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 41^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	4.92	40.7	349.4	4.59	30.0	283.5	0.71	1.07	0.93
2	5.01	41.4	354.3	4.97	26.9	301.1	0.68	1.18	0.99
3	4.98	41.0	339.7	4.71	27.6	284.5	0.67	1.11	0.95
4	4.92	40.9	345.7	4.68	28.9	275.4	0.70	1.10	0.95
5	4.88	39.9	325.2	4.63	29.2	250.3	0.72	1.08	0.95
\bar{x}	4.94	40.8	342.8	4.72	28.5	278.9	0.70	1.11	0.95
s	0.05	0.5	10.0	0.13	1.1	16.6	0.02	0.04	0.02
min	4.88	39.9	325.2	4.59	26.9	250.3	0.67	1.07	0.93
max	5.01	41.4	354.3	4.97	30.0	301.1	0.72	1.18	0.99

14.17 Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.7\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 41^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	5.72	42.0	371.6	5.34	27.4	292.2	0.64	1.12	0.93
2	5.63	41.8	365.6	5.25	25.8	323.4	0.61	1.13	0.93
3	5.68	41.4	380.8	5.24	25.2	307.0	0.60	1.11	0.92
4	5.69	42.4	360.1	5.33	30.1	295.2	0.70	1.10	0.94
5	5.76	43.6	345.3	5.24	31.5	275.5	0.69	1.07	0.91
\bar{x}	5.69	42.2	364.7	5.28	28.0	298.7	0.65	1.10	0.93
s	0.04	0.7	11.9	0.04	2.4	15.9	0.04	0.02	0.01
min	5.63	41.4	345.3	5.24	25.2	275.5	0.60	1.07	0.91
max	5.76	43.6	380.8	5.34	31.5	323.4	0.70	1.13	0.94

14.18 Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.4\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 47^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	4.44	48.0	280.5	4.04	34.9	197.6	0.70	1.12	0.91
2	4.40	48.0	266.1	3.99	33.4	207.2	0.67	1.13	0.91
3	4.39	47.9	275.8	4.00	33.0	202.1	0.67	1.14	0.91
4	4.37	46.6	265.0	4.13	31.7	208.3	0.68	1.17	0.94
5	4.38	46.5	287.2	4.11	31.0	191.9	0.67	1.17	0.94
\bar{x}	4.40	47.4	274.9	4.05	32.8	201.4	0.68	1.14	0.92
s	0.02	0.7	8.5	0.06	1.4	6.1	0.01	0.02	0.02
min	4.37	46.5	265.0	3.99	31.0	191.9	0.67	1.12	0.91
max	4.44	48.0	287.2	4.13	34.9	208.3	0.70	1.17	0.94

14.19 Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.1\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 47^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	5.10	46.3	347.9	4.75	32.4	275.1	0.69	1.14	0.93
2	5.16	46.2	318.1	4.75	33.3	222.5	0.70	1.11	0.92
3	5.16	46.8	340.8	4.81	31.5	225.3	0.67	1.16	0.93
4	5.10	47.5	321.8	4.70	33.3	264.3	0.69	1.14	0.92
5	5.11	46.5	337.8	4.76	29.7	243.6	0.64	1.17	0.93
\bar{x}	5.13	46.7	333.3	4.76	32.0	246.2	0.68	1.15	0.93
s	0.02	0.5	11.4	0.03	1.3	20.8	0.02	0.02	0.00
min	5.10	46.2	318.1	4.70	29.7	222.5	0.64	1.11	0.92
max	5.16	47.5	347.9	4.81	33.3	275.1	0.70	1.17	0.93

14.20 Διάμετρος $d = 3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.9\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 46^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	5.89	45.9	393.3	5.50	34.1	286.9	0.73	1.11	0.93
2	5.90	43.9	391.2	5.39	28.4	281.5	0.63	1.11	0.91
3	5.92	45.2	383.1	5.37	30.3	296.5	0.65	1.11	0.91
4	5.98	46.8	375.9	5.18	29.3	277.5	0.58	1.10	0.87
5	5.91	46.3	357.7	5.41	30.6	290.4	0.65	1.14	0.92
\bar{x}	5.92	45.6	380.2	5.37	30.5	286.6	0.65	1.12	0.91
s	0.03	1.0	12.9	0.11	1.9	6.6	0.05	0.01	0.02
min	5.89	43.9	357.7	5.18	28.4	277.5	0.58	1.10	0.87
max	5.98	46.8	393.3	5.50	34.1	296.5	0.73	1.14	0.93

14.21 Διάμετρος $d = 3.4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.2\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 65^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	4.16	65.3	139.7	3.00	47.0	110.3	0.58	1.18	0.72
2	4.13	65.5	171.7	3.09	45.8	101.2	0.59	1.26	0.75
3	4.29	65.9	136.9	3.06	48.1	114.0	0.58	1.17	0.71
4	4.19	65.4	158.8	3.15	48.3	113.8	0.62	1.20	0.75
5	4.21	64.4	145.0	3.31	51.1	110.7	0.68	1.14	0.79
\bar{x}	4.19	65.3	150.5	3.12	48.1	110.0	0.61	1.19	0.74
s	0.05	0.5	13.0	0.10	1.8	4.6	0.04	0.04	0.03
min	4.13	64.4	136.9	3.00	45.8	101.2	0.58	1.14	0.71
max	4.29	65.9	171.7	3.31	51.1	114.0	0.68	1.26	0.79

14.22 Διάμετρος $d = 3.4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 3.5\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 32^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	3.56	34.7	224.7	3.31	20.7	168.4	0.58	1.06	0.93
2	3.47	33.0	247.4	3.32	23.0	160.1	0.69	1.05	0.96
3	3.50	31.2	203.1	3.34	21.2	178.1	0.67	1.04	0.95
4	3.49	30.9	197.9	3.32	21.8	169.4	0.69	1.03	0.95
5	3.46	31.4	206.0	3.33	22.7	186.7	0.71	1.04	0.96
\bar{x}	3.49	32.2	215.8	3.32	21.9	172.5	0.67	1.04	0.95
s	0.03	1.4	18.2	0.01	0.9	9.1	0.05	0.01	0.01
min	3.46	30.9	197.9	3.31	20.7	160.1	0.58	1.03	0.93
max	3.56	34.7	247.4	3.34	23.0	186.7	0.71	1.06	0.96

14.23 Διάμετρος $d = 3.4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.3\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 31^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	4.31	30.1	243.7	4.10	21.9	236.7	0.71	1.02	0.95
2	4.27	30.0	244.3	4.07	20.4	217.8	0.66	1.03	0.95
3	4.27	30.6	260.8	4.10	23.0	213.1	0.74	1.03	0.96
4	4.39	33.9	225.2	4.10	23.6	212.6	0.67	1.03	0.93
5	4.40	30.8	233.7	4.17	20.4	213.3	0.65	1.03	0.95
\bar{x}	4.33	31.1	241.5	4.11	21.9	218.7	0.68	1.03	0.95
s	0.06	1.5	11.9	0.03	1.3	9.2	0.03	0.00	0.01
min	4.27	30.0	225.2	4.07	20.4	212.6	0.65	1.02	0.93
max	4.40	33.9	260.8	4.17	23.6	236.7	0.74	1.03	0.96

14.24 Διάμετρος $d = 3.4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.9\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 32^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	4.81	30.1	275.4	4.65	20.8	244.9	0.68	1.05	0.97
2	4.92	40.9	345.7	4.68	28.9	275.4	0.70	1.10	0.95
3	4.87	30.5	311.9	4.70	21.1	261.2	0.69	1.04	0.97
4	4.82	29.9	282.6	4.69	18.9	239.7	0.63	1.06	0.97
5	4.83	29.4	283.9	4.68	22.0	253.1	0.74	1.03	0.97
\bar{x}	4.85	32.2	299.9	4.68	22.3	254.8	0.69	1.06	0.97
s	0.04	4.4	26.1	0.02	3.5	12.6	0.04	0.03	0.01
min	4.81	29.4	275.4	4.65	18.9	239.7	0.63	1.03	0.95
max	4.92	40.9	345.7	4.70	28.9	275.4	0.74	1.10	0.97

14.25 Διάμετρος $d = 3.4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.2\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 40^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	4.17	40.2	216.9	3.91	29.3	169.2	0.71	1.07	0.94
2	4.16	40.2	204.9	3.90	27.4	179.2	0.67	1.09	0.94
3	4.17	40.0	234.0	3.87	27.2	198.5	0.66	1.08	0.93
4	4.18	39.4	233.9	3.88	27.0	182.9	0.66	1.07	0.93
5	4.23	41.0	223.9	3.86	28.6	178.5	0.67	1.06	0.91
\bar{x}	4.18	40.2	222.7	3.88	27.9	181.7	0.67	1.07	0.93
s	0.02	0.5	11.0	0.02	0.9	9.6	0.02	0.01	0.01
min	4.16	39.4	204.9	3.86	27.0	169.2	0.66	1.06	0.91
max	4.23	41.0	234.0	3.91	29.3	198.5	0.71	1.09	0.94

14.26 Διάμετρος $d = 3.4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.1\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 40^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	4.88	38.5	275.3	4.64	26.6	230.6	0.68	1.09	0.95
2	4.94	40.0	265.3	4.58	28.9	226.1	0.70	1.06	0.93
3	5.62	39.3	301.0	5.19	25.2	283.0	0.62	1.08	0.92
4	4.96	40.3	263.4	4.55	26.1	221.3	0.62	1.08	0.92
5	4.98	41.0	258.7	4.53	28.7	220.1	0.67	1.06	0.91
\bar{x}	5.08	39.8	272.8	4.70	27.1	236.2	0.66	1.07	0.93
s	0.27	0.9	15.1	0.25	1.5	23.7	0.03	0.01	0.01
min	4.88	38.5	258.7	4.53	25.2	220.1	0.62	1.06	0.91
max	5.62	41.0	301.0	5.19	28.9	283.0	0.70	1.09	0.95

14.27 Διάμετρος $d = 3.4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.7\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 41^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	5.66	41.2	308.9	5.20	26.2	253.7	0.62	1.09	0.92
2	5.61	41.4	348.3	5.26	25.3	246.6	0.61	1.13	0.94
3	5.74	42.2	327.0	5.24	27.4	277.0	0.63	1.09	0.91
4	5.72	41.6	320.3	5.29	27.2	243.1	0.64	1.10	0.93
5	5.65	41.0	327.3	5.34	27.9	249.6	0.67	1.11	0.95
\bar{x}	5.67	41.5	326.4	5.27	26.8	254.0	0.63	1.11	0.93
s	0.05	0.4	12.8	0.05	0.9	12.0	0.02	0.01	0.01
min	5.61	41.0	308.9	5.20	25.3	243.1	0.61	1.09	0.91
max	5.74	42.2	348.3	5.34	27.9	277.0	0.67	1.13	0.95

14.28 Διάμετρος $d = 3.4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.4\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 47^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	4.43	47.6	230.8	4.02	32.5	187.1	0.66	1.14	0.91
2	4.43	47.1	235.8	4.03	32.9	184.3	0.67	1.12	0.91
3	4.37	47.5	237.0	4.02	32.6	173.8	0.67	1.15	0.92
4	4.39	46.2	237.6	4.05	33.4	190.8	0.70	1.11	0.92
5	4.44	47.3	234.9	3.98	31.4	194.5	0.63	1.13	0.90
\bar{x}	4.41	47.2	235.2	4.02	32.5	186.1	0.67	1.13	0.91
s	0.03	0.5	2.4	0.02	0.7	7.1	0.02	0.01	0.01
min	4.37	46.2	230.8	3.98	31.4	173.8	0.63	1.11	0.90
max	4.44	47.6	237.6	4.05	33.4	194.5	0.70	1.15	0.92

14.29 Διάμετρος $d = 3.4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.2\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 46^\circ$

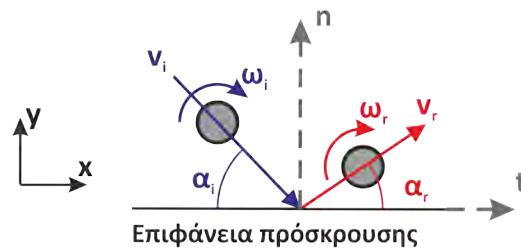
α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	5.20	45.5	299.9	4.85	31.1	214.9	0.68	1.14	0.93
2	5.19	46.5	286.7	4.79	32.4	195.9	0.68	1.13	0.92
3	5.18	46.3	290.0	4.82	32.5	205.5	0.69	1.14	0.93
4	5.14	45.0	299.2	4.65	30.5	212.9	0.65	1.10	0.90
5	5.18	45.7	293.3	4.65	29.1	208.4	0.61	1.12	0.90
\bar{x}	5.18	45.8	293.8	4.75	31.1	207.5	0.66	1.13	0.92
s	0.02	0.6	5.1	0.08	1.3	6.7	0.03	0.01	0.01
min	5.14	45.0	286.7	4.65	29.1	195.9	0.61	1.10	0.90
max	5.20	46.5	299.9	4.85	32.5	214.9	0.69	1.14	0.93

14.30 Διάμετρος $d = 3.4\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.9\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 45^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	5.92	45.7	345.9	5.24	31.5	251.0	0.65	1.08	0.89
2	5.88	44.7	336.2	5.42	28.4	255.0	0.62	1.14	0.92
3	5.83	45.4	332.7	5.27	30.7	242.4	0.65	1.11	0.90
4	5.97	44.9	356.8	5.43	32.0	243.3	0.68	1.09	0.91
5	5.98	46.2	343.2	5.47	31.5	262.4	0.66	1.13	0.91
\bar{x}	5.92	45.4	342.9	5.37	30.8	250.8	0.65	1.11	0.91
s	0.06	0.5	8.4	0.09	1.3	7.5	0.02	0.02	0.01
min	5.83	44.7	332.7	5.24	28.4	242.4	0.62	1.08	0.89
max	5.98	46.2	356.8	5.47	32.0	262.4	0.68	1.14	0.92

Παράρτημα 15

Παραβολική ρίψη σφαιρικών τεμαχίων από ψαμμίτη
 συνεκτίμηση περιστροφικής ταχύτητας



15.1 Διάμετρος $d = 2.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.5\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 66^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	4.43	65.7	169.7	3.97	57.9	144.4	0.83	1.16	0.90
2	4.43	65.5	226.1	4.01	55.6	145.6	0.82	1.23	0.90
3	4.45	66.2	223.1	3.97	56.9	161.2	0.82	1.21	0.89
4	4.49	65.0	142.1	4.06	57.4	128.5	0.84	1.15	0.91
5	4.47	66.0	140.7	4.06	56.0	110.4	0.82	1.25	0.91
\bar{x}	4.45	65.7	180.3	4.02	56.8	138.0	0.83	1.20	0.90
s	0.02	0.4	37.6	0.04	0.9	17.3	0.01	0.04	0.01
min	4.43	65.0	140.7	3.97	55.6	110.4	0.82	1.15	0.89
max	4.49	66.2	226.1	4.06	57.9	161.2	0.84	1.25	0.91

15.2 Διάμετρος $d = 2.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 3.7\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 31^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	3.71	33.6	221.8	3.62	29.0	223.0	0.85	1.02	0.97
2	3.65	29.0	265.6	3.62	23.7	206.9	0.82	1.04	0.99
3	3.71	31.8	249.4	3.60	25.6	198.8	0.80	1.03	0.97
4	3.63	30.5	256.8	3.58	26.7	183.3	0.87	1.02	0.99
5	3.67	31.1	206.9	3.58	28.0	270.4	0.89	1.01	0.98
\bar{x}	3.67	31.2	240.1	3.60	26.6	216.5	0.85	1.02	0.98
s	0.03	1.5	22.1	0.02	1.9	29.8	0.03	0.01	0.01
min	3.63	29.0	206.9	3.58	23.7	183.3	0.80	1.01	0.97
max	3.71	33.6	265.6	3.62	29.0	270.4	0.89	1.04	0.99

15.3 Διάμετρος $d = 2.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.5\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 31^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	4.42	30.6	239.4	4.36	24.2	276.9	0.79	1.05	0.99
2	4.55	30.7	297.9	4.48	25.9	273.2	0.84	1.03	0.98
3	4.58	31.1	335.4	4.62	23.2	277.1	0.77	1.08	1.01
4	4.52	30.5	287.9	4.47	26.1	275.6	0.86	1.03	0.99
5	4.59	30.8	292.4	4.54	26.4	262.2	0.86	1.03	0.99
\bar{x}	4.53	30.8	290.6	4.50	25.2	273.0	0.82	1.04	0.99
s	0.06	0.2	30.6	0.09	1.2	5.6	0.04	0.02	0.01
min	4.42	30.5	239.4	4.36	23.2	262.2	0.77	1.03	0.98
max	4.59	31.1	335.4	4.62	26.4	277.1	0.86	1.08	1.01

15.4 Διάμετρος $d = 2.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.1\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 31^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	4.93	31.4	321.2	4.90	26.8	287.9	0.86	1.04	1.00
2	5.10	31.2	332.8	5.08	24.3	284.1	0.79	1.06	0.99
3	5.17	30.7	355.2	5.24	25.4	301.1	0.85	1.06	1.01
4	4.93	30.7	345.1	4.92	24.4	299.0	0.81	1.06	1.00
5	5.20	30.3	328.3	5.30	23.4	303.3	0.80	1.08	1.02
\bar{x}	5.07	30.9	336.5	5.09	24.9	295.1	0.82	1.06	1.00
s	0.12	0.4	12.2	0.16	1.1	7.6	0.03	0.01	0.01
min	4.93	30.3	321.2	4.90	23.4	284.1	0.79	1.04	0.99
max	5.20	31.4	355.2	5.30	26.8	303.3	0.86	1.08	1.02

15.5 Διάμετρος $d = 2.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.4\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 42^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	4.50	42.1	243.1	4.27	34.7	234.8	0.81	1.05	0.95
2	4.45	44.2	252.9	4.24	32.8	229.7	0.74	1.12	0.95
3	4.43	43.0	251.1	4.30	34.4	216.0	0.80	1.10	0.97
4	4.37	39.4	297.6	4.34	31.4	234.7	0.82	1.10	0.99
5	4.35	41.9	264.1	4.26	32.6	221.8	0.79	1.11	0.98
\bar{x}	4.42	42.1	261.8	4.28	33.2	227.4	0.79	1.09	0.97
s	0.05	1.6	19.1	0.04	1.2	7.4	0.03	0.02	0.02
min	4.35	39.4	243.1	4.24	31.4	216.0	0.74	1.05	0.95
max	4.50	44.2	297.6	4.34	34.7	234.8	0.82	1.12	0.99

15.6 Διάμετρος $d = 2.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.1\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 40^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	5.03	38.6	366.7	5.08	30.4	291.5	0.82	1.11	1.01
2	5.28	41.6	326.7	5.07	36.8	267.2	0.87	1.03	0.96
3	5.20	39.7	363.5	5.11	30.0	266.8	0.77	1.11	0.98
4	5.11	40.9	332.5	5.06	30.9	276.2	0.78	1.12	0.99
5	5.10	41.2	325.7	5.08	33.1	275.2	0.82	1.11	1.00
\bar{x}	5.14	40.4	343.0	5.08	32.2	275.4	0.81	1.10	0.99
s	0.09	1.1	18.2	0.02	2.5	9.0	0.03	0.03	0.02
min	5.03	38.6	325.7	5.06	30.0	266.8	0.77	1.03	0.96
max	5.28	41.6	366.7	5.11	36.8	291.5	0.87	1.12	1.01

15.7 Διάμετρος $d = 2.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.8\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 40^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	5.96	40.1	357.7	5.76	32.0	321.5	0.79	1.07	0.97
2	5.80	40.3	383.3	5.63	33.8	309.4	0.83	1.06	0.97
3	5.89	40.7	374.4	5.70	31.1	314.8	0.77	1.09	0.97
4	5.85	37.7	363.2	5.81	32.2	326.2	0.86	1.06	0.99
5	5.61	41.3	354.0	5.57	33.9	284.0	0.84	1.10	0.99
\bar{x}	5.82	40.0	366.5	5.69	32.6	311.2	0.82	1.08	0.98
s	0.12	1.2	10.9	0.09	1.1	14.8	0.03	0.02	0.01
min	5.61	37.7	354.0	5.57	31.1	284.0	0.77	1.06	0.97
max	5.96	41.3	383.3	5.81	33.9	326.2	0.86	1.10	0.99

15.8 Διάμετρος $d = 2.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.6\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 48^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	4.52	47.4	272.4	4.44	40.3	208.6	0.86	1.10	0.98
2	4.52	47.7	282.3	4.46	36.5	236.3	0.79	1.18	0.99
3	4.54	48.9	272.1	4.37	40.5	225.6	0.83	1.11	0.96
4	4.62	47.8	289.8	4.47	42.2	223.1	0.88	1.07	0.97
5	4.67	48.8	282.5	4.57	42.4	221.3	0.88	1.10	0.98
\bar{x}	4.57	48.1	279.8	4.46	40.4	223.0	0.85	1.11	0.98
s	0.06	0.6	6.8	0.06	2.1	8.9	0.03	0.04	0.01
min	4.52	47.4	272.1	4.37	36.5	208.6	0.79	1.07	0.96
max	4.67	48.9	289.8	4.57	42.4	236.3	0.88	1.18	0.99

15.9 Διάμετρος $d = 2.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.3\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 46^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	5.35	46.0	349.2	5.18	35.5	283.1	0.78	1.13	0.97
2	5.27	45.8	379.6	5.04	34.4	264.9	0.75	1.13	0.96
3	5.35	47.2	355.4	5.07	40.5	269.4	0.84	1.06	0.95
4	5.37	46.4	346.8	5.13	38.7	260.9	0.83	1.08	0.96
5	5.28	45.4	353.3	5.05	38.3	242.4	0.83	1.07	0.96
\bar{x}	5.32	46.2	356.9	5.09	37.5	264.1	0.81	1.10	0.96
s	0.04	0.6	11.8	0.05	2.2	13.2	0.03	0.03	0.01
min	5.27	45.4	346.8	5.04	34.4	242.4	0.75	1.06	0.95
max	5.37	47.2	379.6	5.18	40.5	283.1	0.84	1.13	0.97

15.10 Διάμετρος $d = 2.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 6.0\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 46^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	6.06	46.6	408.1	5.70	36.8	272.8	0.78	1.10	0.94
2	5.93	47.2	367.8	5.55	40.2	321.0	0.82	1.05	0.94
3	6.15	44.9	410.4	5.76	35.4	321.3	0.77	1.08	0.94
4	5.96	44.2	372.5	5.65	38.9	255.7	0.85	1.03	0.95
5	6.01	45.7	411.5	5.70	37.8	289.0	0.81	1.07	0.95
\bar{x}	6.02	45.7	394.1	5.67	37.8	292.0	0.81	1.07	0.94
s	0.08	1.1	19.6	0.07	1.6	26.0	0.03	0.02	0.01
min	5.93	44.2	367.8	5.55	35.4	255.7	0.77	1.03	0.94
max	6.15	47.2	411.5	5.76	40.2	321.3	0.85	1.10	0.95

15.11 Διάμετρος $d = 3.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.5\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 66^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	4.50	66.4	126.3	3.75	55.1	112.4	0.75	1.19	0.83
2	4.52	65.6	149.8	3.91	56.0	106.1	0.79	1.17	0.86
3	4.51	65.3	154.1	3.93	53.7	108.3	0.77	1.23	0.87
4	4.52	64.6	150.2	3.96	54.1	114.8	0.79	1.19	0.88
5	4.50	66.1	159.9	3.87	58.9	90.3	0.81	1.09	0.86
\bar{x}	4.51	65.6	148.1	3.88	55.6	106.4	0.78	1.18	0.86
s	0.01	0.6	11.5	0.07	1.9	8.6	0.02	0.05	0.01
min	4.50	64.6	126.3	3.75	53.7	90.3	0.75	1.09	0.83
max	4.52	66.4	159.9	3.96	58.9	114.8	0.81	1.23	0.88

15.12 Διάμετρος $d = 3.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 3.7\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 32^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	3.70	31.3	164.4	3.56	26.0	155.9	0.81	1.01	0.96
2	3.66	30.7	167.4	3.58	23.6	162.3	0.77	1.04	0.98
3	3.70	32.3	156.1	3.55	28.1	151.9	0.85	1.00	0.96
4	3.71	31.0	159.0	3.57	26.5	158.1	0.83	1.00	0.96
5	3.69	33.9	164.0	3.54	26.1	138.6	0.76	1.04	0.96
\bar{x}	3.69	31.8	162.2	3.56	26.1	153.4	0.80	1.02	0.96
s	0.02	1.2	4.1	0.02	1.5	8.1	0.04	0.02	0.01
min	3.66	30.7	156.1	3.54	23.6	138.6	0.76	1.00	0.96
max	3.71	33.9	167.4	3.58	28.1	162.3	0.85	1.04	0.98

15.13 Διάμετρος $d = 3.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.5\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 31^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	4.60	29.5	201.2	4.46	22.9	192.0	0.76	1.03	0.97
2	4.47	31.2	191.2	4.39	25.7	177.6	0.82	1.03	0.98
3	4.38	30.2	198.6	4.28	25.9	180.4	0.85	1.02	0.98
4	4.52	31.3	213.4	4.37	25.8	184.9	0.81	1.02	0.97
5	4.54	30.6	227.0	4.47	23.3	184.5	0.77	1.05	0.99
\bar{x}	4.50	30.6	206.3	4.39	24.7	183.9	0.80	1.03	0.98
s	0.07	0.7	12.6	0.07	1.3	4.9	0.03	0.01	0.01
min	4.38	29.5	191.2	4.28	22.9	177.6	0.76	1.02	0.97
max	4.60	31.3	227.0	4.47	25.9	192.0	0.85	1.05	0.99

15.14 Διάμετρος $d = 3.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.3\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 33^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	5.24	33.5	229.9	5.07	24.4	209.1	0.72	1.06	0.97
2	5.34	33.9	241.9	5.19	24.7	218.7	0.73	1.06	0.97
3	5.24	32.5	258.5	5.09	25.3	217.6	0.77	1.04	0.97
4	5.20	31.8	241.9	5.08	24.7	212.1	0.77	1.04	0.98
5	5.24	32.9	239.2	5.18	24.5	216.4	0.76	1.07	0.99
\bar{x}	5.25	32.9	242.3	5.12	24.7	214.8	0.75	1.06	0.98
s	0.05	0.7	9.2	0.05	0.3	3.6	0.02	0.01	0.01
min	5.20	31.8	229.9	5.07	24.4	209.1	0.72	1.04	0.97
max	5.34	33.9	258.5	5.19	25.3	218.7	0.77	1.07	0.99

15.15 Διάμετρος $d = 3.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.4\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 41^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	4.36	41.7	195.8	4.23	30.9	170.2	0.75	1.11	0.97
2	4.37	41.1	193.5	4.26	31.5	168.5	0.77	1.10	0.98
3	4.38	39.4	194.9	4.22	28.6	170.0	0.73	1.10	0.96
4	4.33	40.9	187.4	4.14	29.5	159.9	0.72	1.10	0.95
5	4.36	40.2	193.0	4.25	32.0	164.6	0.80	1.08	0.98
\bar{x}	4.36	40.6	192.9	4.22	30.5	166.6	0.75	1.10	0.97
s	0.02	0.8	2.9	0.04	1.3	3.9	0.03	0.01	0.01
min	4.33	39.4	187.4	4.14	28.6	159.9	0.72	1.08	0.95
max	4.38	41.7	195.8	4.26	32.0	170.2	0.80	1.11	0.98

15.16 Διάμετρος $d = 3.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.2\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 40^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	5.23	41.1	235.9	4.98	30.8	187.7	0.74	1.09	0.95
2	5.08	39.4	205.1	5.00	31.4	193.8	0.81	1.09	0.98
3	5.17	41.1	222.9	4.99	30.6	200.0	0.75	1.10	0.96
4	5.36	40.6	198.3	5.00	31.8	197.1	0.75	1.04	0.93
5	5.10	39.6	225.3	4.99	30.7	194.6	0.78	1.09	0.98
\bar{x}	5.19	40.4	217.5	4.99	31.0	194.6	0.77	1.08	0.96
s	0.10	0.7	13.8	0.00	0.5	4.1	0.03	0.02	0.02
min	5.08	39.4	198.3	4.98	30.6	187.7	0.74	1.04	0.93
max	5.36	41.1	235.9	5.00	31.8	200.0	0.81	1.10	0.98

15.17 Διάμετρος $d = 3.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.8\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 40^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	5.82	39.0	297.9	5.69	30.7	213.4	0.79	1.08	0.98
2	5.86	39.1	305.9	5.70	30.5	229.0	0.78	1.08	0.97
3	5.89	41.2	306.2	5.65	31.7	211.9	0.77	1.09	0.96
4	5.87	39.7	256.5	5.70	31.1	213.5	0.78	1.08	0.97
5	5.72	39.7	285.5	5.59	30.2	217.0	0.77	1.10	0.98
\bar{x}	5.83	39.8	290.4	5.66	30.8	217.0	0.78	1.09	0.97
s	0.06	0.8	18.5	0.04	0.6	6.3	0.01	0.01	0.01
min	5.72	39.0	256.5	5.59	30.2	211.9	0.77	1.08	0.96
max	5.89	41.2	306.2	5.70	31.7	229.0	0.79	1.10	0.98

15.18 Διάμετρος $d = 3.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.6\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 47^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	4.61	48.5	212.4	4.43	39.0	154.7	0.81	1.13	0.96
2	4.60	47.5	221.3	4.46	39.0	170.6	0.83	1.12	0.97
3	4.56	48.1	213.2	4.45	37.4	163.8	0.80	1.16	0.98
4	4.54	46.0	216.0	4.41	36.2	164.9	0.80	1.13	0.97
5	4.55	46.7	213.3	4.47	39.4	160.9	0.86	1.11	0.98
\bar{x}	4.57	47.4	215.2	4.45	38.2	163.0	0.82	1.13	0.97
s	0.03	0.9	3.2	0.02	1.2	5.2	0.02	0.02	0.01
min	4.54	46.0	212.4	4.41	36.2	154.7	0.80	1.11	0.96
max	4.61	48.5	221.3	4.47	39.4	170.6	0.86	1.16	0.98

15.19 Διάμετρος $d = 3.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.4\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 46^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	5.33	45.7	252.7	5.02	38.4	206.5	0.82	1.06	0.94
2	5.35	46.4	260.0	4.89	33.4	198.0	0.69	1.11	0.91
3	5.39	46.3	266.0	4.99	35.0	176.7	0.74	1.10	0.93
4	5.48	45.9	280.0	5.07	37.4	203.3	0.78	1.06	0.93
5	5.33	47.1	260.1	5.24	35.6	216.7	0.78	1.17	0.98
\bar{x}	5.38	46.3	263.7	5.04	36.0	200.2	0.76	1.10	0.94
s	0.05	0.5	9.2	0.11	1.8	13.3	0.04	0.04	0.02
min	5.33	45.7	252.7	4.89	33.4	176.7	0.69	1.06	0.91
max	5.48	47.1	280.0	5.24	38.4	216.7	0.82	1.17	0.98

15.20 Διάμετρος $d = 3.9\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 6.1\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 44^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	6.11	44.5	300.4	5.78	36.1	195.5	0.79	1.07	0.95
2	6.07	44.1	298.6	5.78	35.1	180.9	0.79	1.08	0.95
3	6.04	43.7	287.3	5.73	32.0	226.0	0.73	1.11	0.95
4	6.10	43.8	312.5	5.81	32.7	246.3	0.74	1.11	0.95
5	6.05	44.5	288.9	5.76	34.2	203.4	0.76	1.10	0.95
\bar{x}	6.07	44.1	297.6	5.77	34.0	210.4	0.76	1.10	0.95
s	0.03	0.3	9.1	0.03	1.5	23.1	0.03	0.02	0.00
min	6.04	43.7	287.3	5.73	32.0	180.9	0.73	1.07	0.95
max	6.11	44.5	312.5	5.81	36.1	246.3	0.79	1.11	0.95

15.21 Διάμετρος $d = 4.3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.6\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 65^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	4.54	66.0	147.0	3.80	55.5	99.6	0.76	1.17	0.84
2	4.57	64.9	116.8	3.88	57.5	90.6	0.79	1.07	0.85
3	4.56	63.5	142.1	3.81	50.5	85.5	0.72	1.19	0.84
4	4.55	64.0	130.2	3.82	54.6	96.8	0.76	1.11	0.84
5	4.57	65.5	134.6	3.82	52.5	108.5	0.73	1.23	0.84
\bar{x}	4.56	64.8	134.1	3.83	54.1	96.2	0.75	1.15	0.84
s	0.01	0.9	10.4	0.03	2.4	7.9	0.02	0.05	0.00
min	4.54	63.5	116.8	3.80	50.5	85.5	0.72	1.07	0.84
max	4.57	66.0	147.0	3.88	57.5	108.5	0.79	1.23	0.85

15.22 Διάμετρος $d = 4.3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 3.8\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 33^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	3.76	32.9	148.2	3.63	24.6	144.2	0.74	1.05	0.97
2	3.72	33.3	167.9	3.58	28.1	133.7	0.83	1.02	0.96
3	3.74	32.1	152.0	3.54	27.1	142.5	0.81	1.00	0.95
4	3.77	33.0	150.0	3.53	27.3	144.9	0.79	0.99	0.94
5	3.80	32.6	154.1	3.60	28.6	146.1	0.84	0.99	0.95
\bar{x}	3.76	32.8	154.4	3.58	27.1	142.3	0.80	1.01	0.95
s	0.03	0.4	7.0	0.04	1.4	4.5	0.04	0.02	0.01
min	3.72	32.1	148.2	3.53	24.6	133.7	0.74	0.99	0.94
max	3.80	33.3	167.9	3.63	28.6	146.1	0.84	1.05	0.97

15.23 Διάμετρος $d = 4.3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.5\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 31^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	4.65	30.2	201.2	4.46	24.9	179.2	0.80	1.01	0.96
2	4.41	31.5	202.5	4.43	25.1	170.3	0.81	1.07	1.00
3	4.34	31.4	184.2	4.29	24.4	177.5	0.78	1.05	0.99
4	4.42	31.2	206.0	4.35	25.6	180.6	0.82	1.04	0.98
5	4.45	30.1	189.4	4.39	22.9	174.8	0.77	1.05	0.99
\bar{x}	4.45	30.9	196.7	4.38	24.6	176.5	0.80	1.04	0.98
s	0.10	0.6	8.4	0.06	0.9	3.7	0.02	0.02	0.01
min	4.34	30.1	184.2	4.29	22.9	170.3	0.77	1.01	0.96
max	4.65	31.5	206.0	4.46	25.6	180.6	0.82	1.07	1.00

15.24 Διάμετρος $d = 4.3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.1\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 30^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	4.97	31.2	215.0	5.02	22.8	205.6	0.76	1.09	1.01
2	5.08	30.8	222.5	5.09	22.7	220.3	0.76	1.08	1.00
3	5.05	30.9	216.1	4.98	22.9	210.5	0.75	1.06	0.99
4	5.47	27.7	204.7	5.18	22.9	193.0	0.79	0.98	0.95
5	4.96	31.0	213.3	4.85	25.0	205.5	0.80	1.03	0.98
\bar{x}	5.11	30.3	214.3	5.02	23.3	207.0	0.77	1.05	0.98
s	0.19	1.3	5.7	0.11	0.9	8.8	0.02	0.04	0.02
min	4.96	27.7	204.7	4.85	22.7	193.0	0.75	0.98	0.95
max	5.47	31.2	222.5	5.18	25.0	220.3	0.80	1.09	1.01

15.25 Διάμετρος $d = 4.3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.4\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 41^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	4.31	42.1	174.6	4.09	32.8	158.2	0.77	1.07	0.95
2	4.37	40.3	200.4	4.33	29.2	156.1	0.75	1.13	0.99
3	4.44	42.0	175.1	4.29	32.4	161.7	0.77	1.10	0.97
4	4.43	41.2	181.3	4.30	29.4	158.7	0.72	1.13	0.97
5	4.38	40.9	184.1	4.26	30.9	156.8	0.76	1.10	0.97
\bar{x}	4.39	41.3	183.1	4.25	31.0	158.3	0.75	1.11	0.97
s	0.05	0.7	9.4	0.09	1.5	2.0	0.02	0.02	0.01
min	4.31	40.3	174.6	4.09	29.2	156.1	0.72	1.07	0.95
max	4.44	42.1	200.4	4.33	32.8	161.7	0.77	1.13	0.99

15.26 Διάμετρος $d = 4.3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.1\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 40^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	4.95	40.2	204.5	4.82	34.2	170.8	0.85	1.06	0.97
2	5.11	40.4	212.9	4.99	28.9	196.3	0.73	1.12	0.98
3	5.04	40.0	206.0	4.91	32.1	178.9	0.81	1.08	0.97
4	5.17	41.3	219.9	4.94	36.0	173.8	0.85	1.03	0.96
5	5.14	40.4	211.7	4.98	33.6	174.3	0.83	1.06	0.97
\bar{x}	5.08	40.5	211.0	4.93	33.0	178.8	0.81	1.07	0.97
s	0.08	0.5	5.5	0.06	2.4	9.1	0.04	0.03	0.01
min	4.95	40.0	204.5	4.82	28.9	170.8	0.73	1.03	0.96
max	5.17	41.3	219.9	4.99	36.0	196.3	0.85	1.12	0.98

15.27 Διάμετρος $d = 4.3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.8\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 40^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	5.87	39.5	241.2	5.65	31.2	208.1	0.78	1.07	0.96
2	5.78	38.7	236.5	5.63	31.5	201.3	0.81	1.07	0.98
3	5.83	40.7	238.4	5.66	32.6	199.4	0.80	1.08	0.97
4	5.66	39.6	261.7	5.49	28.7	197.7	0.73	1.10	0.97
5	5.70	39.5	237.1	5.54	28.9	224.7	0.74	1.10	0.97
\bar{x}	5.77	39.6	243.0	5.59	30.6	206.2	0.77	1.08	0.97
s	0.08	0.6	9.5	0.07	1.5	9.9	0.03	0.02	0.00
min	5.66	38.7	236.5	5.49	28.7	197.7	0.73	1.07	0.96
max	5.87	40.7	261.7	5.66	32.6	224.7	0.81	1.10	0.98

15.28 Διάμετρος $d = 4.3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 4.6\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 46^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	4.47	46.9	196.8	4.25	36.6	136.7	0.78	1.12	0.95
2	4.75	46.4	207.9	4.32	34.8	149.9	0.72	1.08	0.91
3	4.72	43.9	194.5	4.29	34.2	161.6	0.74	1.04	0.91
4	4.51	48.8	240.1	4.23	38.6	149.6	0.78	1.11	0.94
5	4.77	44.9	222.8	4.22	35.7	139.4	0.73	1.01	0.88
\bar{x}	4.64	46.2	212.4	4.26	36.0	147.4	0.75	1.07	0.92
s	0.13	1.7	17.1	0.04	1.6	8.8	0.03	0.04	0.02
min	4.47	43.9	194.5	4.22	34.2	136.7	0.72	1.01	0.88
max	4.77	48.8	240.1	4.32	38.6	161.6	0.78	1.12	0.95

15.29 Διάμετρος $d = 4.3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 5.3\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 47^\circ$

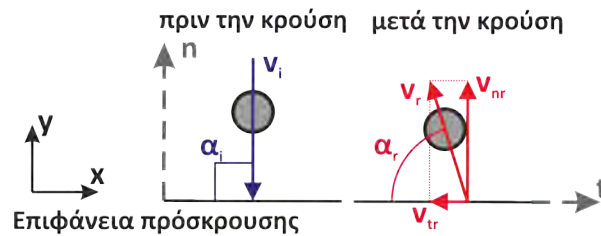
α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	5.29	46.3	225.5	5.03	35.8	177.0	0.77	1.12	0.95
2	5.26	47.1	241.5	5.03	37.6	186.6	0.80	1.11	0.96
3	5.32	46.2	236.0	5.11	37.3	189.7	0.81	1.10	0.96
4	5.38	47.2	231.3	5.17	36.5	175.3	0.78	1.14	0.96
5	5.47	46.0	250.4	4.91	34.7	161.4	0.71	1.06	0.90
\bar{x}	5.34	46.5	236.9	5.05	36.4	178.0	0.77	1.11	0.95
s	0.07	0.5	8.5	0.09	1.1	10.0	0.03	0.02	0.02
min	5.26	46.0	225.5	4.91	34.7	161.4	0.71	1.06	0.90
max	5.47	47.2	250.4	5.17	37.6	189.7	0.81	1.14	0.96

15.30 Διάμετρος $d = 4.3\text{cm}$, ταχύτητα $v_i = 6.1\text{ms}^{-1}$ και γωνία $\alpha_i = 45^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	6.10	44.3	283.4	5.88	31.3	226.9	0.72	1.15	0.96
2	6.00	44.8	274.0	5.75	35.2	184.7	0.79	1.10	0.96
3	5.98	45.8	275.8	5.71	34.3	197.0	0.75	1.13	0.95
4	6.12	45.2	266.5	5.81	34.0	231.0	0.75	1.12	0.95
5	6.09	45.4	268.8	5.72	35.7	191.6	0.77	1.09	0.94
\bar{x}	6.06	45.1	273.7	5.77	34.1	206.3	0.75	1.12	0.95
s	0.06	0.5	5.9	0.06	1.5	19.0	0.02	0.02	0.01
min	5.98	44.3	266.5	5.71	31.3	184.7	0.72	1.09	0.94
max	6.12	45.8	283.4	5.88	35.7	231.0	0.79	1.15	0.96

Παράρτημα 16

Ελεύθερη πτώση σφαιρικών τεμαχίων σε επιφάνεια διαφορετικού τύπου



16.1 Σφαίρα μαρμάρου $d = 2.7\text{cm}$ σε επιφάνεια πρόσκρουσης τσιμεντοειδούς ενέματος

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]
1	-2.97	2.06	0.00	2.06	89.9	0.69	0.69
2	-2.99	2.10	0.01	2.10	89.7	0.70	0.70
3	-2.97	2.12	0.03	2.12	89.1	0.72	0.72
4	-2.98	2.15	0.05	2.15	88.8	0.72	0.72
5	-2.98	2.12	-0.12	2.12	86.7	0.71	0.71
\bar{x}	-2.98	2.11	-0.01	2.11	88.9	0.71	0.71
s	0.01	0.03	0.06	0.03	1.1	0.01	0.01
min	-2.99	2.06	-0.12	2.06	86.7	0.69	0.69
max	-2.97	2.15	0.05	2.15	89.9	0.72	0.72

16.2 Σφαίρα μαρμάρου $d = 3\text{cm}$ σε επιφάνεια πρόσκρουσης τσιμεντοειδούς ενέματος

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-2.97	2.06	0.00	2.06	89.9	0.69	0.69
2	-2.97	1.93	-0.07	1.94	87.9	0.65	0.65
3	-2.97	1.98	-0.09	1.98	87.4	0.67	0.67
4	-2.97	2.05	-0.04	2.05	88.8	0.69	0.69
5	-2.97	2.06	-0.04	2.06	89.0	0.69	0.69
\bar{x}	-2.97	2.02	-0.05	2.02	88.6	0.68	0.68
s	0.00	0.05	0.03	0.05	0.9	0.02	0.02
min	-2.97	1.93	-0.09	1.94	87.4	0.65	0.65
max	-2.97	2.06	0.00	2.06	89.9	0.69	0.69

16.3 Σφαίρα μαρμάρου $d = 3.3\text{cm}$ σε επιφάνεια πρόσκρουσης τσιμεντοειδούς ενέματος

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-2.96	1.92	0.10	1.92	86.9	0.65	0.65
2	-2.97	1.86	0.01	1.86	89.6	0.63	0.63
3	-2.96	1.95	0.07	1.95	87.9	0.66	0.66
4	-2.96	1.92	0.02	1.92	89.3	0.65	0.65
5	-2.97	1.90	-0.10	1.90	86.8	0.64	0.64
\bar{x}	-2.96	1.91	0.02	1.91	88.1	0.64	0.64
s	0.00	0.03	0.07	0.03	1.2	0.01	0.01
min	-2.97	1.86	-0.10	1.86	86.8	0.63	0.63
max	-2.96	1.95	0.10	1.95	89.6	0.66	0.66

16.4 Σφαίρα ψαμμίτη $d = 2.9\text{cm}$ σε επιφάνεια πρόσκρουσης τσιμεντοειδούς ενέματος

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-3.04	2.10	0.02	2.10	89.4	0.69	0.69
2	-3.02	2.04	-0.02	2.04	89.5	0.68	0.68
3	-3.05	2.21	0.02	2.21	89.4	0.72	0.72
4	-3.04	2.14	0.03	2.14	89.2	0.70	0.70
5	-3.04	2.13	0.10	2.13	87.3	0.70	0.70
\bar{x}	-3.04	2.12	0.03	2.12	89.0	0.70	0.70
s	0.01	0.06	0.04	0.06	0.8	0.02	0.02
min	-3.05	2.04	-0.02	2.04	87.3	0.68	0.68
max	-3.02	2.21	0.10	2.21	89.5	0.72	0.72

16.5 Σφαίρα ψαμμίτη $d = 4.0\text{cm}$ σε επιφάνεια πρόσκρουσης τσιμεντοειδούς ενέματος

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-3.07	1.98	0.01	1.98	89.7	0.65	0.65
2	-3.06	1.86	-0.01	1.86	89.7	0.61	0.61
3	-3.08	2.02	-0.12	2.02	86.6	0.66	0.66
4	-3.06	1.98	-0.07	1.98	88.0	0.65	0.65
5	-3.07	1.94	0.03	1.94	89.0	0.63	0.63
\bar{x}	-3.07	1.96	-0.03	1.96	88.6	0.64	0.64
s	0.01	0.05	0.06	0.05	1.2	0.02	0.02
min	-3.08	1.86	-0.12	1.86	86.6	0.61	0.61
max	-3.06	2.02	0.03	2.02	89.7	0.66	0.66

16.6 Σφαίρα ψαμμίτη $d = 4.3\text{cm}$ σε επιφάνεια πρόσκρουσης τσιμεντοειδούς ενέματος

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-3.09	1.86	0.01	1.86	89.6	0.60	0.60
2	-3.08	1.79	0.17	1.80	84.5	0.58	0.58
3	-3.11	1.85	0.02	1.85	89.4	0.60	0.60
4	-3.08	1.85	0.09	1.85	87.2	0.60	0.60
5	-3.08	1.90	0.15	1.90	85.6	0.62	0.62
\bar{x}	-3.09	1.85	0.09	1.85	87.3	0.60	0.60
s	0.01	0.03	0.06	0.03	2.0	0.01	0.01
min	-3.11	1.79	0.01	1.80	84.5	0.58	0.58
max	-3.08	1.90	0.17	1.90	89.6	0.62	0.62

16.7 Σφαίρα τσιμεντοειδούς ενέματος $d = 3\text{cm}$ σε επιφάνεια πρόσκρουσης μαρμάρου

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-3.16	2.21	0.02	2.21	89.5	0.70	0.70
2	-3.24	2.32	0.02	2.32	89.4	0.72	0.72
3	-3.34	2.43	0.04	2.43	89.2	0.73	0.73
4	-3.23	2.18	0.06	2.18	88.3	0.67	0.67
5	-3.31	2.33	0.02	2.33	89.6	0.70	0.70
\bar{x}	-3.26	2.29	0.03	2.30	89.2	0.70	0.70
s	0.06	0.09	0.02	0.09	0.5	0.02	0.02
min	-3.34	2.18	0.02	2.18	88.3	0.67	0.67
max	-3.16	2.43	0.06	2.43	89.6	0.73	0.73

16.8 Σφαίρα τσιμεντοειδούς ενέματος $d = 4\text{cm}$ σε επιφάνεια πρόσκρουσης μαρμάρου

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-3.14	1.90	-0.01	1.90	89.6	0.60	0.60
2	-3.16	1.99	-0.10	2.00	87.0	0.63	0.63
3	-3.17	2.01	0.10	2.02	87.2	0.64	0.63
4	-3.15	1.94	-0.03	1.94	89.1	0.61	0.61
5	-3.18	2.00	0.21	2.01	84.1	0.63	0.63
\bar{x}	-3.16	1.97	0.03	1.97	87.4	0.62	0.62
s	0.02	0.04	0.11	0.05	1.9	0.01	0.01
min	-3.18	1.90	-0.10	1.90	84.1	0.60	0.60
max	-3.14	2.01	0.21	2.02	89.6	0.64	0.63

16.9 Σφαίρα ψαμμίτη $d = 2.9\text{cm}$ σε επιφάνεια πρόσκρουσης μαρμάρου

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-3.10	2.44	-0.08	2.44	88.0	0.79	0.79
2	-3.12	2.39	-0.19	2.39	85.4	0.77	0.76
3	-3.09	2.37	-0.09	2.38	87.9	0.77	0.77
4	-3.10	2.44	-0.17	2.44	86.1	0.79	0.79
5	-3.09	2.40	-0.08	2.40	88.1	0.78	0.78
\bar{x}	-3.10	2.41	-0.12	2.41	87.1	0.78	0.78
s	0.01	0.03	0.05	0.03	1.1	0.01	0.01
min	-3.12	2.37	-0.19	2.38	85.4	0.77	0.76
max	-3.09	2.44	-0.08	2.44	88.1	0.79	0.79

16.10 Σφαίρα ψαμμίτη $d = 4\text{cm}$ σε επιφάνεια πρόσκρουσης μαρμάρου

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-3.10	2.23	-0.01	2.23	89.8	0.72	0.72
2	-3.12	2.19	-0.05	2.19	88.7	0.70	0.70
3	-3.13	2.14	-0.16	2.15	85.7	0.69	0.68
4	-3.11	2.15	-0.15	2.15	86.0	0.69	0.69
5	-3.09	2.13	-0.16	2.14	85.8	0.69	0.69
\bar{x}	-3.11	2.17	-0.10	2.17	87.2	0.70	0.70
s	0.01	0.04	0.06	0.04	1.7	0.01	0.01
min	-3.13	2.13	-0.16	2.14	85.7	0.69	0.68
max	-3.09	2.23	-0.01	2.23	89.8	0.72	0.72

16.11 Σφαίρα ψαμμίτη $d = 4.3\text{cm}$ σε επιφάνεια πρόσκρουσης μαρμάρου

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-3.13	2.12	0.01	2.12	89.8	0.68	0.68
2	-3.14	2.13	-0.05	2.13	88.5	0.68	0.68
3	-3.11	2.04	-0.16	2.05	85.7	0.66	0.66
4	-3.12	2.11	-0.05	2.11	88.6	0.68	0.68
5	-3.11	2.13	0.02	2.13	89.5	0.68	0.68
\bar{x}	-3.12	2.11	-0.05	2.11	88.4	0.68	0.68
s	0.01	0.03	0.06	0.03	1.5	0.01	0.01
min	-3.14	2.04	-0.16	2.05	85.7	0.66	0.66
max	-3.11	2.13	0.02	2.13	89.8	0.68	0.68

16.12 Σφαίρα τσιμεντοειδούς ενέματος $d = 3\text{cm}$ σε επιφάνεια πρόσκρουσης ψαμμίτη

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-3.32	2.33	0.08	2.33	88.1	0.70	0.70
2	-3.49	2.39	0.15	2.39	86.5	0.69	0.69
3	-3.45	2.35	-0.08	2.35	88.0	0.68	0.68
4	-3.39	2.64	0.02	2.64	89.6	0.78	0.78
5	-3.57	2.68	0.00	2.68	89.9	0.75	0.75
\bar{x}	-3.44	2.48	0.03	2.48	88.4	0.72	0.72
s	0.08	0.15	0.08	0.15	1.2	0.04	0.04
min	-3.57	2.33	-0.08	2.33	86.5	0.68	0.68
max	-3.32	2.68	0.15	2.68	89.9	0.78	0.78

16.13 Σφαίρα τσιμεντοειδούς ενέματος $d = 4\text{cm}$ σε επιφάνεια πρόσκρουσης ψαμμίτη

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-3.32	2.18	-0.01	2.18	89.6	0.66	0.66
2	-3.36	2.11	-0.01	2.11	89.7	0.63	0.63
3	-3.30	2.13	0.01	2.13	89.7	0.65	0.65
4	-3.33	2.13	0.15	2.14	86.0	0.64	0.64
5	-3.31	2.24	0.27	2.25	83.2	0.68	0.68
\bar{x}	-3.32	2.16	0.08	2.16	87.6	0.65	0.65
s	0.02	0.05	0.11	0.05	2.6	0.02	0.02
min	-3.36	2.11	-0.01	2.11	83.2	0.63	0.63
max	-3.30	2.24	0.27	2.25	89.7	0.68	0.68

16.14 Σφαίρα μαρμάρου $d = 2.7\text{cm}$ σε επιφάνεια πρόσκρουσης ψαμμίτη

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-2.97	2.33	0.04	2.34	88.9	0.79	0.79
2	-2.96	2.30	0.08	2.30	87.9	0.78	0.78
3	-2.94	2.35	-0.01	2.35	89.9	0.80	0.80
4	-2.93	2.19	-0.12	2.20	86.9	0.75	0.75
5	-2.93	2.23	-0.04	2.24	89.0	0.76	0.76
\bar{x}	-2.94	2.28	-0.01	2.28	88.5	0.78	0.77
s	0.02	0.06	0.07	0.06	1.0	0.02	0.02
min	-2.97	2.19	-0.12	2.20	86.9	0.75	0.75
max	-2.93	2.35	0.08	2.35	89.9	0.80	0.80

16.15 Σφαίρα μαρμάρου $d = 3\text{cm}$ σε επιφάνεια πρόσκρουσης ψαμμίτη

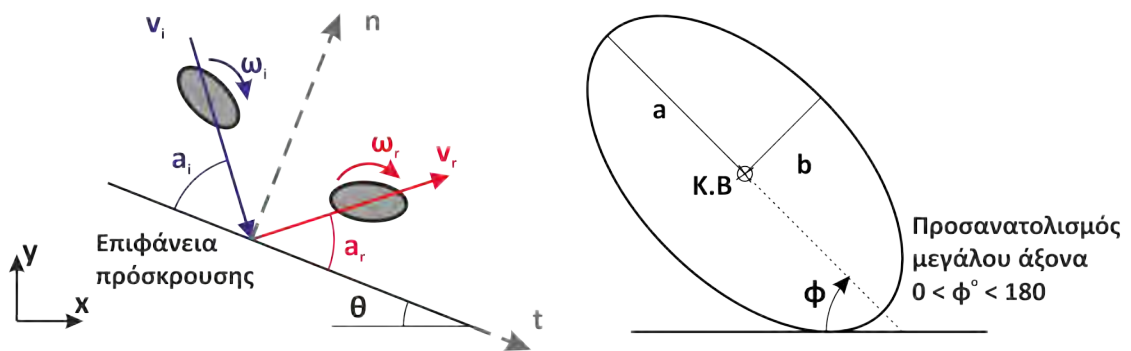
α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-2.98	2.19	0.03	2.19	89.3	0.74	0.74
2	-2.99	2.21	0.01	2.21	89.8	0.74	0.74
3	-2.95	2.22	-0.08	2.22	88.0	0.75	0.75
4	-2.95	2.08	0.07	2.09	88.1	0.71	0.71
5	-2.96	2.24	0.04	2.24	88.9	0.76	0.76
\bar{x}	-2.96	2.19	0.01	2.19	88.8	0.74	0.74
s	0.02	0.05	0.05	0.05	0.7	0.02	0.02
min	-2.99	2.08	-0.08	2.09	88.0	0.71	0.71
max	-2.95	2.24	0.07	2.24	89.8	0.76	0.76

16.16 Σφαίρα μαρμάρου $d = 3.3\text{cm}$ σε επιφάνεια πρόσκρουσης ψαμμίτη

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-2.97	2.17	-0.02	2.17	89.4	0.73	0.73
2	-2.98	2.13	-0.05	2.13	88.8	0.71	0.71
3	-2.95	2.08	0.07	2.08	88.2	0.71	0.71
4	-2.94	2.10	0.02	2.10	89.5	0.71	0.71
5	-2.90	2.03	-0.17	2.04	85.2	0.70	0.70
\bar{x}	-2.95	2.10	-0.03	2.11	88.2	0.71	0.71
s	0.03	0.05	0.08	0.04	1.6	0.01	0.01
min	-2.98	2.03	-0.17	2.04	85.2	0.70	0.70
max	-2.90	2.17	0.07	2.17	89.5	0.73	0.73

Παράρτημα 17

Παραβολική ρίψη ελλειπτικών δίσκων



17.1 Έλλειψη με λόγο $a/b = 2$ σε επιφάνεια κλίσης $\theta = 0^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	ϕ_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	ϕ_r [$^\circ$]	c_L [mm]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]	TE_{COR} [-]
1	2.86	71.6	50.5	78.6	1.96	72.3	36.8	83.0	0.0	0.69	0.66	0.68	0.47
2	2.85	69.1	39.3	156.5	1.88	36.5	88.3	52.3	49.5	0.42	1.49	0.66	0.61
3	2.85	72.3	42.2	160.4	1.59	42.9	97.2	66.4	51.0	0.40	1.34	0.56	0.53
\bar{x}	2.85	71.0	44.0	131.8	1.81	50.5	74.1	67.2	33.5	0.50	1.16	0.63	0.54
s	0.01	1.7	5.8	46.2	0.20	19.1	32.6	15.3	29.0	0.16	0.44	0.07	0.07
min	2.85	69.1	39.3	78.6	1.59	36.5	36.8	52.3	0.0	0.40	0.66	0.56	0.47
max	2.86	72.3	50.5	160.4	1.96	72.3	97.2	83.0	51.0	0.69	1.49	0.68	0.61

17.2 Έλλειψη με λόγο $a/b = 2$ σε επιφάνεια κλίσης $\theta = 14.4^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	ϕ_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	ϕ_r [$^\circ$]	c_L [mm]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]	TE_{COR} [-]
1	2.89	47.8	13.1	169.5	1.84	35.9	82.4	51.4	45.0	0.51	0.77	0.64	0.58
2	2.95	47.9	11.8	156.9	2.01	40.4	83.0	49.3	53.2	0.59	0.77	0.68	0.63
3	3.02	44.7	11.4	138.3	2.06	39.5	55.5	21.2	48.7	0.62	0.74	0.68	0.54
4	2.75	47.6	30.7	80.4	1.69	26.4	42.8	83.8	0.0	0.37	0.82	0.62	0.42
\bar{x}	2.90	47.0	16.8	136.3	1.90	35.5	65.9	51.4	36.7	0.52	0.78	0.65	0.54
s	0.12	1.5	9.3	39.4	0.17	6.4	20.0	25.6	24.7	0.11	0.03	0.03	0.09
min	2.75	44.7	11.4	80.4	1.69	26.4	42.8	21.2	0.0	0.37	0.74	0.62	0.42
max	3.02	47.9	30.7	169.5	2.06	40.4	83.0	83.8	53.2	0.62	0.82	0.68	0.63

17.3 Έλλειψη με λόγο $a/b = 2$ σε επιφάνεια κλίσης $\theta = 26.9^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	ϕ_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	ϕ_r [$^\circ$]	c_L [mm]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]	TE_{COR} [-]
1	2.89	29.8	17.2	39.4	2.14	10.6	-64.8	34.7	0.0	0.27	0.84	0.74	0.65
2	2.84	28.7	12.4	150.1	2.04	29.7	74.5	58.0	52.4	0.74	0.71	0.72	0.66
3	3.00	28.5	15.6	173.2	2.32	17.1	65.7	56.7	38.8	0.48	0.84	0.77	0.70
\bar{x}	2.91	29.0	15.1	120.9	2.17	19.1	25.1	49.8	30.4	0.50	0.80	0.74	0.67
s	0.08	0.7	2.4	71.5	0.14	9.7	78.0	13.1	27.2	0.23	0.07	0.03	0.03
min	2.84	28.5	12.4	39.4	2.04	10.6	-64.8	34.7	0.0	0.27	0.71	0.72	0.65
max	3.00	29.8	17.2	173.2	2.32	29.7	74.5	58.0	52.4	0.74	0.84	0.77	0.70

17.4 Έλλειψη με λόγο $a/b = 2$ σε επιφάνεια κλίσης $\theta = 36.9^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	ϕ_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	ϕ_r [$^\circ$]	c_L [mm]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]	TE_{COR} [-]
1	3.43	25.5	25.3	85.8	2.83	17.2	69.7	87.0	0.0	0.56	0.87	0.83	0.76
2	3.51	25.3	21.8	81.1	2.88	18.3	54.9	85.2	0.0	0.60	0.86	0.82	0.72
3	3.46	24.9	24.6	95.9	2.60	21.9	124.2	78.3	0.0	0.67	0.77	0.75	0.83
4	3.58	24.7	20.4	87.9	2.68	20.9	114.8	85.8	0.3	0.64	0.77	0.75	0.77
\bar{x}	3.49	25.1	23.0	87.7	2.74	19.6	90.9	84.1	0.1	0.62	0.82	0.79	0.77
s	0.06	0.4	2.3	6.2	0.13	2.2	33.8	3.9	0.2	0.04	0.06	0.04	0.04
min	3.43	24.7	20.4	81.1	2.60	17.2	54.9	78.3	0.0	0.56	0.77	0.75	0.72
max	3.58	25.5	25.3	95.9	2.88	21.9	124.2	87.0	0.3	0.67	0.87	0.83	0.83

17.5 Έλλειψη με λόγο $a/b = 1.74$ σε επιφάνεια κλίσης $\theta = 0^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	ϕ_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	ϕ_r [$^\circ$]	c_L [mm]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]	TE_{COR} [-]
1	2.83	69.4	25.9	115.2	1.39	20.5	90.2	61.3	0.0	0.18	1.30	0.49	0.46
2	2.93	66.6	18.1	75.6	1.77	76.6	35.9	79.0	0.0	0.64	0.35	0.61	0.40
3	2.94	67.9	4.7	166.2	1.52	35.4	88.2	6.8	20.8	0.32	1.12	0.52	0.47
4	2.89	67.5	31.4	54.2	1.46	67.3	-81.3	51.6	0.0	0.51	0.51	0.51	0.42
5	2.96	65.9	11.3	109.5	1.93	42.1	96.3	63.9	0.0	0.48	1.19	0.65	0.66
6	2.87	68.1	39.3	121.9	1.72	27.2	125.7	54.7	0.0	0.30	1.43	0.60	0.76
\bar{x}	2.90	67.6	21.8	107.1	1.63	44.9	59.2	52.9	3.5	0.40	0.98	0.56	0.53
s	0.05	1.2	12.9	38.9	0.21	22.4	74.7	24.5	8.5	0.17	0.44	0.07	0.15
min	2.83	65.9	4.7	54.2	1.39	20.5	-81.3	6.8	0.0	0.18	0.35	0.49	0.40
max	2.96	69.4	39.3	166.2	1.93	76.6	125.7	79.0	20.8	0.64	1.43	0.65	0.76

17.6 Έλλειψη με λόγο $a/b = 1.74$ σε επιφάνεια κλίσης $\theta = 14.4^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	ϕ_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	ϕ_r [$^\circ$]	c_L [mm]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]	TE_{COR} [-]
1	3.10	45.2	14.9	152.6	1.97	25.9	98.2	3.6	29.1	0.39	0.81	0.63	0.62
2	3.08	45.4	17.4	3.7	1.69	22.4	13.4	3.6	0.0	0.29	0.72	0.55	0.30
3	3.06	45.5	12.1	136.7	2.02	29.2	81.3	36.1	51.2	0.45	0.82	0.66	0.59
4	3.12	45.0	10.8	115.9	1.95	5.6	110.7	58.7	0.0	0.09	0.88	0.63	0.67
5	3.11	45.0	10.6	112.7	1.99	14.3	106.2	57.7	0.0	0.22	0.88	0.64	0.67
\bar{x}	3.09	45.2	13.1	104.4	1.92	19.5	82.0	32.0	16.1	0.29	0.82	0.62	0.57
s	0.03	0.2	2.9	58.5	0.13	9.5	39.9	27.4	23.3	0.14	0.06	0.04	0.15
min	3.06	45.0	10.6	3.7	1.69	5.6	13.4	3.6	0.0	0.09	0.72	0.55	0.30
max	3.12	45.5	17.4	152.6	2.02	29.2	110.7	58.7	51.2	0.45	0.88	0.66	0.67

17.7 Έλλειψη με λόγο $a/b = 1.74$ σε επιφάνεια κλίσης $\theta = 26.9^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	ϕ_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	ϕ_r [$^\circ$]	c_L [mm]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]	TE_{COR} [-]
1	3.04	29.5	17.9	21.7	2.35	19.4	-42.6	20.1	0.0	0.52	0.84	0.78	0.64
2	3.09	28.9	19.7	29.5	2.51	12.1	-37.8	26.5	0.0	0.35	0.91	0.81	0.69
3	3.07	30.1	18.9	22.3	2.32	17.0	-48.2	20.9	0.0	0.44	0.84	0.76	0.62
4	3.06	29.4	18.9	29.1	2.34	12.9	-42.2	27.3	0.0	0.35	0.85	0.76	0.62
5	3.05	30.5	17.2	156.2	2.33	21.0	73.7	14.2	32.3	0.54	0.83	0.77	0.71
\bar{x}	3.06	29.7	18.5	51.8	2.37	16.5	-19.4	21.8	6.5	0.44	0.85	0.77	0.66
s	0.02	0.6	1.0	58.5	0.08	3.9	52.2	5.3	14.5	0.09	0.03	0.02	0.04
min	3.04	28.9	17.2	21.7	2.32	12.1	-48.2	14.2	0.0	0.35	0.83	0.76	0.62
max	3.09	30.5	19.7	156.2	2.51	21.0	73.7	27.3	32.3	0.54	0.91	0.81	0.71

17.8 Έλλειψη με λόγο $a/b = 1.74$ σε επιφάνεια κλίσης $\theta = 36.9^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	ϕ_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	ϕ_r [$^\circ$]	c_L [mm]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]	TE_{COR} [-]
1	3.61	25.1	19.8	65.8	3.13	8.4	-18.2	66.3	0.0	0.30	0.95	0.87	0.75
2	3.63	25.9	26.2	141.1	3.02	18.3	81.1	16.7	44.0	0.60	0.88	0.83	0.80
3	3.54	24.6	22.1	74.6	2.89	14.6	41.9	78.4	0.0	0.49	0.87	0.82	0.69
4	3.68	25.1	21.7	74.0	3.01	13.6	34.3	74.0	0.0	0.45	0.88	0.82	0.69
5	3.73	26.4	19.5	22.7	3.15	16.4	-61.0	22.9	0.0	0.54	0.90	0.84	0.77
\bar{x}	3.64	25.4	21.9	75.6	3.04	14.2	15.6	51.7	8.8	0.48	0.90	0.84	0.74
s	0.07	0.7	2.7	42.4	0.10	3.7	55.5	29.5	19.7	0.11	0.03	0.02	0.05
min	3.54	24.6	19.5	22.7	2.89	8.4	-61.0	16.7	0.0	0.30	0.87	0.82	0.69
max	3.73	26.4	26.2	141.1	3.15	18.3	81.1	78.4	44.0	0.60	0.95	0.87	0.80

17.9 Έλλειψη με λόγο $a/b = 1.52$ σε επιφάνεια κλίσης $\theta = 0^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	ϕ_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	ϕ_r [$^\circ$]	c_L [mm]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]	TE_{COR} [-]
1	3.01	63.7	19.3	100.1	1.61	41.9	58.4	73.8	2.2	0.40	0.90	0.54	0.37
2	2.97	63.5	13.0	57.1	1.52	68.8	-21.5	56.9	0.0	0.53	0.42	0.51	0.27
3	2.99	64.6	1.6	92.4	1.78	60.6	48.9	87.7	6.8	0.58	0.68	0.60	0.42
4	2.98	66.5	23.9	169.3	1.61	40.8	88.4	7.5	1.3	0.38	1.02	0.54	0.50
\bar{x}	2.99	64.6	14.5	104.7	1.63	53.0	43.5	56.5	2.6	0.47	0.75	0.55	0.39
s	0.02	1.4	9.7	47.0	0.11	13.9	46.5	35.0	2.9	0.10	0.27	0.04	0.09
min	2.97	63.5	1.6	57.1	1.52	40.8	-21.5	7.5	0.0	0.38	0.42	0.51	0.27
max	3.01	66.5	23.9	169.3	1.78	68.8	88.4	87.7	6.8	0.58	1.02	0.60	0.50

17.10 Έλλειψη με λόγο $a/b = 1.52$ σε επιφάνεια κλίσης $\theta = 14.4^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	ϕ_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	ϕ_r [$^\circ$]	c_L [mm]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]	TE_{COR} [-]
1	3.00	44.9	12.7	149.6	2.06	30.1	83.5	40.2	46.4	0.49	0.84	0.69	0.66
2	3.07	45.5	12.9	84.1	1.66	13.0	83.8	84.6	0.0	0.17	0.75	0.54	0.47
3	2.92	44.4	1.9	130.8	1.81	7.2	112.0	40.3	0.0	0.11	0.86	0.62	0.74
4	2.98	46.1	12.4	91.8	1.91	42.0	82.0	84.9	1.1	0.60	0.69	0.64	0.59
5	3.06	46.1	8.7	140.3	2.01	23.6	84.7	40.4	50.1	0.36	0.87	0.66	0.62
\bar{x}	3.01	45.4	9.7	119.3	1.89	23.2	89.2	58.1	19.5	0.35	0.80	0.63	0.62
s	0.06	0.7	4.7	29.5	0.16	13.8	12.8	24.3	26.3	0.21	0.08	0.05	0.10
min	2.92	44.4	1.9	84.1	1.66	7.2	82.0	40.2	0.0	0.11	0.69	0.54	0.47
max	3.07	46.1	12.9	149.6	2.06	42.0	112.0	84.9	50.1	0.60	0.87	0.69	0.74

17.11 Έλλειψη με λόγο $a/b = 1.52$ σε επιφάνεια κλίσης $\theta = 26.9^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	ϕ_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	ϕ_r [$^\circ$]	c_L [mm]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]	TE_{COR} [-]
1	3.15	28.4	15.7	177.9	2.08	30.2	61.9	9.4	12.6	0.70	0.65	0.66	0.53
2	3.18	28.7	8.9	98.9	2.50	20.4	58.9	76.4	0.0	0.57	0.84	0.79	0.70
3	3.00	28.9	19.9	61.4	2.30	11.7	28.1	67.4	2.4	0.32	0.86	0.77	0.60
\bar{x}	3.11	28.7	14.8	112.7	2.30	20.8	49.6	51.1	5.0	0.53	0.78	0.74	0.61
s	0.09	0.2	5.6	59.5	0.21	9.2	18.7	36.4	6.7	0.19	0.12	0.07	0.09
min	3.00	28.4	8.9	61.4	2.08	11.7	28.1	9.4	0.0	0.32	0.65	0.66	0.53
max	3.18	28.9	19.9	177.9	2.50	30.2	61.9	76.4	12.6	0.70	0.86	0.79	0.70

17.12 Έλλειψη με λόγο $a/b = 1.52$ σε επιφάνεια κλίσης $\theta = 36.9^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	ϕ_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	ϕ_r [$^\circ$]	c_L [mm]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]	TE_{COR} [-]
1	4.13	18.7	27.2	40.9	3.10	7.9	-58.5	36.9	0.0	0.32	0.79	0.75	0.61
2	3.84	19.0	32.1	46.8	2.82	8.1	-16.1	44.9	0.0	0.32	0.77	0.74	0.54
3	3.69	25.1	20.8	38.5	3.07	7.9	-23.1	38.5	0.0	0.27	0.91	0.83	0.70
4	3.64	25.3	20.0	54.2	3.07	21.4	-9.3	54.8	0.0	0.72	0.87	0.84	0.70
5	3.75	24.9	16.3	14.6	2.64	16.7	4.7	16.2	0.0	0.48	0.74	0.70	0.49
6	3.57	25.2	8.2	114.5	3.15	4.0	79.3	59.5	2.5	0.14	0.97	0.88	0.89
\bar{x}	3.77	23.0	20.8	51.6	2.98	11.0	-3.8	41.8	0.4	0.38	0.84	0.79	0.66
s	0.20	3.2	8.3	33.6	0.20	6.6	45.9	15.4	1.0	0.20	0.09	0.07	0.14
min	3.57	18.7	8.2	14.6	2.64	4.0	-58.5	16.2	0.0	0.14	0.74	0.70	0.49
max	4.13	25.3	32.1	114.5	3.15	21.4	79.3	59.5	2.5	0.72	0.97	0.88	0.89

17.13 Έλλειψη με λόγο $a/b = 1.25$ σε επιφάνεια κλίσης $\theta = 0^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	ϕ_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	ϕ_r [$^\circ$]	c_L [mm]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]	TE_{COR} [-]
1	2.98	65.4	14.4	99.3	1.74	57.8	50.8	75.8	3.1	0.54	0.74	0.58	0.42
2	2.98	68.1	2.1	105.8	1.08	28.1	42.3	74.7	0.0	0.18	0.86	0.36	0.19
3	2.97	66.2	26.0	118.2	1.40	10.0	67.7	51.9	3.5	0.09	1.15	0.47	0.36
4	3.04	65.1	13.8	81.0	1.47	46.4	47.4	84.6	0.0	0.39	0.79	0.48	0.30
\bar{x}	2.99	66.2	14.1	101.1	1.42	35.6	52.1	71.8	1.7	0.30	0.89	0.47	0.32
s	0.03	1.3	9.8	15.5	0.27	21.0	11.0	13.9	1.9	0.20	0.18	0.09	0.10
min	2.97	65.1	2.1	81.0	1.08	10.0	42.3	51.9	0.0	0.09	0.74	0.36	0.19
max	3.04	68.1	26.0	118.2	1.74	57.8	67.7	84.6	3.5	0.54	1.15	0.58	0.42

17.14 Έλλειψη με λόγο $a/b = 1.25$ σε επιφάνεια κλίσης $\theta = 14.4^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	ϕ_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	ϕ_r [$^\circ$]	c_L [mm]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]	TE_{COR} [-]
1	3.07	46.6	10.9	90.0	1.67	18.0	57.1	79.7	3.1	0.23	0.75	0.54	0.39
2	2.95	47.4	15.4	112.4	1.68	18.5	68.9	61.6	3.3	0.25	0.80	0.57	0.47
3	3.23	46.3	4.8	82.8	1.85	11.2	67.1	88.0	1.3	0.15	0.82	0.57	0.45
4	2.96	48.0	10.5	84.4	1.57	23.2	58.7	86.2	0.3	0.28	0.73	0.53	0.39
5	3.01	45.7	10.8	59.0	1.64	17.0	25.0	64.5	0.0	0.22	0.75	0.55	0.32
\bar{x}	3.04	46.8	10.5	85.7	1.68	17.6	55.4	76.0	1.6	0.23	0.77	0.55	0.40
s	0.11	0.9	3.8	19.1	0.10	4.3	17.7	12.3	1.5	0.05	0.04	0.02	0.06
min	2.95	45.7	4.8	59.0	1.57	11.2	25.0	61.6	0.0	0.15	0.73	0.53	0.32
max	3.23	48.0	15.4	112.4	1.85	23.2	68.9	88.0	3.3	0.28	0.82	0.57	0.47

17.15 Έλλειψη με λόγο $a/b = 1.25$ σε επιφάνεια κλίσης $\theta = 26.9^\circ$

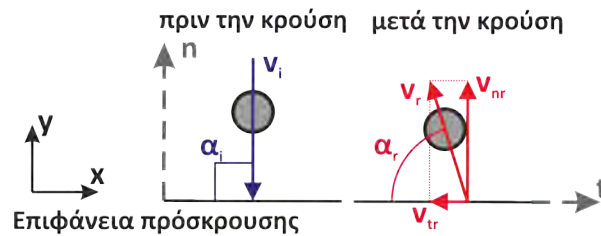
α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	ϕ_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	ϕ_r [$^\circ$]	c_L [mm]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]	TE_{COR} [-]
1	3.21	28.9	10.5	103.5	2.39	9.6	61.7	65.6	0.0	0.26	0.84	0.74	0.65
2	3.24	28.3	8.8	88.8	2.39	5.2	61.5	75.7	5.4	0.14	0.83	0.74	0.64
3	3.21	28.7	8.0	77.3	2.53	15.0	68.8	89.9	2.9	0.42	0.87	0.79	0.74
\bar{x}	3.22	28.6	9.1	89.9	2.44	9.9	64.0	77.1	2.8	0.27	0.85	0.76	0.68
s	0.02	0.3	1.3	13.1	0.08	4.9	4.2	12.2	2.7	0.14	0.02	0.03	0.06
min	3.21	28.3	8.0	77.3	2.39	5.2	61.5	65.6	0.0	0.14	0.83	0.74	0.64
max	3.24	28.9	10.5	103.5	2.53	15.0	68.8	89.9	5.4	0.42	0.87	0.79	0.74

17.16 Έλλειψη με λόγο $a/b = 1.25$ σε επιφάνεια κλίσης $\theta = 36.9^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	ω_i [rs^{-1}]	ϕ_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	ω_r [rs^{-1}]	ϕ_r [$^\circ$]	c_L [mm]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]	TE_{COR} [-]
1	3.62	25.4	7.5	81.3	2.78	24.2	68.1	86.4	0.5	0.73	0.78	0.77	0.69
2	3.67	25.6	9.6	107.9	2.93	4.7	54.4	65.1	3.3	0.15	0.88	0.80	0.69
3	3.86	26.2	9.6	98.3	3.07	16.2	66.1	72.5	2.7	0.50	0.85	0.80	0.71
4	3.67	25.2	16.4	119.4	3.02	3.1	61.8	59.7	0.0	0.10	0.91	0.82	0.75
5	3.64	25.6	12.8	117.0	2.99	13.9	65.0	60.1	0.0	0.46	0.88	0.82	0.76
\bar{x}	3.69	25.6	11.2	104.8	2.96	12.4	63.1	68.8	1.3	0.39	0.86	0.80	0.72
s	0.10	0.4	3.5	15.6	0.11	8.7	5.3	11.1	1.6	0.26	0.05	0.02	0.03
min	3.62	25.2	7.5	81.3	2.78	3.1	54.4	59.7	0.0	0.10	0.78	0.77	0.69
max	3.86	26.2	16.4	119.4	3.07	24.2	68.1	86.4	3.3	0.73	0.91	0.82	0.76

Παράρτημα 18

Ελεύθερη πτώση σφαιρικών τεμαχίων σε αποσαθρωμένη επιφάνεια



18.1 Υγιής επιφάνεια σχιστόλιθου R = 36.2

α/α	$v_{y,i}$ [ms ⁻¹]	$v_{y,r}$ [ms ⁻¹]	$v_{x,r}$ [ms ⁻¹]	v_r [ms ⁻¹]	α_r [°]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-3.20	1.99	0.32	2.01	80.3	0.63	0.62
2	-3.19	1.90	0.15	1.91	85.4	0.60	0.60
3	-3.19	2.05	0.16	2.05	85.3	0.64	0.64
4	-3.21	2.16	0.07	2.16	88.1	0.67	0.67
5	-3.19	2.12	0.23	2.13	83.6	0.67	0.67
6	-3.20	1.96	0.21	1.98	83.5	0.62	0.61
7	-3.19	2.07	0.19	2.08	84.7	0.65	0.65
8	-3.20	2.14	0.11	2.15	86.9	0.67	0.67
9	-3.20	2.14	0.11	2.14	86.9	0.67	0.67
10	-3.19	2.08	0.12	2.09	86.7	0.66	0.65
\bar{x}	-3.20	2.06	0.17	2.07	85.1	0.65	0.65
s	0.01	0.09	0.07	0.08	2.3	0.03	0.03
min	-3.21	1.90	0.07	1.91	80.3	0.60	0.60
max	-3.19	2.16	0.32	2.16	88.1	0.67	0.67

18.2 Επιφάνεια σχιστόλιθου με βαθμό αποσάθρωσης III R = 20

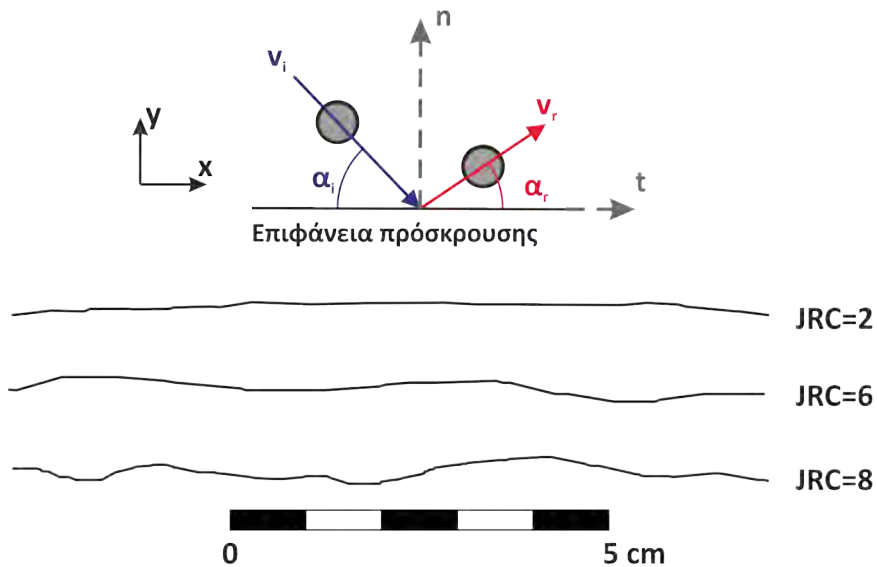
α/α	$v_{y,i}$ [ms ⁻¹]	$v_{y,r}$ [ms ⁻¹]	$v_{x,r}$ [ms ⁻¹]	v_r [ms ⁻¹]	α_r [°]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-3.19	1.57	-0.03	1.57	88.9	0.49	0.49
2	-3.21	1.89	-0.05	1.89	88.3	0.59	0.59
3	-3.20	1.86	-0.12	1.86	86.2	0.58	0.58
4	-3.19	1.75	-0.27	1.77	80.9	0.56	0.55
5	-3.20	1.79	-0.22	1.81	82.7	0.57	0.56
6	-3.20	1.60	-0.29	1.62	79.4	0.51	0.50
7	-3.20	1.58	-0.26	1.61	80.4	0.50	0.50
8	-3.20	1.72	-0.25	1.74	81.2	0.54	0.54
9	-3.20	1.81	-0.24	1.82	82.2	0.57	0.56
10	-3.19	1.68	-0.13	1.69	85.1	0.53	0.53
\bar{x}	-3.20	1.73	-0.19	1.74	83.5	0.54	0.54
s	0.01	0.12	0.10	0.11	3.4	0.03	0.04
min	-3.21	1.57	-0.29	1.57	79.4	0.49	0.49
max	-3.19	1.89	-0.03	1.89	88.9	0.59	0.59

18.3 Επιφάνεια σχιστόλιθου με βαθμό αποσάθρωσης IV R = 16.3

α/α	$v_{y,i}$ [ms ⁻¹]	$v_{y,r}$ [ms ⁻¹]	$v_{x,r}$ [ms ⁻¹]	v_r [ms ⁻¹]	α_r [°]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-3.14	1.43	0.19	1.44	82.1	0.46	0.46
2	-3.14	1.42	0.14	1.43	84.1	0.45	0.45
3	-3.14	1.46	0.04	1.46	88.3	0.46	0.46
4	-3.15	1.55	0.03	1.55	88.4	0.49	0.49
5	-3.14	1.50	0.00	1.50	89.6	0.48	0.48
6	-3.15	1.50	-0.01	1.50	89.3	0.48	0.48
7	-3.14	1.59	0.03	1.59	88.6	0.51	0.51
8	-3.15	1.56	-0.06	1.56	87.4	0.50	0.49
9	-3.15	1.54	0.08	1.54	86.8	0.49	0.49
10	-3.14	1.46	0.10	1.46	85.6	0.47	0.46
\bar{x}	-3.14	1.50	0.05	1.50	87.0	0.48	0.48
s	0.01	0.06	0.07	0.06	2.4	0.02	0.02
min	-3.15	1.42	-0.06	1.43	82.1	0.45	0.45
max	-3.14	1.59	0.19	1.59	89.6	0.51	0.51

Παράρτημα 19

Παραβολική ρίψη σφαιρικών τεμαχίων σε τραχεία επιφάνεια



19.1 Τραχύτητα επιφάνειας JRC = 0 και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 25^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	2.69	25.4	2.59	13.7	0.53	1.03	0.96
2	2.62	26.6	2.44	20.2	0.72	0.98	0.93
3	2.86	24.0	2.65	13.0	0.51	0.99	0.92
4	2.80	25.6	2.47	23.3	0.81	0.90	0.88
5	2.71	25.0	2.52	17.7	0.67	0.98	0.93
\bar{x}	2.74	25.3	2.53	17.6	0.65	0.97	0.93
s	0.09	1.0	0.09	4.3	0.13	0.05	0.03
min	2.62	24.0	2.44	13.0	0.51	0.90	0.88
max	2.86	26.6	2.65	23.3	0.81	1.03	0.96

19.2 Τραχύτητα επιφάνειας $JRC = 0$ και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 45^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	3.32	44.4	2.88	28.0	0.58	1.07	0.87
2	3.22	43.7	2.87	23.1	0.51	1.13	0.89
3	3.38	45.4	2.91	25.4	0.52	1.11	0.86
4	3.37	45.7	3.04	24.8	0.53	1.18	0.90
5	3.31	43.9	2.91	28.8	0.61	1.07	0.88
\bar{x}	3.32	44.6	2.92	26.0	0.55	1.11	0.88
s	0.06	0.9	0.07	2.4	0.04	0.05	0.02
min	3.22	43.7	2.87	23.1	0.51	1.07	0.86
max	3.38	45.7	3.04	28.8	0.61	1.18	0.90

19.3 Τραχύτητα επιφάνειας $JRC = 0$ και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 60^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	3.49	58.6	2.54	41.0	0.56	1.05	0.73
2	3.53	58.7	2.51	41.1	0.55	1.03	0.71
3	3.50	58.7	2.42	39.2	0.51	1.03	0.69
4	3.47	58.6	2.50	39.4	0.54	1.07	0.72
5	3.55	59.2	2.37	40.8	0.51	0.99	0.67
\bar{x}	3.51	58.8	2.47	40.3	0.53	1.04	0.70
s	0.03	0.3	0.07	0.9	0.02	0.03	0.02
min	3.47	58.6	2.37	39.2	0.51	0.99	0.67
max	3.55	59.2	2.54	41.1	0.56	1.07	0.73

19.4 Τραχύτητα επιφάνειας $JRC = 0$ και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 70^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	3.52	70.8	2.06	52.8	0.49	1.07	0.59
2	3.57	70.9	1.95	55.9	0.48	0.94	0.55
3	3.51	70.7	2.03	54.8	0.50	1.01	0.58
4	3.54	70.6	1.93	51.9	0.46	1.01	0.55
5	3.56	70.7	2.03	55.6	0.50	0.97	0.57
\bar{x}	3.54	70.7	2.00	54.2	0.49	1.00	0.57
s	0.03	0.1	0.05	1.8	0.02	0.05	0.02
min	3.51	70.6	1.93	51.9	0.46	0.94	0.55
max	3.57	70.9	2.06	55.9	0.50	1.07	0.59

19.5 Τραχύτητα επιφάνειας JRC = 2 και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 25^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	2.35	24.5	2.28	17.6	0.71	1.02	0.97
2	2.39	24.5	2.12	15.9	0.58	0.94	0.89
3	2.33	25.8	1.99	17.2	0.58	0.91	0.86
4	2.83	22.1	2.45	16.0	0.63	0.90	0.87
5	2.72	22.0	2.43	15.3	0.63	0.93	0.89
6	2.70	22.2	2.48	12.0	0.51	0.97	0.92
7	2.69	22.5	2.60	10.3	0.45	1.03	0.97
8	2.63	23.5	2.39	10.9	0.43	0.98	0.91
9	2.48	23.4	2.27	11.4	0.46	0.98	0.91
10	2.69	22.0	2.66	10.0	0.46	1.05	0.99
\bar{x}	2.58	23.3	2.37	13.7	0.54	0.97	0.92
s	0.18	1.3	0.21	3.0	0.10	0.05	0.05
min	2.33	22.0	1.99	10.0	0.43	0.90	0.86
max	2.83	25.8	2.66	17.6	0.71	1.05	0.99

19.6 Τραχύτητα επιφάνειας JRC = 2 και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 45^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	3.28	42.0	2.82	26.6	0.58	1.03	0.86
2	3.30	42.8	2.78	29.4	0.61	1.00	0.84
3	3.32	41.9	2.84	23.1	0.50	1.06	0.86
4	3.25	44.4	2.57	31.9	0.60	0.94	0.79
5	3.36	42.1	2.63	23.3	0.46	0.97	0.78
6	3.31	42.5	2.79	24.2	0.51	1.04	0.84
7	3.32	43.6	2.78	35.3	0.70	0.94	0.84
8	3.26	43.9	2.71	32.7	0.65	0.97	0.83
9	3.25	42.9	2.68	29.4	0.59	0.98	0.82
10	3.33	42.6	2.72	35.5	0.70	0.90	0.82
\bar{x}	3.30	42.9	2.73	29.1	0.59	0.98	0.83
s	0.04	0.8	0.09	4.7	0.08	0.05	0.03
min	3.25	41.9	2.57	23.1	0.46	0.90	0.78
max	3.36	44.4	2.84	35.5	0.70	1.06	0.86

19.7 Τραχύτητα επιφάνειας $JRC = 2$ και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 60^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	3.26	57.0	2.45	34.2	0.50	1.14	0.75
2	3.37	58.1	2.57	31.4	0.47	1.23	0.76
3	3.39	57.5	2.58	29.3	0.44	1.24	0.76
4	3.39	58.0	2.49	34.1	0.49	1.15	0.73
5	3.46	60.0	2.43	40.6	0.53	1.07	0.70
6	3.46	59.1	2.31	39.7	0.50	1.00	0.67
7	3.38	59.6	2.51	36.9	0.52	1.18	0.74
8	3.44	57.1	2.45	31.3	0.44	1.12	0.71
9	3.40	58.6	2.58	41.8	0.59	1.08	0.76
10	3.46	60.4	2.47	35.7	0.48	1.17	0.71
\bar{x}	3.40	58.5	2.48	35.5	0.50	1.14	0.73
s	0.06	1.2	0.08	4.2	0.04	0.07	0.03
min	3.26	57.0	2.31	29.3	0.44	1.00	0.67
max	3.46	60.4	2.58	41.8	0.59	1.24	0.76

19.8 Τραχύτητα επιφάνειας $JRC = 2$ και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 70^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	3.46	70.6	1.93	63.8	0.53	0.74	0.56
2	3.50	71.4	2.25	49.9	0.52	1.30	0.64
3	3.55	70.7	1.81	48.6	0.41	1.02	0.51
4	3.54	70.3	2.12	54.9	0.52	1.02	0.60
5	3.44	70.9	2.15	57.3	0.56	1.04	0.63
6	3.53	71.2	1.95	64.0	0.52	0.75	0.55
7	3.49	70.1	2.07	42.8	0.43	1.28	0.59
8	3.52	70.8	2.08	56.2	0.52	1.00	0.59
9	3.48	70.9	2.04	52.8	0.49	1.08	0.59
10	3.43	70.2	2.00	53.3	0.50	1.03	0.58
\bar{x}	3.49	70.7	2.04	54.4	0.50	1.03	0.58
s	0.04	0.4	0.13	6.5	0.05	0.18	0.04
min	3.43	70.1	1.81	42.8	0.41	0.74	0.51
max	3.55	71.4	2.25	64.0	0.56	1.30	0.64

19.9 Τραχύτητα επιφάνειας JRC = 6 και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 25^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	2.76	23.6	2.68	19.3	0.80	1.00	0.97
2	2.70	24.3	2.51	17.2	0.67	0.97	0.93
3	2.58	25.4	2.48	24.0	0.91	0.97	0.96
4	2.74	24.1	2.58	19.8	0.78	0.97	0.94
5	2.53	23.9	2.15	10.5	0.38	0.92	0.85
6	2.52	26.8	2.41	15.7	0.58	1.03	0.96
7	2.54	25.1	2.39	14.9	0.57	1.00	0.94
8	2.50	25.5	2.27	12.9	0.47	0.98	0.91
9	2.64	24.4	2.35	24.2	0.88	0.89	0.89
10	2.71	24.0	2.54	17.9	0.71	0.98	0.94
\bar{x}	2.62	24.7	2.44	17.6	0.68	0.97	0.93
s	0.10	1.0	0.16	4.4	0.18	0.04	0.04
min	2.50	23.6	2.15	10.5	0.38	0.89	0.85
max	2.76	26.8	2.68	24.2	0.91	1.03	0.97

19.10 Τραχύτητα επιφάνειας JRC = 6 και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 45^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	3.35	44.0	3.21	22.9	0.54	1.23	0.96
2	3.36	43.0	3.14	30.8	0.70	1.10	0.93
3	3.37	43.5	2.85	16.0	0.34	1.12	0.85
4	3.43	45.6	3.02	20.0	0.42	1.18	0.88
5	3.38	43.1	3.04	30.5	0.67	1.06	0.90
6	3.43	43.9	3.09	16.2	0.36	1.20	0.90
7	3.41	43.9	2.98	17.2	0.37	1.16	0.87
8	3.35	44.9	2.85	31.9	0.64	1.02	0.85
9	3.40	45.2	2.83	22.6	0.45	1.09	0.84
10	3.38	43.7	2.88	33.7	0.69	0.98	0.86
\bar{x}	3.39	44.1	2.99	24.2	0.52	1.11	0.88
s	0.03	0.9	0.13	6.9	0.15	0.08	0.04
min	3.35	43.0	2.83	16.0	0.34	0.98	0.84
max	3.43	45.6	3.21	33.7	0.70	1.23	0.96

19.11 Τραχύτητα επιφάνειας JRC = 6 και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 60^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	3.48	58.7	2.36	29.3	0.39	1.14	0.68
2	3.33	58.5	2.49	24.6	0.37	1.30	0.75
3	3.52	59.1	2.67	30.7	0.45	1.27	0.76
4	3.30	57.3	2.27	31.8	0.43	1.09	0.69
5	3.53	59.6	2.85	27.4	0.43	1.42	0.81
6	3.49	59.0	2.22	53.4	0.59	0.73	0.63
7	3.46	59.6	2.55	46.0	0.62	1.01	0.74
8	3.45	59.2	2.81	44.8	0.67	1.13	0.81
9	3.47	59.8	2.72	39.1	0.57	1.21	0.78
10	3.56	59.3	2.93	19.9	0.33	1.51	0.82
\bar{x}	3.46	59.0	2.59	34.7	0.48	1.18	0.75
s	0.08	0.7	0.25	10.7	0.12	0.22	0.06
min	3.30	57.3	2.22	19.9	0.33	0.73	0.63
max	3.56	59.8	2.93	53.4	0.67	1.51	0.82

19.12 Τραχύτητα επιφάνειας JRC = 6 και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 70^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	3.53	70.9	1.89	49.3	0.43	1.07	0.54
2	3.56	71.0	2.10	67.7	0.58	0.69	0.59
3	3.55	71.1	1.92	64.2	0.51	0.73	0.54
4	3.55	70.5	2.02	64.1	0.54	0.74	0.57
5	3.55	70.9	1.67	65.3	0.45	0.60	0.47
6	3.53	70.6	2.24	50.1	0.52	1.22	0.63
7	3.46	70.7	1.89	51.7	0.45	1.02	0.55
8	3.52	70.3	1.72	70.1	0.49	0.49	0.49
9	3.52	70.4	1.65	52.7	0.40	0.85	0.47
10	3.51	70.6	1.67	72.9	0.48	0.42	0.48
\bar{x}	3.53	70.7	1.88	60.8	0.49	0.78	0.53
s	0.03	0.3	0.20	8.9	0.05	0.26	0.06
min	3.46	70.3	1.65	49.3	0.40	0.42	0.47
max	3.56	71.1	2.24	72.9	0.58	1.22	0.63

19.13 Τραχύτητα επιφάνειας JRC = 8 και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 25^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	3.16	20.2	3.03	11.9	0.57	1.00	0.96
2	3.11	20.5	2.81	26.8	1.16	0.86	0.91
3	2.69	24.3	2.57	25.5	1.00	0.95	0.96
4	3.02	20.5	2.79	21.5	0.97	0.92	0.93
5	2.98	21.1	2.92	22.9	1.06	0.97	0.98
6	2.63	22.9	2.50	8.3	0.35	1.02	0.95
7	2.96	21.3	2.87	20.0	0.92	0.98	0.97
8	2.56	24.6	2.39	24.6	0.93	0.93	0.93
9	2.68	23.6	2.50	8.4	0.34	1.01	0.94
10	3.24	20.1	3.08	6.7	0.32	1.01	0.95
\bar{x}	2.90	21.9	2.75	17.7	0.76	0.96	0.95
s	0.24	1.8	0.24	7.9	0.33	0.05	0.02
min	2.56	20.1	2.39	6.7	0.32	0.86	0.91
max	3.24	24.6	3.08	26.8	1.16	1.02	0.98

19.14 Τραχύτητα επιφάνειας JRC = 8 και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 45^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	3.43	43.9	3.02	35.6	0.74	0.99	0.88
2	3.45	44.3	2.96	32.1	0.65	1.01	0.86
3	3.45	43.1	2.91	26.9	0.56	1.03	0.84
4	3.44	45.1	2.93	35.7	0.70	0.98	0.85
5	3.43	43.2	3.02	19.9	0.44	1.13	0.88
6	3.50	42.7	2.97	22.5	0.48	1.07	0.85
7	3.44	43.5	2.80	33.8	0.66	0.93	0.81
8	3.47	42.5	2.94	19.1	0.41	1.09	0.85
9	3.41	44.4	2.72	32.7	0.62	0.94	0.80
10	3.52	43.1	2.77	34.8	0.66	0.88	0.79
\bar{x}	3.45	43.6	2.90	29.3	0.59	1.01	0.84
s	0.03	0.8	0.11	6.6	0.11	0.08	0.03
min	3.41	42.5	2.72	19.1	0.41	0.88	0.79
max	3.52	45.1	3.02	35.7	0.74	1.13	0.88

19.15 Τραχύτητα επιφάνειας JRC = 8 και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 60^\circ$

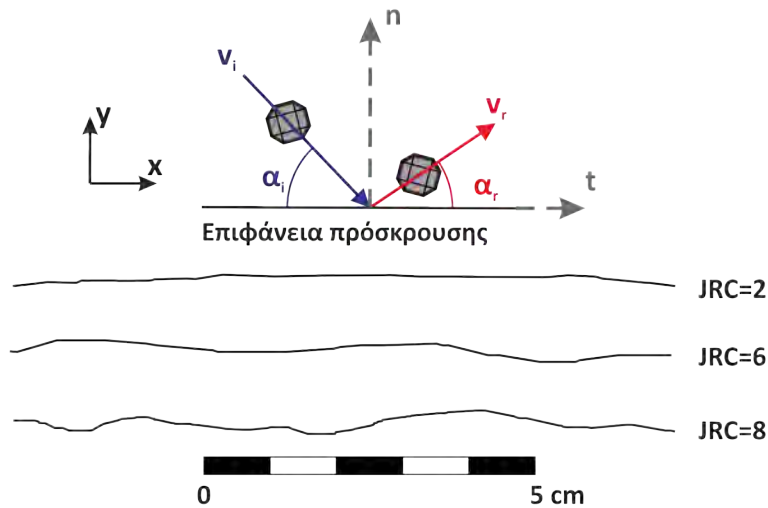
α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	3.43	58.3	2.48	40.6	0.55	1.04	0.72
2	3.41	58.2	2.37	52.1	0.65	0.81	0.70
3	3.48	60.4	2.34	56.3	0.65	0.76	0.68
4	3.41	58.9	2.96	24.7	0.42	1.52	0.87
5	3.42	58.5	2.35	45.8	0.58	0.92	0.69
6	3.42	59.7	2.38	49.1	0.61	0.91	0.70
7	3.49	60.0	2.15	52.8	0.57	0.74	0.62
8	3.45	58.8	2.76	24.4	0.39	1.41	0.80
9	3.43	58.5	2.76	26.6	0.42	1.37	0.80
10	3.45	57.9	2.19	38.2	0.46	0.94	0.63
\bar{x}	3.44	58.9	2.47	41.1	0.53	1.04	0.72
s	0.03	0.8	0.27	12.2	0.10	0.29	0.08
min	3.41	57.9	2.15	24.4	0.39	0.74	0.62
max	3.49	60.4	2.96	56.3	0.65	1.52	0.87

19.16 Τραχύτητα επιφάνειας JRC = 8 και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 70^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	3.47	70.4	2.18	38.5	0.42	1.47	0.63
2	3.47	71.6	2.01	69.1	0.57	0.65	0.58
3	3.45	70.3	1.79	69.7	0.52	0.53	0.52
4	3.43	69.9	1.87	51.0	0.45	1.00	0.55
5	3.49	69.2	1.65	56.5	0.42	0.74	0.47
6	3.42	71.0	1.87	69.7	0.54	0.58	0.55
7	3.48	70.4	2.03	48.7	0.46	1.15	0.58
8	3.49	70.4	2.20	35.4	0.39	1.53	0.63
9	3.46	71.1	2.24	53.4	0.55	1.19	0.65
10	3.54	70.7	2.24	42.2	0.45	1.42	0.63
\bar{x}	3.47	70.5	2.01	53.4	0.48	1.03	0.58
s	0.03	0.7	0.21	12.9	0.06	0.38	0.06
min	3.42	69.2	1.65	35.4	0.39	0.53	0.47
max	3.54	71.6	2.24	69.7	0.57	1.53	0.65

Παράρτημα 20

Παραβολική ρίψη πολυεδρικών τεμαχών σε τραχεία επιφάνεια



20.1 Τραχύτητα επιφάνειας JRC = 0 και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 30^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	2.32	30.3	2.14	14.8	0.47	1.03	0.92
2	1.96	35.3	1.82	24.1	0.66	1.04	0.93
3	2.28	30.9	2.16	11.5	0.37	1.08	0.95
4	2.70	26.8	2.68	26.0	0.96	1.00	0.99
5	2.60	27.4	2.53	15.8	0.57	1.05	0.97
6	2.02	33.2	1.95	15.3	0.47	1.11	0.97
7	2.35	32.3	2.05	28.3	0.77	0.91	0.87
8	2.24	29.1	1.99	31.4	0.95	0.87	0.89
9	2.80	25.7	2.60	15.4	0.57	0.99	0.93
10	2.48	31.8	2.20	24.2	0.69	0.95	0.89
\bar{x}	2.37	30.3	2.21	20.7	0.65	1.00	0.93
s	0.27	3.0	0.29	6.9	0.20	0.08	0.04
min	1.96	25.7	1.82	11.5	0.37	0.87	0.87
max	2.80	35.3	2.68	31.4	0.96	1.11	0.99

20.2 Τραχύτητα επιφάνειας $JRC = 0$ και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 50^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	2.48	44.5	2.15	45.6	0.88	0.85	0.87
2	2.79	41.3	2.33	41.5	0.84	0.83	0.84
3	2.64	55.9	2.16	32.9	0.54	1.22	0.82
4	2.51	50.2	2.03	17.8	0.32	1.20	0.81
5	2.61	54.3	2.04	40.3	0.62	1.03	0.78
6	2.44	55.2	2.03	41.8	0.68	1.09	0.83
7	2.32	44.8	1.86	24.3	0.47	1.03	0.80
8	2.32	54.0	1.71	20.4	0.32	1.18	0.74
9	3.07	54.8	2.29	33.5	0.50	1.08	0.75
10	2.72	53.2	2.14	50.0	0.75	0.85	0.79
\bar{x}	2.59	50.8	2.07	34.8	0.59	1.04	0.80
s	0.23	5.3	0.19	11.0	0.20	0.15	0.04
min	2.32	41.3	1.71	17.8	0.32	0.83	0.74
max	3.07	55.9	2.33	50.0	0.88	1.22	0.87

20.3 Τραχύτητα επιφάνειας $JRC = 0$ και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 65^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	3.05	64.0	1.96	62.9	0.64	0.67	0.64
2	3.26	60.5	2.49	28.8	0.42	1.36	0.76
3	3.28	64.1	1.68	26.4	0.25	1.05	0.51
4	3.27	64.7	1.69	51.2	0.45	0.76	0.52
5	3.19	64.7	2.08	65.1	0.66	0.64	0.65
6	3.25	63.6	1.83	49.3	0.48	0.82	0.56
7	3.29	62.6	2.05	48.7	0.53	0.90	0.62
8	3.20	61.0	2.27	62.2	0.72	0.68	0.71
9	3.19	66.0	1.67	41.4	0.38	0.96	0.52
10	3.41	63.2	1.77	24.9	0.25	1.05	0.52
\bar{x}	3.24	63.5	1.95	46.1	0.48	0.89	0.60
s	0.09	1.7	0.28	15.3	0.16	0.22	0.09
min	3.05	60.5	1.67	24.9	0.25	0.64	0.51
max	3.41	66.0	2.49	65.1	0.72	1.36	0.76

20.4 Τραχύτητα επιφάνειας JRC = 0 και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 80^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	3.34	79.8	1.80	53.3	0.44	1.81	0.54
2	3.32	78.3	1.36	30.1	0.21	1.75	0.41
3	3.33	78.7	2.26	58.2	0.59	1.82	0.68
4	3.30	80.4	1.68	54.7	0.42	1.75	0.51
5	3.11	80.3	1.59	64.6	0.47	1.31	0.51
6	3.21	81.8	1.39	48.3	0.33	2.02	0.43
7	3.29	80.6	1.27	43.7	0.27	1.71	0.39
8	3.31	81.1	1.95	60.6	0.52	1.86	0.59
9	3.20	77.5	1.44	65.4	0.42	0.87	0.45
10	3.17	78.9	1.70	50.8	0.43	1.76	0.54
\bar{x}	3.26	79.7	1.64	53.0	0.41	1.67	0.50
s	0.08	1.3	0.30	10.6	0.11	0.33	0.09
min	3.11	77.5	1.27	30.1	0.21	0.87	0.39
max	3.34	81.8	2.26	65.4	0.59	2.02	0.68

20.5 Τραχύτητα επιφάνειας JRC = 2 και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 30^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	1.87	36.8	1.82	17.7	0.49	1.16	0.97
2	2.04	33.3	1.86	20.0	0.57	1.02	0.91
3	1.83	31.4	1.55	20.2	0.56	0.93	0.85
4	2.45	24.5	2.19	31.3	1.12	0.84	0.89
5	2.33	28.0	2.20	14.9	0.52	1.03	0.94
6	2.25	25.7	2.08	13.5	0.50	1.00	0.93
7	2.34	27.0	2.12	33.1	1.09	0.85	0.90
8	1.91	35.0	1.66	13.4	0.35	1.03	0.87
9	2.40	31.6	2.32	29.2	0.90	0.99	0.97
10	1.91	31.5	1.68	18.2	0.52	0.98	0.88
\bar{x}	2.13	30.5	1.95	21.1	0.66	0.98	0.91
s	0.24	4.1	0.27	7.4	0.27	0.09	0.04
min	1.83	24.5	1.55	13.4	0.35	0.84	0.85
max	2.45	36.8	2.32	33.1	1.12	1.16	0.97

20.6 Τραχύτητα επιφάνειας $JRC = 2$ και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 45^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	2.95	43.0	2.16	29.9	0.54	0.87	0.73
2	2.89	48.8	2.16	22.7	0.38	1.04	0.75
3	3.10	42.1	2.60	21.4	0.46	1.05	0.84
4	2.66	46.5	1.98	40.1	0.66	0.83	0.74
5	2.56	45.0	2.09	27.3	0.53	1.03	0.82
6	2.80	46.2	2.07	31.1	0.53	0.91	0.74
7	2.79	45.2	2.33	28.3	0.56	1.04	0.84
8	3.05	41.6	2.49	34.1	0.69	0.90	0.82
9	2.53	51.1	1.96	28.6	0.48	1.08	0.77
10	2.94	47.3	2.28	20.7	0.37	1.07	0.77
\bar{x}	2.83	45.7	2.21	28.4	0.52	0.98	0.78
s	0.20	3.0	0.21	6.0	0.10	0.09	0.04
min	2.53	41.6	1.96	20.7	0.37	0.83	0.73
max	3.10	51.1	2.60	40.1	0.69	1.08	0.84

20.7 Τραχύτητα επιφάνειας $JRC = 2$ και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 60^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	3.34	61.4	1.87	38.4	0.40	0.92	0.56
2	2.98	61.2	1.71	60.8	0.57	0.58	0.58
3	3.29	59.1	2.26	40.5	0.52	1.02	0.69
4	3.16	61.2	2.01	16.5	0.21	1.27	0.64
5	3.23	60.4	2.07	42.4	0.50	0.96	0.64
6	3.33	59.2	2.52	31.1	0.45	1.26	0.76
7	3.28	61.5	1.93	31.5	0.35	1.05	0.59
8	3.21	59.8	2.29	39.8	0.53	1.09	0.71
9	3.27	60.9	1.99	45.1	0.49	0.88	0.61
10	3.28	63.9	2.01	59.9	0.59	0.70	0.61
\bar{x}	3.23	60.9	2.07	40.6	0.46	0.97	0.64
s	0.11	1.4	0.23	13.2	0.12	0.22	0.06
min	2.98	59.1	1.71	16.5	0.21	0.58	0.56
max	3.34	63.9	2.52	60.8	0.59	1.27	0.76

20.8 Τραχύτητα επιφάνειας JRC = 2 και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 80^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	3.21	79.1	1.37	72.8	0.42	0.67	0.43
2	3.25	80.6	1.59	59.6	0.43	1.51	0.49
3	3.28	78.2	1.18	84.4	0.37	0.17	0.36
4	3.31	80.2	1.10	29.7	0.17	1.70	0.33
5	3.22	81.1	1.47	77.3	0.45	0.65	0.46
6	3.18	77.6	1.38	46.2	0.32	1.40	0.44
7	3.25	80.3	1.41	65.7	0.40	1.06	0.44
8	3.15	78.8	1.73	62.2	0.50	1.33	0.55
9	3.15	80.8	0.93	64.6	0.27	0.79	0.30
10	3.18	78.9	1.36	80.1	0.43	0.38	0.43
\bar{x}	3.22	79.6	1.35	64.3	0.37	0.97	0.42
s	0.06	1.2	0.23	16.5	0.10	0.51	0.07
min	3.15	77.6	0.93	29.7	0.17	0.17	0.30
max	3.31	81.1	1.73	84.4	0.50	1.70	0.55

20.9 Τραχύτητα επιφάνειας JRC = 6 και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 30^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	1.81	36.6	1.34	23.1	0.49	0.85	0.74
2	2.06	30.5	1.90	11.0	0.35	1.05	0.92
3	2.07	29.4	2.04	13.8	0.48	1.10	0.99
4	2.30	28.2	2.16	22.9	0.77	0.98	0.94
5	1.94	32.0	1.72	7.6	0.22	1.04	0.89
6	2.40	28.5	2.29	23.7	0.80	0.99	0.95
7	1.90	34.0	1.80	17.1	0.50	1.09	0.95
8	1.88	34.2	1.73	24.8	0.69	1.01	0.92
9	1.78	35.5	1.36	14.7	0.33	0.91	0.76
10	1.72	37.0	1.34	29.5	0.64	0.85	0.78
\bar{x}	1.99	32.6	1.77	18.8	0.53	0.99	0.88
s	0.22	3.3	0.34	7.0	0.20	0.09	0.09
min	1.72	28.2	1.34	7.6	0.22	0.85	0.74
max	2.40	37.0	2.29	29.5	0.80	1.10	0.99

20.10 Τραχύτητα επιφάνειας JRC = 6 και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 50^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	2.71	44.3	2.19	38.3	0.72	0.89	0.81
2	2.63	46.3	2.31	12.0	0.25	1.24	0.88
3	2.89	42.9	2.25	36.0	0.67	0.86	0.78
4	2.60	48.3	2.14	37.7	0.67	0.98	0.82
5	2.33	58.2	1.39	33.3	0.39	0.95	0.60
6	2.84	46.9	2.58	11.7	0.25	1.30	0.91
7	2.78	47.4	2.23	23.5	0.44	1.09	0.80
8	2.64	56.8	1.95	48.3	0.66	0.90	0.74
9	2.24	51.3	1.89	10.2	0.19	1.32	0.84
10	3.15	51.6	2.06	23.5	0.33	0.97	0.65
\bar{x}	2.68	49.4	2.10	27.4	0.46	1.05	0.78
s	0.26	5.1	0.32	13.3	0.20	0.18	0.10
min	2.24	42.9	1.39	10.2	0.19	0.86	0.60
max	3.15	58.2	2.58	48.3	0.72	1.32	0.91

20.11 Τραχύτητα επιφάνειας JRC = 6 και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 60^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	3.46	62.0	2.21	22.7	0.28	1.26	0.64
2	3.12	62.5	1.89	57.5	0.58	0.71	0.61
3	3.22	62.6	1.78	56.6	0.52	0.66	0.55
4	3.23	62.1	1.86	31.3	0.34	1.05	0.57
5	3.29	60.3	1.84	25.2	0.28	1.02	0.56
6	3.33	61.1	2.01	32.9	0.37	1.05	0.60
7	3.30	59.7	2.26	33.5	0.44	1.13	0.68
8	3.27	61.3	1.95	12.8	0.15	1.21	0.60
9	3.37	62.4	2.33	11.4	0.15	1.47	0.69
10	3.16	62.7	1.87	56.7	0.56	0.71	0.59
\bar{x}	3.28	61.7	2.00	34.0	0.37	1.03	0.61
s	0.10	1.0	0.20	17.5	0.16	0.26	0.05
min	3.12	59.7	1.78	11.4	0.15	0.66	0.55
max	3.46	62.7	2.33	57.5	0.58	1.47	0.69

20.12 Τραχύτητα επιφάνειας $JRC = 6$ και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 80^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	3.18	80.8	1.79	64.0	0.51	1.55	0.56
2	3.25	78.5	1.35	74.6	0.41	0.55	0.42
3	3.26	81.2	0.97	47.2	0.22	1.32	0.30
4	3.24	81.2	1.31	24.7	0.17	2.38	0.40
5	3.24	80.1	1.20	37.5	0.23	1.70	0.37
6	3.26	80.8	1.28	31.4	0.21	2.10	0.39
7	3.28	79.9	1.71	46.2	0.38	2.06	0.52
8	3.22	81.8	1.26	52.4	0.31	1.67	0.39
9	3.25	79.5	1.09	37.3	0.21	1.46	0.34
10	3.28	80.9	1.22	36.0	0.22	1.91	0.37
\bar{x}	3.25	80.5	1.32	45.1	0.29	1.67	0.41
s	0.03	1.0	0.25	15.2	0.11	0.51	0.08
min	3.18	78.5	0.97	24.7	0.17	0.55	0.30
max	3.28	81.8	1.79	74.6	0.51	2.38	0.56

20.13 Τραχύτητα επιφάνειας $JRC = 8$ και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 30^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	1.96	32.8	1.69	30.1	0.80	0.89	0.86
2	2.26	28.4	2.25	26.1	0.92	1.02	1.00
3	2.30	28.9	2.20	17.8	0.61	1.04	0.96
4	1.74	42.1	1.17	27.2	0.46	0.81	0.67
5	2.04	32.8	1.79	23.1	0.63	0.96	0.88
6	1.92	33.9	1.81	15.4	0.45	1.09	0.94
7	1.77	43.3	1.39	22.4	0.44	1.00	0.79
8	2.56	28.2	2.28	10.5	0.34	0.99	0.89
9	2.13	28.3	1.88	27.8	0.87	0.89	0.88
10	1.94	34.3	1.75	20.0	0.55	1.03	0.90
\bar{x}	2.06	33.3	1.82	22.0	0.61	0.97	0.88
s	0.25	5.5	0.36	6.2	0.20	0.09	0.09
min	1.74	28.2	1.17	10.5	0.34	0.81	0.67
max	2.56	43.3	2.28	30.1	0.92	1.09	1.00

20.14 Τραχύτητα επιφάνειας JRC = 8 και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 50^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	3.01	43.7	2.49	20.8	0.43	1.07	0.83
2	2.79	45.3	2.33	10.5	0.21	1.17	0.84
3	2.66	50.0	1.98	25.4	0.42	1.05	0.74
4	2.51	50.9	2.28	27.6	0.54	1.28	0.91
5	2.71	49.8	1.95	62.1	0.83	0.52	0.72
6	2.91	48.6	1.94	33.8	0.50	0.84	0.67
7	2.63	46.4	2.11	50.0	0.85	0.75	0.80
8	2.99	41.3	2.38	37.9	0.74	0.84	0.80
9	2.46	45.6	2.15	25.0	0.52	1.13	0.87
10	2.29	52.3	1.49	18.2	0.26	1.01	0.65
\bar{x}	2.70	47.4	2.11	31.1	0.53	0.96	0.78
s	0.24	3.5	0.29	15.5	0.22	0.23	0.09
min	2.29	41.3	1.49	10.5	0.21	0.52	0.65
max	3.01	52.3	2.49	62.1	0.85	1.28	0.91

20.15 Τραχύτητα επιφάνειας JRC = 8 και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 60^\circ$

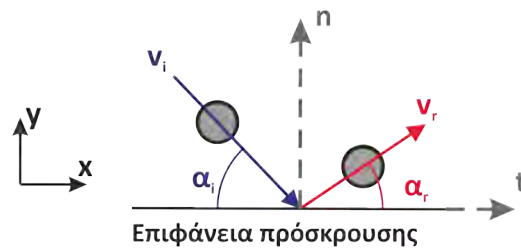
α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	3.28	62.8	1.97	74.4	0.65	0.35	0.60
2	3.35	60.0	2.00	55.7	0.57	0.67	0.60
3	3.08	63.2	1.77	17.8	0.20	1.21	0.57
4	3.30	61.3	2.28	23.2	0.31	1.32	0.69
5	3.25	60.8	2.01	13.5	0.17	1.23	0.62
6	3.36	60.6	1.93	29.6	0.32	1.02	0.57
7	3.32	60.7	2.03	43.9	0.49	0.90	0.61
8	3.35	59.4	1.83	20.0	0.22	1.01	0.55
9	3.30	62.1	1.68	38.7	0.36	0.85	0.51
10	3.25	59.6	1.97	38.9	0.44	0.93	0.61
\bar{x}	3.28	61.0	1.95	35.6	0.37	0.95	0.59
s	0.08	1.3	0.16	19.0	0.16	0.29	0.05
min	3.08	59.4	1.68	13.5	0.17	0.35	0.51
max	3.36	63.2	2.28	74.4	0.65	1.32	0.69

20.16 Τραχύτητα επιφάνειας $JRC = 8$ και γωνία πρόσκρουσης $\alpha_i = 80^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	3.25	79.1	1.70	52.5	0.42	1.69	0.52
2	3.20	78.4	1.71	72.6	0.52	0.80	0.54
3	3.20	78.8	1.59	69.1	0.47	0.91	0.50
4	3.20	79.3	1.19	35.5	0.22	1.64	0.37
5	3.22	79.8	1.83	59.1	0.49	1.64	0.57
6	3.15	78.8	1.07	28.0	0.16	1.54	0.34
7	3.14	80.5	1.15	66.0	0.34	0.90	0.37
8	3.35	78.8	1.63	29.8	0.25	2.18	0.49
9	3.17	78.4	1.85	49.1	0.45	1.90	0.58
10	3.25	79.0	1.54	14.8	0.12	2.39	0.47
\bar{x}	3.21	79.1	1.52	47.6	0.35	1.56	0.47
s	0.06	0.7	0.29	19.7	0.15	0.54	0.09
min	3.14	78.4	1.07	14.8	0.12	0.80	0.34
max	3.35	80.5	1.85	72.6	0.52	2.39	0.58

Παράρτημα 21

Ελεύθερη πτώση σφαιρικών τεμαχών σε επιφάνεια με επικάλυψη ξηρού εδαφικού υλικού



21.1 Σφαίρα $d = 3\text{cm}$ σε επιφάνεια χωρίς επικάλυψη

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-4.30	2.97	0.05	2.97	89.1	0.69	0.69
2	-4.35	2.96	0.12	2.96	87.7	0.68	0.68
3	-4.29	3.00	0.09	3.00	88.2	0.70	0.70
4	-4.31	2.72	0.08	2.72	88.3	0.63	0.63
5	-4.33	2.90	0.10	2.90	88.1	0.67	0.67
\bar{x}	-4.32	2.91	0.09	2.91	88.3	0.67	0.67
s	0.02	0.11	0.03	0.11	0.5	0.03	0.03
min	-4.35	2.72	0.05	2.72	87.7	0.63	0.63
max	-4.29	3.00	0.12	3.00	89.1	0.70	0.70

21.2 Σφαίρα $d = 4\text{cm}$ σε επιφάνεια χωρίς επικάλυψη

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-4.30	2.37	0.09	2.37	87.9	0.55	0.55
2	-4.29	2.45	0.00	2.45	89.9	0.57	0.57
3	-4.31	2.45	0.24	2.46	84.3	0.57	0.57
4	-4.33	2.29	0.14	2.29	86.4	0.53	0.53
5	-4.32	2.37	0.12	2.37	87.1	0.55	0.55
\bar{x}	-4.31	2.38	0.12	2.39	87.1	0.56	0.56
s	0.02	0.07	0.09	0.07	2.0	0.02	0.02
min	-4.33	2.29	0.00	2.29	84.3	0.53	0.53
max	-4.29	2.45	0.24	2.46	89.9	0.57	0.57

21.3 Σφαίρα $d = 3\text{cm}$ σε επιφάνεια με επικάλυψη αργίλου πάχους $t = 1\text{mm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-4.41	2.29	0.08	2.29	88.0	0.52	0.52
2	-4.44	2.39	0.08	2.39	88.1	0.54	0.54
3	-4.47	2.28	0.04	2.28	88.9	0.51	0.51
4	-4.45	2.18	0.13	2.18	86.6	0.49	0.49
5	-4.46	2.14	0.11	2.14	87.1	0.48	0.48
\bar{x}	-4.45	2.25	0.09	2.26	87.7	0.51	0.51
s	0.02	0.10	0.03	0.10	0.9	0.02	0.02
min	-4.47	2.14	0.04	2.14	86.6	0.48	0.48
max	-4.41	2.39	0.13	2.39	88.9	0.54	0.54

21.4 Σφαίρα $d = 4\text{cm}$ σε επιφάνεια με επικάλυψη αργίλου πάχους $t = 1\text{mm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-4.42	1.91	0.08	1.91	87.7	0.43	0.43
2	-4.42	2.20	0.20	2.21	84.7	0.50	0.50
3	-4.31	1.90	0.01	1.90	89.8	0.44	0.44
4	-4.41	2.20	0.27	2.22	83.1	0.50	0.50
5	-4.36	2.15	0.01	2.15	89.7	0.49	0.49
\bar{x}	-4.38	2.07	0.11	2.08	87.0	0.47	0.47
s	0.05	0.16	0.12	0.16	3.0	0.03	0.03
min	-4.42	1.90	0.01	1.90	83.1	0.43	0.43
max	-4.31	2.20	0.27	2.22	89.8	0.50	0.50

21.5 Σφαίρα $d = 3\text{cm}$ σε επιφάνεια με επικάλυψη αργίλου πάχους $t = 2\text{mm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-4.40	1.90	0.20	1.91	83.9	0.43	0.43
2	-4.40	1.97	0.17	1.98	85.1	0.45	0.45
3	-4.46	2.00	0.45	2.05	77.2	0.46	0.45
4	-4.45	1.90	0.23	1.91	83.2	0.43	0.43
5	-4.38	1.88	0.10	1.88	87.0	0.43	0.43
\bar{x}	-4.42	1.93	0.23	1.95	83.3	0.44	0.44
s	0.03	0.05	0.13	0.07	3.7	0.01	0.01
min	-4.46	1.88	0.10	1.88	77.2	0.43	0.43
max	-4.38	2.00	0.45	2.05	87.0	0.46	0.45

21.6 Σφαίρα $d = 4\text{cm}$ σε επιφάνεια με επικάλυψη αργίλου πάχους $t = 2\text{mm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-4.37	1.81	0.18	1.82	84.4	0.42	0.41
2	-4.28	1.72	0.14	1.73	85.4	0.40	0.40
3	-4.35	1.77	0.23	1.78	82.6	0.41	0.41
4	-4.34	1.78	0.13	1.78	85.9	0.41	0.41
5	-4.25	1.74	0.02	1.74	89.5	0.41	0.41
\bar{x}	-4.32	1.76	0.14	1.77	85.6	0.41	0.41
s	0.05	0.03	0.08	0.04	2.5	0.00	0.00
min	-4.37	1.72	0.02	1.73	82.6	0.40	0.40
max	-4.25	1.81	0.23	1.82	89.5	0.42	0.41

21.7 Σφαίρα $d = 3\text{cm}$ σε επιφάνεια με επικάλυψη άμμου πάχους $t = 1\text{mm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-4.48	1.67	0.07	1.67	87.6	0.37	0.37
2	-4.45	1.84	0.05	1.84	88.4	0.41	0.41
3	-4.55	2.03	0.59	2.11	73.9	0.46	0.45
4	-4.31	1.56	0.01	1.56	89.7	0.36	0.36
5	-4.58	1.53	0.50	1.61	71.9	0.35	0.33
\bar{x}	-4.47	1.73	0.24	1.76	82.3	0.39	0.39
s	0.11	0.21	0.28	0.22	8.6	0.05	0.04
min	-4.58	1.53	0.01	1.56	71.9	0.35	0.33
max	-4.31	2.03	0.59	2.11	89.7	0.46	0.45

21.8 Σφαίρα $d = 4\text{cm}$ σε επιφάνεια με επικάλυψη άμμου πάχους $t = 1\text{mm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-4.32	1.49	0.27	1.51	79.7	0.35	0.34
2	-4.27	1.71	0.10	1.71	86.8	0.40	0.40
3	-4.29	1.54	0.02	1.54	89.4	0.36	0.36
4	-4.26	1.49	0.11	1.49	85.7	0.35	0.35
5	-4.30	1.68	0.11	1.68	86.4	0.39	0.39
\bar{x}	-4.29	1.58	0.12	1.59	85.6	0.37	0.37
s	0.02	0.11	0.09	0.10	3.6	0.02	0.03
min	-4.32	1.49	0.02	1.49	79.7	0.35	0.34
max	-4.26	1.71	0.27	1.71	89.4	0.40	0.40

21.9 Σφαίρα $d = 3\text{cm}$ σε επιφάνεια με επικάλυψη άμμου πάχους $t = 2\text{mm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-4.30	1.38	0.22	1.40	80.9	0.33	0.32
2	-4.58	1.14	0.21	1.16	79.6	0.25	0.25
3	-4.43	1.22	0.12	1.23	84.3	0.28	0.28
4	-4.55	1.13	0.17	1.14	81.5	0.25	0.25
5	-4.52	1.08	0.60	1.24	60.9	0.27	0.24
\bar{x}	-4.48	1.19	0.26	1.23	77.4	0.28	0.27
s	0.11	0.12	0.19	0.10	9.4	0.03	0.03
min	-4.58	1.08	0.12	1.14	60.9	0.25	0.24
max	-4.30	1.38	0.60	1.40	84.3	0.33	0.32

21.10 Σφαίρα $d = 4\text{cm}$ σε επιφάνεια με επικάλυψη άμμου πάχους $t = 2\text{mm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-4.42	1.19	0.09	1.19	85.8	0.27	0.27
2	-4.25	0.84	0.00	0.84	89.7	0.20	0.20
3	-4.38	0.97	0.43	1.06	66.1	0.24	0.22
4	-4.33	0.86	0.06	0.86	86.2	0.20	0.20
5	-4.28	1.04	0.01	1.04	89.7	0.24	0.24
\bar{x}	-4.33	0.98	0.12	1.00	83.5	0.23	0.23
s	0.07	0.14	0.18	0.15	9.9	0.03	0.03
min	-4.42	0.84	0.00	0.84	66.1	0.20	0.20
max	-4.25	1.19	0.43	1.19	89.7	0.27	0.27

**21.11 Σφαίρα $d = 3\text{cm}$ σε επιφάνεια με επικάλυψη αργίλου-άμμου
(κ.β. 75-25%) πάχους $t = 1\text{mm}$**

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-4.79	2.29	0.02	2.29	89.4	0.48	0.48
2	-4.54	2.27	0.40	2.31	80.0	0.51	0.50
3	-4.67	2.06	0.29	2.08	82.1	0.45	0.44
4	-4.68	2.22	0.30	2.24	82.4	0.48	0.47
5	-4.51	2.27	0.08	2.27	88.1	0.50	0.50
\bar{x}	-4.64	2.22	0.22	2.24	84.4	0.48	0.48
s	0.11	0.09	0.16	0.09	4.1	0.03	0.03
min	-4.79	2.06	0.02	2.08	80.0	0.45	0.44
max	-4.51	2.29	0.40	2.31	89.4	0.51	0.50

**21.12 Σφαίρα $d = 3\text{cm}$ σε επιφάνεια με επικάλυψη αργίλου-άμμου
(κ.β. 50-50%) πάχους $t = 1\text{mm}$**

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-4.52	2.10	0.07	2.10	88.1	0.46	0.46
2	-4.72	1.94	0.05	1.94	88.5	0.41	0.41
3	-4.91	2.16	0.02	2.16	89.5	0.44	0.44
4	-4.68	2.11	0.13	2.11	86.4	0.45	0.45
5	-4.44	2.00	0.17	2.01	85.1	0.45	0.45
\bar{x}	-4.65	2.06	0.09	2.06	87.5	0.44	0.44
s	0.18	0.09	0.06	0.09	1.8	0.02	0.02
min	-4.91	1.94	0.02	1.94	85.1	0.41	0.41
max	-4.44	2.16	0.17	2.16	89.5	0.46	0.46

**21.13 Σφαίρα $d = 3\text{cm}$ σε επιφάνεια με επικάλυψη αργίλου-άμμου
(κ.β. 25-75%) πάχους $t = 1\text{mm}$**

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-4.48	1.90	0.18	1.91	84.7	0.43	0.42
2	-4.53	1.97	0.04	1.97	88.9	0.44	0.43
3	-4.31	1.80	0.14	1.81	85.6	0.42	0.42
4	-4.38	1.79	0.08	1.79	87.3	0.41	0.41
5	-4.42	1.83	0.33	1.86	79.7	0.42	0.41
\bar{x}	-4.42	1.86	0.15	1.87	85.2	0.42	0.42
s	0.09	0.08	0.11	0.07	3.5	0.01	0.01
min	-4.53	1.79	0.04	1.79	79.7	0.41	0.41
max	-4.31	1.97	0.33	1.97	88.9	0.44	0.43

21.14 Σφαίρα $d = 3\text{cm}$ σε επιφάνεια με επικάλυψη αργίλου-άμμου (κ.β. 75-25%) πάχους $t = 2\text{mm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-4.32	1.54	-0.28	1.57	79.7	0.36	0.36
2	-4.69	1.94	0.05	1.94	88.5	0.41	0.41
3	-4.52	2.02	-0.16	2.03	85.6	0.45	0.45
4	-4.78	1.77	0.30	1.80	80.5	0.38	0.37
5	-4.64	1.93	-0.29	1.95	81.5	0.42	0.42
\bar{x}	-4.59	1.84	-0.08	1.86	83.2	0.40	0.40
s	0.18	0.19	0.25	0.18	3.8	0.04	0.04
min	-4.78	1.54	-0.29	1.57	79.7	0.36	0.36
max	-4.32	2.02	0.30	2.03	88.5	0.45	0.45

21.15 Σφαίρα $d = 3\text{cm}$ σε επιφάνεια με επικάλυψη αργίλου-άμμου (κ.β. 50-50%) πάχους $t = 2\text{mm}$

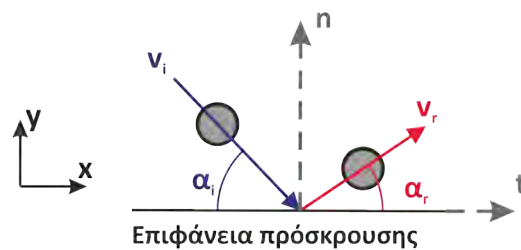
α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-4.51	1.55	0.07	1.55	87.3	0.34	0.34
2	-4.63	1.59	0.05	1.59	88.3	0.34	0.34
3	-4.56	1.64	0.16	1.65	84.4	0.36	0.36
4	-4.60	1.61	0.04	1.61	88.5	0.35	0.35
5	-4.52	1.84	0.13	1.84	86.0	0.41	0.41
\bar{x}	-4.56	1.64	0.09	1.65	86.9	0.36	0.36
s	0.05	0.11	0.05	0.11	1.7	0.03	0.03
min	-4.63	1.55	0.04	1.55	84.4	0.34	0.34
max	-4.51	1.84	0.16	1.84	88.5	0.41	0.41

21.16 Σφαίρα $d = 3\text{cm}$ σε επιφάνεια με επικάλυψη αργίλου-άμμου (κ.β. 25-75%) πάχους $t = 2\text{mm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-4.68	1.56	0.11	1.56	86.0	0.33	0.33
2	-4.72	1.56	0.18	1.57	83.3	0.33	0.33
3	-4.72	1.65	0.13	1.65	85.6	0.35	0.35
4	-4.89	1.41	0.15	1.42	83.9	0.29	0.29
5	-4.85	1.59	0.07	1.59	87.3	0.33	0.33
\bar{x}	-4.77	1.55	0.13	1.56	85.2	0.33	0.33
s	0.09	0.09	0.04	0.08	1.6	0.02	0.02
min	-4.89	1.41	0.07	1.42	83.3	0.29	0.29
max	-4.68	1.65	0.18	1.65	87.3	0.35	0.35

Παράρτημα 22

Ελεύθερη πτώση σφαιρικών τεμαχίων σε επιφάνεια με επάλειψη υδαρούς αργιλικού υλικού



22.1 Επιφάνεια χωρίς επικάλυψη

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]
1	-5.51	3.20	0.02	3.20	89.7	0.58	0.58
2	-5.56	3.33	0.20	3.34	86.6	0.60	0.60
3	-5.63	3.38	0.12	3.38	87.9	0.60	0.60
4	-5.66	3.23	0.01	3.23	89.9	0.57	0.57
5	-5.55	3.16	0.01	3.16	89.9	0.57	0.57
\bar{x}	-5.58	3.26	0.07	3.26	88.8	0.58	0.58
s	0.06	0.09	0.09	0.09	1.5	0.02	0.01
min	-5.66	3.16	0.01	3.16	86.6	0.57	0.57
max	-5.51	3.38	0.20	3.38	89.9	0.60	0.60

22.2 Επιφάνεια με 1 στρώση επάλειψης

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-5.70	2.95	0.23	2.96	85.5	0.52	0.52
2	-5.64	3.16	0.27	3.17	85.1	0.56	0.56
3	-5.41	2.97	0.02	2.97	89.6	0.55	0.55
4	-5.35	2.89	0.33	2.91	83.4	0.54	0.54
5	-5.51	3.08	0.10	3.08	88.1	0.56	0.56
\bar{x}	-5.52	3.01	0.19	3.02	86.3	0.55	0.55
s	0.15	0.11	0.13	0.11	2.5	0.02	0.02
min	-5.70	2.89	0.02	2.91	83.4	0.52	0.52
max	-5.35	3.16	0.33	3.17	89.6	0.56	0.56

22.3 Επιφάνεια με 2 στρώσεις επάλειψης

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-5.43	2.95	0.10	2.95	88.1	0.54	0.54
2	-5.51	2.55	0.17	2.56	86.1	0.46	0.46
3	-5.46	2.78	0.14	2.78	87.2	0.51	0.51
4	-5.68	2.78	0.23	2.79	85.3	0.49	0.49
5	-5.56	2.86	0.16	2.86	86.7	0.51	0.51
\bar{x}	-5.53	2.78	0.16	2.79	86.7	0.50	0.50
s	0.10	0.15	0.05	0.14	1.1	0.03	0.03
min	-5.68	2.55	0.10	2.56	85.3	0.46	0.46
max	-5.43	2.95	0.23	2.95	88.1	0.54	0.54

22.4 Επιφάνεια με 3 στρώσεις επάλειψης

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-5.52	2.63	-0.09	2.66	88.1	0.48	0.48
2	-5.84	2.82	0.04	2.82	89.2	0.48	0.48
3	-5.68	2.86	-0.11	2.86	87.7	0.50	0.50
4	-5.61	2.97	-0.33	2.99	83.6	0.53	0.53
5	-5.68	2.32	-0.14	2.73	86.6	0.48	0.41
\bar{x}	-5.67	2.72	-0.13	2.81	87.0	0.50	0.48
s	0.12	0.26	0.13	0.13	2.1	0.02	0.05
min	-5.84	2.32	-0.33	2.66	83.6	0.48	0.41
max	-5.52	2.97	0.04	2.99	89.2	0.53	0.53

22.5 Επιφάνεια με 4 στρώσεις επάλειψης

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]
1	-5.66	2.94	0.10	2.94	88.1	0.52	0.52
2	-5.60	2.68	0.20	2.69	85.8	0.48	0.48
3	-5.43	2.61	0.23	2.62	84.9	0.48	0.48
4	-5.63	2.54	0.08	2.54	88.2	0.45	0.45
5	-5.59	2.71	0.15	2.71	86.9	0.48	0.48
\bar{x}	-5.58	2.70	0.15	2.70	86.8	0.48	0.48
s	0.09	0.15	0.06	0.15	1.4	0.02	0.02
min	-5.66	2.54	0.08	2.54	84.9	0.45	0.45
max	-5.43	2.94	0.23	2.94	88.2	0.52	0.52

22.6 Επιφάνεια με 5 στρώσεις επάλειψης

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]
1	-5.51	2.83	0.10	2.83	87.9	0.51	0.51
2	-5.67	2.73	0.01	2.73	89.8	0.48	0.48
3	-5.75	2.66	0.17	2.67	86.4	0.46	0.46
4	-5.51	2.70	0.69	2.79	75.6	0.51	0.49
5	-5.63	2.69	0.02	2.69	89.5	0.48	0.48
\bar{x}	-5.61	2.72	0.20	2.74	85.8	0.49	0.49
s	0.10	0.06	0.28	0.07	5.9	0.02	0.02
min	-5.75	2.66	0.01	2.67	75.6	0.46	0.46
max	-5.51	2.83	0.69	2.83	89.8	0.51	0.51

22.7 Επιφάνεια με 6 στρώσεις επάλειψης

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]
1	-5.48	2.80	0.07	2.80	88.5	0.51	0.51
2	-5.44	2.37	0.21	2.38	85.0	0.44	0.44
3	-5.66	2.84	0.01	2.84	89.8	0.50	0.50
4	-5.70	2.76	0.20	2.77	85.8	0.49	0.48
5	-5.51	2.52	0.41	2.55	80.7	0.46	0.46
\bar{x}	-5.56	2.66	0.18	2.67	86.0	0.48	0.48
s	0.11	0.20	0.15	0.20	3.5	0.03	0.03
min	-5.70	2.37	0.01	2.38	80.7	0.44	0.44
max	-5.44	2.84	0.41	2.84	89.8	0.51	0.51

22.8 Επιφάνεια με 7 στρώσεις επάλειψης

α/α	$v_{y,i}$ [ms ⁻¹]	$v_{y,r}$ [ms ⁻¹]	$v_{x,r}$ [ms ⁻¹]	v_r [ms ⁻¹]	α_r [°]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-5.53	2.70	0.02	2.70	89.6	0.49	0.49
2	-5.64	2.55	0.04	2.55	89.0	0.45	0.45
3	-5.56	2.89	0.15	2.89	87.1	0.52	0.52
4	-5.67	2.42	0.27	2.44	83.6	0.43	0.43
5	-5.72	2.51	0.22	2.52	85.1	0.44	0.44
\bar{x}	-5.62	2.61	0.14	2.62	86.9	0.47	0.47
s	0.08	0.18	0.11	0.18	2.5	0.04	0.04
min	-5.72	2.42	0.02	2.44	83.6	0.43	0.43
max	-5.53	2.89	0.27	2.89	89.6	0.52	0.52

22.9 Επιφάνεια με 8 στρώσεις επάλειψης

α/α	$v_{y,i}$ [ms ⁻¹]	$v_{y,r}$ [ms ⁻¹]	$v_{x,r}$ [ms ⁻¹]	v_r [ms ⁻¹]	α_r [°]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-5.49	2.62	0.04	2.62	89.1	0.48	0.48
2	-5.51	2.57	0.00	2.57	89.9	0.47	0.47
3	-5.66	2.52	0.19	2.52	85.6	0.45	0.44
4	-5.51	2.26	0.04	2.26	89.0	0.41	0.41
5	-5.61	2.57	0.20	2.58	85.6	0.46	0.46
\bar{x}	-5.56	2.51	0.10	2.51	87.8	0.45	0.45
s	0.07	0.15	0.09	0.15	2.1	0.03	0.03
min	-5.66	2.26	0.00	2.26	85.6	0.41	0.41
max	-5.49	2.62	0.20	2.62	89.9	0.48	0.48

22.10 Επιφάνεια με 9 στρώσεις επάλειψης

α/α	$v_{y,i}$ [ms ⁻¹]	$v_{y,r}$ [ms ⁻¹]	$v_{x,r}$ [ms ⁻¹]	v_r [ms ⁻¹]	α_r [°]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-5.57	2.55	-0.18	2.56	85.9	0.46	0.46
2	-5.60	2.44	0.18	2.44	85.8	0.44	0.43
3	-5.58	1.95	-0.01	1.95	89.8	0.35	0.35
4	-5.64	2.38	0.18	2.39	85.7	0.42	0.42
5	-5.51	2.33	0.26	2.34	83.6	0.42	0.42
\bar{x}	-5.58	2.33	0.09	2.34	86.2	0.42	0.42
s	0.05	0.23	0.18	0.23	2.2	0.04	0.04
min	-5.64	1.95	-0.18	1.95	83.6	0.35	0.35
max	-5.51	2.55	0.26	2.56	89.8	0.46	0.46

22.11 Επιφάνεια με 10 στρώσεις επάλειψης

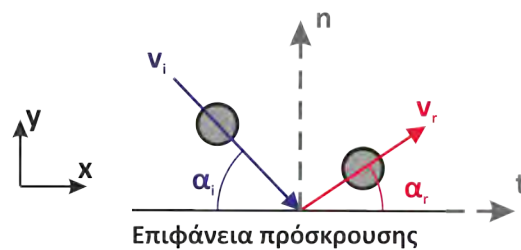
α/α	$v_{y,i}$ [ms ⁻¹]	$v_{y,r}$ [ms ⁻¹]	$v_{x,r}$ [ms ⁻¹]	v_r [ms ⁻¹]	α_r [°]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]
1	-5.44	2.79	0.01	2.79	89.8	0.51	0.51
2	-5.53	2.48	0.02	2.48	89.4	0.45	0.45
3	-5.51	2.19	-0.29	2.21	82.6	0.40	0.40
4	-5.51	2.22	-0.11	2.22	87.3	0.40	0.40
5	-5.45	2.40	0.06	2.40	88.6	0.44	0.44
\bar{x}	-5.49	2.42	-0.06	2.42	87.5	0.44	0.44
s	0.04	0.24	0.14	0.24	2.9	0.05	0.05
min	-5.53	2.19	-0.29	2.21	82.6	0.40	0.40
max	-5.44	2.79	0.06	2.79	89.8	0.51	0.51

22.12 Επιφάνεια με 12 στρώσεις επάλειψης

α/α	$v_{y,i}$ [ms ⁻¹]	$v_{y,r}$ [ms ⁻¹]	$v_{x,r}$ [ms ⁻¹]	v_r [ms ⁻¹]	α_r [°]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]
1	-5.44	2.59	0.01	2.59	89.8	0.48	0.48
2	-5.53	2.48	0.03	2.48	89.4	0.45	0.45
3	-5.51	2.19	0.28	2.21	82.6	0.40	0.40
4	-5.51	2.22	0.10	2.22	87.3	0.40	0.40
5	-5.45	2.40	0.06	2.40	88.6	0.44	0.44
\bar{x}	-5.49	2.38	0.10	2.38	87.5	0.43	0.43
s	0.04	0.17	0.11	0.17	2.9	0.03	0.03
min	-5.53	2.19	0.01	2.21	82.6	0.40	0.40
max	-5.44	2.59	0.28	2.59	89.8	0.48	0.48

Παράρτημα 23

Ελεύθερη πτώση σφαιρικών τεμαχών σε επιφάνεια με επάλειψη αργιλικού υλικού σε ξηρά κατάσταση



23.1 Ρίψη από ύψος $h_d = 100\text{cm}$ σε επιφάνεια με πάχος επάλειψης $t = 0.05\text{mm}$ – 1^η στρώση

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]
1	-4.65	2.88	0.12	2.88	87.7	0.62	0.62
2	-4.49	2.83	0.39	2.86	82.2	0.64	0.63
3	-4.54	2.67	0.24	2.68	84.8	0.59	0.59
4	-4.57	2.93	0.12	2.93	87.7	0.64	0.64
5	-4.57	2.84	0.10	2.84	87.9	0.62	0.62
\bar{x}	-4.56	2.83	0.19	2.84	86.1	0.62	0.62
s	0.06	0.10	0.12	0.09	2.5	0.02	0.02
min	-4.65	2.67	0.10	2.68	82.2	0.59	0.59
max	-4.49	2.93	0.39	2.93	87.9	0.64	0.64

23.2 Ρίψη από ύψος $h_d = 100\text{cm}$ σε επιφάνεια με πάχος επάλειψης $t = 0.16\text{mm}$ – 2^η στρώση

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-4.60	2.84	0.24	2.85	85.2	0.62	0.62
2	-4.47	2.73	0.10	2.73	87.9	0.61	0.61
3	-4.45	2.57	0.24	2.58	84.6	0.58	0.58
4	-4.45	2.76	0.13	2.76	87.2	0.62	0.62
5	-4.63	2.50	0.10	2.50	87.6	0.54	0.54
\bar{x}	-4.52	2.68	0.16	2.68	86.5	0.59	0.59
s	0.09	0.14	0.07	0.14	1.5	0.03	0.03
min	-4.63	2.50	0.10	2.50	84.6	0.54	0.54
max	-4.45	2.84	0.24	2.85	87.9	0.62	0.62

23.3 Ρίψη από ύψος $h_d = 100\text{cm}$ σε επιφάνεια με πάχος επάλειψης $t = 0.22\text{mm}$ – 3^η στρώση

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-4.70	2.87	0.06	2.87	88.8	0.61	0.61
2	-4.47	2.41	0.23	2.42	84.6	0.54	0.54
3	-4.51	2.44	0.42	2.48	80.2	0.55	0.54
4	-4.70	2.65	0.41	2.68	81.3	0.57	0.56
5	-4.50	2.42	0.16	2.43	86.3	0.54	0.54
\bar{x}	-4.58	2.56	0.25	2.58	84.2	0.56	0.56
s	0.11	0.20	0.16	0.20	3.5	0.03	0.03
min	-4.70	2.41	0.06	2.42	80.2	0.54	0.54
max	-4.47	2.87	0.42	2.87	88.8	0.61	0.61

23.4 Ρίψη από ύψος $h_d = 100\text{cm}$ σε επιφάνεια με πάχος επάλειψης $t = 0.48\text{mm}$ – 5^η στρώση

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-4.44	2.14	0.16	2.15	85.8	0.48	0.48
2	-4.58	2.40	0.37	2.43	81.2	0.53	0.52
3	-4.40	2.52	0.06	2.52	88.6	0.57	0.57
4	-4.54	2.32	0.13	2.32	86.7	0.51	0.51
5	-4.73	2.09	0.02	2.09	89.4	0.44	0.44
\bar{x}	-4.54	2.29	0.15	2.30	86.3	0.51	0.51
s	0.13	0.18	0.14	0.18	3.2	0.05	0.05
min	-4.73	2.09	0.02	2.09	81.2	0.44	0.44
max	-4.40	2.52	0.37	2.52	89.4	0.57	0.57

23.5 Ρίψη από ύψος $h_d = 100\text{cm}$ σε επιφάνεια με πάχος επάλειψης $t = 0.82\text{mm}$ – 8^η στρώση

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-4.47	1.61	0.12	1.61	85.9	0.36	0.36
2	-4.37	1.66	0.06	1.66	88.1	0.38	0.38
3	-4.42	1.45	0.15	1.46	84.1	0.33	0.33
4	-4.46	1.97	0.08	1.97	87.7	0.44	0.44
5	-4.65	1.63	0.10	1.63	86.6	0.35	0.35
\bar{x}	-4.47	1.66	0.10	1.67	86.5	0.37	0.37
s	0.11	0.19	0.04	0.19	1.6	0.04	0.04
min	-4.65	1.45	0.06	1.46	84.1	0.33	0.33
max	-4.37	1.97	0.15	1.97	88.1	0.44	0.44

23.6 Ρίψη από ύψος $h_d = 100\text{cm}$ σε επιφάνεια με πάχος επάλειψης $t = 1.09\text{mm}$ – 10^η στρώση

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-4.49	1.21	0.10	1.21	85.1	0.27	0.27
2	-4.47	1.29	0.15	1.30	83.3	0.29	0.29
3	-4.51	1.26	0.02	1.26	89.2	0.28	0.28
4	-4.56	0.86	0.13	0.87	81.2	0.19	0.19
5	-4.50	1.04	0.00	1.04	90.0	0.23	0.23
\bar{x}	-4.51	1.13	0.08	1.14	85.8	0.25	0.25
s	0.03	0.18	0.07	0.18	3.8	0.04	0.04
min	-4.56	0.86	0.00	0.87	81.2	0.19	0.19
max	-4.47	1.29	0.15	1.30	90.0	0.29	0.29

23.7 Ρίψη από ύψος $h_d = 150\text{cm}$ σε επιφάνεια με πάχος επάλειψης $t = 0.07\text{mm}$ – 1^η στρώση

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-5.65	2.98	0.07	2.98	88.6	0.53	0.53
2	-5.49	3.04	-0.03	3.04	89.4	0.55	0.55
3	-5.41	2.85	0.27	2.86	84.6	0.53	0.53
4	-5.67	3.20	0.16	3.21	87.2	0.57	0.57
5	-5.55	2.96	0.01	2.96	89.9	0.53	0.53
\bar{x}	-5.55	3.01	0.10	3.01	87.9	0.54	0.54
s	0.11	0.13	0.12	0.13	2.1	0.02	0.02
min	-5.67	2.85	-0.03	2.86	84.6	0.53	0.53
max	-5.41	3.20	0.27	3.21	89.9	0.57	0.57

23.8 Ρίψη από ύψος $h_d = 150\text{cm}$ σε επιφάνεια με πάχος επάλειψης $t = 0.17\text{mm}$ – 2^η στρώση

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-5.40	2.98	0.12	2.98	87.7	0.55	0.55
2	-5.68	3.03	0.08	3.03	88.5	0.53	0.53
3	-5.66	2.90	0.29	2.91	84.2	0.51	0.51
4	-5.62	2.99	0.04	2.99	89.3	0.53	0.53
5	-5.72	2.88	0.19	2.89	86.3	0.51	0.50
\bar{x}	-5.62	2.96	0.14	2.96	87.2	0.53	0.53
s	0.13	0.06	0.10	0.06	2.0	0.02	0.02
min	-5.72	2.88	0.04	2.89	84.2	0.51	0.50
max	-5.40	3.03	0.29	3.03	89.3	0.55	0.55

23.9 Ρίψη από ύψος $h_d = 150\text{cm}$ σε επιφάνεια με πάχος επάλειψης $t = 0.43\text{mm}$ – 4^η στρώση

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-5.50	2.81	0.34	2.83	83.2	0.51	0.51
2	-5.61	2.72	0.23	2.73	85.1	0.49	0.48
3	-5.71	2.93	0.17	2.94	86.6	0.51	0.51
4	-5.57	2.49	0.17	2.50	86.2	0.45	0.45
5	-5.39	2.80	0.16	2.80	86.7	0.52	0.52
\bar{x}	-5.56	2.75	0.21	2.76	85.6	0.50	0.50
s	0.12	0.16	0.07	0.16	1.5	0.03	0.03
min	-5.71	2.49	0.16	2.50	83.2	0.45	0.45
max	-5.39	2.93	0.34	2.94	86.7	0.52	0.52

23.10 Ρίψη από ύψος $h_d = 150\text{cm}$ σε επιφάνεια με πάχος επάλειψης $t = 0.64\text{mm}$ – 6^η στρώση

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-5.77	2.45	0.02	2.45	89.6	0.43	0.42
2	-5.64	2.66	0.32	2.68	83.1	0.48	0.47
3	-5.66	2.59	0.05	2.59	88.9	0.46	0.46
4	-5.65	2.63	0.13	2.64	87.1	0.47	0.47
5	-5.57	2.60	0.01	2.60	89.7	0.47	0.47
\bar{x}	-5.66	2.59	0.11	2.59	87.7	0.46	0.46
s	0.07	0.08	0.13	0.09	2.8	0.02	0.02
min	-5.77	2.45	0.01	2.45	83.1	0.43	0.42
max	-5.57	2.66	0.32	2.68	89.7	0.48	0.47

23.11 Ρίψη από ύψος $h_d = 150\text{cm}$ σε επιφάνεια με πάχος επάλειψης $t = 0.77\text{mm}$ – 8^η στρώση

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-5.60	1.70	0.36	1.74	78.1	0.31	0.30
2	-5.47	1.79	0.26	1.81	81.8	0.33	0.33
3	-5.49	2.09	0.05	2.09	88.5	0.38	0.38
4	-5.63	2.30	0.25	2.31	83.9	0.41	0.41
5	-5.59	2.40	0.02	2.40	89.6	0.43	0.43
\bar{x}	-5.56	2.05	0.19	2.07	84.4	0.37	0.37
s	0.07	0.31	0.15	0.30	4.8	0.05	0.05
min	-5.63	1.70	0.02	1.74	78.1	0.31	0.30
max	-5.47	2.40	0.36	2.40	89.6	0.43	0.43

23.12 Ρίψη από ύψος $h_d = 150\text{cm}$ σε επιφάνεια με πάχος επάλειψης $t = 0.91\text{mm}$ – 10^η στρώση

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-5.68	1.45	0.26	1.48	79.7	0.26	0.26
2	-5.64	1.69	0.14	1.69	85.3	0.30	0.30
3	-5.49	1.74	0.20	1.76	83.3	0.32	0.32
4	-5.63	2.08	0.52	2.14	76.0	0.38	0.37
5	-5.61	1.88	0.05	1.88	88.6	0.34	0.34
\bar{x}	-5.61	1.77	0.23	1.79	82.6	0.32	0.32
s	0.07	0.23	0.18	0.25	4.9	0.04	0.04
min	-5.68	1.45	0.05	1.48	76.0	0.26	0.26
max	-5.49	2.08	0.52	2.14	88.6	0.38	0.37

23.13 Ρίψη από ύψος $h_d = 150\text{cm}$ σε επιφάνεια με πάχος επάλειψης $t = 1.17\text{mm}$ – 12^η στρώση

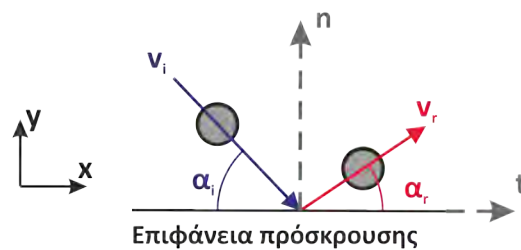
α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-5.64	0.90	0.05	0.90	87.1	0.16	0.16
2	-5.36	1.29	0.03	1.29	88.7	0.24	0.24
3	-5.58	1.10	0.16	1.12	81.8	0.20	0.20
4	-5.63	0.74	0.27	0.79	69.9	0.14	0.13
5	-5.49	0.99	0.08	0.99	85.3	0.18	0.18
\bar{x}	-5.54	1.00	0.12	1.02	82.6	0.18	0.18
s	0.12	0.21	0.10	0.19	7.5	0.04	0.04
min	-5.64	0.74	0.03	0.79	69.9	0.14	0.13
max	-5.36	1.29	0.27	1.29	88.7	0.24	0.24

23.14 Ρίψη από ύψος $h_d = 150\text{cm}$ σε επιφάνεια με πάχος επάλειψης $t = 1.41\text{mm} - 14^{\text{η}}$ στρώση

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-5.57	0.66	0.09	0.67	82.3	0.12	0.12
2	-5.68	0.61	0.14	0.63	77.5	0.11	0.11
3	-5.61	0.84	0.07	0.84	85.0	0.15	0.15
4	-5.78	0.63	0.09	0.64	82.1	0.11	0.11
5	-5.58	0.78	0.09	0.78	83.4	0.14	0.14
\bar{x}	-5.64	0.70	0.10	0.71	82.1	0.13	0.12
s	0.09	0.10	0.02	0.10	2.8	0.02	0.02
min	-5.78	0.61	0.07	0.63	77.5	0.11	0.11
max	-5.57	0.84	0.14	0.84	85.0	0.15	0.15

Παράρτημα 24

Ελεύθερη πτώση σφαιρικών τεμαχών σε επιφάνεια με αναζυμωμένο εδαφικό μείγμα



24.1 Επιφάνεια με επικάλυψη αργίλου-άμμου M31 (κ.β. 75-25%) πάχους $t = 1\text{mm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]
1	-4.61	0.40	0.04	0.40	83.7	0.09	0.09
2	-4.56	0.67	0.10	0.68	81.3	0.15	0.15
3	-4.42	0.54	0.17	0.57	72.2	0.13	0.12
4	-4.55	0.37	0.13	0.39	70.0	0.09	0.08
5	-4.44	0.29	0.15	0.32	63.0	0.07	0.06
6	-4.53	0.52	0.10	0.53	79.3	0.12	0.11
\bar{x}	-4.52	0.46	0.12	0.48	74.9	0.11	0.10
s	0.07	0.14	0.05	0.13	7.9	0.03	0.03
min	-4.61	0.29	0.04	0.32	63.0	0.07	0.06
max	-4.42	0.67	0.17	0.68	83.7	0.15	0.15

24.2 Επιφάνεια με επικάλυψη αργίλου-άμμου M31 (κ.β. 75-25%) πάχους $t = 2\text{mm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-4.56	0.13	0.02	0.13	82.3	0.03	0.03
2	-4.41	0.09	0.02	0.09	75.3	0.02	0.02
3	-4.46	0.13	0.04	0.14	71.5	0.03	0.03
4	-4.39	0.17	0.13	0.21	52.7	0.05	0.04
5	-4.58	0.07	0.04	0.08	63.9	0.02	0.02
6	-4.53	0.24	0.10	0.26	68.3	0.06	0.05
\bar{x}	-4.49	0.14	0.06	0.15	69.0	0.03	0.03
s	0.08	0.06	0.04	0.07	10.1	0.02	0.01
min	-4.58	0.07	0.02	0.08	52.7	0.02	0.02
max	-4.39	0.24	0.13	0.26	82.3	0.06	0.05

24.3 Επιφάνεια με επικάλυψη αργίλου-άμμου M31 (κ.β. 50-50%) πάχους $t = 1\text{mm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-4.46	0.69	0.01	0.69	89.3	0.15	0.15
2	-4.45	0.82	0.23	0.85	74.2	0.19	0.18
3	-4.45	0.57	0.28	0.63	63.8	0.14	0.13
4	-4.62	0.46	0.05	0.46	84.2	0.10	0.10
5	-4.65	0.75	0.12	0.76	80.8	0.16	0.16
6	-4.63	0.88	0.21	0.90	76.6	0.19	0.19
\bar{x}	-4.54	0.69	0.15	0.72	78.2	0.16	0.15
s	0.10	0.16	0.11	0.16	8.9	0.03	0.03
min	-4.65	0.46	0.01	0.46	63.8	0.10	0.10
max	-4.45	0.88	0.28	0.90	89.3	0.19	0.19

24.4 Επιφάνεια με επικάλυψη αργίλου-άμμου M31 (κ.β. 50-50%) πάχους $t = 2\text{mm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-4.51	0.40	0.13	0.42	71.3	0.09	0.09
2	-4.54	0.35	0.03	0.35	84.6	0.08	0.08
3	-4.45	0.37	0.01	0.37	87.7	0.08	0.08
4	-4.48	0.51	0.08	0.52	81.3	0.12	0.11
5	-4.64	0.44	0.19	0.48	67.0	0.10	0.10
6	-4.51	0.24	0.03	0.24	81.7	0.06	0.05
\bar{x}	-4.52	0.38	0.08	0.40	78.9	0.09	0.09
s	0.07	0.09	0.07	0.10	8.0	0.02	0.02
min	-4.64	0.24	0.01	0.24	67.0	0.06	0.05
max	-4.45	0.51	0.19	0.52	87.7	0.12	0.11

24.5 Επιφάνεια με επικάλυψη αργίλου-άμμου M31 (κ.β. 25-75%) πάχους $t = 1\text{mm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-4.58	1.08	0.04	1.08	87.8	0.24	0.24
2	-4.63	1.28	0.25	1.30	79.0	0.28	0.28
3	-4.71	1.25	0.07	1.25	87.0	0.26	0.27
4	-4.66	0.68	0.34	0.76	63.2	0.16	0.15
5	-4.55	0.86	0.06	0.86	85.9	0.19	0.19
6	-4.43	1.29	0.26	1.32	78.6	0.30	0.29
\bar{x}	-4.59	1.07	0.17	1.10	80.3	0.24	0.23
s	0.10	0.25	0.13	0.24	9.3	0.05	0.06
min	-4.71	0.68	0.04	0.76	63.2	0.16	0.15
max	-4.43	1.29	0.34	1.32	87.8	0.30	0.29

24.6 Επιφάνεια με επικάλυψη αργίλου-άμμου M31 (κ.β. 25-75%) πάχους $t = 2\text{mm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-4.52	0.51	-0.03	0.51	84.5	0.11	0.11
2	-4.44	0.73	-0.10	0.74	82.6	0.17	0.17
3	-4.43	0.34	0.13	0.37	65.3	0.08	0.08
4	-4.33	0.49	0.30	0.57	58.7	0.13	0.11
5	-4.70	0.42	-0.03	0.42	86.1	0.09	0.09
6	-4.53	0.40	-0.21	0.47	57.8	0.10	0.09
\bar{x}	-4.49	0.48	0.01	0.51	72.5	0.11	0.11
s	0.13	0.14	0.18	0.13	13.3	0.03	0.03
min	-4.70	0.34	-0.21	0.37	57.8	0.08	0.08
max	-4.33	0.73	0.30	0.74	86.1	0.17	0.17

24.7 Επιφάνεια με επικάλυψη αργίλου-άμμου M34 (κ.β. 75-25%) πάχους $t = 1\text{mm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-4.63	0.38	0.01	0.38	88.5	0.08	0.08
2	-4.36	0.51	0.10	0.52	78.4	0.12	0.12
3	-4.49	0.69	0.11	0.70	81.2	0.16	0.15
4	-4.59	0.61	0.07	0.61	83.1	0.13	0.13
5	-4.39	0.43	0.16	0.46	69.5	0.10	0.10
6	-4.55	0.64	0.01	0.64	89.1	0.14	0.14
\bar{x}	-4.50	0.54	0.08	0.55	81.6	0.12	0.12
s	0.11	0.12	0.06	0.12	7.3	0.03	0.03
min	-4.63	0.38	0.01	0.38	69.5	0.08	0.08
max	-4.36	0.69	0.16	0.70	89.1	0.16	0.15

24.8 Επιφάνεια με επικάλυψη αργίλου-άμμου M34 (κ.β. 75-25%) πάχους $t = 2\text{mm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]
1	-4.72	0.20	0.09	0.22	66.5	0.05	0.04
2	-4.47	0.40	0.16	0.43	68.0	0.10	0.09
3	-4.55	0.10	0.18	0.21	29.8	0.05	0.02
4	-4.56	0.47	0.12	0.48	76.1	0.11	0.10
5	-4.70	0.31	0.13	0.34	67.5	0.07	0.07
6	-4.61	0.26	0.07	0.27	74.1	0.06	0.06
\bar{x}	-4.60	0.29	0.13	0.33	63.7	0.07	0.06
s	0.10	0.13	0.04	0.11	17.0	0.03	0.03
min	-4.72	0.10	0.07	0.21	29.8	0.05	0.02
max	-4.47	0.47	0.18	0.48	76.1	0.11	0.10

24.9 Επιφάνεια με επικάλυψη αργίλου-άμμου M34 (κ.β. 50-50%) πάχους $t = 1\text{mm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	n_{COR} [-]
1	-4.51	1.06	0.04	1.06	88.1	0.24	0.23
2	-4.47	1.09	0.08	1.09	86.0	0.24	0.24
3	-4.71	1.21	0.03	1.21	88.8	0.26	0.26
4	-4.51	1.11	0.16	1.12	82.0	0.25	0.25
5	-4.60	1.23	0.11	1.24	84.7	0.27	0.27
6	-4.63	0.97	0.14	0.98	81.7	0.21	0.21
\bar{x}	-4.57	1.11	0.09	1.12	85.2	0.24	0.24
s	0.09	0.10	0.05	0.10	3.0	0.02	0.02
min	-4.71	0.97	0.03	0.98	81.7	0.21	0.21
max	-4.47	1.23	0.16	1.24	88.8	0.27	0.27

24.10 Επιφάνεια με επικάλυψη αργίλου-άμμου M34 (κ.β. 50-50%) πάχους $t = 2\text{mm}$

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-4.63	0.68	0.15	0.70	77.7	0.15	0.15
2	-4.41	0.75	0.18	0.77	76.1	0.17	0.17
3	-4.40	0.49	0.17	0.52	70.8	0.12	0.11
4	-4.45	0.57	0.05	0.57	85.3	0.13	0.13
5	-4.55	0.84	0.05	0.84	86.3	0.18	0.18
6	-4.67	0.62	0.05	0.62	85.1	0.13	0.13
\bar{x}	-4.52	0.66	0.11	0.67	80.2	0.15	0.15
s	0.12	0.13	0.07	0.12	6.3	0.03	0.03
min	-4.67	0.49	0.05	0.52	70.8	0.12	0.11
max	-4.40	0.84	0.18	0.84	86.3	0.18	0.18

24.11 Επιφάνεια με επικάλυψη αργίλου-άμμου M34 (κ.β. 25-75%) πάχους $t = 1\text{mm}$

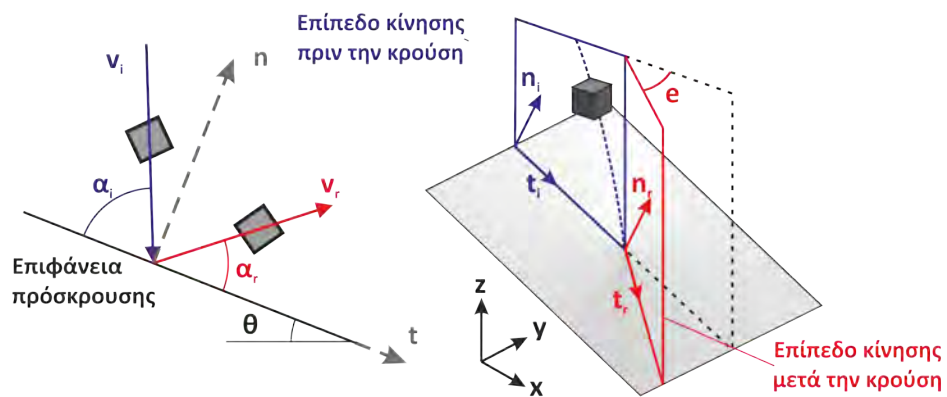
α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-4.47	1.26	0.12	1.27	84.6	0.28	0.28
2	-4.47	0.98	0.05	0.98	87.2	0.22	0.22
3	-4.68	1.20	0.12	1.21	84.5	0.26	0.26
4	-4.73	1.04	0.05	1.04	87.3	0.22	0.22
5	-4.44	1.33	0.06	1.33	87.5	0.30	0.30
6	-4.67	1.19	0.04	1.19	88.3	0.25	0.25
\bar{x}	-4.58	1.17	0.07	1.17	86.6	0.26	0.26
s	0.13	0.13	0.04	0.13	1.6	0.03	0.03
min	-4.73	0.98	0.04	0.98	84.5	0.22	0.22
max	-4.44	1.33	0.12	1.33	88.3	0.30	0.30

**24.12 Επιφάνεια με επικάλυψη αργίλου-άμμου M34 (κ.β. 25-75%)
πάχους $t = 2\text{mm}$**

α/α	$v_{y,i}$ [ms^{-1}]	$v_{y,r}$ [ms^{-1}]	$v_{x,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]
1	-4.44	0.86	0.13	0.87	81.6	0.20	0.19
2	-4.69	0.54	0.14	0.56	75.0	0.12	0.12
3	-4.58	0.61	0.15	0.63	76.3	0.14	0.13
4	-4.44	0.45	0.03	0.45	85.9	0.10	0.10
5	-4.59	0.66	0.27	0.71	67.3	0.15	0.14
6	-4.67	0.51	0.06	0.51	83.7	0.11	0.11
\bar{x}	-4.57	0.60	0.13	0.62	78.3	0.14	0.13
s	0.11	0.15	0.09	0.15	6.8	0.03	0.03
min	-4.69	0.45	0.03	0.45	67.3	0.10	0.10
max	-4.44	0.86	0.27	0.87	85.9	0.20	0.19

Παράρτημα 25

Ελεύθερη πτώση κυβικών τεμαχών



25.1 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 20^\circ$

α/α	$v_{t,i}$ [ms ⁻¹]	$v_{n,i}$ [ms ⁻¹]	v_i [ms ⁻¹]	$v_{t,r}$ [ms ⁻¹]	$v_{n,r}$ [ms ⁻¹]	v_r [ms ⁻¹]	α_i [°]	α_r [°]	e [°]	η_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	1.21	-3.01	3.25	1.02	0.80	1.30	68.1	34.6	5.1	0.26	0.84	0.40
2	1.24	-3.13	3.37	1.02	0.65	1.21	68.3	28.7	-18.1	0.21	0.82	0.36
3	1.31	-3.06	3.33	0.78	0.39	0.87	67.8	21.3	17.1	0.13	0.60	0.26
4	1.24	-3.05	3.30	1.13	0.83	1.40	67.9	33.1	2.0	0.27	0.91	0.43
5	1.30	-2.94	3.21	1.60	0.45	1.66	67.1	12.8	-4.0	0.15	1.23	0.52
6	1.22	-3.01	3.25	1.65	0.65	1.77	67.8	18.9	9.0	0.22	1.35	0.54
7	1.21	-3.01	3.24	1.36	0.36	1.41	68.0	14.9	-4.8	0.12	1.12	0.43
8	1.17	-2.90	3.13	1.09	1.05	1.51	68.0	41.0	-8.8	0.36	0.93	0.48
9	1.25	-2.99	3.24	1.26	0.52	1.36	67.2	19.1	-5.8	0.17	1.01	0.42
10	1.21	-2.96	3.19	0.81	0.70	1.07	67.8	36.7	21.3	0.24	0.67	0.34
11	1.18	-3.03	3.26	0.87	0.83	1.21	68.7	40.1	8.7	0.27	0.74	0.37
12	1.27	-3.03	3.29	1.15	0.88	1.45	67.3	34.4	-5.1	0.29	0.91	0.44
13	1.21	-2.99	3.23	1.07	0.79	1.33	67.9	33.1	-14.7	0.26	0.88	0.41
14	1.34	-3.02	3.31	1.10	0.55	1.23	67.0	22.6	-7.8	0.18	0.82	0.37
15	1.22	-3.01	3.25	1.58	0.58	1.68	68.0	18.1	6.7	0.19	1.30	0.52
\bar{x}	1.24	-3.01	3.26	1.17	0.67	1.36	67.8	27.3	0.0	0.22	0.94	0.42
s	0.05	0.05	0.06	0.27	0.20	0.24	0.5	9.5	11.2	0.07	0.22	0.08
min	1.17	-3.13	3.13	0.78	0.36	0.87	67.0	12.8	-18.1	0.12	0.60	0.26
max	1.34	-2.90	3.37	1.65	1.05	1.77	68.7	41.0	21.3	0.36	1.35	0.54

25.2 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 45^\circ$

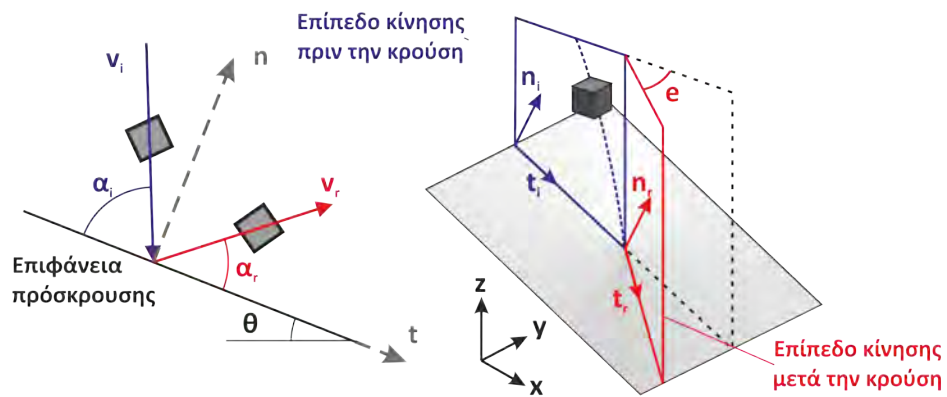
α/α	$v_{t,i}$ [ms^{-1}]	$v_{n,i}$ [ms^{-1}]	v_i [ms^{-1}]	$v_{t,r}$ [ms^{-1}]	$v_{n,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	e [$^\circ$]	η_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	2.48	-2.39	3.44	2.39	0.32	2.41	43.8	6.1	-4.7	0.13	0.96	0.70
2	2.45	-2.29	3.35	1.94	0.75	2.08	43.1	21.0	11.0	0.33	0.79	0.62
3	2.41	-2.37	3.38	1.79	0.50	1.86	44.4	13.5	-7.5	0.21	0.75	0.55
4	2.41	-2.45	3.44	2.10	0.92	2.30	45.4	21.8	12.1	0.38	0.87	0.67
5	2.34	-2.41	3.36	1.44	0.23	1.46	45.9	6.6	8.0	0.10	0.62	0.43
6	2.47	-2.34	3.40	2.07	0.94	2.27	43.5	24.5	-8.8	0.40	0.84	0.67
7	2.37	-2.42	3.38	1.80	0.47	1.86	44.9	12.7	-9.8	0.20	0.76	0.55
8	2.58	-2.47	3.57	1.96	0.52	2.03	43.7	13.0	14.5	0.21	0.76	0.57
9	2.42	-2.35	3.37	2.49	0.65	2.57	46.4	13.2	-12.6	0.28	1.03	0.76
10	2.44	-2.35	3.39	2.04	0.85	2.21	43.9	22.7	0.8	0.36	0.83	0.65
11	2.42	-2.42	3.42	2.32	0.53	2.38	45.0	11.2	13.7	0.22	0.96	0.70
12	2.58	-2.46	3.57	1.91	0.24	1.93	43.5	5.4	1.4	0.10	0.74	0.54
13	2.39	-2.39	3.38	1.74	1.25	2.14	45.0	35.7	12.5	0.52	0.73	0.63
\bar{x}	2.44	-2.40	3.42	2.00	0.63	2.12	44.5	16.0	2.3	0.26	0.82	0.62
s	0.07	0.05	0.07	0.29	0.30	0.30	1.0	8.8	10.1	0.13	0.11	0.09
min	2.34	-2.47	3.35	1.44	0.23	1.46	43.1	5.4	-12.6	0.10	0.62	0.43
max	2.58	-2.29	3.57	2.49	1.25	2.57	46.4	35.7	14.5	0.52	1.03	0.76

25.3 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 70^\circ$

α/α	$v_{t,i}$ [ms^{-1}]	$v_{n,i}$ [ms^{-1}]	v_i [ms^{-1}]	$v_{t,r}$ [ms^{-1}]	$v_{n,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	e [$^\circ$]	η_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	3.23	-1.03	3.39	2.88	0.86	3.01	17.7	15.8	5.2	0.84	0.89	0.89
2	3.06	-0.97	3.21	2.44	0.77	2.56	17.6	16.6	-12.0	0.80	0.80	0.80
3	3.22	-0.98	3.37	2.67	0.91	2.82	16.8	17.8	-11.2	0.93	0.83	0.84
4	3.35	-1.05	3.51	2.76	0.87	2.89	17.4	16.4	6.6	0.82	0.82	0.82
5	3.42	-1.10	3.59	3.27	0.28	3.28	17.8	4.3	-2.4	0.25	0.96	0.91
6	3.26	-1.07	3.43	3.07	0.56	3.12	18.2	9.6	1.1	0.52	0.94	0.91
7	3.34	-1.04	3.50	3.38	0.23	3.39	17.3	3.3	12.6	0.22	1.01	0.97
8	3.11	-1.02	3.27	2.94	0.77	3.04	18.2	13.9	-6.1	0.75	0.95	0.93
9	3.18	-0.98	3.33	2.89	0.49	2.93	17.0	8.9	-4.8	0.50	0.91	0.88
10	3.53	-1.14	3.71	3.35	0.65	3.41	17.8	10.3	8.8	0.57	0.95	0.92
11	3.34	-1.02	3.49	3.18	0.50	3.22	16.9	8.4	-6.7	0.50	0.95	0.92
12	3.50	-1.12	3.68	3.10	0.53	3.15	17.8	9.0	6.3	0.47	0.89	0.86
13	3.26	-1.05	3.42	3.19	0.60	3.25	17.8	10.0	-0.9	0.57	0.98	0.95
14	3.17	-1.00	3.33	2.68	0.78	2.79	17.4	15.3	13.4	0.78	0.84	0.84
\bar{x}	3.28	-1.04	3.45	2.99	0.63	3.06	17.5	11.4	0.7	0.61	0.91	0.89
s	0.14	0.05	0.15	0.28	0.21	0.24	0.4	4.6	8.3	0.22	0.06	0.05
min	3.06	-1.14	3.21	2.44	0.23	2.56	16.8	3.3	-12.0	0.22	0.80	0.80
max	3.53	-0.97	3.71	3.38	0.91	3.41	18.2	17.8	13.4	0.93	1.01	0.97

Παράρτημα 26

Ελεύθερη πτώση πολυεδρικών τεμαχών



26.1 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 20^\circ$

α/α	$v_{t,i}$ [ms^{-1}]	$v_{n,i}$ [ms^{-1}]	v_i [ms^{-1}]	$v_{t,r}$ [ms^{-1}]	$v_{n,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	e [$^\circ$]	η_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	1.24	-3.03	3.27	1.16	0.67	1.34	67.8	26.7	-20.6	0.22	0.93	0.41
2	1.29	-2.94	3.21	1.57	1.30	2.04	67.1	37.3	19.0	0.44	1.22	0.63
3	1.24	-3.05	3.29	1.65	0.45	1.71	67.9	15.3	9.6	0.15	1.34	0.52
4	1.24	-2.96	3.21	0.68	0.97	1.19	68.3	51.6	18.4	0.33	0.55	0.37
5	1.27	-3.07	3.32	1.13	0.73	1.35	68.5	29.2	0.1	0.24	0.89	0.40
6	1.25	-2.94	3.20	1.63	0.83	1.83	66.9	24.4	3.8	0.28	1.30	0.57
7	1.22	-2.97	3.21	0.93	1.30	1.60	67.6	51.9	-8.7	0.44	0.76	0.50
8	1.16	-2.95	3.17	1.23	1.04	1.61	68.6	37.5	-8.0	0.35	1.06	0.51
9	1.21	-2.99	3.22	1.00	1.01	1.42	67.9	42.0	-19.9	0.34	0.83	0.44
10	1.27	-3.05	3.30	0.91	1.08	1.41	67.3	47.1	-22.8	0.36	0.72	0.43
11	1.21	-2.97	3.21	1.20	1.16	1.67	67.7	41.5	-14.9	0.39	0.99	0.52
12	1.19	-2.97	3.20	0.79	1.03	1.30	68.2	49.4	16.2	0.35	0.67	0.41
13	1.24	-3.01	3.26	1.26	0.89	1.55	68.6	32.6	24.2	0.30	1.02	0.47
14	1.28	-3.00	3.26	1.52	0.95	1.79	67.7	29.5	2.7	0.32	1.18	0.55
\bar{x}	1.24	-2.99	3.24	1.19	0.96	1.56	67.9	36.9	-0.1	0.32	0.96	0.48
s	0.04	0.04	0.05	0.31	0.23	0.24	0.5	11.1	16.1	0.08	0.24	0.08
min	1.16	-3.07	3.17	0.68	0.45	1.19	66.9	15.3	-22.8	0.15	0.55	0.37
max	1.29	-2.94	3.32	1.65	1.30	2.04	68.6	51.9	24.2	0.44	1.34	0.63

26.2 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 45^\circ$

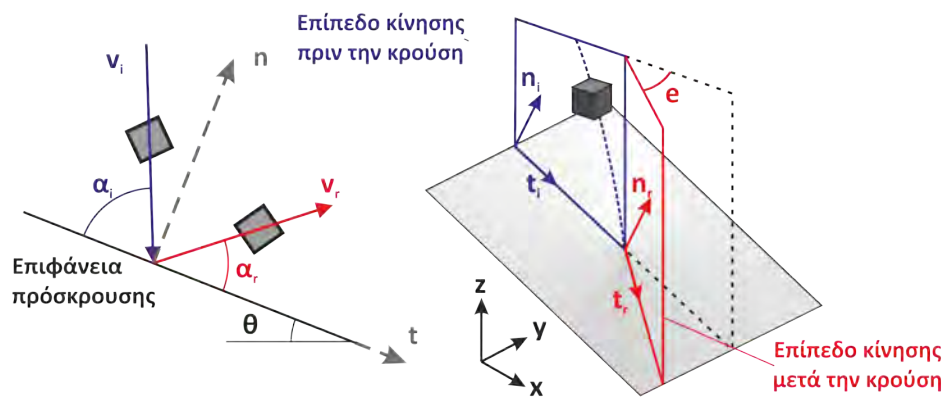
α/α	$v_{t,i}$ [ms^{-1}]	$v_{n,i}$ [ms^{-1}]	v_i [ms^{-1}]	$v_{t,r}$ [ms^{-1}]	$v_{n,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	e [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	2.41	-2.34	3.36	2.08	0.70	2.19	46.0	16.7	-2.8	0.30	0.86	0.65
2	2.48	-2.37	3.43	2.10	0.65	2.20	43.5	15.4	3.8	0.27	0.85	0.64
3	2.49	-2.40	3.46	1.89	1.00	2.14	43.8	25.7	-5.1	0.42	0.76	0.62
4	2.43	-2.39	3.41	1.17	1.53	1.93	46.5	50.1	4.0	0.64	0.48	0.57
5	2.44	-2.40	3.42	2.47	0.71	2.57	44.5	14.4	9.2	0.29	1.01	0.75
6	2.42	-2.43	3.43	2.02	0.94	2.23	45.0	23.1	-2.0	0.39	0.83	0.65
7	2.47	-2.40	3.44	1.99	0.68	2.11	44.0	17.0	4.8	0.29	0.81	0.61
8	2.50	-2.41	3.47	1.83	0.73	1.97	43.9	19.6	-2.2	0.30	0.73	0.57
9	2.43	-2.30	3.34	1.64	0.81	1.83	44.7	23.9	-12.8	0.35	0.68	0.55
10	2.35	-2.38	3.35	1.47	0.91	1.73	46.3	29.2	5.2	0.38	0.63	0.52
11	2.37	-2.34	3.33	1.09	1.54	1.88	46.5	52.4	5.1	0.66	0.46	0.57
12	2.45	-2.35	3.39	2.03	0.34	2.06	43.7	7.8	5.5	0.15	0.83	0.61
13	2.45	-2.38	3.42	1.72	1.31	2.16	46.1	35.2	-4.6	0.55	0.70	0.63
14	2.45	-2.40	3.43	1.42	1.15	1.83	46.2	36.5	7.0	0.48	0.58	0.53
\bar{x}	2.44	-2.38	3.41	1.78	0.93	2.06	45.0	26.2	1.1	0.39	0.73	0.60
s	0.04	0.04	0.04	0.39	0.35	0.22	1.2	13.3	6.1	0.15	0.15	0.06
min	2.35	-2.43	3.33	1.09	0.34	1.73	43.5	7.8	-12.8	0.15	0.46	0.52
max	2.50	-2.30	3.47	2.47	1.54	2.57	46.5	52.4	9.2	0.66	1.01	0.75

26.3 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 70^\circ$

α/α	$v_{t,i}$ [ms^{-1}]	$v_{n,i}$ [ms^{-1}]	v_i [ms^{-1}]	$v_{t,r}$ [ms^{-1}]	$v_{n,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	e [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	3.40	-1.10	3.57	3.47	0.30	3.48	17.9	4.4	2.8	0.27	1.02	0.98
2	3.03	-0.97	3.19	2.84	0.50	2.88	17.7	9.3	-4.8	0.51	0.93	0.90
3	3.31	-1.07	3.48	3.19	0.94	3.33	17.9	15.7	9.5	0.88	0.96	0.96
4	2.97	-0.90	3.10	2.68	0.76	2.79	16.8	15.0	-14.0	0.85	0.90	0.90
5	3.02	-0.83	3.14	3.02	0.20	3.03	17.3	3.2	-4.7	0.24	1.00	0.97
6	3.17	-0.94	3.31	2.84	0.72	2.93	17.1	13.5	-10.0	0.77	0.89	0.88
7	3.08	-0.90	3.21	2.66	0.36	2.69	17.1	6.9	2.9	0.40	0.86	0.84
8	3.39	-1.09	3.56	3.19	0.22	3.20	17.7	3.4	11.3	0.20	0.94	0.90
9	3.12	-1.00	3.27	2.57	0.65	2.65	17.7	13.2	-3.3	0.65	0.83	0.81
10	3.12	-0.98	3.27	2.94	0.63	3.01	16.8	11.2	5.2	0.64	0.94	0.92
11	3.20	-0.91	3.33	2.43	1.19	2.71	16.8	25.0	-1.0	1.30	0.76	0.81
12	3.25	-1.02	3.40	3.21	0.71	3.29	17.4	11.8	-7.8	0.70	0.99	0.97
13	3.22	-0.98	3.37	3.03	0.31	3.04	17.6	5.2	2.4	0.32	0.94	0.90
\bar{x}	3.18	-0.98	3.32	2.93	0.58	3.00	17.4	10.6	-0.9	0.59	0.92	0.90
s	0.14	0.08	0.15	0.30	0.30	0.26	0.4	6.2	7.5	0.32	0.07	0.06
min	2.97	-1.10	3.10	2.43	0.20	2.65	16.8	3.2	-14.0	0.20	0.76	0.81
max	3.40	-0.83	3.57	3.47	1.19	3.48	17.9	25.0	11.3	1.30	1.02	0.98

Παράρτημα 27

Ελεύθερη πτώση σφαιρικών τεμαχών



27.1 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 20^\circ$

α/α	$v_{t,i}$ [ms ⁻¹]	$v_{n,i}$ [ms ⁻¹]	v_i [ms ⁻¹]	$v_{t,r}$ [ms ⁻¹]	$v_{n,r}$ [ms ⁻¹]	v_r [ms ⁻¹]	α_i [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	e [$^\circ$]	η_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	1.18	-2.94	3.17	0.93	1.73	1.97	68.1	60.1	-5.6	0.59	0.79	0.62
2	1.21	-2.96	3.20	1.41	0.76	1.60	67.7	25.4	9.5	0.26	1.16	0.50
3	1.32	-2.99	3.26	1.27	0.59	1.40	67.5	21.5	-11.6	0.20	0.97	0.43
4	1.26	-3.11	3.35	1.31	1.80	2.23	67.8	52.3	-3.0	0.58	1.03	0.66
5	1.25	-2.90	3.16	0.64	1.39	1.53	67.6	62.9	7.2	0.48	0.51	0.48
6	1.29	-3.03	3.29	1.39	1.16	1.82	67.7	37.5	19.6	0.38	1.08	0.55
7	1.21	-3.02	3.26	1.91	0.44	1.96	68.1	10.4	18.5	0.14	1.58	0.60
8	1.17	-2.98	3.20	0.42	1.68	1.73	68.6	74.3	14.9	0.56	0.36	0.54
9	1.19	-2.74	2.99	0.56	1.39	1.50	67.4	65.9	-15.1	0.51	0.47	0.50
10	1.19	-2.94	3.17	1.05	1.76	2.05	68.0	57.6	-11.3	0.60	0.88	0.65
11	1.20	-2.99	3.22	1.29	1.75	2.17	68.1	51.7	-5.0	0.58	1.07	0.67
12	1.23	-3.01	3.25	1.08	1.49	1.84	67.7	51.9	-4.5	0.49	0.88	0.56
13	1.28	-3.05	3.30	0.61	1.72	1.83	68.2	68.7	-1.4	0.57	0.48	0.55
14	1.32	-2.87	3.16	0.70	1.76	1.90	67.5	66.6	-11.5	0.61	0.53	0.60
15	1.26	-2.88	3.14	0.98	1.54	1.82	67.2	55.6	15.0	0.53	0.78	0.58
\bar{x}	1.24	-2.96	3.21	1.04	1.40	1.82	67.8	50.8	1.0	0.47	0.84	0.57
s	0.05	0.09	0.09	0.41	0.46	0.24	0.4	18.8	12.0	0.15	0.33	0.07
min	1.17	-3.11	2.99	0.42	0.44	1.40	67.2	10.4	-15.1	0.14	0.36	0.43
max	1.32	-2.74	3.35	1.91	1.80	2.23	68.6	74.3	19.6	0.61	1.58	0.67

27.2 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 45^\circ$

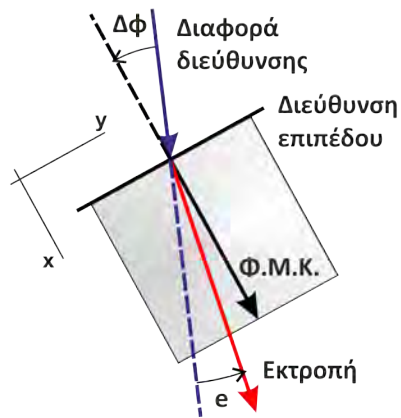
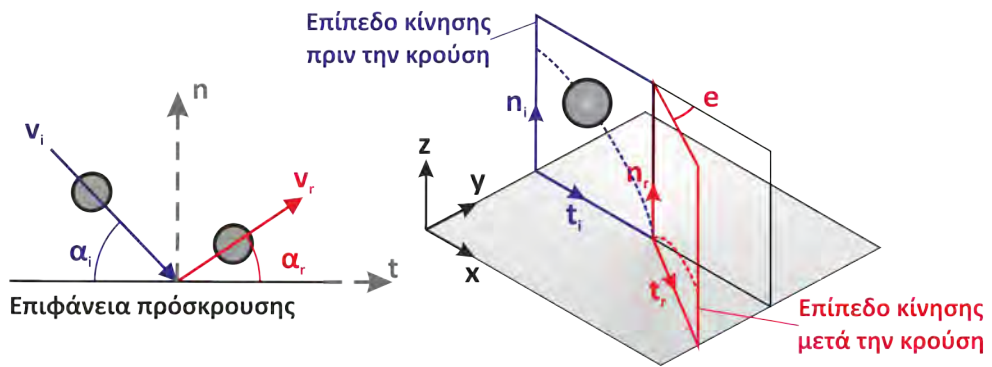
α/α	$v_{t,i}$ [ms^{-1}]	$v_{n,i}$ [ms^{-1}]	v_i [ms^{-1}]	$v_{t,r}$ [ms^{-1}]	$v_{n,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	e [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	2.47	-2.31	3.38	1.49	1.36	2.02	42.9	40.1	-5.5	0.59	0.60	0.60
2	2.40	-2.41	3.41	1.63	1.42	2.16	45.0	38.8	6.5	0.59	0.68	0.63
3	2.44	-2.44	3.45	1.54	1.31	2.02	45.0	38.1	0.2	0.54	0.63	0.59
4	2.40	-2.40	3.40	1.68	1.49	2.24	44.8	39.5	-3.9	0.62	0.70	0.66
5	2.54	-2.40	3.49	2.14	0.68	2.24	43.2	15.9	2.4	0.29	0.84	0.64
6	2.48	-2.46	3.49	1.59	1.61	2.26	44.7	43.3	-6.8	0.65	0.64	0.65
7	2.53	-2.45	3.52	2.35	0.35	2.38	43.9	7.0	-9.5	0.14	0.93	0.68
8	2.37	-2.39	3.36	1.03	1.93	2.19	46.2	49.9	0.5	0.81	0.43	0.65
9	2.50	-2.42	3.48	2.35	0.76	2.47	43.9	16.3	-0.9	0.31	0.94	0.71
10	2.60	-2.42	3.55	1.79	1.08	2.09	42.8	29.0	-1.3	0.45	0.69	0.59
11	2.47	-2.40	3.45	1.87	0.88	2.07	45.0	23.1	6.8	0.37	0.76	0.60
12	2.49	-2.44	3.49	1.53	1.52	2.16	44.3	42.7	-6.1	0.62	0.61	0.62
13	2.46	-2.40	3.44	1.47	1.51	2.11	46.2	43.5	2.2	0.63	0.60	0.61
14	2.47	-2.46	3.49	1.74	1.05	2.03	44.7	28.9	-4.1	0.43	0.70	0.58
\bar{x}	2.47	-2.41	3.46	1.73	1.21	2.17	44.5	32.6	-1.4	0.50	0.70	0.63
s	0.06	0.04	0.06	0.36	0.43	0.13	1.1	12.8	4.9	0.18	0.14	0.04
min	2.37	-2.46	3.36	1.03	0.35	2.02	42.8	7.0	-9.5	0.14	0.43	0.58
max	2.60	-2.31	3.55	2.35	1.93	2.47	46.2	49.9	6.8	0.81	0.94	0.71

27.3 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 70^\circ$

α/α	$v_{t,i}$ [ms^{-1}]	$v_{n,i}$ [ms^{-1}]	v_i [ms^{-1}]	$v_{t,r}$ [ms^{-1}]	$v_{n,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	e [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	3.21	-1.01	3.37	2.84	0.50	2.89	17.5	9.3	-0.4	0.50	0.89	0.86
2	3.17	-0.99	3.32	2.97	0.55	3.02	17.3	9.7	-3.6	0.55	0.94	0.91
3	3.22	-1.02	3.37	3.24	0.50	3.28	17.5	8.1	-3.9	0.49	1.01	0.97
4	3.29	-1.07	3.46	2.55	0.85	2.69	17.9	17.5	1.9	0.80	0.77	0.78
5	3.33	-1.06	3.49	3.13	0.86	3.25	17.7	14.6	1.3	0.81	0.94	0.93
6	3.27	-1.03	3.43	2.50	0.83	2.64	17.4	17.4	-2.1	0.81	0.77	0.77
7	3.20	-0.98	3.35	3.04	0.66	3.11	17.2	11.5	-1.1	0.68	0.95	0.93
8	3.24	-0.97	3.38	2.46	1.18	2.72	16.5	24.4	6.3	1.22	0.76	0.81
9	3.21	-0.98	3.35	2.84	0.76	2.94	17.0	14.1	-10.8	0.77	0.89	0.88
10	3.28	-1.04	3.44	3.00	0.84	3.12	17.5	14.8	9.9	0.81	0.91	0.91
11	3.26	-1.08	3.44	3.16	0.83	3.27	18.3	13.9	9.8	0.77	0.97	0.95
12	3.30	-1.08	3.47	3.14	0.43	3.16	18.1	7.1	8.5	0.39	0.95	0.91
13	3.06	-0.99	3.22	2.66	0.99	2.83	17.9	19.4	-8.2	1.00	0.87	0.88
14	3.15	-0.99	3.31	2.65	0.92	2.81	17.4	18.2	4.5	0.93	0.84	0.85
\bar{x}	3.23	-1.02	3.39	2.87	0.76	2.98	17.5	14.3	0.9	0.75	0.89	0.88
s	0.07	0.04	0.07	0.27	0.21	0.22	0.5	4.9	6.4	0.22	0.08	0.06
min	3.06	-1.08	3.22	2.46	0.43	2.64	16.5	7.1	-10.8	0.39	0.76	0.77
max	3.33	-0.97	3.49	3.24	1.18	3.28	18.3	24.4	9.9	1.22	1.01	0.97

Παράρτημα 28

Παραβολική ρίψη σφαιρικών τεμαχών

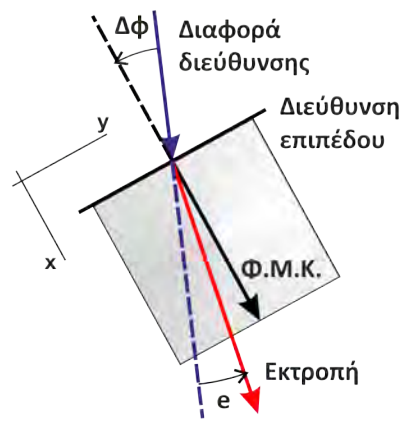
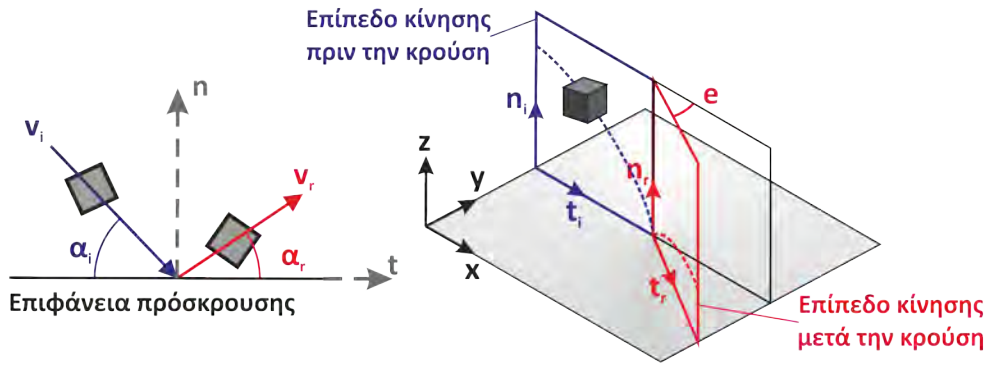


28.1 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 0^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	azi_i [$^\circ$]	dip_i [$^\circ$]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	azi_r [$^\circ$]	dip_r [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	$\Delta\phi$ [$^\circ$]	e [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]	E_{COR} [-]
1	3.78	90.0	52.7	52.7	3.10	90.5	42.8	42.8	0.0	0.5	0.70	0.99	0.82	0.67
2	3.87	90.0	56.0	56.0	2.90	89.9	36.2	36.2	0.0	-0.1	0.53	1.08	0.75	0.56
3	3.74	90.0	52.6	52.6	2.93	91.2	37.1	37.1	0.0	1.2	0.59	1.03	0.78	0.61
4	3.94	90.0	56.1	56.1	2.83	89.2	37.6	37.6	0.0	-0.8	0.53	1.02	0.72	0.51
5	3.64	90.0	51.4	51.4	2.73	86.0	38.1	38.1	0.0	-4.0	0.59	0.94	0.75	0.56
6	3.68	90.0	52.7	52.7	2.88	90.3	38.7	38.7	0.0	0.3	0.62	1.01	0.78	0.62
7	3.73	90.0	53.4	53.4	2.88	89.1	38.8	38.8	0.0	-0.9	0.60	1.01	0.77	0.60
8	3.78	90.0	53.9	53.9	3.04	95.0	33.0	33.0	0.0	5.0	0.54	1.14	0.80	0.65
9	3.84	90.0	56.5	56.5	2.97	98.8	35.6	35.6	0.0	8.8	0.54	1.16	0.77	0.60
10	3.62	90.0	51.8	51.8	2.84	91.5	33.5	33.5	0.0	1.5	0.55	1.06	0.79	0.62
11	3.76	90.0	53.6	53.6	2.90	88.7	39.9	39.9	0.0	-1.3	0.62	1.00	0.77	0.60
12	3.62	90.0	52.6	52.6	2.89	91.6	31.8	31.8	0.0	1.6	0.53	1.11	0.80	0.63
13	3.73	90.0	51.6	51.6	3.00	93.1	34.3	34.3	0.0	3.1	0.58	1.07	0.80	0.65
14	3.70	90.0	53.2	53.2	2.80	91.6	33.7	33.7	0.0	1.6	0.53	1.05	0.76	0.57
15	3.85	90.0	55.7	55.7	2.91	94.7	40.7	40.7	0.0	4.7	0.60	1.02	0.76	0.57
16	3.74	90.0	52.0	52.0	2.94	83.3	38.5	38.5	0.0	-6.7	0.62	1.00	0.79	0.62
17	3.69	90.0	51.3	51.3	2.94	87.6	38.1	38.1	0.0	-2.4	0.63	1.00	0.80	0.63
18	3.68	90.0	50.7	50.7	2.98	86.1	33.5	33.5	0.0	-3.9	0.58	1.07	0.81	0.65
19	3.76	90.0	54.3	54.3	2.95	93.1	35.0	35.0	0.0	3.1	0.55	1.10	0.79	0.62
20	3.67	90.0	52.8	52.8	2.81	87.7	34.6	34.6	0.0	-2.3	0.55	1.05	0.77	0.59
21	3.73	90.0	53.3	53.3	2.90	89.1	37.6	37.6	0.0	-0.9	0.59	1.03	0.78	0.60
22	3.70	90.0	53.2	53.2	2.90	86.3	37.9	37.9	0.0	-3.7	0.60	1.03	0.78	0.61
23	3.82	90.0	53.4	53.4	2.96	92.2	38.6	38.6	0.0	2.2	0.60	1.01	0.77	0.60
24	3.65	90.0	51.8	51.8	3.06	88.9	40.7	40.7	0.0	-1.1	0.70	1.03	0.84	0.71
\bar{x}	3.74	90.0	53.2	53.2	2.92	90.2	36.9	36.9	0.0	0.2	0.59	1.04	0.78	0.61
s	0.08	0.0	1.5	1.5	0.08	3.3	2.8	2.8	0.0	3.3	0.05	0.05	0.02	0.04
min	3.62	90.0	50.7	50.7	2.73	83.3	31.8	31.8	0.0	-6.7	0.53	0.94	0.72	0.51
max	3.94	90.0	56.5	56.5	3.10	98.8	42.8	42.8	0.0	8.8	0.70	1.16	0.84	0.71

Παράρτημα 29

Παραβολική ρίψη κυβικών τεμαχών



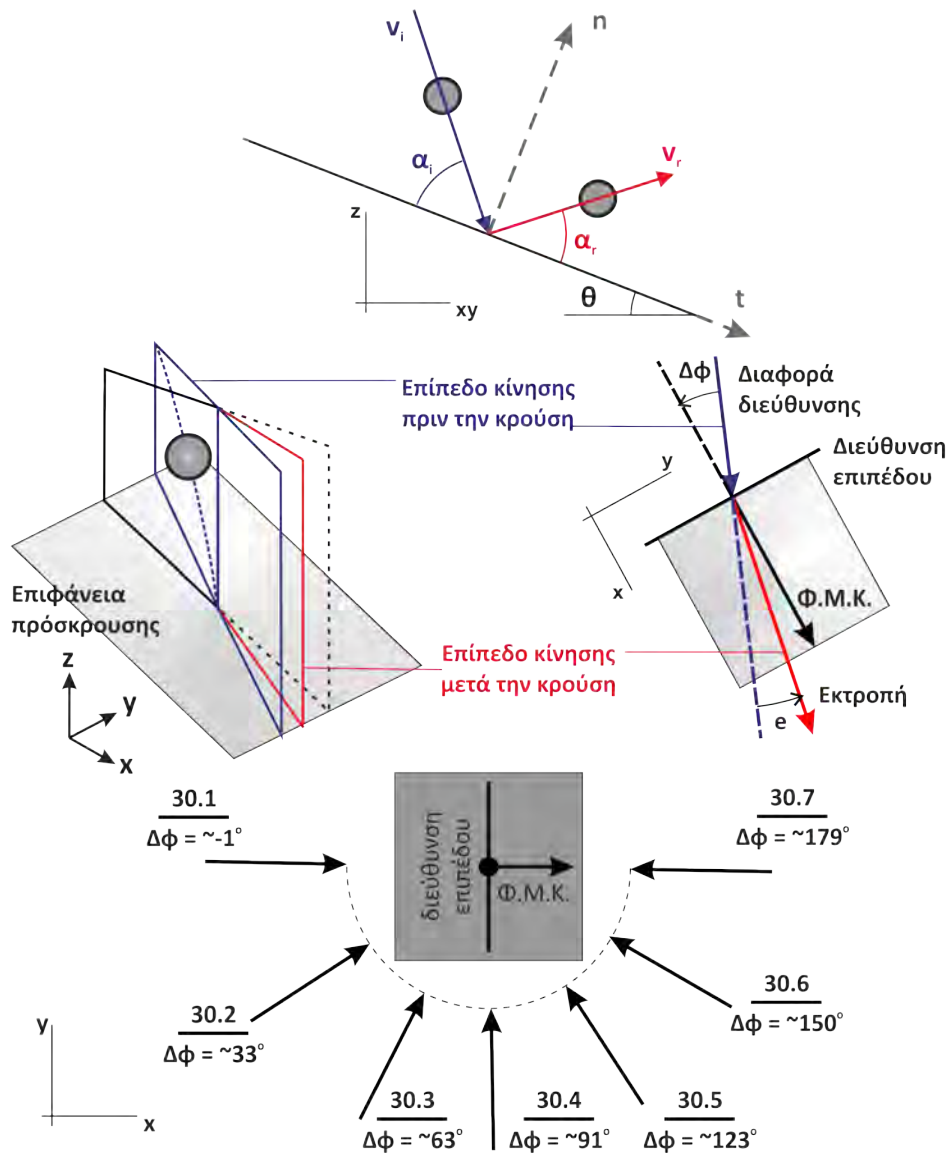
29.1 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 0^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	ω_i [rs^{-1}]	azi_i [$^\circ$]	dip_i [$^\circ$]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	ω_r [rs^{-1}]	azi_r [$^\circ$]	dip_r [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	$\Delta\phi$ [$^\circ$]	e [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]	E_{COR} [-]	TE_{COR} [-]
1	3.57	15.4	89.9	57.8	57.8	1.68	2.5	98.2	21.8	21.8	0.1	-8.3	0.17	0.84	0.47	0.22	0.27
2	3.44	9.4	88.4	54.9	54.9	1.75	1.5	107.3	21.6	21.6	1.6	-18.9	0.18	0.85	0.51	0.26	0.34
3	3.55	7.4	89.6	55.9	55.9	1.72	1.2	108.0	17.3	17.3	0.4	-18.4	0.14	0.84	0.48	0.23	0.32
4	3.54	8.8	89.9	60.6	60.6	1.22	1.4	98.6	27.1	27.1	0.1	-8.8	0.16	0.64	0.34	0.12	0.14
5	3.30	10.3	89.8	56.8	56.8	1.49	1.6	111.3	33.2	33.2	0.2	-21.5	0.25	0.73	0.45	0.20	0.24
6	3.65	6.1	89.7	57.7	57.7	1.98	1.0	80.5	13.3	13.3	0.3	9.2	0.12	0.99	0.54	0.29	0.29
7	3.48	7.2	89.6	67.8	67.8	1.72	1.2	101.5	25.8	25.8	0.4	-11.9	0.22	1.19	0.49	0.24	0.25
8	3.08	44.6	92.8	60.1	60.1	1.51	7.1	72.3	42.7	42.7	-2.8	20.4	0.34	0.79	0.49	0.24	0.25
9	3.39	6.5	91.1	58.1	58.1	1.29	1.0	74.9	42.1	42.1	-1.1	16.2	0.27	0.57	0.38	0.14	0.15
10	3.45	20.1	89.4	63.9	63.9	1.43	3.2	84.6	21.7	21.7	0.6	4.8	0.16	0.89	0.41	0.17	0.17
11	3.21	23.0	91.3	58.1	58.1	1.13	3.7	97.7	16.4	16.4	-1.3	-6.4	0.09	0.65	0.35	0.12	0.14
12	3.36	25.1	89.7	70.9	70.9	1.49	4.0	77.9	33.3	33.3	0.3	11.8	0.26	1.12	0.44	0.20	0.25
13	2.91	9.5	91.5	57.4	57.4	0.82	1.5	49.3	33.9	33.9	-1.5	42.2	0.16	0.46	0.28	0.08	0.13
14	3.56	9.5	90.3	57.3	57.3	1.67	1.5	100.7	29.0	29.0	-0.3	-10.4	0.24	0.78	0.47	0.22	0.28
15	3.59	8.1	88.7	57.4	57.4	1.96	1.3	69.3	27.6	27.6	1.3	19.4	0.27	0.92	0.55	0.30	0.32
16	3.40	26.2	90.0	58.2	58.2	1.61	4.2	100.7	6.2	6.2	0.0	-10.7	0.03	0.90	0.47	0.22	0.36
17	3.57	3.8	91.0	55.8	55.8	1.91	0.6	88.6	27.9	27.9	-1.0	2.4	0.26	0.87	0.54	0.29	0.32
18	3.63	14.3	88.7	63.6	63.6	1.94	2.3	104.0	42.7	42.7	1.3	-15.2	0.40	0.89	0.53	0.28	0.32
19	3.24	9.1	92.8	59.2	59.2	1.46	1.4	103.4	30.8	30.8	-2.8	-10.5	0.23	0.79	0.45	0.20	0.21
20	3.51	45.9	89.1	62.2	62.2	0.79	7.3	75.3	20.1	20.1	0.9	13.8	0.08	0.46	0.22	0.05	0.05
21	3.25	6.5	90.6	58.2	58.2	0.63	1.0	86.7	18.4	18.4	-0.6	3.9	0.06	0.36	0.19	0.04	0.08
22	3.48	5.5	89.7	65.8	65.8	1.66	0.9	101.0	29.1	29.1	0.3	-11.2	0.24	1.04	0.48	0.23	0.32
23	3.08	6.9	90.3	61.0	61.0	0.64	1.1	116.7	9.4	9.4	-0.3	-26.4	0.02	0.43	0.21	0.04	0.08
24	3.18	0.7	90.7	66.5	66.5	1.35	0.1	112.7	18.9	18.9	-0.7	-22.0	0.13	1.02	0.42	0.18	0.27
25	3.07	3.6	90.2	69.8	69.8	1.45	0.6	79.7	34.2	34.2	-0.2	10.5	0.27	1.16	0.47	0.22	0.24
26	3.03	18.1	88.0	56.8	56.8	0.96	2.9	79.7	47.7	47.7	2.0	8.3	0.24	0.45	0.32	0.10	0.16
27	3.59	8.1	89.2	58.3	58.3	1.75	1.3	98.5	29.8	29.8	0.8	-9.3	0.25	0.83	0.49	0.24	0.26
28	3.52	7.1	90.2	56.8	56.8	1.50	1.1	85.8	40.7	40.7	-0.2	4.4	0.30	0.63	0.42	0.18	0.20
29	3.47	6.3	88.3	54.5	54.5	1.72	1.0	89.9	35.2	35.2	1.7	-1.6	0.31	0.74	0.50	0.25	0.28
30	3.58	7.6	91.6	60.6	60.6	1.75	1.2	74.7	26.8	26.8	-1.6	16.9	0.24	0.90	0.49	0.24	0.30

α/α	v_i [ms^{-1}]	ω_i [rs^{-1}]	azi_i [$^\circ$]	dip_i [$^\circ$]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	ω_r [rs^{-1}]	azi_r [$^\circ$]	dip_r [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	$\Delta\phi$ [$^\circ$]	e [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]	E_{COR} [-]	TE_{COR} [-]
31	3.37	4.7	90.9	55.5	55.5	1.64	0.8	93.9	27.7	27.7	-0.9	-2.9	0.23	0.80	0.49	0.24	0.26
32	3.44	22.9	86.4	57.7	57.7	1.72	3.6	77.2	11.3	11.3	3.6	9.1	0.09	0.92	0.50	0.25	0.33
33	3.35	11.0	89.5	57.9	57.9	1.84	1.7	123.7	41.6	41.6	0.5	-34.2	0.39	0.82	0.55	0.30	0.35
34	3.46	18.8	86.6	57.7	57.7	1.23	3.0	79.0	15.4	15.4	3.4	7.5	0.09	0.65	0.36	0.13	0.14
35	3.57	9.2	90.1	55.4	55.4	2.08	1.5	88.3	27.1	27.1	-0.1	1.8	0.28	0.94	0.58	0.34	0.42
36	3.67	5.3	89.6	58.8	58.8	2.09	0.8	87.7	35.7	35.7	0.4	1.9	0.36	0.92	0.57	0.32	0.37
37	3.39	26.5	90.9	55.6	55.6	2.02	4.2	89.7	36.2	36.2	-0.9	1.2	0.37	0.90	0.59	0.35	0.44
38	3.68	5.9	89.3	57.6	57.6	1.55	0.9	90.4	6.1	6.1	0.7	-1.2	0.03	0.78	0.42	0.18	0.21
39	3.72	3.8	90.5	55.6	55.6	1.95	0.6	95.8	29.7	29.7	-0.5	-5.3	0.27	0.84	0.52	0.28	0.30
40	3.78	17.8	89.7	57.5	57.5	1.66	2.8	87.3	17.0	17.0	0.3	2.4	0.13	0.79	0.44	0.19	0.25
41	3.59	7.1	91.5	55.0	55.0	1.56	1.1	76.0	23.5	23.5	-1.5	15.5	0.18	0.71	0.43	0.19	0.20
42	3.73	4.8	89.2	57.3	57.3	1.84	0.8	69.0	24.0	24.0	0.8	20.2	0.22	0.85	0.49	0.24	0.27
43	3.50	3.6	89.8	63.7	63.7	1.77	0.6	89.9	21.0	21.0	0.2	-0.1	0.18	1.08	0.51	0.26	0.30
44	3.15	7.6	92.2	59.2	59.2	0.89	1.2	74.8	12.4	12.4	-2.2	17.4	0.05	0.55	0.28	0.08	0.10
45	3.61	4.3	91.8	56.6	56.6	1.43	0.7	73.5	19.1	19.1	-1.8	18.3	0.13	0.69	0.40	0.16	0.21
46	3.61	15.5	90.0	59.2	59.2	1.80	2.5	108.0	20.0	20.0	0.0	-18.0	0.17	0.93	0.50	0.25	0.29
\bar{x}	3.44	12.0	90.0	59.2	59.2	1.54	1.9	89.9	25.9	25.9	0.0	0.1	0.20	0.80	0.45	0.21	0.25
s	0.20	9.7	1.3	3.9	3.9	0.37	1.5	14.7	10.1	10.1	1.3	14.9	0.10	0.19	0.10	0.08	0.09
min	2.91	0.7	86.4	54.5	54.5	0.63	0.1	49.3	6.1	6.1	-2.8	-34.2	0.02	0.36	0.19	0.04	0.05
max	3.78	45.9	92.8	70.9	70.9	2.09	7.3	123.7	47.7	47.7	3.6	42.2	0.40	1.19	0.59	0.35	0.44

Παράρτημα 30

Παραβολική ρίψη σφαιρικών τεμαχίων σε επιφάνεια με κλίση $\theta = 13^\circ$



30.1 Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = -1^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	azi_i [$^\circ$]	dip_i [$^\circ$]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	azi_r [$^\circ$]	dip_r [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	$\Delta\phi$ [$^\circ$]	e [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]	E_{COR} [-]
1	3.67	91.1	46.9	34.0	2.91	92.3	21.5	34.4	-1.1	1.2	0.80	0.79	0.79	0.63
2	3.80	91.7	50.5	37.5	2.85	93.4	22.5	35.4	-1.7	1.6	0.71	0.77	0.75	0.56
3	3.60	90.4	45.8	32.8	2.83	91.1	21.7	34.7	-0.4	0.8	0.83	0.77	0.79	0.62
4	3.70	89.5	45.9	32.9	2.96	85.8	16.6	29.6	0.5	-3.6	0.73	0.83	0.80	0.64
5	3.64	92.7	46.8	33.8	2.88	92.8	20.1	33.1	-2.7	0.0	0.78	0.80	0.79	0.63
6	3.59	92.7	45.8	32.8	2.89	96.2	15.9	28.8	-2.7	3.5	0.72	0.84	0.80	0.64
7	3.56	90.6	46.3	33.3	2.95	88.0	21.4	34.4	-0.6	-2.6	0.85	0.82	0.83	0.69
8	3.61	92.4	45.9	32.9	2.92	91.6	17.4	30.3	-2.4	-0.8	0.75	0.83	0.81	0.65
9	3.63	92.5	46.0	33.1	3.05	90.4	20.7	33.7	-2.5	-2.1	0.85	0.84	0.84	0.71
10	3.60	90.6	45.1	32.2	2.90	91.4	22.3	35.2	-0.6	0.8	0.87	0.78	0.81	0.65
11	3.66	88.7	45.3	32.3	2.87	90.7	15.1	28.1	1.3	2.1	0.69	0.82	0.78	0.61
12	3.69	90.0	47.1	34.2	2.87	93.2	22.1	35.1	0.0	3.1	0.80	0.77	0.78	0.60
13	3.70	88.5	46.2	33.2	2.96	84.4	21.8	34.7	1.5	-4.0	0.83	0.78	0.80	0.64
14	3.59	90.8	44.9	32.0	2.87	93.2	17.7	30.6	-0.8	2.4	0.77	0.81	0.80	0.64
15	3.64	91.4	47.4	34.5	2.93	91.1	23.8	36.8	-1.4	-0.2	0.85	0.78	0.81	0.65
16	3.67	92.0	47.1	34.1	2.92	93.8	20.0	32.9	-2.0	1.7	0.77	0.81	0.80	0.63
17	3.61	90.5	46.3	33.3	2.75	86.0	14.5	27.4	-0.5	-4.5	0.64	0.81	0.76	0.58
18	3.62	92.8	46.3	33.3	3.00	91.4	25.8	38.7	-2.8	-1.4	0.94	0.77	0.83	0.68
19	3.55	91.0	45.4	32.4	2.93	87.1	21.6	34.5	-1.0	-3.9	0.87	0.80	0.82	0.68
20	3.54	93.0	46.2	33.2	2.97	95.3	23.2	36.1	-3.0	2.3	0.90	0.81	0.84	0.70
21	3.68	90.6	46.3	33.3	3.04	87.6	23.0	35.9	-0.6	-2.9	0.89	0.80	0.83	0.69
22	3.52	95.1	46.1	33.1	2.96	95.9	21.2	34.1	-5.1	0.8	0.86	0.83	0.84	0.71
23	3.68	91.5	47.3	34.3	3.06	86.8	25.6	38.6	-1.5	-4.7	0.92	0.79	0.83	0.69
24	3.64	90.5	45.9	32.9	3.00	94.3	22.3	35.2	-0.5	3.8	0.87	0.80	0.82	0.68
\bar{x}	3.63	91.3	46.4	33.4	2.93	91.0	20.7	33.7	-1.3	-0.3	0.81	0.80	0.81	0.65
s	0.06	1.5	1.1	1.1	0.07	3.3	3.0	3.0	1.5	2.6	0.08	0.02	0.02	0.04
min	3.52	88.5	44.9	32.0	2.75	84.4	14.5	27.4	-5.1	-4.7	0.64	0.77	0.75	0.56
max	3.80	95.1	50.5	37.5	3.06	96.2	25.8	38.7	1.5	3.8	0.94	0.84	0.84	0.71

30.2 Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 33^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	azi_i [$^\circ$]	dip_i [$^\circ$]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	azi_r [$^\circ$]	dip_r [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	$\Delta\phi$ [$^\circ$]	e [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]	E_{COR} [-]
1	3.67	55.6	46.9	35.7	3.07	62.0	24.9	36.8	34.4	6.4	0.86	0.82	0.83	0.70
2	3.67	56.3	46.4	35.1	3.04	62.4	28.6	40.6	33.7	6.1	0.93	0.77	0.83	0.68
3	3.73	55.6	46.7	35.5	3.09	61.4	24.7	36.5	34.4	5.7	0.85	0.82	0.83	0.69
4	3.68	55.7	47.7	36.6	3.04	58.1	21.5	32.9	34.3	2.3	0.75	0.86	0.83	0.68
5	3.65	57.4	46.5	35.1	3.01	59.8	21.9	33.6	32.6	2.4	0.79	0.84	0.83	0.68
6	3.63	56.7	46.0	34.7	3.02	60.4	20.7	32.5	33.3	3.7	0.78	0.85	0.83	0.69
7	3.64	56.5	45.9	34.6	3.05	59.8	24.5	36.2	33.5	3.3	0.87	0.82	0.84	0.70
8	3.62	57.7	46.7	35.3	3.10	60.0	21.7	33.4	32.3	2.3	0.82	0.88	0.86	0.73
9	3.63	56.1	47.8	36.6	3.00	58.9	22.0	33.6	33.9	2.8	0.77	0.86	0.83	0.69
10	3.60	59.0	47.8	36.3	3.01	59.2	19.7	31.3	31.0	0.2	0.73	0.89	0.84	0.70
11	3.60	55.7	45.6	34.4	3.01	61.4	21.9	33.7	34.3	5.7	0.82	0.84	0.83	0.70
12	3.64	57.6	46.7	35.3	3.02	58.3	21.9	33.4	32.4	0.8	0.79	0.85	0.83	0.69
13	3.66	54.8	45.9	34.9	3.02	60.3	19.0	30.7	35.2	5.5	0.74	0.87	0.83	0.68
14	3.67	54.5	43.5	32.5	3.06	59.0	18.8	30.3	35.5	4.4	0.78	0.85	0.83	0.70
15	3.66	56.8	46.1	34.8	3.12	60.6	26.1	37.9	33.2	3.8	0.92	0.82	0.85	0.73
16	3.62	56.2	46.3	35.1	3.08	60.3	18.4	30.2	33.8	4.1	0.74	0.90	0.85	0.72
17	3.60	56.5	46.5	35.2	3.01	58.5	22.7	34.2	33.5	2.0	0.81	0.85	0.84	0.70
18	3.77	55.4	47.8	36.7	2.99	63.0	23.4	35.4	34.6	7.6	0.77	0.80	0.79	0.63
19	3.62	58.3	46.9	35.5	3.01	57.4	20.8	32.2	31.7	-0.9	0.76	0.86	0.83	0.69
20	3.60	56.6	46.1	34.9	3.07	60.4	22.5	34.2	33.4	3.9	0.84	0.86	0.85	0.73
21	3.69	56.6	47.2	35.9	3.01	61.9	19.1	31.0	33.4	5.3	0.72	0.87	0.82	0.67
22	3.81	56.1	47.3	36.1	3.08	59.7	23.8	35.4	33.9	3.6	0.80	0.82	0.81	0.66
23	3.60	59.3	47.5	35.9	3.04	63.9	24.4	36.5	30.7	4.7	0.85	0.84	0.84	0.71
24	3.65	56.8	47.2	35.9	3.07	57.1	22.7	34.0	33.2	0.3	0.80	0.86	0.84	0.71
\bar{x}	3.66	56.6	46.6	35.4	3.04	60.2	22.3	34.0	33.4	3.6	0.80	0.85	0.83	0.69
s	0.05	1.2	0.9	0.9	0.04	1.7	2.4	2.5	1.2	2.1	0.05	0.03	0.01	0.02
min	3.60	54.5	43.5	32.5	2.99	57.1	18.4	30.2	30.7	-0.9	0.72	0.77	0.79	0.63
max	3.81	59.3	47.8	36.7	3.12	63.9	28.6	40.6	35.5	7.6	0.93	0.90	0.86	0.73

30.3 Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 63^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	azi_i [$^\circ$]	dip_i [$^\circ$]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	azi_r [$^\circ$]	dip_r [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	$\Delta\phi$ [$^\circ$]	e [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]	E_{COR} [-]
1	3.78	26.2	45.1	39.5	2.93	29.6	27.3	33.6	63.8	3.4	0.67	0.84	0.77	0.60
2	3.72	27.4	45.1	39.2	2.90	27.3	21.0	26.8	62.6	-0.1	0.56	0.90	0.78	0.61
3	3.87	28.4	44.7	38.6	2.99	31.1	33.0	39.6	61.6	2.6	0.79	0.76	0.77	0.60
4	3.81	23.4	47.8	42.7	3.01	31.9	26.5	33.2	66.6	8.4	0.64	0.90	0.79	0.62
5	3.61	26.3	44.2	38.6	3.05	34.1	27.0	34.2	63.7	7.8	0.76	0.89	0.85	0.71
6	3.73	28.5	45.2	39.1	3.10	33.6	23.6	30.7	61.5	5.0	0.67	0.92	0.83	0.69
7	3.70	28.2	45.7	39.7	2.94	31.1	25.1	31.7	61.8	2.9	0.65	0.88	0.80	0.63
8	3.68	22.7	45.6	40.6	2.97	31.0	30.8	37.3	67.3	8.3	0.75	0.85	0.81	0.65
9	3.67	25.5	45.7	40.2	3.20	30.3	30.1	36.5	64.5	4.8	0.80	0.92	0.87	0.76
10	3.81	25.5	47.5	42.0	2.92	31.5	27.9	34.6	64.5	6.0	0.65	0.85	0.76	0.58
11	3.70	27.4	45.2	39.3	2.98	29.4	28.8	35.1	62.6	2.0	0.73	0.85	0.80	0.65
12	3.62	25.1	44.6	39.2	2.92	28.4	23.8	29.9	64.9	3.3	0.64	0.90	0.81	0.65
13	3.70	28.6	44.9	38.8	3.08	32.5	28.1	35.0	61.4	3.9	0.76	0.87	0.83	0.69
14	3.78	27.5	46.2	40.3	3.12	31.5	28.4	35.1	62.5	4.0	0.73	0.88	0.82	0.68
15	3.75	30.5	44.8	38.3	3.23	39.2	32.4	40.4	59.5	8.7	0.90	0.84	0.86	0.74
16	3.77	29.2	45.0	38.7	3.07	30.7	27.9	34.5	60.8	1.6	0.74	0.86	0.81	0.66
17	3.92	29.2	46.6	40.3	3.10	36.6	27.1	34.7	60.8	7.3	0.70	0.85	0.79	0.63
18	3.88	34.0	44.9	37.7	3.11	38.4	31.8	39.8	56.0	4.5	0.84	0.78	0.80	0.64
19	3.66	28.5	43.9	37.8	3.08	30.8	27.7	34.2	61.5	2.3	0.77	0.88	0.84	0.71
20	3.61	23.4	46.2	41.1	2.93	30.6	27.5	34.0	66.6	7.2	0.69	0.89	0.81	0.66
21	3.82	29.8	44.8	38.4	3.13	34.6	30.3	37.6	60.2	4.8	0.80	0.83	0.82	0.67
22	3.79	27.6	48.1	42.1	3.11	31.0	26.9	33.5	62.4	3.4	0.67	0.92	0.82	0.67
23	3.87	26.5	48.1	42.3	3.17	30.5	28.9	35.3	63.5	4.0	0.70	0.90	0.82	0.67
24	3.65	27.1	45.0	39.2	3.09	36.4	27.7	35.3	62.9	9.3	0.78	0.89	0.85	0.72
\bar{x}	3.75	27.4	45.6	39.7	3.05	32.2	27.9	34.7	62.6	4.8	0.73	0.87	0.81	0.66
s	0.09	2.4	1.2	1.4	0.09	2.9	2.7	3.0	2.4	2.5	0.07	0.04	0.03	0.04
min	3.61	22.7	43.9	37.7	2.90	27.3	21.0	26.8	56.0	-0.1	0.56	0.76	0.76	0.58
max	3.92	34.0	48.1	42.7	3.23	39.2	33.0	40.4	67.3	9.3	0.90	0.92	0.87	0.76

30.4 Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 91^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	azi_i [$^\circ$]	dip_i [$^\circ$]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	azi_r [$^\circ$]	dip_r [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	$\Delta\phi$ [$^\circ$]	e [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]	E_{COR} [-]
1	3.60	1.2	44.9	44.6	2.94	8.3	31.5	33.3	88.8	7.1	0.64	0.96	0.82	0.67
2	3.41	-1.7	41.1	41.5	3.08	10.3	32.0	34.3	91.7	12.0	0.77	1.00	0.90	0.82
3	3.75	-1.5	47.0	47.4	3.14	7.8	38.3	40.0	91.5	9.3	0.73	0.95	0.84	0.70
4	3.64	0.0	47.3	47.3	3.02	8.7	33.2	35.2	90.0	8.8	0.65	1.00	0.83	0.69
5	3.67	-1.0	47.3	47.5	3.12	10.2	34.9	37.2	91.0	11.3	0.70	1.00	0.85	0.72
6	3.78	-4.5	44.1	45.1	3.11	9.6	33.5	35.7	94.5	14.1	0.68	0.95	0.82	0.68
7	3.76	-1.3	47.4	47.7	3.11	10.2	34.2	36.5	91.3	11.5	0.67	0.99	0.83	0.69
8	3.74	-1.7	46.5	46.9	3.11	9.1	38.4	40.5	91.7	10.7	0.74	0.93	0.83	0.69
9	3.41	1.1	45.0	44.7	2.99	7.2	29.8	31.4	88.9	6.1	0.65	1.06	0.88	0.77
10	3.26	1.9	42.9	42.5	2.95	10.2	31.0	33.3	88.1	8.3	0.73	1.03	0.90	0.82
11	3.59	-0.3	45.8	45.8	2.98	9.6	29.5	31.7	90.3	9.9	0.61	1.01	0.83	0.69
12	3.82	-2.3	47.1	47.6	3.25	6.2	39.0	40.3	92.3	8.5	0.74	0.96	0.85	0.72
13	3.32	-0.2	45.9	46.0	2.98	9.8	37.5	39.7	90.2	10.0	0.78	0.91	0.90	0.81
14	3.76	-1.9	45.5	45.9	3.20	8.2	35.1	36.9	91.9	10.1	0.71	0.98	0.85	0.72
15	3.71	-0.8	45.4	45.6	3.17	7.1	39.1	40.7	90.8	7.9	0.78	0.93	0.85	0.73
16	3.81	-2.4	46.7	47.2	3.08	10.5	38.4	40.7	92.4	12.8	0.72	0.90	0.81	0.65
17	3.80	2.0	49.9	49.5	3.15	9.6	37.5	39.7	88.0	7.5	0.70	0.98	0.83	0.69
18	3.61	0.5	46.4	46.2	3.10	9.5	33.5	35.6	89.5	8.9	0.69	1.01	0.86	0.74
19	3.68	0.0	48.4	48.4	3.04	7.0	37.9	39.4	90.0	7.0	0.70	0.96	0.83	0.68
20	3.70	-1.6	45.1	45.5	2.98	5.9	36.5	37.8	91.6	7.5	0.69	0.91	0.81	0.65
21	3.74	-2.0	46.4	46.8	2.96	3.7	41.3	42.2	92.0	5.7	0.73	0.86	0.79	0.63
22	3.82	-2.6	47.1	47.7	3.02	4.3	34.2	35.2	92.6	6.9	0.62	0.96	0.79	0.62
23	3.61	0.7	46.8	46.7	3.15	9.3	39.4	41.5	89.3	8.6	0.79	0.95	0.87	0.76
24	3.73	-0.8	48.2	48.3	3.12	5.1	31.8	32.9	90.8	5.8	0.61	1.06	0.84	0.70
\bar{x}	3.65	-0.8	46.2	46.4	3.07	8.2	35.3	37.2	90.8	9.0	0.70	0.97	0.84	0.71
s	0.15	1.5	1.8	1.8	0.08	2.0	3.3	3.2	1.5	2.2	0.05	0.05	0.03	0.05
min	3.26	-4.5	41.1	41.5	2.94	3.7	29.5	31.4	88.0	5.7	0.61	0.86	0.79	0.62
max	3.82	2.0	49.9	49.5	3.25	10.5	41.3	42.2	94.5	14.1	0.79	1.06	0.90	0.82

30.5 Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 123^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	azi_i [$^\circ$]	dip_i [$^\circ$]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	azi_r [$^\circ$]	dip_r [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	$\Delta\phi$ [$^\circ$]	e [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]	E_{COR} [-]
1	3.79	-32.8	46.6	53.5	3.03	-28.4	35.3	29.2	122.8	4.4	0.48	1.17	0.80	0.64
2	4.08	-32.0	45.9	52.7	3.01	-17.1	43.0	39.2	122.0	14.9	0.59	0.94	0.74	0.54
3	3.70	-32.0	43.6	50.4	2.84	-23.1	40.3	35.3	122.0	8.9	0.58	0.98	0.77	0.59
4	3.70	-33.3	45.8	52.9	3.01	-24.3	46.0	40.8	123.3	9.0	0.67	1.02	0.81	0.66
5	3.45	-33.3	43.5	50.5	3.03	-17.8	42.7	38.8	123.3	15.5	0.71	1.08	0.88	0.77
6	3.76	-33.1	46.2	53.2	2.96	-24.6	43.9	38.6	123.1	8.5	0.61	1.03	0.79	0.62
7	3.56	-33.7	43.4	50.5	2.74	-28.0	36.9	30.9	123.7	5.7	0.51	1.04	0.77	0.59
8	3.72	-31.7	44.7	51.4	3.02	-18.8	46.1	42.0	121.7	12.8	0.69	0.97	0.81	0.66
9	3.90	-32.1	44.1	50.9	3.15	-16.6	46.4	42.8	122.1	15.4	0.71	0.94	0.81	0.65
10	3.65	-33.5	43.1	50.2	2.99	-25.6	46.4	40.8	123.5	7.9	0.70	0.97	0.82	0.67
11	3.51	-33.6	47.9	54.9	3.03	-25.6	45.9	40.4	123.6	8.0	0.68	1.14	0.86	0.74
12	3.70	-33.5	47.6	54.6	3.08	-25.5	45.7	40.2	123.5	8.0	0.66	1.10	0.83	0.69
13	3.71	-33.5	45.0	52.0	2.91	-18.4	41.0	37.0	123.5	15.1	0.60	1.02	0.79	0.62
14	3.73	-33.4	46.0	53.1	3.05	-23.5	46.6	41.5	123.4	9.9	0.68	1.02	0.82	0.67
15	3.75	-34.1	47.6	54.7	3.09	-22.7	46.4	41.4	124.1	11.4	0.67	1.07	0.82	0.68
16	3.49	-34.4	46.5	53.7	3.09	-29.4	46.0	39.7	124.4	4.9	0.70	1.15	0.89	0.78
17	3.71	-33.9	47.2	54.4	2.99	-23.8	47.6	42.4	123.9	10.1	0.67	1.02	0.81	0.65
18	3.57	-34.1	46.1	53.3	3.08	-22.1	45.8	41.0	124.1	12.1	0.71	1.09	0.86	0.75
19	3.42	-33.2	43.3	50.3	2.98	-26.3	42.8	37.1	123.2	6.9	0.68	1.09	0.87	0.76
20	3.58	-33.6	44.0	51.0	3.07	-22.1	40.1	35.3	123.6	11.5	0.63	1.11	0.86	0.73
21	3.61	-32.9	43.6	50.6	3.04	-23.1	43.0	38.0	122.9	9.8	0.67	1.05	0.84	0.71
22	3.74	-33.7	47.8	54.9	3.03	-25.1	45.6	40.2	123.7	8.6	0.64	1.08	0.81	0.66
23	3.72	-35.2	46.9	54.2	3.11	-25.7	44.8	39.2	125.2	9.5	0.65	1.11	0.84	0.70
24	3.40	-35.3	42.1	49.5	2.97	-27.2	46.2	40.4	125.3	8.1	0.74	1.03	0.87	0.76
\bar{x}	3.66	-33.4	45.4	52.4	3.01	-23.5	43.9	38.8	123.4	9.9	0.65	1.05	0.82	0.68
s	0.15	0.9	1.7	1.7	0.09	3.5	3.1	3.3	0.9	3.1	0.06	0.06	0.04	0.06
min	3.40	-35.3	42.1	49.5	2.74	-29.4	35.3	29.2	121.7	4.4	0.48	0.94	0.74	0.54
max	4.08	-31.7	47.9	54.9	3.15	-16.6	47.6	42.8	125.3	15.5	0.74	1.17	0.89	0.78

30.6 Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 150^\circ$

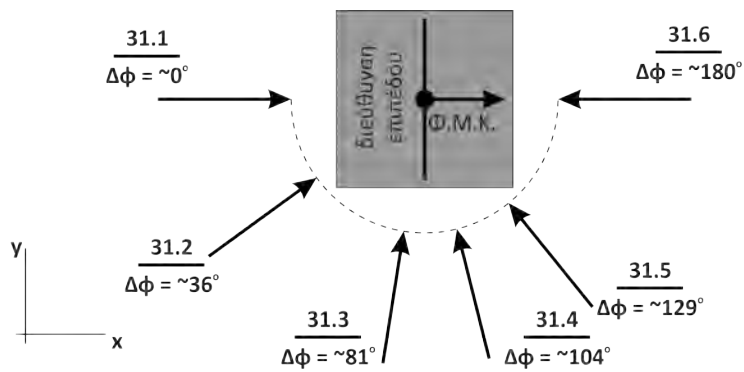
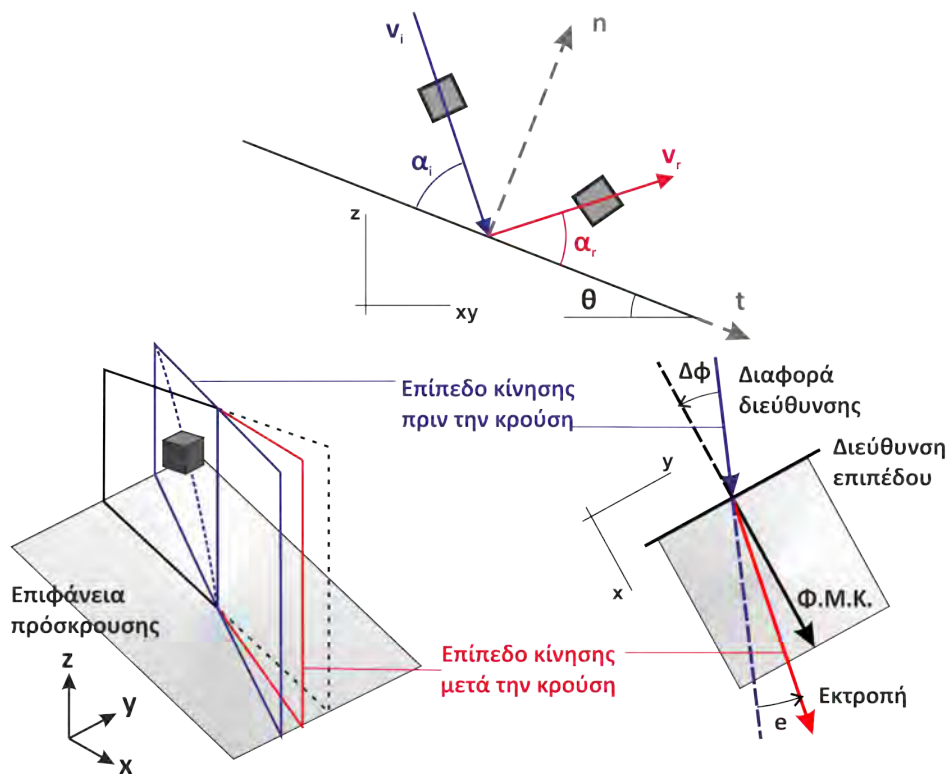
α/α	v_i [ms^{-1}]	azi_i [$^\circ$]	dip_i [$^\circ$]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	azi_r [$^\circ$]	dip_r [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	$\Delta\phi$ [$^\circ$]	e [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]	E_{COR} [-]
1	3.68	-59.4	48.8	59.6	2.72	-53.4	53.2	43.1	149.4	6.0	0.59	1.07	0.74	0.55
2	3.67	-57.6	45.5	56.1	2.78	-46.3	52.5	43.4	147.6	11.3	0.63	0.99	0.76	0.57
3	3.72	-59.5	46.1	56.9	2.99	-50.0	54.3	44.6	149.5	9.5	0.68	1.05	0.80	0.65
4	3.67	-60.4	47.1	58.0	2.86	-59.8	51.1	40.3	150.4	0.6	0.59	1.12	0.78	0.61
5	3.56	-60.1	45.8	56.6	2.88	-54.8	56.8	46.6	150.1	5.2	0.70	1.01	0.81	0.66
6	3.60	-58.0	44.4	55.0	2.76	-52.5	56.8	46.9	148.0	5.5	0.68	0.91	0.77	0.59
7	3.57	-62.4	47.6	58.7	2.94	-59.3	54.4	43.6	152.4	3.1	0.66	1.15	0.82	0.67
8	3.45	-59.5	43.0	53.8	2.97	-51.5	49.8	40.0	149.5	8.0	0.68	1.12	0.86	0.74
9	3.80	-59.1	48.6	59.3	2.88	-55.3	55.1	44.8	149.1	3.8	0.62	1.05	0.76	0.57
10	3.59	-59.1	48.2	59.0	2.86	-57.5	55.2	44.7	149.1	1.7	0.65	1.10	0.80	0.63
11	3.73	-60.6	47.6	58.5	2.81	-55.7	52.1	41.7	150.6	4.9	0.59	1.08	0.75	0.57
12	3.80	-57.2	47.6	58.1	2.85	-45.5	52.7	43.7	147.2	11.7	0.61	1.02	0.75	0.56
13	3.62	-61.8	47.9	58.9	2.87	-58.3	54.4	43.7	151.8	3.6	0.64	1.11	0.79	0.63
14	3.72	-59.7	46.9	57.7	2.82	-51.3	50.7	40.9	149.7	8.5	0.59	1.07	0.76	0.57
15	3.72	-60.4	48.1	59.0	2.90	-55.6	56.4	46.0	150.4	4.8	0.65	1.05	0.78	0.61
16	3.64	-59.4	45.6	56.4	2.84	-54.4	53.5	43.3	149.4	5.1	0.64	1.03	0.78	0.61
17	3.62	-60.9	47.6	58.6	2.91	-54.7	53.3	43.0	150.9	6.2	0.64	1.13	0.80	0.65
18	3.66	-59.6	47.0	57.8	2.94	-46.5	58.5	49.3	149.6	13.0	0.72	0.98	0.80	0.64
19	3.85	-55.9	47.9	58.3	2.80	-50.6	54.9	45.2	145.9	5.3	0.61	0.98	0.73	0.53
20	3.38	-61.2	44.0	55.0	2.85	-61.8	52.8	41.7	151.2	-0.6	0.69	1.10	0.84	0.71
21	3.66	-60.4	47.2	58.1	3.03	-58.0	55.3	44.7	150.4	2.4	0.68	1.11	0.83	0.68
22	3.57	-59.9	46.2	57.1	2.82	-53.8	51.9	41.7	149.9	6.1	0.63	1.08	0.79	0.62
23	3.60	-61.3	47.6	58.6	2.96	-53.5	56.1	46.0	151.3	7.9	0.69	1.10	0.82	0.68
24	3.82	-58.6	48.0	58.7	2.93	-49.6	57.3	47.7	148.6	9.0	0.66	0.99	0.77	0.59
\bar{x}	3.65	-59.7	46.8	57.7	2.87	-53.7	54.1	44.0	149.7	5.9	0.65	1.06	0.79	0.62
s	0.11	1.5	1.5	1.5	0.07	4.2	2.2	2.3	1.5	3.4	0.04	0.06	0.03	0.05
min	3.38	-62.4	43.0	53.8	2.72	-61.8	49.8	40.0	145.9	-0.6	0.59	0.91	0.73	0.53
max	3.85	-55.9	48.8	59.6	3.03	-45.5	58.5	49.3	152.4	13.0	0.72	1.15	0.86	0.74

30.7 Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 179^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	azi_i [$^\circ$]	dip_i [$^\circ$]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	azi_r [$^\circ$]	dip_r [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	$\Delta\phi$ [$^\circ$]	e [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]	E_{COR} [-]
1	3.70	-90.2	47.2	59.7	2.77	-86.5	60.7	48.2	180.2	3.7	0.65	0.99	0.75	0.56
2	3.71	-87.9	47.6	60.1	2.81	-82.1	61.9	49.5	177.9	5.8	0.66	0.99	0.76	0.58
3	3.85	-86.6	49.2	61.7	2.93	-83.0	63.7	51.2	176.6	3.7	0.67	1.00	0.76	0.58
4	3.80	-90.8	47.9	60.4	2.78	-89.1	59.4	46.9	180.8	1.8	0.62	1.01	0.73	0.54
5	3.71	-90.6	48.0	60.5	2.85	-91.2	60.5	48.0	180.6	-0.6	0.66	1.05	0.77	0.59
6	3.61	-87.9	45.6	58.1	2.76	-87.5	61.0	48.5	177.9	0.4	0.67	0.96	0.76	0.58
7	3.73	-87.7	47.2	59.7	2.86	-81.5	63.7	51.3	177.7	6.2	0.69	0.95	0.77	0.59
8	3.86	-88.8	49.4	61.9	2.86	-92.2	63.7	51.2	178.8	-3.4	0.66	0.99	0.74	0.55
9	3.77	-89.5	46.9	59.4	2.94	-86.3	61.8	49.3	179.5	3.2	0.69	1.00	0.78	0.61
10	3.65	-88.2	45.8	58.3	2.83	-88.5	62.3	49.8	178.2	-0.2	0.70	0.95	0.78	0.60
11	3.72	-89.6	46.5	59.0	2.88	-91.9	64.1	51.7	179.6	-2.3	0.71	0.93	0.77	0.60
12	3.77	-88.9	47.8	60.3	2.87	-83.7	62.4	50.0	178.9	5.2	0.67	0.99	0.76	0.58
13	3.64	-86.3	48.0	60.5	2.75	-84.8	60.2	47.7	176.3	1.5	0.64	1.03	0.76	0.57
14	3.74	-88.3	49.6	62.1	2.91	-95.6	63.5	51.1	178.3	-7.3	0.68	1.04	0.78	0.60
15	3.78	-89.9	47.8	60.3	2.55	-89.6	54.6	42.1	179.9	0.2	0.52	1.01	0.68	0.46
16	3.74	-92.7	45.7	58.2	2.68	-97.9	57.9	45.6	182.7	-5.2	0.60	0.95	0.72	0.51
17	3.61	-89.4	45.5	58.0	2.76	-91.1	59.8	47.3	179.4	-1.7	0.66	0.98	0.76	0.58
18	3.69	-90.5	45.5	58.0	2.82	-91.1	63.9	51.4	180.5	-0.7	0.71	0.90	0.77	0.59
19	3.87	-91.6	47.7	60.2	2.89	-90.4	64.2	51.7	181.6	1.2	0.68	0.93	0.75	0.56
20	3.73	-87.4	47.9	60.4	2.89	-91.7	64.8	52.3	177.4	-4.4	0.70	0.96	0.77	0.60
21	3.74	-90.2	47.4	59.9	2.76	-95.4	59.6	47.1	180.2	-5.2	0.62	1.00	0.74	0.54
22	3.83	-88.0	48.6	61.1	2.92	-86.6	60.4	47.9	178.0	1.4	0.65	1.06	0.76	0.58
23	3.59	-87.6	44.9	57.4	2.74	-87.9	55.9	43.4	177.6	-0.4	0.62	1.03	0.76	0.58
24	3.71	-88.3	46.9	59.4	2.92	-87.7	57.3	44.8	178.3	0.6	0.65	1.10	0.79	0.62
\bar{x}	3.73	-89.0	47.3	59.8	2.82	-88.9	61.1	48.7	179.0	0.2	0.66	0.99	0.76	0.57
s	0.08	1.5	1.3	1.3	0.09	4.2	2.7	2.7	1.5	3.5	0.04	0.05	0.02	0.03
min	3.59	-92.7	44.9	57.4	2.55	-97.9	54.6	42.1	176.3	-7.3	0.52	0.90	0.68	0.46
max	3.87	-86.3	49.6	62.1	2.94	-81.5	64.8	52.3	182.7	6.2	0.71	1.10	0.79	0.62

Παράρτημα 31

Παραβολική ρίψη κυβικών τεμαχών σε επιφάνεια με κλίση $\theta = 13.5^\circ$



31.1 Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 0^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	ω_i [rs^{-1}]	azi_i [$^\circ$]	dip_i [$^\circ$]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	ω_r [rs^{-1}]	azi_r [$^\circ$]	dip_r [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	$\Delta\phi$ [$^\circ$]	e [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]	E_{COR} [-]	TE_{COR} [-]
1	3.24	8.3	88.6	62.5	52.6	1.63	54.6	78.8	13.0	22.6	1.4	9.8	0.24	0.76	0.50	0.25	0.30
2	3.20	3.3	89.0	60.5	50.7	1.87	29.6	80.9	11.2	20.9	1.0	8.1	0.27	0.86	0.58	0.34	0.35
3	3.14	3.5	91.2	60.3	50.5	1.61	63.4	75.9	5.7	15.2	-1.2	15.2	0.18	0.78	0.51	0.26	0.33
4	3.22	3.8	89.5	59.8	50.0	1.81	62.9	89.1	-4.4	5.4	0.5	0.4	0.07	0.87	0.56	0.32	0.37
5	3.48	6.3	92.3	55.8	46.0	2.04	25.2	87.8	5.9	15.7	-2.3	4.5	0.22	0.81	0.59	0.34	0.35
6	3.40	37.4	87.3	60.8	51.0	1.94	72.6	83.1	13.6	23.3	2.7	4.2	0.29	0.83	0.57	0.32	0.39
7	3.28	5.7	90.6	58.8	49.0	2.04	76.3	89.4	20.5	30.3	-0.6	1.2	0.42	0.82	0.62	0.39	0.47
8	3.61	10.8	90.6	55.5	45.7	2.41	60.0	102.8	7.2	16.8	-0.6	-12.2	0.27	0.92	0.67	0.45	0.49
9	3.19	6.8	88.4	60.2	50.4	1.93	59.2	97.7	22.4	32.2	1.6	-9.3	0.42	0.80	0.60	0.37	0.42
10	3.75	4.0	91.3	55.4	45.6	2.28	86.7	99.8	-4.7	5.0	-1.3	-8.5	0.07	0.86	0.61	0.37	0.45
11	3.04	12.5	86.8	60.5	50.7	1.89	56.9	83.2	7.7	17.5	3.2	3.6	0.24	0.94	0.62	0.39	0.44
12	3.41	9.4	88.9	58.1	48.2	2.22	50.8	87.5	1.1	10.9	1.1	1.4	0.17	0.96	0.65	0.42	0.46
13	3.32	5.0	89.4	59.8	50.0	1.92	87.0	91.5	9.0	18.8	0.6	-2.1	0.24	0.85	0.58	0.34	0.44
14	3.44	36.3	90.4	53.8	44.0	2.12	5.4	94.0	14.8	24.6	-0.4	-3.6	0.37	0.78	0.62	0.38	0.38
15	3.27	5.4	90.3	58.1	48.3	1.78	34.1	84.9	11.3	21.0	-0.3	5.4	0.26	0.76	0.54	0.30	0.31
16	3.56	26.7	91.3	54.3	44.5	2.04	50.4	92.3	7.8	17.6	-1.3	-1.0	0.25	0.77	0.57	0.33	0.36
17	3.08	14.8	86.4	57.2	47.4	1.80	28.6	91.1	8.3	18.1	3.6	-4.8	0.25	0.82	0.58	0.34	0.35
18	3.68	1.9	92.5	55.4	45.6	2.13	24.2	99.3	-0.5	9.2	-2.5	-6.9	0.13	0.82	0.58	0.34	0.34
19	3.31	2.4	91.3	61.5	51.7	1.72	40.4	82.7	7.9	17.6	-1.3	8.6	0.20	0.80	0.52	0.27	0.29
20	3.61	3.3	92.2	55.3	45.5	1.72	53.6	82.0	-4.6	5.2	-2.2	10.1	0.06	0.68	0.48	0.23	0.26
21	3.33	5.4	91.3	57.6	47.8	2.25	73.0	96.5	16.7	26.5	-1.3	-5.3	0.41	0.90	0.68	0.46	0.53
22	3.27	4.0	89.5	58.5	48.7	1.98	63.1	93.8	-7.3	2.5	0.5	-4.4	0.04	0.92	0.60	0.37	0.42
23	3.32	7.3	89.6	59.2	49.4	2.03	34.5	85.3	9.7	19.5	0.4	4.3	0.27	0.89	0.61	0.38	0.39
24	3.38	28.0	85.4	59.6	49.8	2.06	79.4	100.6	10.8	20.4	4.6	-15.2	0.28	0.89	0.61	0.37	0.45
25	3.61	3.1	90.1	55.0	45.2	1.96	63.9	90.2	-11.0	1.2	-0.1	-0.2	0.02	0.77	0.54	0.29	0.34
26	3.67	8.0	91.9	55.9	46.1	2.19	66.0	89.4	17.4	27.2	-1.9	2.4	0.38	0.77	0.60	0.36	0.40
27	3.56	8.1	90.8	55.8	46.0	1.87	51.6	100.7	2.8	12.4	-0.8	-10.0	0.16	0.74	0.53	0.28	0.31
28	3.37	5.6	90.7	57.5	47.7	1.92	38.3	87.0	18.7	28.6	-0.7	3.7	0.37	0.74	0.57	0.33	0.35
29	3.68	1.4	89.3	55.4	45.6	2.61	93.8	87.5	5.5	15.3	0.7	1.8	0.26	0.98	0.71	0.50	0.60
30	3.50	7.9	89.9	55.8	46.0	2.12	35.4	91.5	18.2	28.0	0.1	-1.7	0.40	0.77	0.61	0.37	0.38
\bar{x}	3.40	9.6	89.9	57.8	48.0	2.00	54.0	89.9	7.8	17.7	0.1	0.0	0.24	0.83	0.59	0.35	0.39
s	0.19	9.5	1.7	2.4	2.4	0.22	20.9	6.9	8.4	8.2	1.7	7.0	0.11	0.07	0.05	0.06	0.07
min	3.04	1.4	85.4	53.8	44.0	1.61	5.4	75.9	-11.0	1.2	-2.5	-15.2	0.02	0.68	0.48	0.23	0.26
max	3.75	37.4	92.5	62.5	52.6	2.61	93.8	102.8	22.4	32.2	4.6	15.2	0.42	0.98	0.71	0.50	0.60

31.2 Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 36^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	ω_i [rs^{-1}]	azi_i [$^\circ$]	dip_i [$^\circ$]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	ω_r [rs^{-1}]	azi_r [$^\circ$]	dip_r [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	$\Delta\phi$ [$^\circ$]	e [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]	E_{COR} [-]	TE_{COR} [-]
1	3.54	7.9	55.2	56.7	48.6	2.34	31.5	66.5	14.5	23.5	34.8	11.3	0.35	0.92	0.66	0.44	0.45
2	3.43	8.4	55.8	57.9	49.8	2.04	58.4	58.2	20.1	28.4	34.2	2.4	0.37	0.81	0.59	0.35	0.40
3	3.30	4.9	54.9	61.6	53.6	1.86	31.8	72.3	6.5	15.8	35.1	17.4	0.19	0.91	0.56	0.32	0.33
4	3.82	5.9	52.3	54.2	46.4	2.23	53.9	67.4	16.7	25.8	37.7	15.1	0.35	0.76	0.58	0.34	0.37
5	3.55	5.3	55.9	59.3	51.1	2.05	37.3	71.4	15.6	24.8	34.1	15.5	0.31	0.84	0.58	0.34	0.35
6	3.57	5.3	54.2	58.4	50.4	2.12	70.8	58.8	18.3	26.7	35.8	4.5	0.35	0.83	0.59	0.35	0.41
7	3.66	15.7	53.0	56.1	48.3	2.10	41.0	64.5	22.5	31.3	37.0	11.4	0.40	0.74	0.57	0.33	0.35
8	3.67	3.8	53.3	56.9	49.0	2.37	73.7	72.4	12.4	21.7	36.7	19.0	0.32	0.92	0.65	0.42	0.48
9	3.54	41.4	54.2	64.3	56.3	1.59	48.8	73.2	-5.6	3.8	35.8	18.9	0.04	0.81	0.45	0.20	0.23
10	3.38	53.2	52.5	58.4	50.6	2.18	54.9	49.7	16.1	23.6	37.5	-2.7	0.33	0.93	0.64	0.41	0.44
11	3.64	2.8	54.7	57.1	49.1	2.01	50.1	68.9	9.3	18.4	35.3	14.2	0.23	0.80	0.55	0.30	0.33
12	3.20	46.3	54.1	50.6	42.7	2.11	91.7	69.9	-8.7	0.5	35.9	15.9	0.01	0.90	0.66	0.44	0.54
13	3.37	4.2	53.6	58.3	50.4	2.17	42.3	67.9	17.5	26.6	36.4	14.3	0.37	0.90	0.64	0.41	0.44
14	3.60	31.3	52.9	58.1	50.3	2.08	66.9	73.5	2.5	11.9	37.1	20.6	0.15	0.88	0.58	0.33	0.38
15	3.50	9.7	53.9	58.1	50.2	1.97	40.5	67.7	23.3	32.3	36.1	13.9	0.39	0.74	0.56	0.32	0.34
16	3.02	32.4	51.7	66.6	58.9	1.35	45.5	49.3	26.4	33.8	38.3	-2.4	0.29	0.72	0.44	0.20	0.23
17	3.47	4.8	54.1	55.3	47.3	2.34	38.9	69.3	5.0	14.2	35.9	15.2	0.22	0.96	0.67	0.45	0.47
18	3.18	1.1	53.8	62.4	54.5	1.69	46.4	73.6	6.3	15.7	36.2	19.9	0.18	0.88	0.53	0.28	0.32
19	3.61	5.9	54.1	55.2	47.3	2.57	34.6	72.1	12.9	22.2	35.9	18.0	0.37	0.97	0.71	0.51	0.52
20	3.34	6.4	55.9	60.0	51.9	1.74	51.0	56.6	18.0	26.2	34.1	0.7	0.29	0.76	0.52	0.27	0.31
21	3.41	12.8	49.4	57.1	49.6	1.97	54.0	61.2	10.4	19.0	40.6	11.8	0.25	0.84	0.58	0.33	0.37
22	3.37	4.3	54.3	61.8	53.9	1.71	51.9	53.3	5.6	13.5	35.7	-1.0	0.15	0.84	0.51	0.26	0.29
23	3.23	27.3	49.8	63.2	55.8	1.16	12.1	54.3	-0.6	7.4	40.2	4.5	0.06	0.63	0.36	0.13	0.13
24	3.28	6.5	52.9	61.2	53.4	1.97	45.1	68.7	18.8	27.9	37.1	15.8	0.35	0.89	0.60	0.36	0.39
25	3.61	4.0	54.2	57.2	49.2	2.40	89.4	73.5	8.3	17.7	35.8	19.3	0.27	0.97	0.66	0.44	0.53
26	3.68	11.7	54.4	57.1	49.1	1.95	91.1	50.3	15.8	23.4	35.6	-4.1	0.28	0.74	0.53	0.28	0.37
27	3.43	4.5	55.7	59.4	51.3	1.93	61.1	62.4	-1.9	6.8	34.3	6.7	0.08	0.89	0.56	0.32	0.36
28	3.64	4.1	52.9	56.2	48.4	1.90	45.3	68.2	-1.3	7.8	37.1	15.3	0.09	0.78	0.52	0.27	0.29
29	3.45	9.0	53.9	57.9	50.0	2.02	62.0	68.4	11.9	21.0	36.1	14.5	0.27	0.85	0.59	0.34	0.39
30	3.59	39.8	52.9	59.8	52.0	1.88	29.4	53.1	2.7	10.5	37.1	0.3	0.12	0.84	0.53	0.28	0.28
\bar{x}	3.47	14.0	53.7	58.5	50.6	1.99	51.7	64.6	10.6	19.4	36.3	10.9	0.25	0.84	0.57	0.33	0.37
s	0.18	14.6	1.5	3.1	3.2	0.30	18.2	7.9	8.8	8.6	1.5	7.7	0.11	0.08	0.07	0.08	0.09
min	3.02	1.1	49.4	50.6	42.7	1.16	12.1	49.3	-8.7	0.5	34.1	-4.1	0.01	0.63	0.36	0.13	0.13
max	3.82	53.2	55.9	66.6	58.9	2.57	91.7	73.6	26.4	33.8	40.6	20.6	0.40	0.97	0.71	0.51	0.54

31.3 Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 81^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	ω_i [rs^{-1}]	azi_i [$^\circ$]	dip_i [$^\circ$]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	ω_r [rs^{-1}]	azi_r [$^\circ$]	dip_r [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	$\Delta\phi$ [$^\circ$]	e [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]	E_{COR} [-]	TE_{COR} [-]
1	3.81	13.1	7.9	57.4	55.8	1.68	42.6	21.5	9.9	14.2	82.1	13.6	0.13	0.76	0.44	0.20	0.21
2	3.70	4.3	8.6	56.9	55.1	1.90	43.4	20.9	12.8	17.0	81.4	12.3	0.18	0.86	0.51	0.26	0.28
3	2.87	45.0	11.3	69.9	67.6	1.40	37.0	14.5	31.2	34.1	78.7	3.3	0.30	1.06	0.49	0.24	0.25
4	3.61	6.7	8.5	56.1	54.3	1.70	62.2	31.5	16.2	22.2	81.5	23.0	0.22	0.75	0.47	0.22	0.27
5	3.56	3.4	9.7	57.1	55.2	2.24	45.4	33.9	15.7	22.2	80.3	24.2	0.29	1.02	0.63	0.40	0.42
6	3.57	16.4	10.2	55.8	53.7	1.51	72.9	15.7	14.7	17.8	79.8	5.5	0.16	0.68	0.42	0.18	0.24
7	3.62	8.8	9.4	56.6	54.7	2.46	94.5	26.0	26.7	31.7	80.6	16.6	0.44	1.00	0.68	0.46	0.56
8	3.67	14.3	9.5	56.7	54.8	2.54	79.8	30.8	23.6	29.6	80.5	21.2	0.42	1.04	0.69	0.48	0.55
9	3.64	8.9	9.4	55.1	53.2	1.71	77.0	14.7	9.5	12.4	80.6	5.3	0.13	0.77	0.47	0.22	0.29
10	3.03	37.4	10.8	68.1	65.9	1.05	59.3	47.4	12.7	21.2	79.2	36.7	0.14	0.79	0.35	0.12	0.17
11	3.38	7.9	7.3	55.3	53.8	1.75	46.6	11.3	16.0	18.3	82.7	4.0	0.20	0.83	0.52	0.27	0.30
12	3.64	18.8	7.6	60.7	59.2	2.25	51.2	17.2	20.8	24.2	82.4	9.6	0.30	1.10	0.62	0.38	0.41
13	3.42	1.5	11.2	59.0	56.7	2.11	60.5	30.3	18.1	24.0	78.8	19.0	0.30	1.02	0.62	0.38	0.43
14	2.75	21.3	9.2	71.6	69.7	0.58	17.9	40.3	-12.7	5.2	80.8	31.1	0.02	0.61	0.21	0.04	0.05
15	3.46	42.5	10.0	55.5	53.5	1.99	60.0	42.0	20.4	28.2	80.0	32.1	0.34	0.85	0.57	0.33	0.37
16	3.51	6.3	8.6	56.9	55.2	2.45	96.7	27.0	20.0	25.2	81.4	18.4	0.36	1.11	0.70	0.49	0.60
17	3.33	66.6	10.4	59.3	57.2	2.16	82.9	31.8	11.0	17.1	79.6	21.4	0.23	1.14	0.65	0.42	0.48
18	3.24	46.1	8.1	55.2	53.5	2.57	101.7	35.1	8.6	15.3	81.9	27.0	0.26	1.29	0.79	0.63	0.76
19	3.41	19.6	9.7	56.7	54.7	2.17	19.7	23.5	11.5	16.2	80.3	13.8	0.22	1.06	0.64	0.41	0.41
20	3.51	11.1	7.4	58.1	56.6	2.36	21.3	37.4	7.5	14.5	82.6	30.0	0.20	1.18	0.67	0.45	0.46
21	3.42	14.6	10.4	56.6	54.5	1.96	44.6	33.7	13.8	20.2	79.6	23.3	0.24	0.92	0.57	0.33	0.35
22	3.05	11.2	13.8	65.6	62.8	1.79	98.1	42.2	-6.0	1.8	76.2	28.4	0.02	1.29	0.59	0.35	0.50
23	3.57	16.7	6.0	56.8	55.6	1.91	61.7	29.2	27.9	33.6	84.0	23.2	0.36	0.79	0.54	0.29	0.33
24	3.04	18.0	10.8	59.5	57.3	1.98	95.7	36.4	5.4	12.3	79.2	25.6	0.16	1.18	0.65	0.42	0.57
25	3.68	51.2	8.8	58.3	56.5	2.15	84.1	12.5	-8.1	5.6	81.2	3.7	0.07	1.05	0.58	0.34	0.41
26	3.21	3.7	8.1	54.4	52.7	2.25	69.7	32.1	12.6	18.8	81.9	24.0	0.28	1.10	0.70	0.49	0.56
27	3.49	28.1	5.9	52.0	50.8	1.48	19.7	36.5	-1.9	5.0	84.1	30.6	0.05	0.67	0.42	0.18	0.18
28	3.17	9.3	11.3	62.4	60.1	1.71	56.7	17.3	20.2	23.7	78.7	6.0	0.25	0.99	0.54	0.29	0.34
29	3.55	35.9	4.6	55.2	54.2	1.65	17.9	22.4	14.5	19.0	85.4	17.8	0.19	0.75	0.46	0.21	0.22
\bar{x}	3.41	20.3	9.1	58.6	56.7	1.91	59.3	28.1	12.9	19.0	80.9	19.0	0.22	0.95	0.56	0.33	0.38
s	0.26	16.5	1.9	4.6	4.4	0.44	25.7	9.7	10.1	8.2	1.9	9.5	0.11	0.19	0.12	0.13	0.15
min	2.75	1.5	4.6	52.0	50.8	0.58	17.9	11.3	-12.7	1.8	76.2	3.3	0.02	0.61	0.21	0.04	0.05
max	3.81	66.6	13.8	71.6	69.7	2.57	101.7	47.4	31.2	34.1	85.4	36.7	0.44	1.29	0.79	0.63	0.76

31.4 Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 104^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	ω_i [rs^{-1}]	azi_i [$^\circ$]	dip_i [$^\circ$]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	ω_r [rs^{-1}]	azi_r [$^\circ$]	dip_r [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	$\Delta\phi$ [$^\circ$]	e [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]	E_{COR} [-]	TE_{COR} [-]
1	3.62	12.4	-13.4	56.4	59.6	2.11	39.4	25.4	14.3	20.1	103.4	38.7	0.23	1.08	0.58	0.34	0.36
2	3.43	9.8	-14.1	58.0	61.4	1.53	42.9	6.1	8.7	10.2	104.1	20.1	0.09	0.92	0.45	0.20	0.22
3	3.41	4.1	-16.1	55.5	59.3	1.96	30.5	14.8	25.0	28.5	106.1	30.9	0.32	0.99	0.57	0.33	0.34
4	3.70	6.7	-15.3	55.5	59.2	2.19	40.0	20.9	5.3	10.2	105.3	36.3	0.12	1.14	0.59	0.35	0.37
5	3.77	11.1	-12.5	54.5	57.5	2.49	109.1	-4.4	17.3	16.2	102.5	8.1	0.22	1.18	0.66	0.44	0.56
6	3.44	2.3	-15.1	56.3	59.9	1.84	34.1	-9.3	29.7	27.5	105.1	5.8	0.29	0.95	0.53	0.29	0.30
7	3.41	6.5	-12.2	53.3	56.2	2.23	71.6	23.5	21.7	27.2	102.2	35.7	0.36	1.05	0.65	0.43	0.49
8	3.50	7.7	-14.4	58.5	61.9	2.00	35.4	7.2	30.3	32.0	104.4	21.6	0.34	1.03	0.57	0.32	0.34
9	3.25	4.6	-18.2	58.7	63.0	2.07	66.7	9.9	26.7	29.1	108.2	28.1	0.35	1.23	0.64	0.41	0.47
10	3.12	4.9	-17.7	57.3	61.5	2.25	69.4	4.1	26.4	27.4	107.7	21.8	0.38	1.34	0.72	0.52	0.60
11	3.41	9.4	-14.8	58.8	62.3	1.89	64.8	19.8	12.7	17.3	104.8	34.6	0.19	1.13	0.55	0.31	0.36
12	3.25	46.2	-6.1	52.5	54.0	1.51	49.3	34.8	17.4	25.2	96.1	40.9	0.25	0.72	0.47	0.22	0.24
13	3.46	15.5	-17.3	54.6	58.7	2.09	14.8	3.0	9.2	9.9	107.3	20.3	0.12	1.15	0.60	0.36	0.37
14	3.28	10.9	-14.7	61.4	64.9	1.31	50.8	20.9	23.1	28.0	104.7	35.7	0.21	0.83	0.40	0.16	0.19
15	3.49	5.2	-14.4	58.3	61.7	1.91	39.6	11.1	19.9	22.5	104.4	25.5	0.24	1.07	0.55	0.30	0.32
16	3.43	3.5	-14.8	60.1	63.6	2.07	66.4	13.6	27.1	30.3	104.8	28.4	0.34	1.17	0.60	0.36	0.42
17	3.69	2.2	-12.8	56.4	59.5	1.99	73.0	18.8	14.1	18.5	102.8	31.5	0.20	1.01	0.54	0.29	0.35
18	3.60	7.7	-13.6	56.7	59.9	2.26	50.2	13.7	21.1	24.3	103.6	27.3	0.30	1.14	0.63	0.40	0.42
19	3.55	15.2	-11.8	56.0	58.8	2.24	63.0	13.4	20.2	23.4	101.8	25.2	0.29	1.12	0.63	0.40	0.44
20	3.41	7.7	-15.4	56.7	60.4	2.57	83.0	26.0	23.2	29.2	105.4	41.4	0.42	1.33	0.75	0.57	0.66
21	3.40	18.5	-9.5	56.3	54.0	1.28	31.5	28.9	32.1	38.7	99.5	38.4	0.29	0.50	0.38	0.14	0.15
22	3.74	6.3	-13.7	55.9	59.2	2.05	35.9	11.0	19.1	21.7	103.7	24.7	0.24	0.99	0.55	0.30	0.31
23	3.38	8.7	-11.6	50.6	53.3	1.79	66.4	20.4	13.1	17.9	101.6	32.0	0.20	0.84	0.53	0.28	0.34
24	3.75	6.7	-15.7	56.4	60.2	1.51	36.7	19.9	11.1	15.7	105.7	35.6	0.13	0.78	0.40	0.16	0.18
25	3.42	33.0	-11.3	58.8	61.5	2.17	106.6	1.5	13.8	14.1	101.3	12.8	0.18	1.29	0.63	0.40	0.54
26	3.67	4.8	-12.5	55.8	58.8	2.29	52.7	3.8	23.3	24.2	102.5	16.3	0.30	1.10	0.62	0.39	0.42
27	3.74	19.6	-10.9	57.3	59.9	1.81	36.9	17.4	20.2	24.3	100.9	28.3	0.23	0.88	0.49	0.24	0.25
28	3.85	9.0	-13.4	56.0	59.1	1.95	50.8	-7.2	23.8	22.1	103.4	6.1	0.22	0.91	0.51	0.26	0.28
\bar{x}	3.51	10.7	-13.7	56.5	59.6	1.98	54.0	13.2	19.6	22.7	103.7	26.9	0.25	1.03	0.56	0.33	0.37
s	0.18	9.3	2.5	2.2	2.7	0.32	21.8	10.7	6.9	6.9	2.5	10.0	0.08	0.19	0.09	0.10	0.12
min	3.12	2.2	-18.2	50.6	53.3	1.28	14.8	-9.3	5.3	9.9	96.1	5.8	0.09	0.50	0.38	0.14	0.15
max	3.85	46.2	-6.1	61.4	64.9	2.57	109.1	34.8	32.1	38.7	108.2	41.4	0.42	1.34	0.75	0.57	0.66

31.5 Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 129^\circ$

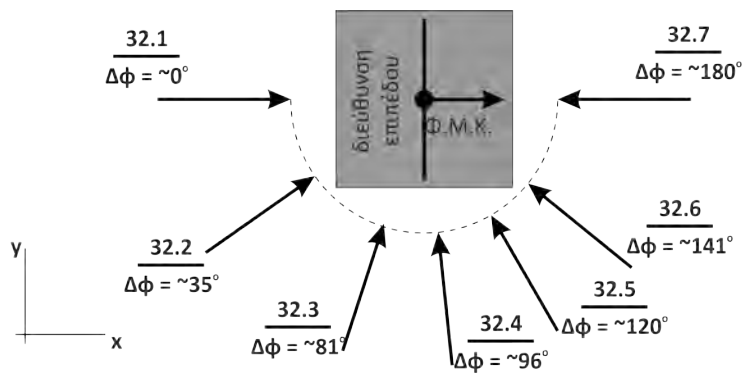
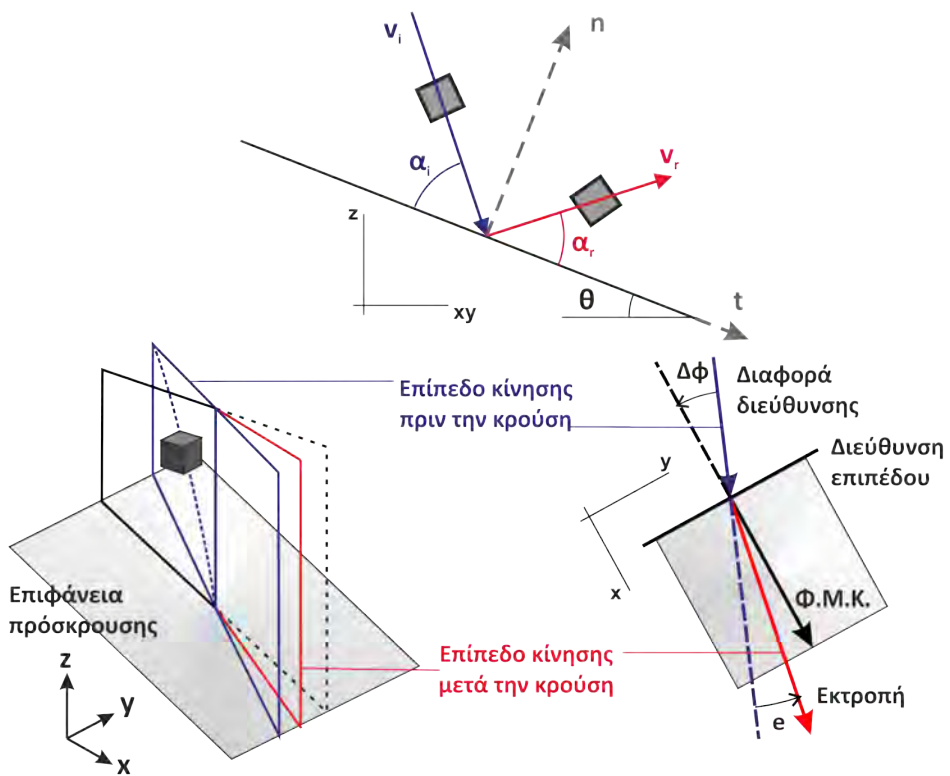
α/α	v_i [ms^{-1}]	ω_i [rs^{-1}]	azi_i [$^\circ$]	dip_i [$^\circ$]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	ω_r [rs^{-1}]	azi_r [$^\circ$]	dip_r [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	$\Delta\phi$ [$^\circ$]	e [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]	E_{COR} [-]	TE_{COR} [-]
1	3.12	5.0	-41.3	57.5	67.8	1.79	52.2	2.7	27.9	28.7	131.3	44.0	0.30	1.33	0.57	0.33	0.37
2	3.73	4.2	-38.2	56.2	65.9	2.26	23.2	-5.0	24.5	23.1	128.2	33.2	0.26	1.36	0.60	0.36	0.37
3	3.47	4.9	-40.1	56.2	66.3	1.83	68.4	-9.1	27.7	25.2	130.1	31.0	0.25	1.19	0.53	0.28	0.34
4	3.26	3.8	-47.7	51.7	63.2	1.76	26.1	-2.5	32.9	32.2	137.7	45.2	0.32	1.01	0.54	0.29	0.30
5	3.85	9.4	-39.5	55.2	65.2	1.79	59.8	-24.2	36.5	30.1	129.5	15.3	0.26	0.96	0.46	0.22	0.25
6	3.31	5.6	-40.6	57.8	68.0	1.69	33.8	-13.5	18.9	15.2	130.6	27.1	0.15	1.32	0.51	0.26	0.28
7	3.57	22.0	-38.3	54.8	64.5	2.02	36.7	-2.6	31.1	30.4	128.3	35.7	0.32	1.13	0.56	0.32	0.33
8	3.54	5.1	-38.8	57.1	66.9	1.90	43.6	-2.6	25.8	25.1	128.8	36.2	0.25	1.24	0.54	0.29	0.31
9	3.54	3.3	-39.6	57.1	67.1	1.45	50.2	-13.4	32.6	29.0	129.6	26.3	0.22	0.92	0.41	0.17	0.20
10	3.66	4.9	-39.1	55.8	65.7	1.88	37.4	0.9	39.5	39.7	129.1	39.9	0.36	0.96	0.51	0.26	0.28
11	3.52	15.1	-37.2	58.3	67.8	1.43	45.4	-27.7	54.0	46.7	127.2	9.5	0.32	0.74	0.41	0.16	0.19
12	3.45	5.9	-42.1	62.3	72.8	1.30	34.1	13.4	26.9	30.6	132.1	55.5	0.20	1.10	0.38	0.14	0.16
13	3.41	5.2	-38.5	59.7	69.5	1.74	54.8	3.6	39.0	40.0	128.5	42.1	0.35	1.11	0.51	0.26	0.30
14	3.57	4.8	-38.3	57.9	67.6	1.95	71.1	8.4	32.0	34.3	128.3	46.7	0.33	1.19	0.55	0.30	0.36
15	3.50	11.8	-40.6	53.8	64.0	1.67	38.7	-3.8	21.9	20.8	130.6	36.8	0.19	1.02	0.48	0.23	0.25
16	3.64	12.0	-37.1	55.8	65.3	1.87	28.2	-16.8	22.1	17.5	127.1	20.3	0.17	1.17	0.51	0.26	0.27
17	3.40	27.1	-37.8	55.9	65.5	0.69	15.9	5.4	22.6	24.1	127.8	43.1	0.09	0.45	0.20	0.04	0.04
18	3.32	14.3	-43.4	62.0	72.7	1.40	74.2	-25.8	47.4	40.6	133.4	17.6	0.29	1.08	0.42	0.18	0.25
19	3.00	13.3	-39.3	62.7	72.6	1.68	52.9	-2.6	29.8	29.1	129.3	36.7	0.29	1.63	0.56	0.31	0.36
20	3.01	36.4	-33.3	70.6	79.2	2.00	49.6	22.8	29.1	35.2	123.3	56.2	0.39	2.90	0.67	0.44	0.47
21	3.45	7.5	-40.0	56.3	66.4	1.75	50.9	-25.0	46.4	39.8	130.0	15.0	0.36	0.97	0.51	0.26	0.29
22	3.74	3.7	-38.2	57.8	67.5	1.85	50.7	-25.8	35.4	28.5	128.2	12.4	0.26	1.13	0.49	0.24	0.27
23	3.19	5.8	-38.5	62.3	72.0	0.99	45.8	21.2	10.7	16.4	128.5	59.7	0.09	0.96	0.31	0.10	0.13
24	3.54	2.7	-38.9	58.5	68.3	1.89	39.4	-6.2	34.9	33.2	128.9	32.6	0.31	1.21	0.53	0.29	0.30
25	3.37	8.1	-36.5	59.2	68.5	1.92	30.5	-6.6	32.9	31.1	126.5	29.9	0.32	1.33	0.57	0.33	0.34
26	3.67	35.5	-36.4	56.2	65.5	2.05	39.6	-11.5	28.6	25.4	126.4	25.0	0.26	1.22	0.56	0.31	0.32
27	3.56	4.2	-39.1	57.4	67.2	1.70	64.8	-8.6	28.3	25.9	129.1	30.5	0.23	1.11	0.48	0.23	0.28
28	3.77	19.7	-40.7	57.3	67.4	1.24	38.4	1.9	35.1	35.6	130.7	42.6	0.21	0.70	0.33	0.11	0.12
29	3.35	37.3	-35.1	60.5	69.5	1.69	54.7	-23.4	29.1	22.9	125.1	11.7	0.21	1.33	0.50	0.25	0.29
30	3.20	32.2	-46.9	61.1	72.5	1.84	48.1	-14.0	28.6	24.8	136.9	32.9	0.25	1.73	0.57	0.33	0.36
\bar{x}	3.46	12.4	-39.4	58.2	68.1	1.70	45.3	-6.3	31.1	29.4	129.4	33.0	0.26	1.18	0.49	0.25	0.28
s	0.21	10.7	2.9	3.5	3.3	0.32	13.9	13.2	8.5	7.4	2.9	13.2	0.07	0.40	0.09	0.08	0.09
min	3.00	2.7	-47.7	51.7	63.2	0.69	15.9	-27.7	10.7	15.2	123.3	9.5	0.09	0.45	0.20	0.04	0.04
max	3.85	37.3	-33.3	70.6	79.2	2.26	74.2	22.8	54.0	46.7	137.7	59.7	0.39	2.90	0.67	0.44	0.47

31.6 Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 180^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	ω_i [rs^{-1}]	azi_i [$^\circ$]	dip_i [$^\circ$]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	ω_r [rs^{-1}]	azi_r [$^\circ$]	dip_r [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	$\Delta\phi$ [$^\circ$]	e [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]	E_{COR} [-]	TE_{COR} [-]
1	2.89	47.3	-96.5	71.1	85.7	1.02	4.9	32.2	67.7	75.6	186.5	128.6	0.34	1.18	0.35	0.12	0.12
2	3.14	14.1	-88.2	62.2	76.9	0.99	36.8	-89.1	32.2	17.4	178.2	-0.9	0.10	1.33	0.32	0.10	0.12
3	3.44	12.7	-84.4	57.4	72.1	0.45	15.6	-79.9	23.6	9.1	174.4	4.6	0.02	0.42	0.13	0.02	0.02
4	3.58	5.5	-85.0	59.8	74.5	1.01	61.4	-86.6	26.2	11.4	175.0	-1.6	0.06	1.04	0.28	0.08	0.12
5	3.28	5.7	-87.5	60.5	75.2	1.09	51.4	-45.2	77.5	66.9	177.5	42.3	0.32	0.51	0.33	0.11	0.15
6	3.40	4.3	-86.6	58.4	73.2	1.40	78.9	-57.1	54.5	42.0	176.6	29.5	0.29	1.06	0.41	0.17	0.25
7	3.18	13.5	-90.4	62.6	77.3	0.38	21.0	-144.8	-8.4	17.0	180.4	-54.5	0.04	0.52	0.12	0.01	0.02
8	2.85	8.1	-99.4	71.2	85.7	0.68	16.0	121.8	58.7	71.3	189.4	221.2	0.23	1.02	0.24	0.06	0.06
9	2.97	18.1	-92.8	65.2	80.0	0.45	14.5	156.8	-13.7	7.7	182.8	249.6	0.02	0.87	0.15	0.02	0.03
10	3.44	3.3	-86.4	57.2	71.9	1.67	54.2	-62.8	51.9	38.7	176.4	23.6	0.32	1.22	0.49	0.24	0.27
11	3.08	7.3	-92.3	63.4	78.1	0.27	64.2	-145.4	-60.0	68.6	182.3	-53.0	0.08	0.16	0.09	0.01	0.07
12	3.34	20.5	-87.9	60.0	74.8	0.33	12.1	-133.2	-10.2	21.1	177.9	-45.3	0.04	0.35	0.10	0.01	0.01
13	3.36	27.5	-89.9	61.4	76.1	0.71	26.1	-19.8	16.0	10.9	179.9	70.0	0.04	0.87	0.21	0.04	0.05
14	3.02	9.4	-89.5	64.4	79.1	0.37	32.1	17.7	-15.9	11.3	179.5	107.3	0.02	0.64	0.12	0.02	0.03
15	3.41	4.8	-85.9	58.8	73.5	1.36	57.1	-38.1	42.5	33.3	175.9	47.8	0.23	1.17	0.40	0.16	0.20
16	3.05	22.1	-94.0	65.9	80.6	0.58	14.0	-31.7	4.8	3.1	184.0	62.3	0.01	1.16	0.19	0.04	0.04
17	3.58	10.4	-85.1	58.8	73.5	0.99	33.7	-121.0	0.6	12.1	175.1	-36.0	0.06	0.95	0.28	0.08	0.09
18	3.24	5.9	-88.5	62.3	77.1	1.28	44.3	-104.6	50.8	36.5	178.5	-16.2	0.24	1.42	0.39	0.16	0.18
19	2.78	39.4	-98.4	72.6	87.2	0.80	28.5	-25.4	28.5	22.1	188.4	73.0	0.11	5.50	0.29	0.08	0.10
20	3.34	2.7	-86.8	58.8	73.5	1.59	40.6	-40.4	46.1	36.4	176.8	46.4	0.30	1.35	0.48	0.23	0.25
21	3.42	14.9	-87.1	58.5	73.2	1.18	31.1	-130.5	62.5	51.2	177.1	-43.4	0.28	0.75	0.34	0.12	0.13
22	2.86	5.3	-97.5	69.9	84.6	0.61	33.5	115.0	49.0	62.5	187.5	212.5	0.19	1.04	0.21	0.05	0.07
23	3.29	23.6	-88.7	58.3	73.0	1.18	19.2	-28.1	62.7	55.7	178.7	60.7	0.31	0.70	0.36	0.13	0.13
24	3.16	8.6	-88.2	61.9	76.6	1.11	74.8	-136.9	68.1	57.9	178.2	-48.8	0.31	0.81	0.35	0.12	0.21
25	3.48	4.9	-87.6	58.6	73.4	1.12	42.7	-65.1	66.8	53.3	177.6	22.6	0.27	0.67	0.32	0.10	0.13
26	3.31	10.5	-85.3	60.0	74.7	1.49	50.6	-98.6	52.1	37.5	175.3	-13.3	0.28	1.35	0.45	0.20	0.24
27	2.82	31.0	-97.2	71.5	86.1	0.53	22.3	-143.2	31.1	22.1	187.2	-46.0	0.07	2.55	0.19	0.03	0.04
28	3.47	25.2	-82.2	56.7	71.3	1.36	92.7	-40.2	62.5	52.9	172.2	42.0	0.33	0.74	0.39	0.15	0.26
29	2.77	23.8	-98.6	74.0	88.6	0.63	27.6	58.4	38.9	51.6	188.6	157.0	0.18	5.67	0.23	0.05	0.07
30	3.55	3.0	-84.5	58.3	73.0	1.45	53.9	-39.1	32.0	22.6	174.5	45.5	0.16	1.28	0.41	0.17	0.20
31	3.27	69.6	-97.1	62.4	77.0	0.78	56.9	-55.6	9.1	3.2	187.1	41.5	0.01	1.06	0.24	0.06	0.10
32	3.48	44.0	-88.1	56.2	71.0	1.51	51.4	-72.9	34.6	20.4	178.1	15.2	0.16	1.25	0.43	0.19	0.22
33	2.79	28.5	-100.4	72.4	86.9	0.55	35.9	-2.4	33.2	32.6	190.4	98.0	0.11	3.10	0.20	0.04	0.06
34	3.09	27.7	-89.9	65.3	80.1	0.73	50.5	-123.6	10.5	1.9	179.9	-33.8	0.01	1.37	0.24	0.06	0.09
35	2.79	47.5	-99.9	72.1	86.6	0.50	10.4	-161.3	36.4	31.5	189.9	-61.4	0.09	2.62	0.18	0.03	0.03
36	3.10	49.6	-90.0	64.3	79.1	1.09	49.4	-137.9	55.5	45.5	180.0	-47.9	0.25	1.30	0.35	0.12	0.16
\bar{x}	3.19	19.5	-90.5	63.1	77.8	0.92	39.2	-54.4	32.7	33.7	180.5	36.1	0.16	1.36	0.29	0.09	0.12
s	0.25	16.2	5.1	5.3	5.2	0.40	20.6	77.3	29.6	21.4	5.1	79.4	0.11	1.18	0.11	0.06	0.08
min	2.77	2.7	-100.4	56.2	71.0	0.27	4.9	-161.3	-60.0	1.9	172.2	-61.4	0.01	0.16	0.09	0.01	0.01
max	3.58	69.6	-82.2	74.0	88.6	1.67	92.7	156.8	77.5	75.6	190.4	249.6	0.34	5.67	0.49	0.24	0.27

Παράρτημα 32

Παραβολική ρίψη κυβικών τεμαχίων σε επιφάνεια με κλίση $\theta = 24^\circ$



32.1 Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 0^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	ω_i [rs^{-1}]	azi_i [$^\circ$]	dip_i [$^\circ$]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	ω_r [rs^{-1}]	azi_r [$^\circ$]	dip_r [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	$\Delta\phi$ [$^\circ$]	e [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]	E_{COR} [-]	TE_{COR} [-]
1	3.09	4.9	86.3	63.0	42.1	1.99	56.5	86.9	-6.3	14.6	3.7	0.6	0.24	0.84	0.65	0.42	0.47
2	3.54	2.7	88.7	55.3	34.4	2.43	45.2	87.0	-8.6	12.3	1.3	-1.7	0.26	0.81	0.69	0.47	0.50
3	3.73	8.7	90.8	57.5	36.6	2.35	50.0	94.4	-6.3	14.6	-0.8	3.7	0.27	0.76	0.63	0.40	0.43
4	2.90	4.1	89.4	64.2	43.2	1.36	28.4	77.6	-5.2	15.3	0.6	-11.8	0.18	0.62	0.47	0.22	0.23
5	3.38	11.8	92.1	56.6	35.7	2.27	75.8	91.7	-16.1	4.8	-2.1	-0.4	0.10	0.82	0.67	0.45	0.52
6	3.28	6.6	89.3	58.4	37.4	2.07	55.5	91.9	1.4	22.3	0.7	2.5	0.39	0.74	0.63	0.40	0.44
7	3.25	3.0	88.1	60.0	39.1	1.97	40.0	88.5	-18.1	2.9	1.9	0.4	0.05	0.78	0.61	0.37	0.39
8	3.23	14.1	87.6	59.9	39.0	2.19	56.7	91.2	4.0	25.0	2.4	3.6	0.45	0.79	0.68	0.46	0.50
9	3.24	3.7	89.3	60.6	39.7	1.87	69.8	85.4	-9.7	11.2	0.7	-3.8	0.17	0.73	0.58	0.33	0.40
10	3.60	3.0	89.4	58.2	37.3	2.44	26.6	92.8	-24.4	3.5	0.6	3.4	0.07	0.85	0.68	0.46	0.47
11	3.40	14.0	91.1	56.8	35.9	2.35	75.4	92.7	-10.0	10.9	-1.1	1.6	0.22	0.84	0.69	0.48	0.55
12	3.52	4.8	89.3	57.3	36.3	2.45	53.2	87.4	2.2	23.1	0.7	-1.9	0.46	0.79	0.70	0.48	0.52
13	3.54	5.2	90.5	57.3	36.3	2.43	65.4	97.1	-15.1	5.7	-0.5	6.6	0.12	0.85	0.69	0.47	0.52
14	3.70	33.6	90.7	54.6	33.7	2.42	50.1	87.3	-8.6	12.3	-0.7	-3.3	0.25	0.77	0.66	0.43	0.45
15	3.07	8.5	90.9	59.7	38.8	2.01	41.6	90.6	0.2	21.2	-0.9	-0.3	0.38	0.78	0.65	0.43	0.46
16	3.33	25.2	92.2	57.9	37.0	2.07	86.7	101.7	-2.3	18.2	-2.2	9.5	0.32	0.74	0.62	0.39	0.48
17	3.29	27.0	91.7	59.5	38.5	2.05	60.0	85.4	3.3	24.2	-1.7	-6.3	0.41	0.73	0.62	0.39	0.43
18	3.43	1.1	90.1	58.1	37.2	2.14	57.3	84.2	-12.5	8.4	-0.1	-5.9	0.15	0.77	0.62	0.39	0.43
19	3.25	3.1	89.0	59.2	38.2	2.01	57.4	84.2	-14.1	6.8	1.0	-4.8	0.12	0.78	0.62	0.38	0.43
20	3.68	15.9	92.3	54.5	33.6	2.32	31.1	86.5	-6.3	14.6	-2.3	-5.8	0.29	0.73	0.63	0.40	0.41
21	3.52	12.6	92.3	56.0	35.1	2.38	45.0	99.3	-19.2	1.4	-2.3	7.0	0.03	0.82	0.67	0.46	0.48
22	3.27	6.5	89.5	59.0	38.0	2.17	60.1	89.7	-2.3	18.6	0.5	0.2	0.34	0.80	0.66	0.44	0.49
23	3.33	12.0	91.4	57.2	36.3	2.35	62.0	88.4	4.9	25.9	-1.4	-3.0	0.52	0.79	0.71	0.50	0.55
24	3.42	10.7	92.1	57.2	36.3	2.38	17.7	97.0	-21.3	0.5	-2.1	4.9	0.01	0.86	0.70	0.49	0.49
25	3.75	8.1	90.9	53.8	32.9	2.63	49.1	91.4	0.5	21.4	-0.9	0.5	0.47	0.78	0.70	0.49	0.52
26	3.46	9.7	91.4	54.9	34.0	2.31	57.1	91.6	-2.8	18.1	-1.4	0.2	0.37	0.77	0.67	0.45	0.49
27	3.17	3.8	88.3	59.4	38.5	1.97	42.5	83.4	-4.7	16.1	1.7	-4.9	0.28	0.76	0.62	0.39	0.41
28	3.56	4.8	90.0	54.8	33.8	2.48	58.5	89.3	1.2	22.2	0.0	-0.7	0.47	0.78	0.70	0.48	0.52
29	3.53	4.7	90.2	56.3	35.3	2.36	81.3	90.4	-1.1	19.8	-0.2	0.2	0.39	0.77	0.67	0.45	0.53
30	3.17	75.1	88.8	59.8	38.9	1.81	18.5	96.8	-3.9	16.9	1.2	7.9	0.26	0.70	0.57	0.33	0.31

α/α	v_i [ms^{-1}]	ω_i [rs^{-1}]	azi_i [$^\circ$]	dip_i [$^\circ$]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	ω_r [rs^{-1}]	azi_r [$^\circ$]	dip_r [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	$\Delta\phi$ [$^\circ$]	e [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]	E_{COR} [-]	TE_{COR} [-]
31	3.49	6.2	91.1	57.6	36.7	2.35	60.9	88.4	-0.7	20.2	-1.1	-2.8	0.39	0.79	0.68	0.46	0.50
32	3.09	7.0	87.6	63.0	42.1	2.06	52.7	98.5	-28.7	8.0	2.4	10.9	0.14	0.89	0.67	0.44	0.49
33	3.48	5.5	88.1	57.2	36.3	2.38	37.0	87.8	-14.0	6.9	1.9	-0.3	0.14	0.84	0.68	0.47	0.48
34	3.26	6.8	89.1	60.6	39.7	2.19	64.8	90.2	-1.8	19.1	0.9	1.2	0.34	0.82	0.67	0.45	0.51
35	3.54	6.0	90.7	56.1	35.2	2.11	21.2	85.1	-7.3	13.6	-0.7	-5.6	0.24	0.71	0.60	0.35	0.36
36	3.37	7.9	90.3	57.3	36.3	2.16	67.8	93.4	-5.2	15.7	-0.3	3.1	0.29	0.77	0.64	0.41	0.47
37	2.93	4.4	87.9	61.8	40.9	1.96	60.6	84.8	1.4	22.3	2.1	-3.2	0.39	0.82	0.67	0.45	0.51
38	3.14	13.0	87.3	58.5	37.5	2.13	32.7	86.6	-8.0	12.9	2.7	-0.7	0.25	0.83	0.68	0.46	0.47
39	3.15	32.8	89.9	61.4	40.5	1.85	13.3	89.3	-9.1	11.8	0.1	-0.7	0.19	0.76	0.59	0.35	0.34
\bar{x}	3.36	11.2	89.9	58.2	37.3	2.19	50.9	89.9	-7.0	14.4	0.1	0.0	0.27	0.78	0.65	0.42	0.46
s	0.21	12.9	1.5	2.4	2.4	0.24	17.6	4.9	8.0	6.9	1.5	4.6	0.13	0.05	0.05	0.06	0.07
min	2.90	1.1	86.3	53.8	32.9	1.36	13.3	77.6	-28.7	0.5	-2.3	-11.8	0.01	0.62	0.47	0.22	0.23
max	3.75	75.1	92.3	64.2	43.2	2.63	86.7	101.7	4.9	25.9	3.7	10.9	0.52	0.89	0.71	0.50	0.55

32.2 Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 35^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	ω_i [rs^{-1}]	azi_i [$^\circ$]	dip_i [$^\circ$]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	ω_r [rs^{-1}]	azi_r [$^\circ$]	dip_r [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	$\Delta\phi$ [$^\circ$]	e [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]	E_{COR} [-]	TE_{COR} [-]
1	3.39	11.0	53.9	56.3	38.9	2.41	101.2	67.9	-2.7	17.1	36.1	13.9	0.33	0.87	0.71	0.50	0.64
2	3.58	5.0	55.1	57.9	40.2	2.30	47.1	63.9	0.1	19.3	34.9	8.8	0.33	0.79	0.64	0.41	0.44
3	3.29	8.2	53.9	58.8	41.4	2.16	96.5	65.5	-13.3	6.2	36.1	11.6	0.11	0.87	0.66	0.43	0.56
4	3.40	11.9	56.5	60.8	42.9	2.07	56.4	66.5	-4.0	15.6	33.5	10.1	0.24	0.80	0.61	0.37	0.41
5	3.18	14.8	52.4	60.5	43.4	1.94	89.6	74.6	-3.2	17.4	37.6	22.3	0.27	0.80	0.61	0.37	0.49
6	3.51	3.8	55.0	56.4	38.7	2.30	85.6	65.2	-23.2	3.8	35.0	10.2	0.07	0.84	0.66	0.43	0.52
7	3.69	6.6	54.3	58.1	40.6	2.43	41.4	63.6	6.2	25.4	35.7	9.4	0.43	0.78	0.66	0.43	0.45
8	3.51	11.1	57.8	56.4	38.2	2.24	42.9	69.9	-13.1	7.0	32.2	12.1	0.13	0.81	0.64	0.41	0.43
9	3.50	20.6	52.1	57.7	40.7	2.26	76.2	63.4	0.1	19.2	37.9	11.2	0.33	0.80	0.65	0.42	0.48
10	3.48	5.4	54.4	57.5	39.9	2.37	14.5	58.3	-12.5	5.8	35.6	4.0	0.11	0.88	0.68	0.46	0.47
11	3.60	7.3	55.3	56.2	38.5	2.46	81.8	69.4	-2.9	17.1	34.7	14.1	0.32	0.83	0.68	0.47	0.54
12	3.29	5.6	55.5	59.8	42.0	2.03	20.0	61.0	-13.6	5.2	34.5	5.5	0.08	0.83	0.62	0.38	0.39
13	3.34	4.7	55.3	58.3	40.6	2.08	74.2	56.4	-1.1	16.8	34.7	1.1	0.28	0.79	0.62	0.39	0.46
14	3.04	16.5	56.6	63.2	45.3	1.91	50.0	59.3	-0.7	17.8	33.4	2.7	0.27	0.85	0.63	0.40	0.43
15	3.17	5.2	53.3	59.8	42.5	2.05	83.5	62.8	-2.9	16.1	36.7	9.5	0.27	0.84	0.65	0.42	0.52
16	3.49	22.8	52.4	57.5	40.4	2.05	74.5	64.7	-3.9	15.5	37.6	12.3	0.24	0.74	0.59	0.34	0.41
17	3.52	11.8	58.0	58.6	40.3	2.37	65.7	68.5	-4.7	15.2	32.0	10.5	0.27	0.85	0.67	0.45	0.50
18	3.58	3.6	54.6	57.7	40.2	2.19	33.9	59.8	-6.7	11.8	35.4	5.2	0.19	0.78	0.61	0.37	0.39
19	3.72	6.5	52.6	57.9	40.7	2.39	114.5	64.0	-11.3	7.9	37.4	11.4	0.14	0.84	0.64	0.41	0.56
20	3.32	6.9	55.2	58.9	41.2	1.83	66.1	75.8	-2.8	17.9	34.8	20.6	0.26	0.70	0.55	0.30	0.36
21	2.68	18.9	57.8	65.9	47.6	1.37	19.6	66.3	-13.4	6.2	32.2	8.4	0.07	0.76	0.51	0.26	0.27
22	3.50	11.1	53.7	57.7	40.3	2.29	21.4	66.1	-15.9	3.6	36.3	12.5	0.06	0.86	0.65	0.43	0.43
23	3.69	8.7	56.4	56.4	38.4	2.19	17.8	58.1	-13.4	4.8	33.6	1.7	0.08	0.76	0.59	0.35	0.36
24	3.51	15.4	55.9	56.6	38.8	2.17	68.8	65.6	-12.0	7.5	34.1	9.7	0.13	0.79	0.62	0.38	0.44
25	3.73	7.8	53.6	54.8	37.4	2.53	91.6	59.4	6.4	24.9	36.4	5.7	0.47	0.78	0.68	0.46	0.55
26	3.06	6.6	54.1	63.7	46.2	1.74	30.6	59.5	1.0	19.5	35.9	5.4	0.26	0.78	0.57	0.32	0.34
27	3.17	5.5	55.5	61.8	44.0	1.87	63.3	60.5	3.5	22.2	34.5	5.0	0.32	0.76	0.59	0.35	0.41
28	3.60	8.2	54.6	55.2	37.6	2.49	93.6	55.4	-9.5	8.2	35.4	0.8	0.16	0.86	0.69	0.48	0.58
29	3.05	44.4	58.8	53.4	35.0	1.09	27.1	80.7	-19.9	1.1	31.2	21.9	0.01	0.44	0.36	0.13	0.14
30	3.04	29.0	54.0	56.6	39.2	1.78	53.0	71.4	-10.0	10.2	36.0	17.4	0.16	0.74	0.59	0.34	0.38
31	3.37	6.2	54.6	58.5	40.9	2.20	9.7	65.4	-4.2	15.2	35.4	10.8	0.26	0.83	0.65	0.43	0.43
32	3.36	5.4	54.8	56.8	39.2	2.14	68.9	55.5	-17.9	0.2	35.2	0.8	0.00	0.82	0.64	0.40	0.47
\bar{x}	3.39	11.1	54.9	58.3	40.7	2.12	58.8	64.5	-6.9	12.6	35.1	9.6	0.21	0.80	0.62	0.39	0.45
s	0.24	8.4	1.7	2.6	2.6	0.31	28.6	5.8	7.4	6.9	1.7	5.7	0.12	0.08	0.06	0.07	0.10
min	2.68	3.6	52.1	53.4	35.0	1.09	9.7	55.4	-23.2	0.2	31.2	0.8	0.00	0.44	0.36	0.13	0.14
max	3.73	44.4	58.8	65.9	47.6	2.53	114.5	80.7	6.4	25.4	37.9	22.3	0.47	0.88	0.71	0.50	0.64

32.3 Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 81^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	ω_i [rs^{-1}]	azi_i [$^\circ$]	dip_i [$^\circ$]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	ω_r [rs^{-1}]	azi_r [$^\circ$]	dip_r [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	$\Delta\phi$ [$^\circ$]	e [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]	E_{COR} [-]	TE_{COR} [-]
1	4.45	4.2	20.4	67.9	59.9	2.13	21.8	139.3	40.7	3.1	69.6	20.2	0.03	0.95	0.48	0.23	0.23
2	3.43	21.4	16.8	56.5	49.8	1.97	75.8	145.4	34.6	1.4	73.2	17.8	0.02	0.89	0.57	0.33	0.40
3	3.52	5.4	16.9	55.0	48.4	2.30	71.9	149.1	30.9	14.0	73.1	14.0	0.21	0.96	0.66	0.43	0.49
4	2.86	16.8	19.8	66.1	58.3	1.43	51.4	126.0	54.0	0.5	70.2	34.2	0.00	0.95	0.50	0.25	0.30
5	3.11	3.8	17.9	61.8	54.7	2.13	38.7	136.2	43.8	29.8	72.1	25.9	0.42	1.03	0.69	0.47	0.49
6	3.54	6.3	19.5	56.6	49.0	2.18	39.8	137.3	42.7	24.1	70.5	23.1	0.33	0.86	0.62	0.38	0.40
7	3.58	9.9	16.4	55.6	49.1	2.25	49.1	144.8	35.2	15.4	73.6	18.8	0.22	0.93	0.63	0.40	0.42
8	3.66	11.2	20.3	54.4	46.5	2.09	57.4	139.8	40.2	23.6	69.7	19.9	0.31	0.76	0.57	0.33	0.36
9	2.85	8.1	15.2	66.8	60.8	1.20	39.2	129.6	50.4	11.0	74.8	35.1	0.09	0.84	0.42	0.18	0.20
10	3.64	7.9	18.2	54.3	47.2	2.36	72.2	147.6	32.4	24.0	71.8	14.3	0.36	0.87	0.65	0.42	0.48
11	2.85	46.8	20.6	65.4	57.3	1.59	64.0	121.0	59.0	22.6	69.4	38.4	0.25	0.95	0.56	0.31	0.37
12	3.46	27.7	16.8	57.4	50.8	1.81	53.8	149.3	30.7	7.6	73.2	14.0	0.09	0.82	0.52	0.27	0.31
13	3.43	4.5	19.3	56.0	48.5	1.79	22.5	141.8	38.2	6.5	70.7	18.9	0.08	0.78	0.52	0.27	0.28
14	3.07	20.0	18.1	62.3	55.2	1.97	78.0	121.0	59.0	14.5	71.9	40.9	0.19	1.09	0.64	0.41	0.50
15	3.14	38.6	19.1	60.9	53.4	1.81	47.8	133.7	46.3	13.7	70.9	27.2	0.17	0.94	0.58	0.33	0.36
16	3.65	7.1	18.4	54.9	47.7	2.27	37.9	143.2	36.8	18.7	71.6	18.4	0.27	0.88	0.62	0.39	0.40
17	3.17	14.1	18.2	60.1	52.9	1.67	60.8	151.0	29.0	10.0	71.8	10.7	0.11	0.86	0.53	0.28	0.33
18	3.20	6.7	18.8	59.0	51.7	1.51	24.0	139.7	40.3	10.6	71.2	21.5	0.11	0.75	0.47	0.22	0.23
19	3.29	2.9	17.5	56.4	49.5	1.90	63.7	140.9	39.1	6.0	72.5	21.6	0.08	0.89	0.58	0.34	0.39
20	3.35	7.7	17.4	56.2	49.3	2.40	60.9	126.6	53.4	24.9	72.6	36.0	0.40	1.00	0.72	0.51	0.56
21	3.19	31.3	17.7	67.1	60.1	1.21	16.6	128.5	51.5	7.7	72.3	33.8	0.06	0.76	0.38	0.14	0.15
22	2.98	37.7	9.0	56.4	52.8	1.54	31.2	136.1	43.9	23.2	81.0	34.9	0.26	0.78	0.52	0.27	0.28
23	3.59	16.0	18.1	57.5	50.3	1.82	49.9	135.3	44.7	24.0	71.9	26.6	0.27	0.73	0.51	0.26	0.29
24	2.78	22.7	16.1	67.2	60.9	1.46	39.7	144.6	35.4	24.3	73.9	19.3	0.25	0.98	0.52	0.27	0.30
25	3.46	19.0	18.5	53.6	46.4	1.82	48.5	148.1	31.9	21.8	71.5	13.5	0.27	0.71	0.53	0.28	0.31
26	3.18	46.2	4.4	57.2	55.4	1.45	23.6	139.3	40.7	4.0	85.6	36.3	0.04	0.80	0.46	0.21	0.21
27	3.01	22.2	20.4	64.8	56.8	1.55	19.8	129.6	50.4	5.5	69.6	30.0	0.06	0.94	0.52	0.27	0.27
28	3.29	4.8	19.2	58.3	50.8	2.12	49.0	143.8	36.2	24.5	70.8	17.0	0.34	0.93	0.65	0.42	0.45
29	3.21	19.3	22.0	62.2	53.7	1.84	52.0	141.4	38.6	9.7	68.0	16.6	0.12	0.95	0.57	0.33	0.36
30	3.44	4.3	19.2	55.1	47.5	2.35	51.0	148.0	32.0	10.3	70.8	12.8	0.17	1.00	0.68	0.47	0.50
\bar{x}	3.31	16.5	17.7	59.4	52.5	1.86	47.1	138.6	41.4	14.6	72.3	23.7	0.19	0.89	0.56	0.32	0.35
s	0.33	12.7	3.3	4.5	4.5	0.34	17.1	8.3	8.3	8.4	3.3	8.7	0.12	0.09	0.08	0.09	0.10
min	2.78	2.9	4.4	53.6	46.4	1.20	16.6	121.0	29.0	0.5	68.0	10.7	0.00	0.71	0.38	0.14	0.15
max	4.45	46.8	22.0	67.9	60.9	2.40	78.0	151.0	59.0	29.8	85.6	40.9	0.42	1.09	0.72	0.51	0.56

32.4 Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 96^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	ω_i [rs^{-1}]	azi_i [$^\circ$]	dip_i [$^\circ$]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	ω_r [rs^{-1}]	azi_r [$^\circ$]	dip_r [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	$\Delta\phi$ [$^\circ$]	e [$^\circ$]	η_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]	E_{COR} [-]	TE_{COR} [-]
1	4.22	12.4	-7.3	63.0	66.3	2.10	63.2	24.0	-11.7	1.1	97.3	31.3	0.01	1.24	0.50	0.25	0.28
2	2.94	14.5	-8.4	64.1	68.0	1.18	14.3	41.3	2.5	19.3	98.4	49.7	0.14	1.01	0.40	0.16	0.16
3	2.99	31.5	-7.3	62.4	65.8	1.34	20.0	36.4	3.3	18.5	97.3	43.7	0.16	1.03	0.45	0.20	0.20
4	3.73	3.2	-4.4	58.6	60.6	1.78	21.3	34.5	11.2	25.8	94.4	38.9	0.24	0.88	0.48	0.23	0.23
5	3.62	46.3	-7.3	54.6	58.0	1.73	47.6	16.8	7.4	15.0	97.3	24.1	0.15	0.87	0.48	0.23	0.25
6	3.77	4.3	-6.5	56.9	59.9	1.96	39.5	8.3	3.4	7.2	96.5	14.9	0.08	1.03	0.52	0.27	0.29
7	3.15	3.0	-5.2	58.3	60.7	2.10	58.6	32.8	14.4	28.4	95.2	38.0	0.36	1.20	0.67	0.44	0.50
8	2.94	25.6	-5.3	65.8	68.2	1.61	25.6	50.4	11.8	31.3	95.3	55.7	0.31	1.26	0.55	0.30	0.31
9	3.03	11.9	-9.5	58.8	63.2	1.88	76.5	34.3	1.1	15.6	99.5	43.8	0.19	1.32	0.62	0.38	0.48
10	2.79	34.8	-11.0	68.1	73.1	1.08	29.9	15.5	10.4	17.4	101.0	26.6	0.12	1.27	0.39	0.15	0.16
11	2.85	12.1	-5.5	65.2	67.7	1.09	30.3	43.2	0.8	18.3	95.5	48.7	0.13	0.96	0.38	0.15	0.16
12	4.31	5.0	-6.3	64.8	67.7	2.04	45.5	28.4	-28.1	15.8	96.3	34.7	0.14	1.20	0.47	0.22	0.24
13	2.82	22.7	-3.5	63.8	65.4	1.80	40.8	22.8	15.8	25.9	93.5	26.3	0.31	1.38	0.64	0.41	0.43
14	2.87	64.9	-5.8	64.6	67.2	1.33	38.8	21.0	18.6	28.0	95.8	26.8	0.24	1.06	0.46	0.21	0.22
15	4.43	4.2	-4.6	62.1	64.2	2.18	72.9	25.8	-30.1	18.8	94.6	30.4	0.18	1.07	0.49	0.24	0.28
16	3.33	2.6	-4.3	58.3	60.3	1.99	88.5	37.2	-7.3	8.2	94.3	41.6	0.10	1.19	0.60	0.36	0.46
17	3.40	8.6	-2.9	51.7	53.0	1.79	45.7	30.3	-2.7	10.4	92.9	33.1	0.12	0.86	0.53	0.28	0.30
18	3.67	16.9	-3.4	54.9	56.5	1.95	80.2	13.0	-11.5	5.7	93.4	16.4	0.06	0.96	0.53	0.28	0.35
19	3.47	8.5	-4.0	54.1	55.9	2.03	57.6	17.2	1.3	9.0	94.0	21.2	0.11	1.03	0.59	0.34	0.38
20	3.01	44.8	-9.4	65.2	69.5	1.07	26.6	24.0	12.2	22.8	99.4	33.4	0.15	0.93	0.35	0.13	0.13
21	2.85	43.8	-8.0	76.0	79.7	0.83	5.4	49.7	-20.4	1.1	98.0	57.7	0.01	1.62	0.29	0.08	0.08
22	3.47	6.4	-5.3	54.9	57.3	2.04	58.2	12.9	1.9	7.7	95.3	18.2	0.09	1.08	0.59	0.35	0.39
23	3.49	5.8	-5.6	58.2	60.8	2.19	41.2	30.7	4.7	18.0	95.6	36.3	0.22	1.22	0.63	0.39	0.41
24	3.17	21.5	-4.6	56.6	58.7	1.94	57.5	16.1	-0.2	7.0	94.6	20.8	0.09	1.17	0.61	0.37	0.42
25	3.18	29.7	-2.0	59.6	60.5	1.52	32.6	23.9	12.8	23.3	92.0	25.9	0.22	0.89	0.48	0.23	0.24
26	3.47	7.9	-5.9	56.0	58.7	2.01	33.3	8.8	2.9	6.9	95.9	14.6	0.08	1.11	0.58	0.34	0.35
27	3.16	6.9	-4.2	60.2	62.1	1.29	27.9	46.2	15.4	33.7	94.2	50.3	0.26	0.72	0.41	0.17	0.18
28	3.60	21.7	-4.1	57.0	58.9	1.83	49.9	33.2	18.0	32.1	94.1	37.4	0.32	0.83	0.51	0.26	0.29
\bar{x}	3.35	18.6	-5.8	60.5	63.1	1.70	43.9	27.8	2.1	16.9	95.8	33.6	0.16	1.09	0.51	0.27	0.29
s	0.45	15.9	2.1	5.1	5.7	0.39	20.2	11.8	12.7	9.3	2.1	12.0	0.09	0.19	0.09	0.09	0.11
min	2.79	2.6	-11.0	51.7	53.0	0.83	5.4	8.3	-30.1	1.1	92.0	14.6	0.01	0.72	0.29	0.08	0.08
max	4.43	64.9	-2.0	76.0	79.7	2.19	88.5	50.4	18.6	33.7	101.0	57.7	0.36	1.62	0.67	0.44	0.50

32.5 Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 120^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	ω_i [rs^{-1}]	azi_i [$^\circ$]	dip_i [$^\circ$]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	ω_r [rs^{-1}]	azi_r [$^\circ$]	dip_r [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	$\Delta\phi$ [$^\circ$]	e [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]	E_{COR} [-]	TE_{COR} [-]
1	3.51	12.1	-31.1	53.5	68.4	1.39	75.6	3.5	36.6	38.4	121.1	34.6	0.26	0.84	0.40	0.16	0.23
2	3.55	17.7	-30.1	54.8	69.2	1.22	42.0	25.7	24.6	37.1	120.1	55.8	0.22	0.77	0.34	0.12	0.14
3	3.35	5.2	-30.5	56.6	71.2	1.80	51.8	22.2	18.5	29.5	120.5	52.7	0.28	1.45	0.54	0.29	0.32
4	2.87	16.6	-30.8	66.1	80.9	1.39	43.7	40.3	-17.1	1.2	120.8	71.1	0.01	3.04	0.48	0.23	0.27
5	3.30	21.2	-29.5	57.5	71.7	1.24	53.4	33.8	-29.2	13.3	119.5	63.3	0.09	1.17	0.38	0.14	0.18
6	2.78	95.5	-30.1	58.5	72.9	1.09	38.7	14.0	41.0	48.1	120.1	44.1	0.30	0.89	0.39	0.15	0.15
7	3.61	31.9	-29.7	53.4	67.6	1.28	29.6	25.1	23.8	36.0	119.7	54.8	0.23	0.75	0.35	0.13	0.13
8	3.64	7.3	-29.6	52.9	67.1	1.49	50.8	27.6	20.1	33.5	119.6	57.3	0.25	0.88	0.41	0.17	0.20
9	3.43	5.5	-27.8	52.2	65.7	1.85	68.5	7.9	15.2	19.2	117.8	35.7	0.19	1.23	0.54	0.29	0.35
10	3.20	16.6	-26.6	57.6	70.5	0.70	26.8	18.3	35.1	44.3	116.6	44.9	0.16	0.47	0.22	0.05	0.06
11	2.99	6.5	-30.6	62.3	76.9	1.07	50.4	46.6	14.4	34.9	120.6	77.2	0.21	1.30	0.36	0.13	0.17
12	3.67	14.6	-29.4	68.2	82.3	1.20	39.7	47.9	-31.0	10.1	119.4	77.3	0.06	2.41	0.33	0.11	0.12
13	3.42	9.6	-30.7	58.5	73.1	1.75	53.2	4.0	29.4	31.4	120.7	34.8	0.28	1.50	0.51	0.26	0.30
14	3.18	27.5	-33.2	64.3	80.0	1.00	24.7	49.4	-10.1	11.2	123.2	82.6	0.06	1.78	0.31	0.10	0.11
15	3.41	9.8	-28.3	56.1	69.8	1.06	20.1	30.8	-6.5	8.3	118.3	59.1	0.05	0.89	0.31	0.10	0.10
16	3.22	20.7	-30.7	62.0	76.7	1.46	47.0	4.1	28.1	30.2	120.7	34.9	0.24	1.71	0.45	0.21	0.24
17	2.90	44.2	-31.7	55.8	70.9	0.91	42.8	49.6	24.9	46.2	121.7	81.4	0.24	0.66	0.31	0.10	0.13
18	3.26	9.8	-32.2	59.6	74.9	0.81	39.8	37.7	-1.6	15.8	122.2	69.8	0.07	0.91	0.25	0.06	0.08
19	4.38	9.0	-32.4	62.4	77.8	1.70	74.5	25.0	-8.8	3.4	122.4	57.3	0.02	1.83	0.39	0.15	0.19
20	3.44	32.8	-28.3	74.0	87.7	0.65	19.5	52.8	-25.2	3.0	118.3	81.1	0.01	4.70	0.19	0.04	0.04
21	3.76	20.9	-27.2	54.9	68.1	1.34	24.4	-1.9	-28.3	29.3	117.2	25.3	0.19	0.83	0.36	0.13	0.13
22	3.23	5.2	-31.0	59.3	74.1	1.60	49.1	35.1	36.0	52.5	121.0	66.1	0.41	1.10	0.50	0.25	0.28
23	3.16	67.9	-28.2	51.5	65.1	1.41	50.4	18.2	30.6	39.7	118.2	46.5	0.32	0.82	0.45	0.20	0.22
24	3.09	37.0	-31.1	67.0	81.8	1.28	43.0	14.4	5.1	12.3	121.1	45.5	0.09	2.84	0.41	0.17	0.20
25	3.87	43.7	-30.2	75.4	89.8	0.59	72.5	42.5	-26.6	7.5	120.2	72.7	0.02	57.20	0.15	0.02	0.07
26	3.50	14.6	-31.5	52.6	67.6	1.22	36.2	-7.0	22.4	18.8	121.5	24.5	0.12	0.86	0.35	0.12	0.14
27	4.19	5.5	-30.1	63.5	77.9	1.75	57.6	25.1	-8.4	3.8	120.1	55.2	0.03	1.99	0.42	0.17	0.20
28	4.26	11.2	-27.6	67.5	80.9	1.80	40.1	33.4	-16.5	0.7	117.6	61.0	0.01	2.67	0.42	0.18	0.19
29	3.65	8.3	-29.7	54.6	68.8	1.42	49.0	4.5	21.8	24.1	119.7	34.1	0.17	0.98	0.39	0.15	0.18
30	3.55	8.1	-29.3	55.2	69.3	1.65	66.2	-7.6	23.3	19.4	119.3	21.7	0.17	1.24	0.46	0.22	0.27
31	3.46	6.0	-31.0	52.2	67.1	2.11	30.8	12.1	21.4	27.6	121.0	43.2	0.31	1.39	0.61	0.37	0.38
32	3.22	3.9	-29.5	55.5	69.7	1.87	40.7	17.3	17.6	26.3	119.5	46.8	0.27	1.50	0.58	0.34	0.36
\bar{x}	3.44	20.2	-30.0	59.2	73.6	1.35	45.4	23.5	8.8	23.7	120.0	53.5	0.17	3.21	0.39	0.17	0.19
s	0.37	19.7	1.5	6.2	6.3	0.38	14.9	17.1	22.2	14.8	1.5	17.4	0.11	9.74	0.11	0.08	0.09
min	2.78	3.9	-33.2	51.5	65.1	0.59	19.5	-7.6	-31.0	0.7	116.6	21.7	0.01	0.47	0.15	0.02	0.04
max	4.38	95.5	-26.6	75.4	89.8	2.11	75.6	52.8	41.0	52.5	123.2	82.6	0.41	57.20	0.61	0.37	0.38

32.6 Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 141^\circ$

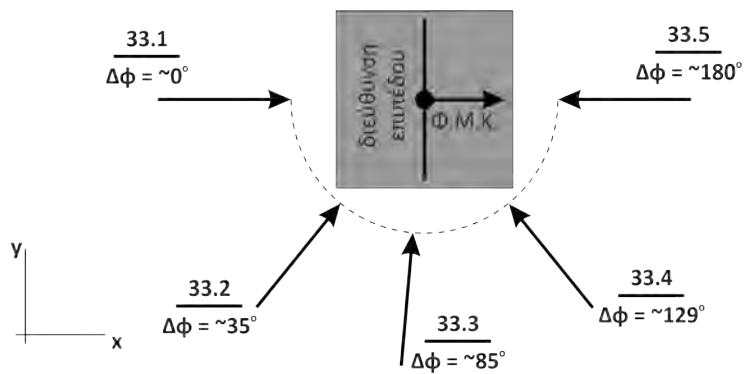
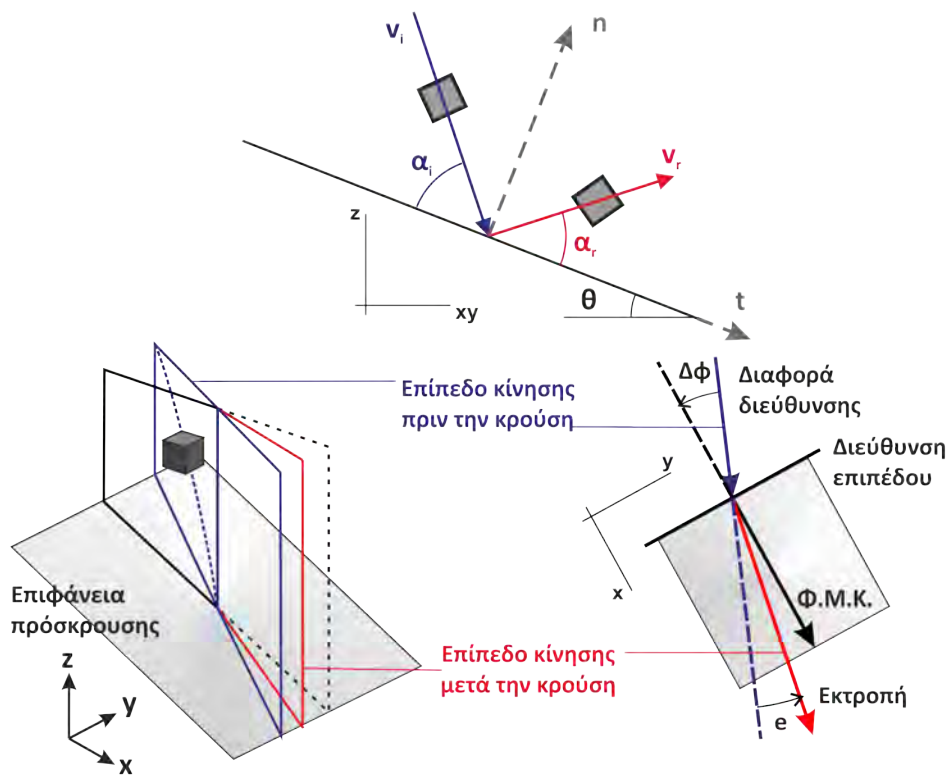
α/α	v_i [ms^{-1}]	ω_i [rs^{-1}]	azi_i [$^\circ$]	dip_i [$^\circ$]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	ω_r [rs^{-1}]	azi_r [$^\circ$]	dip_r [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	$\Delta\phi$ [$^\circ$]	e [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]	E_{COR} [-]	TE_{COR} [-]
1	3.31	11.3	-53.2	58.9	80.2	0.65	26.4	47.9	-17.7	2.2	143.2	101.1	0.01	1.15	0.20	0.04	0.05
2	3.73	45.2	-51.3	60.8	81.6	1.46	41.4	-6.6	47.9	44.8	141.3	44.8	0.28	1.91	0.39	0.15	0.17
3	3.24	86.7	-49.7	63.0	83.4	1.67	37.4	-8.8	53.7	49.5	139.7	40.9	0.39	2.92	0.52	0.27	0.26
4	3.46	4.8	-53.7	53.4	74.9	1.31	30.8	0.0	38.7	38.7	143.7	53.6	0.25	1.14	0.38	0.14	0.16
5	3.40	65.3	-48.6	71.3	91.5	0.24	17.4	-9.7	82.7	78.0	138.6	38.9	0.07	-0.57	0.07	0.00	0.01
6	3.00	33.6	-49.3	65.2	85.5	1.32	45.9	42.0	36.2	54.3	139.3	91.3	0.36	3.25	0.44	0.19	0.22
7	3.45	8.1	-54.4	57.4	79.1	1.11	41.8	-27.9	57.8	44.9	144.4	26.4	0.23	1.20	0.32	0.10	0.12
8	3.61	5.3	-54.0	53.2	74.7	1.52	74.4	18.3	42.3	51.0	144.0	72.3	0.34	1.00	0.42	0.18	0.24
9	3.24	23.0	-56.7	61.0	83.2	0.39	34.2	-29.7	38.3	24.7	146.7	27.1	0.05	0.93	0.12	0.01	0.03
10	2.94	51.3	-51.4	65.5	86.4	0.98	42.5	-11.6	69.2	63.6	141.4	39.8	0.30	2.36	0.33	0.11	0.14
11	3.53	12.9	-51.6	56.5	77.4	1.68	56.8	-15.3	46.2	38.9	141.6	36.4	0.31	1.70	0.48	0.23	0.27
12	3.07	17.1	-54.5	63.6	85.2	1.02	54.6	-11.0	61.4	56.1	144.5	43.5	0.28	2.24	0.33	0.11	0.16
13	3.02	9.2	-51.0	63.6	84.3	1.03	55.2	35.2	1.3	17.0	141.0	86.1	0.10	3.31	0.34	0.12	0.17
14	3.05	10.7	-51.9	63.7	84.7	0.99	56.7	35.4	1.1	16.9	141.9	87.3	0.10	3.37	0.33	0.11	0.16
15	3.89	27.8	-49.3	75.4	95.7	1.05	45.0	61.3	-18.6	4.6	139.3	110.7	0.02	-2.73	0.27	0.07	0.09
16	2.77	43.0	-48.0	66.1	86.1	0.97	24.9	-1.9	36.1	35.2	138.0	46.1	0.20	4.17	0.35	0.12	0.13
17	2.29	22.5	-48.0	53.9	73.8	0.56	14.8	52.3	-12.7	8.4	138.0	100.3	0.04	0.87	0.25	0.06	0.07
18	3.63	4.1	-54.3	53.4	75.0	1.65	95.2	6.3	39.4	42.5	144.3	60.6	0.32	1.30	0.45	0.21	0.31
19	3.01	7.3	-49.1	67.3	87.6	0.51	21.5	4.0	55.8	57.7	139.1	53.1	0.14	2.13	0.17	0.03	0.04
20	3.15	6.1	-55.2	56.8	78.7	1.07	53.5	47.9	27.7	47.7	145.2	103.1	0.26	1.16	0.34	0.12	0.16
21	3.42	4.5	-54.3	56.6	78.2	1.50	40.8	3.7	42.0	43.8	144.3	58.0	0.31	1.55	0.44	0.19	0.21
22	2.92	31.1	-48.6	66.7	86.9	1.26	46.5	21.8	47.0	57.2	138.6	70.4	0.36	4.27	0.43	0.19	0.22
23	2.80	14.1	-44.7	71.6	90.6	0.75	71.9	18.6	63.6	72.4	134.7	63.3	0.26	-8.03	0.27	0.07	0.17
24	2.94	19.2	-54.0	63.3	84.9	0.74	31.1	15.1	84.0	91.3	144.0	69.2	0.25	-0.06	0.25	0.06	0.08
\bar{x}	3.20	23.5	-51.5	62.0	82.9	1.06	44.2	12.0	38.5	43.4	141.5	63.5	0.22	1.27	0.33	0.12	0.15
s	0.35	21.0	2.9	6.0	5.6	0.40	18.5	25.6	28.3	22.2	2.9	25.0	0.12	2.45	0.11	0.07	0.08
min	2.29	4.1	-56.7	53.2	73.8	0.24	14.8	-29.7	-18.6	2.2	134.7	26.4	0.01	-8.03	0.07	0.00	0.01
max	3.89	86.7	-44.7	75.4	95.7	1.68	95.2	61.3	84.0	91.3	146.7	110.7	0.39	4.27	0.52	0.27	0.31

32.7 Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 180^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	ω_i [rs^{-1}]	azi_i [$^\circ$]	dip_i [$^\circ$]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	ω_r [rs^{-1}]	azi_r [$^\circ$]	dip_r [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	$\Delta\phi$ [$^\circ$]	e [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]	E_{COR} [-]	TE_{COR} [-]
1	3.25	13.2	-93.3	58.9	83.0	1.14	61.8	6.5	80.6	83.5	183.3	99.8	0.35	0.33	0.35	0.12	0.18
2	3.01	10.9	-97.8	66.2	90.1	0.80	44.9	104.0	34.3	57.8	187.8	201.8	0.23	0.85	0.27	0.07	0.10
3	3.50	6.0	-91.1	60.0	84.1	1.19	67.6	162.9	80.6	88.2	181.1	254.0	0.34	0.11	0.34	0.12	0.17
4	3.31	9.4	-91.3	59.2	83.3	0.57	22.7	158.1	26.1	35.6	181.3	249.4	0.10	1.19	0.17	0.03	0.04
5	3.67	5.1	-86.4	54.3	78.3	1.00	60.2	173.1	81.1	84.2	176.4	259.5	0.28	0.14	0.27	0.07	0.12
6	3.42	6.0	-90.1	57.6	81.7	1.23	62.6	161.2	71.5	79.7	180.1	251.3	0.36	0.45	0.36	0.13	0.18
7	3.93	6.1	-89.1	59.1	83.2	0.40	33.3	17.8	-9.0	1.2	179.1	107.0	0.00	0.87	0.10	0.01	0.02
8	3.33	26.7	-93.5	61.4	85.4	0.71	33.5	-15.4	38.1	31.3	183.5	78.1	0.11	2.29	0.21	0.05	0.06
9	3.59	6.2	-90.1	56.6	80.7	1.57	60.4	-70.1	72.0	49.2	180.1	20.0	0.34	1.77	0.44	0.19	0.23
10	3.36	4.1	-90.8	58.4	82.6	0.86	55.0	-167.7	72.2	66.7	180.8	-76.9	0.24	0.78	0.26	0.07	0.11
11	3.59	11.5	-88.2	58.1	82.2	0.72	74.3	27.3	-51.5	39.9	178.2	115.5	0.13	1.13	0.20	0.04	0.10
12	3.26	9.9	-92.6	59.7	83.8	0.38	14.8	126.5	49.7	69.5	182.6	219.1	0.11	0.38	0.12	0.01	0.02
13	3.52	4.8	-92.4	57.8	81.9	0.78	65.1	23.5	-0.3	9.9	182.4	115.9	0.04	1.53	0.22	0.05	0.10
14	3.21	37.0	-88.0	54.9	78.9	0.34	23.3	145.6	53.4	67.6	178.0	233.6	0.10	0.21	0.11	0.01	0.02
15	3.75	21.5	-91.0	56.7	80.8	1.41	51.4	15.3	54.0	60.7	181.0	106.3	0.33	1.16	0.38	0.14	0.17
16	2.97	6.4	-100.3	63.3	87.1	0.55	16.7	48.1	-60.3	41.9	190.3	148.4	0.12	2.72	0.18	0.03	0.04
17	3.66	4.9	-90.3	56.1	80.2	1.27	43.6	2.7	61.9	63.1	180.3	93.0	0.31	0.92	0.35	0.12	0.14
18	3.67	7.8	-87.5	58.6	82.7	0.43	13.3	78.4	-33.4	9.7	177.5	165.9	0.02	0.91	0.12	0.01	0.02
19	3.50	7.9	-89.0	57.6	81.7	0.24	44.9	87.4	-1.0	23.1	179.0	176.4	0.03	0.44	0.07	0.00	0.03
20	3.30	5.0	-91.1	58.4	82.5	0.37	40.8	178.5	14.0	14.6	181.1	269.7	0.03	0.84	0.11	0.01	0.04
21	3.33	48.0	-84.0	55.2	79.2	0.22	14.9	177.3	41.2	42.5	174.0	261.3	0.04	0.25	0.06	0.00	0.01
22	3.53	14.6	-93.2	62.3	86.4	0.85	34.0	-26.0	10.4	0.7	183.2	67.2	0.00	3.81	0.24	0.06	0.07
23	3.77	8.3	-86.7	56.5	80.6	0.89	20.8	-118.7	64.5	43.1	176.7	-32.0	0.16	1.06	0.24	0.06	0.06
24	3.38	4.6	-87.9	56.5	80.6	1.25	59.3	157.2	49.1	58.9	177.9	245.1	0.32	1.17	0.37	0.14	0.18
25	3.41	5.3	-88.8	56.0	80.2	0.69	47.7	25.2	-46.6	35.9	178.8	114.0	0.12	0.95	0.20	0.04	0.07
26	3.42	37.9	-91.8	63.5	87.6	0.51	23.6	127.2	-31.3	11.7	181.8	218.9	0.03	3.52	0.15	0.02	0.03
27	3.74	23.6	-86.6	58.7	82.8	0.47	31.0	-138.9	34.9	18.5	176.6	-52.3	0.04	0.94	0.12	0.02	0.03
28	3.39	10.0	-89.1	56.5	80.6	0.94	50.5	-127.4	62.0	42.4	179.1	-38.3	0.19	1.25	0.28	0.08	0.11
29	3.76	53.1	-89.5	68.2	92.3	0.54	41.2	-3.2	-6.0	7.4	179.5	86.3	0.02	-3.51	0.14	0.02	0.04
30	4.26	3.1	-89.7	64.2	88.3	0.65	42.8	-36.9	9.4	5.7	179.7	52.8	0.02	5.01	0.15	0.02	0.04
\bar{x}	3.49	14.0	-90.4	59.0	83.1	0.77	41.9	43.3	27.4	41.5	180.4	133.7	0.15	1.12	0.22	0.06	0.08
s	0.26	13.3	3.2	3.3	3.3	0.36	17.5	101.1	41.8	26.6	3.2	101.2	0.12	1.42	0.10	0.05	0.06
min	2.97	3.1	-100.3	54.3	78.3	0.22	13.3	-167.7	-60.3	0.7	174.0	-76.9	0.00	-3.51	0.06	0.00	0.01
max	4.26	53.1	-84.0	68.2	92.3	1.57	74.3	178.5	81.1	88.2	190.3	269.7	0.36	5.01	0.44	0.19	0.23

Παράρτημα 33

Παραβολική ρίψη κυβικών τεμαχίων σε επιφάνεια με κλίση $\theta = 43.5^\circ$



33.1 Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 0^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	ω_i [rs^{-1}]	azi_i [$^\circ$]	dip_i [$^\circ$]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	ω_r [rs^{-1}]	azi_r [$^\circ$]	dip_r [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	$\Delta\phi$ [$^\circ$]	e [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]	E_{COR} [-]	TE_{COR} [-]
1	3.76	3.5	89.7	56.6	17.3	2.82	123.5	86.8	-25.9	13.4	0.3	-2.9	0.58	0.76	0.75	0.56	0.72
2	4.37	6.2	88.4	62.5	23.2	3.12	55.8	91.0	-24.0	15.4	1.6	2.6	0.48	0.75	0.71	0.51	0.53
3	4.42	10.1	97.1	59.7	20.6	3.11	26.5	90.8	-25.8	13.6	-7.1	-6.3	0.47	0.73	0.70	0.50	0.50
4	4.16	2.0	87.2	62.5	23.2	3.03	15.7	84.7	-38.6	0.6	2.8	-2.5	0.02	0.79	0.73	0.53	0.53
5	4.03	6.7	90.5	59.7	20.3	3.39	35.7	91.2	-40.6	1.2	-0.5	0.7	0.05	0.90	0.84	0.71	0.72
6	4.12	6.6	89.9	60.9	21.5	3.74	30.0	89.7	-43.7	4.4	0.1	-0.2	0.19	0.97	0.91	0.82	0.83
7	4.32	4.0	91.3	60.6	21.3	3.39	35.3	91.6	-34.0	5.3	-1.3	0.3	0.20	0.84	0.79	0.62	0.63
8	3.60	14.8	90.3	62.5	23.2	2.94	33.9	91.3	-27.8	11.5	-0.3	1.0	0.42	0.87	0.82	0.67	0.68
9	3.90	20.6	87.0	67.6	28.3	2.60	31.8	87.1	-29.0	10.3	3.0	0.1	0.25	0.75	0.67	0.44	0.45
10	4.19	4.8	89.8	60.2	20.9	3.66	39.8	87.5	-38.0	1.3	0.2	-2.3	0.06	0.94	0.87	0.76	0.78
11	4.31	15.3	91.1	60.7	21.4	2.60	38.0	83.9	-32.8	6.4	-1.1	-7.1	0.18	0.64	0.60	0.36	0.38
12	4.27	6.9	92.5	61.1	21.8	3.96	55.3	90.2	-39.4	0.1	-2.5	-2.3	0.00	1.00	0.93	0.86	0.89
13	4.12	9.7	87.4	58.9	19.6	3.61	40.7	90.1	-42.4	3.0	2.6	2.7	0.14	0.93	0.87	0.77	0.78
14	4.69	2.6	90.5	62.5	23.2	3.86	47.1	89.4	-38.5	0.8	-0.5	-1.0	0.03	0.90	0.82	0.68	0.69
15	4.51	4.1	89.8	61.5	22.2	2.90	93.8	94.1	-24.7	14.6	0.2	4.3	0.43	0.67	0.64	0.41	0.48
16	3.84	79.3	86.4	60.7	21.4	3.01	114.2	92.1	-28.9	10.4	3.6	5.7	0.39	0.83	0.78	0.62	0.70
17	4.25	4.0	94.9	58.9	19.7	3.61	24.3	90.9	-26.1	13.3	-4.9	-4.0	0.58	0.88	0.85	0.72	0.73
18	4.08	7.2	89.4	58.5	19.1	3.85	77.5	91.6	-42.2	2.9	0.6	2.2	0.14	1.00	0.94	0.89	0.94
19	3.77	21.9	88.0	63.6	24.3	2.81	48.6	95.8	-34.5	4.7	2.0	7.8	0.15	0.81	0.74	0.55	0.58
20	3.72	24.2	89.0	65.2	25.8	2.86	14.4	94.0	-33.8	5.5	1.0	5.0	0.17	0.85	0.77	0.59	0.59
21	3.09	5.0	86.6	57.6	18.3	2.81	63.6	84.7	-34.7	4.5	3.4	-1.9	0.23	0.96	0.91	0.83	0.89
22	4.80	7.7	88.7	64.0	24.7	3.78	136.6	88.4	-36.1	3.2	1.3	-0.3	0.11	0.87	0.79	0.62	0.74
23	4.26	30.9	91.9	65.3	26.0	3.69	22.0	93.8	-39.8	0.5	-1.9	1.9	0.02	0.96	0.87	0.75	0.75
24	3.55	40.2	89.4	65.3	25.9	2.66	54.8	86.0	-23.5	15.8	0.6	-3.4	0.47	0.80	0.75	0.56	0.59
\bar{x}	4.09	14.1	89.9	61.5	22.2	3.24	52.5	89.9	-33.5	6.8	0.1	0.0	0.24	0.85	0.79	0.64	0.67
s	0.38	16.6	2.5	2.6	2.6	0.44	32.9	3.1	6.4	5.3	2.5	3.6	0.18	0.10	0.09	0.14	0.15
\min	3.09	2.0	86.4	56.6	17.3	2.60	14.4	83.9	-43.7	0.1	-7.1	-7.1	0.00	0.64	0.60	0.36	0.38
\max	4.80	79.3	97.1	67.6	28.3	3.96	136.6	95.8	-23.5	15.8	3.6	7.8	0.58	1.00	0.94	0.89	0.94

33.2 Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 51^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	ω_i [rs^{-1}]	azi_i [$^\circ$]	dip_i [$^\circ$]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	ω_r [rs^{-1}]	azi_r [$^\circ$]	dip_r [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	$\Delta\phi$ [$^\circ$]	e [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]	E_{COR} [-]	TE_{COR} [-]
1	4.08	15.3	41.6	61.3	33.3	3.57	41.5	65.4	-20.7	15.3	48.4	23.8	0.42	1.01	0.88	0.77	0.78
2	2.89	57.0	40.6	66.5	39.0	2.71	83.7	61.7	-35.8	0.7	49.4	21.1	0.02	1.20	0.94	0.88	0.95
3	4.05	8.6	40.0	61.8	34.7	3.20	26.6	62.2	-17.9	17.3	50.0	22.2	0.41	0.92	0.79	0.62	0.63
4	3.84	39.7	40.5	63.4	36.0	3.11	34.2	69.5	-17.0	19.8	49.5	29.0	0.47	0.94	0.81	0.66	0.66
5	3.73	44.7	36.4	62.5	37.1	3.25	63.4	62.0	-35.2	0.0	53.6	25.6	0.00	1.09	0.87	0.76	0.78
6	3.73	44.7	36.4	62.5	37.1	2.90	63.4	62.0	-23.9	11.3	53.6	25.6	0.25	0.96	0.78	0.60	0.63
7	3.90	24.1	36.3	63.4	38.1	3.33	78.3	67.7	-22.3	14.1	53.7	31.4	0.34	1.05	0.85	0.73	0.78
8	3.17	18.7	37.9	62.6	36.5	2.86	28.5	61.1	-35.4	0.4	52.1	23.2	0.01	1.12	0.90	0.81	0.82
9	3.93	21.2	36.5	62.3	36.8	3.21	30.5	66.4	-29.7	6.5	53.5	29.8	0.15	1.01	0.82	0.67	0.67
10	3.93	21.2	36.5	62.3	36.8	3.09	30.5	66.4	-25.2	11.0	53.5	29.8	0.25	0.96	0.78	0.62	0.62
11	4.11	10.1	40.2	58.1	30.8	3.55	97.7	58.2	-25.1	9.1	49.8	18.0	0.27	0.99	0.86	0.75	0.83
12	4.46	16.5	35.7	62.0	37.0	3.18	67.0	60.2	-16.0	18.7	54.3	24.6	0.38	0.85	0.71	0.51	0.54
13	3.85	21.2	38.7	64.0	37.4	2.95	79.3	65.2	-16.1	19.9	51.3	26.5	0.43	0.91	0.77	0.59	0.65
14	3.72	65.1	39.8	62.4	35.3	2.91	98.4	59.7	-22.0	12.6	50.2	19.9	0.30	0.94	0.78	0.61	0.69
15	4.03	15.8	35.1	63.6	39.0	3.13	42.7	61.1	-30.0	4.9	54.9	26.0	0.11	0.99	0.78	0.60	0.62
16	3.48	16.8	39.7	63.1	36.1	3.15	59.7	69.7	-21.9	15.0	50.3	30.1	0.40	1.08	0.91	0.82	0.86
17	4.00	8.8	39.3	62.1	35.3	3.16	47.3	69.7	-18.2	18.6	50.7	30.4	0.44	0.92	0.79	0.62	0.64
18	4.44	17.6	34.7	62.5	38.0	3.06	28.7	55.8	-32.7	0.7	55.3	21.0	0.01	0.88	0.69	0.48	0.48
19	3.46	20.4	41.3	62.3	34.5	2.90	98.9	59.3	-24.1	10.4	48.7	18.0	0.27	1.00	0.84	0.70	0.82
20	3.62	44.7	39.3	57.4	30.6	3.09	126.1	54.4	-26.1	6.9	50.7	15.1	0.20	0.99	0.86	0.73	0.89
21	3.37	7.3	44.8	67.0	37.7	2.72	77.2	63.1	-25.6	9.9	45.2	18.2	0.23	1.00	0.81	0.65	0.73
22	4.13	8.6	38.7	57.8	31.3	3.30	26.4	68.1	-22.9	13.6	51.3	29.4	0.36	0.91	0.80	0.64	0.65
23	3.84	88.2	42.9	60.1	31.6	2.90	57.0	59.6	-20.6	14.0	47.1	16.7	0.35	0.86	0.75	0.57	0.56
24	3.78	57.7	35.7	60.2	35.2	3.55	52.9	62.4	-39.8	4.6	54.3	26.7	0.13	1.15	0.94	0.89	0.88
\bar{x}	3.81	28.9	38.7	62.1	35.6	3.12	60.0	63.0	-25.2	10.6	51.3	24.3	0.26	0.99	0.82	0.68	0.72
s	0.35	20.9	2.6	2.2	2.5	0.23	27.3	4.2	6.6	6.3	2.6	4.8	0.15	0.09	0.06	0.10	0.12
min	2.89	7.3	34.7	57.4	30.6	2.71	26.4	54.4	-39.8	0.0	45.2	15.1	0.00	0.85	0.69	0.48	0.48
max	4.46	88.2	44.8	67.0	39.0	3.57	126.1	69.7	-16.0	19.9	55.3	31.4	0.47	1.20	0.94	0.89	0.95

33.3 Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 85^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	ω_i [rs^{-1}]	azi_i [$^\circ$]	dip_i [$^\circ$]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	ω_r [rs^{-1}]	azi_r [$^\circ$]	dip_r [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	$\Delta\phi$ [$^\circ$]	e [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]	E_{COR} [-]	TE_{COR} [-]
1	3.78	15.1	2.7	62.0	59.5	3.63	57.1	57.0	-31.9	5.3	87.3	54.2	0.10	1.89	0.96	0.92	0.95
2	3.64	46.8	2.3	64.6	62.6	2.37	35.5	35.0	-17.2	10.2	87.7	32.8	0.13	1.39	0.65	0.42	0.43
3	3.67	2.6	3.3	66.1	63.1	2.78	48.6	53.3	-15.0	20.9	86.7	50.0	0.30	1.56	0.76	0.57	0.60
4	3.83	27.6	9.5	56.2	47.7	2.81	61.8	44.7	-10.2	22.3	80.5	35.2	0.38	1.01	0.73	0.54	0.57
5	3.99	77.6	-1.9	59.3	61.0	2.60	61.9	43.5	-3.6	28.3	91.9	45.3	0.35	1.19	0.65	0.43	0.44
6	4.28	21.9	4.1	61.6	57.8	2.67	115.9	44.9	-33.2	0.7	85.9	40.8	0.01	1.17	0.62	0.39	0.50
7	3.63	20.5	6.3	61.7	56.0	2.61	76.4	52.1	-6.5	29.0	83.7	45.8	0.42	1.12	0.72	0.52	0.58
8	2.93	7.0	4.6	72.2	68.1	1.47	89.4	63.1	-8.9	30.0	85.4	58.5	0.27	1.16	0.50	0.25	0.39
9	4.38	46.9	1.5	60.4	59.1	3.26	41.6	42.4	-10.2	21.1	88.5	40.9	0.31	1.35	0.74	0.55	0.56
10	3.71	32.1	5.7	60.5	55.4	2.95	104.1	53.2	-35.0	0.9	84.3	47.5	0.01	1.40	0.79	0.63	0.74
11	3.42	11.8	7.0	58.5	52.3	2.66	34.9	43.9	-29.4	2.6	83.0	36.9	0.05	1.27	0.78	0.60	0.62
12	3.94	19.6	2.4	60.5	58.3	2.98	42.9	40.7	-17.3	13.2	87.6	38.2	0.20	1.40	0.76	0.57	0.59
13	3.47	22.3	12.5	66.9	55.9	2.45	117.6	43.3	-42.2	10.4	77.5	30.8	0.16	1.24	0.71	0.50	0.67
14	2.92	65.6	3.5	60.6	57.5	2.58	74.9	52.6	-35.7	0.0	86.5	49.1	0.00	1.64	0.88	0.78	0.81
15	3.83	51.5	7.9	58.1	51.0	3.03	67.1	53.1	-11.5	24.3	82.1	45.2	0.42	1.14	0.79	0.62	0.65
16	3.37	21.5	4.9	66.4	62.0	2.51	74.5	52.4	-5.0	30.6	85.1	47.5	0.43	1.36	0.74	0.55	0.62
17	4.10	11.6	5.8	62.9	57.6	3.09	53.4	56.2	-19.8	17.0	84.2	50.4	0.26	1.35	0.75	0.57	0.59
18	4.20	24.5	1.4	61.8	60.5	2.53	77.1	36.4	-19.3	8.8	88.6	35.0	0.11	1.21	0.60	0.36	0.41
19	4.30	9.0	6.1	56.9	51.4	3.10	38.5	32.2	-4.0	21.6	83.9	26.1	0.34	1.08	0.72	0.52	0.53
20	3.91	25.7	10.0	59.2	50.3	2.01	46.1	45.9	-18.0	14.9	80.0	35.9	0.17	0.78	0.51	0.26	0.28
21	4.22	2.4	6.9	64.4	58.2	3.46	126.2	45.4	-16.4	16.3	83.1	38.5	0.27	1.49	0.82	0.67	0.80
22	3.09	11.1	6.4	66.1	60.4	2.17	74.5	53.8	-9.7	26.4	83.6	47.4	0.36	1.27	0.70	0.49	0.58
23	4.28	7.3	6.0	62.8	57.4	2.29	100.0	59.4	6.3	44.2	84.0	53.3	0.44	0.71	0.53	0.29	0.37
\bar{x}	3.78	25.3	5.2	62.1	57.5	2.70	70.4	48.0	-17.1	17.3	84.8	42.8	0.24	1.27	0.71	0.52	0.58
s	0.42	19.5	3.1	3.6	4.6	0.47	26.9	7.8	12.1	11.3	3.1	8.1	0.14	0.25	0.11	0.15	0.15
min	2.92	2.4	-1.9	56.2	47.7	1.47	34.9	32.2	-42.2	0.0	77.5	26.1	0.00	0.71	0.50	0.25	0.28
max	4.38	77.6	12.5	72.2	68.1	3.63	126.2	63.1	6.3	44.2	91.9	58.5	0.44	1.89	0.96	0.92	0.95

33.4 Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 129^\circ$

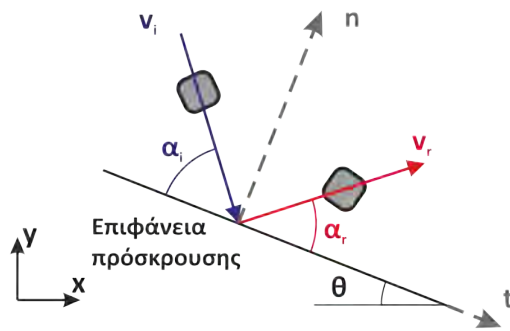
α/α	v_i [ms^{-1}]	ω_i [rs^{-1}]	azi_i [$^\circ$]	dip_i [$^\circ$]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	ω_r [rs^{-1}]	azi_r [$^\circ$]	dip_r [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	$\Delta\phi$ [$^\circ$]	e [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]	E_{COR} [-]	TE_{COR} [-]
1	3.99	27.0	-41.7	64.2	98.9	2.00	62.5	62.4	-8.1	34.6	131.7	104.1	0.29	-2.68	0.50	0.25	0.29
2	4.11	43.9	-34.4	60.2	90.7	1.12	19.1	14.6	14.1	28.7	124.4	49.0	0.13	-20.90	0.27	0.07	0.08
3	3.16	13.0	-44.1	68.9	104.7	1.86	107.2	58.5	-6.3	35.2	134.1	102.6	0.35	-1.90	0.59	0.35	0.52
4	4.07	75.7	-42.6	63.7	98.8	0.88	14.2	67.7	-31.2	12.7	132.6	110.3	0.05	-1.38	0.22	0.05	0.05
5	3.83	34.2	-41.1	65.7	100.0	2.00	86.8	74.6	-4.7	40.4	131.1	115.7	0.34	-2.28	0.52	0.27	0.35
6	3.96	4.2	-37.2	58.9	91.1	1.48	99.7	65.9	-0.6	42.9	127.2	103.1	0.25	-14.56	0.37	0.14	0.23
7	4.03	14.6	-41.4	62.0	96.5	1.96	141.4	37.8	-11.5	21.0	131.4	79.2	0.18	-4.04	0.49	0.24	0.42
8	4.27	27.7	-37.8	63.0	95.5	1.69	60.1	76.4	6.8	52.1	127.8	114.3	0.31	-2.52	0.39	0.16	0.18
9	4.60	2.1	-39.1	59.2	92.4	2.44	71.0	53.4	-11.3	28.5	129.1	92.5	0.25	-11.01	0.53	0.28	0.32
10	3.71	60.9	-39.9	75.7	109.4	1.37	89.0	13.1	-34.4	21.1	129.9	53.1	0.14	-1.04	0.37	0.14	0.21
11	4.14	33.1	-45.4	65.8	102.3	1.69	56.5	54.7	8.9	49.2	135.4	100.0	0.32	-1.26	0.41	0.17	0.19
12	3.65	67.9	-36.4	70.4	102.1	1.51	78.2	36.1	3.3	34.8	126.4	72.5	0.24	-1.62	0.41	0.17	0.23
13	3.93	6.6	-40.2	62.5	96.4	2.30	85.7	43.9	-2.8	33.0	130.2	84.1	0.32	-4.43	0.59	0.34	0.41
14	4.23	33.0	-40.4	63.1	97.1	1.95	13.7	22.5	10.5	32.2	130.4	62.9	0.25	-3.16	0.46	0.21	0.21
15	4.38	8.9	-40.3	62.0	95.8	1.66	49.4	22.9	-6.2	15.8	130.3	63.1	0.10	-3.59	0.38	0.14	0.16
16	3.98	54.8	-32.9	63.3	92.7	1.28	74.3	14.4	-8.0	6.5	122.9	47.3	0.04	-6.68	0.32	0.10	0.15
17	4.00	33.8	-37.6	65.5	97.8	1.12	22.5	59.3	-40.6	1.2	127.6	96.9	0.01	-2.05	0.28	0.08	0.08
18	3.90	26.9	-43.7	61.9	97.5	1.45	53.1	73.5	-9.0	35.9	133.7	117.2	0.22	-2.29	0.37	0.14	0.16
19	3.92	12.7	-42.4	64.7	99.8	1.73	125.4	55.1	-29.8	10.7	132.4	97.5	0.08	-2.57	0.44	0.20	0.35
20	3.80	28.8	-36.6	64.4	96.2	0.70	121.5	20.0	-10.2	9.4	126.6	56.6	0.03	-1.68	0.18	0.03	0.19
21	3.54	45.3	-37.2	63.4	95.5	2.07	90.9	24.9	-25.7	2.1	127.2	62.1	0.02	-6.07	0.58	0.34	0.43
22	3.84	72.2	-38.3	61.2	94.0	1.30	99.9	47.2	-26.7	10.6	128.3	85.5	0.06	-4.78	0.34	0.12	0.21
23	4.49	10.3	-39.5	60.6	94.1	2.17	97.8	27.8	-7.9	17.9	129.5	67.3	0.15	-6.46	0.48	0.23	0.30
24	4.01	73.4	-35.9	64.3	95.7	2.13	172.3	32.5	-23.1	6.1	125.9	68.5	0.06	-5.32	0.53	0.28	0.53
\bar{x}	3.98	33.8	-39.4	63.9	97.3	1.66	78.8	44.1	-10.6	24.3	129.4	83.6	0.17	-4.76	0.42	0.19	0.26
s	0.30	22.9	3.0	3.6	4.2	0.44	39.2	20.5	14.6	14.7	3.0	22.2	0.11	4.60	0.11	0.09	0.13
min	3.16	2.1	-45.4	58.9	90.7	0.70	13.7	13.1	-40.6	1.2	122.9	47.3	0.01	-20.90	0.18	0.03	0.05
max	4.60	75.7	-32.9	75.7	109.4	2.44	172.3	76.4	14.1	52.1	135.4	117.2	0.35	-1.04	0.59	0.35	0.53

33.5 Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 180^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	ω_i [rs^{-1}]	azi_i [$^\circ$]	dip_i [$^\circ$]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	ω_r [rs^{-1}]	azi_r [$^\circ$]	dip_r [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	$\Delta\phi$ [$^\circ$]	e [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]	E_{COR} [-]	TE_{COR} [-]
1	3.20	35.6	-87.0	65.5	109.6	1.61	72.4	109.4	-7.6	34.8	177.0	196.4	0.31	-1.23	0.50	0.25	0.32
2	3.56	49.5	-93.1	62.1	106.2	1.23	63.9	78.0	-12.2	31.3	183.1	171.2	0.19	-1.06	0.35	0.12	0.16
3	3.33	51.9	-92.2	66.4	110.6	0.71	40.5	113.7	-27.4	14.2	182.2	205.9	0.06	-0.59	0.21	0.05	0.07
4	3.51	53.7	-95.7	67.3	111.3	1.19	72.6	105.4	8.6	51.7	185.7	201.1	0.29	-0.58	0.34	0.11	0.17
5	4.01	62.2	-88.5	64.1	108.2	0.75	47.6	55.1	18.6	57.1	178.5	143.6	0.17	-0.33	0.19	0.04	0.05
6	3.87	18.6	-92.2	69.3	113.4	1.76	97.9	122.4	-17.9	21.5	182.2	214.6	0.18	-1.07	0.46	0.21	0.30
7	3.49	37.0	-86.6	64.8	108.9	1.19	88.4	121.7	2.3	41.8	176.6	208.3	0.24	-0.79	0.34	0.12	0.21
7	3.49	37.0	-86.6	64.8	108.9	1.19	88.4	121.7	2.3	41.8	176.6	208.3	0.24	-0.79	0.34	0.12	0.21
9	4.10	3.1	-84.7	61.9	106.0	1.82	74.4	86.0	4.5	48.6	174.7	170.8	0.35	-1.07	0.44	0.20	0.25
10	3.86	21.3	-93.7	61.0	105.1	1.27	43.7	131.3	-6.5	29.6	183.7	225.0	0.17	-1.10	0.33	0.11	0.13
11	3.38	51.2	-87.8	68.1	112.2	1.23	53.9	125.3	-2.3	36.1	177.8	213.2	0.23	-0.78	0.36	0.13	0.17
12	3.93	7.9	-90.1	61.3	105.4	1.14	43.6	52.6	17.2	54.9	180.1	142.8	0.25	-0.62	0.29	0.08	0.10
13	3.26	5.5	-95.2	61.8	105.8	1.08	65.4	102.5	-11.1	32.4	185.2	197.8	0.18	-1.03	0.33	0.11	0.17
14	3.59	21.4	-91.9	65.1	109.2	0.89	49.4	80.2	-13.7	30.0	181.9	172.1	0.13	-0.66	0.25	0.06	0.09
15	3.58	58.2	-89.4	61.6	105.7	1.28	91.2	82.9	29.1	73.1	179.4	172.2	0.36	-0.39	0.36	0.13	0.22
16	3.89	37.4	-88.2	66.0	110.2	0.95	82.5	116.5	-31.6	9.4	178.2	204.7	0.04	-0.70	0.25	0.06	0.13
17	3.93	22.6	-89.0	62.7	106.9	1.38	79.8	71.8	13.7	56.4	179.0	160.8	0.30	-0.67	0.35	0.12	0.18
18	3.34	27.9	-92.4	63.3	107.4	1.31	37.7	64.0	-2.2	38.9	182.4	156.4	0.26	-1.02	0.39	0.15	0.17
19	3.30	21.9	-87.3	67.3	111.4	1.72	100.6	118.9	-21.5	18.9	177.3	206.2	0.18	-1.35	0.52	0.27	0.41
20	3.79	45.8	-82.5	63.6	107.5	1.46	93.5	116.7	-11.2	29.8	172.5	199.2	0.20	-1.11	0.38	0.15	0.23
21	3.84	14.9	-91.7	61.8	105.9	1.15	36.5	78.8	22.0	65.6	181.7	170.5	0.28	-0.45	0.30	0.09	0.10
22	4.09	72.7	-91.9	59.3	103.4	2.12	28.0	51.8	3.9	41.2	181.9	143.6	0.35	-1.68	0.52	0.27	0.26
23	3.62	35.9	-88.8	59.6	103.7	1.93	9.2	122.2	-4.0	35.4	178.8	211.0	0.32	-1.83	0.53	0.28	0.28
24	3.54	65.7	-91.5	63.9	108.1	0.69	28.4	78.0	8.8	52.3	181.5	169.5	0.16	-0.39	0.20	0.04	0.05
\bar{x}	3.65	35.8	-89.9	63.9	108.0	1.29	62.1	96.1	-1.6	39.4	179.9	186.0	0.23	-0.89	0.36	0.14	0.18
s	0.27	19.3	3.2	2.6	2.6	0.37	25.0	25.3	15.2	15.5	3.2	24.8	0.08	0.38	0.10	0.07	0.09
min	3.20	3.1	-95.7	59.3	103.4	0.69	9.2	51.8	-31.6	9.4	172.5	142.8	0.04	-1.83	0.19	0.04	0.05
max	4.10	72.7	-82.5	69.3	113.4	2.12	100.6	131.3	29.1	73.1	185.7	225.0	0.36	-0.33	0.53	0.28	0.41

Παράρτημα 34

Επιτόπου δοκιμές στην Σπηλιά Νταβέλη

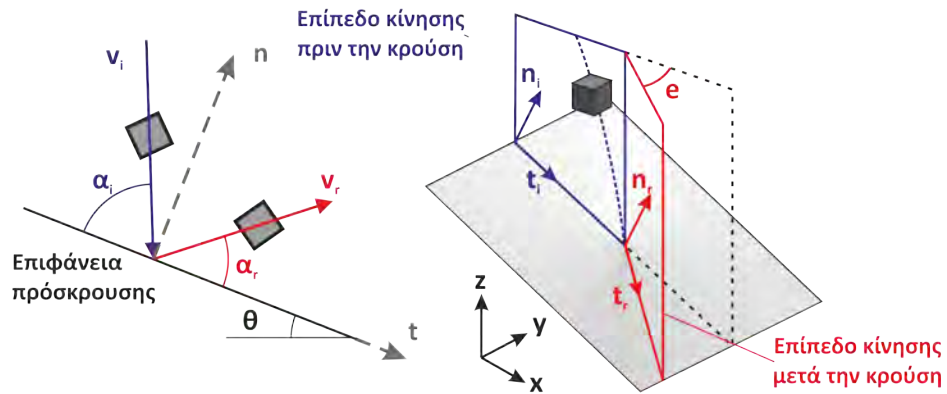


34.1 Κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης $\theta = 30^\circ$

α/α	τέμαχος	v_i [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	v_{COR} [-]	η_{COR} [-]	t_{COR} [-]
1	1	8.58	4.81	40.7	24.1	0.56	0.35	0.68
2		6.45	5.81	23.8	18.6	0.90	0.71	0.93
3		7.54	4.71	45.6	14.5	0.62	0.22	0.87
4		5.71	5.36	7.6	20.5	0.94	2.47	0.89
5	2	7.79	5.12	49.3	11.6	0.66	0.17	0.99
6		5.87	5.13	17.1	16.9	0.87	0.86	0.88
7		6.76	6.42	18.1	35.8	0.95	1.79	0.81
8		7.68	4.35	46.8	23.1	0.57	0.31	0.76
9		4.88	4.09	9.5	20.0	0.84	1.74	0.80
10	3	7.80	4.70	44.3	17.3	0.60	0.26	0.80
11		5.98	4.67	14.2	19.7	0.78	1.08	0.76
12		7.79	4.31	45.4	13.3	0.55	0.18	0.77
13		5.64	4.73	5.5	23.7	0.84	3.52	0.77
14	4	7.83	4.63	46.4	10.5	0.59	0.15	0.84
15		5.19	4.25	11.6	20.6	0.82	1.43	0.78
16		8.17	4.84	45.7	6.9	0.59	0.10	0.84
17		5.88	5.79	13.2	10.2	0.99	0.76	1.00
18		4.85	3.43	31.6	13.5	0.71	0.31	0.81
19		5.93	3.70	34.3	25.8	0.62	0.48	0.68
20		6.09	4.48	33.1	33.4	0.74	0.74	0.73
21	5	8.33	5.11	45.5	30.1	0.61	0.43	0.76
22		8.36	5.32	48.0	4.4	0.64	0.07	0.95
23		4.83	4.52	7.1	24.2	0.94	3.09	0.86
24		5.78	5.18	17.9	10.2	0.89	0.51	0.93
25	6	8.14	6.13	42.8	13.4	0.75	0.26	1.00
26		5.40	5.11	14.3	7.6	0.95	0.51	0.97
27		6.45	5.96	11.3	33.0	0.92	2.56	0.79
28		7.55	4.88	44.7	13.1	0.65	0.21	0.89
29		6.95	4.38	34.2	24.4	0.63	0.46	0.70
\bar{x}		6.70	4.89	29.3	18.6	0.75	0.89	0.84
s		1.18	0.68	15.5	8.1	0.14	0.94	0.09
min		4.83	3.43	5.5	4.4	0.55	0.07	0.68
max		8.58	6.42	49.3	35.8	0.99	3.52	1.00

Παράρτημα 35

Επιτόπου δοκιμές στο Θέατρο Βράχων - Θέση 1: $\theta = 55^\circ$



35.1 Κυβικά τεμάχια

α/α	$v_{t,i}$ [ms^{-1}]	$v_{n,i}$ [ms^{-1}]	v_i [ms^{-1}]	$v_{t,r}$ [ms^{-1}]	$v_{n,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	e [$^\circ$]	η_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	5.59	-3.20	6.44	2.68	1.18	2.93	29.7	22.5	10.3	0.37	0.48	0.46
2	6.05	-3.39	6.93	4.72	0.79	4.79	29.1	8.9	-1.8	0.23	0.78	0.69
3	5.93	-3.54	6.90	3.38	0.87	3.50	30.8	13.3	-4.7	0.25	0.57	0.51
4	7.07	-3.48	7.88	3.57	1.90	4.04	26.2	28.0	0.7	0.54	0.50	0.51
5	6.64	-3.49	7.50	4.24	1.49	4.49	27.7	19.4	-14.2	0.43	0.64	0.60
6	7.18	-3.54	8.01	3.94	0.84	4.03	26.0	11.0	3.4	0.24	0.55	0.50
7	6.28	-3.35	7.12	4.99	1.03	5.10	28.0	11.2	-4.0	0.31	0.80	0.72
8	6.76	-3.69	7.70	4.69	1.18	4.83	28.5	13.5	3.2	0.32	0.69	0.63
9	6.53	-3.58	7.45	4.23	1.50	4.49	28.6	18.7	-0.9	0.42	0.65	0.60
10	6.88	-3.59	7.76	3.89	1.70	4.25	27.4	22.5	-0.2	0.47	0.57	0.55
11	6.46	-3.51	7.35	2.88	1.45	3.22	28.4	25.4	1.6	0.41	0.45	0.44
12	6.88	-3.70	7.81	4.83	2.07	5.26	28.2	22.4	0.0	0.56	0.70	0.67
13	7.02	-3.91	8.03	4.85	1.12	4.97	29.0	12.5	-12.5	0.29	0.69	0.62
14	6.33	-3.40	7.19	4.84	1.72	5.14	28.2	18.6	-0.3	0.51	0.76	0.71
\bar{x}	6.54	-3.53	7.43	4.12	1.35	4.36	28.3	17.7	-1.4	0.38	0.63	0.59
s	0.45	0.17	0.46	0.73	0.39	0.71	1.2	5.8	6.0	0.11	0.11	0.09
min	5.59	-3.91	6.44	2.68	0.79	2.93	26.0	8.9	-14.2	0.23	0.45	0.44
max	7.18	-3.20	8.03	4.99	2.07	5.26	30.8	28.0	10.3	0.56	0.80	0.72

35.2 Πολυεδρικά τεμάχια

α/α	$v_{t,i}$ [ms ⁻¹]	$v_{n,i}$ [ms ⁻¹]	v_i [ms ⁻¹]	$v_{t,r}$ [ms ⁻¹]	$v_{n,r}$ [ms ⁻¹]	v_r [ms ⁻¹]	α_i [°]	α_r [°]	e [°]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	6.13	-3.81	7.21	3.46	0.90	3.57	31.8	13.6	12.5	0.24	0.56	0.50
2	6.33	-3.77	7.36	4.65	1.08	4.77	30.7	12.4	0.6	0.29	0.73	0.65
3	6.54	-3.62	7.47	4.45	0.65	4.50	28.8	7.7	0.3	0.18	0.68	0.60
4	6.60	-3.30	7.38	4.72	1.28	4.89	26.4	14.3	-6.5	0.39	0.71	0.66
5	6.63	-3.22	7.37	4.16	2.44	4.82	25.9	30.3	-4.9	0.76	0.63	0.65
6	6.84	-3.70	7.29	4.04	2.52	4.76	28.4	31.9	12.3	0.68	0.59	0.65
7	6.45	-3.30	7.24	4.94	0.59	4.98	27.0	6.2	-2.6	0.18	0.77	0.69
8	6.49	-3.88	7.56	3.95	1.00	4.08	30.8	13.4	4.7	0.26	0.61	0.54
9	6.46	-3.49	7.34	5.01	1.03	5.11	28.3	11.0	-4.5	0.29	0.78	0.70
10	6.57	-3.51	7.45	4.46	1.94	4.86	28.0	22.4	-7.5	0.55	0.68	0.65
11	6.69	-3.73	7.66	3.85	1.05	3.99	29.0	14.2	-3.6	0.28	0.58	0.52
12	6.94	-3.67	7.84	5.57	1.17	5.69	27.7	11.4	10.8	0.32	0.80	0.72
13	6.72	-3.71	7.67	5.07	0.49	5.09	28.8	4.9	5.2	0.13	0.75	0.66
14	6.81	-3.28	7.56	3.89	0.89	3.99	25.5	12.1	-8.1	0.27	0.57	0.53
15	7.01	-3.39	7.78	4.35	1.21	4.52	25.7	14.9	1.5	0.36	0.62	0.58
\bar{x}	6.61	-3.56	7.48	4.44	1.22	4.64	28.2	14.7	0.7	0.34	0.67	0.62
s	0.23	0.22	0.19	0.56	0.61	0.54	1.9	7.8	7.1	0.18	0.08	0.07
min	6.13	-3.88	7.21	3.46	0.49	3.57	25.5	4.9	-8.1	0.13	0.56	0.50
max	7.01	-3.22	7.84	5.57	2.52	5.69	31.8	31.9	12.5	0.76	0.80	0.72

35.3 Σφαιρικά τεμάχια

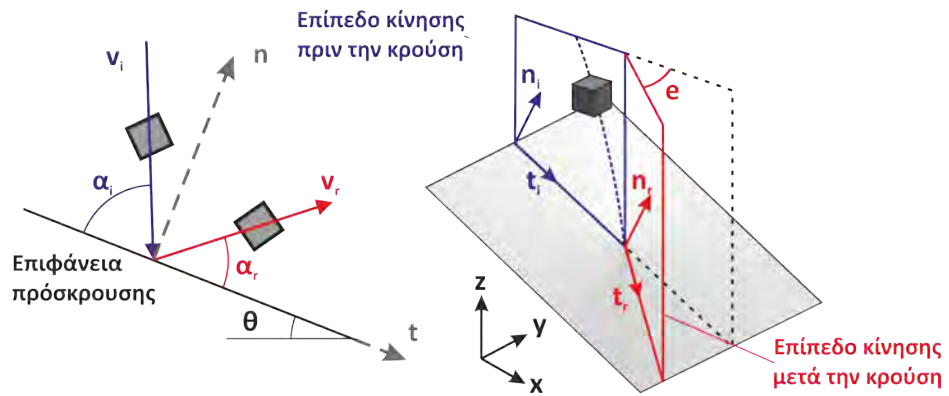
α/α	$v_{t,i}$ [ms ⁻¹]	$v_{n,i}$ [ms ⁻¹]	v_i [ms ⁻¹]	$v_{t,r}$ [ms ⁻¹]	$v_{n,r}$ [ms ⁻¹]	v_r [ms ⁻¹]	α_i [°]	α_r [°]	e [°]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	6.34	-3.66	7.32	3.91	0.84	4.00	29.9	11.3	-0.4	0.23	0.62	0.55
2	5.81	-3.23	6.65	4.98	1.27	5.14	29.0	13.7	-11.7	0.39	0.86	0.77
3	6.98	-3.70	7.90	4.92	2.13	5.36	27.8	22.4	-7.6	0.57	0.70	0.68
4	6.52	-3.36	7.34	4.69	1.28	4.87	27.1	14.5	-6.9	0.38	0.72	0.66
5	6.36	-3.38	7.20	4.15	1.80	4.53	27.8	22.6	9.3	0.53	0.65	0.63
6	6.44	-3.53	7.34	3.27	2.19	3.94	28.6	32.8	10.2	0.62	0.51	0.54
7	6.81	-3.82	7.81	3.73	1.39	3.99	29.2	19.6	2.4	0.36	0.55	0.51
8	6.47	-3.80	7.50	4.61	0.91	4.69	30.4	10.6	6.5	0.24	0.71	0.63
9	6.66	-3.63	7.59	2.80	2.44	3.71	28.6	41.0	2.5	0.67	0.42	0.49
10	6.43	-3.52	7.33	3.46	2.90	4.51	28.7	40.0	3.2	0.82	0.54	0.61
\bar{x}	6.48	-3.56	7.40	4.05	1.72	4.47	28.7	22.9	0.7	0.48	0.63	0.61
s	0.31	0.20	0.35	0.74	0.68	0.55	1.0	11.4	7.4	0.19	0.13	0.09
min	5.81	-3.82	6.65	2.80	0.84	3.71	27.1	10.6	-11.7	0.23	0.42	0.49
max	6.98	-3.23	7.90	4.98	2.90	5.36	30.4	41.0	10.2	0.82	0.86	0.77

35.4 Φυσικά - ακανόνιστα τεμάχια

α/α	$v_{t,i}$ [ms ⁻¹]	$v_{n,i}$ [ms ⁻¹]	v_i [ms ⁻¹]	$v_{t,r}$ [ms ⁻¹]	$v_{n,r}$ [ms ⁻¹]	v_r [ms ⁻¹]	α_i [°]	α_r [°]	e [°]	η_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	6.25	-3.29	7.06	5.00	0.52	5.03	27.6	5.6	19.2	0.16	0.80	0.71
2	7.00	-3.40	7.78	5.79	2.04	6.14	25.9	19.4	-4.8	0.60	0.83	0.79
3	6.98	-3.57	7.84	4.70	1.78	5.03	26.9	19.9	-12.2	0.50	0.67	0.64
4	6.94	-3.57	7.80	4.50	1.61	4.78	27.1	18.3	-14.8	0.45	0.65	0.61
5	6.15	-3.59	7.12	4.54	1.89	4.92	30.3	22.7	-8.1	0.53	0.74	0.69
6	6.39	-3.25	7.17	4.31	1.34	4.51	26.8	16.5	-5.4	0.41	0.67	0.63
7	7.35	-4.00	8.37	4.21	1.88	4.61	28.4	23.2	-4.4	0.47	0.57	0.55
8	6.66	-3.57	7.55	5.61	1.38	5.78	28.1	13.7	-19.1	0.39	0.84	0.76
9	6.27	-3.60	7.23	5.24	0.56	5.27	29.8	5.7	-15.2	0.16	0.84	0.73
10	6.62	-3.64	7.55	5.12	2.06	5.52	28.7	21.1	1.3	0.57	0.77	0.73
11	6.71	-3.64	7.63	3.95	2.30	4.57	28.3	29.2	12.2	0.63	0.59	0.60
\bar{x}	6.66	-3.56	7.55	4.82	1.58	5.10	28.0	17.8	-4.7	0.44	0.73	0.68
s	0.38	0.20	0.39	0.59	0.59	0.52	1.3	7.2	11.7	0.16	0.10	0.08
min	6.15	-4.00	7.06	3.95	0.52	4.51	25.9	5.6	-19.1	0.16	0.57	0.55
max	7.35	-3.25	8.37	5.79	2.30	6.14	30.3	29.2	19.2	0.63	0.84	0.79

Παράρτημα 36

Επιτόπου δοκιμές στο Θέατρο Βράχων - Θέση 2: $\theta = 75^\circ$



36.1 Κυβικά τεμάχια

α/α	$v_{t,i}$ [ms ⁻¹]	$v_{n,i}$ [ms ⁻¹]	v_i [ms ⁻¹]	$v_{t,r}$ [ms ⁻¹]	$v_{n,r}$ [ms ⁻¹]	v_r [ms ⁻¹]	α_i [°]	α_r [°]	e [°]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	7.42	-1.31	7.53	5.04	2.12	5.47	9.9	21.4	9.2	1.62	0.68	0.73
2	8.25	-1.45	8.37	5.14	3.39	6.16	9.8	31.2	2.1	2.33	0.62	0.74
3	8.56	-1.57	8.70	5.79	2.95	6.49	10.3	25.3	11.5	1.87	0.68	0.75
4	8.03	-1.34	8.14	5.99	2.69	6.56	9.3	23.3	17.2	2.01	0.75	0.81
5	7.73	-1.39	7.85	5.41	2.01	5.77	10.1	19.0	-3.8	1.44	0.70	0.73
6	9.37	-1.73	9.53	7.91	1.73	8.10	10.3	11.6	-16.3	1.00	0.84	0.85
7	10.11	-1.56	10.23	6.74	3.15	7.44	8.6	23.9	8.7	2.01	0.67	0.73
8	9.72	-1.47	9.83	7.28	1.67	7.47	8.4	12.1	-3.6	1.14	0.75	0.76
9	7.58	-1.61	7.75	5.57	0.87	5.63	11.9	7.3	-11.1	0.54	0.73	0.73
10	7.66	-1.59	7.82	5.61	2.08	5.98	11.7	19.1	-7.1	1.30	0.73	0.76
11	7.96	-1.71	8.14	7.23	2.07	7.52	12.1	15.8	6.7	1.21	0.91	0.92
12	8.95	-1.53	9.08	7.05	0.92	7.11	9.6	6.8	4.1	0.60	0.79	0.78
13	8.50	-1.37	8.61	5.65	1.89	5.96	9.0	17.5	-14.0	1.38	0.67	0.69
14	8.45	-1.39	8.56	7.04	2.69	7.54	9.2	20.5	19.4	1.93	0.83	0.88
15	8.96	-1.63	9.10	5.97	2.36	6.42	10.2	20.4	-15.2	1.45	0.67	0.71
16	8.27	-1.57	8.42	5.29	2.79	5.98	10.7	26.3	1.5	1.77	0.64	0.71
17	8.37	-1.74	8.55	6.06	3.22	6.86	11.7	27.4	1.1	1.85	0.72	0.80
18	9.37	-1.85	9.55	5.17	2.39	5.70	11.1	23.3	-3.7	1.29	0.55	0.60
19	9.38	-1.73	9.53	6.78	1.48	6.94	10.3	11.3	-5.5	0.86	0.72	0.73
20	8.93	-2.04	9.16	6.16	3.41	7.04	12.8	27.6	19.1	1.67	0.69	0.77
\bar{x}	8.58	-1.58	8.72	6.14	2.29	6.61	10.3	19.6	1.0	1.46	0.72	0.76
s	0.75	0.19	0.76	0.84	0.75	0.77	1.2	6.9	11.1	0.49	0.08	0.07
min	7.42	-2.04	7.53	5.04	0.87	5.47	8.4	6.8	-16.3	0.54	0.55	0.60
max	10.11	-1.31	10.23	7.91	3.41	8.10	12.8	31.2	19.4	2.33	0.91	0.92

36.2 Πολυεδρικά τεμάχια

α/α	$v_{t,i}$ [ms ⁻¹]	$v_{n,i}$ [ms ⁻¹]	v_i [ms ⁻¹]	$v_{t,r}$ [ms ⁻¹]	$v_{n,r}$ [ms ⁻¹]	v_r [ms ⁻¹]	α_i [°]	α_r [°]	e [°]	η_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	7.42	-1.55	7.58	5.84	1.90	6.14	11.7	16.9	3.2	1.22	0.79	0.81
2	7.93	-1.66	8.10	7.14	1.61	7.32	11.7	11.9	13.0	0.97	0.90	0.90
3	8.46	-1.61	8.61	7.32	1.69	7.51	10.6	12.1	-8.5	1.05	0.86	0.87
4	8.96	-1.42	9.07	6.26	4.14	7.50	8.8	32.2	4.9	2.91	0.70	0.83
5	9.26	-1.69	9.41	7.59	2.35	7.95	10.2	16.4	-7.7	1.39	0.82	0.84
6	8.43	-1.67	8.60	6.94	1.91	7.20	11.1	14.5	15.3	1.14	0.82	0.84
7	8.10	-1.92	8.33	6.73	2.29	7.11	13.3	17.7	2.5	1.19	0.83	0.85
8	8.21	-1.80	8.40	7.00	1.79	7.23	12.3	13.4	-7.9	0.99	0.85	0.86
9	7.98	-1.53	8.13	6.59	2.25	6.96	10.7	17.7	0.1	1.47	0.83	0.86
10	7.50	-1.19	7.60	6.51	2.22	6.88	8.8	17.8	18.0	1.87	0.87	0.91
11	8.11	-1.30	8.22	5.75	1.97	6.07	8.9	17.8	12.8	1.52	0.71	0.74
12	7.59	-1.73	7.79	6.18	1.13	6.28	12.8	9.7	-16.8	0.65	0.81	0.81
13	8.88	-1.91	9.08	7.40	1.91	7.64	12.1	13.9	-13.1	1.00	0.83	0.84
14	8.50	-1.88	8.70	7.67	2.14	7.96	12.4	15.4	-6.1	1.14	0.90	0.91
\bar{x}	8.24	-1.63	8.40	6.78	2.09	7.13	11.1	16.2	0.7	1.32	0.82	0.85
s	0.55	0.22	0.55	0.62	0.67	0.61	1.5	5.3	11.1	0.54	0.06	0.05
min	7.42	-1.92	7.58	5.75	1.13	6.07	8.8	9.7	-16.8	0.65	0.70	0.74
max	9.26	-1.19	9.41	7.67	4.14	7.96	13.3	32.2	18.0	2.91	0.90	0.91

36.3 Σφαιρικά τεμάχια

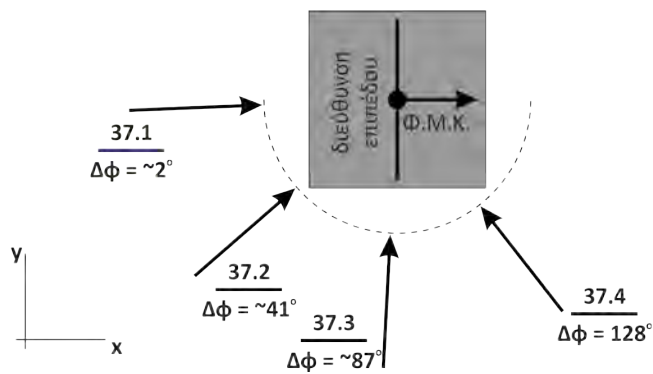
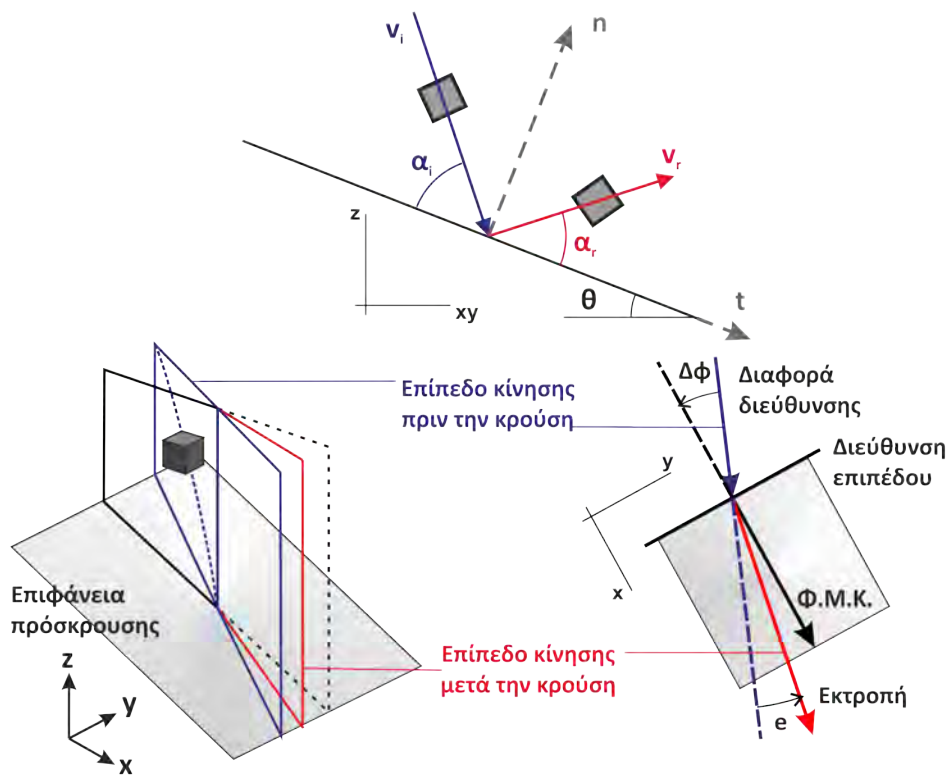
α/α	$v_{t,i}$ [ms ⁻¹]	$v_{n,i}$ [ms ⁻¹]	v_i [ms ⁻¹]	$v_{t,r}$ [ms ⁻¹]	$v_{n,r}$ [ms ⁻¹]	v_r [ms ⁻¹]	α_i [°]	α_r [°]	e [°]	η_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	7.36	-1.63	7.54	6.20	1.72	6.44	12.5	13.3	8.2	1.05	0.84	0.85
2	8.40	-1.52	8.53	3.33	3.19	4.61	10.1	41.2	-15.7	2.09	0.40	0.54
3	7.38	-1.02	7.45	5.50	1.78	5.78	12.0	16.7	-10.2	1.74	0.75	0.78
4	8.38	-1.92	8.60	7.05	2.51	7.49	12.8	18.6	-1.8	1.31	0.84	0.87
5	8.14	-1.61	8.30	3.59	4.44	5.71	11.1	48.9	12.8	2.77	0.44	0.69
6	8.58	-1.96	8.80	5.33	2.85	6.05	12.8	26.5	8.6	1.46	0.62	0.69
\bar{x}	8.04	-1.61	8.20	5.17	2.75	6.01	11.9	27.5	0.3	1.74	0.65	0.74
s	0.54	0.34	0.57	1.46	1.01	0.95	1.1	14.4	11.5	0.62	0.20	0.12
min	7.36	-1.96	7.45	3.33	1.72	4.61	10.1	13.3	-15.7	1.05	0.40	0.54
max	8.58	-1.02	8.80	7.05	4.44	7.49	12.8	48.9	12.8	2.77	0.84	0.87

36.4 Φυσικά - ακανόνιστα τεμάχη

α/α	$v_{t,i}$ [ms^{-1}]	$v_{n,i}$ [ms^{-1}]	v_i [ms^{-1}]	$v_{t,r}$ [ms^{-1}]	$v_{n,r}$ [ms^{-1}]	v_r [ms^{-1}]	α_i [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	e [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]
1	6.93	-1.17	7.03	6.24	2.11	6.59	9.5	17.7	24.7	1.81	0.90	0.94
2	5.37	-0.69	5.41	4.48	0.31	4.49	7.1	3.0	9.6	0.45	0.83	0.83
3	7.44	-1.07	7.51	6.56	2.01	6.86	7.9	16.5	7.4	1.88	0.88	0.91
4	8.17	-0.95	8.22	4.78	1.93	5.16	6.3	19.9	-11.7	2.03	0.59	0.63
5	8.39	-1.55	8.53	4.26	2.21	4.80	10.7	25.4	8.6	1.43	0.51	0.56
6	9.37	-1.85	9.55	8.38	1.54	8.52	11.1	9.9	17.9	0.83	0.89	0.89
7	8.39	-1.37	8.50	6.10	1.37	6.26	9.1	11.6	2.2	1.00	0.73	0.74
8	8.42	-1.02	8.48	4.88	2.17	5.34	6.7	22.0	5.1	2.13	0.58	0.63
9	8.92	-1.01	8.98	5.78	1.96	6.11	6.2	17.1	-7.4	1.93	0.65	0.68
10	8.42	-0.86	8.46	4.24	1.98	4.68	5.8	25.1	-19.4	2.31	0.50	0.55
11	8.40	-1.44	8.52	5.90	3.49	6.85	9.7	30.6	0.1	2.43	0.70	0.80
12	9.94	-1.20	10.01	6.30	2.23	6.68	8.5	18.4	-31.4	1.86	0.63	0.67
\bar{x}	8.18	-1.18	8.27	5.66	1.94	6.03	8.2	18.1	0.5	1.67	0.70	0.74
s	1.18	0.32	1.20	1.21	0.73	1.18	1.8	7.5	15.8	0.62	0.15	0.14
min	5.37	-1.85	5.41	4.24	0.31	4.49	5.8	3.0	-31.4	0.45	0.50	0.55
max	9.94	-0.69	10.01	8.38	3.49	8.52	11.1	30.6	24.7	2.43	0.90	0.94

Παράρτημα 37

Επιτόπου δοκιμές στο Πεντελικό όρος - Θέση 1: $\theta = 20^\circ$



37.1 Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 2^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	ω_i [rs^{-1}]	azi_i [$^\circ$]	dip_i [$^\circ$]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	ω_r [rs^{-1}]	azi_r [$^\circ$]	dip_r [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	$\Delta\phi$ [$^\circ$]	e [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]	E_{COR} [-]	TE_{COR} [-]
1	4.48	8.8	85.6	66.3	48.9	2.66	23.7	70.0	4.6	19.9	4.4	-15.6	0.27	0.85	0.59	0.35	0.36
2	4.86	3.4	86.0	62.3	44.9	3.06	13.7	103.1	-10.3	8.0	4.0	17.1	0.12	0.88	0.63	0.40	0.40
3	5.94	9.4	80.0	71.8	55.1	2.55	26.0	95.2	2.7	20.8	10.0	15.3	0.19	0.70	0.43	0.18	0.19
4	4.38	11.0	78.1	61.9	45.3	1.22	40.1	108.9	7.3	25.5	11.9	30.8	0.17	0.36	0.28	0.08	0.09
5	6.07	8.4	101.3	65.3	47.1	2.35	32.0	69.8	19.3	34.6	-11.3	-31.5	0.30	0.47	0.39	0.15	0.15
6	5.26	5.0	113.7	73.8	55.8	1.68	30.6	80.7	-8.8	8.1	-23.7	-33.0	0.05	0.56	0.32	0.10	0.11
7	4.68	2.3	79.1	65.3	48.6	2.41	16.1	62.9	21.0	35.0	10.9	-16.3	0.39	0.64	0.52	0.27	0.27
8	6.23	5.1	83.8	68.5	51.3	3.76	21.2	85.0	-15.8	1.5	6.2	1.2	0.02	0.97	0.60	0.37	0.37
9	4.87	9.6	83.7	73.7	56.5	2.12	10.2	78.0	31.3	47.9	6.3	-5.7	0.39	0.53	0.44	0.19	0.19
10	4.69	5.6	64.7	62.1	47.7	2.87	27.4	55.8	25.5	38.0	25.3	-8.9	0.51	0.72	0.61	0.38	0.38
11	3.66	8.1	91.9	56.3	38.4	2.31	24.8	74.1	18.9	34.8	-1.9	-17.8	0.58	0.66	0.63	0.40	0.40
12	5.84	6.2	77.9	68.9	52.4	3.11	32.3	77.5	-2.8	13.7	12.1	-0.4	0.16	0.85	0.53	0.28	0.29
13	4.94	3.7	87.8	63.8	46.2	4.05	22.3	108.1	7.4	25.6	2.2	20.3	0.49	1.07	0.82	0.67	0.68
14	4.98	3.6	89.2	66.5	48.8	3.85	17.6	85.7	13.2	30.6	0.8	-3.5	0.52	1.01	0.77	0.60	0.60
15	6.36	5.0	97.2	71.2	53.1	4.77	28.0	112.8	-15.4	2.6	-7.2	15.6	0.04	1.25	0.75	0.56	0.56
16	5.02	6.3	90.9	64.4	46.6	2.97	36.4	41.4	13.5	22.2	-0.9	-49.5	0.31	0.80	0.59	0.35	0.36
17	5.91	14.6	96.6	68.2	50.0	3.19	16.5	90.1	15.3	33.1	-6.6	-6.5	0.38	0.70	0.54	0.29	0.29
18	4.89	10.9	67.3	65.2	50.4	4.20	29.0	114.9	7.4	25.3	22.7	47.6	0.48	1.22	0.86	0.74	0.74
19	5.95	16.6	86.3	70.2	52.8	2.44	23.3	85.7	-10.5	6.9	3.7	-0.6	0.06	0.67	0.41	0.17	0.17
20	5.83	7.1	95.3	68.6	50.5	1.82	115.0	93.0	25.7	43.7	-5.3	-2.3	0.28	0.35	0.31	0.10	0.11
21	6.06	7.2	82.0	70.7	53.7	2.47	24.6	96.9	-5.4	12.7	8.0	14.9	0.11	0.67	0.41	0.17	0.17
22	5.69	4.2	89.2	70.4	52.7	3.77	15.3	90.9	-15.2	2.6	0.8	1.7	0.04	1.09	0.66	0.44	0.44
23	5.08	15.8	104.3	64.5	46.3	1.21	2.2	123.9	7.3	24.4	-14.3	19.6	0.14	0.31	0.24	0.06	0.06
24	5.73	4.4	92.4	67.8	49.9	2.89	8.4	123.7	11.5	28.7	-2.4	31.3	0.32	0.69	0.50	0.25	0.26
\bar{x}	5.31	7.6	87.7	67.0	49.7	2.82	26.5	88.7	6.2	22.8	2.3	1.0	0.26	0.75	0.53	0.31	0.32
s	0.68	3.8	10.7	4.1	4.0	0.90	20.4	20.5	13.8	13.1	10.7	21.9	0.17	0.25	0.17	0.18	0.18
min	3.66	2.3	64.7	56.3	38.4	1.21	2.2	41.4	-15.8	1.5	-23.7	-49.5	0.02	0.31	0.24	0.06	0.06
max	6.36	16.6	113.7	73.8	56.5	4.77	115.0	123.9	31.3	47.9	25.3	47.6	0.58	1.25	0.86	0.74	0.74

37.2 Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 41^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	ω_i [rs^{-1}]	azi_i [$^\circ$]	dip_i [$^\circ$]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	ω_r [rs^{-1}]	azi_r [$^\circ$]	dip_r [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	$\Delta\phi$ [$^\circ$]	e [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]	E_{COR} [-]	TE_{COR} [-]
1	6.23	18.4	45.9	72.2	58.9	3.07	34.2	59.7	12.5	28.3	44.1	13.9	0.27	0.84	0.49	0.24	0.24
2	6.05	8.5	48.1	75.1	61.3	2.28	12.5	50.5	-8.9	5.4	41.9	2.4	0.04	0.78	0.38	0.14	0.14
3	7.33	6.9	47.4	72.7	59.0	3.57	23.6	67.7	6.8	23.8	42.6	20.3	0.23	0.87	0.49	0.24	0.24
4	5.25	7.6	57.2	71.2	55.7	2.79	23.0	74.6	18.7	36.3	32.8	17.3	0.38	0.76	0.53	0.28	0.29
5	6.82	7.1	56.7	72.3	56.9	3.10	14.6	52.8	20.1	34.8	33.3	-3.9	0.31	0.68	0.45	0.21	0.21
6	6.52	7.9	53.1	70.2	55.4	4.42	26.0	70.9	19.2	36.5	36.9	17.8	0.49	0.96	0.68	0.46	0.46
7	6.64	10.9	55.1	74.6	59.4	3.39	33.7	71.9	6.2	23.6	34.9	16.7	0.24	0.92	0.51	0.26	0.26
8	6.52	8.4	46.6	70.0	56.6	3.00	41.3	55.7	19.1	34.3	43.4	9.1	0.31	0.69	0.46	0.21	0.22
9	5.48	4.0	46.9	69.2	55.7	3.09	63.3	72.3	-7.8	9.6	43.1	25.4	0.11	0.99	0.56	0.32	0.33
10	5.90	4.7	59.4	73.9	58.1	2.72	13.4	79.0	16.6	34.5	30.6	19.6	0.31	0.72	0.46	0.21	0.21
11	5.60	7.1	56.6	67.0	51.6	3.03	96.6	72.3	-8.6	8.8	33.4	15.7	0.11	0.86	0.54	0.29	0.30
12	5.16	7.5	46.2	68.1	54.7	2.70	74.0	62.3	31.7	47.9	43.8	16.0	0.47	0.61	0.52	0.27	0.28
13	6.33	6.6	43.7	67.8	55.0	2.75	57.1	65.5	26.7	43.4	46.3	21.9	0.36	0.55	0.43	0.19	0.19
14	5.84	5.0	43.0	69.1	56.4	3.26	34.0	59.7	24.8	40.7	47.0	16.7	0.44	0.77	0.56	0.31	0.31
15	4.90	2.5	47.1	73.5	59.9	2.83	24.5	51.4	-10.7	3.8	42.9	4.3	0.04	1.15	0.58	0.33	0.34
16	7.07	6.9	45.6	73.3	60.1	2.95	49.6	45.3	9.2	22.4	44.4	-0.2	0.18	0.77	0.42	0.17	0.18
17	6.48	1.8	42.4	72.3	59.8	3.62	11.4	48.9	-12.5	1.5	47.6	6.5	0.02	1.11	0.56	0.31	0.31
18	5.93	7.3	39.2	74.5	62.8	3.17	45.6	67.0	20.1	37.0	50.8	27.9	0.36	0.93	0.53	0.29	0.29
19	6.16	9.1	42.3	72.5	60.0	2.43	6.7	61.6	-3.7	12.5	47.7	19.4	0.10	0.77	0.40	0.16	0.16
20	6.16	4.9	46.8	68.7	55.2	3.42	28.1	67.0	21.8	38.7	43.2	20.1	0.42	0.76	0.55	0.31	0.31
21	6.36	7.8	41.5	71.5	59.2	3.73	4.0	61.7	10.5	26.7	48.5	20.2	0.31	1.02	0.59	0.34	0.34
22	6.88	13.2	54.0	74.2	59.3	2.83	19.0	61.9	20.3	36.5	36.0	7.9	0.28	0.65	0.41	0.17	0.17
23	5.73	7.0	53.7	70.6	55.8	4.32	69.9	64.1	11.3	27.8	36.3	10.4	0.43	1.19	0.75	0.57	0.58
\bar{x}	6.14	7.4	48.6	71.5	57.7	3.15	35.0	62.8	10.6	26.7	41.4	14.1	0.27	0.84	0.52	0.27	0.28
s	0.60	3.4	5.7	2.3	2.6	0.52	23.5	8.7	13.0	13.4	5.7	8.0	0.14	0.17	0.09	0.10	0.10
min	4.90	1.8	39.2	67.0	51.6	2.28	4.0	45.3	-12.5	1.5	30.6	-3.9	0.02	0.55	0.38	0.14	0.14
max	7.33	18.4	59.4	75.1	62.8	4.42	96.6	79.0	31.7	47.9	50.8	27.9	0.49	1.19	0.75	0.57	0.58

37.3 Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 87^\circ$

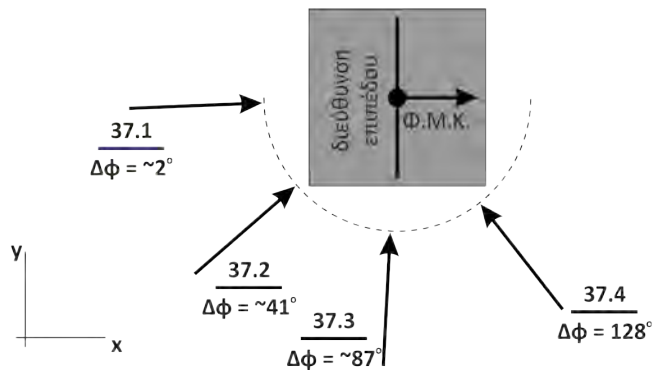
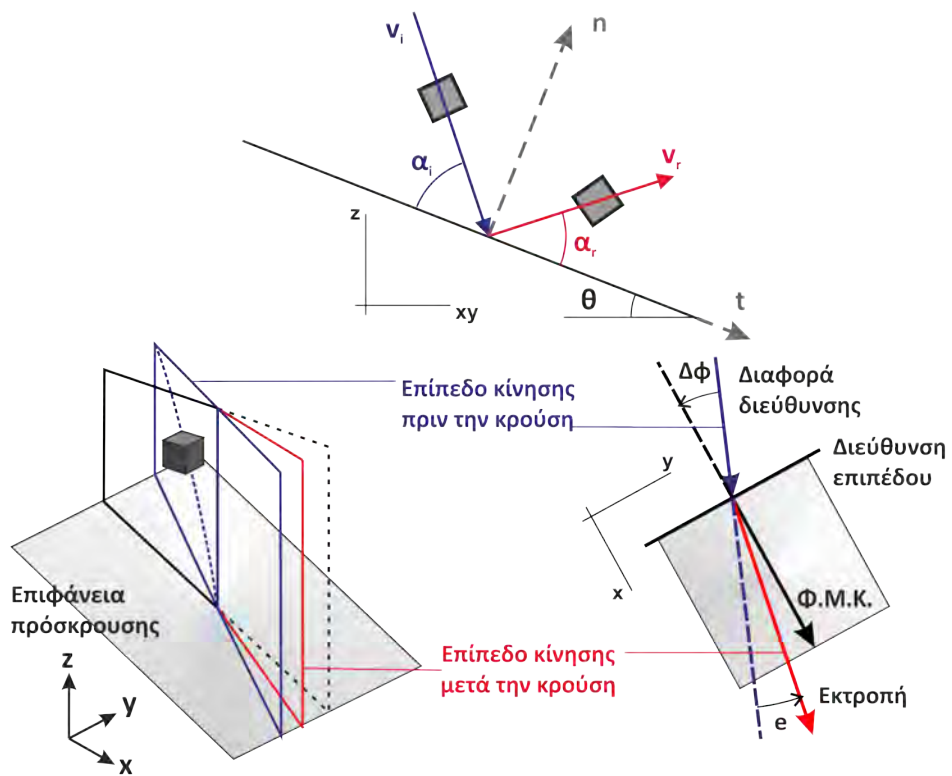
α/α	v_i [ms^{-1}]	ω_i [rs^{-1}]	azi_i [$^\circ$]	dip_i [$^\circ$]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	ω_r [rs^{-1}]	azi_r [$^\circ$]	dip_r [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	$\Delta\phi$ [$^\circ$]	e [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]	E_{COR} [-]	TE_{COR} [-]
1	6.60	7.2	3.9	62.0	60.7	1.08	18.0	28.9	28.1	37.1	86.1	25.0	0.11	0.27	0.16	0.03	0.03
2	6.02	4.1	-3.4	63.8	64.9	1.77	60.0	7.6	4.0	6.5	93.4	11.0	0.04	0.69	0.30	0.09	0.09
3	6.98	7.6	8.0	68.2	65.5	2.06	33.0	18.8	17.9	23.9	82.0	10.8	0.13	0.65	0.30	0.09	0.09
4	6.98	8.3	3.2	63.8	62.7	1.81	20.0	40.4	-3.9	8.1	86.8	37.2	0.04	0.56	0.26	0.07	0.07
5	6.46	1.5	2.1	65.6	64.9	2.40	47.4	40.2	-1.3	10.7	87.9	38.1	0.08	0.86	0.37	0.14	0.14
6	6.05	5.6	2.2	62.1	61.4	2.00	30.7	32.4	38.2	48.2	87.8	30.1	0.28	0.46	0.33	0.11	0.11
7	6.05	48.2	6.6	61.6	59.5	2.36	21.3	38.0	3.0	14.5	83.4	31.4	0.11	0.74	0.39	0.15	0.15
8	6.84	32.9	3.4	65.8	64.6	2.37	16.3	18.7	39.8	45.9	86.6	15.2	0.28	0.56	0.35	0.12	0.12
9	6.05	4.0	7.9	64.7	62.1	2.57	60.2	45.6	16.8	30.1	82.1	37.7	0.24	0.79	0.43	0.18	0.19
10	7.18	10.1	-6.4	67.3	69.4	2.94	26.8	21.8	5.4	12.4	96.4	28.3	0.09	1.14	0.41	0.17	0.17
11	6.08	9.7	7.3	60.3	57.9	3.40	24.3	37.9	7.4	18.8	82.7	30.6	0.21	1.00	0.56	0.31	0.32
12	6.19	6.4	3.3	61.5	60.4	1.43	20.1	39.0	35.7	47.4	86.7	35.7	0.20	0.32	0.23	0.05	0.06
13	6.56	6.8	0.6	65.2	65.0	2.56	19.3	42.0	23.1	35.6	89.4	41.5	0.25	0.75	0.39	0.15	0.15
14	5.64	3.9	-3.2	61.4	62.4	2.88	39.8	38.1	-3.0	8.4	93.2	41.2	0.08	1.09	0.51	0.26	0.27
15	5.42	5.8	7.2	61.6	59.2	2.34	49.0	38.8	9.0	20.6	82.8	31.6	0.18	0.79	0.43	0.19	0.19
16	6.39	6.0	2.4	62.7	61.9	2.40	47.6	19.9	24.3	30.7	87.6	17.5	0.22	0.69	0.38	0.14	0.15
17	5.73	4.4	0.6	62.3	62.1	2.47	35.1	44.3	7.0	20.0	89.4	43.7	0.17	0.87	0.43	0.19	0.19
18	6.69	9.5	2.0	61.8	61.2	2.02	34.6	33.5	39.3	49.6	88.0	31.5	0.26	0.41	0.30	0.09	0.09
19	6.47	6.9	-2.9	65.2	66.1	2.09	8.1	38.4	4.3	15.9	92.9	41.3	0.10	0.77	0.32	0.10	0.10
20	5.26	4.8	4.5	60.8	59.3	2.76	9.5	49.0	23.9	37.8	85.5	44.6	0.37	0.81	0.52	0.27	0.28
\bar{x}	6.28	9.7	2.5	63.4	62.6	2.29	31.1	33.7	15.9	26.1	87.5	31.2	0.17	0.71	0.37	0.15	0.15
s	0.51	10.8	4.0	2.2	2.8	0.52	15.1	10.6	14.4	14.3	4.0	10.3	0.09	0.23	0.10	0.07	0.07
min	5.26	1.5	-6.4	60.3	57.9	1.08	8.1	7.6	-3.9	6.5	82.0	10.8	0.04	0.27	0.16	0.03	0.03
max	7.18	48.2	8.0	68.2	69.4	3.40	60.2	49.0	39.8	49.6	96.4	44.6	0.37	1.14	0.56	0.31	0.32

37.4 Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 128^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	ω_i [rs^{-1}]	azi_i [$^\circ$]	dip_i [$^\circ$]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	ω_r [rs^{-1}]	azi_r [$^\circ$]	dip_r [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	$\Delta\phi$ [$^\circ$]	e [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]	E_{COR} [-]	TE_{COR} [-]
1	6.46	13.5	-35.1	58.8	72.7	2.22	26.6	23.4	12.5	15.7	125.1	58.5	0.10	1.11	0.34	0.12	0.12
2	6.87	6.2	-43.0	65.9	81.2	1.95	27.0	17.6	18.7	20.0	133.0	60.6	0.10	1.75	0.28	0.08	0.08
3	6.91	9.3	-43.0	66.4	81.8	1.77	31.4	-25.4	16.1	4.4	133.0	17.7	0.02	1.79	0.26	0.07	0.07
4	6.73	6.8	-44.1	56.2	71.8	2.90	53.7	-10.3	12.1	4.5	134.1	33.8	0.04	1.38	0.43	0.19	0.19
5	7.04	2.4	-33.2	59.7	73.2	2.07	4.0	28.9	9.0	14.0	123.2	62.1	0.07	0.99	0.29	0.09	0.09
6	7.12	9.2	-38.9	60.4	75.0	1.12	17.0	-6.3	39.8	33.3	128.9	32.6	0.09	0.51	0.16	0.02	0.03
7	6.98	1.5	-36.3	53.8	67.9	0.90	19.5	27.3	13.8	18.3	126.3	63.6	0.04	0.32	0.13	0.02	0.02
8	6.46	3.3	-32.7	53.9	67.3	1.28	41.3	10.2	10.7	11.8	122.7	42.9	0.04	0.50	0.20	0.04	0.04
9	7.20	24.0	-37.4	63.3	77.7	1.47	64.6	38.5	17.6	25.5	127.4	76.0	0.09	0.87	0.20	0.04	0.05
10	7.07	8.2	-41.8	53.5	68.6	2.33	61.7	-15.8	14.3	5.1	131.8	26.0	0.03	0.90	0.33	0.11	0.11
11	6.09	1.5	-36.5	46.2	60.4	2.59	43.1	-7.3	14.2	7.4	126.5	29.2	0.06	0.85	0.43	0.18	0.19
12	6.30	4.4	-31.6	51.8	65.0	1.69	9.0	20.0	5.3	7.4	121.6	51.6	0.04	0.63	0.27	0.07	0.07
13	5.28	4.5	-32.0	55.3	68.6	0.82	15.3	24.0	17.4	20.7	122.0	56.0	0.06	0.40	0.16	0.02	0.03
14	5.41	1.2	-44.8	59.6	75.3	2.46	15.6	27.2	27.5	32.0	134.8	72.0	0.25	1.52	0.45	0.21	0.21
15	5.61	8.7	-36.5	57.8	72.0	3.46	56.9	-6.6	11.4	4.9	126.5	29.9	0.06	1.99	0.62	0.38	0.39
16	6.28	4.8	-38.2	56.6	71.2	3.38	9.6	23.4	17.0	20.2	128.2	61.6	0.20	1.56	0.54	0.29	0.29
17	5.56	5.4	-45.0	55.4	71.2	2.60	80.2	5.9	18.0	20.5	135.0	51.0	0.17	1.36	0.47	0.22	0.23
\bar{x}	6.43	6.8	-38.3	57.3	71.8	2.06	33.9	10.3	16.2	15.6	128.3	48.5	0.09	1.08	0.33	0.13	0.13
s	0.62	5.4	4.5	5.0	5.3	0.77	22.1	18.3	7.5	9.1	4.5	17.0	0.06	0.51	0.14	0.10	0.10
min	5.28	1.2	-45.0	46.2	60.4	0.82	4.0	-25.4	5.3	4.4	121.6	17.7	0.02	0.32	0.13	0.02	0.02
max	7.20	24.0	-31.6	66.4	81.8	3.46	80.2	38.5	39.8	33.3	135.0	76.0	0.25	1.99	0.62	0.38	0.39

Παράρτημα 38

Επιτόπου δοκιμές στο Πεντελικό όρος - Θέση 2: $\theta = 45^\circ$



38.1 Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = -1^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	ω_i [rs^{-1}]	azi_i [$^\circ$]	dip_i [$^\circ$]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	ω_r [rs^{-1}]	azi_r [$^\circ$]	dip_r [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	$\Delta\phi$ [$^\circ$]	e [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]	E_{COR} [-]	TE_{COR} [-]
1	4.69	2.0	85.5	65.4	20.5	3.18	10.4	86.2	-23.5	21.5	4.5	0.7	0.71	0.67	0.68	0.46	0.46
2	5.91	3.3	89.4	71.7	26.7	3.61	24.6	95.0	-21.4	23.5	0.6	5.6	0.54	0.63	0.61	0.37	0.38
3	4.94	1.6	87.0	65.5	20.5	3.34	20.6	92.5	-24.9	20.1	3.0	5.5	0.66	0.68	0.68	0.46	0.46
4	5.50	7.3	86.3	75.9	31.0	3.32	2.5	93.0	-14.4	30.6	3.7	6.7	0.60	0.61	0.60	0.36	0.36
5	5.04	5.9	102.9	73.4	29.1	2.92	13.7	81.7	-29.5	15.2	-12.9	-21.2	0.31	0.64	0.58	0.34	0.34
6	5.61	7.8	93.1	66.9	21.9	3.51	13.4	89.7	-24.5	20.5	-3.1	-3.3	0.59	0.63	0.63	0.39	0.39
7	4.26	50.2	103.3	65.2	21.0	3.71	87.2	104.9	-31.7	12.3	-13.3	1.6	0.52	0.91	0.87	0.76	0.77
8	4.52	11.1	93.2	68.6	23.6	3.25	11.2	105.5	-30.6	13.3	-3.2	12.3	0.41	0.76	0.72	0.52	0.52
9	4.44	14.5	79.5	68.4	23.8	3.43	7.9	102.4	-28.5	15.9	10.5	22.9	0.52	0.81	0.77	0.60	0.60
10	6.33	14.6	89.2	79.6	34.6	3.81	8.4	83.9	-24.3	20.5	0.8	-5.3	0.37	0.68	0.60	0.36	0.36
11	4.63	7.3	85.1	69.1	24.2	3.48	19.6	86.2	-31.8	13.1	4.9	1.2	0.42	0.80	0.75	0.57	0.57
12	5.97	3.8	97.7	63.7	18.9	3.06	19.3	97.7	-29.9	14.8	-7.7	0.0	0.40	0.52	0.51	0.26	0.26
13	6.15	13.1	77.8	72.5	28.1	3.57	15.9	94.2	-17.7	27.2	12.2	16.4	0.56	0.58	0.58	0.34	0.34
14	5.56	2.4	81.3	72.5	27.8	3.62	9.7	88.5	-34.7	10.3	8.7	7.2	0.25	0.72	0.65	0.42	0.43
15	5.00	9.3	89.3	70.0	25.0	4.28	36.8	100.9	-24.9	19.6	0.7	11.6	0.68	0.89	0.86	0.73	0.74
16	6.98	9.8	83.2	79.4	34.6	3.61	33.9	92.3	-31.3	13.7	6.8	9.1	0.22	0.61	0.52	0.27	0.27
17	6.67	12.7	94.1	74.4	29.5	3.75	27.5	84.4	-29.8	15.0	-4.1	-9.8	0.30	0.62	0.56	0.32	0.32
18	5.24	10.5	102.7	72.0	27.7	4.06	8.4	99.8	-36.8	7.8	-12.7	-2.9	0.23	0.87	0.77	0.60	0.60
19	6.39	8.1	87.9	65.3	20.4	4.14	12.7	89.4	-28.7	16.3	2.1	1.4	0.52	0.66	0.65	0.42	0.42
20	5.80	6.7	101.1	70.5	26.1	3.08	6.1	102.0	-11.6	32.7	-11.1	0.9	0.65	0.50	0.53	0.28	0.28
21	4.88	8.9	85.3	75.7	30.8	3.23	7.9	94.1	-19.0	25.9	4.7	8.9	0.57	0.69	0.66	0.44	0.44
22	6.57	10.1	96.7	74.0	29.2	3.82	25.5	102.7	-29.2	15.1	-6.7	6.0	0.31	0.64	0.58	0.34	0.34
23	5.37	8.8	94.7	63.1	18.1	3.48	5.9	86.9	-28.9	16.1	-4.7	-7.7	0.58	0.65	0.65	0.42	0.42
24	5.47	82.7	99.9	73.3	28.8	3.50	20.3	90.2	-21.6	23.4	-9.9	-9.7	0.53	0.67	0.64	0.41	0.41
\bar{x}	5.50	13.0	91.1	70.7	25.9	3.53	18.7	93.5	-26.2	18.5	-1.1	2.4	0.48	0.69	0.65	0.43	0.44
s	0.75	17.2	7.5	4.6	4.6	0.33	16.8	7.0	6.1	6.2	7.5	9.2	0.15	0.10	0.10	0.13	0.13
min	4.26	1.6	77.8	63.1	18.1	2.92	2.5	81.7	-36.8	7.8	-13.3	-21.2	0.22	0.50	0.51	0.26	0.26
max	6.98	82.7	103.3	79.6	34.6	4.28	87.2	105.5	-11.6	32.7	12.2	22.9	0.71	0.91	0.87	0.76	0.77

38.2 Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 37^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	ω_i [rs^{-1}]	azi_i [$^\circ$]	dip_i [$^\circ$]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	ω_r [rs^{-1}]	azi_r [$^\circ$]	dip_r [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	$\Delta\phi$ [$^\circ$]	e [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]	E_{COR} [-]	TE_{COR} [-]
1	5.63	9.7	59.0	75.8	35.2	3.61	18.3	75.9	-17.2	26.9	31.0	16.9	0.50	0.70	0.64	0.41	0.41
2	4.87	21.5	56.6	74.1	34.3	3.23	30.0	79.3	-36.0	8.5	33.4	22.8	0.17	0.79	0.66	0.44	0.44
3	5.74	14.2	46.2	77.2	41.4	3.01	22.3	77.3	-25.2	19.0	43.8	31.1	0.26	0.66	0.52	0.27	0.28
4	5.01	10.2	61.6	71.7	30.3	3.47	6.2	82.6	-31.9	12.9	28.4	21.0	0.31	0.78	0.69	0.48	0.48
5	4.86	9.3	59.0	79.5	38.9	2.80	9.9	80.4	-36.0	8.6	31.0	21.4	0.14	0.73	0.58	0.33	0.33
6	5.29	10.4	51.5	81.3	43.2	3.97	31.7	74.8	-23.2	20.8	38.5	23.2	0.39	0.96	0.75	0.56	0.56
7	5.02	10.3	54.8	76.8	37.5	3.39	30.5	71.6	-38.8	4.7	35.2	16.8	0.09	0.85	0.68	0.46	0.46
8	5.62	12.1	57.8	76.3	36.1	4.38	20.9	71.3	-23.6	19.8	32.2	13.5	0.45	0.91	0.78	0.61	0.61
9	5.49	1.9	64.9	75.4	33.2	3.78	33.5	79.6	-27.1	17.4	25.1	14.7	0.38	0.78	0.69	0.47	0.48
10	5.10	29.6	64.7	73.7	31.6	3.58	11.5	85.2	-21.7	23.2	25.3	20.5	0.53	0.76	0.70	0.49	0.49
11	5.70	9.9	53.5	76.1	37.3	3.16	23.8	77.0	-20.1	24.2	36.5	23.5	0.37	0.64	0.56	0.31	0.31
12	5.93	5.8	56.5	71.9	32.1	4.06	39.7	78.0	-20.7	23.7	33.5	21.6	0.52	0.74	0.68	0.47	0.47
13	4.35	7.4	58.3	74.0	33.6	3.36	17.9	84.1	-17.0	27.8	31.7	25.7	0.65	0.82	0.77	0.60	0.60
14	5.35	3.7	45.1	79.3	44.0	3.13	12.3	75.0	-12.3	31.7	44.9	29.9	0.44	0.69	0.58	0.34	0.34
15	5.45	10.3	41.3	76.5	43.1	2.61	49.7	66.7	-23.3	19.3	48.7	25.5	0.23	0.62	0.48	0.23	0.23
16	4.49	8.0	55.8	70.3	30.7	3.61	27.2	65.3	-21.2	21.0	34.2	9.5	0.56	0.87	0.80	0.64	0.65
17	5.49	9.7	45.7	78.3	42.7	2.80	13.1	64.8	-34.5	7.6	44.3	19.1	0.10	0.69	0.51	0.26	0.26
18	4.51	11.5	44.7	73.5	38.4	2.88	42.1	74.7	-22.4	21.6	45.3	30.1	0.38	0.76	0.64	0.41	0.42
19	4.15	18.0	53.1	71.2	32.6	3.02	32.3	62.3	-19.5	22.1	36.9	9.2	0.51	0.80	0.73	0.53	0.53
20	5.51	7.5	41.1	74.3	41.0	3.58	15.3	71.0	-33.3	10.1	48.9	29.9	0.17	0.85	0.65	0.42	0.42
21	5.48	9.1	55.3	78.9	39.5	3.64	31.5	66.1	-24.8	17.6	34.7	10.8	0.32	0.82	0.67	0.44	0.45
22	4.24	12.1	59.8	69.8	29.0	3.51	29.7	77.4	-23.2	21.1	30.3	17.7	0.62	0.88	0.83	0.69	0.69
23	5.71	14.3	45.5	77.3	41.8	2.63	5.5	72.6	-34.3	9.4	44.5	27.0	0.11	0.61	0.46	0.21	0.21
24	5.38	11.4	49.4	77.6	40.4	3.55	5.2	73.7	-30.5	13.4	40.6	24.4	0.24	0.84	0.66	0.44	0.44
\bar{x}	5.18	11.2	53.4	75.5	37.0	3.36	23.3	74.4	-25.7	18.0	36.6	21.1	0.35	0.77	0.65	0.44	0.44
s	0.51	5.6	6.9	3.0	4.5	0.44	11.9	6.1	6.9	7.0	6.9	6.4	0.17	0.09	0.10	0.13	0.13
min	4.15	1.9	41.1	69.8	29.0	2.61	5.2	62.3	-38.8	4.7	25.1	9.2	0.09	0.61	0.46	0.21	0.21
max	5.93	29.6	64.9	81.3	44.0	4.38	49.7	85.2	-12.3	31.7	48.9	31.1	0.65	0.96	0.83	0.69	0.69

38.3 Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 93^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	ω_i [rs^{-1}]	azi_i [$^\circ$]	dip_i [$^\circ$]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	ω_r [rs^{-1}]	azi_r [$^\circ$]	dip_r [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	$\Delta\phi$ [$^\circ$]	e [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]	E_{COR} [-]	TE_{COR} [-]
1	6.71	12.5	3.7	71.8	68.1	3.56	14.6	64.7	-35.2	6.9	86.3	61.0	0.07	1.41	0.53	0.28	0.28
2	5.05	6.9	6.7	70.2	63.6	3.58	18.0	59.6	-5.2	35.5	83.3	53.0	0.46	1.29	0.71	0.50	0.50
3	6.03	11.7	1.3	70.8	69.6	3.79	18.2	61.7	0.1	41.5	88.7	60.4	0.44	1.35	0.63	0.40	0.40
4	6.58	7.2	-8.0	70.7	78.6	4.39	59.3	58.3	-21.9	18.4	98.0	66.3	0.22	3.21	0.67	0.45	0.45
5	6.46	6.2	-6.8	71.9	78.6	4.24	33.7	69.1	-26.1	17.0	96.8	75.9	0.20	3.18	0.66	0.43	0.43
6	6.03	6.9	-2.0	71.1	73.1	3.68	20.0	65.9	-24.9	17.5	92.0	68.0	0.19	2.00	0.61	0.37	0.37
7	5.45	6.1	-2.0	73.8	75.9	4.04	23.4	71.4	-15.5	28.0	92.0	73.4	0.36	2.68	0.74	0.55	0.55
8	5.99	4.2	-0.2	69.3	69.5	2.60	37.7	70.3	-19.3	24.0	90.2	70.5	0.19	1.13	0.43	0.19	0.19
9	6.48	8.3	-4.2	70.5	74.7	4.52	31.6	68.2	-34.1	8.8	94.2	72.4	0.11	2.61	0.70	0.49	0.71
10	5.72	6.6	-5.7	75.1	80.7	3.16	17.9	45.5	-28.6	6.9	95.7	51.1	0.07	3.42	0.55	0.31	0.31
11	6.92	11.1	-9.0	70.9	79.8	4.30	22.3	70.2	-36.7	6.5	99.0	79.2	0.07	3.49	0.62	0.39	0.39
12	7.26	10.1	-1.8	74.5	76.4	3.84	27.3	56.4	-5.9	33.9	91.8	58.2	0.30	1.86	0.53	0.28	0.28
13	6.61	6.8	-0.2	70.0	70.2	4.31	37.3	62.5	-29.6	12.0	90.2	62.7	0.14	1.88	0.65	0.43	0.43
14	6.96	48.9	-11.9	72.2	83.9	3.96	41.0	62.8	-23.1	18.5	101.9	74.7	0.18	5.06	0.57	0.32	0.33
15	7.25	5.9	-1.6	67.1	68.7	3.18	21.4	59.2	-18.3	22.4	91.6	60.8	0.18	1.11	0.44	0.19	0.19
16	6.90	9.9	1.7	73.5	71.9	4.32	15.6	48.3	-27.2	9.5	88.3	46.6	0.11	1.98	0.63	0.39	0.39
17	6.36	3.0	-1.1	73.0	74.1	3.50	22.0	51.3	-4.8	33.2	91.1	52.4	0.31	1.68	0.55	0.30	0.30
18	6.38	6.9	-2.1	69.9	71.9	3.89	31.8	60.9	-30.1	11.1	92.1	63.0	0.12	1.93	0.61	0.37	0.37
19	7.49	23.9	-6.3	73.1	79.3	3.77	39.0	47.3	-5.1	31.2	96.3	53.6	0.27	2.33	0.50	0.25	0.26
20	6.65	5.7	2.7	73.8	71.0	3.63	23.5	42.4	-32.6	1.4	87.3	39.7	0.01	1.68	0.55	0.30	0.30
21	6.53	3.6	-5.4	69.4	74.8	4.06	28.7	56.0	-13.7	26.0	95.4	61.5	0.28	2.13	0.62	0.39	0.39
22	6.75	7.1	-13.0	70.3	83.0	3.53	29.0	63.7	-21.5	20.4	103.0	76.7	0.18	4.03	0.52	0.27	0.28
23	7.22	4.9	-6.1	73.0	79.1	5.03	55.5	74.9	-32.2	11.8	96.1	81.0	0.15	3.60	0.70	0.49	0.49
24	7.32	31.9	-6.7	72.4	79.0	4.38	44.6	56.7	8.0	47.9	96.7	63.4	0.45	2.10	0.60	0.36	0.36
\bar{x}	6.55	10.7	-3.3	71.6	74.8	3.89	29.7	60.3	-20.1	20.4	93.3	63.6	0.21	2.38	0.60	0.36	0.37
s	0.60	10.1	4.7	1.9	5.1	0.51	11.8	8.5	12.1	12.0	4.7	10.5	0.12	0.99	0.08	0.09	0.11
min	5.05	3.0	-13.0	67.1	63.6	2.60	14.6	42.4	-36.7	1.4	83.3	39.7	0.01	1.11	0.43	0.19	0.19
max	7.49	48.9	6.7	75.1	83.9	5.03	59.3	74.9	8.0	47.9	103.0	81.0	0.46	5.06	0.74	0.55	0.71

38.4 Διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi = 152^\circ$

α/α	v_i [ms^{-1}]	ω_i [rs^{-1}]	azi_i [$^\circ$]	dip_i [$^\circ$]	α_i [$^\circ$]	v_r [ms^{-1}]	ω_r [rs^{-1}]	azi_r [$^\circ$]	dip_r [$^\circ$]	α_r [$^\circ$]	$\Delta\phi$ [$^\circ$]	e [$^\circ$]	n_{COR} [-]	t_{COR} [-]	v_{COR} [-]	E_{COR} [-]	TE_{COR} [-]
1	6.53	8.1	-65.7	56.9	99.2	2.58	27.1	42.1	25.5	59.3	155.7	107.8	0.34	-1.25	0.39	0.16	0.16
2	8.47	4.6	-65.0	62.4	104.6	2.73	24.4	33.5	-19.3	9.6	155.0	98.5	0.06	-1.26	0.32	0.10	0.11
3	6.64	2.9	-58.4	57.5	97.9	1.09	19.4	108.7	-7.6	35.8	148.4	167.0	0.10	-0.97	0.16	0.03	0.03
4	7.27	6.2	-62.4	55.3	96.8	2.70	19.1	37.4	1.8	33.1	152.4	99.8	0.20	-2.63	0.37	0.14	0.14
5	6.43	6.4	-69.4	55.7	98.8	2.01	18.4	77.7	-28.9	15.4	159.4	147.0	0.08	-1.97	0.31	0.10	0.10
6	5.79	4.7	-59.7	51.0	91.8	3.41	23.4	51.1	-33.8	4.1	149.7	110.8	0.04	-18.5	0.59	0.35	0.35
7	7.42	16.4	-58.4	57.3	97.7	2.46	28.6	47.0	21.4	57.6	148.4	105.4	0.28	-1.32	0.33	0.11	0.11
8	7.55	6.0	-62.1	57.8	99.3	2.48	24.5	42.1	6.4	40.3	152.1	104.3	0.22	-1.55	0.33	0.11	0.11
9	6.49	4.5	-67.6	55.9	98.7	2.56	28.2	26.5	16.9	41.0	157.6	94.2	0.26	-1.97	0.39	0.16	0.16
10	7.09	4.2	-58.7	57.7	98.2	0.61	8.1	76.3	-16.4	27.8	148.7	135.0	0.04	-0.54	0.09	0.01	0.01
11	6.65	12.8	-59.8	52.5	93.3	3.12	24.3	36.5	2.5	33.2	149.8	96.3	0.26	-6.75	0.47	0.22	0.22
12	6.87	5.4	-60.2	55.2	96.1	1.65	13.6	116.1	-25.3	16.6	150.2	176.3	0.07	-2.15	0.24	0.06	0.06
13	6.41	4.8	-65.1	42.8	85.0	1.21	1.2	90.9	-24.3	20.7	155.1	156.0	0.07	2.03	0.19	0.04	0.04
14	7.49	15.3	-58.5	52.2	92.7	2.95	34.5	31.6	-18.6	9.0	148.5	90.1	0.06	-8.25	0.39	0.15	0.16
15	6.70	2.1	-66.9	56.5	99.1	2.94	19.6	72.5	-1.1	42.6	156.9	139.4	0.30	-2.03	0.44	0.19	0.19
16	7.44	4.9	-65.1	63.9	106.1	2.64	13.5	94.8	0.7	45.6	155.1	159.9	0.26	-0.89	0.35	0.13	0.13
17	6.54	32.1	-63.5	47.6	89.4	3.04	15.5	56.5	-7.5	32.3	153.5	119.9	0.25	40.76	0.46	0.22	0.22
18	7.15	25.8	-60.2	58.1	99.1	2.66	20.2	24.9	-20.4	2.4	150.2	85.0	0.02	-2.35	0.37	0.14	0.14
19	7.00	5.3	-61.1	56.5	97.7	1.65	1.8	26.0	27.2	50.9	151.1	87.1	0.18	-1.11	0.24	0.06	0.06
20	7.09	0.8	-58.8	52.7	93.3	3.26	18.3	52.8	7.0	45.6	148.8	111.6	0.33	-5.60	0.46	0.21	0.21
21	5.72	8.0	-56.7	46.6	86.5	2.82	16.3	20.2	23.9	42.9	146.7	76.9	0.34	5.87	0.49	0.24	0.25
22	7.78	13.9	-59.3	60.8	101.4	1.20	16.7	75.3	-36.1	8.0	149.3	134.6	0.02	-0.77	0.15	0.02	0.02
23	6.79	5.8	-62.4	55.6	97.1	2.88	22.7	90.7	-4.3	40.7	152.4	153.1	0.28	-2.59	0.42	0.18	0.18
24	7.37	6.6	-56.2	54.7	94.5	1.70	9.5	103.1	-25.0	19.3	146.2	159.3	0.08	-2.79	0.23	0.05	0.05
\bar{x}	6.95	8.6	-61.7	55.1	96.4	2.35	18.7	59.8	-5.6	30.6	151.7	121.5	0.17	-0.78	0.34	0.13	0.13
s	0.60	7.3	3.5	4.7	4.9	0.75	7.9	28.9	19.1	16.6	3.5	29.1	0.11	9.64	0.12	0.08	0.08
min	5.72	0.8	-69.4	42.8	85.0	0.61	1.2	20.2	-36.1	2.4	146.2	76.9	0.02	-	0.09	0.01	0.01
max	8.47	32.1	-56.2	63.9	106.1	3.41	34.5	116.1	27.2	59.3	159.4	176.3	0.34	18.52 40.76	0.59	0.35	0.35