



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



**Διερεύνηση της επίδρασης των χαρακτηριστικών
πρόσκρουσης στις καταπτώσεις βράχων**

Βασιλοπούλου Ιωάννα Ελένη

Επιβλέπων Καθηγητής: Γεώργιος Τσιαμπάος

Αθήνα, Ιούλιος 2015

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το φαινόμενο των καταπτώσεων βράχων έχει αποτελέσει αιτία σημαντικών καταστροφών σε έργα υποδομής ακόμα και με απώλειες ανθρώπινων ζώων, ως εκ τούτου η αντιμετώπιση του είναι κρίσιμη για την ασφαλή και εύρυθμη λειτουργία των περιοχών που επηρεάζουν. Για την διαστασιολόγηση κατάλληλων μέτρων προστασίας, έχουν αναπτυχθεί εξειδικευμένα προγράμματα που ως στόχο έχουν την πρόβλεψη της τροχιάς των βραχωδών τεμαχίων. Λόγω της πολυπλοκότητας που εμφανίζει η τροχιά του τεμάχους που καταπέφτει, η προσομοίωση γίνεται με σημαντικές απλουστευτικές παραδοχές, μεταξύ των οποίων η κρισιμότερη γίνεται για την περιγραφή της αναπήδησης. Η προσομοίωσή της γίνεται με τους συντελεστές αναπήδησης, οι οποίοι εκφράζουν την απώλεια κίνησης του τεμάχους κατά την κρούση με το πρανές. Έχουν προταθεί διάφοροι ορισμοί για τους συντελεστές αναπήδησης, ωστόσο δεν ακολουθούν μία ενιαία λογική, με αποτέλεσμα οι αποκλίσεις μεταξύ τους να είναι σημαντικές. Επιπλέον, στις μέχρι σήμερα θεωρήσεις, οι συντελεστές αποτελούν συνάρτηση μόνο του τύπου του υλικού που δομεί το πρανές, συνεπώς σημαντικοί παράμετροι που επηρεάζουν την απόκριση του τεμάχους στην κρούση δεν λαμβάνονται υπόψη, μεταξύ των οποίων η μάζα και η ταχύτητα πρόσκρουσης του τεμάχους, που αποτελούν το αντικείμενο διερεύνησης της παρούσης διπλωματικής εργασίας. Κατά καιρούς έχουν συσχετιστεί οι συντελεστές αναπήδησης με την ταχύτητα που αναπτύσσει το τέμαχος, αλλά δεν γίνονται ιδιαίτερες αναφορές στη σχέση τους με τη μάζα του τεμάχους. Για το λόγο αυτό, στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, πραγματοποιήθηκαν 880 εργαστηριακές δοκιμές με σκοπό τη διερεύνηση της επίδρασης των κινηματικών χαρακτηριστικών στις καταπτώσεις βράχων. Χρησιμοποιήθηκε η πειραματική διάταξη που έχει αναπτυχθεί στο εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Βραχομηχανικής στο πλαίσιο της ευρύτερης έρευνας που διεξάγεται επί του φαινομένου των καταπτώσεων. Η κατάπτωση προσομοιώθηκε στο εργαστήριο με ρίψεις σφαιρικών δοκιμίων, διαφόρων μαζών, πάνω σε τετραγωνικές βάσεις. Παράλληλα, για να ληφθεί υπόψη και η επίδραση των ιδιοτήτων των υλικών στους συντελεστές αναπήδησης χρησιμοποιήθηκαν σφαιρικά δοκίμια από τρία διαφορετικά υλικά, πιο συγκεκριμένα: ψαμίτιη, μάρμαρο και τσιμέντο. Πραγματοποιήθηκαν τρεις σειρές δοκιμών. Οι δύο πρώτες αφορούν ελεύθερες πτώσεις, ενώ η τρίτη σειρά αφορά παραβολικές ρίψεις που είναι και περισσότερο αντιπροσωπευτικές των πραγματικών καταπτώσεων. Οι δύο σειρές δοκιμών ελεύθερης πτώσης διαφέρουν ως προς το υλικό της βάσης πρόσκρουσης. Στην πρώτη σειρά τα υλικά της σφαίρας και της βάσης πρόσκρουσης συμπίπτουν, ενώ στην δεύτερη σειρά δοκιμών διαφοροποιούνται. Τέλος, πραγματοποιήθηκαν ρίψεις από διάφορα ύψη ώστε να αναπτυχθούν διαφορετικές ταχύτητες. Η κίνηση των δοκιμίων καταγράφηκε από ειδική κάμερα ταχείας λήψης και για την επεξεργασία των πειραμάτων έγινε χρήση κώδικα που αναπτύχθηκε γι' αυτόν το σκοπό. Από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της πρώτης σειράς δοκιμών ελεύθερων πτώσεων διαπιστώθηκε η σημαντική επίδραση των κινηματικών χαρακτηριστικών στην αναπήδηση. Γι' αυτό τον λόγο προτάθηκε μια νέα μεθοδολογία προσδιορισμού του συντελεστή αναπήδησης που να λαμβάνει

υπόψη τόσο τον τύπο του υλικού από το οποίο δομείται το πρανές όσο και τα κινηματικά χαρακτηριστικά του τεμάχους που καταπέφτει. Επιπλέον, από τη δεύτερη σειρά δοκιμών διαπιστώθηκε ότι η διαφοροποίηση στους τύπους των υλικών επιφάνειας πρόσκρουσης και τεμάχους κατάπτωσης επιδρά στην τιμή που λαμβάνει ο συντελεστής αναπήδησης. Έτσι, η προτεινόμενη μεθοδολογία γενικεύτηκε ώστε να είναι αντιπροσωπευτική και στην περίπτωση διαφοροποίησης των υλικών επιφάνειας πρόσκρουσης και τεμάχους. Τέλος, η μεθοδολογία ελέγχθηκε και για τα αποτελέσματα της τρίτης σειράς δοκιμών που αφορά στις παραβολικές ρίψεις, όπου διαπιστώθηκε ότι περιγραφεί ικανοποιητικά και τις συνθήκες κρούσης υπό γωνία.

ABSTRACT

Rockfalls have been the cause of major disasters in infrastructure and in many occasions they are accompanied with loss of life, hence mitigation is critical affected areas. The design of protection measures is done by specialized software, which predict the trajectory of the falling rock blocks. Due to the complexity met in trajectory of the falling blocks, simulation is done with considerable reductive assumptions. The most critical simulation process is to describe the response at impact. Simulation is achieved with the coefficients of restitution, which express the energy loss of the block due to an impact into the slope. Various definitions have been proposed for the coefficients of restitution. However, these definitions are expressed with different assumptions, resulting to significant deviations amongst them. Moreover, the coefficients have been associated to the material type of the slope. Therefore, important parameters that affect the blocks' reresponse are not taken into account, including the mass and the impact velocity of the blocks, which form the subject of this thesis. Occasionally, coefficients of restitution have been associated with the impact velocity, but there is no particular reference to the relation with the blocks' mass. For this thesis, 880 laboratory tests have been conducted in order to investigate the effect of impacting velocity and mass to the coefficients of restitution. An experimental setup has been developed in the laboratory of Engineering Geology and Rock Mechanics as part of the on-going research of impact in rockfalls, which was used in this thesis. Rock impacts were simulated by releasing spherical blocks of various masses on smooth surfaces. Furthermore, in order to take into account the effect of material properties on the phenomenon, three different materials were used, namely: sandstone, marble and concrete. Three test series were conducted. The first two were performed with free falls, while the third was held with parabolic drops, which are more representative of actual conditions. The two free-fall series differ in the material of the impact surface. In the first set, the material type of the base and the sphere coincide, while in the second test series they differ. Finally, blocks were released from various heights in order to impact with different velocities. The trajectories of the spheres were recorded by a high speed camera and data acquisition and extrapolation was performed using a machine vision code developed in the context of the on-going research performed in the lab. The evaluation of the results of the first test series showed the significant effect of the kinematic characteristics in the impact response. A new model for the determination of the coefficients of restitution is proposed which takes into account both the type of slope material and kinematic properties at impact. Moreover, from the second series of tests, it was proved that diversifying the types of surface material and the impact block affects the coefficient. Thus, the model was generalized to be representative even when the material type of bases and spheres differ. Finally, the model was tested on the results of the third test series concerning parabolic drops, which adequately described their response.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1	Σκοπός της εργασίας.....	1
1.2	Ευχαριστίες.....	2
2	ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	3
2.1	Ορισμός του φαινομένου.....	3
2.2	Αίτια καταπτώσεων.....	9
2.2.1	Γεωλογικές-υδρογεωλογικές διαδικασίες.....	9
2.2.2	Σεισμική φόρτιση.....	10
2.2.3	Ανθρώπινη δραστηριότητα.....	10
2.3	Επικινδυνότητα καταπτώσεων.....	11
2.4	Τροχιά κίνησης πίπτοντος βραχοτεμάχους.....	12
2.4.1	Ολίσθηση.....	13
2.4.2	Κύλιση.....	13
2.4.3	Αναπήδηση.....	14
2.5	Μαθηματική προσέγγιση των συντελεστών αναπήδησης.....	15
2.5.1	Σχέσεις ταχυτήτων.....	17
2.5.2	Σχέσεις ενεργειών.....	18
3	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	19
3.1	Παράμετροι που επηρεάζουν τους συντελεστές αναπήδησης.....	19
3.2	Συγκεντρωτικός πίνακας τιμών συντελεστών αναπήδησης από την βιβλιογραφία.....	21
3.3	Αναδρομή αποτελεσμάτων από προηγούμενες έρευνες.....	24
3.4	Συντελεστές προσαρμογής.....	26
3.4.1	Συντελεστές προσαρμογής σε όρους ταχυτήτων.....	26
3.4.2	Συντελεστής κλίμακας βασιζόμενος στη μάζα του τεμάχους.....	27
3.4.3	Συντελεστής κλίμακας βασιζόμενος στην ορμή του τεμάχους.....	28
4	ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ.....	32
4.1	Φιλοσοφία πίσω από το πείραμα.....	32
4.2	Διάταξη του εργαστηρίου.....	32
4.2.1	Δοκίμια.....	32
4.2.2	Βάσεις ρίψης.....	34

4.3	Όργανα και συσκευές.....	35
4.3.1	Κάμερα ταχείας λήψης	35
4.3.2	Μηχανισμός ρίψης της σφαίρας	35
4.3.2.1	Μηχανισμός ελεύθερης πτώσης.....	35
4.3.2.2	Μηχανισμός κεκλιμένης πτώσης	36
4.3.3	Φωτισμός	37
4.3.4	Δευτερεύοντα όργανα και συσκευές.....	38
4.4	Εκτέλεση δοκιμών.....	38
4.5	Επεξεργασία αποτελεσμάτων.....	38
4.5.1	MaxTraQ.....	38
4.5.2	MATLAB.....	38
5	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	40
5.1	Πυκνότητα.....	40
5.2	Μονοαξονική θλιπτική αντοχή και παραμορφωσιμότητα	41
5.3	Εφελκυστική αντοχή	44
5.4	Ταχύτητα διάδοσης υπερήχων	45
5.5	Σφύρα Schmidt.....	47
5.6	Ιδιότητες των υλικών	49
6	ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	50
6.1	Παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	50
6.1.1	Δοκιμές ελεύθερης πτώσης.....	50
6.1.1.1	Δοκιμές ελεύθερης πτώσης με ίδιο υλικό σφαιρικού δοκιμίου και βάσης πρόσπτωσης	51
6.1.1.2	Δοκιμές ελεύθερης πτώσης με διαφορετικό υλικό σφαιρικού δοκιμίου και βάσης πρόσπτωσης	55
6.1.2	Δοκιμές παραβολικών ρίψεων	57
7	ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	62
7.1	Ανάλυση αποτελεσμάτων ελεύθερων ρίψεων	62
7.1.1	Ανάλυση αποτελεσμάτων ελεύθερων ρίψεων με ίδιο υλικό σφαιρικού δοκιμίου και βάσης πρόσκρουσης	62
7.1.1.1	Έλεγχος της αξιοπιστίας της έρευνας	62
7.1.1.2	Ανάλυση των αποτελεσμάτων των δοκιμών βάσει της ταχύτητας πρόσκρουσης.....	67
7.1.1.3	Ανάλυση των αποτελεσμάτων βάσει της ορμής πρόσκρουσης	69

7.1.1.4	Προσδιορισμός σφάλματος του μοντέλου στον υπολογισμό του κάθετου συντελεστή αναπήδησης στην περίπτωση των ελεύθερων ρίψεων....	75
7.1.2	Ανάλυση αποτελεσμάτων ελεύθερων ρίψεων με διαφορετικό υλικό σφαιρικού δοκιμίου και βάσης πρόσπτωσης	77
7.1.2.1	Σύγκριση με την σχέση του Richards	77
7.1.2.2	Προσαρμογή της συσχέτισης του συντελεστή αναπήδησης με την ορμή για κρούσεις μεταξύ διαφορετικών υλικών.	79
7.1.2.3	Προσδιορισμός σφάλματος του διορθωμένου μοντέλου στον υπολογισμό του κάθετου συντελεστή αναπήδησης.....	81
7.2	Ανάλυση αποτελεσμάτων παραβολικών ρίψεων	83
7.2.1	Προσδιορισμός σφάλματος του μοντέλου στον υπολογισμό του κάθετου συντελεστή αναπήδησης στην περίπτωση των παραβολικών ρίψεων	86
8	ΣΥΝΟΨΗ.....	88
8.1	Πειραματική διαδικασία.....	88
8.2	Συμπεράσματα	88
8.2.1	Δοκιμές ελεύθερης πτώσης με ίδιο υλικό σφαιρικού δοκιμίου και βάσης πρόσκρουσης.....	88
8.2.2	. Δοκιμές ελεύθερης πτώσης με διαφορετικό υλικό σφαιρικού δοκιμίου και βάσης πρόσκρουσης	89
8.2.3	Δοκιμές παραβολικών ρίψεων	90
8.3	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	91
9	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	93

ΕΙΚΟΝΕΣ

Εικόνα 2.1 Άποψη από την κατάπτωση των Τεμπών, 2009 (www.ergonblog.gr).....	3
Εικόνα 2.2 Κατάπτωση βράχου στην περιοχή Utah των Ηνωμένων Πολιτειών, 2015 (www.toledoblade.com).....	4
Εικόνα 2.3 Καταπτώσεις βράχων στην Ελλάδα, α) Μύρτος, Κεφαλονιά 2015 (www.protothema.gr), β) Μονεμβάσια, Λακωνία 2011, (www.ethnos.gr).....	5
Εικόνα 2.4 Βραχολίσθηση στο χωριό Πλάκα Κλειτορίας, Καλάβρυτα 2015 (www.protothema.gr).....	5
Εικόνα 2.5 Μέτρα αντιμετώπισης βραχοπτώσεων α) Μεταλλικό πλέγμα (www.geobrugg.com), β)Εύκαμπτος φράχτης ανάσχεσης (www.geobrugg.com).....	6
Εικόνα 2.6 Μεταλλικό στέγαστρο (www.geobrugg.com).....	6
Εικόνα 2.7 Εργασίες κατασκευών μέτρων αντιμετώπισης: α) Εφαρμογή μεταλλικού πλέγματος (www.geobrugg.com), β) Εγκατάσταση αγκυρίων (www.ameritech.com).....	7
Εικόνα 2.8 Εφαρμογή μεταλλικού πλέγματος για τον περιορισμό της κίνησης των τεμαχών (www.geobrugg.com)	7
Εικόνα 2.9 α)Μεταλλικά πλέγματα πριν και μετά την εφαρμογή τους (www.ameritech.pro), β)Αγκύρωση μεταλλικού πλέγματος στη στέψη πρανούς (www.ameritech.pro).....	8
Εικόνα 2.10 Ανάσχεση βράχων: α) από ευκάμπτη μεταλλική βραχοπαγίδα (www.externalworksindex.co.uk), και β) από μεταλλικά μετωπικά πλέγματα (www.geobrugg.com)	8
Εικόνα 2.11 Ανάσχεση βράχου από μεταλλικό φράχτη (www.geobrugg.com).....	9
Εικόνα 2.12 Οι τέσσερις τύποι κίνησης του τεμάχους που αποκολλάται από το πρανές.	12
Εικόνα 2.13 Τα είδη κίνησης του τεμάχους συναρτήσει της κλίσης του πρανούς (Ritchie, 1963).	13
Εικόνα 2.14 Συνιστώσες ταχυτήτων πριν και μετά την αναπήδηση (Asteriou et al, 2012).....	16
Εικόνα 3.1 Επίδραση ταχύτητας πρόσκρουσης στους συντελεστές αναπήδησης, (Urciuoli, 1988).....	24
Εικόνα 3.2 Διάγραμμα ταχύτητας v_i – Συντελεστή κλίμακας (Asteriou et al. 2013a) με τις σχέσεις των 1) Rammer et al. (2010), 2) Johnson(1985), 3) Pfeiffer & Bowen (1989), 4) Richards et al. (2001).....	27
Εικόνα 3.3 Οι τιμές των συντελεστών αναπήδησης συναρτήσει της ταχύτητας πρόσπτωσης για τις τέσσερις μάζες από εποξειδική ρητίνη (Asteriou et al, 2013).....	30
Εικόνα 3.4 Οι τιμές των συντελεστών αναπήδησης συναρτήσει της ταχύτητας πρόσπτωσης για τις τρεις μάζες από τσιμεντένεμα (Asteriou et al, 2013).	30
Εικόνα 3.5 Συσχέτιση του συντελεστή αναπήδησης με την ορμή του τεμάχους πριν την κρούση (Asteriou et al. 2013).....	31
Εικόνα 4.1 Δοκίμια Ψαμμίτη	33
Εικόνα 4.2 Δοκίμια Τσιμέντου	33

Εικόνα 4.3 Δοκίμιο Μαρμάρου	34
Εικόνα 4.4 Βάσεις ρίψης από μάρμαρο (αριστερά) και ψαμμίτη (δεξιά).....	34
Εικόνα 4.5 Κάμερα καταγραφής της κίνησης. Στο βάθος ο μηχανισμός ρίψης.....	35
Εικόνα 4.6 Μηχανισμός ελεύθερης πτώσης, αντλία κενού (αριστερά), μήτρα τοποθέτησης της βάσης (δεξιά), ακροφύσιο (πάνω)	36
Εικόνα 4.7 Μηχανισμός κεκλιμένης πτώσης.....	37
Εικόνα 4.8 Κατάλληλος φωτισμός για ευκρινή καταγραφή.....	37
Εικόνα 5.1 Συσκευή θλίψης (πρέσσα) και σερβομηχανή για την επιβολή του φορτίου με σταθερό ρυθμό	41
Εικόνα 5.2 Δοκίμιο μετά την επιβολή φορτίου αστοχίας.....	42
Εικόνα 5.3 Εξοπλισμός μέτρησης της αξονικής και της ακτινικής παραμόρφωσης των δοκιμίων.....	42
Εικόνα 5.4 Δοκιμή δίσκου (Brazilian test). Δοκίμιο μετά την επιβολή φορτίου αστοχίας.....	44
Εικόνα 5.5 Εργαστηριακός εξοπλισμός για την μέτρηση της ταχύτητας διάδοσης υπερήχων.....	46
Εικόνα 5.6 Πρέσσα επιβολής του φορτίου και ακροδέκτες.....	47
Εικόνα 5.7 Σφύρα Schmidt για την μέτρηση της σκληρότητας.....	48

ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 3.1 Παράμετροι που επηρεάζουν τους συντελεστές αναπήδησης (Heidenreich 2004)	19
Πίνακας 3.2 Παράμετροι που επηρεάζουν το φαινόμενο της αναπήδησης.....	21
Πίνακας 3.3 Τιμές συντελεστών αναπήδησης από την βιβλιογραφία.....	21
Πίνακας 3.4 Ιδιότητες Υλικών, (Asteriou et al., 2013b).....	29
Πίνακας 4.1 Οι ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική μέθοδο.....	49
Πίνακας 6.1 Οι μάζες και οι διαμέτροι των σφαιριδίων που χρησιμοποιήθηκαν για τις ελεύθερες ρίψεις.	51
Πίνακας 6.2 . Συνοπτική περιγραφή της διαδικασίας διεξαγωγής της πρώτης σειράς δοκιμών.....	51
Πίνακας 6.3 . Αποτελέσματα δοκιμών ελεύθερης πτώσης με υλικό σφαιρικού δοκιμίου και βάσης πρόσπτωσης το μάρμαρο.....	52
Πίνακας 6.4 . Αποτελέσματα δοκιμών ελεύθερης πτώσης με υλικό σφαιρικού δοκιμίου και βάσης πρόσπτωσης τον ψαμμίτη.....	53
Πίνακας 6.5 . Αποτελέσματα δοκιμών ελεύθερης πτώσης με υλικό σφαιρικού δοκιμίου και βάσης πρόσπτωσης το τσιμέντο.	54
Πίνακας 6.6 . Συνοπτική παρουσίαση της διεξαγωγής των πειραμάτων ελεύθερης πτώσης σφαιρικών δοκιμίων πάνω σε επιφάνειες πρόσκρουσης διαφορετικού υλικού.	55
Πίνακας 6.7 . Αποτελέσματα δοκιμών ελεύθερης πτώσης με υλικό σφαιρικού δοκιμίου το μάρμαρο και υλικό βάσης πρόσπτωσης τον ψαμμίτη και το τσιμέντο....	55
Πίνακας 6.8 . Αποτελέσματα δοκιμών ελεύθερης πτώσης με υλικό σφαιρικού δοκιμίου τον ψαμμίτη και υλικό βάσης πρόσπτωσης το μάρμαρο και το τσιμέντο....	56
Πίνακας 6.9 . Αποτελέσματα δοκιμών ελεύθερης πτώσης με υλικό σφαιρικού δοκιμίου το τσιμέντο και υλικό βάσης πρόσπτωσης το μάρμαρο και τον ψαμμίτη....	56
Πίνακας 6.10 Αποτελέσματα δοκιμών παραβολικών ρίψεων με υλικό σφαιρικού δοκιμίου και βάσης πρόσπτωσης το μάρμαρο.....	57
Πίνακας 6.11 Αποτελέσματα δοκιμών παραβολικών ρίψεων με υλικό σφαιρικού δοκιμίου και βάσης πρόσπτωσης τον ψαμμίτη.....	59
Πίνακας 6.12 Αποτελέσματα δοκιμών παραβολικών ρίψεων με υλικό σφαιρικού δοκιμίου και βάσης πρόσπτωσης το τσιμέντο.	61
Πίνακας 7.1 Τα αποτελέσματα των ταχυτήτων πρόσκρουσης v_i (m/s), της ορμής πρόσκρουσης M_i (kgm/s) και των κάθετων συντελεστών αναπήδησης V_{COR} για τις τρεις μάζες τσιμεντενάματος της έρευνας των Asteriou et al.(2013).	63
Πίνακας 7.2 Οι συντελεστές των ευθειών που προέκυψαν από την γραμμική παλινδρόμηση για τα τρία υλικά:.....	67
Πίνακας 7.3 Συντελεστές συσχέτισης για κάθε υλικό και οι αντίστοιχες σκληρότητές τους.	73

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Σκοπός της εργασίας

Για την κατασκευή κατάλληλων μέτρων προστασίας από τις καταπτώσεις βράχων απαιτείται η πρόβλεψη της τροχιάς που εκτελούν τα τεμάχια κατά την διάρκεια της κατάπτωσης. Η διαδικασία αυτή γίνεται από εξειδικευμένα λογισμικά που προσομοιώνουν την τροχιά σε τέσσερα απλούστερα είδη κινήσεων: την ολίσθηση, την κύλιση, την ελεύθερη πορεία στον αέρα και την αναπήδηση. Σε αντίθεση με τα άλλα τρία είδη κίνησης, η αναπήδηση είναι ένα πολυπαραμετρικό φαινόμενο, γεγονός που το καθιστά δύσκολα προβλέψιμο. Η αναπήδηση καθορίζεται από την αντίσταση που συναντά το τεμάχιο κατά την πρόσκρουση στο πρηνές και εκφράζεται μέσω των συντελεστών αναπήδησης.

Στην βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετοί ορισμοί των συντελεστών αναπήδησης. Ωστόσο, βασίζονται σε διαφορετικές θεωρήσεις και παραδοχές με αποτέλεσμα κατά την εφαρμογή τους για ίδιες συνθήκες πρόσκρουσης οι συντελεστές να λαμβάνουν τελείως διαφορετικές τιμές. Οι τιμές των συντελεστών σχετίζονται με την φύση του υλικού που δομεί το πρηνές, και επιπρόσθετα, προσαρμόζονται βάσει της ταχύτητας πρόσκρουσης. Όμως, στις περισσότερες έρευνες έχει αγνοηθεί η επίδραση της μάζας των τεμαχίων στο φαινόμενο της αναπήδησης με αποτέλεσμα να λαμβάνονται ίδιες τιμές συντελεστών για τεμάχια διαφορετικών μαζών το οποίο δεν είναι λογικά συνεπές. Συνεπώς, υπάρχουν ακόμα σημεία αδιευκρίνιστα στην ευρύτερη έρευνα των καταπτώσεων, τα οποία χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης. Εξάλλου, βαθύτερη γνώση του αντικειμένου σημαίνει αποτελεσματικότερη αντιμετώπιση. Αν συνυπολογίσουμε, δε, ότι μέχρι και σήμερα το φαινόμενο και προκαλεί σημαντικά προβλήματα σε οικισμούς και έργα υποδομής, στοιχίζοντας ακόμα και ανθρώπινες ζωές, κατανοούμε τη σημασία εμβάθυνσης στο αντικείμενο.

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, πραγματοποιήθηκαν 880 δοκιμές με σκοπό την εξέταση της επίδρασης της ταχύτητας και της μάζας στους συντελεστές αναπήδησης. Η κατάπτωση προσομοιώθηκε με σφαιρικό δοκίμιο που προσπίπτει πάνω σε βάση ίδιου ή άλλου υλικού με αυτό του δοκιμίου, ενώ πραγματοποιήθηκαν ελεύθερες και παραβολικές ρίψεις. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν μάρμαρο, ψαμμίτης και τσιμέντο, ώστε να συνεκτιμηθεί η επίδραση των ιδιοτήτων των υλικών στην αναπήδηση. Για την διερεύνηση της επίδρασης της ταχύτητας πραγματοποιήθηκαν ρίψεις από διαφορετικά ύψη ή διαφορετικές κλίσεις αντίστοιχα, ανάλογα με τη μορφή της κίνησης, ενώ για την διερεύνηση της επίδρασης της μάζας χρησιμοποιήθηκαν για κάθε υλικό σφαιρίδια διαφορετικών μαζών. Η κίνηση καταγράφηκε από κάμερα ταχείας λήψης και στη συνέχεια ακολούθησε η ανάλυση και η επεξεργασία των δοκιμών.

1.2 Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας, Δρ. Γεώργιο Τσιαμπάο, καθηγητή της σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. του Τομέα Γεωτεχνικής, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με την παρούσα διπλωματική εργασία και να εμβαθύνω σε ένα αντικείμενο με μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον, καθώς και για την βοήθεια που μου παρείχε κατά τη διάρκεια εκπόνησής της.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς επιτροπής, τον Δρ. Μιχάλη Καββαδά, αναπληρωτή καθηγητή της σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. του τομέα Γεωτεχνικής και τον Δρ. Αχιλλέα Παπαδημητρίου, επίκουρο καθηγητή της σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. του τομέα Γεωτεχνικής, για τον χρόνο που αφιέρωσαν στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Επίσης θα ήθελα να εκφράσω ένα ιδιαίτερα μεγάλο ευχαριστώ στον κ. Παύλο Αστερίου, υποψήφιο διδάκτορα του τομέα Γεωτεχνικής της σχολής Πολιτικών Μηχανικών, για την αμέριστη βοήθειά του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Σπύρο και Αλεξάνδρα, τα αδέρφια μου, Βασίλη και Κωνσταντίνα, καθώς και όλους τους φίλους μου για την πολύτιμη στήριξή τους σε όλη την φοιτητική μου πορεία στο Ε.Μ.Π.

2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζονται αναλυτικά ως φαινόμενο οι καταπτώσεις βράχων. Αρχικά ορίζεται το φαινόμενο, αναφέρονται τα αίτια που το προκαλούν καθώς και τα υπάρχοντα μέτρα αντιμετώπισής του. Στην συνέχεια, παρατίθενται οι τέσσερις βασικοί τύποι κίνησης στους οποίους αναλύεται η τροχιά ενός βραχοτεμάχους μετά την αποκόλλησή του από το πρανές. Τέλος, παρουσιάζονται οι μαθηματικές προσεγγίσεις που αφορούν το πολυπλοκότερο από τα τέσσερα είδη κίνησης, αυτό της αναπήδησης και δίνονται οι ορισμοί των συντελεστών αναπήδησης, βάσει των οποίων προσομοιώνεται.

2.1 Ορισμός του φαινομένου

Ως κατάπτωση ορίζεται η απότομη αποκόλληση τεμάχους βράχου από πρανές, το οποίο στη συνέχεια προσκρούει πάνω στην επιφάνεια του πρανούς και αναπηδά μέχρι να σταθεροποιηθεί σε μία νέα θέση ισορροπίας.

Οι βραχοπτώσεις είναι ένα σύνθητες γεωμορφολογικό φαινόμενο που εμφανίζεται κυρίως σε ορεινές ή παράκτιες περιοχές καθώς και σε τεχνητά πρανή. Αποτελεί αντικείμενο μελέτης εδώ και πολλά χρόνια. Έχουν αναπτυχθεί αρκετά μέτρα πρόληψης και αντιμετώπισής του, παρ' όλα αυτά ακόμα και σήμερα υπάρχουν αβεβαιότητες και ζητήματα στον σχεδιασμό που παραμένουν ασαφή και χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης.

Ως φαινόμενο χαρακτηρίζεται από μεγάλο βαθμό επικινδυνότητας και έχει στοιχίσει ακόμα και ανθρώπινες ζωές. Στην Ελλάδα, λόγω της έντονης ορεινής μορφολογίας της, οι βραχοπτώσεις αποτελούν συχνό φαινόμενο με χαρακτηριστικό παράδειγμα το περιστατικό που σημειώθηκε στην κοιλάδα των Τεμπών το 2009.



Εικόνα 2.1 Άποψη από την κατάπτωση των Τεμπών, 2009 (www.ergonblog.gr)

Υπάρχουν δυο βασικές προσεγγίσεις στην αντιμετώπιση των καταπτώσεων, με παθητικά και ενεργητικά μέτρα.. Πιο συγκεκριμένα, στην πρώτη περίπτωση δεν

αποτρέπεται η κατάπτωση αλλά επιδιώκεται να μετριαστούν οι αρνητικές επιπτώσεις της, ελέγχοντας την κίνηση του τεμάχους μετά την αποκόλληση. Τέτοια μέτρα αποτελούν οι φράχτες ανάσχεσης, οι τάφροι στον πόδα του πρανούς, τα μεταλλικά πλέγματα κάλυψης του πρανούς, τα στέγαστρα κ.α. Η δεύτερη προσέγγιση εφαρμόζεται στην θέση έναρξης της βραχόπτωσης και αποσκοπεί στην ενίσχυση της βραχόμαζας για την αποτροπή της απόσπασης του τεμάχους. Παραδείγματα ενεργητικών μεθόδων αποτελούν το εκτοξευμένο σκυρόδεμα, οι αγκυρώσεις, η καθαίρεση επισφαλών όγκων, η αποστράγγιση, η αλλαγή της γεωμετρίας του πρανούς (πχ αλλαγή κλίσης) κ.α.



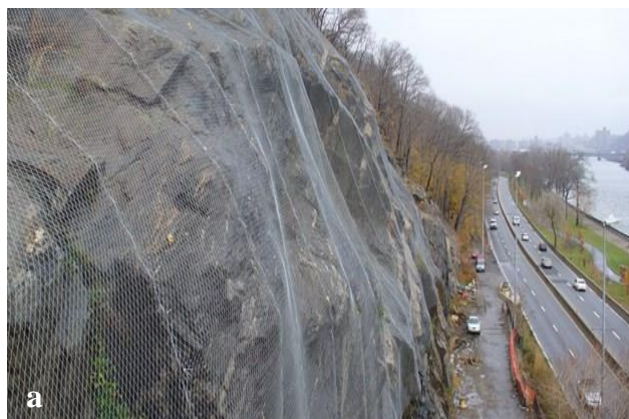
Εικόνα 2.2 Κατάπτωση βράχου στην περιοχή Utah των Ηνωμένων Πολιτειών, 2015 (www.toledoblade.com)



Εικόνα 2.3 Καταπτώσεις βράχων στην Ελλάδα, α) Μύρτος, Κεφαλονιά 2015 (www.protothema.gr), β) Μονεμβάσια, Λακωνία 2011, (www.ethnos.gr)



Εικόνα 2.4 Βραχολίσθηση στο χωριό Πλάκα Κλειτορίας, Καλάβρυτα 2015 (www.protothema.gr)



Εικόνα 2.5 Μέτρα αντιμετώπισης βραχοπτώσεων a) Μεταλλικό πλέγμα (www.geobrugg.com), b)Εύκαμπτος φράχτης ανάσχεσης (www.geobrugg.com)



Εικόνα 2.6 Μεταλλικό στέγαστρο (www.geobrugg.com)



Εικόνα 2.7 Εργασίες κατασκευών μέτρων αντιμετώπισης: a) Εφαρμογή μεταλλικού πλέγματος (www.geobrugg.com), b) Εγκατάσταση αγκυρίων (www.ameritech.com)



Εικόνα 2.8 Εφαρμογή μεταλλικού πλέγματος για τον περιορισμό της κίνησης των τεμαχών (www.geobrugg.com)



Εικόνα 2.9 α)Μεταλλικά πλέγματα πριν και μετά την εφαρμογή τους (www.ameritech.pro), β)Αγκύρωση μεταλλικού πλέγματος στη στέψη πρανούς (www.ameritech.pro)



Εικόνα 2.10 Ανάσχεση βράχων: α) από ευκάμπτη μεταλλική βραχοπαγίδα (www.externalworksindex.co.uk), και β) από μεταλλικά μετωπικά πλέγματα (www.geobrugg.com)



Εικόνα 2.11 Ανάσχεση βράχου από μεταλλικό φράχτη (www.geobrugg.com)

2.2 Αίτια καταπτώσεων

Υπάρχουν πολλοί παράγοντες που μπορούν να οδηγήσουν σε μία πιθανή βραχόπτωση. Σύμφωνα με τον Hoek (2000) οι καταπτώσεις βράχων σχετίζονται με αλλαγές στις δυνάμεις που αναπτύσσονται στο εσωτερικό της βραχομάζας που οφείλονται σε κλιματικά ή βιολογικά γεγονότα. Οι κύριες κατηγορίες των αιτιών που μπορούν να επιφέρουν βραχοπτώσεις είναι οι γεωλογικές-υδρογεωλογικές διαδικασίες, η σεισμική φόρτιση και η ανθρώπινη δραστηριότητα (Αστερίου, 2011).

2.2.1 Γεωλογικές-υδρογεωλογικές διαδικασίες

Η εμφάνιση του φαινομένου των καταπτώσεων είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την ποιότητα της βραχομάζας. Η αντοχή και ευκολία αποσάθρωσης που την χαρακτηρίζουν είναι και αυτά που καθορίζουν την ποιότητά της. Ωστόσο, η αντοχή και ο βαθμός της αποσάθρωσης εξαρτώνται από μια πληθώρα χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων της βραχομάζας τα οποία είναι αποτέλεσμα του τρόπου γένεσης και της τεκτονικής καταπόνησης που δέχεται με τα χρόνια το πέτρωμα.

Κύριοι συντελεστές της μηχανικής αποσάθρωσης αποτελούν:

- **Η κρυστάλλωση των αλάτων**, όπου τα άλατα μέσα στους πόρους και τις ρωγμές του πετρώματος κρυσταλλώνονται, με αποτέλεσμα την διόγκωσή τους. Αποτέλεσμα αυτής είναι η άσκηση δυνάμεων στο πέτρωμα.
- **Η παγετώδης αποσφήνωση**, όπου το νερό που περιέχεται στις ρωγμές του πετρώματος διογκώνεται, λόγω της πήξης του, και ασκεί σημαντικές δυνάμεις στο πέτρωμα.
- **Η θερμική διαστολή και συστολή**, λόγω της διαφοροποίησης στο βαθμό συστολής και διαστολής των επιμέρους ορυκτών τα οποία συνιστούν το πέτρωμα.

- **Η βιογενής δραστηριότητα**, δηλαδή η δραστηριότητα των ζώων με της υπόγειες εκσκαφές τους αλλά και οι ρίζες το φυτών που συνεισφέρουν στη τελική διαμόρφωση της βραχώμαζας διευρύνοντας τις ήδη υπάρχουσες ρωγμές.

Ταυτόχρονα με την μηχανική αποσάθρωση επενεργεί και η χημική όπου αναπτύσσονται τα εξής χημικά φαινόμενα:

- **Υδρόλυση**, κατά την οποία ελεύθερα ιόντα αντικαθιστούν τα θετικά ιόντα του πλέγματος των ορυκτών
- **Οξειδωση**, όπου το οξυγόνο της ατμόσφαιρας σχηματίζει διάφορες χημικές ενώσεις με τα στοιχεία του πετρώματος
- **Διάλυση**, λόγω της παρουσίας οξέος στο νερό με αποτέλεσμα την αύξηση της διαλυτικής του ικανότητας

Όλες αυτές οι παραπάνω χημικές διεργασίες έχουν σαν αποτέλεσμα την αλλοίωση της ορυκτολογικής σύστασης των πετρωμάτων.

Τέλος, ένα επιπλέον φυσικό φαινόμενο με σημαντικές επιπτώσεις στην ποιότητα της βραχώμαζας είναι οι βροχοπτώσεις. Το νερό της βροχής εισέρχεται στις ασυνέχειες και τις ρωγμές της βραχώμαζας με αποτέλεσμα:

- Να συμβάλλει στο φαινόμενο της παγετώδους αποσφήνωσης
- Να ασκεί υδροστατικές πιέσεις στην βραχώμαζα συμβάλλοντας σε φαινόμενα καταπτώσεων ήδη ασταθών τεμαχών
- Να επιταχύνει τις χημικές διεργασίες
- Να αφαιρεί το εδαφικό υλικό που μπορεί να υπάρχει μεταξύ των ρωγμών του πετρώματος και λειτουργεί ως πλήρωση στις ρωγμές χαλαρώνοντας επιπλέον την βραχώμαζα

2.2.2 Σεισμική φόρτιση

Η σεισμική διέγερση μπορεί να θέσει σε κίνηση βραχώδη τεμάχια που βρίσκονται σε οριακή ισορροπία επί του πρηνούς, με αποτέλεσμα την κατάπτωσή τους. Επίσης, η σεισμική δράση προκαλεί μείωση των δυνάμεων ευστάθειας, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η πιθανότητα αστοχίας. Έτσι, υλικά που η σύστασή τους είναι χαλαρή ή εμφανίζουν μικρή συνεκτικότητα καθώς και πρηνή που επηρεάζονται από νεοτεκτονικές διεργασίες ή είναι έντονα κερματισμένα παρουσιάζουν αυξημένο κίνδυνο καταπτώσεων λόγω της σεισμικής καταπόνησης

2.2.3 Ανθρώπινη δραστηριότητα

Αξιοσημείωτη είναι και η συμβολή της ανθρώπινης παρέμβασης στην ανάπτυξη του φαινομένου. Η χρήση εκρηκτικών για την διάνοιξη σηράγγων και την εκσκαφή τεχνητών πρηνών προκαλούν δυναμική καταπόνηση στη βραχώμαζα με πιθανή συνέπεια την αποκόλληση τεμαχών. Τέλος, αποκολλήσεις επιπρόσθετες των επιδιωκόμενων μπορούν να επιφέρουν τα μέτρα καθαίρεσης επισφαλών τεμαχών.

2.3 Επικινδυνότητα καταπτώσεων

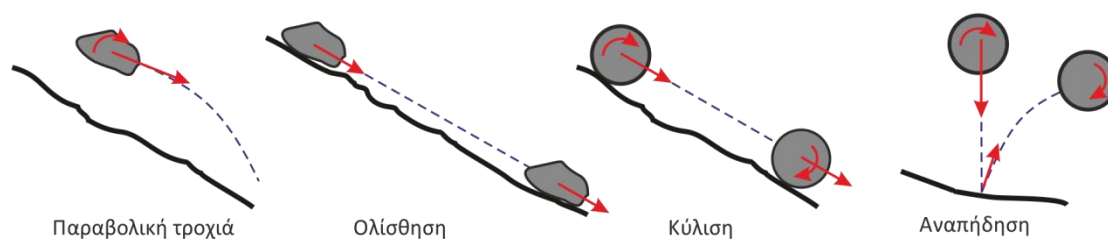
Με στόχο την αποτελεσματικότερη και πιο στοχευόμενη αντιμετώπιση των καταπτώσεων, αποτελεί συνήθη πρακτική η αξιολόγηση του κινδύνου εκδήλωσης καταπτώσεων σε ζώνες επικινδυνότητας. Ο διαχωρισμός, αυτός, βασίζεται σε ορισμένα χαρακτηριστικά τα οποία επηρεάζουν την εμφάνιση του φαινομένου, και είναι τα εξής (Ανδριανόπουλος, 2011):

- **Η κλίση των πρανών:** Μεγάλη κλίση του πρανούς συνεπάγεται σημαντικότερη επίδραση της βαρύτητας στα τεμάχια και κατ' επέκταση μεγαλύτερη πιθανότητα αποκόλλησης.
- **Η πυκνότητα του οδικού δικτύου:** Μεγάλο οδικό δίκτυο συνεπάγεται σημαντική ανθρώπινη δραστηριότητα και παρέμβαση μέσω χρήσης εκρηκτικών και αλλοίωσης των φυσικών συνθηκών της περιοχής.
- **Η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου:** Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως το νερό αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες αιτίες αποσάθρωσης (μηχανικής και χημικής) της βραχώμαζας.
- **Η γεωγραφική κατανομή του ύψους της βροχόπτωσης:** η βροχόπτωση αποτελεί σημαντικό παράγοντα εκδήλωσης του φαινομένου επιδρώντας είτε απ' ευθείας στην βραχώμαζα είτε στο εδαφικό υλικό που μπορεί να πληρώνει τυχόν ασυνέχειες ή ρωγμές στην βραχώμαζα.
- **Η κλιματική ζώνη στην οποία ανήκει η κάθε περιοχή που εξετάζεται:** Έντονες κλιματικές και θερμοκρασιακές μεταβολές, με αντίστοιχες διαστολές και συστολές των πετρωμάτων επιδρούν δυσμενώς στην ποιότητα της βραχώμαζας.
- **Η λιθολογική σύσταση των πρανών:** Το κάθε πέτρωμα συνίσταται από διάφορα ορυκτά, καθένα από τα οποία προσδίδει στο πέτρωμα ιδιαίτερες ιδιότητες και μία συνολική χαρακτηριστική αντοχή που καθορίζει την ποιότητα της βραχομάζας
- **Η σεισμική δραστηριότητα και οι γεωτεκτονικές ζώνες που συμβάλλουν στην αποκόλληση ήδη ασταθών τεμαχίων,**
- **Η πυκνότητα του πληθυσμού:** όσο μεγαλύτερος ο πληθυσμός σε μία περιοχή, τόσο μεγαλύτερες και περισσότερες οι ανθρώπινες παρεμβάσεις με αντίστοιχες συνέπειες στην αύξηση των πιθανοτήτων εκδήλωσης του φαινομένου.
- **Η εκμετάλλευση της γης και η συμπεριφορά των ανθρώπων απέναντί της:** το ριζικό σύστημα μιας περιοχής επηρεάζει άμεσα την ποιότητα των πετρωμάτων.

2.4 Τροχιά κίνησης πέτοντος βραχοτεμάχου

Για την διαστασιολόγηση κατάλληλων μέτρων προστασίας και αντιστήριξης έχουν αναπτυχθεί προγράμματα που μελετούν και προβλέπουν την τροχιά του τεμάχου σε περίπτωση κατάπτωσης. Για την διευκόλυνση της ανάλυσης, η κίνηση του τεμάχου απλοποιείται σε τέσσερα είδη κινήσεων (Descoeudres and Zimmermann 1987):

- Ελεύθερη πορεία στον αέρα (free flight)
- Αναπήδηση (bouncing)
- Κύλιση (rolling)
- Ολίσθηση (sliding)

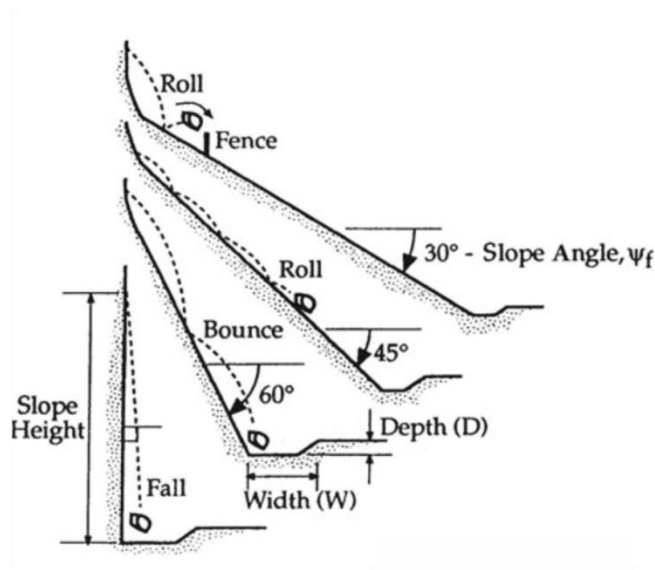


Εικόνα 2.12 Οι τέσσερις τύποι κίνησης του τεμάχου που αποκολλάται από το πρανές.

Κατά την ανάλυση της τροχιάς του τεμάχου που αποκολλάται, αγνοείται η αντίσταση του αέρα, ενώ ως σημείο αναφοράς θεωρείται το κέντρο μάζας του. Με αυτές τις παραδοχές, η τροχιά του τεμάχου μπορεί να θεωρηθεί παραβολική.

Το είδος της κίνησης καθορίζεται βάσει της γωνίας κλίσης του πρανούς (Ritchie 1963). Ως γωνία κλίσης λαμβάνεται η γωνία μεταξύ οριζόντιου επιπέδου και επιπέδου πρανούς. Η κατηγοριοποίηση αυτή έχει ως εξής:

- Για γωνίες κλίσης μέχρι 45° ο επικρατέστερος τύπος κίνησης θεωρείται η κύλιση
- Για γωνίες κλίσης μεταξύ 46° και 63° επικρατεί η αναπήδηση
- Για γωνίες μεγαλύτερες των 64° ως κύρια κίνηση θεωρείται η ελεύθερη πτώση



Εικόνα 2.13 Τα είδη κίνησης του τεμάχους συναρτῆσει της κλίσης του πρανούς (Ritchie, 1963).

2.4.1 Ολίσθηση

Κατά την ολίσθηση το τεμάχος που αποκολλάται κινείται κατά μήκος της πλαγιάς χωρίς να περιστρέφεται μέχρι να καταλήξει σε μία νέα θέση ισορροπίας όπου σταματάει η ολίσθησή του. Η νέα αυτή κατάσταση ηρεμίας προκαλείται από την δύναμη αντίστασης που εφαρμόζεται στο σημείο επαφής του τεμάχους με το πρανές και αντιστέκεται στην κίνησή του. Η έκφραση της δύναμης αυτής δίνεται από το νόμο του Coulomb (Bozzolo and Pamini 1986):

$$F = \mu \cdot N = \mu \cdot m \cdot g \cdot \cos \beta \quad 2.1$$

Όπου,

μ , είναι ο συντελεστής τριβής (κυμαίνεται από 0,6 έως 1)

m , η μάζα του βραχοτεμάχους

g , η επιτάχυνση της βαρύτητας και

β , η κλίση του πρανούς.

2.4.2 Κύλιση

Κατά τη διάρκεια της κύλισης το τεμάχος που αποκολλάται κινείται κατά μήκος της πλαγιάς περιστρεφόμενο.

Πολλές φορές, η κίνηση του τεμάχους κατά μήκος του πρανούς παρουσιάζει μεγαλύτερη πολυπλοκότητα, συνδυάζοντας τα δύο είδη κίνησης: ολίσθηση και περιστροφή. Σε αυτή τη σύνθετη περίπτωση, εφαρμόζεται και πάλι ο νόμος του Coulomb με διαφοροποιημένο το συντελεστή τριβής που τώρα εξαρτάται περισσότερο από τις ιδιότητες του πρανούς. Η δύναμη αντίστασης σε αυτήν την περίπτωση περιγράφεται από τη σχέση (Bozzolo and Pamini 1986):

$$F = \mu \cdot N = \mu \cdot m \cdot g \cdot \cos \beta \quad 2.2$$

Όπου:

$$\mu = \mu_o + \kappa \cdot \frac{d'}{d}$$

και είναι:

μ ,ο συντελεστής τριβής

μ_o ,σταθερά που κυμαίνεται από 0,37 έως 0,67

d ,σταθερά που κυμαίνεται από 0,17 έως 0,26 και

d' ,μήκος επαφής του τεμάχους με το πρανές.

2.4.3 Αναπήδηση

Η αναπήδηση αποτελεί το είδος της κίνησης που παρουσιάζει το μεγαλύτερο βαθμό δυσκολίας ως προς τη μελέτη και την ανάλυσή του. Μέχρι σήμερα, η ανάλυση του φαινομένου γίνεται με την χρήση ορισμένων συντελεστών, γνωστοί ως συντελεστές αναπήδησης. Οι συντελεστές αυτοί εκφράζουν την απώλεια ταχύτητας ή ενέργειας κατά την κρούση.

Παρ' όλο που αυτοί οι συντελεστές παίζουν καθοριστικό ρόλο στην προσομοίωση της τροχιάς του τεμάχους και στον έλεγχο των απωλειών ταχυτήτων και ενεργειών, συναντώνται διαφορετικοί ορισμοί στην βιβλιογραφία, γεγονός που επιβεβαιώνει την έλλειψη κατανόησης του φαινομένου (Chau et al. 2002). Επομένως, επιβάλλεται μία βαθύτερη διερεύνηση του γενικότερου φαινομένου της αναπήδησης και των αντίστοιχων συντελεστών, αφού κάτι τέτοιο συνεπάγεται σωστότερη πρόβλεψη της τροχιάς και κατ' επέκταση πιο στοχευόμενη και αποτελεσματική αντιμετώπιση. Για την ουσιαστικότερη παρατήρηση του φαινομένου χρησιμοποιούνται οι εξής μέθοδοι:

- **Ανάδρομες αναλύσεις** καταπτώσεων όπου μετά την ολοκλήρωση των φαινομένων μελετώνται οι τροχιές που διαγράφησαν, από τα ίχνη που άφησαν τα τεμάχια στο πρανές (πχ το μέγεθος τεμαχών, οι οριζόντιες και πλευρικές αποστάσεις που διένυσαν)

- **Δοκιμές πεδίου (in situ tests)** για την αξιολόγηση των φυσικών παραμέτρων και την ορθή βαθμονόμηση των αριθμητικών μοντέλων
- **Εργαστηριακές δοκιμές υπό κλίμακα** που περιλαμβάνουν πειραματικές προσομοιώσεις καταπτώσεων μικρής κλίμακας.

2.5 Μαθηματική προσέγγιση των συντελεστών αναπήδησης

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω για την κατασκευή των κατάλληλων μέτρων προστασίας έναντι των καταπτώσεων επιβάλλεται η πρόβλεψη της τροχιάς που θα ακολουθήσει το τέμαχος.

Κατά την πρόσκρουση του στην επιφάνεια του πρανούς, το τέμαχος ασκεί μια δύναμη σε αυτό και λόγω δράσης – αντίδρασης το πρανές ασκεί δύναμη στο τέμαχος, που προκαλεί την αναπήδησή του προς την αντίθετη κατεύθυνση. Τα στοιχεία της αναπήδησης του τεμάχους, όπως το ύψος αναπήδησης, η ταχύτητα (μεταφορική και περιστροφική) και η κατεύθυνση εξαρτώνται από τις συνθήκες πρόσκρουσης, οι οποίες με τη σειρά τους εξαρτώνται από έναν μεγάλο αριθμό παραμέτρων.

Πιο συγκεκριμένα, τη στιγμή της πρόσκρουσης του τεμάχους πάνω στην επιφάνεια του πρανούς απελευθερώνεται ενέργεια, γεγονός που οφείλεται σε πολλούς παράγοντες ταυτόχρονα: στην ελαστο-πλαστική συμπεριφορά του υλικού της επιφάνειας πρόσκρουσης, στην αντίσταση κύλισης και ολίσθησης, στην ανάπτυξη ελαστικού κύματος, ακόμα και στην ενδεχόμενη θραύση του (Giani 1992). Όμως, το ποσό της διαχεόμενης ενέργειας καθορίζει την τροχιά που θα ακολουθήσει το τέμαχος. Συνεπώς, κρίνεται απαραίτητος ο υπολογισμός της ποσότητας αυτής, ώστε εν συνεχεία να μπορεί να εκτιμηθεί η συμπεριφορά του βραχοτεμάχους μετά την κρούση.

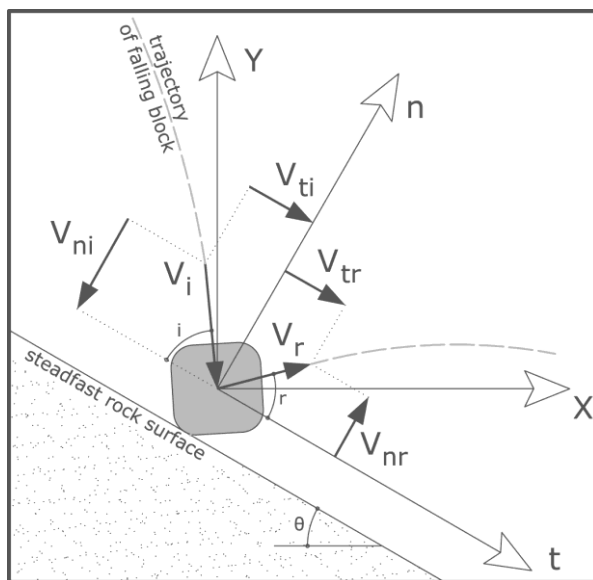
Γενικά, ο μηχανισμός της διάχυσης ενέργειας γίνεται με δύο τρόπους. Η ενέργεια κάθετα στην επιφάνεια του πρανούς καθορίζεται από την ελαστικότητα του υλικού της επιφάνειας πρόσκρουσης και η αντίσταση παράλληλα στην επιφάνεια εξαρτάται από την τριβή ολίσθησης και κύλισης.

Αυτή η διαφοροποίηση των μηχανισμών στην αντίσταση της κίνησης έχει ως συνέπεια τη χρησιμοποίηση επί μέρους ορισμών για τη μέτρηση των απωλειών ενέργειας. Έτσι το μέτρο της αντίστασης κάθετα στο επίπεδο του πρανούς ονομάζεται κάθετος συντελεστής αναπήδησης (normal coefficient of restitution) ενώ αυτό παράλληλα στο επίπεδο του πρανούς ονομάζεται εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης (tangential coefficient of restitution) και ορίζονται ως οι λόγοι των ταχυτήτων ή των ενεργειών πριν και μετά την κρούση. Θεωρητικά, λαμβάνουν ως τιμή τη μονάδα σε περίπτωση πλήρως ελαστικής κρούσης, τιμή μικρότερη της μονάδας σε περίπτωση ανελαστικής συμπεριφοράς και την τιμή μηδέν για πλήρως πλαστική συμπεριφορά

Συνήθως, οι συντελεστές που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς βασίζονται στο χαρακτηριστικά του υλικού που δομεί το πρανές, στον βαθμό συμπίκνωσης και στην φυτοκάλυψη. Όμως, όπως αναφέρουν αρκετοί συγγραφείς (Azzoni et al. 1992; Bozzolo and Pamini 1986; Dorren et al. 2006; Gerber 2001; Hungr and Evans 1996) οι συντελεστές εξαρτώνται και από τα χαρακτηριστικά του ίδιου του βραχοτεμάχους και την κινηματική του συμπεριφορά, συμπεράσματα που έχουν προκύψει από δοκιμές πεδίου και ανάδρομες αναλύσεις. Γι' αυτό, θεωρείται ότι λαμβάνουν υπόψη και τα χαρακτηριστικά της κίνησης, της κρούσης, της ολίσθησης-κύλισης κατά την επαφή, της παραμόρφωσης του τεμάχους.

Εκτός των συνθηκών που επικρατούν πριν την πρόσκρουση, η αναπήδηση διαφοροποιεί περαιτέρω τη στιγμή της επαφής του τεμάχους με την επιφάνεια του πρανούς. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση ύπαρξης εφαπτομενικής συνιστώσας ταχύτητας στο σημείο επαφής, η πρόσκρουση ονομάζεται πρόσκρουση κύλισης ή ολίσθησης (sliding ή slipping impact) και στην περίπτωση που είναι μηδενική και η αντίστοιχη πρόσκρουση ονομάζεται πρόσκρουση προσκόλλησης (sticking impact).

Έχουν αναπτυχθεί διάφορες σχέσεις που εκφράζουν τους συντελεστές αλλά δεν ακολουθούν μια ενιαία λογική. Μέχρι σήμερα, έχουν ορισθεί κυρίως σε όρους ταχυτήτων και σε όρους ενεργειών. Ωστόσο, έχουν εκφραστεί και σε σχέση με την ώθηση πριν και μετά την κρούση (Bozzolo and Pamini 1986; Descoeudres and Zimmermann 1987).



Εικόνα 2.14 Συνιστώσες ταχυτήτων πριν και μετά την αναπήδηση (Asteriou et al, 2012)

2.5.1 Σχέσεις ταχυτήτων

Η νευτώνεια θεωρία για την κεντρική ανελαστική κρούση μεταξύ δύο σωματιδίων δίνει το συντελεστή αναπήδησης ως εξής:

$$R = \frac{V_{r,2} - V_{r,1}}{V_{i,2} - V_{i,1}} \quad (2.3)$$

όπου οι δείκτες *i* (incident) και *r* (rebound) διαχωρίζουν τις ταχύτητες που αναπτύσσονται πριν και μετά την κρούση αντίστοιχα και οι δείκτες 1 και 2 διαχωρίζουν τα δύο σωματίδια που έρχονται σε επαφή.

Πάνω σε αυτή τη σχέση βασίστηκε ο ορισμός των συντελεστών αναπήδησης σε όρους ταχυτήτων, μόνο που στην περίπτωση των καταπτώσεων βράχων το ένα σώμα είναι το πρανές, που έχει μηδενική ταχύτητα. Οι πιο διαδεδομένες σχέσεις, είναι αυτές που λαμβάνουν ξεχωριστά υπόψη τις δύο συνιστώσες της ταχύτητας: την κάθετη (normal) και την εφαπτομενική (tangential) σε σχέση με την επιφάνεια πρόσκρουσης, πριν και μετά την κρούση. Οι δύο συντελεστές είναι:

$$R_n = -\frac{V_{r,n}}{V_{i,n}} \quad (2.4)$$

$$R_t = \frac{V_{r,t}}{V_{i,t}} \quad (2.5)$$

Η κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας αλλάζει πρόσημο κατά την κρούση και συνεπώς τοποθετείται μπροστά από το λόγο το αρνητικό πρόσημο για να λαμβάνει ο συντελεστής θετικές τιμές. Χαρακτηριστικό των παραπάνω εκφράσεων είναι ότι αφορούν τη μεταθετική κίνηση του κέντρου μάζας του τεμάχους.

Άλλη έκφραση του συντελεστή αναπήδησης αφορά τα μέτρα των διανυσμάτων των ταχυτήτων πριν και μετά την κρούση:

$$R_v = \frac{V_r}{V_i} \quad (2.6)$$

Η παραπάνω σχέση απλοποιείται στην περίπτωση της ελεύθερης πτώσης και εμπλέκει το ύψος από το οποίο αρχίζει η κίνηση του τεμάχους (H_i) και το ύψος της αναπήδησης μέχρι το σημείο που μηδενίζεται η ταχύτητα H_r :

$$R_H = \sqrt{\frac{H_r}{H_i}} \quad (2.7)$$

2.5.2 Σχέσεις ενεργειών

Ο συντελεστής αναπήδησης σε όρους ενεργειών εκφράζεται από τον λόγο των ενεργειών του τεμάχους πριν και μετά την κρούση. Στους υπολογισμούς των ενεργειών λαμβάνεται υπόψη η μεταφορική ταχύτητα και παίρνει τη μορφή:

$$R_E = \frac{E_{trans,r}}{E_{trans,i}} = \frac{\frac{1}{2}mV_r^2}{\frac{1}{2}mV_i^2} = \frac{V_r^2}{V_i^2} \quad (2.8)$$

όπου:

m η μάζα του τεμάχους (με την προϋπόθεση ότι δεν μεταβάλλεται κατά την κρούση)

V_i το μέτρο της μεταφορικής ταχύτητας πριν την κρούση και

V_r το μέτρο της μεταφορικής ταχύτητας μετά την κρούση

Με διαχωρισμό του συντελεστή σε κάθετη και εφαπτομενική συνιστώσα παίρνει τις εξής δύο μορφές:

$$R_{E,n} = \frac{V_{n,r}^2}{V_{n,i}^2 + V_{t,i}^2} = \frac{V_{n,r}^2}{V_i^2} \quad (2.9)$$

$$R_{E,t} = \frac{V_{t,r}^2}{V_{n,i}^2 + V_{t,i}^2} = \frac{V_{t,r}^2}{V_i^2} \quad (2.10)$$

Ωστόσο, εκτός από μεταφορική κίνηση πολλές φορές το τέμαχος μπορεί να αναπτύσσει και περιστροφική. Σ' αυτήν την περίπτωση ο συντελεστής γίνεται:

$$R_{TE} = \frac{E_{tot,r}}{E_{tot,i}} = \frac{\frac{1}{2} \left[m(V_{n,r}^2 + V_{t,r}^2) + I\omega_r^2 \right]}{\frac{1}{2} \left[m(V_{n,i}^2 + V_{t,i}^2) + I\omega_i^2 \right]} \quad (2.11)$$

όπου:

ω η περιστροφική ταχύτητα που αναπτύσσει το τέμαχος και

I η ροπή αδράνειας ως προς το κέντρο μάζας

3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Στην ενότητα αυτή, γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση όσον αφορά το φαινόμενο της αναπήδησης. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι παράμετροι οι οποίες επηρεάζουν τους συντελεστές αναπήδησης όπως έχουν προκύψει από εργαστηριακές διερευνήσεις. Για να μπορούν να ληφθούν υπόψη αυτές οι παράμετροι στις αναλύσεις πραγματικών καταπτώσεων εισάγεται η έννοια των συντελεστών προσαρμογής και παρουσιάζονται οι μαθηματικές εκφράσεις με τις οποίες συναντώνται στην βιβλιογραφία.

3.1 Παράμετροι που επηρεάζουν τους συντελεστές αναπήδησης

Σε αυτή την παράγραφο γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση των παραμέτρων που επηρεάζουν τους συντελεστές αναπήδησης και την αναπήδηση ως φαινόμενο συνολικά. Οι παράμετροι αφορούν τα χαρακτηριστικά του τεμάχους που αποκολλάται κατά την βραχόπτωση, τα χαρακτηριστικά του πρανούς και τα κινηματικά χαρακτηριστικά της κρούσης. Ο Szabo (1966) βασιζόμενος στη Νευτώνεια φυσική και την θεωρία των κρούσεων συμπεράνε ότι η αναπήδηση είναι ανεξάρτητη των ιδιοτήτων του υλικού του τεμάχους που αποκολλάται. Ωστόσο, στην βιβλιογραφία υπάρχουν πολλές αναφορές που συσχετίζουν την αναπήδηση με το υλικό του τεμάχους.

Πίνακας 3.1 Παράμετροι που επηρεάζουν τους συντελεστές αναπήδησης (Heidenreich 2004)

Παράμετροι		R_v	R_n	R_t	R_E	Εδαφικό Υλικό	Αναφορά
Τεμάχος	μάζα τεμάχους ↗		↘			Σκυρόδεμα, βράχος	Ushiro et al. (2000)
		↘				Σκυρόδεμα	Kamijo et al. (2000)
	Γωνιότητα ↗ (από σφαιρικό σε γωνιώδες)		↘	↗ (ελαφρώς)	↘	γρανίτης	(Wong et al. 2000)
			$30^\circ < \beta < 60^\circ - 60^\circ < \beta < 75^\circ$ ↗	↘ (ελαφρώς)	↘ (ελαφρώς)	γύψος	(Chau et al. 1999)
Εδαφικό υλικό	Μέτρο Ελαστικότητας ↗		↗	↗		Φυσικά πρανή	(Pfeiffer and Bowen 1989)
			↗	↗		Φυσικά πρανή	(Fornaro et al. 1990)

Παράμετροι	R_v	R_n	R_t	R_E	Εδαφικό Υλικό	Αναφορά	
Εδαφικό υλικό		↗	↗		Έδαφος, γύψος, βράχος	(Chau et al. 2002; Wu 1985)	
	Ξηρή πυκνότητα ↗	$w < w_{opt}$ ↗ $w > w_{opt}$ -	$w < w_{opt}$ ↗ $w > w_{opt}$ -	$w < w_{opt}$ ↗ $w > w_{opt}$ -	έδαφος, γύψος	(Chau et al. 1999)	
	Φυσική υγρασία ↗	$w < w_{opt}$ - $w > w_{opt}$ ↗	$w < w_{opt}$ - $w > w_{opt}$ ↗	$w < w_{opt}$ - $w > w_{opt}$ ↗	έδαφος, γύψος	(Chau et al. 1999)	
Κινηματικά Χαρακτηριστικά	Γωνία Πρόσκρουσης θ ↗ ή κλίση πρανούς β ↘		↘	↗ (ελαφρώς)		ξύλο, βράχος	(Wu 1985)
			↘ (ελαφρώς)			γρανίτης, εκτοξευμένο σκυρόδεμα	(Wong et al. 2000)
			↘			γύψος, έδαφος	
		↘	↘ (ελαφρώς)	-	↘	Γρανίτης, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα	(Chau et al. 2002)
		↘	↘	-	↘	Γύψος, έδαφος	
	Ύψος ρίψης H ↗ & ταχύτητα πρόσκρουσης ↘		↘ (λιγότερο από το $R_t, R_{E,t}$)	↘	↘ ($R_t, R_{E,t}$)	ασβεστόλιθος	(Urciuoli 1988)
		↘				Σκυρόδεμα	(Kamijo et al. 2000)
			↘ (ελαφρώς)	-		Σκυρόδεμα, βράχος	(Ushiro et al. 2000)

Πίνακας 3.2 Παράμετροι που επηρεάζουν το φαινόμενο της αναπήδησης (Labouse and Heidenreich 2009)

Χαρακτηριστικά πλαγιάς	Ιδιότητες τεμάχους	Κινηματικά χαρακτηριστικά
Αντοχή	Αντοχή	Ταχύτητα πρόσκρουσης (μεταφορική περιστροφική)
Στιβαρότητα (Δυσκαμψία)	Στιβαρότητα (Δυσκαμψία)	Γωνία πρόσκρουσης
Τραχύτητα	Βάρος- μέγεθος	Προσανατολισμός του τεμάχους
Κλίση	Σχήμα	

3.2 Συγκεντρωτικός πίνακας τιμών συντελεστών αναπήδησης από την βιβλιογραφία

Παρακάτω παρατίθενται συνοπτικά τιμές των συντελεστών αναπήδησης από την βιβλιογραφία και αφορούν διάφορες περιπτώσεις υλικών.

Πίνακας 3.3 Τιμές συντελεστών αναπήδησης από την βιβλιογραφία

Αναφορά	R_n	R_t	Υλικό - Παρατηρήσεις
(Habib 1977)	0,75-0,80	-	Βασισμένο σε εμπειρία στην Ιταλία
	0,50-0,60	-	Βασισμένο σε εμπειρία στη Νορβηγία
(Piteau & Clayton 1977)	0,80-0,90	0,65-0,75	Συμπαγής βράχος
	0,50-0,80	0,45-0,65	Κορήματα μαζί με μεγάλα τεμάχια βράχου
	0,40-0,50	0,35-0,45	Συμπαγή κορήματα μαζί με μικρά τεμάχια βράχου
	0,20-0,40	0,20-0,30	Πλαγίες με φυτοκάλυψη
(Wu 1985)	0,20-0,80	0,50-0,75	Βράχος πάνω σε βράχο ή ξύλινη επιφάνεια
(Heierli 1985)	0,95	-	Βράχος
	0,55	-	Χαλίκια στρώσης 35 cm
	0,45	-	Χαλίκια στρώσης 70 cm
	0,45	-	Κορήματα
(Hoek 1987)	0,53	0,99	Συμπαγής βράχος
	0,40	0,90	Ασφαλτοστρωμένος δρόμος
	0,35	0,85	Σάρρες, ογκόλιθοι
	0,32	0,82	Κορήματα
	0,32	0,80	Κορήματα με φυτοκάλυψη
	0,30	0,80	Εδαφικό υλικό με λίγη βλάστηση
(Urciuoli 1988)	0,05-0,35	0,50-1,00	Βραχώδη τεμάχια ασβεστόλιθου
	-	0,24	Κορήματα

Αναφορά	R _n	R _t	Υλικό - Παρατηρήσεις
(Pfeiffer and Bowen 1989)	0,37-0,42	0,87-0,92	Λεία, σκληρή επιφάνεια σαν στρώσεις βράχου
	0,33-0,37	0,83-0,87	Βράχοι ή ογκόλιθοι με λίγη βλάστηση ή έδαφος
	0,30-0,33	0,83-0,87	Κορήματα με λίγη βλάστηση
	0,30-0,33	0,80-0,83	Κορήματα με βλάστηση
	0,28-0,32	0,80-0,83	Εδαφικό υλικό με λίγη βλάστηση
	0,28-0,32	0,78-0,82	Εδαφικό υλικό με βλάστηση
(Giani 1992)	0,50	0,95	Βράχος
	0,35	0,85	Βράχος με ογκολίθους
	0,30	0,70	Κορήματα με ομοιόμορφη κατανομή στοιχείων
	0,25	0,55	Έδαφος με βλάστηση
(Azzoni et al. 1992)	0,45	0,45	Χαλαζίτης
	0,66	0,30	Χαλαζίτης
	0,66	0,62	Ασβεστόλιθος
	0,8	1,22	-
(Hungr and Evans 1988)	0,90	0,90	Μικρά τεμάχια πάνω σε βράχο
	0,70	0,80	Μεγάλα τεμάχια σε κορήματα
(Budetta and Santo 1994)	0,20	0,53	Βράχος (από βαθμονόμηση προγράμματος)
(Gerber 1995)	0,17-0,43	0,45-0,88	Ασβεστόλιθος
(Kamijo et al. 2000)	0,10-0,35	-	Κατακόρυφη πτώση τεμάχους 220 kg σε σκληρή επιφάνεια
	0,10	-	Κατακόρυφη πτώση τεμάχους 800 kg σε σκληρή επιφάνεια
(Ushiro et al. 2000)	0,10-0,40	0,71	-
(Jones et al. 2000)	0,60-1,00	0,90-1,00	Λεία και στρωσιγενής επιφάνεια
	0,15-0,30	0,75-0,95	Βράχος και ογκόλιθοι
	0,12-0,20	0,65-0,95	Κορήματα και πλαγιές με έδαφος
	0,10-0,20	0,50-0,80	Πλαγιές με χαλαρό έδαφος
(Giani et al. 2004)	0,48	0,79	Οφθιολιθικός βράχος μέσης κλίσης 27,5°
	0,25	0,47	Αποσαθρωμένος γρανιτικός βράχος μέσης κλίσης 36°
(Cagnoli and	0,15	-	Ελαφρόπετρες με γωνία πρόσπτωσης 80°

Αναφορά	R _n	R _t	Υλικό - Παρατηρήσεις
Manga 2003)	0,55	-	Ελαφρόπετρες με γωνία πρόσπτωσης 25°
(Dorren et al. 2004)	0,77	0,36	Δασική περιοχή με μέση κλίση πρανών 38°
	0,70	0,26	Μη δασική περιοχή με μέση κλίση πρανών 38°
(Topal et al. 2007)	0,46	0,71	Ανάδρομες αναλύσεις, περιοχή με γεωλογικό υπόβαθρο από ανδεσίτες
(Labieuse and Heidenreich 2009)	0,003-0,257	0,07-1,00	Πειράματα μικρής και μέσης κλίμακας πάνω σε στρώση άμμου-Δοκίμια σκυροδέματος
(Spadari et al. 2012)	1,06	0,74	Αλακαλικός Βασάλτης
	1,15	0,73	Χαλαζιακός Ψαμμίτης
	1,18	0,78	Lithic Sandstones
(Αστερίου 2011)	0,34-0,52	0,70-0,88	Μάρμαρο Πεντέλης
	0,22-0,52	0,77-0,97	Ασβεστόλιθος
	0,24-0,56	0,56-0,88	Σχιστόλιθος
	0,38-0,62	0,72-0,98	Χαλαζιακός Ψαμμίτης
	0,14-0,58	0,61-0,99	Μάργα
(Σαρόγλου κ.α. 2010)	0,48	0,77	Εργαστηριακές δοκιμές με σφαιρικά δοκίμια από ασβεστόλιθο
	0,46	0,83	Ανάδρομες αναλύσεις με σφαιρικά δοκίμια από ασβεστόλιθο
(Giacomini et al. 2012)	0,61-1,14	0,40-0,83	Ψαμμίτης
	0,59-0,93	0,52-0,83	Ιλύλιθος
	0,11-0,22	0,40-0,80	Αποσαθρωμένα κορήματα
	0,41	0,64	Γαιάνθρακας
(Ansari et al. 2012)	0,35	0,85	Ανάδρομες αναλύσεις- Βασάλτης
(Asteriou et al. 2013b)	0,52	0,49	Μάρμαρο (Τύπος I)
	0,64	0,62	Μάρμαρο (Τύπος II)
	0,66	0,66	Ψαμμίτης
	0,52	0,51	Κρυσταλλικός ασβεστόλιθος
	0,50	0,47	Ασβεστόλιθος
	0,38	0,34	Σχιστόλιθος
	0,51	0,47	Πρασινοσχιστόλιθος
	0,36	0,33	Μάργα
	0,56	0,54	Ένεμα SikaDur

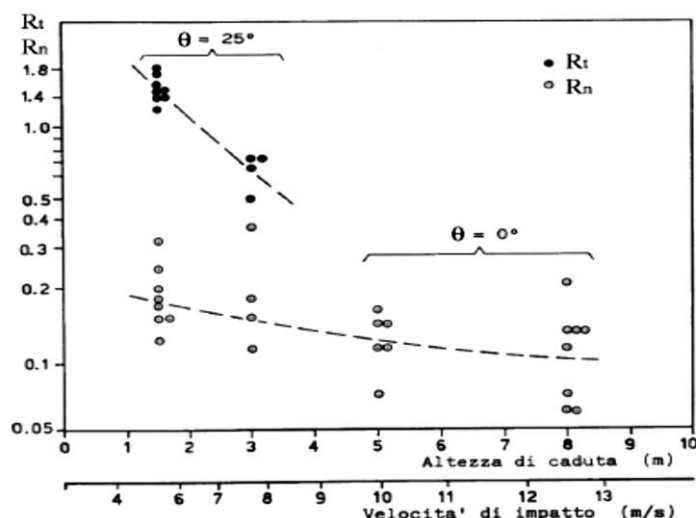
Αναφορά	R_n	R_t	Υλικό - Παρατηρήσεις
	0,49	0,47	Ένεμα SikaGrout
	0,59	0,56	Πολυεστέρας
	0,25	0,55	Έδαφος με βλάστηση

Παρατηρούμε ότι για διαφορετικές πειραματικές μεθόδους που αφορούν ίδια υλικά οι αποκλίσεις των τιμών είναι σημαντικές.

3.3 Αναδρομή αποτελεσμάτων από προηγούμενες έρευνες

Παρακάτω, παρουσιάζονται ενδεικτικά τα συμπεράσματα από έρευνες που έχουν επιτελεστεί πάνω στο αντικείμενο των συντελεστών αναπήδησης. Αξίζει να σημειωθεί ότι στις εργαστηριακές δοκιμές σπάνια χρησιμοποιούνται ως δοκίμια φυσικά τεμάχια πετρώματος, καθώς είναι δύσκολο να διαμορφωθούν στην απαραίτητη μορφή, έτσι τις περισσότερες φορές χρησιμοποιούνται τεχνητά δοκίμια.

Οι (Urciuoli 1988) προσδιόρισαν τους συντελεστές αναπήδησης R_n και R_t από πειράματα πεδίου και εργαστηριακές δοκιμές. Από την έρευνά τους προέκυψε ότι οι τιμές όλων των συντελεστών αναπήδησης εξαρτώνται άμεσα από παράγοντες όπως η γωνία κλίσης του πρανού, η ταχύτητα πρόσπτωσης του τεμάχους, το ύψος ρίψης, το σχήμα του τεμάχους και τον προσανατολισμό του τεμάχους πριν την πρόσκρουση. Πιο συγκεκριμένα, αναφέρεται ότι αύξηση της ταχύτητας πρόσκρουσης συνεπάγεται μείωση των τιμών των συντελεστών αναπήδησης και ότι ο εφαπτομενικός συντελεστής είναι πιο ευαίσθητος όσον αναφορά αυτήν την παράμετρο παρά ο κάθετος.



Εικόνα 3.1 Επίδραση ταχύτητας πρόσκρουσης στους συντελεστές αναπήδησης, (Urciuoli, 1988)

Οι (Ushiro et al. 2000), μέσω πειραμάτων μικρής κλίμακας σε επιφάνειες αποτελούμενες από βράχο και σκυρόδεμα, μελέτησαν την επιρροή της ταχύτητας

πρόσκρουσης στους συντελεστές αναπήδησης. Πιο συγκεκριμένα, προέκυψε ότι ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης μειώνεται με την αύξηση της κάθετης συνιστώσας της ταχύτητας πρόσκρουσης. Αντίθετα, η επιρροή της ταχύτητας στον εφαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης είναι αμελητέα. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης μειώνεται με την αύξηση της μάζας του τεμάχους, ανεξαρτήτως της ταχύτητας πρόσπτωσης. Τέλος, εξήχθησαν οι παρακάτω σχέσεις που συνδέουν τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης (R_n) με την κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας πρόσπτωσης (v_n) στην περίπτωση επιφανειών από σκυρόδεμα (πρώτη σχέση) και στην περίπτωση βραχωδών επιφανειών (η δεύτερη σχέση).

$$R_n = 0,8478 \cdot e^{-0,0842} \cdot (-v_n) \quad (3.1)$$

$$R_n = 2,506 \cdot e^{-0,1053} \cdot (-v_n) \quad (3.2)$$

Οι (Richards et al. 2001), από εργαστηριακές δοκιμές σε εννέα διαφορετικά γεωυλικά και με τεμάχια ποικίλων διαστάσεων και τραχύτητας, διατύπωσαν την παρακάτω σχέση για τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης (R_n), συναρτήσει της σκληρότητας Schmidt:

$$R_n = \frac{-110 + 9 \cdot S_{slab} + 4 \cdot S_{ball} + 4 \cdot a}{1000} \quad (3.3)$$

Όπου

S_{slab} (-), η τιμή της σκληρότητας Schmidt για την επιφάνεια πρόσπτωσης,

S_{ball} (-), η τιμή της σκληρότητας Schmidt για το τεμάχος πρόσκρουσης και

a ($^{\circ}$), η γωνία της επιφάνειας πρόσπτωσης με αυτή του οριζοντίου επιπέδου.

Από την σχέση αυτή παρατηρείται ότι η σκληρότητα του πρανούς επηρεάζει 2,25 φορές περισσότερο τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης από αυτή του τεμάχους. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι οι τιμές του κάθετου συντελεστή για ομαλά τεμάχια με λεία επιφάνεια είναι έως και τριπλάσιες από αυτές για τεμάχια με ακαθόριστη μορφή. Ως αποτέλεσμα αυτής της παρατήρησης διεξήχθη μια πρόσθετη σειρά δοκιμών μέσω της οποίας διατυπώθηκε η παρακάτω σχέση για ακανόνιστου σχήματος τεμάχια:

$$R_{n-ακανόνιστο} = \frac{-9 + 49 \cdot R_{n-λειο}}{100} \quad (3.4)$$

Δεδομένου του ότι δεν υπήρχαν ενδείξεις στην παρούσα έρευνα για επιρροή του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης από την σκληρότητα Schmidt, δεν την εμβάθυναν προς εκείνη την κατεύθυνση.

3.4 Συντελεστές προσαρμογής

Από τις εργαστηριακές δοκιμές καταπτώσεων προκύπτουν οι παράμετροι που επηρεάζουν την αναπήδηση και κατ' επέκταση τους συντελεστές αναπήδησης. Η απόκριση του τεμάχους στην κρούση καθορίζεται σε σημαντικό βαθμό από την σφοδρότητα της κρούσης, αφού ελέγχει την έκταση των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων. Έτσι, η ταχύτητα πρόσκρουσης έχει σημαντικό αντίκτυπο στις τιμές των συντελεστών αναπήδησης.

Έχουν προταθεί κατά καιρούς διάφοροι συντελεστές προσαρμογής. Οι περισσότεροι από αυτούς λαμβάνουν υπόψη τους ως παράμετρο την ταχύτητα πρόσκρουσης. Υπάρχουν, ωστόσο, και συντελεστές βασισμένοι είτε στην ορμή, είτε στην μάζα.

3.4.1 Συντελεστές προσαρμογής σε όρους ταχυτήτων.

Οι (Pfeiffer and Bowen 1989) παρουσίασαν στο προσομοίωμα βραχοπτώσεων CRSP τον συντελεστή προσαρμογής για τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης, ως εξής:

$$B_v = \frac{1}{1 + (v_{i,n} / v_{ref})^2} \quad (3.5)$$

Όπου

v_{ref} η ταχύτητα αναφοράς, που ισούται με 9.14 m/s και

B_v συντελεστής προσαρμογής.

Η σχέση αυτή είναι η πλέον διαδεδομένη για την προσαρμογή του κάθετου συντελεστή αναπήδησης και χρησιμοποιείται στην πλειοψηφία των λογισμικών προσομοίωσης των καταπτώσεων. Σύμφωνα, όμως, με τους (Bourrier and Hungr 2011) δεν υπάρχει ιδιαίτερη τεκμηρίωση για τη εφαρμοσιμότητα της σχέσης αυτής σε τεμάχη διαφορετικών μεγεθών.

Οι (Richards et al. 2001) μετά από εργαστηριακή διερεύνηση, πρότειναν για την παραπάνω σχέση $v_{ref} = 5$ m/s.

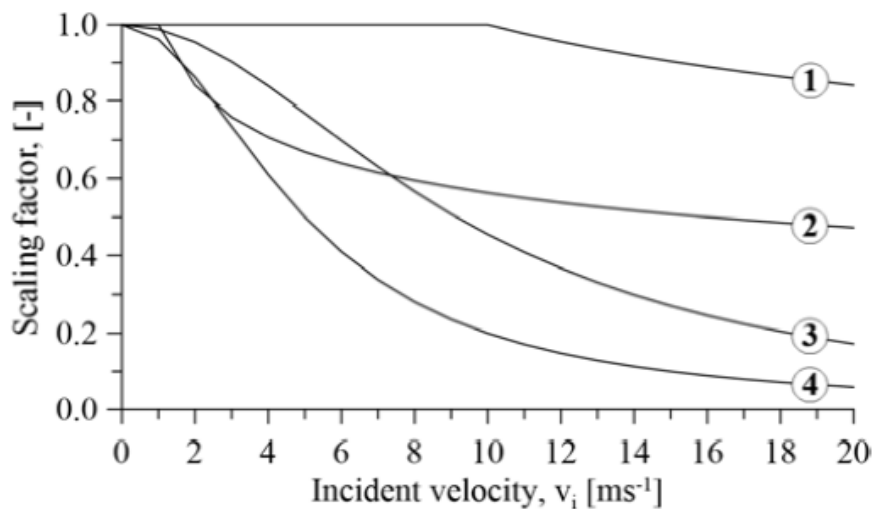
Οι (Rammer et al. 2010) εισήγαγαν ένα συντελεστή κλίμακας για ταχύτητες πριν την πρόσκρουση v_i μεγαλύτερες από 10 m/s.

$$k = \begin{cases} 1, & v_i \leq 10 \text{ms}^{-1} \\ 10^{0.25} v_i^{-0.25}, & v_i > 10 \text{ms}^{-1} \end{cases} \quad (3.6)$$

Η εφαρμογή συντελεστή προσαρμογής μόνο σε περιπτώσεις όπου η ταχύτητα πρόσκρουσης είναι μεγαλύτερη από 10m/s αιτιολογείται καθότι οι προτεινόμενες στην βιβλιογραφία τιμές, προέρχονται από δοκιμές με μικρότερη ταχύτητα v_i , και άρα συμπεριλαμβάνεται η επίδραση της κλίμακας.

Ο παραπάνω τύπος προέρχεται από την σχέση που προτάθηκε από τον (Johnson 1985), σύμφωνα με την οποία, ο συντελεστής κλίμακας είναι ανάλογος της ταχύτητας πρόσκρουσης $v_i^{-0.25}$.

Παρ' όλο που οι παραπάνω σχέσεις βασίζονται στην ίδια παράμετρο, την ταχύτητα πρόσκρουσης, παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση για ίδιες τιμές ταχυτήτων, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά και στο παρακάτω διάγραμμα:



Εικόνα 3.2 Διάγραμμα ταχύτητας v_i – Συντελεστή κλίμακας (Asteriou et al. 2013) με τις σχέσεις των 1) Rammer et al. (2010), 2) Johnson(1985), 3) Pfeiffer & Bowen (1989), 4) Richards et al. (2001)

3.4.2 Συντελεστής κλίμακας βασισμένος στη μάζα του τεμάχους.

Είναι ένας συντελεστής παρόμοιας μορφής με εκείνον των Pfeiffer & Bowen (1989) και είναι διαθέσιμος στο λογισμικό Rocfall της εταιρίας Rocscience (Stevens 1998).

$$B_m = \frac{1}{1 + (m / m_{ref})^2} \quad (3.7)$$

Όπου:

m_{ref} η μάζα αναφοράς

Παρόλα αυτά δεν προτείνεται κάποια τιμή για την μάζα αναφοράς, ενώ η τεκμηρίωση της σχέσης είναι ανεπαρκής.

Σύμφωνα με τους δημιουργούς του λογισμικού δε συνίσταται η χρήση του μαζί με αντίστοιχους συντελεστές κλίμακας ταχυτήτων, διότι δίνουν μη ρεαλιστικές τροχιές ως αποτέλεσμα. Καμία περαιτέρω πληροφορία δεν δίνεται για την μέθοδο εξαγωγής της σχέσης, καθιστώντας την χρήση της προβληματική.

3.4.3 Συντελεστής κλίμακας βασιζόμενος στην ορμή του τεμάχους

Οι (Bourrier and Hungr 2011), πρότειναν ένα συντελεστή κλίμακας λαμβάνοντας υπόψη ως παράμετρο την ορμή του τεμάχους. Σε αυτή την περίπτωση, οι συντελεστές αναπήδησης περιγράφονται μία παραβολική συνάρτηση που αποδίδει την τιμή μονάδα για ‘μαλακές’ κρούσεις και την τιμή μηδέν για ‘σφοδρές’ κρούσεις, όπου όλη η ενέργεια διαχέεται μέσω της πλαστικής παραμόρφωσης. Ο συντελεστής δίνεται από την σχέση:

$$k' = \frac{M_{0.5}}{M_n + M_{0.5}} \quad (3.8)$$

Οι (Asteriou et al. 2013a) διερεύνησαν την επίδραση της ορμής του τεμάχους πρόσπτωσης στους συντελεστές αναπήδησης. Για τη συγκεκριμένη έρευνα, η βραχύπωση προσομοιάστηκε με ελεύθερες πτώσεις σφαιρικών δοκιμίων πάνω σε βάσεις ίδιου υλικού με αυτό των δοκιμίων που προσέπιπταν πάνω τους κάθε φορά. Για τη κατασκευή των δοκιμίων και των βάσεων πρόσκρουσης χρησιμοποιήθηκαν δύο τεχνητά υλικά, τσιμεντένεμα SikaGrout και εποξειδική ρητίνη. Συνολικά, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με επτά σφαιρικά δοκίμια διαφορετικών μαζών, τέσσερα από SikaGrout και τρία από εποξειδική ρητίνη, με σκοπό την διερεύνηση της επίδρασης της μάζας στους συντελεστές. Επίσης, οι ρίψεις διεξήχθησαν από διαφορετικά ύψη για την διερεύνηση της επίδρασης που έχει η ταχύτητα πρόσκρουσης.

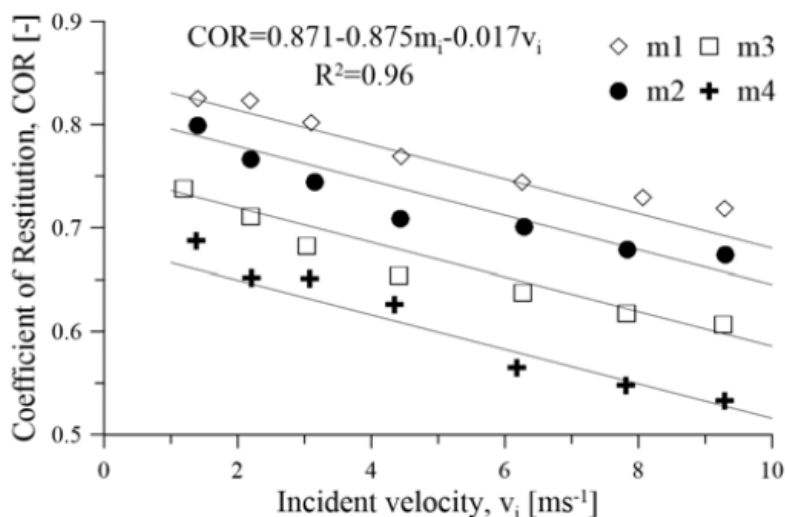
Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την έρευνα αποδεικνύουν τον καθοριστικό ρόλο των κινηματικών χαρακτηριστικών των βραχοτεμαχών στους συντελεστές αναπήδησης και κατ' επέκταση στην τροχιά που θα ακολουθήσουν τα τεμάχια. Πιο

συγκεκριμένα, προέκυψε ότι οι συντελεστές εξαρτώνται από την ταχύτητα πρόσπτωσης αλλά, περισσότερο, από τη μάζα, ενώ αύξηση των δύο παραμέτρων συνεπάγεται μείωση των συντελεστών. Μέχρι σήμερα, οι συντελεστές αποτελούσαν συνάρτηση μόνο των ιδιοτήτων των υλικών, με αποτέλεσμα να λαμβάνονται ίδιες τιμές συντελεστών για τεμάχια ίδιου υλικού αλλά διαφορετικής μάζας και ταχύτητας. Από τα συμπεράσματα, όμως, των (Asteriou et al. 2013a) η αντιμετώπιση των συντελεστών μέχρι σήμερα αποδείχθηκε ανακριβής.

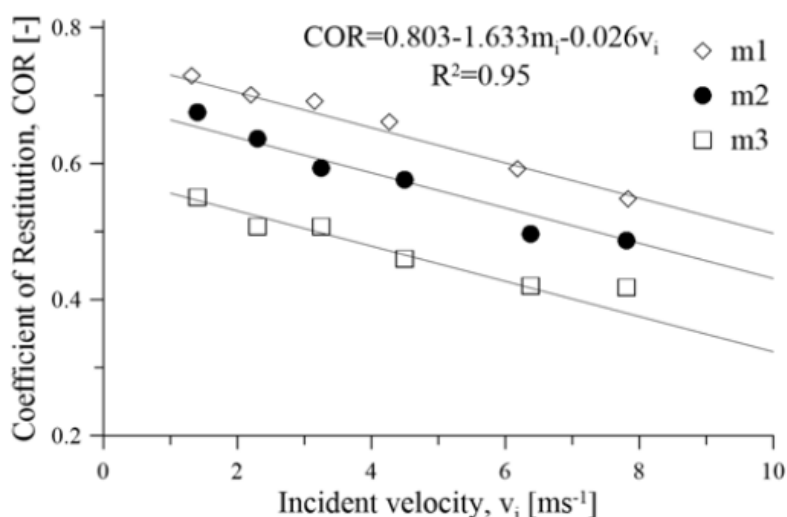
Οι ιδιότητες των δύο υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή των πειραμάτων:

Πίνακας 3.4 Ιδιότητες Υλικών, (Asteriou et al. 2013a)

Ιδιότητες υλικού	Ένεμα τσιμεντοειδούς βάσης	Εποξειδική ρητίνη
Πυκνότητα ρ (kN/m^3)	21,90	20,40
Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (Mpa)	37,40	86,50
Μέτρο του Young (Gpa)	15,70	11,00
Λόγος Poisson (ν)	0,11	0,38
Αντοχή σε εφελκυσμό (Mpa)	7,50	15,60
Ταχύτητα κυμάτων P (m/s)	4335,00	4125,00
Ταχύτητα κυμάτων S (m/s)	2575,00	2430,00
Σκληρότητα Schmidt, R	33,00	42,00



Εικόνα 3.3 Οι τιμές των συντελεστών αναπήδησης συναρτήσει της ταχύτητας πρόσπτωσης για τις τέσσερις μάζες από εποξειδική ρητίνη (Asteriou et al, 2013a).



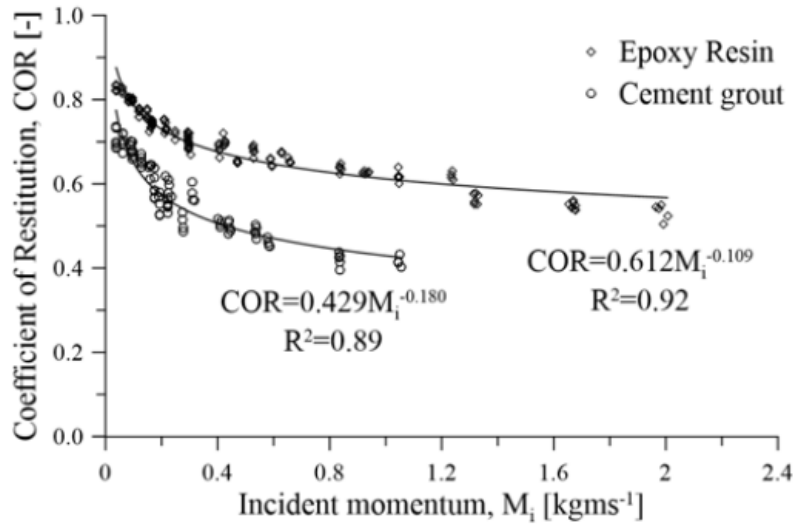
Εικόνα 3.4 Οι τιμές των συντελεστών αναπήδησης συναρτήσει της ταχύτητας πρόσπτωσης για τις τρεις μάζες από τσιμεντένεμα (Asteriou et al, 2013a).

Οι γραμμές προσαρμογής στα παραπάνω διαγράμματα προέκυψαν από πολυμεταβλητές γραμμικές παλινδρομήσεις. Όμως, επισημαίνεται ότι τα αποτελέσματα αυτά δεν ικανοποιούν την περίπτωση των ελαστικών κρούσεων, όπου θεωρητικά θα έπρεπε οι συντελεστές να λαμβάνουν τιμές ίσες με τη μονάδα ανεξαρτήτως μάζας. Επίσης, δεν λειτουργούν ικανοποιητικά για μεγαλύτερες τιμές μάζας ή ταχύτητας καθώς οδηγούν σε αρνητικούς συντελεστές αναπήδησης..

Έτσι, τα αποτελέσματα ερμηνεύθηκαν με μία μη γραμμική σχέση που περιγράφει τον συντελεστή αναπήδησης συναρτήσει της ορμής του πίπτοντος τεμάχους ακριβώς πριν την κρούση:

$$COR = a \cdot (m \cdot v_i)^{-b} \quad (3.9)$$

Όπου a, b παράμετροι που επηρεάζονται από τις ιδιότητες του υλικού του πέπτοντος τεμάχους όπως η αντοχή και η ελαστικότητα.



Εικόνα 3.5 Συσχέτιση του συντελεστή αναπήδησης με την ορμή του τεμάχους πριν την κρούση (Asteriou et al. 2013a)

Η παραπάνω σχέση περιγράφει ικανοποιητικά την απόκριση του τεμάχους και είναι συμβατή με τις θεωρητικές απαιτήσεις του προβλήματος

4 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η διαδικασία διεξαγωγής των πειραμάτων. Αρχικά, παρατίθεται η λογική βάσει της οποίας σχεδιάστηκε και πραγματοποιήθηκε η πειραματική διαδικασία. Εν συνεχεία, παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη και περιγράφονται αναλυτικά τα στάδια εκτέλεσης των δοκιμών. Έπειτα, παρουσιάζονται οι τυπικές εργαστηριακές δοκιμές βραχομηχανικής που έγιναν για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν. Τέλος παρουσιάζεται το πρόγραμμα επεξεργασίας των αποτελεσμάτων.

4.1 Φιλοσοφία πίσω από το πείραμα

Όπως αναλύθηκε στο πρώτο κεφάλαιο σκοπός της παρούσης διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της επιρροής των χαρακτηριστικών πρόσκρουσης σε συνδυασμό με τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού στους συντελεστές αναπήδησης. Γι' αυτό το σκοπό η κατάπτωση προσομοιώθηκε στο εργαστήριο με την ρίψη σφαιρικών δοκιμίων πάνω σε λείες βάσεις με τη μορφή ελεύθερης και κεκλιμένης πτώσης. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για τις δοκιμές είναι μάρμαρο, ψαμμίτης και ένεμα τσιμεντοειδούς βάσης. Οι δοκιμές έγιναν από διαφορετικά ύψη απελευθέρωσης και υπό διαφορετικές κλίσεις έτσι ώστε να προσδιορίσουμε τον ρόλο της ταχύτητας στους συντελεστές. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν σφαιρίδια διαφορετικών μεγεθών με σκοπό τον καθορισμό της επίδρασης που έχει η μάζα στην πρόσκρουση.

4.2 Διάταξη του εργαστηρίου

Χρησιμοποιήθηκαν δύο πειραματικές διάταξεις, οι οποίες έχουν αναπτυχθεί στο εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Βραχομηχανικής στον τομέα Γεωτεχνικής της σχολής Πολιτικών Μηχανικών, από τον υποψήφιο διδάκτορα Παύλο Αστερίου. Η μία διάταξη είναι για δοκιμές ελεύθερης πτώσης και η άλλη για παραβολικές ρίψεις.

Η καταγραφή της κίνησης γίνεται με την χρήση κάμερας ταχείας λήψης . Επειδή η επεξεργασία γίνεται με τεχνικές μηχανικές όρασης, ο φωτισμός της σκηνής πρέπει να ευνοεί την διακριτοποίηση του τεμάχους, οπότε χρησιμοποιήθηκαν προβολείς για τον κατάλληλο φωτισμό της.

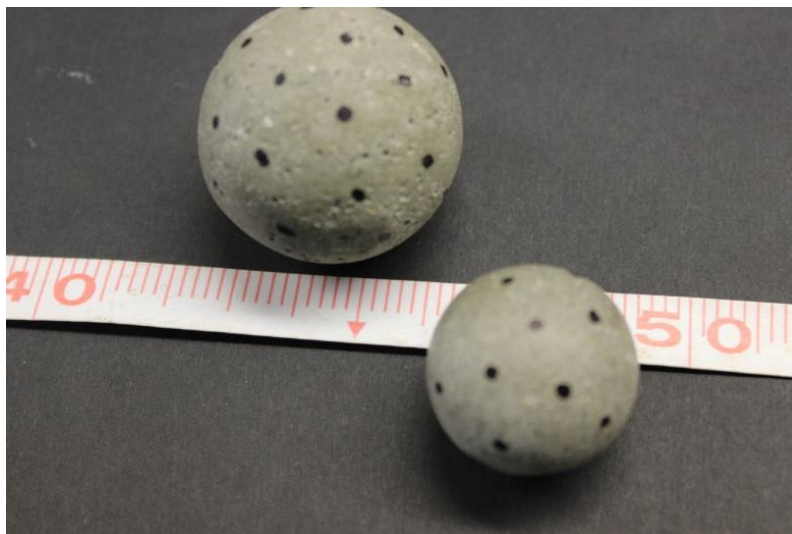
4.2.1 Δοκίμια

Επιλέχθηκε σφαιρικό σχήμα δοκιμίων αφού είναι το βέλτιστο για τη μελέτη των καταπτώσεων στο εργαστήριο λόγω της συμμετρίας του. Τα δοκίμια από τσιμέντο διαμορφώθηκαν με κατάλληλα καλούπια στα οποία εγχύθηκε τσιμεντένεμα, ενώ τα δοκίμια από ψαμμίτη και μάρμαρο, που η διαμόρφωσή τους σε σχήμα σφαιρικό είναι πολύπλοκη, ανατέθηκε σε γλύπτη.

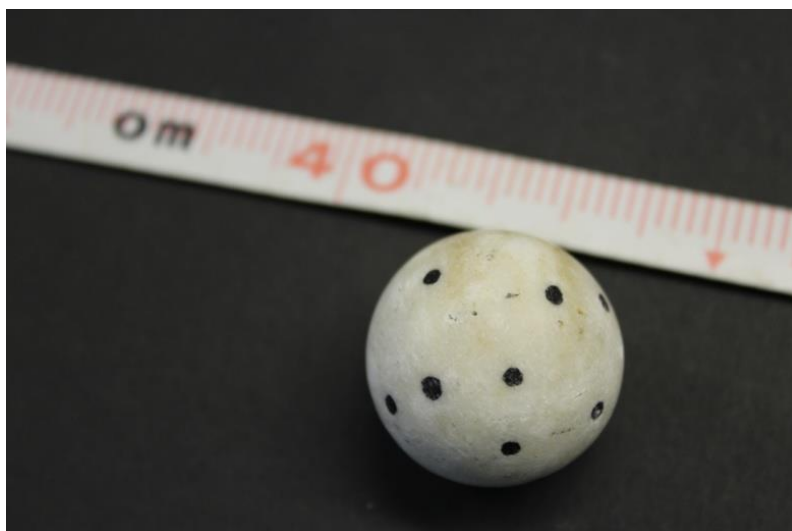
Για την μελέτη της συμπεριφοράς του μαρμάρου και του ψαμμίτη κατά την κρούση χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια τριών διαφορετικών διαστάσεων, ενώ για το τσιμέντο χρησιμοποιήθηκαν δύο. Οι μάζες υπολογίσθηκαν με ζυγαριά υψηλής ακριβείας.



Εικόνα 4.1 Δοκίμια Ψαμμίτη



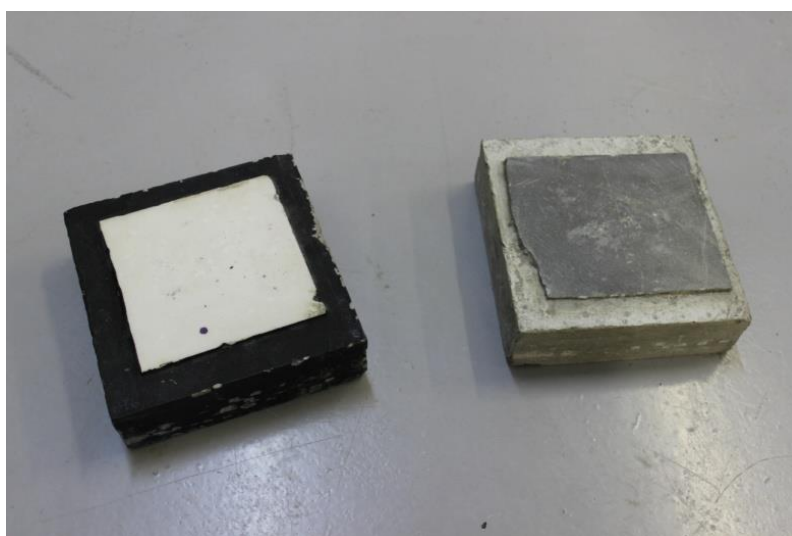
Εικόνα 4.2 Δοκίμια Τσιμέντου



Εικόνα 4.3 Δοκίμιο Μαρμάρου

4.2.2 Βάσεις ρίψης

Από φυσικό πέτρωμα διαμορφώθηκε πλάκα πάχους 5cm η οποία εγκιβωτίστηκε με ένεμα στην πρότυπη μήτρα σκυροδέματος ώστε να αποκτήσει κάτοψη τετραγωνικής μορφής διαστάσεων 15x15 cm.

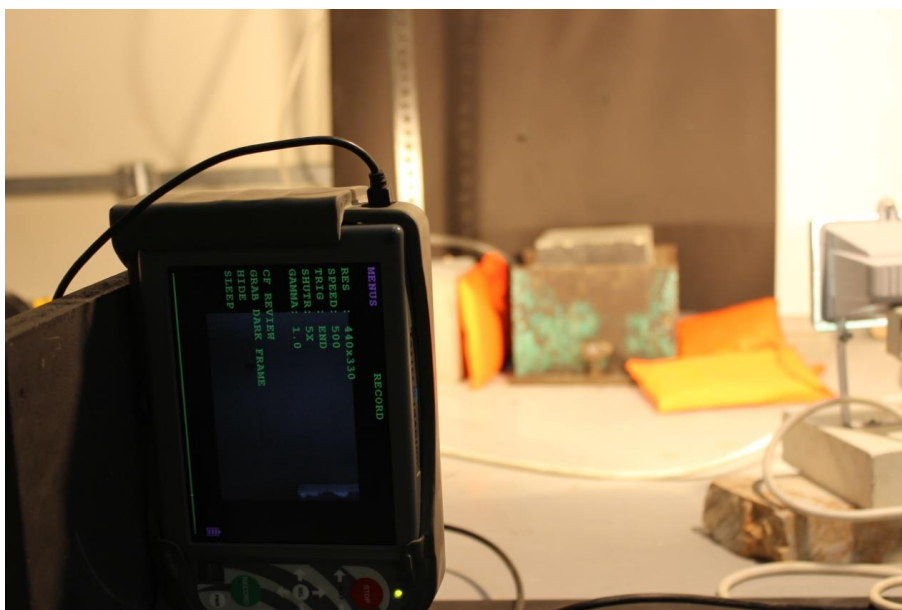


Εικόνα 4.4 Βάσεις ρίψης από μάρμαρο (αριστερά) και ψαμμίτη (δεξιά).

4.3 Όργανα και συσκευές

4.3.1 Κάμερα ταχείας λήψης

Η κάμερα που χρησιμοποιήθηκε είναι η Troubleshooter LE της εταιρίας Fastec Imaging με φακό 16mm τύπου C-mount με δυνατότητα καταγραφής έως και 500 καρέ το δευτερόλεπτο. Για την πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκε ανάλυση 440x330 pixels. Η θέση της κάμερας προσαρμόστηκε κάθε φορά στις απαιτήσεις της εκάστοτε λήψης και σε απόσταση περίπου 1 m από τον μηχανισμό. Για την διευκόλυνση της ανάλυσης επιλέχθηκε κατάλληλο φόντο (άσπρο ή μαύρο) ώστε να επιτυγχάνεται αντίθεση με το τέμαχος.



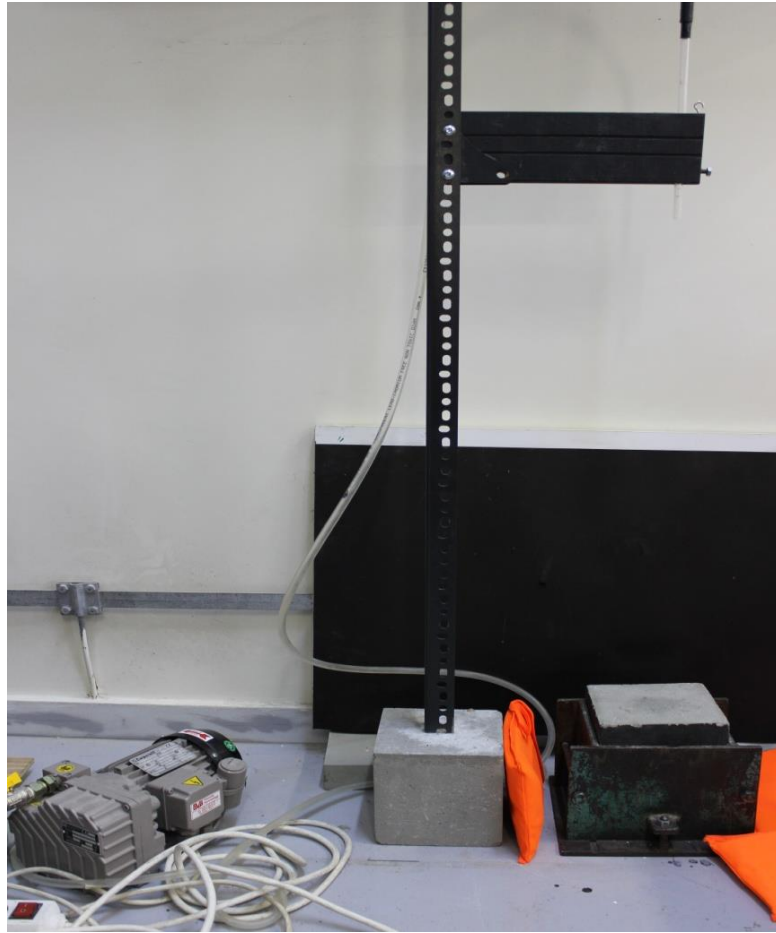
Εικόνα 4.5 Κάμερα καταγραφής της κίνησης. Στο βάθος ο μηχανισμός ρίψης.

4.3.2 Μηχανισμός ρίψης της σφαίρας

Χρησιμοποιήθηκαν δύο ξεχωριστοί μηχανισμοί, ένας για τις δοκιμές ελεύθερης πτώσης και ένας για τις δοκιμές παραβολικών ρίψεων.

4.3.2.1 Μηχανισμός ελεύθερης πτώσης

Ο μηχανισμός αποτελείται από μία αντλία κενού και μία μεταλλική δοκό μεταβλητού ύψους για να πραγματοποιηθούν ρίψεις από διαφορετικά ύψη. Πάνω στη δοκό και συνδεδεμένο με την αντλία είναι ένα ακροφύσιο, το οποίο μέσω της υποπίεσης συγκρατεί το δοκίμιο στο επιλεγμένο ύψος όταν η αντλία βρίσκεται σε λειτουργία. Όταν σταματήσει η λειτουργία της αντλίας, η υποπίεση σταδιακά μειώνεται έως τον πλήρη μηδενισμό της, οπότε η σφαίρα αποκολλάται από τον σωλήνα με αποτέλεσμα την ελεύθερη πτώση της στη βάση. Ο συγκεκριμένος μηχανισμός δεν επιτρέπει την περιστροφή της σφαίρας κατά την πτώση.



Εικόνα 4.6 Μηχανισμός ελεύθερης πτώσης, αντλία κενού (αριστερά), μήτρα τοποθέτησης της βάσης (δεξιά), ακροφύσιο (πάνω) .

4.3.2.2 Μηχανισμός κεκλιμένης πτώσης

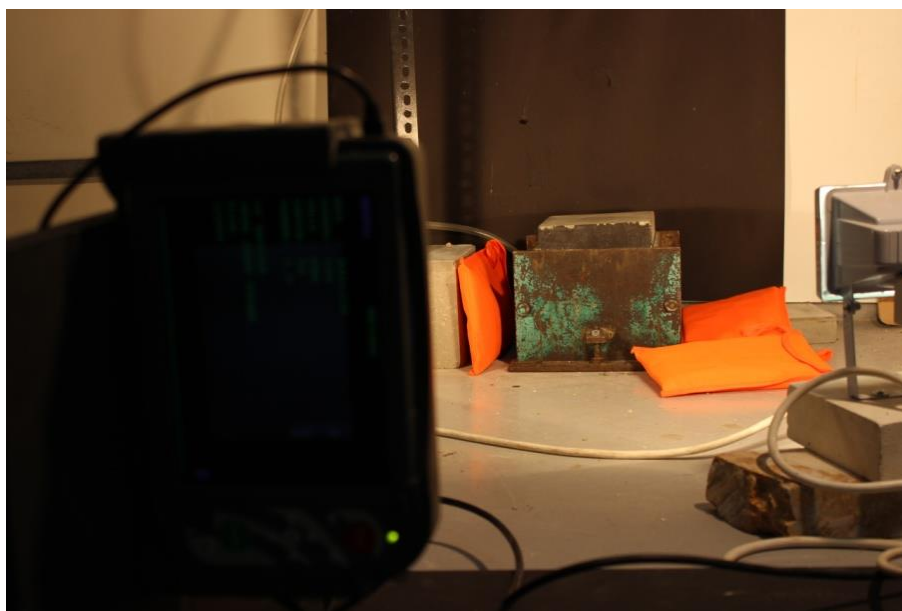
Ο μηχανισμός αποτελείται από σωλήνα, το μήκος και η κλίση του οποίου μεταβάλλονται ελεγχόμενα ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή κάθε φορά ταχύτητα και γωνία πρόσκρουσης.



Εικόνα 4.7 Μηχανισμός κεκλιμένης ρίψης.

4.3.3 Φωτισμός

Για την επιτυχή ανάλυση της τροχιάς του πέτοντος δοκιμίου ήταν σημαντικό να μη σχηματίζονται σκιές στο φόντο. Για την αποφυγή τους χρησιμοποιήθηκαν 2 μικροί προβολείς αλογόνου για τις δοκιμές της ελεύθερης πτώσης και ένας επιπλέον μεγάλος προβολέας για τις κεκλιμένες ρίψεις.



Εικόνα 4.8 Κατάλληλος φωτισμός για ευκρινή καταγραφή.

4.3.4 Δευτερεύοντα όργανα και συσκευές

- Ηλεκτρονικός ζυγός ακριβείας $\pm 0,01\text{gr}$
- Ηλεκτρονικό παχύμετρο ακριβείας $\pm 0,01\text{mm}$
- Ηλεκτρονικό αποστασιόμετρο-κλισίμετρο χειρός Leica τύπου Disto 3D για τον υπολογισμό της κλίσης της επιφάνειας πρόσπτωσης με απόκλιση γωνία $\pm 0,10^\circ$.

4.4 Εκτέλεση δοκιμών

Συνολικά εκτελέστηκαν 880 που οργανώθηκαν σε 3 σειρές δοκιμών. Οι πρώτες δύο σειρές αφορούν ελεύθερες ρίψεις ενώ η τρίτη σειρά αφορά παραβολικές. Οι σειρές ελεύθερων ρίψεων διαφέρουν ως προς το υλικό της βάσης πρόσπτωσης. Συγκεκριμένα, η πρώτη σειρά περιλαμβάνει ρίψεις των σφαιριδίων πάνω σε βάσεις ίδιου υλικού με αυτό των δοκιμών. Αντίθετα, στη δεύτερη σειρά το υλικό της βάσης διαφοροποιείται. Στις παραβολικές ρίψεις υλικό βάσης και δοκιμίου συμπίπτουν. Οι σειρές δοκιμών που εκτελέστηκαν παρουσιάζονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 6 και οι δοκιμές παρατίθενται στο παράρτημα.

4.5 Επεξεργασία αποτελεσμάτων

Για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την εκτέλεση και την καταγραφή των πειραμάτων από την κάμερα, χρησιμοποιήθηκαν τα προγράμματα MaxTraQ και MATLAB.

4.5.1 MaxTraQ

Το πρόγραμμα αυτό χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της φωτογραφικής μηχανής κατά την εκτέλεση των δοκιμών και την αποθήκευση των βίντεο των δοκιμών. Κάθε δοκιμή αποτελείται από τα καρέ εκείνα που περιλάμβαναν την κίνηση λίγο πριν την κρούση του τεμάχους στην βάση, την κρούση και την πρώτη αναπήδησή του. Αυτή η περικοπή είχε ως σκοπό την μείωσή του αποθηκευτικού χώρου που καταλάμβανε το κάθε αρχείο που αντιστοιχούσε σε μία δοκιμή για την ευχερέστερη μετέπειτα επεξεργασία τους.

4.5.2 MATLAB

Σκοπός της επεξεργασίας είναι ο εντοπισμός της τροχιάς της σφαίρας για τον υπολογισμό του συντελεστή αναπήδησης. Η επεξεργασία των βίντεο γίνεται από κώδικα στο περιβάλλον της MATLAB, που έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Βραχομηχανικής, στο πλαίσιο της έρευνας που εκτελείται στο αντικείμενο. Ένα βίντεο αποτελείται από μία σειρά ψηφιακών εικόνων, οι οποίες με τη σειρά τους αποτελούνται από εικονοστοιχεία σε δύο διαστάσεις, με τη μορφή ενός πίνακα με γραμμές και στήλες που αντιστοιχούν στην ανάλυση της εικόνας. Κάθε στοιχείο της εικόνας παίρνει τιμές από 0 (μαύρο) έως και 255 (λευκό) ανάλογα με το χρώμα της που βρίσκεται στην κλίμακα του γκρι. Ο αλγόριθμος εντοπισμού της τροχιάς της σφαίρας ακολουθεί μια διαδικασία τριών σταδίων, η οποία επαναλαμβάνεται σε όλες τις εικόνες που αποτελούν το κάθε βίντεο δοκιμής ώστε να

προσδιορισθεί η τροχιά του τεμάχους. Τα στάδια του αλγορίθμου είναι τα εξής (Asteriou et al. 2013a)

1. Διάκριση της σφαίρας από το φόντο. Αυτό επιτυγχάνεται με την μετατροπή του κάθε καρέ σε δυαδική εικόνα, δηλαδή η κάθε μία από τις εικόνες που αποτελούν το κάθε βίντεο να αποτελείται από δύο και μόνο χρώματα, άσπρο και μαύρο.

2. Καθορισμός του κυκλικού περιγράμματος της σφαίρας, μέσω του αλγορίθμου αναγνώρισης του περιθωρίου (Canny 1986).

3. Προσδιορισμός των συντεταγμένων του κέντρου του κυκλικού περιγράμματος μέσω της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων (Pratt 1987). Η εξίσωση που περιγράφει τη μέθοδο είναι:

$$SS(X, Y, R) = \sum_{i=1}^n \left(R - \sqrt{(x_i - X)^2 + (y_i - Y)^2} \right)^2 \quad (4.1)$$

Όπου:

x_i, y_i , οι συντεταγμένες των σημείων του κύκλου,

X, Y , οι συντεταγμένες του κύκλου και

R , η ακτίνα του

Μετά την ολοκλήρωση των 3 σταδίων το πρόγραμμα κατηγοριοποιεί τα στιγμιότυπα σε εκείνα πριν και σε εκείνα μετά την κρούση του δοκιμίου με την επιφάνεια πρόσπτωσης. Στιγμή της κρούσης λαμβάνουμε την εικόνα όπου η σφαίρα βρίσκεται στην κατώτερη καταγεγραμμένη θέση. Στη συνέχεια, η διαδικασία επαναλαμβάνεται και για τις εικόνες της δοκιμής μετά την κρούση και τελικά προκύπτουν οι ταχύτητες πριν και μετά την κρούση και κατά συνέπεια και ο συντελεστής αναπήδησης της δοκιμής.

5 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται οι εργαστηριακές δοκιμές προσδιορισμού των ιδιοτήτων των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στα εργαστηριακά πειράματα και τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών. Τα υλικά των πειραμάτων είναι: ψαμμίτης, μάρμαρο και τσιμέντο. Οι δοκιμές που περιγράφονται παρακάτω διεξήχθησαν με βάση τα πρότυπα της Διεθνούς Εταιρίας Βραχομηχανικής (International Society for Rock Mechanics (ISRM 2007)).

5.1 Πυκνότητα

Η ύπαρξη κενών σε ένα βραχώδες υλικό μειώνει σημαντικά την αντοχή του και αυξάνει σημαντικά την παραμορφωσιμότητά του. Για τον προσδιορισμό της πυκνότητας, μετράται η μάζα των δοκιμίων (M_{sat}) και μετά από ξήρανσή τους, η αντίστοιχη ξηρή τους μάζα (M_s). Στη συνέχεια, μετράται ο συνολικός όγκος των δοκιμίων (V). Με δεδομένα τα παραπάνω προκύπτει ο συνολικός όγκος κενών (V_v) και ο όγκος στερεών των υλικών (V_s).

Με γνωστές τις ποσότητες αυτές πλέον, υπολογίζονται τα ακόλουθα:

$$\text{Περιεκτικότητα νερού: } w = \frac{M_w}{M_s} \times 100 \quad (\%) \quad (5.1)$$

$$\text{Πορώδες: } n = \frac{V_v}{V_s} \times 100 \quad (\%) \quad (5.2)$$

$$\text{Πυκνότητα: } \rho = \frac{M_s + M_v}{V} \quad (kg / m^3) \quad (5.3)$$

$$\text{Ξηρή πυκνότητα: } \rho_d = \frac{M_s}{V} \quad (kg / m^3) \quad (5.4)$$

$$\text{Ειδικό βάρος: } \gamma = \rho \cdot g \quad (N / m^3) \quad (5.5)$$

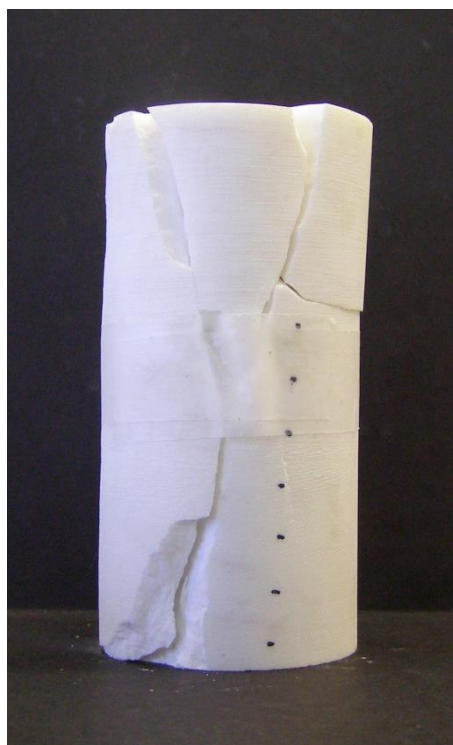
Με την παραδοχή ότι τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα δεν περιέχουν σημαντικό ποσοστό υγρασίας λόγω των γεωγραφικών και κλιματολογικών συνθηκών που επικρατούσαν στην περιοχή της θέσης λήψης τους, προσδιορίζεται η πυκνότητά τους από την μέτρηση της μάζας και των διαστάσεων των δοκιμίων.

5.2 Μονοαξονική θλιπτική αντοχή και παραμορφωσιμότητα

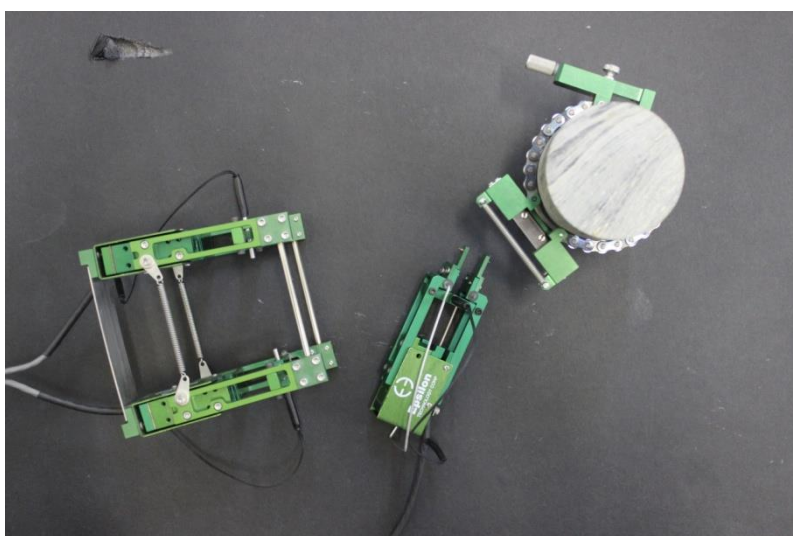
Ο προσδιορισμός της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής και της παραμορφωσιμότητας επιτυγχάνεται με την θλιπτική φόρτιση ενός κυλινδρικού δοκιμίου με σταθερό ρυθμό μέχρι την αστοχία του. Πάνω στο δοκίμιο έχουν προσαρμοσθεί ειδικά μηκυνσιόμετρα τα οποία καταγράφουν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή την αξονική και διαμετρική μεταβολή των διαστάσεων του δοκιμίου. Έτσι, κατασκευάζονται οι καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων και προσδιορίζονται το μέτρο ελαστικότητας Young (E) και ο λόγος Poisson (ν). Η δοκιμή ,αυτή, πραγματοποιείται ,κυρίως, για τη μελέτη υλικών χωρίς ασυνέχειες.



Εικόνα 5.1 Συσκευή θλίψης (πρέσσα) και σερβομηχανή για την επιβολή του φορτίου με σταθερό ρυθμό

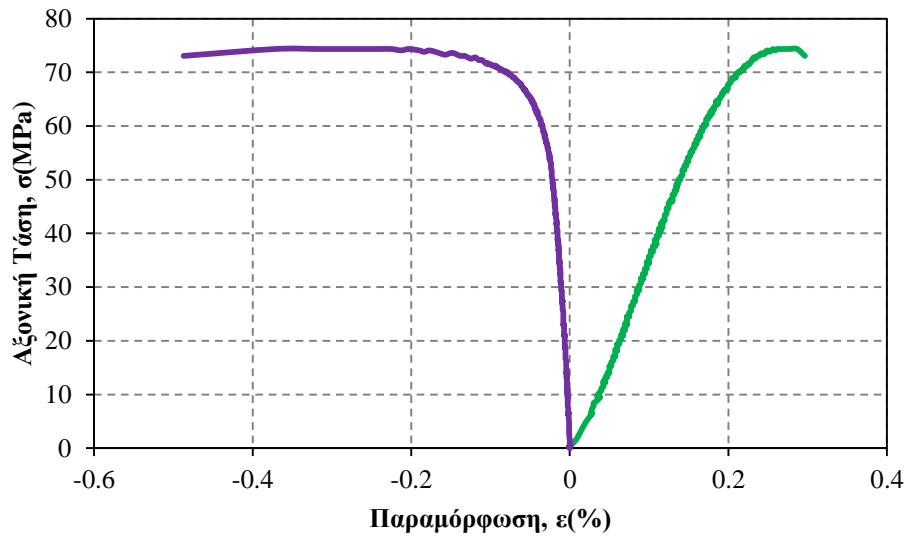


Εικόνα 5.2 Δοκίμιο μετά την επιβολή φορτίου αστοχίας.

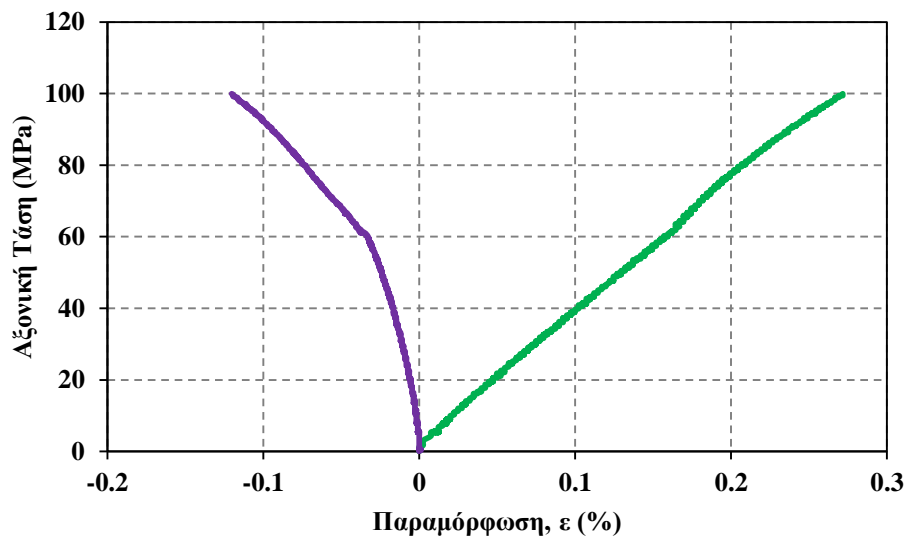


Εικόνα 5.3 Εξοπλισμός μέτρησης της αξονικής και της ακτινικής παραμόρφωσης των δοκιμίων.

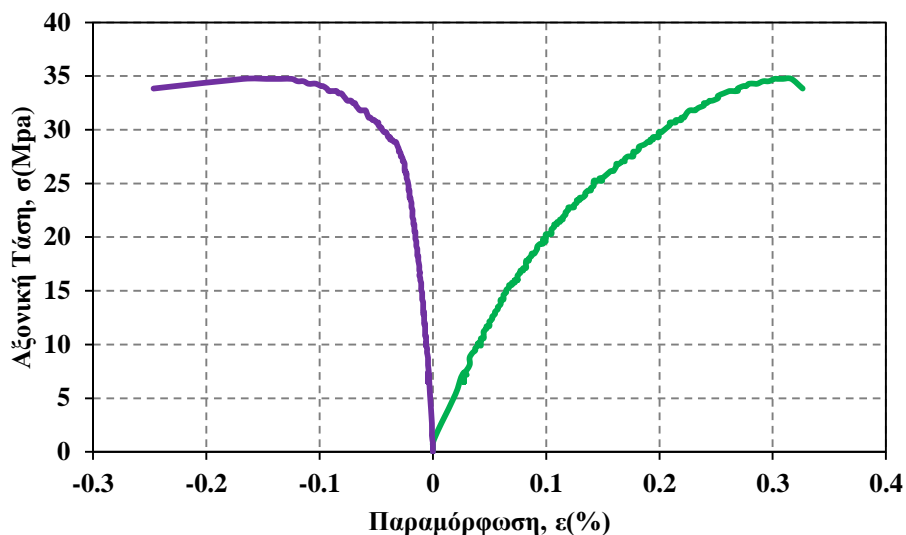
Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων των υλικών:



Διάγραμμα 5.1 Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων για το μάρμαρο



Διάγραμμα 5.2 Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων για τον ψαμμίτη



Διάγραμμα 5.3 Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων για τον ψαμμίτη

5.3 Εφελκυστική αντοχή

Η εφελκυστική αντοχή των υλικών προσδιορίστηκε έμμεσα με την δοκιμή δίσκου (Brazilian test). Η δοκιμή, αυτή, βασίζεται στην παραδοχή πως όταν ένα δείγμα πετρώματος υπόκειται σε διαξονική καταπόνηση αστοχεί σε εφελκυσμό, όταν η μία κύρια τάση είναι εφελκυστική και η άλλη είναι θλιπτική, αλλά όχι περισσότερη από τρεις φορές την κύρια εφελκυστική τάση.



Εικόνα 5.4 Δοκιμή δίσκου (Brazilian test). Δοκίμιο μετά την επιβολή φορτίου αστοχίας.

Το σύστημα επιβολής της φόρτισης είναι το ίδιο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε και για τον προσδιορισμό της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη.

Η εφελκυστική αντοχή του υλικού (σ_t) δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_t = 0.636 \frac{P}{D_t} \quad (\text{MPa}) \quad (5.6)$$

όπου:

P το φορτίο κατά την αστοχία (N),

D η διάμετρος του δοκιμίου (mm) και

t το πάχος του δοκιμίου μετρημένο στο κέντρο (mm).

5.4 Ταχύτητα διάδοσης υπερήχων

Η μέθοδος της ταχύτητας διάδοσης υπερήχων εφαρμόζεται για τον έλεγχο της κατάστασης των υλικών. Πιο συγκεκριμένα, ανιχνεύει επιφανειακές ή εσωτερικές ατέλειες ενώ ταυτόχρονα προσδιορίζει δυναμικές μηχανικές ιδιότητες των υλικών (E, ν , G κ.α.) χωρίς την ανάγκη θραύσης δοκιμίων (Πρασιανάκης & Κουρκούλης, 1999)

Η μέθοδος, αυτή, χρησιμοποιεί μηχανικά κύματα δύο ειδών, διαμήκη και εγκάρσια. Κάθε μηχανικό κύμα συντίθεται από ταλαντώσεις των δομικών στοιχείων των υλικών που εξετάζονται ενώ η διάδοση του ήχου εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού. Γι' αυτό το οι ταχύτητες διάδοσης των διαμήκων και των εγκάρσιων κυμάτων (c_l και c_t αντίστοιχα) αποτελούν χαρακτηριστικές σταθερές του εκάστοτε υλικού που εξετάζεται και ανεξάρτητες των διαστάσεων του και της συχνότητας του ήχου.

Οι σχέσεις που συνδέουν τις ταχύτητες διάδοσης των κυμάτων με τις ελαστικές ιδιότητες των υλικών είναι οι εξής:

$$c_l = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{2\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (5.7)$$

$$c_t = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (5.8)$$

$$\nu = \frac{\frac{1}{2} \left(\frac{c_l}{c_t} \right)^2 - 1}{\left(\frac{c_l}{c_t} \right)^2 - 1} = \frac{c_l^2 - 2c_t^2}{2c_l^2 - 2c_t^2} \quad (5.9)$$

$$E = \rho c_t^2 \frac{3c_l^2 - 4c_t^2}{c_l^2 - 2c_t^2} = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \rho c_t^2 = 1(1+\nu)\rho c_t^2 \quad (5.10)$$

$$G = \rho c_t^2 \quad (5.11)$$

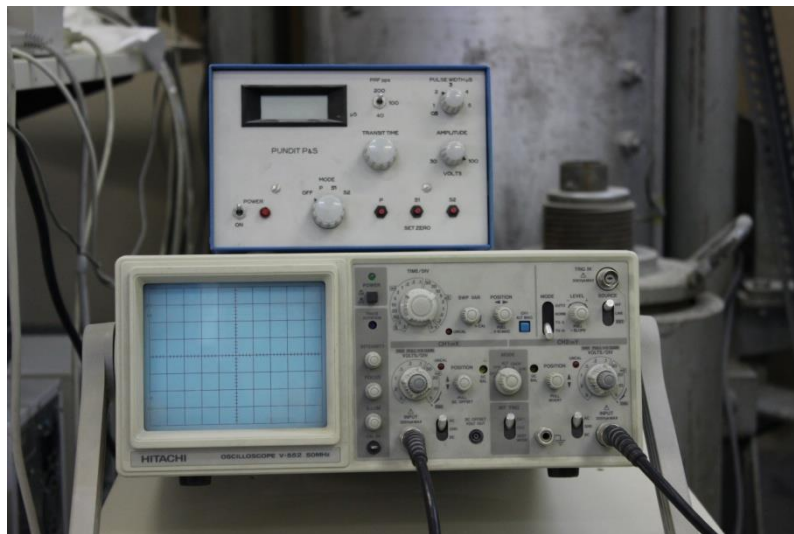
όπου ρ η πυκνότητα του υλικού.

Οι ταχύτητες διάδοσης των διαμήκων κυμάτων c_l και εγκάρσιων κυμάτων c_t ορίζονται με τη μέτρηση του χρόνου διάδοσης (t_l και t_t αντίστοιχα) και της απόστασης d μεταξύ του πομπού και του δέκτη κατά την διεξαγωγή της δοκιμής

$$v_l = \frac{d}{t_l} \quad (5.12)$$

Και

$$v_t = \frac{d}{t_t} \quad (5.13)$$



Εικόνα 5.5 Εργαστηριακός εξοπλισμός για την μέτρηση της ταχύτητας διάδοσης υπερήχων.



Εικόνα 5.6 Πρέσσα επιβολής του φορτίου και ακροδέκτες.

5.5 Σφύρα Schmidt

Η σφύρα Schmidt αποτελείται από ένα έμβολο που συγκρατείται με ένα ελατήριο το οποίο ελευθερώνεται όταν το έμβολο πιέζεται πάνω σε μία επιφάνεια. Η ενέργεια που έχει το ελατήριο όταν επιστρέφει εξαρτάται από την σκληρότητα του δοκιμίου και ορίζεται ως ο λόγος των μηκών του ελατηρίου πριν και μετά την κρούση. Η σφύρα που χρησιμοποιήθηκε είναι τύπου L και εφαρμόστηκε κατά τη διάρκεια της δοκιμής κάθετα στις βάσεις.



Εικόνα 5.7 Σφύρα Schmidt για την μέτρηση της σκληρότητας.

5.6 Ιδιότητες των υλικών

Ακολουθεί συγκεντρωτικός πίνακας με τις ιδιότητες των υλικών όπως προέκυψαν από τις εργαστηριακές δοκιμές.

Πίνακας 4.1 Οι ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική μέθοδο

Υλικό	ρ (kN/m ³)	$\sigma_{c(50)}$ (MPa)	E_t (GPa)	ν	σ_t (MPa)	V_p (m/s)	V_s (m/s)	SHV
Μάρμαρο	25.2	66.1	40.2	0.261	6.2	4954	2861	38.2
Ψαμμίτης	25.2	107.5	35.4	0.252	11.3	4606	2981	44.7
Τσιμεντοειδές ένεμα	21.9	37.4	15.7	0.113	7.5	4335	2574	33.4
Epoxy Resin	20.4	86.5	11.0	0.377	15.6	4125	2429	42.3

Στο σημείο αυτό να σημειωθεί ότι η εποξειδική ρητίνη δεν έχει χρησιμοποιηθεί στα πειράματα της παρούσας διπλωματικής. Ωστόσο, παρατίθεται διότι έχει χρησιμοποιηθεί σε προηγούμενη ανάλογη έρευνα (Asteriou et al. 2013b) στην οποία γίνεται αναφορά σε επόμενο κεφάλαιο.

6 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Πραγματοποιήθηκαν τρεις σειρές δοκιμών. Οι δύο πρώτες αφορούν ελεύθερες ρίψεις τεμαχών που έγιναν με σκοπό την διερεύνηση της επίδρασης του κάθετου συντελεστή αναπήδησης από τα κινηματικά χαρακτηριστικά πρόσκρουσης, καθώς και από τα χαρακτηριστικά του επιπέδου στο οποίο προσκρούει. Η τρίτη και τελευταία σειρά πειραμάτων αφορά παραβολικές ρίψεις που είναι και περισσότερο αντιπροσωπευτικές των πραγματικών καταπτώσεων. Στη συνέχεια, ακολουθεί η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Από την επεξεργασία και ανάλυση των αποτελεσμάτων προκύπτει ένα νέο μοντέλο έκφρασης του συντελεστή αναπήδησης συναρτήσει των κινηματικών χαρακτηριστικών πρόσκρουσης και της σκληρότητας κατά τη σφύρα Schmidt του υλικού.

6.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

6.1.1 Δοκιμές ελεύθερης πτώσης

Σε πρώτη φάση, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές ελεύθερης πτώσης με συνολικά οκτώ σφαιρικά δοκίμια διαφορετικών μαζών το καθένα: τρία δοκίμια μαρμάρου, τρία δοκίμια ψαμμίτη και δύο δοκίμια τσιμέντου. Έγιναν δύο σειρές δοκιμών. Η πρώτη σειρά περιλαμβάνει ρίψεις των δοκιμίων σε βάσεις πρόσκρουσης ίδιου υλικού με αυτό των σφαιρών ενώ η δεύτερη αφορά ρίψεις των δοκιμίων σε βάσεις διαφορετικού υλικού. Και στις δύο σειρές δοκιμών έγιναν πέντε επαναλήψεις ρίψης του κάθε δοκιμίου από κάθε ύψος για μείωση του εύρους σφάλματος.

Όλες οι ρίψεις πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια του αυτοσχέδιου μηχανισμού ελεύθερης πτώσης που έχει αναπτυχθεί στο εργαστήριο Βραχομηχανικής, στον τομέα των Γεωτεχνικής. Η κίνηση των δοκιμίων από την απελευθέρωσή τους μέχρι την πρώτη αναπήδησή τους καταγράφηκε από κάμερα υψηλής ταχύτητας καταγραφής (βλ. κεφ. 4). Στη συνέχεια, γίνεται η επεξεργασία των καταγεγραμμένων δοκιμών μέσω ενός κώδικα στη Matlab, ο οποίος αναπτύχθηκε γι' αυτόν το σκοπό στα πλαίσια προηγούμενης έρευνας. Από την επεξεργασία προκύπτει η ταχύτητα κίνησης της σφαίρας σε κάθε χρονική στιγμή, βάσει της οποίας προσδιορίζεται ο συντελεστής αναπήδησης από τη σχέση:

$$V_{COR} = \frac{V_r}{V_i} \quad (6.1)$$

Όπου :

V_i , η ταχύτητα που αναπτύσσει το σώμα αμέσως πριν την πρόσκρουση και

V_r , η ταχύτητα που αναπτύσσει το σώμα αμέσως μετά την πρόσκρουση.

Στο σημείο αυτό να σημειωθεί ότι, όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο (βλ. κεφ. 2), υπάρχει ένα αξιόλογο πλήθος σχέσεων έκφρασης των συντελεστών αναπήδησης. Ωστόσο, στην παρούσα έρευνα χρησιμοποιήθηκε η σχέση που βασίζεται σε όρους ταχυτήτων καθώς είναι απλούστερη από τις υπόλοιπες και ταυτόχρονα η πλέον χρησιμοποιούμενη στις συναφείς δημοσιεύσεις. Επιπροσθέτως, αξίζει να σημειωθεί ότι στις δοκιμές ελεύθερων ρίψεων ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης δεν ορίζεται καθώς η αρχική τιμή της εφαπτομενικής ταχύτητας είναι μηδενική.

Πίνακας 6.1 Οι μάζες και οι διάμετροι των σφαιριδίων που χρησιμοποιήθηκαν για τις ελεύθερες ρίψεις.

α/α δοκιμίου	Μάρμαρο		Ψαμμίτης		Τσιμέντο	
	Μάζα (gr)	Διάμετρος (mm)	Μάζα (gr)	Διάμετρος (mm)	Μάζα (gr)	Διάμετρος (mm)
1	28,07	27,10	33,90	28,60	29,20	29,40
2	39,57	30,40	87,10	39,70	66,50	38,90
3	57,60	34,50	106,00	42,70	-	-

6.1.1.1 Δοκιμές ελεύθερης πτώσης με ίδιο υλικό σφαιρικού δοκιμίου και βάσης πρόσπτωσης

Σε αυτή την φάση δοκιμών, τα δοκίμια ελευθερώθηκαν από τα ύψη των 12,5 cm, 25 cm, 50 cm, 100 cm και 180 cm, έτσι ώστε σταδιακά να επιτυγχάνονται μεγαλύτερες ταχύτητες κατά την πρόσκρουση. Σκοπός αυτής της πρώτης σειράς δοκιμών είναι η μελέτη της επίδρασης της ταχύτητας και της μάζας των τεμαχίων στον κάθετο συντελεστή αναπήδησης. Διεξήχθησαν συνολικά 200 δοκιμές εκ των οποίων οι 75 δοκιμές έγιναν με τα τρία σφαιρίδια του μάρμαρου (5 επαναλήψεις, 3 δοκίμια, 5 διαφορετικά ύψη), 75 δοκιμές με τα τρία σφαιρίδια ψαμμίτη (5 επαναλήψεις, 3 δοκίμια, 5 διαφορετικά ύψη) και 50 δοκιμές με τα δύο σφαιρίδια του τσιμέντου (5 επαναλήψεις, 2 δοκίμια, 5 διαφορετικά ύψη). Συγκεντρωτικά, η πρώτη σειρά πειραμάτων είχε ως εξής:

Πίνακας 6.2 . Συνοπτική περιγραφή της διαδικασίας διεξαγωγής της πρώτης σειράς δοκιμών.

Υλικό Δοκιμίου	Μάρμαρο (m ₁ , m ₂ , m ₃)	Ψαμμίτης (m ₁ , m ₂ , m ₃)	Τσιμέντο (m ₁ , m ₂)
Υλικό Βάσης Πρόσκρουσης	Μάρμαρο	Ψαμμίτης	Τσιμέντο
Ύψος Ρίψης (cm)	12,5, 25, 50, 100, 180		
Πλήθος δοκιμών	75	75	50

Στο σημείο αυτό παρατίθενται οι μέσες ταχύτητες πρόσπτωσης των δοκιμών (v_i) όπως προέκυψαν από τον μέσο όρο των ταχυτήτων που αναπτύχθηκαν σε κάθε μία από τις πέντε επαναλήψεις για κάθε ύψος και οι αντίστοιχοι μέσοι συντελεστές αναπήδησης (V_{COR}):

Πίνακας 6.3 . Αποτελέσματα δοκιμών ελεύθερης πτώσης με υλικό σφαιρικού δοκιμίου και βάσης πρόσπτωσης το μάρμαρο.

Μάρμαρο				
α/α δοκιμής	Ύψος ρίψης (cm)	Μάζα m_i	Μέση Ταχύτητα πρόσπτωσης $v_{n,i}$ (m/s)	Μέσος Κάθετος Συντελεστής Αναπήδησης V_{COR} (-)
1-5	H=12,5	m_1	1,34	0,753
6-10		m_2	1,32	0,738
11-15		m_3	1,30	0,700
41-45	H=25,0	m_1	1,97	0,741
46-50		m_2	1,95	0,723
51-55		m_3	1,94	0,691
361-365	H=50,0	m_1	3,00	0,720
366-370		m_2	3,00	0,703
371-375		m_3	3,03	0,673
801-805	H=100,0	m_1	4,31	0,704
806-810		m_2	4,32	0,682
811-815		m_3	4,35	0,654
61-65	H=180,0	m_1	θραύση	θραύση
66-70		m_2	θραύση	θραύση
71-75		m_3	θραύση	θραύση

Επισημαίνεται ότι στις δοκιμές με τεμάχια μαρμάρου από ύψος ρίψης 180 cm, υπήρξε θραύση των δοκιμίων, συνεπώς δεν ήταν δυνατός ο προσδιορισμός των ταχυτήτων και κατ' επέκταση των συντελεστών αναπήδησης.

Πίνακας 6.4 . Αποτελέσματα δοκιμών ελεύθερης πτώσης με υλικό σφαιρικού δοκιμίου και βάσης πρόσπτωσης τον ψαμμίτη.

Ψαμμίτης				
α/α σειράς	Ύψος ρίψης (cm)	Μάζα m_i	Μέση Ταχύτητα πρόσπτωσης $v_{n,i}$ (m/s)	Μέσος Κάθετος Συντελεστής Αναπήδησης $V_{COR}(-)$
16-20	H=12,5	m_1	1,44	0,867
21-25		m_2	1,40	0,837
26-30		m_3	1,39	0,823
56-60	H=25,0	m_1	2,03	0,861
61-65		m_2	2,03	0,831
66-70		m_3	2,04	0,815
321-325	H=50,0	m_1	3,08	0,843
326-330		m_2	3,11	0,818
331-345		m_3	3,14	0,794
816-820	H=100,0	m_1	4,58	0,834
821-825		m_2	4,56	0,786
826-830		m_3	4,54	0,774
856-860	H=180,0	m_1	5,59	0,825
861-865		m_2	5,78	0,784
866-870		m_3	5,88	0,759

Πίνακας 6.5 . Αποτελέσματα δοκιμών ελεύθερης πτώσης με υλικό σφαιρικού δοκιμίου και βάσης πρόσπτωσης το τσιμέντο.

Τσιμέντο				
α/α δοκιμής	Ύψος ρίψης (cm)	Μάζα m_i	Μέση Ταχύτητα Πρόσπτωσης $v_{n,i}$ (m/s)	Μέσος Κάθετος Συντελεστής Αναπήδησης $V_{COR}(-)$
31-35	H=12,5	m_1	1,55	0,708
36-40		m_2	1,50	0,646
71-75	H=25,0	m_1	2,14	0,688
76-80		m_2	2,08	0,632
521-525	H=50,0	m_1	3,35	0,672
526-530		m_2	3,15	0,609
831-835	H=100,0	m_1	4,95	0,632
836-840		m_2	4,37	0,613
871-875	H=180,0	m_1	6,18	0,604
876-880		m_2	6,12	0,536

6.1.1.2 Δοκιμές ελεύθερης πτώσης με διαφορετικό υλικό σφαιρικού δοκιμίου και βάσης πρόσπτωσης

Σε αυτή την φάση πειραμάτων, τα δοκίμια ελευθερώθηκαν σε βάσεις διαφορετικού υλικού. Όλα τα σφαιρίδια ρίφθηκαν από το ύψος των 50cm και συνολικά πραγματοποιήθηκαν 80 δοκιμές (5 επαναλήψεις, 2 διαφορετικές βάσεις, 2 ή 3 μάζες για κάθε υλικό δοκιμίου). Σκοπός αυτή της σειράς πειραμάτων ήταν ο προσδιορισμός της επίδρασης που έχουν τα υλικά των τεμαχίων αποκόλλησης και των επιπέδων πρόσκρουσης στην αναπήδηση. Συνοπτικά, η εναλλαγή των υλικών των δοκιμίων και των βάσεων είχε ως εξής:

Πίνακας 6.6 . Συνοπτική παρουσίαση της διεξαγωγής των πειραμάτων ελεύθερης πτώσης σφαιρικών δοκιμίων πάνω σε επιφάνειες πρόσκρουσης διαφορετικού υλικού.

Υλικό δοκιμίου	Μάρμαρο (m ₁ , m ₂ , m ₃)	Ψαμμίτης (m ₁ , m ₂ , m ₃)	Τσιμέντο (m ₁ , m ₂)
Βάση πρόσκρουσης	Ψαμμίτης	Τσιμέντο	Μάρμαρο
Πλήθος δοκιμών	15	15	10

Σε αυτή την σειρά δοκιμών τα αποτελέσματα έχουν ως εξής:

Πίνακας 6.7 . Αποτελέσματα δοκιμών ελεύθερης πτώσης με υλικό σφαιρικού δοκιμίου το μάρμαρο και υλικό βάσης πρόσπτωσης τον ψαμμίτη και το τσιμέντο.

Υλικό Δοκιμίου: Μάρμαρο				
α/α δοκιμής	Υλικό Βάσης Πρόσκρουσης	Μάζα m _i	Μέση Ταχύτητα Πρόσπτωσης v _i (m/s)	Μέσος Κάθετος Συντελεστής Αναπήδησης V _{cor} (-)
336-340	Ψαμμίτης	m ₁	2,94	0,775
341-345		m ₂	2,96	0,738
346-350		m ₃	2,95	0,707
491-495	Τσιμέντο	m ₁	2,98	0,716
496-500		m ₂	2,97	0,671
501-505		m ₃	2,96	0,647

Πίνακας 6.8 . Αποτελέσματα δοκιμών ελεύθερης πτώσης με υλικό σφαιρικού δοκιμίου τον ψαμμίτη και υλικό βάσης πρόσπτωσης το μάρμαρο και το τσιμέντο.

Υλικό Δοκιμίου: Ψαμμίτης				
α/α δοκιμής	Υλικό Βάσης Πρόσκρουσης	Μάζα m_i	Μέση Ταχύτητα Πρόσπτωσης v_i (m/s)	Μέσος Κάθετος Συντελεστής Αναπήδησης $V_{COR}(-)$
376-380	Μάρμαρο	m_1	3,10	0,778
381-385		m_2	3,11	0,698
386-390		m_3	3,12	0,675
506-510	Τσιμέντο	m_1	3,04	0,699
511-515		m_2	3,07	0,638
516-520		m_3	3,09	0,599

Πίνακας 6.9 . Αποτελέσματα δοκιμών ελεύθερης πτώσης με υλικό σφαιρικού δοκιμίου το τσιμέντο και υλικό βάσης πρόσπτωσης το μάρμαρο και τον ψαμμίτη.

Υλικό Δοκιμίου: Τσιμέντο				
α/α δοκιμής	Υλικό Βάσης Πρόσκρουσης	Μάζα m_i	Μέση Ταχύτητα Πρόσπτωσης v_i (m/s)	Μέσος Κάθετος Συντελεστής Αναπήδησης $V_{COR}(-)$
391-395	Μάρμαρο	m_1	3,26	0,705
396-400		m_2	3,44	0,720
351-355	Ψαμμίτης	m_1	3,16	0,6237
356-360		m_2	3,32	0,6513

6.1.2 Δοκιμές παραβολικών ρίψεων

Στην τρίτη και τελευταία πειραματική σειρά, οι δοκιμές αφορούν παραβολικές ρίψεις των οκτώ μαζών πάνω σε βάσεις ίδιου υλικού με αυτό των δοκιμών που ελευθερώνονταν κάθε φορά. Πραγματοποιήθηκαν συνολικά 600 δοκιμές και τα δοκίμια ρίφθηκαν από 15 διαφορετικές κλίσεις. Έγιναν πέντε επαναλήψεις ρίψης του κάθε δοκιμίου από κάθε κλίση.

Οι ρίψεις πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση δύο αυτοσχέδιων μηχανισμών παραβολικών ρίψεων που έχουν αναπτυχθεί στο εργαστήριο Βραχομηχανικής. Ο πρώτος μηχανισμός χρησιμοποιήθηκε για ρίψεις μικρότερων ταχυτήτων, ενώ ο δεύτερος για ρίψεις μεγαλύτερης κλίμακας με σκοπό να επιτευχθούν μεγαλύτερες ταχύτητες. Η κίνηση των δοκιμών και σε αυτή την φάση καταγράφηκε από την κάμερα ταχείας λήψης. Τέλος, ακολούθησε η ίδια διαδικασία επεξεργασίας των δοκιμών και υπολογισμού των ταχυτήτων που αναπτύχθηκαν πριν την πρόσκρουση και των αντίστοιχων συντελεστών αναπήδησης με αυτή των ελεύθερων ρίψεων. Προφανώς στην περίπτωση των κεκλιμένων πτώσεων ο συντελεστής αναπήδησης (V_{COR}) αναλύεται σε δύο συνιστώσες, την κατακόρυφη (n_{COR}) και την εφαπτομενική (t_{COR}).

Ακολουθούν τα αποτελέσματα από την επεξεργασία των δοκιμών. Παρατίθενται οι ταχύτητες πρόσκρουσης και αναπήδησης v_i (m/s) και v_r (m/s) αντίστοιχα όπως προέκυψαν από τους μέσους όρους των πέντε επαναλήψεων από κάθε κλίση. Επίσης, παρουσιάζονται οι αντίστοιχες τιμές των κάθετων και των εφαπτομενικών συντελεστών αναπήδησης n_{COR} (αδιάστατο μέγεθος) και t_{COR} (αδιάστατο μέγεθος) αντίστοιχα. Τέλος, παρατίθενται οι γωνίες πρόσπτωσης (a_i) και αναπήδησης (a_r).

Πίνακας 6.10 Αποτελέσματα δοκιμών παραβολικών ρίψεων με υλικό σφαιρικού δοκιμίου και βάσης πρόσπτωσης το μάρμαρο.

Μάρμαρο									
α/α σειράς	Μάζα	v_i (m/s)	v_r (m/s)	n_{cor} (-)	t_{cor} (-)	v_{COR} (-)	a_i (°)	a_r (°)	
81-85	m ₁	2,67	2,23	0,712	1,039	0,837	54,53	43,87	
121-125		3,15	2,81	0,771	1,029	0,893	48,71	40,51	
161-165		3,27	3,00	0,725	1,083	0,920	45,05	33,80	
201-205		2,37	2,18	0,779	0,992	0,920	37,28	30,85	
241-245		1,92	1,83	0,775	0,978	0,954	21,47	17,30	
281-285		4,16	3,32	0,679	1,200	0,797	65,01	50,45	
531-535		3,48	3,31	0,712	1,029	0,952	31,78	23,18	
561-565		4,23	4,03	0,675	1,036	0,952	31,30	21,65	
591-595		4,86	4,72	0,707	1,044	0,972	29,86	21,18	

Μάρμαρο									
α/α σειράς	Μάζα	v_i (m/s)	v_r (m/s)	n_{cor} (-)	t_{cor} (-)	v_{COR} (-)	a_i (°)	a_r (°)	
621-625		4,25	3,90	0,705	1,050	0,918	41,08	30,35	
651-655		5,00	4,71	0,721	1,068	0,942	39,89	29,46	
681-685		5,63	5,34	0,679	1,104	0,949	40,43	27,65	
711-715		4,38	4,09	0,717	1,141	0,933	47,67	34,58	
741-745		5,12	4,85	0,696	1,159	0,946	46,21	32,06	
771-775		5,89	5,64	0,728	1,144	0,958	45,21	32,68	
86-90		2,69	2,24	0,714	1,034	0,834	54,80	44,42	
126-130		3,11	2,70	0,717	1,043	0,867	49,96	39,27	
166-170		3,27	3,02	0,722	1,079	0,924	44,03	32,90	
206-210		2,36	2,17	0,726	1,006	0,919	36,34	27,97	
246-250		1,90	1,86	0,803	0,999	0,979	19,47	15,86	
286-290		4,19	3,26	0,654	1,203	0,778	65,37	49,85	
536-540		3,48	3,32	0,657	1,044	0,955	31,23	20,86	
566-570	m₂	4,30	4,11	0,689	1,031	0,955	30,69	21,65	
596-600		4,80	4,68	0,678	1,052	0,974	29,75	20,22	
626-630		4,23	3,89	0,663	1,074	0,920	41,17	28,41	
656-660		4,94	4,73	0,705	1,108	0,958	40,67	28,73	
686-690		5,69	5,28	0,646	1,105	0,927	42,22	27,99	
716-720		4,40	4,05	0,678	1,145	0,922	47,42	32,82	
746-750		5,13	4,76	0,676	1,146	0,927	46,67	32,05	
776-780		5,92	5,37	0,646	1,117	0,908	45,61	30,54	
91-95		2,72	2,20	0,695	0,994	0,808	54,65	44,57	
131-135		2,65	2,69	0,684	1,044	0,852	50,02	37,98	
171-175		3,08	3,01	0,688	1,096	0,920	44,25	31,44	
211-215		3,86	2,19	0,717	1,014	0,919	36,72	27,82	
251-255		2,42	1,87	0,796	0,980	0,959	20,29	16,64	
291-295	m₃	4,19	3,12	0,609	1,189	0,744	65,30	48,06	
541-545		3,49	3,32	0,666	1,044	0,951	32,24	21,87	
571-575		4,33	4,11	0,685	1,028	0,949	31,08	21,86	
601-605		4,83	4,68	0,685	1,046	0,968	29,96	20,69	
631-635		4,18	3,88	0,673	1,073	0,928	40,15	27,90	
661-665		5,08	4,70	0,658	1,072	0,925	39,81	27,09	

Μάρμαρο									
α/α σειράς	Μάζα	v_i (m/s)	v_r (m/s)	n_{cor} (-)	t_{cor} (-)	v_{COR} (-)	a_i (°)	a_r (°)	
691-695		5,67	5,27	0,632	1,105	0,928	41,47	26,81	
721-725		4,41	4,02	0,669	1,130	0,911	47,16	32,54	
751-755		5,18	4,75	0,661	1,126	0,917	45,78	31,10	
782-785		5,92	5,40	0,654	1,115	0,912	45,30	30,67	

Πίνακας 6.11 Αποτελέσματα δοκιμών παραβολικών ρίψεων με υλικό σφαιρικού δοκιμίου και βάσης πρόσπτωσης τον ψαμμίτη.

Ψαμμίτης									
α/α σειράς	Μάζα	v_i (m/s)	v_r (m/s)	n_{cor} (-)	t_{cor} (-)	v_{COR} (-)	a_i (°)	a_r (°)	
96-100	m₁	2,65	2,41	0,828	1,030	0,910	51,31	45,15	
136-140		3,08	2,79	0,861	0,951	0,905	46,79	43,92	
176-180		3,86	3,45	0,788	1,012	0,894	48,20	41,03	
216-220		2,42	2,30	0,889	0,981	0,950	36,47	33,81	
256-260		1,91	1,92	0,874	1,021	1,008	18,17	15,71	
296-300		4,45	4,02	0,828	1,200	0,902	65,69	56,77	
546-550		3,67	3,60	0,859	1,023	0,982	31,05	26,86	
576-580		4,53	4,50	0,824	1,044	0,991	30,75	25,16	
606-610		5,07	5,09	0,823	1,061	1,004	30,86	24,87	
636-640		4,42	4,28	0,792	1,094	0,970	42,13	33,19	
666-670		5,14	5,08	0,811	1,097	0,988	40,40	32,22	
696-700		5,82	5,69	0,819	1,076	0,978	40,03	32,58	
726-730		4,57	4,46	0,848	1,112	0,976	48,11	40,39	
756-760		5,32	5,09	0,807	1,096	0,957	46,17	37,49	
786-790		6,02	5,67	0,807	1,065	0,942	45,71	37,81	
101-105	m₂	2,67	2,41	0,802	1,046	0,905	50,78	43,46	
141-145		3,35	2,93	0,739	1,016	0,875	47,72	38,68	
181-185		3,49	3,25	0,774	1,068	0,933	45,15	36,02	
221-225		2,46	2,28	0,817	0,983	0,928	36,47	31,54	
261-265		1,92	1,92	0,831	1,019	1,000	19,38	15,98	
301-305		4,51	3,88	0,779	1,177	0,861	65,58	55,56	
551-555		3,69	3,56	0,803	1,019	0,964	31,82	26,06	

Ψαμμίτης								
α/α σειράς	Μάζα	v_i (m/s)	v_r (m/s)	n_{cor} (-)	t_{cor} (-)	v_{COR} (-)	a_i (°)	a_r (°)
581-585		4,50	4,39	0,802	1,030	0,976	30,57	24,72
611-615		5,25	5,12	0,751	1,056	0,975	32,94	24,73
641-645		4,37	4,24	0,764	1,099	0,972	40,57	30,74
671-675		5,19	4,99	0,766	1,082	0,962	40,38	31,05
701-705		5,83	5,66	0,778	1,085	0,971	39,76	30,82
731-735		2,67	2,41	0,802	1,046	0,905	50,78	43,46
761-765		5,38	5,04	0,762	1,098	0,938	46,29	35,97
791-795		6,07	5,77	0,763	1,097	0,950	44,10	34,01
106-110		m₃	2,79	2,34	0,711	0,997	0,841	50,27
146-150	3,28		2,93	0,727	1,039	0,895	44,86	34,96
186-190	3,73		3,39	0,758	1,038	0,908	44,93	36,06
226-230	2,48		2,31	0,804	0,989	0,929	36,36	30,92
266-270	1,98		1,94	0,995	0,995	0,980	20,10	17,58
306-310	4,56		3,83	0,752	1,154	0,840	64,76	54,11
556-560	3,76		3,58	0,802	1,008	0,953	32,76	27,13
586-590	4,45		4,38	0,798	1,043	0,984	30,88	24,59
616-620	5,11		5,02	0,771	1,049	0,985	30,32	23,28
646-650	4,39		4,25	0,754	1,106	0,969	41,31	30,96
676-680	5,08		4,93	0,812	1,069	0,970	40,46	32,97
706-710	5,77		5,59	0,775	1,084	0,970	39,59	30,59
736-740	4,64		4,26	0,748	1,075	0,919	46,21	35,99
766-770	5,34		5,05	0,773	1,106	0,945	46,55	36,38
796-800	6,06		5,77	0,754	1,117	0,953	45,10	34,12

Πίνακας 6.12 Αποτελέσματα δοκιμών παραβολικών ρίψεων με υλικό σφαιρικού δοκιμίου και βάσης πρόσπτωσης το τσιμέντο.

Τσιμέντο								
α/α σειράς	Μάζα	v_i (m/s)	v_r (m/s)	n_{cor} (-)	t_{cor} (-)	v_{COR} (-)	a_i (°)	a_r (°)
111-115	m₁	2,95	2,19	0,583	1,006	0,745	55,70	40,45
151-155		3,57	2,71	0,553	0,991	0,761	50,58	34,15
191-195		3,71	3,23	0,714	1,023	0,870	47,37	37,21
231-235		2,61	2,24	0,670	0,984	0,859	41,75	31,26
271-275		2,10	1,97	0,714	0,984	0,937	26,29	19,73
401-415		3,86	3,63	0,708	1,018	0,941	32,18	23,75
411-415		4,65	4,39	0,687	1,035	0,947	32,70	23,09
421-425		5,13	4,94	0,695	1,041	0,963	30,53	21,45
431-435		4,55	4,10	0,680	1,076	0,903	44,68	32,03
441-445		5,24	4,75	0,666	1,069	0,907	42,61	29,87
451-455		6,04	5,35	0,639	1,045	0,887	41,91	28,75
461-465		4,96	4,29	0,621	1,093	0,866	47,77	32,08
471-475		5,96	4,94	0,586	1,052	0,831	47,58	31,29
481-485		6,63	5,43	0,556	1,054	0,821	47,90	30,39
311-315		4,67	3,58	0,650	1,168	0,766	65,299	50,466
116-120		m₂	3,02	2,16	0,531	0,992	0,715	55,27
156-160	3,46		2,59	0,497	1,012	0,749	50,82	31,17
196-200	3,40		2,91	0,606	1,074	0,858	46,59	30,84
236-240	2,62		2,21	0,625	0,977	0,844	41,06	29,18
276-280	2,18		2,13	0,637	1,056	0,978	28,11	17,87
406-410	3,79		3,46	0,584	1,025	0,912	33,73	20,79
416-420	4,48		4,12	0,612	1,020	0,919	32,82	21,17
426-430	5,12		4,70	0,551	1,031	0,918	32,43	18,69
436-440	4,42		3,88	0,530	1,115	0,878	44,39	24,98
446-450	5,16		4,50	0,560	1,070	0,871	43,03	26,02
456-460	5,78		5,25	0,585	1,098	0,909	41,45	25,23
466-470	5,11		3,87	0,527	0,962	0,759	47,00	30,49
476-480	5,51		4,57	0,475	1,162	0,829	50,12	26,08
486-490	6,36		5,19	0,534	1,032	0,816	45,68	27,90
316-320	4,76		3,00	0,482	1,160	0,631	67,33	45,08

7 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στην ενότητα αυτή, επιδιώκεται η ανάλυση των αποτελεσμάτων της πειραματικής διερεύνησης που διενεργήθηκε. Αρχικά, γίνεται η ανάλυση των αποτελεσμάτων που αφορούν τις ελεύθερες ρίψεις. Στη συνέχεια, με δεδομένα τα συμπεράσματα από τις δοκιμές ελεύθερης πτώσης ακολουθεί η επεξεργασία των αποτελεσμάτων των παραβολικών ρίψεων.

7.1 Ανάλυση αποτελεσμάτων ελεύθερων ρίψεων

Σε πρώτη φάση, γίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων της παρούσας έρευνας με προηγούμενη αντίστοιχη έρευνα μελέτης (Asteriou et al, 2013a) του φαινομένου της αναπήδησης για την επιβεβαίωση της αξιοπιστίας και της επαναληψιμότητας της.

Στη συνέχεια, με δεδομένη την αξιοπιστία της μεθόδου, η ανάλυση επικεντρώνεται στις δοκιμές ελεύθερης πτώσης όπου τα υλικά των σφαιρικών δοκιμίων και των επιφανειών πρόσκρουσης είναι ίδια. Σκοπός της επεξεργασίας είναι η εξαγωγή συμπερασμάτων αναφορικά με την επίδραση των κινηματικών χαρακτηριστικών στους συντελεστές αναπήδησης. Από την επεξεργασία αυτή προκύπτει μια νέα μεθοδολογία προσδιορισμού των συντελεστών αναπήδησης συναρτήσει της ταχύτητας πρόσκρουσης, της μάζας του τεμάχους και της σκληρότητας του υλικού κατά την σφύρα Schmidt..

Ακολουθεί η επεξεργασία των αποτελεσμάτων των δοκιμών ελεύθερης ρίψης, όπου το υλικό της βάσης διαφοροποιείται από το υλικό του δοκιμίου, όπου διερευνάται η επίδραση της διαφορετικότητας των υλικών βάσης και δοκιμίου στην αναπήδηση για τον τελικό προσδιορισμό της προτεινόμενης μεθοδολογίας.

7.1.1 Ανάλυση αποτελεσμάτων ελεύθερων ρίψεων με ίδιο υλικό σφαιρικού δοκιμίου και βάσης πρόσκρουσης

Αρχικά, στην παράγραφο αυτή, γίνεται ο έλεγχος της αξιοπιστίας της μεθόδου στην οποία βασίστηκε η παρούσα έρευνα. Για να διαπιστώσουμε κατά πόσον οι θεωρήσεις του πειράματος είναι ασφαλείς για την εξαγωγή συμπερασμάτων έγινε μία σύγκριση με παλαιότερη ανάλογη έρευνα η οποία και είχε αναπτυχθεί στα ίδια θεωρητικά και πρακτικά πλαίσια.

7.1.1.1 Έλεγχος της αξιοπιστίας της έρευνας

Στο πλαίσιο της έρευνας των Asteriou et al.(2013a) είχαν πραγματοποιηθεί δοκιμές ελεύθερης πτώσης από διάφορα ύψη με τρία σφαιρικά δοκίμια από ένεμα τσιμεντοειδούς βάσης SikaGrout και τέσσερα δοκίμια από εποξειδική ρητίνη, διαφορετικής μάζας το κάθε δοκίμιο. Σκοπός της έρευνας ήταν η συσχέτιση των συντελεστών αναπήδησης με την ορμή του βραχοτεμάχους πρόσπτωσης (βλ. 3.2.3). Στην παρούσα έρευνα, χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος αυτοσχέδιος μηχανισμός ελεύθερης ρίψης. Επιπλέον, τα δύο πρώτα δοκίμια από τσιμεντένεμα αναπαράχθηκαν από το

ίδιο υλικό και με τα ίδια εκμαγεία, ώστε να είναι όμοια με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στην έρευνα των Asteriou et al.(2013a), επιτρέποντας την μεταξύ τους σύγκριση.

Δεδομένου, λοιπόν, ότι οι δύο διαφορετικές έρευνες κινούνται στα πλαίσια μίας κοινής φιλοσοφίας και είναι βασισμένες σε ένα κοινό θεωρητικό και πρακτικό υπόβαθρο που περιλαμβάνει ίδιες παραδοχές, θεωρήσεις καθώς και ίδιο πειραματικό μηχανισμό, επιδιώκεται η παράλληλη αξιολόγησή τους. Στο σημείο αυτό παρατίθενται τα αποτελέσματα που είχαν προκύψει από την έρευνα των Asteriou et al.(2013) για τις τρεις μάζες από ένεμα τσιμεντοειδούς βάσης:

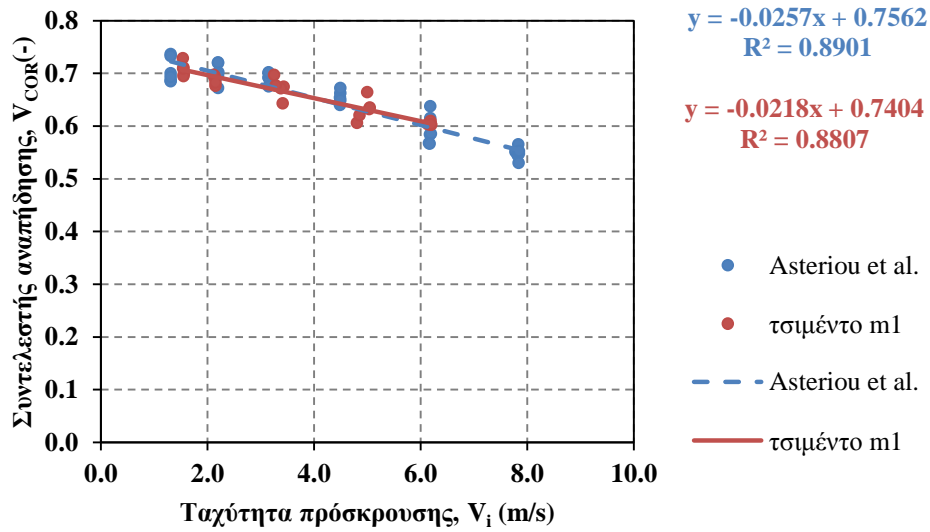
Πίνακας 7.1 Τα αποτελέσματα των ταχυτήτων πρόσκρουσης v_i (m/s), της ορμής πρόσκρουσης M_i (kgm/s) και των κάθετων συντελεστών αναπήδησης V_{COR} για τις τρεις μάζες τσιμεντεμάτος της έρευνας των Asteriou et al.(2013a).

Asteriou et al.								
m_1			m_2			m_3		
v_i (m/s)	M_i (kgm/s)	V_{COR}	v_i (m/s)	M_i (kgm/s)	V_{COR}	v_i (m/s)	M_i (kgm/s)	V_{COR}
1,32	0,037	0,687	1,40	0,096	0,679	1,43	0,192	0,569
1,32	0,037	0,685	1,40	0,096	0,699	1,44	0,193	0,525
1,32	0,037	0,700	1,40	0,096	0,675	1,43	0,192	0,527
1,32	0,037	0,693	1,40	0,096	0,666	1,43	0,193	0,580
1,32	0,037	0,736	1,40	0,096	0,658	1,43	0,193	0,552
1,32	0,037	0,733	2,31	0,160	0,612	2,08	0,277	0,487
2,21	0,063	0,672	2,22	0,154	0,640	2,08	0,277	0,495
2,21	0,063	0,719	2,28	0,158	0,645	2,06	0,274	0,533
2,21	0,063	0,702	2,35	0,163	0,644	2,07	0,276	0,515
2,20	0,063	0,721	2,33	0,161	0,643	3,07	0,409	0,505
2,20	0,062	0,695	3,39	0,235	0,569	3,09	0,412	0,512
3,15	0,089	0,691	3,10	0,215	0,618	3,07	0,410	0,497
3,15	0,090	0,692	3,25	0,225	0,578	3,02	0,403	0,517
3,15	0,090	0,675	3,25	0,225	0,609	4,38	0,584	0,454
3,15	0,090	0,701	3,29	0,228	0,597	4,39	0,585	0,452
3,15	0,089	0,702	4,48	0,310	0,578	4,37	0,582	0,461
4,49	0,128	0,640	4,56	0,316	0,561	4,33	0,578	0,473
4,50	0,128	0,662	4,51	0,313	0,563	6,26	0,835	0,426
4,49	0,127	0,654	4,45	0,309	0,604	6,29	0,838	0,430
4,50	0,128	0,649	6,45	0,447	0,488	6,28	0,837	0,414
4,50	0,128	0,672	6,41	0,444	0,495	6,27	0,836	0,396

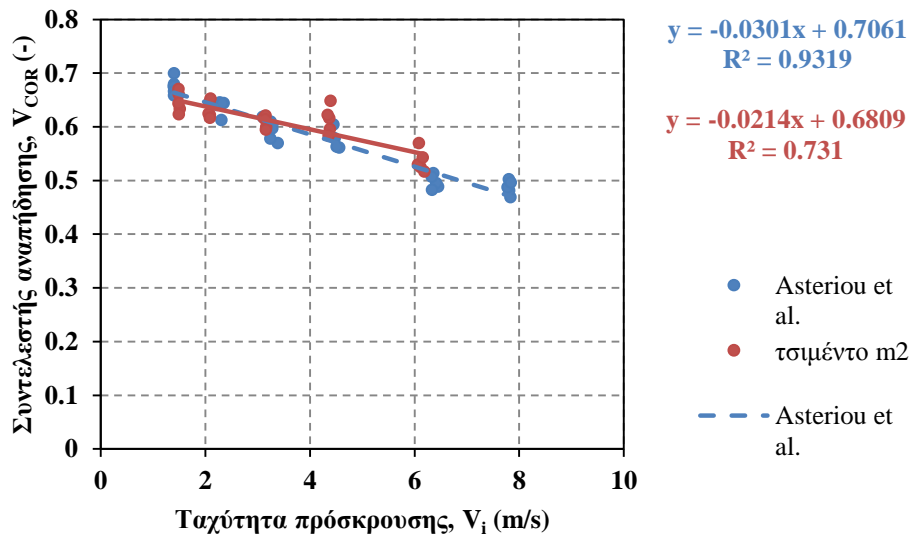
Asteriou et al.								
m ₁			m ₂			m ₃		
v _i (m/s)	M _i (kgm/s)	V _{COR}	v _i (m/s)	M _i (kgm/s)	V _{COR}	v _i (m/s)	M _i (kgm/s)	V _{COR}
6,17	0,175	0,584	6,36	0,441	0,513	6,26	0,834	0,437
6,16	0,175	0,568	6,33	0,439	0,507	7,77	1,045	0,414
6,20	0,176	0,585	6,34	0,439	0,482	7,86	1,056	0,403
6,19	0,176	0,615	7,84	0,538	0,468	7,78	1,046	0,413
6,18	0,176	0,637	7,81	0,536	0,502	7,81	1,050	0,432
6,17	0,175	0,566	7,81	0,536	0,481			
7,78	0,221	0,551	7,78	0,534	0,487			
7,83	0,222	0,565	7,84	0,538	0,496			
7,83	0,222	0,545						
7,85	0,223	0,548						
7,85	0,223	0,552						
7,84	0,223	0,530						

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο ερευνών έγινε για τις περιπτώσεις των δύο πρώτων μαζών τιμεντενέματος που σκόπιμα είναι ίδιες και στις δύο έρευνες. Παρουσιάζοντας παράλληλα τα αποτελέσματα των δύο ερευνών για κάθε μάζα ξεχωριστά προκύπτουν τα εξής διαγράμματα:

Σε όρους ταχυτήτων:

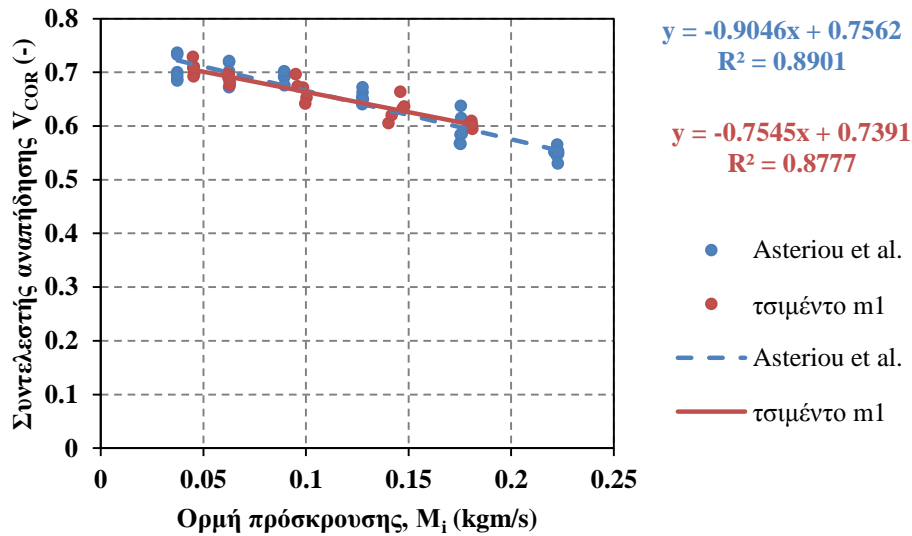


Διάγραμμα 7.1 Σχέση μεταξύ της ταχύτητας πρόσκρουσης v_i (m/s) και του κάθετου συντελεστή αναπήδησης V_{COR} (αδιάστατο μέγεθος) για την μάζα m_1 .

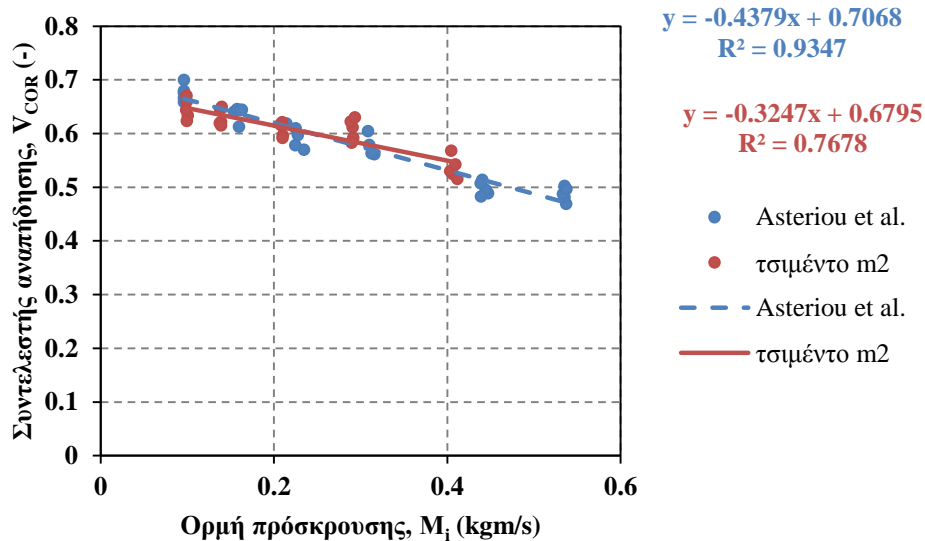


Διάγραμμα 7.2 Σχέση μεταξύ της ταχύτητας πρόσκρουσης v_i (m/s) και του κάθετου συντελεστή αναπήδησης V_{COR} (αδιάστατο μέγεθος) για την μάζα m_2 .

Σε όρους ορμής:



Διάγραμμα 7.3. Σχέση μεταξύ της ορμής πρόσκρουσης M_i (kgm/s) και του κάθετου συντελεστή αναπήδησης V_{COR} (αδιάστατο μέγεθος) για την μάζα m_1 .



Διάγραμμα 7.4. Σχέση μεταξύ της ορμής πρόσκρουσης M_i (kgm/s) και του κάθετου συντελεστή αναπήδησης V_{COR} (αδιάστατο μέγεθος) για την μάζα m_2 .

Παρατηρώντας, λοιπόν, τα αποτελέσματα των δύο ερευνών παράλληλα, διαπιστώνουμε ότι για την ίδια μάζα υλικού και για ένα αξιόλογο εύρος ταχυτήτων η απόκλιση των αντίστοιχων κάθετων συντελεστών αναπήδησης μεταξύ των δύο ερευνών είναι εντυπωσιακά μικρή. Επομένως, μπορούμε να συμπεράνουμε με ασφάλεια ότι τόσο οι θεωρήσεις στις οποίες βασίστηκαν οι δύο έρευνες, όσο και η πειραματική μέθοδος που εφαρμόστηκε είναι αξιόπιστες.

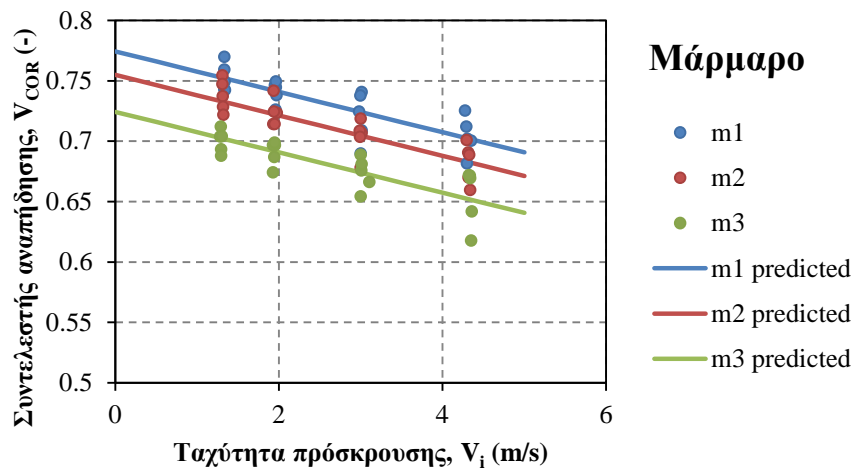
7.1.1.2 Ανάλυση των αποτελεσμάτων των δοκιμών βάσει της ταχύτητας πρόσκρουσης

Εφόσον έχει εξασφαλιστεί πλέον η αξιοπιστία των θεωρήσεων στις οποίες βασίστηκε η παρούσα έρευνα ακολουθεί η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Σκοπός της ανάλυσης είναι η διερεύνηση της σχέσης του συντελεστή αναπήδησης με τα κινηματικά χαρακτηριστικά των δοκιμών. Με γνωστούς, λοιπόν, τους συντελεστές αναπήδησης για τις διάφορες ταχύτητες πρόσκρουσης, επιδιώκεται η κατάρτιση της σχέσης μεταξύ της ταχύτητας πρόσπτωσης v_i , της μάζας των δοκιμών και του συντελεστή αναπήδησης COR. Γι' αυτό το λόγο, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της γραμμικής παλινδρόμησης για κάθε υλικό, όπου η ταχύτητα πρόσκρουσης και η μάζα των δοκιμών αποτελούν ανεξάρτητες μεταβλητές (x_1, x_2) ενώ ο συντελεστής αναπήδησης είναι η αντίστοιχη εξαρτημένη μεταβλητή (y). Από την εφαρμογή της μεθόδου προέκυψε μία ευθεία (της μορφής $f(x) = ax_1 + bx_2 + c$) που εκφράζει κατά τον βέλτιστο δυνατό τρόπο τη σχέση του κάθετου συντελεστή COR με τα κινηματικά χαρακτηριστικά των δοκιμών.

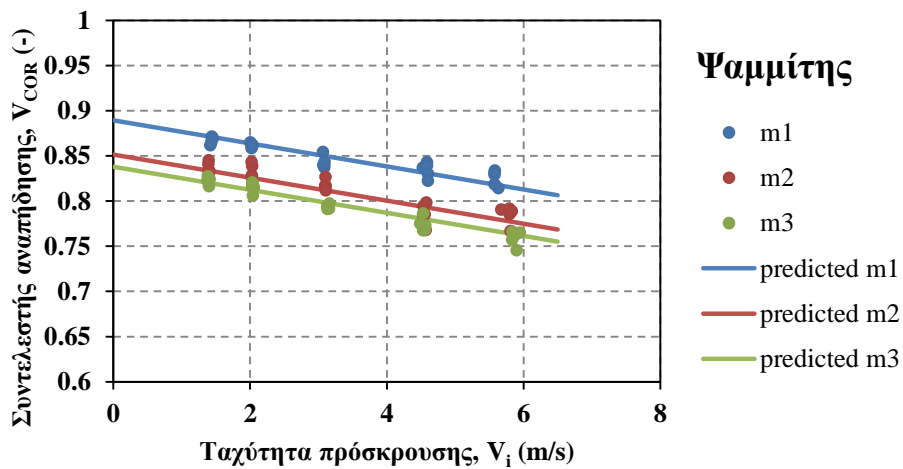
Πίνακας 7.2 Οι συντελεστές των ευθειών που προέκυψαν από την γραμμική παλινδρόμηση για τα τρία υλικά:

Συντελεστές Ευθειών	Μάρμαρο (m_1, m_2, m_3)	Ψαμμίτης (m_1, m_2, m_3)	Τσιμέντο (m_1, m_2)
a	-0,017	-0,013	-0,022
b	-0,002	-0,001	-0,002
c	0,822	0,913	0,785

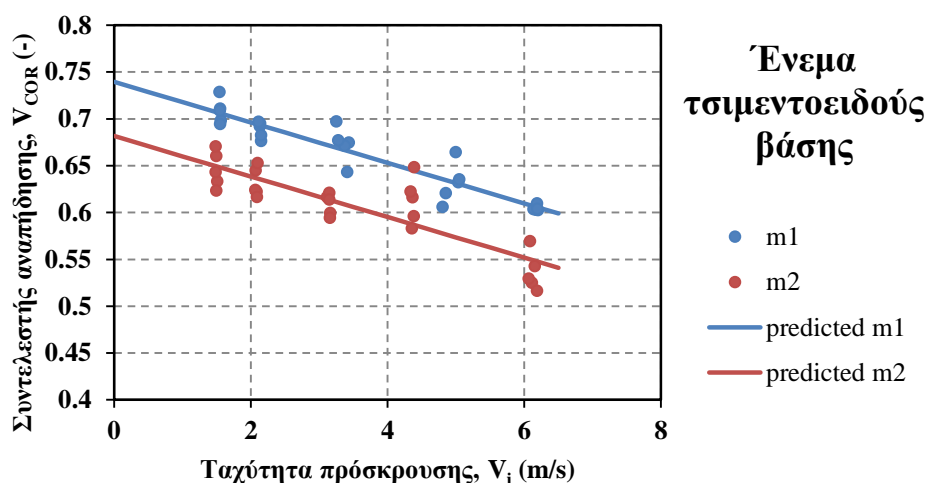
Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται για κάθε υλικό οι τιμές των συντελεστών αναπήδησης συναρτήσεως των ταχυτήτων που ανέπτυξαν οι διαφορετικές μάζες πριν την πρόσκρουση (σημεία). Επίσης, παρουσιάζονται οι προβλέψεις που προκύπτουν από τα αντίστοιχα μοντέλα παλινδρόμησης.



Διάγραμμα 7.5 Τιμές των συντελεστών αναπήδησης V_{COR} συναρτήσει της ταχύτητας πρόσκρουσης (m_i) για τα δοκίμια μαρμάρου και οι αντίστοιχες προβλεπόμενες τιμές που προέκυψαν από τις γραμμικές παλινδρομήσεις (predicted m_i).



Διάγραμμα 7.6 Τιμές των συντελεστών αναπήδησης V_{COR} συναρτήσει της ταχύτητας πρόσκρουσης (m_i) για τα δοκίμια ψαμμίτη και οι αντίστοιχες προβλεπόμενες τιμές που προέκυψαν από τις γραμμικές παλινδρομήσεις (predicted m_i).



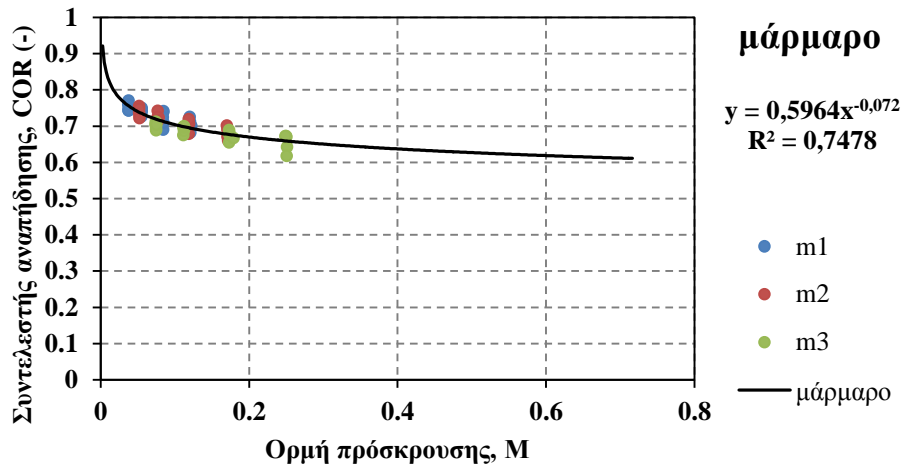
Διάγραμμα 7.7 Τιμές συντελεστών αναπήδησης V_{COR} συναρτήσει της ταχύτητας πρόσκρουσης (m_i) για τα δοκίμια τσιμεντενέματος και οι αντίστοιχες προβλεπόμενες τιμές που προέκυψαν από τις γραμμικές παλινδρομήσεις (predicted m_i).

Παρατηρώντας τα παραπάνω της προηγούμενης ενότητας προκύπτει ότι οι γραμμές προσαρμογής, που ορίζουν τη βέλτιστη σχέση μεταξύ μάζας και ταχύτητας με τους συντελεστές αναπήδησης είναι αντιπροσωπευτικές των δοκιμών. Διαπιστώνουμε, λοιπόν, ότι το φαινόμενο της αναπήδησης που εκφράζεται μαθηματικά μέσω του συντελεστή αναπήδησης COR είναι άμεσα εξαρτώμενο τόσο από την ταχύτητα, όσο και από την μάζα του τεμάχους που καταπίπτει.

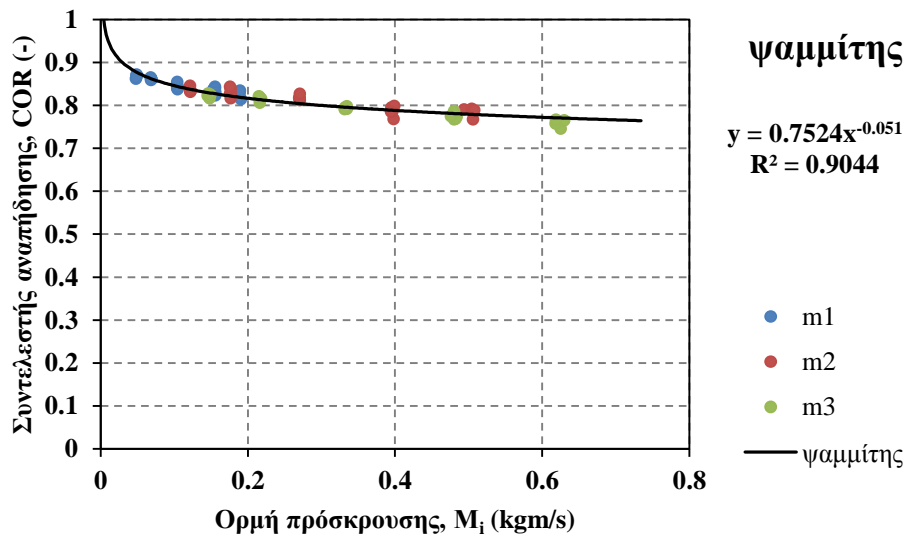
Ωστόσο, στις μέχρι σήμερα θεωρήσεις, οι συντελεστές αποτελούν συνάρτηση μόνο των ιδιοτήτων των υλικών, με αποτέλεσμα να λαμβάνονται ίδιες τιμές συντελεστών για τεμάχια ίδιου υλικού αλλά διαφορετικής μάζας και ταχύτητας. Συνεπώς, η έκφραση των συντελεστών είναι ελλιπής όταν αγνοούνται τα παραπάνω χαρακτηριστικά. Επιβάλλεται, λοιπόν, η ανάπτυξη μιας νέας σχέσης που να εκφράζει τον συντελεστή συναρτήσει τόσο των ιδιοτήτων των υλικών, όσο και των παραπάνω χαρακτηριστικών.

7.1.1.3 Ανάλυση των αποτελεσμάτων βάσει της ορμής πρόσκρουσης

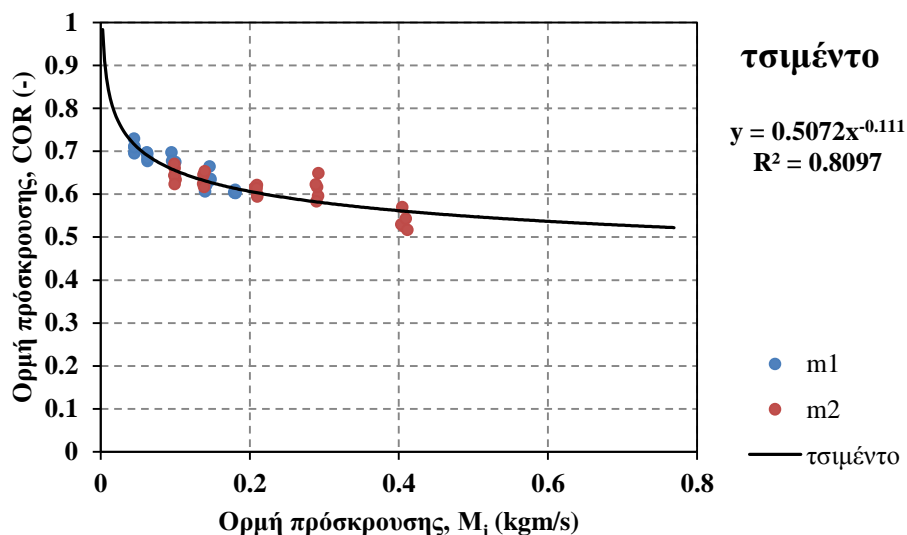
Οι δύο παράμετροι, μάζα και ταχύτητα, είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Για να μπορέσουν να συνδυαστούν σε μία νέα σχέση χρησιμοποιείται η ορμή, ένα μέγεθος που συνδέει απευθείας τη μάζα του υλικού με την ταχύτητα που αναπτύσσει, και περιγράφει την σφοδρότητα της κρούσης. Στο σημείο αυτό παρατίθενται για κάθε υλικό οι τιμές των συντελεστών αναπήδησης συναρτήσει πλέον της ορμής των τεμαχίων πριν την πρόσκρουση.



Διάγραμμα 7.8 Οι συντελεστές αναπήδησης συναρτήσει της ορμής που ανέπτυξαν τα σφαιρίδια μαρμάρου πριν την πρόσκρουση και η εκθετική γραμμική τάση που συνδέει τα δύο μεγέθη.



Διάγραμμα 7.9 Οι συντελεστές αναπήδησης συναρτήσει της ορμής που ανέπτυξαν τα σφαιρίδια ψαμμίτη πριν την πρόσκρουση και η εκθετική γραμμική τάση που συνδέει τα δύο μεγέθη.



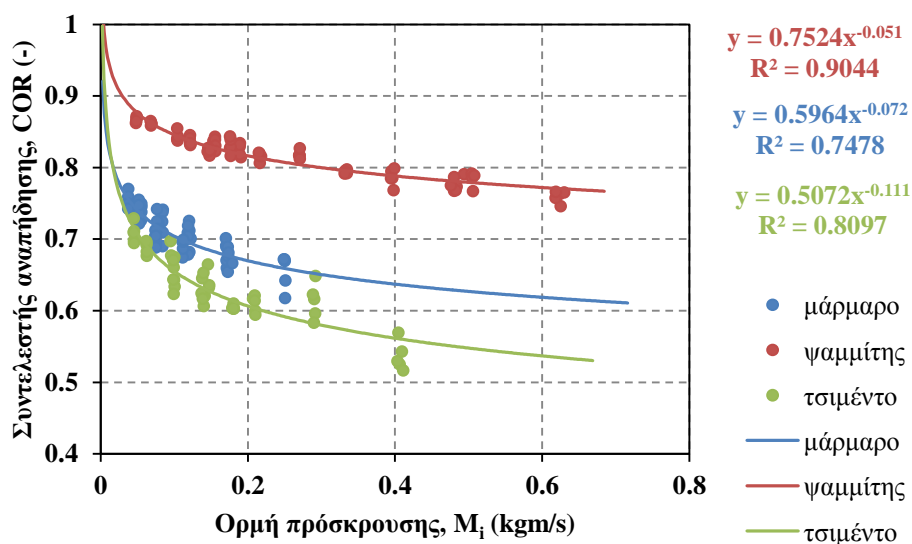
Διάγραμμα 7.10 Οι συντελεστές αναπήδησης συναρτήσκει της ορμής που ανέπτυξαν τα σφαιρίδια τσιμέντου πριν την πρόσκρουση και η εκθετική γραμμή τάσης που συνδέει τα δύο μεγέθη.

Από τα παραπάνω διαγράμματα συμπεραίνουμε ότι η ορμή σχετίζεται ιδιαίτερα ικανοποιητικά με τον συντελεστή αναπήδησης, καθώς τα σημεία εμφανίζουν κοινή τάση ανεξαρτήτως της μάζας ή της ταχύτητας των τεμαχών.

Επίσης, συμπεραίνουμε ότι μία γραμμική σχέση δεν είναι ικανοποιητική για να εκφράσει τη σχέση του συντελεστή με την ορμή των δοκιμίων. Χρειάζεται μία εκθετική σχέση που να συνδέει τα δύο μεγέθη. Η σχέση θα πρέπει, λοιπόν, να έχει τη μορφή:

$$V_{COR} = a \cdot M^b \tag{7.1}$$

Αν συμπεριλάβουμε τα τρία υλικά σε ένα ενιαίο διάγραμμα διαπιστώνουμε ότι με δεδομένη την ορμή με την οποία προσπίπτει ένα τέμαχος βράχου σε μία επιφάνεια, ο συντελεστής αναπήδησης μεταβάλλεται ανάλογα με τις ιδιότητες του υλικού του:



Διάγραμμα 7.11 Η σχέση των συντελεστών αναπήδησης COR (αδιάστατο μέγεθος) με την ορμή πρόσκρουσης M_i (kgm/s) και οι αντίστοιχες εκθετικές γραμμές τάσεις και για τα τρία υλικά (μάρμαρο, ψαμμίτης, τσιμέντο).

Συνεπώς, οι παράμετροι a , b θα πρέπει να εκφράζουν την επιρροή των ιδιοτήτων των υλικών στην αναπήδηση. Όμως, κάθε υλικό ορίζεται από ένα μεγάλο πλήθος ιδιοτήτων με αποτέλεσμα, ο προσδιορισμός των παραμέτρων συναρτήσει όλων αυτών να είναι πρακτικά ανέφικτος.

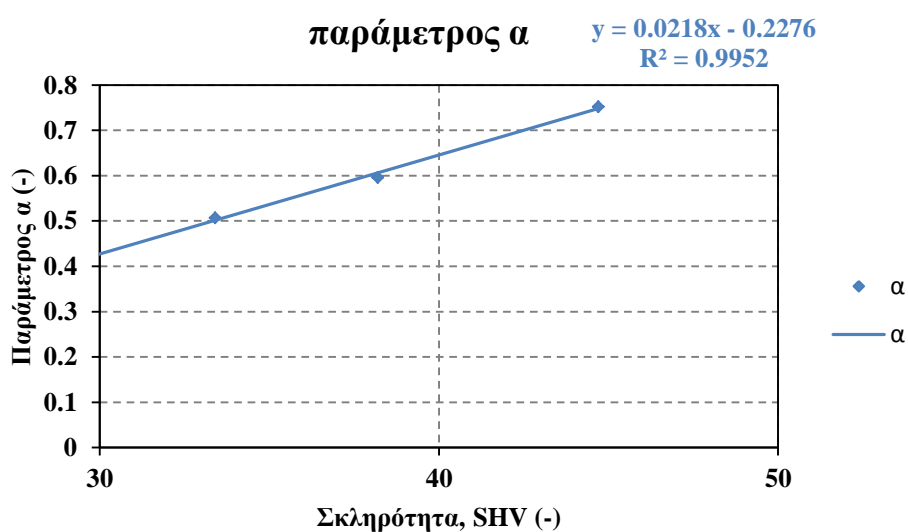
Σε προηγούμενη έρευνα των Asteriou et al. (2013b) είχε διερευνηθεί η επίδραση των ιδιοτήτων των υλικών στην τροχιά των τεμαχών βράχου σε περίπτωση καταπτώσεων. Από την έρευνα αυτή είχε προκύψει ότι η κρισιμότερη, με διαφορά, ιδιότητα των υλικών που καθορίζει την αναπήδηση των τεμαχών μετά την πρόσκρουση είναι η σκληρότητα. Το συμπέρασμα αυτό επιβεβαιώνεται και από τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας καθώς ο ψαμμίτης, ως το σκληρότερο από τα τρία υλικά, παρουσιάζει την μεγαλύτερη αναπήδηση και το ένεμα τσιμεντοειδούς βάσης, ως το πιο μαλακό παρουσιάζει αντίστοιχα την μικρότερη. Αυτό συμβαίνει διότι στην περίπτωση ενός μαλακού υλικού καταναλώνεται μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας στην παραμόρφωσή του με αποτέλεσμα η αναπήδηση που αναπτύσσει να είναι μικρότερη.

Εφόσον, λοιπόν, η σκληρότητα (SHV) αποτελεί την πιο καθοριστική ιδιότητα, οι παράμετροι a και b θα εκφραστούν συναρτήσει αυτής. Με δεδομένη την σκληρότητα των τριών υλικών, όπως προέκυψε από τις μετρήσεις με τη σφύρα Schmidt (βλ. κεφ. 5), και από τα αποτελέσματα των αναλύσεων έχουν προκύψει τα εξής:

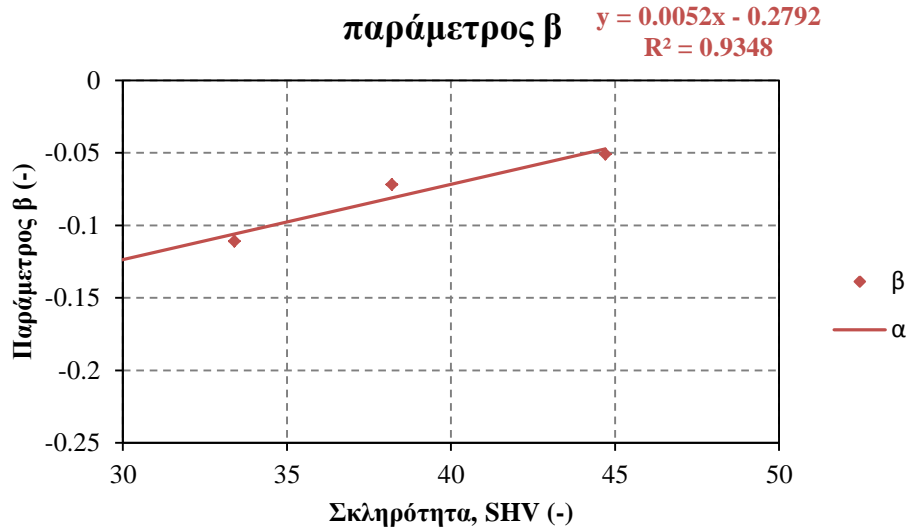
Πίνακας 7.3 Συντελεστές συσχέτισης για κάθε υλικό και οι αντίστοιχες σκληρότητές τους.

Υλικό	a	b	R^2	SHV
τσιμέντο	0,5072	-0,111	0,8097	33,40
μάρμαρο	0,5964	-0,072	0,7478	38,20
ψαμμίτης	0,7524	-0,051	0,9044	44,70

Παρατηρούμε, λοιπόν, ότι όσο αυξάνεται η σκληρότητα του υλικού οι παράμετροι a και b αυξάνονται. Αν αναπαραστήσουμε γραφικά τη συσχέτιση των δύο παραμέτρων με την σκληρότητα των υλικών (SHV) προκύπτουν τα εξής διαγράμματα:



Διάγραμμα 7.12 Οι τιμές της παραμέτρου a συναρτήσκει της σκληρότητας (SHV) των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα (τσιμέντο, μάρμαρο ψαμμίτης) και η γραμμή τάσης που συνδέει τα δύο μεγέθη.



Διάγραμμα 7.13 Οι τιμές της παραμέτρου b συναρτήσει της σκληρότητας (SHV) των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα (τσιμέντο, μάρμαρο ψαμμίτης) και η γραμμή τάσης που συνδέει τα δύο μεγέθη.

Από τις γραφικές απεικονίσεις συμπεραίνουμε ότι δύο γραμμικές σχέσεις της μορφής $f(x) = a_i x + \beta_i$ εκφράζουν ικανοποιητικά τη σχέση μεταξύ της σκληρότητας των υλικών και των παραμέτρων a , b με τη σκληρότητα να αποτελεί την ανεξάρτητη μεταβλητή που καθορίζει τις τιμές τους. Οι γραμμικές αυτές σχέσεις, λοιπόν, θα είναι οι ακόλουθες:

$$\alpha = 0,0218x - 0,2276 \quad (7.2)$$

$$b = -0,0052x + 0,2792 \quad (7.3)$$

Όπου:

x , η σκληρότητα του υλικού

Οπότε το μοντέλο που θα περιγράφει την σχέση του κάθετου συντελεστή αναπήδησης με την ορμή πρόσκρουσης του τεμάχους που αποκολλάται σε περίπτωση κατάπτωσης για συνθήκες ελεύθερης πτώσης θα έχει την μορφή:

$$V_{COR} = (0,0218SHV - 0,2276)M_i^{(0,0052SHV - 0,2792)} \quad (7.4)$$

Όπου:

V_{COR} (-), ο συντελεστής αναπήδησης σε περίπτωση ελεύθερης πτώσης,

SHV (-), η σκληρότητα του υλικού, και

M_i (kgm/s), η ορμή πρόσκρουσης του τεμάχους.

7.1.1.4 Προσδιορισμός σφάλματος του μοντέλου στον υπολογισμό του κάθετου συντελεστή αναπήδησης στην περίπτωση των ελεύθερων ρίψεων

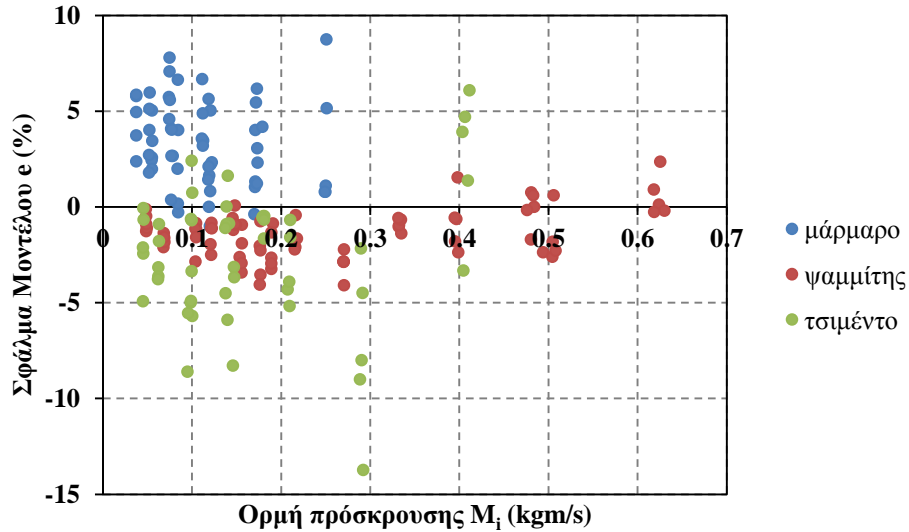
Στην παράγραφο αυτή, θα προσδιοριστεί το σφάλμα του μοντέλου στον υπολογισμό του κάθετου συντελεστή αναπήδησης συναρτήσει των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις πειραματικές δοκιμές. Για τον υπολογισμό του σφάλματος, δόθηκαν στο μοντέλο οι τιμές της ορμής που αναπτύχθηκαν στις δοκιμές ρίψεων. Οι συντελεστές αναπήδησης που προσδιορίζονται από το μοντέλο συγκρίθηκαν με εκείνους που προσδιορίστηκαν πειραματικά. Το σφάλμα για την περίπτωση των ελεύθερων ρίψεων, προκύπτει από την σχέση :

$$error = \frac{V_{COR,pred} - V_{COR,meas}}{V_{COR,pred}} * 100\% \quad (7.5)$$

Όπου:

$V_{COR,pred}$, ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης που προβλέπει το μοντέλο, και

$V_{COR,meas}$, ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης που προέκυψε πειραματικά.



Διάγραμμα 7.14 Το σφάλμα του μοντέλου για τις δοκιμές ελεύθερης πτώσης συναρτήσει των ορμών πρόσκρουσης που αναπτύχθηκαν κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων.

Από το διάγραμμα συμπεραίνουμε ότι το σφάλμα στις περισσότερες δοκιμές ελεύθερης πτώσης περιορίζεται στο $\pm 5\%$ πλην ελάχιστων δοκιμών όπου μπορεί να φτάνει το $\pm 10-15\%$. Σε κάθε περίπτωση το ποσοστό αυτό είναι πολύ μικρό και δικαιολογείται τόσο από πειραματική διαδικασία εν γένει όσο και από τις παραδοχές στις οποίες βασίζεται. Παρά το γεγονός ότι η κατανομή του σφάλματος δεν είναι ιδιαίτερα ομοιόμορφη, το μέγεθος του είναι πολύ μικρό με αποτέλεσμα να μπορεί να αγνοηθεί.

7.1.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων ελεύθερων ρίψεων με διαφορετικό υλικό σφαιρικού δοκιμίου και βάσης πρόσπτωσης

Σε πολλές περιπτώσεις καταπτώσεων βράχων τα τεμάχια που αποκολλώνται προσπίπτουν σε επιφάνειες άλλων υλικών. Ωστόσο, αυτή η διαφοροποίηση στα υλικά δεν λαμβάνεται υπόψη στην μεθοδολογία που προτάθηκε στην προηγούμενη ενότητα. Γι' αυτό τον λόγο, στην παράγραφο αυτή επιδιώκεται ο προσδιορισμός της επίδρασης που έχουν τα υλικά του τεμάχους αποκόλλησης και του επιπέδου πρόσκρουσης στην τιμή της κάθετης συνιστώσας του συντελεστή αναπήδησης. Αρχικά, γίνεται μια σύγκριση με την σχέση του Richards και στην συνέχεια γίνεται η προσαρμογή της μεθοδολογίας που προτάθηκε στην παραπάνω ενότητα για την περίπτωση που διαφοροποιείται το υλικό του τεμάχους από αυτό της βάσης.

7.1.2.1 Σύγκριση με την σχέση του Richards

Μία ανάλογη προσέγγιση είχε γίνει και στο παρελθόν από τους Richards et al. (2001) (βλ. κεφ. 3). Από την έρευνά τους είχε προκύψει η εξής σχέση:

$$n_{COR} = \frac{-110 + 9R_{slab} + 4R_{ball} + 4\theta}{1000} \quad (7.6)$$

Όπου:

n_{COR} (-), η κάθετη συνιστώσα του συντελεστή αναπήδησης V_{COR} ,

R_{slab} (-), η σκληρότητα του υλικού της επιφάνειας πρόσκρουσης,

R_{ball} (-), η σκληρότητα του υλικού του τεμάχους πρόσκρουσης και

θ ($^{\circ}$), η κλίση του πρηνούς.

Στα πλαίσια της παρούσας έρευνας, προκειμένου να επιτευχθεί η συσχέτιση αυτή χρησιμοποιήθηκε και πάλι η μέθοδος γραμμικής παλινδρόμησης. Ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης αποτελεί την εξαρτημένη μεταβλητή, ενώ οι σκληρότητες των υλικών αποτελούν τις δύο ανεξάρτητες μεταβλητές. Οι τιμές του κάθετου συντελεστή αναπήδησης (n_{COR}) προσδιορίστηκαν από την πειραματική διερεύνηση και οι σκληρότητες των υλικών των δοκιμίων (R_{ball}) και των επιφανειών πρόσκρουσης (R_{slab}) προέκυψαν από την δοκιμή σκληρότητας με την σφύρα Schmidt (βλ. κεφ. 5).

Να σημειωθεί ότι εφόσον αναφερόμαστε μόνο σε ελεύθερες πτώσεις, η κλίση του πρηνούς είναι μηδενική, οπότε δεν λαμβάνεται υπόψη ο όρος 4θ της σχέσης του Richards. Επιπλέον, να τονίσουμε ότι επικεντρωνόμαστε στην επίδραση της

σκληρότητας των υλικών (τέμαχος και επιφάνεια πρόσκρουσης) καθώς, όπως έχουμε προαναφέρει, αποτελεί την καθοριστική ιδιότητα των υλικών που επηρεάζει την αναπήδηση. Από την εφαρμογή της μεθόδου προκύπτει η παρακάτω συσχέτιση των τριών παραμέτρων:

$$n_{COR} = \frac{-149 + 8,8R_{slab} + 5,3R_{ball}}{1000} \quad (7.7)$$

Διαπιστώνουμε ότι η έκφραση που προέκυψε προσεγγίζει την αντίστοιχη των Richards et al (2001). Όμως, ο συντελεστής συσχέτισης ($R^2=0,245$) ο οποίος αξιολογεί την ποιότητα της συσχέτισης είναι αρκετά μικρός.

Όπως συμπεράναμε στην προηγούμενη παράγραφο, η επίδραση της ορμής στο συντελεστή αναπήδησης είναι σημαντική. Συνεπώς, και σε αυτή την έκφραση του συντελεστή μπορεί η συμμετοχή της ορμής να δώσει μία σχέση με καλύτερο αποτέλεσμα συσχέτισης. Εξάλλου, και στη σειρά αυτή των δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν όλες οι διαφορετικές μάζες για κάθε υλικό. Αν, λοιπόν, στη συσχέτιση ληφθεί υπόψη και η επίδραση της ορμής η σχέση αλλάζει και παίρνει την εξής μορφή:

$$n_{COR} = 0,080 + 0,0089R_{slab} + 0,0087R_{ball} - 0,4M \quad (7.8)$$

Όπου:

n_{COR} (-), η κάθετη συνιστώσα του συντελεστή αναπήδησης V_{COR} ,

R_{slab} (-), η σκληρότητα του υλικού της επιφάνειας πρόσκρουσης,

R_{ball} (-), η σκληρότητα του υλικού του τεμάχους πρόσκρουσης, και

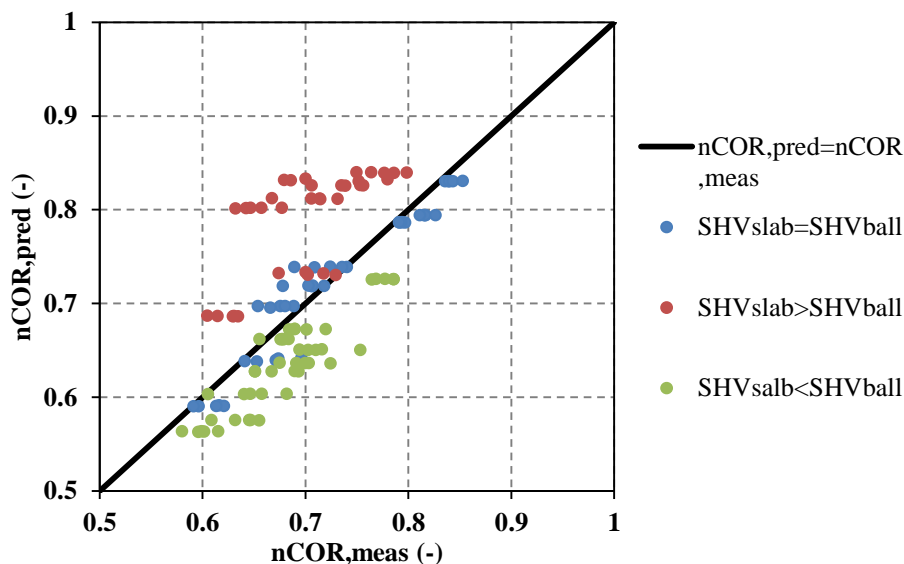
M (kgm/s), η ορμή του τεμάχους πρόσκρουσης.

Στην περίπτωση της νέας έκφρασης ο συντελεστής συσχέτισης λαμβάνει πολύ μεγαλύτερη τιμή ($R^2=0,76$). Συνεπώς η σχέση αυτή παρουσιάζει αποτελεσματικότερα τη συσχέτιση του συντελεστή με τους παράγοντες της σκληρότητας των υλικών.. Από τους συντελεστές που προέκυψαν διαπιστώνουμε ότι δεν επηρεάζει ιδιαίτερα η διαφορετικότητα των υλικών τεμάχους και επιφάνειας πρόσκρουσης στην αναπήδηση καθώς οι δύο συντελεστές ποσοτικά δεν διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους. Αντίθετα, ο συντελεστής της ορμής είναι δύο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερος από τους συντελεστές των σκληροτήτων γεγονός που επιβεβαιώνει τον καταλυτικό ρόλο της ορμής στην αναπήδηση.

7.1.2.2 Προσαρμογή της συσχέτισης του συντελεστή αναπήδησης με την ορμή για κρούσεις μεταξύ διαφορετικών υλικών.

Η σχέση 7.5 περιγράφει ικανοποιητικά την απόκριση του τεμάχους συναρτήσει της ορμής πρόσκρουσης και της σκληρότητας του υλικού, όταν η βάση και το τέμαχος συνίστανται από το ίδιο υλικό. Έτσι, θεωρήθηκε σκόπιμο η σχέση αυτή να παραμείνει ως έχει και η επίδραση των διαφορετικών υλικών να λαμβάνεται υπόψη με την χρήση ενός διορθωτικού συντελεστή.

Παρακάτω αναπαρίστανται γραφικά η πρόβλεψη του μοντέλου, όταν χρησιμοποιείται η σκληρότητα της βάσης, σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα για τις δοκιμές ελεύθερης πτώσης με τέμαχος διαφορετικού υλικού.



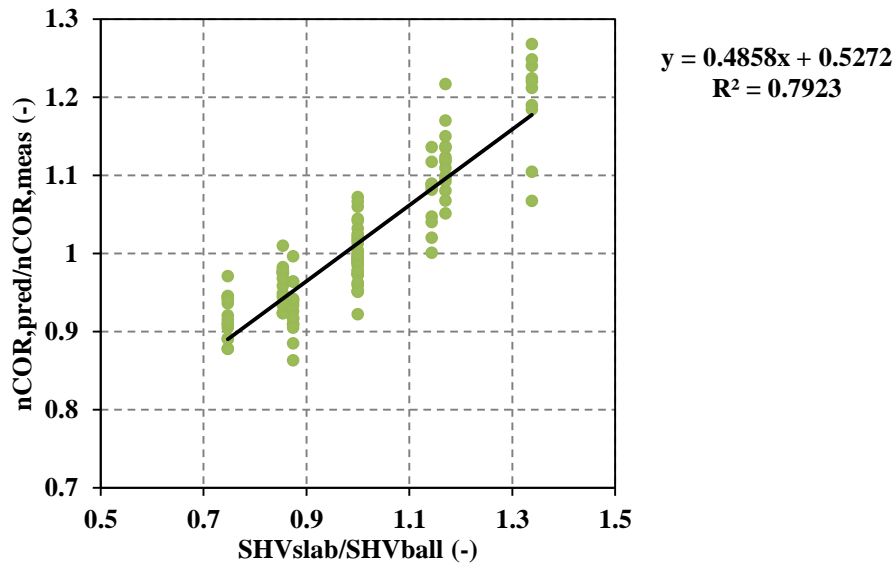
Διάγραμμα 7.15 Γραφική σύγκριση των τιμών που προβλέπει το μοντέλο συναρτήσει των πειραματικών αποτελεσμάτων.

Από το παραπάνω διάγραμμα διαπιστώνουμε ότι το μοντέλο προβλέπει ικανοποιητικά την αναπήδηση στην περίπτωση που υλικό τεμάχους και επιφάνειας πρόσκρουσης συμπίπτουν, κάτι αναμενόμενο καθώς έχει προκύψει από τέτοια δεδομένα. Όμως υπερεκτιμά την αναπήδηση στην περίπτωση που η σκληρότητα της βάσης είναι μεγαλύτερη και αντιθέτως την υποτιμά όταν η σκληρότητα της βάσης είναι μικρότερη.

Επομένως, παρά το γεγονός ότι η διαφορά των συντελεστών των δύο σκληροτήτων, βάσης και δοκιμίου, στη συσχέτιση που έγινε προηγουμένως είναι μικρή, η διαφοροποίηση αυτή θα πρέπει να ληφθεί υπόψη στο μοντέλο που έχει προταθεί το οποίο αφορά περιπτώσεις ρίψεων δοκιμίων πάνω σε βάσεις ίδιου υλικού. Γι' αυτό το σκοπό, θα προσπαθήσουμε να γενικεύσουμε το μοντέλο ώστε να ανταποκρίνεται και σε περιπτώσεις διαφοροποίησης των υλικών τεμάχους και επιφάνειας πρόσκρουσης.

Θα συμπεριληφθεί, λοιπόν, στο μοντέλο ένας διορθωτικός συντελεστής ο οποίος να προσαρμόζει την πρόβλεψη σε περίπτωση διαφοροποίησης των υλικών.

Αν, τώρα, συμπεριλάβουμε τον λόγο των δύο συντελεστών, από την πρόβλεψη και την μέτρηση, και τον λόγο των σκληροτήτων, δοκιμίου και βάσης πρόσκρουσης, σε ένα ενιαίο διάγραμμα παρατηρούμε τα εξής:



Διάγραμμα 7.16 Σχέση μεταξύ του λόγου των συντελεστών αναπήδησης , πρόβλεψης και μέτρησης, συναρτήσεως του λόγου σκληροτήτων, βάσης και δοκιμίου.

Η διαφορά στην τιμή πρόβλεψης που δίνει το μοντέλο σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα και εκφράζεται ποιοτικά μέσω του λόγου των δύο συντελεστών σχετίζεται γραμμικά με τον λόγο των σκληροτήτων των υλικών μέσω της εξίσωσης:

$$\frac{n_{COR,pre}}{n_{COR,meas}} = 0,4858 \frac{R_{slab}}{R_{ball}} + 0,5272 \quad (7.9)$$

Δηλαδή,

$$n_{COR,pre} = \left(0,4858 \frac{R_{slab}}{R_{ball}} + 0,5272 \right) \cdot n_{COR,meas} \quad (7.10)$$

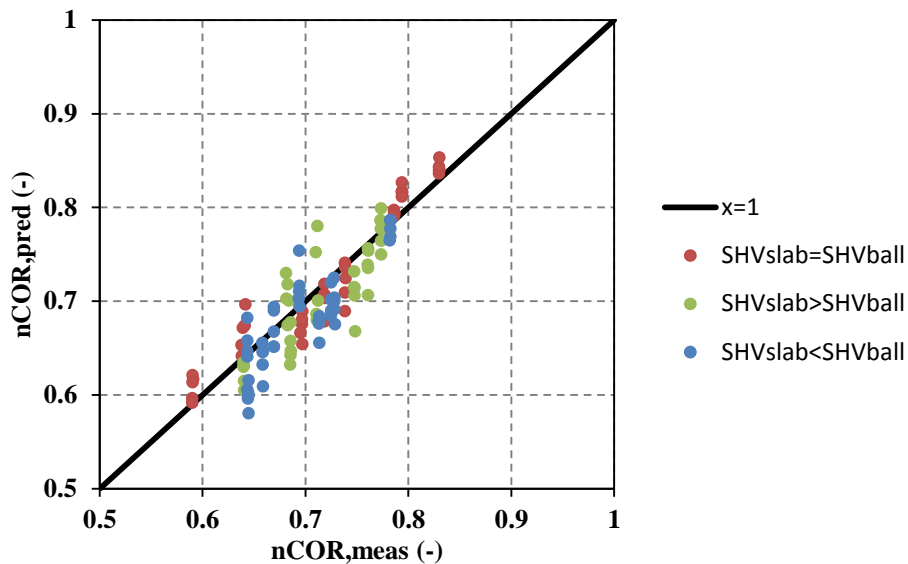
Επομένως, ο διορθωτικός συντελεστής, παίρνει την μορφή:

$$A = 0,4858 \frac{R_{slab}}{R_{ball}} + 0,5272 \quad (7.11)$$

ή απλουστευτικά:

$$A = \frac{R_{slab}}{2 \cdot R_{ball}} + 0,5 \quad (7.12)$$

Με την εφαρμογή του διορθωτικού συντελεστή στα αποτελέσματα της πρόβλεψης για όλες τις ελεύθερες ρίψεις το διάγραμμα σύγκρισης των συντελεστών αναπήδησης της πειραματικής μεθόδου και του μοντέλου πρόβλεψης παίρνει την παρακάτω μορφή:

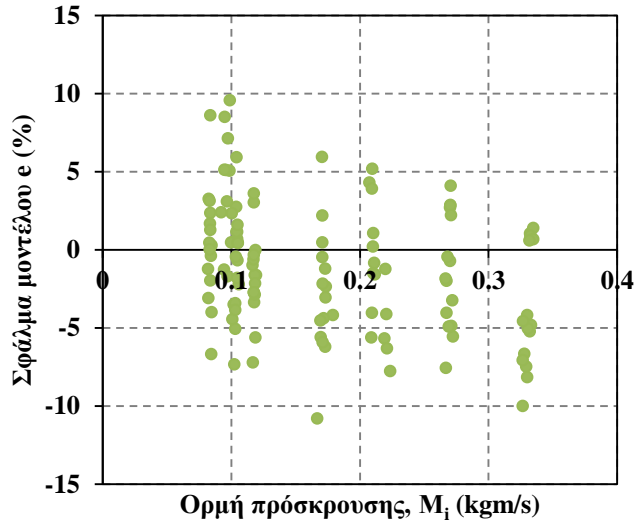


Διάγραμμα 7.17 Γραφική σύγκριση των τιμών που προβλέπει το μοντέλο συναρτήσει των πειραματικών αποτελεσμάτων μετά την προσθήκη του διορθωτικού συντελεστή.

Πλέον, με την προσθήκη του διορθωτικού συντελεστή η διαφορά μεταξύ του συντελεστή πρόβλεψης και του συντελεστή που μετρήθηκε μέσω της πειραματικής μεθόδου είναι πολύ μικρή.

7.1.2.3 Προσδιορισμός σφάλματος του διορθωμένου μοντέλου στον υπολογισμό του κάθετου συντελεστή αναπήδησης

Το σφάλμα του διορθωμένου μοντέλου θα προσδιοριστεί μέσω της σχέσης (7.5) και αναπαρίσταται γραφικά συναρτήσει της ορμής πρόσκρουσης παρακάτω:



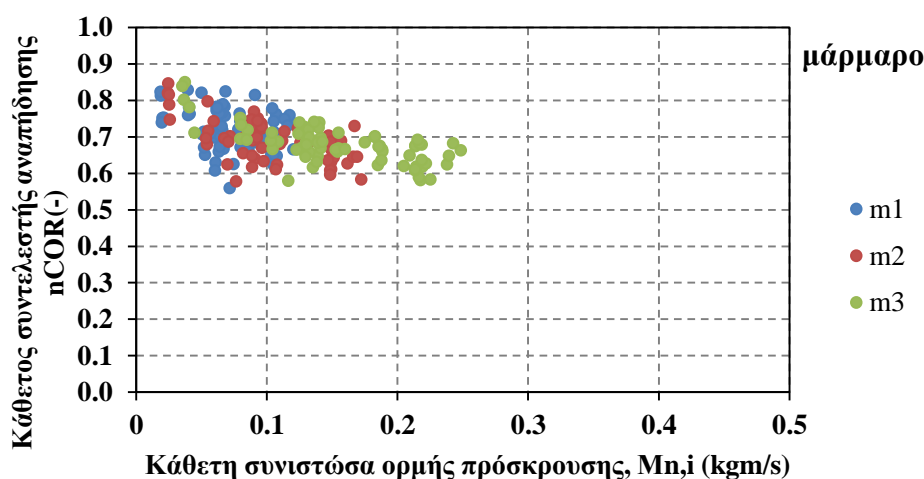
Διάγραμμα 7.18 Το σφάλμα του διορθωμένου μοντέλου συναρτίζεται των τιμών ορμής πρόσκρουση που αναπτύχθηκαν στο εργαστήριο.

Παρατηρούμε, λοιπόν, ότι το σφάλμα κυμαίνεται κυρίως μεταξύ των τιμών $\pm 5\%$ ενώ σε λίγες περιπτώσεις φτάνει το $\pm 10\%$. Το ποσοστό αυτό είναι πολύ μικρό και μπορούμε με ασφάλεια να συμπεράνουμε ότι το διορθωμένο μοντέλο είναι αντιπροσωπευτικό για όλες τις δοκιμές ελεύθερης πτώσης, είτε αυτές αφορούν ρίψεις σε βάσεις ίδιου υλικού, είτε ρίψεις όπου υλικό δοκιμίου και βάσης διαφοροποιείται.

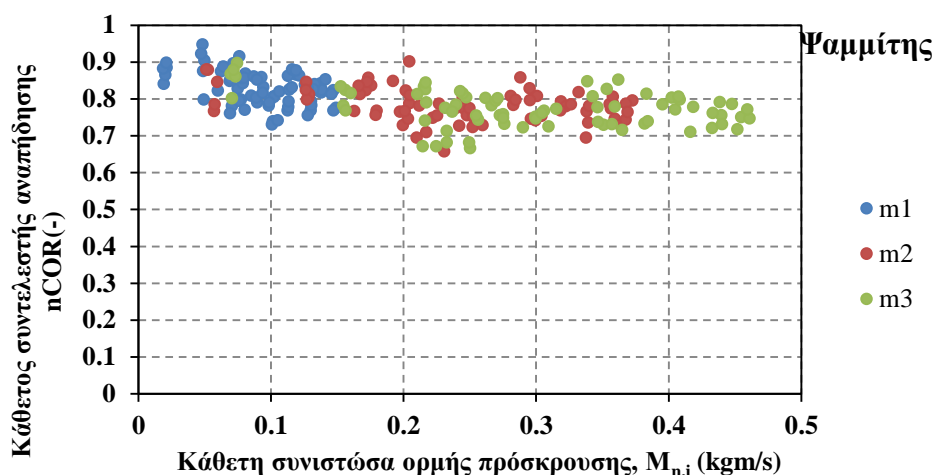
7.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων παραβολικών ρίψεων

Όπως προαναφέρθηκε, το μοντέλο που αναπτύχθηκε στην προηγούμενη παράγραφο αφορά την περίπτωση ελεύθερων ρίψεων. Ωστόσο, η ελεύθερη πτώση αποτελεί μία ιδανική περίπτωση που δεν συναντάται στην φύση. Πρέπει, λοιπόν, να διαπιστώσουμε κατά πόσον το μοντέλο αυτό μπορεί να εφαρμοσθεί και στην περίπτωση παραβολικής τροχιάς. Γι' αυτό τον λόγο, θα γίνει έλεγχος του μοντέλου που προέκυψε από τις δοκιμές ελεύθερης πτώσης για τα αποτελέσματα από την ανάλυση των παραβολικών δοκιμών. Προφανώς, ο έλεγχος του μοντέλου θα γίνει για την περίπτωση της κάθετης συνιστώσας της ορμής πρόσκρουσης $M_{n,i}$ και θα αφορά τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης $nCOR$.

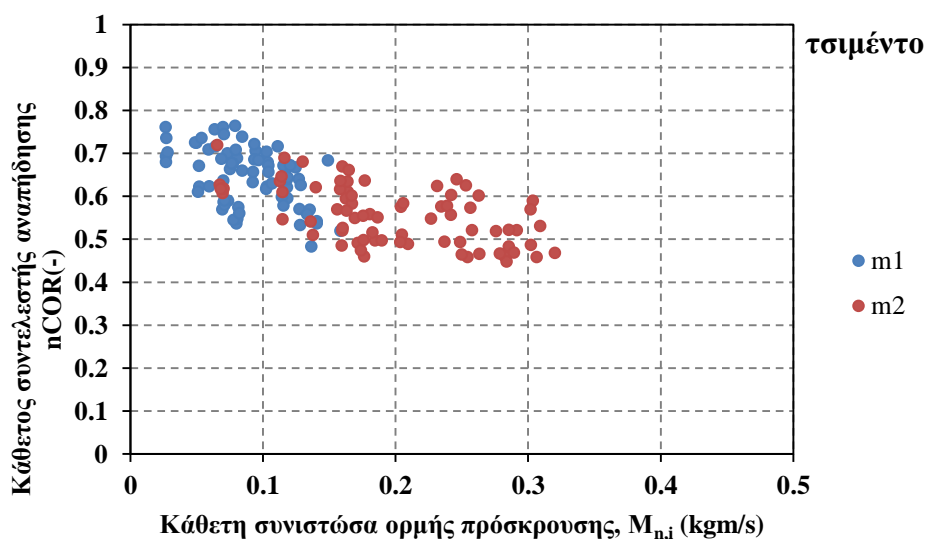
Στο σημείο αυτό παρατίθενται οι τιμές των κάθετων συντελεστών αναπήδησης συναρτήσει της ορμής πρόσκρουσης που ανέπτυξαν τα δοκίμια των τριών υλικών όπως προέκυψαν από την επεξεργασία των δοκιμών παραβολικών ρίψεων:



Διάγραμμα 7.19 Τιμές του κάθετου συντελεστή αναπήδησης $nCOR$ (αδιάστατο μέγεθος) συναρτήσει της ορμής πρόσκρουσης $M_{n,i}$ (kgm/s) που ανέπτυξαν τα δοκίμια μαρμάρου.

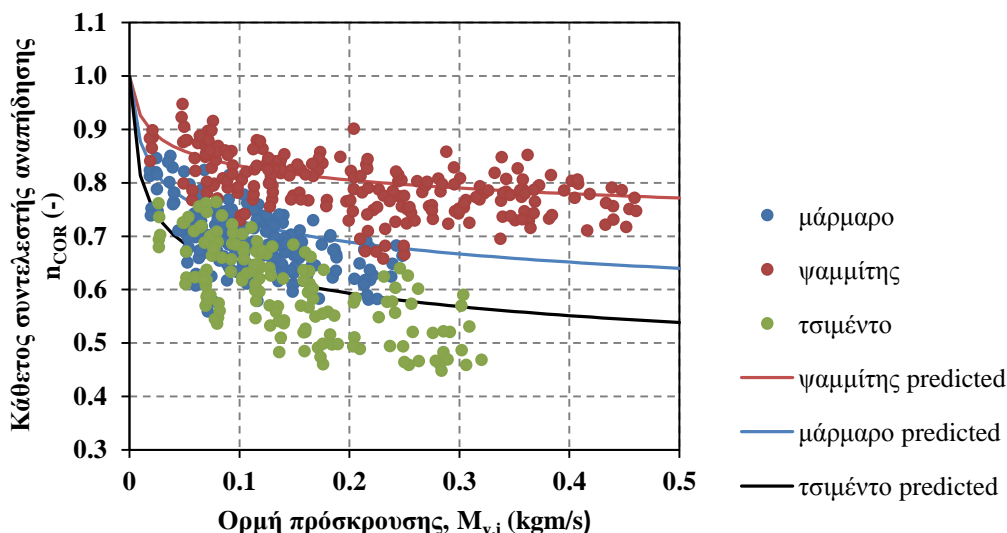


Διάγραμμα 7.20 Τιμές του κάθετου συντελεστή αναπήδησης nCOR (αδιάστατο μέγεθος) συναρτήσει της ορμής πρόσκρουσης $M_{n,i}$ (kgm/s) που ανέπτυξαν τα δοκίμια ψαμμίτη.



Διάγραμμα 7.21 Τιμές του κάθετου συντελεστή αναπήδησης nCOR (αδιάστατο μέγεθος) συναρτήσει της ορμής πρόσκρουσης $M_{n,i}$ (kgm/s) που ανέπτυξαν τα δοκίμια τσιμέντου.

Για να διαπιστωθεί κατά πόσον το μοντέλο που αναπτύχθηκε μπορεί να εφαρμοσθεί και στην περίπτωση παραβολικών ρίψεων προβάλλονται, στο διάγραμμα 17, τα σημεία από την διερεύνηση με τις δοκιμές παραβολικής ρίψης και οι προβλέψεις του μοντέλου.



Διάγραμμα 7.22 Τα αποτελέσματα των πειραμάτων παραβολικής ρίψης για τα τρία υλικά (σημεία) και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του μοντέλου για τυχαίες τιμές ορμής πρόσκρουσης (γραμμές τάσης).

Από την γραφική σύγκριση των αποτελεσμάτων διαπιστώνουμε ότι το μοντέλο που αναπτύχθηκε για την περίπτωση ελεύθερης πτώσης είναι αντιπροσωπευτικό και στην περίπτωση των παραβολικών ρίψεων, εφόσον χρησιμοποιηθεί η κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας. Συνεπώς, η σχέση παίρνει την ακόλουθη τελική μορφή, με τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης αντί του κινηματικού:

$$nCOR = (0,0218SHV - 0,2276)M_{n,i}^{(-0,0052SHV + 0,2792)} \quad (7.13)$$

Όπου:

$nCOR$ (-), ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης,

SHV (-), η σκληρότητα του τεμάχους αποκόλλησης, και

$M_{n,i}$ (kgm/s), η κάθετη συνιστώσα της ορμής πρόσκρουσης του τεμάχους.

Η σχέση αυτή καθιστά τον προσδιορισμό των κάθετων συντελεστών αναπήδησης ιδιαίτερα απλό καθώς τόσο η σκληρότητα, όσο και η ορμή του τεμάχους πρόσκρουσης είναι δύο εύκολα υπολογίσιμα μεγέθη.

7.2.1 Προσδιορισμός σφάλματος του μοντέλου στον υπολογισμό του κάθετου συντελεστή αναπήδησης στην περίπτωση των παραβολικών ρίψεων

Στην παράγραφο αυτή προσδιορίζεται το σφάλμα του μοντέλου στον υπολογισμό της κάθετης συνιστώσας του συντελεστή αναπήδησης στην περίπτωση των παραβολικών ρίψεων μέσω της σχέσης:

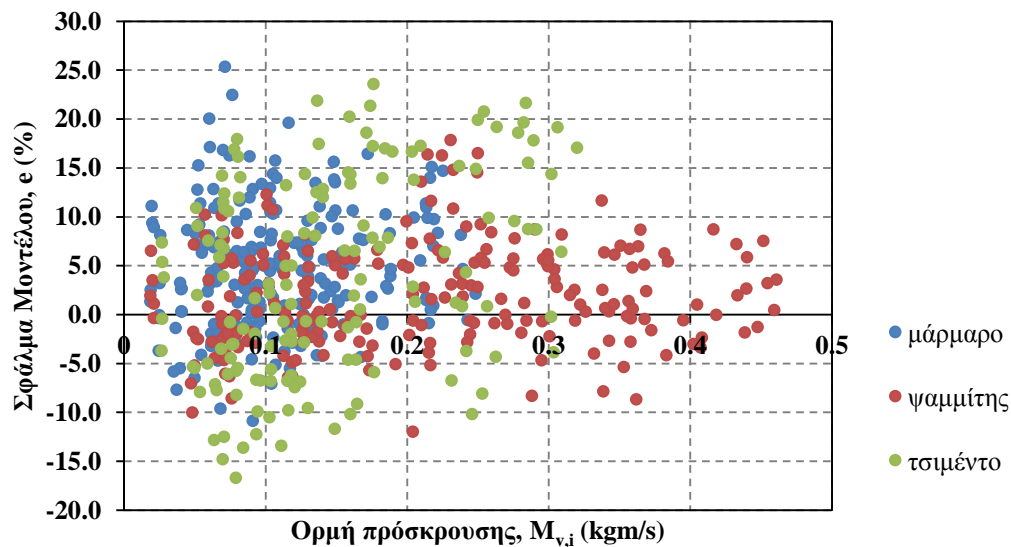
$$error = \frac{n_{COR,pred} - n_{COR,meas}}{n_{COR,pred}} * 100\% \quad (7.14)$$

Όπου

$n_{COR,pred}$, η κάθετη συνιστώσα του συντελεστή αναπήδησης που προβλέπει το μοντέλο, και

$n_{COR,meas}$, η κάθετη συνιστώσα του συντελεστή αναπήδησης που προέκυψε πειραματικά.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται γραφικά στο παρακάτω διάγραμμα:



Διάγραμμα 7.23 Το σφάλμα του μοντέλου για τις δοκιμές παραβολικών ρίψεων συναρτήσει των ορμών πρόσκρουσης που αναπτύχθηκαν κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων.

Για αυτή τη σειρά πειραμάτων το σφάλμα χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη ομοιομορφία αλλά η τιμή του αυξάνεται. Περιορίζεται κυρίως στο $\pm 10\%$, ωστόσο για ορισμένες τιμές ορμής φτάνει και το 25%. Η αύξηση αυτή στο ποσοστό του σφάλματος είναι λογική και αναμενόμενη καθώς στην περίπτωση των κεκλιμένων πτώσεων μετέχουν και επιπρόσθετοι παράγοντες που καθορίζουν την αναπήδηση, οι

οποίοι δεν έχουν ληφθεί υπόψη στην ανάλυση του μοντέλου, όπως για παράδειγμα η γωνιακή ταχύτητα. Ωστόσο, και πάλι δεν θεωρείται τόσο σημαντικό ώστε να καθιστά το μοντέλο αναξιόπιστο.

Επομένως, διαπιστώνουμε ότι το μοντέλο προβλέπει με ικανοποιητική ακρίβεια τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζοντας μία συντηρητική τάση, δεδομένου ότι η μέση τιμή του σφάλματος είναι μετατοπισμένη προς τα θετικά, που συνεπάγεται ότι προβλέπει μεγαλύτερους συντελεστές αναπήδησης από αυτούς που παρατηρήθηκαν.

8 ΣΥΝΟΨΗ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται συνοπτικά η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Εν συνεχεία, διατυπώνονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Τέλος, παρατίθενται ορισμένες προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

8.1 Πειραματική διαδικασία

Πραγματοποιήθηκαν τρεις σειρές δοκιμών:

- **1^η Σειρά δοκιμών:**
 - **Περιγραφή:** Δοκιμές ελεύθερης ρίψης με ίδιο υλικό σφαιρικού δοκιμίου και βάσης πρόσκρουσης.
 - **Σκοπός:** Διερεύνηση της επίδρασης των κινηματικών χαρακτηριστικών στον συντελεστή αναπήδησης V_{COR} . Στην περίπτωση της ελεύθερης ρίψης δεν έχει νόημα ο διαχωρισμός του συντελεστή σε συνιστώσες αφού ο επαπτομενικός δεν ορίζεται.
- **2^η Σειρά δοκιμών:**
 - **Περιγραφή:** Δοκιμές ελεύθερης ρίψης με διαφορετικό υλικό σφαιρικού δοκιμίου και βάσης πρόσκρουσης.
 - **Σκοπός:** Διερεύνηση της επίδρασης της διαφοροποίησης των ιδιοτήτων των υλικών, τεμάχους και βάσης πρόσκρουσης, στον συντελεστή αναπήδησης.
- **3^η Σειρά δοκιμών**
 - **Περιγραφή:** Δοκιμές παραβολικής ρίψης με ίδιο υλικό σφαιρικού δοκιμίου και βάσης πρόσκρουσης.
 - **Σκοπός:** Διερεύνηση της επίδρασης των κινηματικών χαρακτηριστικών στην κάθετη συνιστώσα του συντελεστή αναπήδησης $nCOR$.

8.2 Συμπεράσματα

8.2.1 Δοκιμές ελεύθερης πτώσης με ίδιο υλικό σφαιρικού δοκιμίου και βάσης πρόσκρουσης

Από την πρώτη σειρά δοκιμών διαπιστώθηκε ο καταλυτικός ρόλος της μάζας και ταχύτητας στην αναπήδηση. Επομένως, οι μεθοδολογίες που έχουν προταθεί μέχρι σήμερα για την προσαρμογή των συντελεστών αναπήδησης δεν περιγράφουν ικανοποιητικά το φαινόμενο αφού δεν λαμβάνουν υπόψη την μάζα του τεμάχους. Συνεπώς, χρειάζεται ένα νέο μοντέλο που να λαμβάνει υπόψη τόσο τις ιδιότητες των υλικών, που μέχρι σήμερα θεωρούνταν ο πρωταρχικός παράγοντας στην αναπήδηση, όσο και τα χαρακτηριστικά πρόσκρουσης. Για να μπορούν να συνδυαστούν οι δύο ανεξάρτητοι παράγοντες, μάζα και ταχύτητα, σε μία κοινή σχέση χρησιμοποιείται το μέγεθος της ορμής, που συνδέει απευθείας τη μάζα του υλικού με την ταχύτητα που αναπτύσσει, και περιγράφει την σφοδρότητα της κρούσης. Παράλληλα, στο νέο μοντέλο θα πρέπει να συμπεριληφθεί και η επιρροή των ιδιοτήτων των υλικών και

συγκεκριμένα η ιδιότητα της σκληρότητας, η οποία έχει αποδειχθεί σε προηγούμενη έρευνα (Asteriou et al., 2013) ως η καθοριστική ιδιότητα που ελέγχει την αναπήδηση. Από τον συνδυασμό των παραπάνω, καταλήξαμε σε μία σχέση της μορφής:

$$V_{COR} = (0,0218SHV - 0,2276)M_i^{(0,0052SHV - 0,2792)}$$

Όπου:

V_{COR} (-), ο συντελεστής αναπήδησης σε περίπτωση ελεύθερης πτώσης,

SHV (-), η σκληρότητα του υλικού, και

M_i (kgm/s), η ορμή πρόσκρουσης του τεμάχους.

Από τον προσδιορισμό του σφάλματος της σχέσης διαπιστώθηκε ότι εκφράζει ικανοποιητικά την αναπήδηση σε περίπτωση που το σφαιρίδιο και η βάση πρόσκρουσης είναι από όμοιο υλικό.

8.2.2 . Δοκιμές ελεύθερης πτώσης με διαφορετικό υλικό σφαιρικού δοκιμίου και βάσης πρόσκρουσης

Όπως προαναφέρθηκε, το μοντέλο που προέκυψε από την πρώτη σειρά δοκιμών είναι αντιπροσωπευτικό σε περίπτωση που το τέμαχος και η επιφάνεια πρόσκρουσης δεν διαφέρουν ως προς τις ιδιότητες των υλικών τους. Επομένως, πρέπει να γενικευθεί το μοντέλο ώστε να περιγράφει και τα αποτελέσματα της αναπήδησης στην περίπτωση που το τέμαχος διαφοροποιείται από την επιφάνεια πρόσκρουσης.

Για να επιτευχθεί αυτή η γενίκευση του μοντέλου, πρέπει πρώτα να διαπιστωθεί πως επηρεάζεται ο συντελεστής αναπήδησης από την διαφοροποίηση των σκληροτήτων, βάσης και δοκιμίου. Μία τέτοια προσπάθεια προσέγγισης είχε γίνει και στο παρελθόν από τους Richards et al.(2001) (βλ. σχέση 3.3). Αρχικά, λοιπόν, έγινε μία σύγκριση με τη σχέση αυτή. Από την επεξεργασία όλων των δοκιμών ελεύθερων πτώσεων διαπιστώθηκε ότι, πράγματι, ποσοτικά οι σκληρότητες της βάσης και του σφαιριδίου επηρεάζουν διαφορετικά την αναπήδηση. Ωστόσο, για να συσχετιστεί ικανοποιητικά ο συντελεστής αναπήδησης με τις σκληρότητες των υλικών χρειάζεται και ένας πρόσθετος όρος, αυτός της ορμής ο οποίος, όμως, δεν λαμβάνεται υπόψη στη συσχέτιση των Richards et al. Τελικά, προέκυψε η παρακάτω έκφραση συσχέτισης της κάθετης συνιστώσας του συντελεστή αναπήδησης με τις σκληρότητες των υλικών βάσης και δοκιμίου και της ορμής πρόσκρουσης:

$$n_{COR} = 0,080 + 0,0089R_{slab} + 0,0087R_{ball} - 0,4M$$

Όπου:

$n_{COR} (-)$, η κάθετη συνιστώσα του συντελεστή αναπήδησης V_{COR} ,

$R_{slab} (-)$, η σκληρότητα του υλικού της επιφάνειας πρόσκρουσης,

$R_{ball} (-)$, η σκληρότητα του υλικού του τεμάχους πρόσκρουσης, και

M (kgm/s), η ορμή του τεμάχους πρόσκρουσης.

Συνεπώς, στο σημείο αυτό, επιβεβαιώνεται το συμπέρασμα της σημαντικής επίδρασης των κινηματικών χαρακτηριστικών στην αναπήδηση που εξήχθη από την πρώτη σειρά δοκιμών. Ταυτόχρονα, επιβεβαιώνεται η αρχική υπόθεση ότι στην αναπήδηση το ποσοστό της επίδρασης των ιδιοτήτων βάσης και δοκιμίου είναι διαφορετικό και συνεπώς θα πρέπει αυτή η διαφοροποίηση να λαμβάνεται υπόψη στο μοντέλο. Χρειάζεται, λοιπόν, ένας διορθωτικός συντελεστής ο οποίος να προσαρμόζει το μοντέλο στην περίπτωση αυτή. Από την γραφική απεικόνιση των λόγων των κάθετων συντελεστών αναπήδησης που προέκυψαν από το μοντέλο ως προς τους αντίστοιχους που προέκυψαν από τις μετρήσεις συναρτήσει του λόγου των σκληροτήτων των βάσεων ως προς τις αντίστοιχες των δοκιμίων διαπιστώθηκε ότι η σχέση μεταξύ των δύο λόγων εκφράζεται από την παρακάτω γραμμική σχέση:

$$\frac{n_{COR,pre}}{n_{COR,meas}} = 0,4858 \frac{R_{slab}}{R_{ball}} + 0,5272$$

Συνεπώς, ο διορθωτικός συντελεστής παίρνει απλουστευτικά την μορφή:

$$A = \frac{R_{slab}}{2 \cdot R_{ball}} + 0,5$$

Πλέον με την εφαρμογή του παραπάνω συντελεστή, το διορθωμένο μοντέλο μπορεί να εκτιμήσει τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης τόσο στην περίπτωση της πρώτης σειράς δοκιμών, όσο και στην περίπτωση της δεύτερης σειράς δοκιμών και το σφάλμα του να παραμένει σε πολύ μικρά ποσοστά.

8.2.3 Δοκιμές παραβολικών ρίψεων

Η ελεύθερη πτώση αποτελεί μία ιδανική περίπτωση που σπάνια συναντάται στη φύση. Συνεπώς, πρέπει να διαπιστωθεί πόσο εφαρμόσιμο είναι το μοντέλο στην περίπτωση παραβολικής τροχιάς. Γι' αυτό τον λόγο, έγινε ο έλεγχος του μοντέλου με τα αποτελέσματα των παραβολικών ρίψεων. Προφανώς, επειδή το μοντέλο αφορά την κάθετη συνιστώσα του συντελεστή, ο έλεγχος γίνεται για τις τιμές της κάθετης συνιστώσας της ορμής. Από τον έλεγχο προέκυψε ότι το μοντέλο είναι

αντιπροσωπευτικό και στην περίπτωση των παραβολικών ρίψεων. Μπορεί το σφάλμα να λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές, ωστόσο, αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι δεν έχουν ληφθεί υπόψη επιπρόσθετοι παράγοντες, όπως η γωνιακή ταχύτητα. Παρόλα αυτά, το γεγονός αυτό δεν το καθιστά αναξιόπιστο. Αντίθετως, προβλέπει με ικανοποιητική ακρίβεια τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζοντας μία συντηρητική τάση. Πλέον, το μοντέλο γενικεύεται ώστε να μπορεί να προβλέπει την κάθετη συνιστώσα του συντελεστή αναπήδησης και στην περίπτωση των παραβολικών ρίψεων παίρνει την τελική μορφή:

$$nCOR = (0,0218SHV - 0,2276)M_{n,i}^{(-0,0052SHV + 0,2792)}$$

Όπου:

$nCOR$ (-), ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης,

SHV (-), η σκληρότητα του τεμάχους αποκόλλησης, και

$M_{n,i}$ (kgm/s), η κάθετη συνιστώσα της ορμής πρόσκρουσης του τεμάχους.

Με την εφαρμογή του παραπάνω μοντέλου, ο προσδιορισμός του κάθετου συντελεστή αναπήδησης είναι εύκολος αφού τόσο οι σκληρότητες των υλικών όσο και η ορμή του τεμάχους πρόσκρουσης είναι εύκολα υπολογίσιμα μεγέθη.

8.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η αναπήδηση αποτελεί ένα πολυπαραμετρικό φαινόμενο με αποτέλεσμα η απόδοση μιας ακριβούς μαθηματικής έκφρασης που να την προβλέπει να είναι πρακτικά ανέφικτη. Στην παρούσα έρευνα, με την βοήθεια λογικών παραδοχών και αξιόλογων συμπερασμάτων που είχαν προκύψει από προηγούμενες έρευνας επιτεύχθηκε η έκφραση ενός μοντέλου που να περιγράφει αξιόπιστα το φαινόμενο. Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν είναι καθοριστικά, αποσαφηνίζοντας παρελθοντικές ασάφειες όσον αφορά τις παραμέτρους που επηρεάζουν το φαινόμενο.

Ωστόσο, υπάρχουν πολλά πεδία διερεύνησης ακόμα. Ο κώδικας επεξεργασίας μπορεί να βελτιωθεί λαμβάνοντας υπόψη και την περιστροφή του τεμάχους ώστε να μπορεί να υπολογίζει πέρα από την ταχύτητα πρόσκρουσης και την γωνιακή ταχύτητά του. Ο συνυπολογισμός του μεγέθους της γωνιακής ταχύτητας στο μοντέλο μπορεί να επιφέρει σημαντικές διαφοροποιήσεις και μία ακόμα πιο ρεαλιστική πρόβλεψη της αναπήδησης.

Επιπλέον, στην παρούσα έρευνα δεν έχει γίνει αναφορά στον εφαιτομενικό συντελεστή αναπήδησης. Παρ' όλο που πραγματοποιήθηκαν δοκιμές παραβολικής ρίψης όπου ο μηχανισμός αντίστασης και διάχυσης ενέργειας διαφέρει ανά κατεύθυνση η παρούσα έρευνα επικεντρώθηκε μόνο στην κάθετη συνιστώσα του συντελεστή αναπήδησης. Πρέπει να διερευνηθεί, λοιπόν, η επιρροή των κινηματικών

χαρακτηριστικών και στην εφαπτομενική συνιστώσα του συντελεστή, προαπαιτούμενο της οποίας είναι ο προσδιορισμός της γωνιακής ταχύτητας

Τέλος, με γνωστά τα μοντέλα πρόβλεψης και για τις δύο συνιστώσες, μπορεί να ακολουθήσει περαιτέρω σύγκριση των δύο συντελεστών ως προς τις τιμές που λαμβάνουν και ως προς την επίδραση που μπορεί να έχουν σε αυτές μεταβολές στις ιδιότητες των υλικών.

9 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ansari MK, Ahmad M, Singh R, Singh TN (2012) Rockfall assessment near Saptashrunji Gad temple, Nashik, Maharashtra, India International Journal of Disaster Risk Reduction 2:77-83 doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijdrr.2012.09.002>

Asteriou P, Saroglou H, Tsiambaos G (2013a) Rockfall: Scaling Factors for the Coefficient of Restitution Proceedings of EUROCK2013 - The 2013 ISRM International Symposium:195-200

Asteriou P, Saroglou H, Tsiambaos G (2013b) Rockfalls: Influence of Rock Hardness on the Trajectory of Falling rock Blocks Bulletin of the Geological Society of Greece XLVII

Azzoni A, Rossi PP, Drigo E, Giani GP, Zaninetti A (1992) In situ observation of rockfall analysis parameters Landslides, Proceedings of the 6th International Symposium on Landslides in Christchurch 1:307-314

Bourrier F, Hungr O (2011) Rockfall Dynamics: a Critical Review of Collision and Rebound Models. In: Lambert S, Nicot F (eds) Rockfall Engineering. Wiley - ISTE, Hoboken, NJ - London,

Bozzolo D, Pamini R (1986) Simulation of rock falls down a valley side Acta Mechanica 63:113-130 doi:[10.1007/BF01182543](https://doi.org/10.1007/BF01182543)

Budetta P, Santo A (1994) Morphostructural evolution and related kinematics of rockfalls in Campania (southern Italy): A case study Engineering Geology 36:197-210

Cagnoli B, Manga M (2003) Pumice-pumice collisions and the effect of the impact angle Geophysical Research Letters 30:38-31

Canny J (1986) COMPUTATIONAL APPROACH TO EDGE DETECTION IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence PAMI-8:679-698

Chau KT, Wong RHC, Liu J, Wu JJ, Lee CF Shape effects on the coefficient of restitution during rockfall impacts. In, 1999. pp 541-544

Chau KT, Wong RHC, Wu JJ (2002) Coefficient of restitution and rotational motions of rockfall impacts International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 39:69-77 doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S1365-1609\(02\)00016-3](http://dx.doi.org/10.1016/S1365-1609(02)00016-3)

Descoedres F, Zimmermann T (1987) Three-dimensional dynamic calculation of rockfalls Proc 6th Congress International Society for Rock Mechanics, Montreal, 1987 Vol 1:337-342

Dorren LKA, Berger F, Putters US (2006) Real-size experiments and 3-D simulation of rockfall on forested and non-forested slopes *Natural Hazards and Earth System Science* 6:145-153 doi:10.5194/nhess-6-145-2006

Dorren LKA, Maier B, Putters US, Seijmonsbergen AC (2004) Combining field and modelling techniques to assess rockfall dynamics on a protection forest hillslope in the European Alps *Geomorphology* 57:151-167 doi:10.1016/S0169-555X(03)00100-4

Fornaro M, Peila D, Nebbia M (1990) Block falls on rock slopes-application of a numerical simulation program to some real cases *Int Congress IAEG*:2173-2180

Gerber W (2001) Guideline for the approval of rockfall protection kits Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL) and the Swiss Federal Research Institute

Giacomini A, Thoeni K, Lambert C, Booth S, Sloan SW (2012) Experimental study on rockfall drapery systems for open pit highwalls *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 56:171-181

Giani GP (1992) *Rock Slope Stability Analysis*.

Giani GP, Giacomini A, Migliazza M, Segalini A (2004) Experimental and theoretical studies to improve rock fall analysis and protection work design *Rock Mechanics and Rock Engineering* 37:369-389 doi:10.1007/s00603-004-0027-2

Habib P (1977) Note sur le rebondissement des blocs rocheux *Proceedings of the Meeting on Rockfall Dynamics and Protective Works Effectiveness*:25-38

Heidenreich B (2004) Small- and half-scale experimental studies of rockfall impacts on sandy slopes. EPFL

Hoek E (1987) Rockfall: A computer program for prediction rockfall trajectories *ISRM News J* 2:4-16

Hoek E (2000) *Analysis of rockfall hazards*.

Hungr O, Evans SG (1988) Engineering evaluation of fragmental rockfall hazards *Landslides Proc 5th symposium, Lausanne, 1988 Vol 1*:685-690

Hungr O, Evans SG (1996) Rock avalanche runout prediction using a dynamic model *Proceedings of the 7th International Symposium on Landslides* 1:233-238

ISRM (2007) *The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006*

Johnson KL (1985) *Contact Mechanics*. Cambridge University Press, UK

Kamijo A, Onda S, Masuya H, Tanaka Y (2000) Fundamental test on restitution coefficient and frictional coefficient of rock fall 5th Symposium on Impact Problems in Civil Engineering:83-86

Labieuse V, Heidenreich B (2009) Half-scale experimental study of rockfall impacts on sandy slopes Natural Hazards and Earth System Science 9:1981-1993

Pfeiffer TJ, Bowen TD (1989) Computer simulation of rockfalls Bulletin - Association of Engineering Geologists 26:135-146

Pratt V (1987) DIRECT LEAST-SQUARES FITTING OF ALGEBRAIC SURFACE Computer Graphics (ACM) 21:145-152

Rammer W, Brauner M, Dorren LKA, Berger F, Lexer MJ (2010) Evaluation of a 3-D rockfall module within a forest patch model Natural Hazards and Earth System Science 10:699-711

Richards LR, Peng B, Bell DH (2001) Laboratory and field evaluation of the normal Coefficient of Restitution for rocks Proceedings of Proc ISRM Regional Symposium EUROCK2001:149-155

Ritchie AM (1963) Evaluation of rockfall and its control Highway Research Record 17:13-28

Spadari M, Giacomini A, Buzzi O, Fityus S, Giani GP (2012) In situ rockfall testing in New South Wales, Australia International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 49:84-93 doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2011.11.013>

Stevens W (1998) Rockfall: A tool for probabilistic analysis, design of remedial measures and prediction of rockfalls RocFall: A Tool for Probabilistic Analysis, Design of Remedial Measures and Prediction of Rockfalls

Topal T, Akin M, Ozden UA (2007) Assessment of rockfall hazard around Afyon Castle, Turkey Environmental Geology 53:191-200 doi:10.1007/s00254-006-0633-2

Urciuoli G (1988) Sperimentazione sulla caduta di blocchi lungo un pendio nella formazione calcareo-dolomitica della Penisola Sorrentina Proc Convegno Cartografia e Monitoraggio Dei Movimenti Franosi:35-54

Ushiro T, Shinohara S, Tanida K, Yagi N (2000) A study on the motion of rockfalls on slopes Proceedings of the 5th Symposium on Impact Problems in Civil Engineering:91-96

Wong RHC, Ho KW, Chau KT (2000) Shape and mechanical properties of slope material effects on the coefficient of restitution of rockfall study Proc Fourth North Am Rock Mech Symp:507-514

Wu S-S (1985) ROCKFALL EVALUATION BY COMPUTER SIMULATION
Transportation Research Record:1-5

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ανδριανόπουλος, Άγγελος. Εκτίμηση επικινδυνότητας και διακινδύνευσης καταπτώσεων βράχων σε πρηνή οδοποιία - η περίπτωση της κοιλάδας των Τεμπών. Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, (2011).

Αστερίου, Παύλος. Διερεύνηση Χαρακτηριστικών τροχιάς καταπτώσεων σε βραχώδη πρηνή - Επίδραση κινηματικών παραμέτρων. Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, (2011).

Ευθυμίου, Βίκτωρ. Διερεύνηση Χαρακτηριστικών τροχιάς καταπτώσεων σε βραχώδη πρηνή - Επίδραση γεωτεχνικών παραμέτρων. Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, (2011).

Πρασιανάκης, Ι. Ν., Κουρκουλής, Σ. Κ. Εργαστήρια Πειραματικής Αντοχής των Υλικών. Συμμετρία, Αθήνα (1999).

Σαρόγλου, Ι. Χ., Μπεκρή, Ε., Τσιαμπάος, Γ. Προσδιορισμός Κρίσιμων Παραμέτρων Γεωλογικών Σχηματισμών για την Προσομοίωση της Πτώσης Βραχωδών Τεμαχών σε Πρηνή. 6ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής. Βόλος (2010).

Σοφιανός, Α. Ι. Σημειώσεις Μηχανικής των Πετρωμάτων. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. (2001).