



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

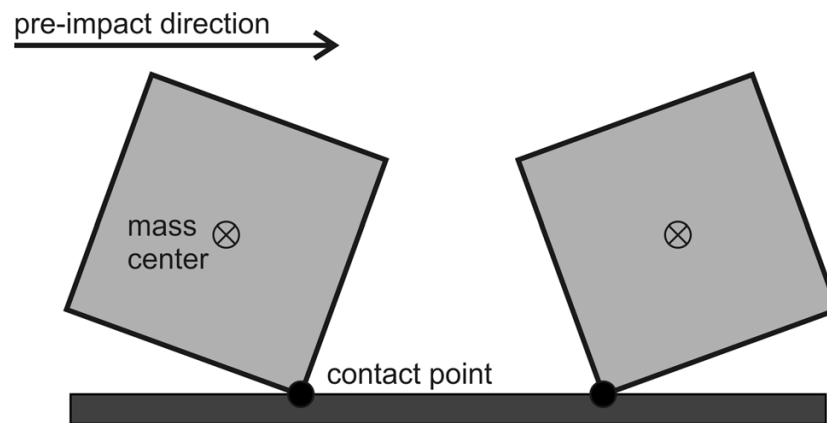
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ

Συντονίζουσα Σχολή : **Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών (ΜΜΜ)**

Συμμετέχουσα Σχολή : **Πολιτικών Μηχανικών (ΠΜ)**

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΛΕΥΡΙΚΗΣ ΕΚΤΡΟΠΗΣ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΚΙΟΥΡΤΖΙΔΗΣ ΑΛΕΞΙΟΣ

Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός ΑΠΘ (2012)

Επιβλέπων Καθηγητής

Γ. Τσιαμπάος, Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2015



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΚΙΟΥΡΤΖΙΔΗΣ ΑΛΕΞΙΟΣ

Επιβλέπων: Γ. ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ Καθηγητής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την //2015

.....

.....

.....

Γ.ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ

ΑΘΗΝΑ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2015

.....

ΓΚΙΟΥΡΤΖΙΔΗΣ ΑΛΕΞΙΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο των απαιτήσεων του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπόγειων Έργων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Κάτοχος

© 2015 - Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος - All rights reserved

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω την μεγάλη μου ευγνωμοσύνη στον επιβλέποντα καθηγητή της παρούσας διπλωματικής εργασίας Δρ. Γ.Τσιαμπάο, Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., που άμεσα ανταποκρίθηκε στο αίτημα μου για συνεργασία σε επίπεδο μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας.

Ευχαριστώ επίσης τα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς επιτροπής, τον Δρ. , Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., και τον Δρ. Γ. , Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., για το χρόνο που αφιέρωσαν στην παρούσα εργασία.

Τέλος, τις εγκάρδιες ευχαριστίες προς τον κ. Παύλο Αστερίου, Υποψήφιο Διδάκτορα της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Τομέα Γεωτεχνικής, που οι συμβουλές του ήταν ζωτικής σημασίας για την περάτωση της της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι καταπτώσεις βραχοτεμαχών (rockfalls), είναι ένα φαινόμενο που αποτελεί μια από τις σημαντικότερες κατηγορίες αστοχιών πρανών με καταστροφικά αποτελέσματα τόσο στα έργα υποδομής όσο και στις ανθρώπινες ζωές. Προκειμένου να αποφευχθούν οι επιπτώσεις αυτές του φαινομένου, κρίνεται απαραίτητη η συστηματική μελέτη του καθώς και κατάλληλη τοποθέτηση μέτρων ανάσχεσης, στις περιοχές όπου εμφανίζεται ο υψηλότερος κίνδυνος. Για την πρόβλεψη της πιθανής τροχιάς των βραχοτεμαχών έχουν αναπτυχθεί διάφορα λογισμικά, όμως παρόλη την έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί από πολλούς ερευνητές, η συμπεριφορά και η απόκριση των βραχοτεμαχών τη στιγμή της πρόσκρουσης, αλλά και η επίδραση της περιστροφικής κίνησης παραμένουν σε μεγάλο βαθμό αδιευκρίνιστα λόγω της πολυπλοκότητας του φαινομένου. Τα παραπάνω αυτά γεγονότα προκαλούν δυσκολίες στην ακριβή προσομοίωση της εκτελούμενης τροχιάς. Στην παρούσα διπλωματική εργασία εκτελέστηκαν εργαστηριακές δοκιμές αλλά και δοκιμές πεδίου μικρής κλίμακας, με σκοπό την ολοκληρωμένη προσομοίωση της τροχιάς των τεμαχών αλλά και με στόχο τον προσδιορισμό της επίδρασης του σχήματος, να γίνει συγκριτική αξιολόγηση μεταξύ των αποτελεσμάτων πεδίου και εργαστηρίου καθώς και να μελετηθεί η αποτελεσματικότητα της τριδιάστατης ανάλυσης της τροχιάς των τεμαχών πάνω στο φαινόμενο. Χρησιμοποιήθηκαν τόσο στο εργαστήριο όσο και στο πεδίο κυβικά τεμάχια για τη πραγματοποίηση των δοκιμών. Η τριδιάστατη ανάλυση επιτεύχθηκε μέσω εφαρμογής της μεθόδου της στερεοφωτογραμμετρίας, μετά από καταγραφή της τροχιάς από φωτογραφικές μηχανές υψηλής ανάλυσης. Οι συντελεστές αναπήδησης υπολογίστηκαν με εφαρμογή μαθηματικών προσεγγίσεων που έχουν αναπτυχθεί και εξετάστηκε η επίδραση διαφόρων παραγόντων όπως της κλίσης του επιπέδου πρόσκρουσης, της διεύθυνσης ρίψεως και του σχήματος του τεμάχους. Μελετήθηκε η επίδραση της περιστροφικής κίνησης στους συντελεστές αναπήδησης αλλά και της διεύθυνσης του τεμάχους πριν την κρούση σε σχέση με τη διεύθυνση του επιπέδου πρόσκρουσης, με αποτέλεσμα τη μελέτη της εκτροπής της τροχιάς. Η μέση τιμή του λόγου της περιστροφικής και μεταφορικής ενέργειας μετά την κρούση του τεμάχους προέκυψε 20% με την μέγιστη τιμή να φτάνει ακόμα και το 67%, συνεκτιμώντας τα αποτελέσματα δοκιμών πεδίου και εργαστηρίου. Με βάση τα αποτελέσματα αυτά των δοκιμών καταρτίστηκε ένα εμπειρικό μοντέλο που προβλέπει την πλευρική εκτροπή των τεμαχών.

ABSTRACT

A Rockfall is a phenomenon that is one of the most important categories of slope failures that disastrously results in both infrastructure and human lives. To avoid the impacts of this phenomenon, systematic study and proper placement of containment measures, in areas where a higher risk occurs, are deemed necessary. For the prediction of potential rock blocks trajectory, different software and equipment are developed, but despite all the research that has been performed by many researchers, the behavior and response of rock falling at the moment of impact, and the effect of the rotational movement remain highly unclear due to the complexity of the phenomenon. These events cause difficulties for the accurate simulation of the executed trajectory. In the present thesis, laboratory tests and small-scale field trials are conducted, aiming to the complete simulation of the trajectory of the pieces but but also aiming to determine the influence of the shape, and a comparative evaluation between field and laboratory results as well as to study the effectiveness of the three-dimensional trajectory analysis of the pieces on the phenomenon, was conducted. For the fulfillment of the tests, cubic pieces were used both in the laboratory and in the field. The three-dimensional analysis was accomplished by applying the method of digital stereophotogrammetry after recording the track with high-resolution cameras. Bouncing coefficients were calculated by applying developed mathematical approaches and the effect of various factors such as the gradient of the impact level, the direction of the dropping and shape of the piece was examined. The effect of the rotational movement on the rebound factors was also studied, as well as the address of the piece before the impact with respect to the direction of the collision plane, therefore studying the dispersion of the track. The average value of the ratio of the rotational to the translational energy after the impact of the block is 20%, with the maximum value reaching even 67%, taking into account the results of field and laboratory trials. Based on these trial results an empirical model that predicts the lateral dispersion of the pieces was established.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	vi
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	vii
ABSTRACT.....	viii
1.Εισαγωγή.....	1
1.1. Γενικά Στοιχεία.....	1
1.2. Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας.....	2
1.3. Δομή της Διπλωματικής Εργασίας.....	3
2. Θεωρητικό Υπόβαθρο.....	4
2.1. Γενικά Στοιχεία Καταπτώσεων Βράχων.....	4
2.2. Μέθοδοι Μελέτης Καταπτώσεων Βράχων.....	6
2.2.1. Ανάστροφες αναλύσεις.....	6
2.2.2. Επί Τόπου Δοκιμές.....	6
2.2.3. Εργαστηριακές Δοκιμές.....	6
2.2.4. Υπολογιστικά Προγράμματα.....	7
2.3. Μαθηματική Προσέγγιση Φαινομένου Καταπτώσεων Βράχων.....	8
2.3.1. Μελέτη Τροχιάς.....	8
2.3.2. Μαθηματική Προσέγγιση Φαινομένου Αναπήδησης.....	18
2.3.3. Συντελεστής Περιστροφής.....	28
2.3.4. Μείωση Ταχύτητας Τεμαχών κατά την Κατάπτωση.....	29
2.3.5. Ζώνη Απόθεσης.....	30
2.4. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση Δοκιμών Καταπτώσεων με Τριδιάστατη Ανάλυση Τροχιάς.....	31
3. Πειραματική Διερεύνηση.....	46
3.1. Στόχοι Διερεύνησης.....	46
3.2. Διάταξη Εργαστηρίου.....	46

3.2.1. Επιλογή Σχήματος Δοκιμίων.....	49
3.2.2. Επιλογή Υλικού Δοκιμίων.....	50
3.3. Πρόγραμμα Δοκιμών Εργαστηρίου.....	55
3.4. Διαδικασία Εκτέλεσης Δοκιμών.....	56
3.5. Σχεδιασμός Δοκιμών Πεδίου.....	56
3.5.1. Διάταξη Πεδίου.....	56
3.5.2. Πρόγραμμα Δοκιμών.....	56
3.5.3. Διαδικασία Εκτέλεσης Δοκιμών.....	57
4. Επεξεργασία Δοκιμών.....	60
4.1. Βαθμονόμηση Φωτογραφικών Μηχανών.....	61
4.2. Υπολογισμός Τριδιάστατης Θέσης Σημείων.....	65
4.3. Μετασχηματισμός Συστήματος Συντεταγμένων και Αποτύπωση της Επιφάνειας.....	66
4.3.1. Υλοποίηση Κατακόρυφου Άξονα.....	66
4.3.2. Αποτύπωση Επιφάνειας Πρόσκρουσης.....	68
4.3.3. Μετασχηματισμός Συστήματος Συντεταγμένων.....	69
4.4. Ανάλυση της Καταγραφείσας Τροχιάς.....	69
4.4.1. Ανακατασκευή του Σχήματος του Δοκιμίου.....	69
4.4.2. Προσδιορισμός της Θέσης του Δοκιμίου.....	71
4.4.3. Ανακατασκευή της Τροχιάς.....	72
4.5. Υπολογισμός Συντελεστών Αναπήδησης.....	75
4.5.1. Υπολογισμός Διεύθυνσης Πρόσπτωσης και Αναπήδησης.....	75
4.5.2. Υπολογισμός Γωνιών Πρόσπτωσης και Αναπήδησης.....	76
4.5.3. Υπολογισμός Συντελεστών Αναπήδησης.....	78
5. Παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	80
5.1. Διεύθυνση κρούσης – αναπήδησης.....	80
5.1.1. Δοκιμές Εργαστηρίου.....	80

5.1.2. Δοκιμές Πεδίου.....	86
5.1.3. Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα	94
5.2. Συντελεστές Αναπήδησης.....	98
5.2.1. Επίδραση της Περιστροφής στους Συντελεστές Αναπήδησης.....	99
5.2.2. Επίδραση των Χαρακτηριστικών της Τροχιάς στους Συντελεστές Αναπήδησης	101
5.2. Επίδραση της Γωνίας Πρόσπτωσης στην Γωνία Αναπήδησης	104
6. Πρόταση Εμπειρικού Μοντέλου.....	105
6.1. Επίδραση της Κλίσης και της Διεύθυνσης της Επιφάνειας Πρόσκρουσης σε Κρούσεις με Διαφορά Διεύθυνσης.....	105
6.2. Μοντέλο Εκτροπής	107
6.3. Επαλήθευση Αποτελεσμάτων με τις Δοκιμές Πεδίου Μικρής Κλίμακας	108
7. Σύνοψη - Συμπεράσματα.....	111
7.1. Συμπεράσματα	111
7.1.1 Εκτροπή της Τροχιάς των Δοκιμίων.....	111
7.1.2. Συντελεστές Αναπήδησης	112
7.2. Προτάσεις για Έρευνα στο Μέλλον.....	114
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	115
Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία	115
Ελληνική Βιβλιογραφία.....	120

EΙΚΟΝΕΣ

Εικόνα 1: Κατάπτωση βράχων. (Πηγή http://www.geocaching.com).....	5
Εικόνα 2: Τύποι κίνησης βραχοτεμάχους. (Πηγή: <i>Descoeudres & Zimmermann, 1987</i>)	9
Εικόνα 3: Τύποι κίνησης σε σχέση με τη γωνία κλίσης του πρανούς. (Πηγή: <i>Ritchie, 1963</i>) 10	
Εικόνα 4: Αποτελέσματα από διαδοχικές θέσεις βραχοτεμάχους. (Πηγή: <i>D. Bozzolo and R. Pamini, 1986</i>).....	12
Εικόνα 5: Απεικόνιση της κύλισης του βραχοτεμάχους. (Πηγή: <i>D. Bozzolo and R. Pamini, 1986</i>).....	15
Εικόνα 6: Παραμόρφωση του εδάφους κατά την πρόσπτωση σφαίρας. (Πηγή: <i>Baishan Peng, 2000</i>).....	18
Εικόνα 7: Οι ταχύτητες που αναπτύσσονται κατά την πρόσπτωση.(Πηγή: <i>Asteriou & Tsiambaos, 2015</i>).....	21
Εικόνα 8: Χαρακτηριστικό προφίλ διαδρομής βραχοπτώσεων. (Πηγή: <i>Hungr 1989</i>).....	30
Εικόνα 9: Επίπεδα πρόσπτωσης του βραχοτεμάχους. (Πηγή: <i>Giakomini et al., 2012</i>).....	41
Εικόνα 10: Τροχιές βραχοτεμαχών σε ηφαιστειακό περιβάλλον. (Πηγή: <i>Dewez et al., 2010</i>)	44
Εικόνα 11: Αποτελέσματα πειραμάτων στην Ταϊτή. (Πηγή: <i>Dewez et al., 2010</i>).....	45
Εικόνα 12: Πειραματική συσκευή (Πηγή: <i>Asteriou & Tsiambaos, 2015</i>).....	47
Εικόνα 13: Εργαστηριακή διάταξη.	47
Εικόνα 14: Φωτογραφικές μηχανές Canon D600 EOS (www.dpreview.com).....	48
Εικόνα 15: Νήμα της στάθμης και ηλεκτρονικό αποστασιόμετρο (www.geoshop.gr).....	49
Εικόνα 16: Κυβικά δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη ρίψη στο εργαστήριο.	50
Εικόνα 17: Μεταλλικό καλούπι και η επιφάνεια πρόσκρουσης.....	51
Εικόνα 18: Συσκευή μονοαξονικής θλίψης.	53
Εικόνα 19: Τυπική εικόνα αστοχίας μαρμάρου κατά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.	53
Εικόνα 20: Σχηματική αναπαράσταση συσκευής Brazilian test (www.rockeng.snu.ac.kr). 54	
Εικόνα 21: Δοκίμια πειράματος πεδίου.	57
Εικόνα 22: Τροχιές δοκιμών δοκιμών πεδίου για γωνία κλίσης 20° και 45° αντίστοιχα (<i>Asteriou, P., & Tsiambaos, G. 2015</i>).....	58
Εικόνα 23: Απεικόνιση μαρμάρου της Πεντέλης.	59
Εικόνα 24: Άποψη μετά την εκτέλεση δοκιμών στο τέμαχος με 45° κλίση.	60
Εικόνα 25: Καταγραφή καννάβου από την αριστερή φωτομηχανή.	62
Εικόνα 26: Καταγραφή καννάβου από την δεξιά φωτομηχανή.	62
Εικόνα 27: Προσδιορισμός των εξωτερικών παραμέτρων για τις δύο φωτομηχανές, αριστερή και δεξιά αντίστοιχα (σε mm).....	63
Εικόνα 28: Προσδιορισμός των εξωτερικών παραμέτρων του στερεοζεύγους (σε mm)....	65
Εικόνα 29: Υλοποίηση σημείων πάνω στο νήμα της στάθμης.....	67
Εικόνα 30: Κατακόρυφος άξονας βαρύτητας στο σύστημα συντεταγμένων της αριστερής φωτομηχανής.	67

Εικόνα 31: Αποτύπωση της επιφάνειας πρόσκρουσης με εφαρμογή της φωτογραμμετρικής εμπροσθοτομίας.....	68
Εικόνα 32: Εισαγωγή γωνιών κυβικών δοκιμίων.....	70
Εικόνα 33: Ανακατασκευή σχήματος δοκιμίου.....	71
Εικόνα 34: Ανακατασκευή σχήματος δοκιμίου (<i>Μώρου, 2014</i>).....	72
Εικόνα 35: Διάγραμμα μεταβολής των γωνιών στροφής μεταξύ διαδοχικών λήψεων εικόνων.	74
Εικόνα 36: Ανακατασκευασμένη τροχιά δοκιμίου και έλεγχος με την καταγραφείσα.	75
Εικόνα 37: Υπολογισμός των διευθύνσεων πρόσπτωσης και αναπήδησης δοκιμίου (<i>Πηγή: Asteriou & Tsiambaos, 2015</i>).....	76
Εικόνα 38: Κύκλος Schmidt για κλίση του επιπέδου πρόσκρουσης 40^0 και διαφορά διεύθυνσης $d_f=0^0$	81
Εικόνα 39: Κύκλος Schmidt για κλίση του επιπέδου πρόσκρουσης 40^0 και διαφορά διεύθυνσης $d_f=50^0$	82
Εικόνα 40: Κύκλος Schmidt για κλίση του επιπέδου πρόσκρουσης 40^0 και διαφορά διεύθυνσης $d_f=85^0$	83
Εικόνα 41: Κύκλος Schmidt για κλίση του επιπέδου πρόσκρουσης 40^0 και διαφορά διεύθυνσης $d_f=130^0$	84
Εικόνα 42: Κύκλος Schmidt για κλίση του επιπέδου πρόσκρουσης 40^0 και διαφορά διεύθυνσης $d_f=180^0$	85
Εικόνα 43: Κύκλος Schmidt για κλίση του επιπέδου πρόσκρουσης 20^0 και διαφορά διεύθυνσης $d_f=0^0$	86
Εικόνα 44: Κύκλος Schmidt για κλίση του επιπέδου πρόσκρουσης 20^0 και διαφορά διεύθυνσης $d_f=40^0$	87
Εικόνα 45: Κύκλος Schmidt για κλίση του επιπέδου πρόσκρουσης 20^0 και διαφορά διεύθυνσης $d_f=90^0$	88
Εικόνα 46: Κύκλος Schmidt για κλίση του επιπέδου πρόσκρουσης 20^0 και διαφορά διεύθυνσης $d_f=150^0$	89
Εικόνα 47: Κύκλος Schmidt για κλίση του επιπέδου πρόσκρουσης 45^0 και διαφορά διεύθυνσης $d_f=0^0$	90
Εικόνα 48: Κύκλος Schmidt για κλίση του επιπέδου πρόσκρουσης 45^0 και διαφορά διεύθυνσης $d_f=40^0$	91
Εικόνα 49: Κύκλος Schmidt για κλίση του επιπέδου πρόσκρουσης 45^0 και διαφορά διεύθυνσης $d_f=90^0$	92
Εικόνα 50: Κύκλος Schmidt για κλίση του επιπέδου πρόσκρουσης 45^0 και διαφορά διεύθυνσης $d_f=150^0$	93

ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 1: Παράμετροι που επηρεάζουν τους συντελεστές αναπήδησης (Heidenreih, 2004)	16
Πίνακας 2(Συνέχεια): Παράμετροι που επηρεάζουν τους συντελεστές αναπήδησης (Heidenreih, 2004)	17
Πίνακας 3: Παράμετροι που επηρεάζουν το φαινόμενο της αναπήδησης (Labiouse&Descoeudres, 1999)	18
Πίνακας 4: Τιμές συντελεστών αναπήδησης από τη βιβλιογραφία.	24
Πίνακας 5: Αποτελέσματα δοκιμών προσδιορισμού της τροχιάς πριν και μετά την κρούση.	38
Πίνακας 6: Αποτελέσματα δοκιμών σε περιοχή ανοιχτής εξόρυξης. (Πηγή: Giakomini et al., 2012).....	42
Πίνακας 7: Τεχνικά χαρακτηριστικά φωτογραφικής μηχανής Canon D600 EOS.	48
Πίνακας 8: Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.	52
Πίνακας 9: Δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης.	55
Πίνακας 10: Μηχανικές ιδιότητες φυσικών και τεχνητών δοκιμίων. (Πηγή: Asteriou et al., 2013).....	55
Πίνακας 11: Εργαστηριακές δοκιμές που εκτελέστηκαν.....	56
Πίνακας 12: Δοκιμές πεδίου που εκτελέστηκαν.....	58
Πίνακας 13: Δοκιμές πεδίου που εκτελέστηκαν.....	59
Πίνακας 14: Τιμές συντελεστών αναπήδησης	98
Πίνακας 15: Τιμές συντελεστών αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης.	102
Πίνακας 16: Μέγιστες και ελάχιστες τιμές γωνιών αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης.	104

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

Διάγραμμα 1: Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει γωνίας αναπήδησης. (Asteriou et al., 2012)	32
Διάγραμμα 2: Η συνολική ενέργεια E_{TCOR} συναρτήσει της ενέργειας E_{COR} για κυβικά δοκίμια. (Asteriou et al., 2012)	33
Διάγραμμα 3: Διεύθυνση τροχιάς μετά την κρούση για κυβικά και σφαιρικά δοκίμια.	34
Διάγραμμα 4: Ιστόγραμμα εκτροπής της διεύθυνσης μετά την κρούση για κυβικά και σφαιρικά δοκίμια.	34
Διάγραμμα 5: Διάγραμμα προσδιορισμού ελάχιστης τιμής διεύθυνσης μετά την κρούση ($\min\beta_r$) (Μώρου, 2014).	36
Διάγραμμα 6: Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων για δοκίμιο ενέματος.	52
Διάγραμμα 7: Εκτροπή-διαφορά διεύθυνσης για κλίση πρανούς 40° (Εργαστήριο).	94
Διάγραμμα 8: Εκτροπή-διαφορά διεύθυνσης για κλίση πρανούς 20° (Πεδίο).	95
Διάγραμμα 9: Εκτροπή-διαφορά διεύθυνσης για κλίση πρανούς 45° (Πεδίο).	95
Διάγραμμα 10: Συγκεντρωτικό δοκιμών εργαστηρίου-πεδίου.	96
Διάγραμμα 11: Συγκεντρωτικό δοκιμών πεδίου.	97
Διάγραμμα 12: Επίδραση της περιστροφής στην ενέργεια αμέσως μετά την κρούση.	99
Διάγραμμα 13: Επίδραση της περιστροφής στους συντελεστές αναπήδησης.	100
Διάγραμμα 15: Συντελεστές αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης.	103
Διάγραμμα 16: Γωνία αναπήδησης (r) συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης (i).	105
Διάγραμμα 17(a,b): Εκτροπή e ως συνάρτηση της διαφοράς διεύθυνσης $\Delta\phi$, a) όλες οι τιμές, b) ποσοστιαίες τιμές (Πηγή: Asteriou & Tsiambaos, 2015).	106
Διάγραμμα 18(a,b,c,d): Σύγκριση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και προβλέψεις εμπειρικού μοντέλου (Πηγή: Asteriou & Tsiambaos, 2015).	108
Διάγραμμα 19: Ιστόγραμμα της πλευρικής διασποράς για παράλληλη πρόσκρουση (Πηγή: Asteriou & Tsiambaos, 2015).	109
Διάγραμμα 20: Σύγκριση της εκτροπής για τις δοκιμές πεδίου, με το εμπειρικό μοντέλο πρόβλεψης για κλίσεις 20° και 45° (Πηγή: Asteriou & Tsiambaos, 2015).	109

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

E_{tot} : συνολική ενέργεια

E_{trans} : μεταφορική ενέργεια

I : κεντροβαρική ροπή αδράνειας

m : μάζα

R_v : συντελεστής αναπήδησης

R_E : συντελεστής αναπήδησης λόγω μεταφορικής ενέργειας

R_n : κάθετος συντελεστής αναπήδησης

R_t : εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης

R_{TE} : συντελεστής αναπήδησης λόγω μεταφορικής και περιστροφικής ενέργειας

v_i : ταχύτητα πριν την κρούση

v_n : κάθετη ταχύτητα

v_r : ταχύτητα μετά την κρούση

v_t : εφαπτομενική ταχύτητα

β : γωνία πρόσπτωσης

ω : γωνιακή ταχύτητα του κέντρου μάζας

1.Εισαγωγή

1.1. Γενικά Στοιχεία

Ως κατάπτωση ή βραχύπτωση χαρακτηρίζεται, η αποκόλληση τμήματος βράχου από απότομο πρανές κατά μήκος μιας επιφάνειας με μικρή ή σχεδόν μηδενική διατμητική αντοχή. Το φαινόμενο της κατάπτωσης των βραχοτεμαχών (rockfall), αποτελεί μια από τις σημαντικότερες κατηγορίες αστοχίας πρανών, με καταστροφικά αποτελέσματα σε έργα υποδομής και σε οικισμούς, αλλά και απώλεια ανθρώπινων ζώων. Άρα είναι σημαντική η κατασκευή μέτρων προστασίας στις περιοχές με πιθανή εκδήλωση βραχοπτώσεων. Πληθώρα πλέον λογισμικών προγραμμάτων υπάρχει σήμερα όπως το RocFall ή το CRSP, τα οποία βασίζονται στην πρόβλεψη των πιθανών τροχιών των βραχοτεμαχών για τον καθορισμό των απαιτούμενων μέτρων προστασίας. Όπως θα υποδειχθεί παρακάτω, η προσομοίωση της τροχιάς γίνεται με την χρήση ενός ή δύο συντελεστών που περιγράφουν τις απώλειες κατά την κίνηση και ονομάζονται συντελεστές αναπήδησης.

Οι διάφορες τιμές των συντελεστών αυτών συνδέονται με τα χαρακτηριστικά των γεωλογικών υλικών, αλλά και με άλλους παράγοντες όπως: τα χαρακτηριστικά του τεμάχους που πέφτει (βάρος, σχήμα, μέγεθος, αντοχή, ελαστικότητα), της κίνησής του (ταχύτητα πρόσκρουσης μεταφορική και γωνιακή, γωνία πρόσκρουσης) και τα χαρακτηριστικά της βραχώδους επιφάνειας πρόσκρουσης (κλίση, τραχύτητα, αντοχή). Οι συντελεστές αναπήδησης προσδιορίζονται τόσο από εργαστηριακές δοκιμές όσο και από δοκιμές πεδίου.

Η περιστροφική συνιστώσα της κίνησης τεμαχών είναι ένας άλλος παράγοντας που επιδρά, γενικώς παραμένει αδιευκρίνιστη η επίδραση της περιστροφής στην κίνηση των τεμαχών αν και έχουν γίνει αρκετές έρευνες πάνω σε αυτό.

Για τον προσδιορισμό των μέτρων προστασίας έναντι των καταπτώσεων, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η συστηματική μελέτη της συμπεριφοράς των βραχοτεμαχών κατά τη στιγμή πρόσκρουσης με το πρανές αλλά και κατά το στάδιο κίνησής τους. Η διεύθυνση της τροχιάς του βραχοτεμάχους πριν την κρούση σε σχέση με τη διεύθυνση της επιφάνειας πρόσπτωσης περιγράφει την εκτροπή του τεμάχους εξαιτίας της κρούσης, έτσι

καθορίζεται η έκταση των ζωνών υψηλής επικινδυνότητας από την εκδήλωση βραχοπτώσεων.

Οι παραπάνω παράγοντες εξετάστηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, με σκοπό στην καλύτερη κατανόηση του φαινομένου των βραχοπτώσεων για την αποτελεσματικότερη αντιμετώπισή του.

1.2. Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας

Στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν 120 εργαστηριακές δοκιμές στο Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Βραχομηχανικής του τομέα Γεωτεχνικής και 96 δοκιμές πεδίου στην περιοχή της Πεντέλης, Αττικής. Ο στόχος των δοκιμών αυτών ήταν η εξέταση των παραγόντων που επιδρούν στην εκτροπή των τεμαχών και τη μελέτη της επίδρασης της περιστροφής κατά την διάρκεια μιας βραχόπτωσης.

Λόγω του ότι η εκτροπή των τεμαχών λαμβάνει χώρα στον τριδιάστατο χώρο απαιτείται η τριδιάστατη καταγραφή και προσομοίωση της τροχιάς τους. Έτσι γίνεται ο υπολογισμός της εκτροπής του τεμάχους μετά την κρούση και ο προσδιορισμός διαφόρων παραγόντων, όπως της κλίσης του επιπέδου πρόσκρουσης και της διεύθυνσης ρίψεως του τεμάχους.

Έχοντας συγκεντρώσει, αξιολογήσει και επεξεργαστεί τα αποτελέσματα, καταρτίστηκε ένα εμπειρικό μοντέλο πρόβλεψης της εκτροπής του τεμάχους μετά την κρούση, με στόχο τον προσδιορισμό της καταλληλότερης θέσης εγκατάστασης των μέτρων αναχαίτισης των καταπτώσεων.

Με τη μελέτη της περιστροφικής κίνησης σε τρεις διαστάσεις γίνεται σύγκριση στις τιμές των συντελεστών αναπήδησης και αξιολογείται η επίδραση της περιστροφής. Οι παλαιότερες έρευνες βασίζονταν σε διδιάστατες αναλύσεις για την εκτίμηση των συντελεστών αναπήδησης, αγνοώντας όμως έτσι την επίδραση της περιστροφικής ενέργειας.

1.3. Δομή της Διπλωματικής Εργασίας

Στο επόμενο κεφάλαιο, παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο για τη μελέτη του φαινομένου των βραχοπτώσεων. Αρχικά, ορίζεται το φαινόμενο και ακολούθως αναλύονται οι διάφορες μέθοδοι μελέτης των βραχοπτώσεων. Γίνεται αναφορά σε όλες τις μαθηματικές προσεγγίσεις που έχουν αναπτυχθεί, δίνοντας έμφαση στο φαινόμενο της αναπήδησης καθώς αποτελεί το τύπο κίνησης με τις περισσότερες αβεβαιότητες σε μια φυσική κατάπτωση. Τέλος, γίνεται ανασκόπηση της υπάρχουσας βιβλιογραφίας που αφορά στην τριδιάστατη ανάλυση της τροχιάς τεμαχών από πειραματικές ρίψεις μεγάλης κλίμακας.

Στο τρίτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται η εργαστηριακή πειραματική διάταξη αλλά και η διάταξη πεδίου που αναπτύχθηκε και περιγράφεται η διαδικασία εκτέλεσης των δοκιμών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται η διαδικασία για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των εργαστηριακών δοκιμών αλλά και των δοκιμών του πεδίου, περιγράφοντας τον τρόπο υπολογισμού των χαρακτηριστικών της τροχιάς σε κάθε στάδιο.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μετά από επεξεργασία και προσδιορισμό των χαρακτηριστικών μεγεθών των τροχιών, για κάθε ρίψη στο εργαστήριο και στο πεδίο. Τα αποτελέσματα αυτά σχολιάζονται και διατυπώνονται τα αντίστοιχα συμπεράσματα.

Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται πρόταση ενός εμπειρικού μοντέλου βάσει των αποτελεσμάτων των εργαστηριακών δοκιμών, το οποίο επαλήθευεται στην συνέχεια με τις δοκιμές πεδίου μικρής κλίμακας.

Στο έβδομο κεφάλαιο συνοψίζονται τα κυριότερα συμπεράσματα της παρούσας έρευνας και δίνονται παράλληλα κάποιες προτάσεις για την κατεύθυνση που πρέπει να ακολουθήσει η μελλοντική έρευνα στο εν λόγω αντικείμενο.

2. Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1. Γενικά Στοιχεία Καταπτώσεων Βράχων

Κατάπτωση βράχων (rockfall) ορίζεται ως η πτώση βραχοτεμαχών διαφορετικού μεγέθους μετά την απόσπαση τους από απότομα πρανή (με κλίση μεγαλύτερη των 30 μοιρών και συνήθως της τάξεως των 70 με 90 μοιρών). Η κίνηση γίνεται εξαιτίας της βαρύτητας, ενώ στην προσομοίωση θεωρείται ότι τα τεμάχια έχουν αμελητέα δυναμική αλληλεπίδραση μεταξύ τους. Οι καταπτώσεις βράχων συμβαίνουν όταν μια μάζα βράχων αποκοπεί από το μητρικό πέτρωμα και είναι δυνατή η προς τα κάτω κίνησή της. Έτσι, οι υδρογεωλογικές διεργασίες, η σεισμική φόρτιση, καθώς ακόμα και η ανθρώπινη δραστηριότητα συμβάλλουν στην πραγματοποίηση του φαινομένου.

Γενικά το μέγεθος των τεμαχίων μπορεί να κυμαίνεται από κάποια κυβικά εκατοστά έως μερικά δεκάδες κυβικά μέτρα. Αυτό καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών της βραχομάζας (εμμογή, αριθμός οικογενειών, απόσταση). Είναι ιδιαίτερα σημαντικό στις περιοχές όπου υπάρχει πιθανότητα εκδήλωσης κατάπτωσης βραχωδών τεμαχίων, να υπάρχει η δυνατότητα πρόβλεψης των χαρακτηριστικών της τροχιάς τους, προκειμένου να συνταχθούν χάρτες επικινδυνότητας, αλλά και να κατασκευαστούν τα κατάλληλα μέτρα προστασίας.

Οι Chen et al (1994) όρισαν τις βραχοπτώσεις ως τις αιφνίδιες κινήσεις ανεξάρτητων τεμαχίων από απότομα πρανή. Οι Lee και Elliot (1998) τις ορίζουν ως την προς κατάντη κίνηση βράχων σε φυσικές πλαγιές ή από ελεύθερα μέτωπα πρανών, που αν δεν περιορίζονται ενέχουν τον κίνδυνο να καταστρέψουν ή να βλάψουν κατά την πορεία τους, κατασκευές και να εμποδίσουν την ομαλή κυκλοφορία μιας οδού. Ο Sprang (1987) πρότεινε τον περιορισμό χρησιμοποίησης του όρου «βραχόπτωση» στις καταπτώσεις που εκδηλώνουν μέγιστη ενέργεια 500 KNm, που αντιστοιχεί στην πτώση ενός όγκου μάζας 5 τόνων από ύψος 5 μέτρων. Θεωρεί, επίσης, ότι πιθανές καταπτώσεις μεγαλύτερης κινητικής ενέργειας απαιτούν ενεργητικά μέτρα αντιμετώπισής τους καθώς μόνο με παθητικά θα ήταν αδύνατον.

Ο Richards (1988) προσπάθησε να συνοψίσει τα αποδεκτά χαρακτηριστικά μιας κατάπτωσης και τον ορισμό της ως βραχόπτωση ως εξής: Το γεγονός περιλαμβάνει ένα ή μια ομάδα τεμαχών που αποκολλούνται από ένα μέτωπο πρανούς. Κάθε κομμάτι συμπεριφέρεται λιγότερο ή περισσότερο ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα. Υπάρχει αποκόλληση από το υποκείμενο επίπεδο, μεγάλη επιτάχυνση κατά την πτώση και ανάπτυξη σημαντικής κινητικής ενέργειας. Η τοποθέτηση και η επιλογή μιας συγκεκριμένης μορφής μέτρου ανάσχεσης καταπτώσεων γίνεται με βάση την εκτίμηση της τροχιάς και της κινητικής ενέργειας της κατάπτωσης.



Εικόνα 1: Κατάπτωση βράχων. (Πηγή <http://www.geocaching.com>)

Η πρώτη προσέγγιση στο σχεδιασμό μέτρων προστασίας από καταπτώσεις βράχων έγινε από τον Ritchie (1963). Όμως, υπάρχουν στη βιβλιογραφία αρκετές προτάσεις, όπως των Richards (1988), Pierson et al. (1990) και Spang & Sönsler (1995). Αντίστοιχα, οι Chang et al. (1986) σχεδίασαν φράχτες αναχαίτισης ικανούς να ανταπεξέλθουν σε σύγκρουση ενέργειας 100 KNm, ενώ για μεγαλύτερες ενέργειες απαιτείται επί τόπου σταθεροποίηση των επικίνδυνων τεμαχών.

2.2. Μέθοδοι Μελέτης Καταπτώσεων Βράχων

Σχεδόν όλα τα μοντέλα καταπτώσεων που χρησιμοποιούνται σήμερα περιγράφουν την αναπήδηση με δύο συντελεστές που ονομάζονται συντελεστές αναπήδησης. Γενικά, για ακριβέστερες αναλύσεις απαραίτητη είναι η βελτίωση των μοντέλων προσομοίωσης της τροχιάς των τεμαχίων. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την συστηματική παρατήρηση του φαινομένου και την εφαρμογή κατάλληλων προσεγγίσεων όπως :

- Ανάστροφες αναλύσεις (back analysis) φυσικών φαινομένων καταπτώσεων
- Επιτόπου δοκιμές (in situ)
- Εργαστηριακές δοκιμές
- Αναλύσεις με χρήση προγραμμάτων Η/Υ

2.2.1. Ανάστροφες αναλύσεις

Μετά το πέρας της εκδήλωσης ενός φυσικού φαινομένου κατάπτωσης, μπορεί από την ανάλυση των ιχνών που άφησαν στο πεδίο τα βραχοτεμάχια να ανακατασκευαστεί η τροχιά τους και άρα να προσδιοριστούν οι ταχύτητες, τα ύψη των αναπηδήσεων και οι ενέργειες κατά μήκος της τροχιάς και κατ' επέκταση οι συντελεστές αναπήδησης.

2.2.2. Επί Τόπου Δοκιμές

Εκτός από την παρατήρηση φυσικών φαινομένων βραχοπτώσεων, απαραίτητες είναι και οι επί τόπου δοκιμές στο πεδίο. Από την κορυφή του πρηνούς με γνωστά γεωμετρικά και γεωλογικά χαρακτηριστικά, απελευθερώνονται βραχώδη τεμάχια. Η καταγραφή των τροχιών τους γίνεται από ειδικές φωτογραφικές μηχανές και στη συνέχεια αναλύονται ώστε να προσδιοριστούν οι ταχύτητες, οι ενέργειες, τα ύψη αναπήδησης και ακολούθως οι συντελεστές αναπήδησης.

2.2.3. Εργαστηριακές Δοκιμές

Εκτελούνται κυρίως πειραματικές δοκιμές μικρής ή και ακόμα και μέσης κλίμακας. Είναι πολύ χρήσιμες για την κατανόηση του μηχανισμού της κατάπτωσης και την απόκτηση απαραίτητων στοιχείων για τον προσδιορισμό σημαντικών παραμέτρων. Όμως η ποιοτική ερμηνεία των αποτελεσμάτων είναι σύνθετη, εξαιτίας της δυσκολίας αναγωγής στην φυσική κλίμακα των παραμέτρων που υπεισέρχονται στη δυναμική διαδικασία.

Σύμφωνα με πειράματα μικρής κλίμακας (Camponuono, 1977), η αντιστοιχία των στατικών χαρακτηριστικών των παραμέτρων, όπως η παραμορφωσιμότητα, η πυκνότητα κ.α. είναι δυνατή, σε αντίθεση με αυτές που σχετίζονται με τη δυναμική διαδικασία. Το πλεονέκτημα αυτών των δοκιμών είναι ότι οι συνθήκες και οι παράμετροι μπορούν εύκολα να ελεγχθούν.

2.2.4. Υπολογιστικά Προγράμματα

Έχει αναπτυχθεί σήμερα ένας μεγάλος αριθμός λογισμικών Η/Υ για την προσομοίωση της τροχιάς των βραχοτεμαχών. Με την προϋπόθεση ότι τα προγράμματα είναι σωστά βαθμονομημένα και χρησιμοποιούνται αντιπροσωπευτικές, για την περίπτωση, τιμές των συντελεστών αναπήδησης, τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά.

2.2.4.1. Διδιάστατα Μοντέλα

Με τις διδιάστατες προσομοιώσεις, μελετάται η τροχιά που θα ακολουθήσει ένα βραχοτέμαχος κατά μήκος μιας επιλεγμένης τομής του φυσικού εδάφους ή του τεχνητού πρανού, συνήθως κατά μήκος της μέγιστης κλίσης (Σακελλαρίου et al., 1995, Spang & Sönsner, 1995).

Τα περισσότερα μοντέλα υιοθετούν την προσέγγιση της σημειακής μάζας (lump-mass) ή την θεώρηση του στερεού σώματος (rigid body). Στη δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιείται ένα απλό γεωμετρικό σχήμα για το βραχοτέμαχος. Η υβριδική προσέγγιση αφορά στη χρήση της προσέγγισης σημειακής μάζας για την προσομοίωση του τεμάχου κατά τη διάρκεια που αυτό βρίσκεται στον αέρα και στη χρήση της προσέγγισης στερεού σώματος για την προσομοίωση της κύλισης, της κρούσης και της αναπήδησης.

2.2.4.2. Τριδιάστατα Μοντέλα

Το τριδιάστατο μοντέλο είναι είναι πιο πολύπλοκο από το διδιάστατο γιατί απαιτεί εξισώσεις κίνησης στον τριδιάστατο χώρο. Εκτός της δυσκολίας στην εύρεση εξισώσεων που να αναπαριστούν ορθολογικά την κίνηση του βραχοτεμάχου, πολύπλοκη είναι και η πρόβλεψη της πορείας που θα ακολουθήσει το τέμαχος ακριβώς μετά την πρόσκρουσή του στο πρανές, καθώς στηρίζεται στη θεωρία κρούσεων στο χώρο.

2.2.4.2. Μοντέλα βασισμένα στο Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών

Ένα μοντέλο GIS (GIS-based models) αποτελείται από τρεις διαδικασίες. Στην πρώτη προσδιορίζονται οι πιθανές θέσεις έναρξης καταπτώσεων στην περιοχή ενδιαφέροντος, στη δεύτερη καθορίζεται η τροχιά της κατάπτωσης και στην τρίτη υπολογίζεται το μήκος της ζώνης απόθεσης (Hegg & Kienholz, 1995).

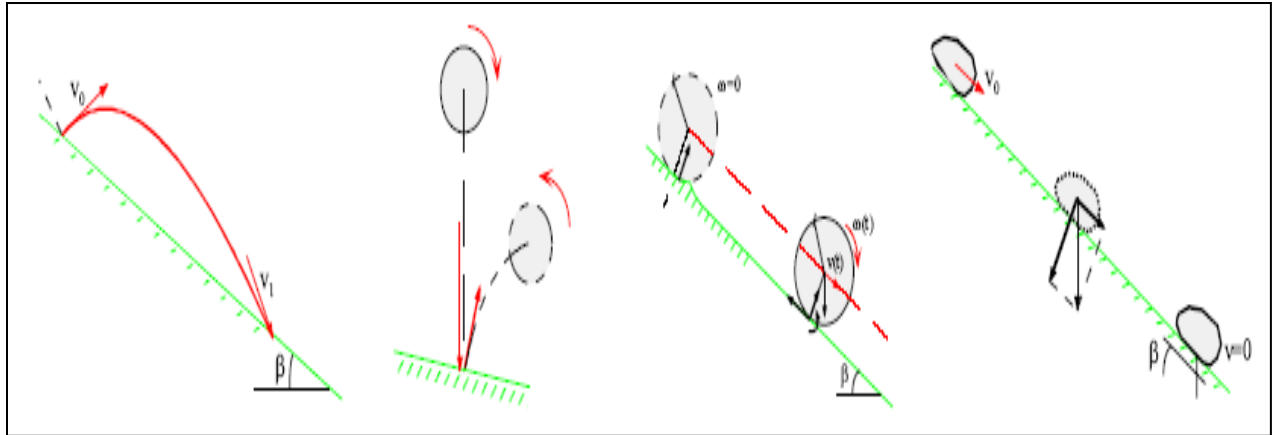
Ο εντοπισμός των πιθανών περιοχών έναρξης μιας κατάπτωσης, γίνεται χρησιμοποιώντας ένα σύνολο δεδομένων που υπάρχει σε ένα GIS, δηλαδή σε μία βάση δεδομένων. Σε αυτές τις βάσεις δεδομένων περιλαμβάνεται πληθώρα στοιχείων, όπως για παράδειγμα ο τύπος του πετρώματος, η κλίση του πρανούς και η κάλυψη γης της περιοχής ενδιαφέροντος. Ακολούθως, η τροχιά της βραχύπτωσης, προσδιορίζεται περιγράφοντας το ανάγλυφο με κάνναβο, και η τροχιά καθορίζεται από το συνδυασμό των χαρακτηριστικών των γειτονικών τετραγώνων του καννάβου (raster analysis method). Τέλος, το μήκος της ζώνης απόθεσης υπολογίζεται από εμπειρικά μοντέλα.

2.3. Μαθηματική Προσέγγιση Φαινομένου Καταπτώσεων Βράχων

2.3.1. Μελέτη Τροχιάς

Από τις πρώτες περιγραφές του φαινομένου, από γεωλογικής άποψης, έγινε από τον Heim το 1882. Σύμφωνα με τον Lied (1977) μια κατάπτωση βραχώδους τεμάχους λαμβάνει χώρα με τον ακόλουθο τρόπο:

- ελεύθερη πορεία στον αέρα (free fall)
- ολίσθηση (rolling)
- κύλιση (sliding)
- αναπήδηση (bouncing)

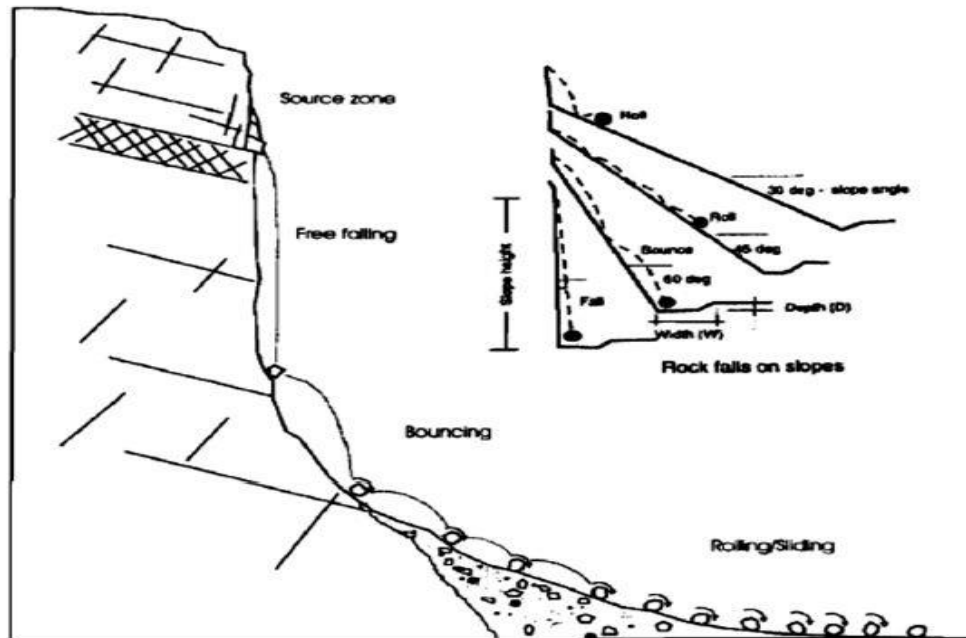


Εικόνα 2: Τύποι κίνησης βραχοτεμάχους. (Πηγή: Descoedres & Zimmermann, 1987)

Οι εργαστηριακές διερευνήσεις δείχνουν ότι ο τύπος της κίνησης μετά την πρόσκρουση εξαρτάται από το σχήμα του τεμάχους, την κλίση και την ποσότητα της ενέργειας που διαχέεται.

Σύμφωνα με τον Hoek (2000) ο πιο σημαντικός παράγοντας που καθορίζει την τροχιά της κατάπτωσης είναι η γεωμετρία του πρανού. Απότομα πρανή, προσδίδουν μια οριζόντια συνιστώσα στην τροχιά του τεμάχους κατά την κατάπτωση. Η επίδραση άλλων παραγόντων όπως το μέγεθος και το σχήμα του βραχοτεμάχους και ο συντελεστής τριβής φαίνεται μικρότερη. Καταπτώσεις σε πρανή χωρίς φυτοκάλυψη είναι περισσότερο επικίνδυνες, καθώς από πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί στο πεδίο απέδειξαν ότι στην περίπτωση πρανών με φυτοκάλυψη οι τιμές των ταχυτήτων και το ύψος αναπήδησης των τεμαχών είναι πολύ μικρότερες. Επίσης μέσω μιας σειράς τεχνητών καταπτώσεων ο Ritchie (1963) παρατήρησε ότι το κύριο είδος της κίνησης ενός βραχοτεμάχους σε πρανή με κλίση έως 45° είναι κύλιση, για κλίση πρανών από 45° έως 63° αναπήδηση και για πρανή με κλίση μεγαλύτερη των 63° ελεύθερη πτώση.

Γενικότερα, τα μεγαλύτερα σε μέγεθος τεμάχη, τείνουν να έχουν μια τροχιά τύπου κύλισης και ολίσθησης παρά αναπήδησης (Ritchie, 1963; Bozzolo & Pamini, 1986).



Εικόνα 3: Τύποι κίνησης σε σχέση με τη γωνία κλίσης του πρανούς. (Πηγή: Ritchie, 1963)

2.3.1.1. Εναέρια φάση

Η αντίσταση του αέρα έχει αμελητέα επίδραση στην κίνηση του βραχοτεμάχους έτσι η τροχιά του βραχοτεμάχους, η οποία περιγράφεται από το κέντρο μάζας του, μπορεί να θεωρηθεί παραβολική (Ritchie, 1963). Σύμφωνα με τους Bozzolo & Pamini (1986), εμφανίζονται δύο μορφές κίνησης : η πρώτη αφορά στη μετακίνηση του κέντρου μάζας του τεμάχους και η δεύτερη στην περιστροφή του τεμάχους γύρω από το κέντρο βάρους του.

Στην εναέρια φάση η αλληλεπίδραση μεταξύ του βραχοτεμάχους και του πρανούς είναι μηδενική, κάτι το οποίο δεν ισχύει με τους άλλους τύπους κίνησης, στους οποίους το τέμαχος αποσπάται σε μικρότερα τεμάχη.

Όταν σαν αίτιο για την έναρξη μιας κατάπτωσης είναι η ολίσθηση των τεμαχών, ο όγκος της επιτάχυνσης προς την επιτάχυνση βαρύτητας εκφράζεται από τη σχέση:

$$\frac{a}{g} = \sin \beta - \mu_f \cdot \cos \beta \quad (2.1)$$

Όπου,

a : η επιτάχυνση του βραχοτεμάχους

g : η επιτάχυνση λόγω βαρύτητας (9,81 m/s²)

β : η γωνία κλίσης του πρανούς

μ_f : ο συντελεστής τριβής

Η εξίσωση της κινητικής ενέργειας παίρνει τη μορφή:

$$E_{kin} = E_{trans} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (2.2)$$

Όπου,

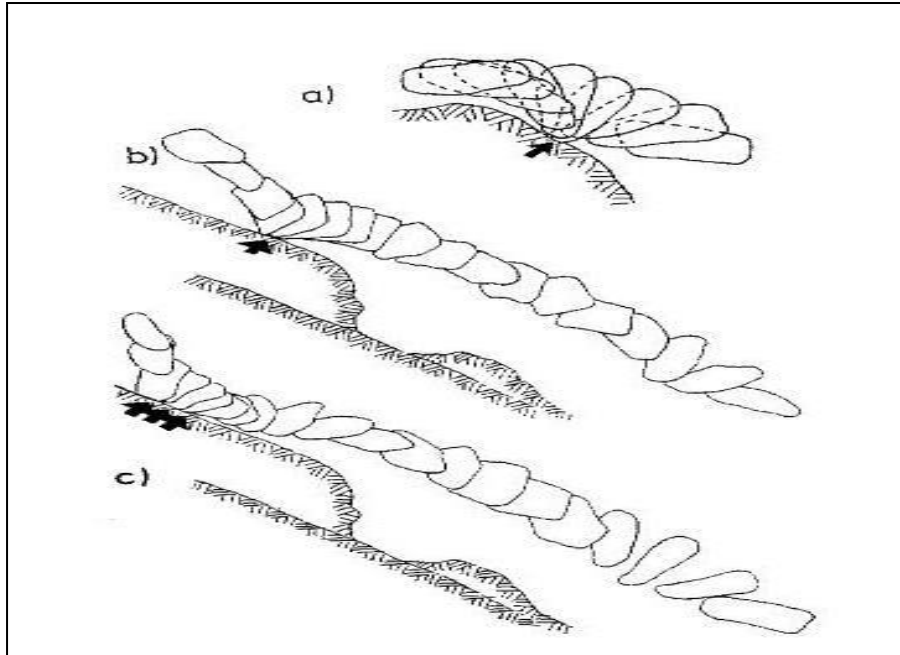
m : η μάζα του τεμάχους

v : η ταχύτητα του τεμάχους ($v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$)

h : το ύψος της πτώσης

2.3.1.2. Ολίσθηση

Ένας άλλος τύπος κίνησης είναι η ολίσθηση, συμβαίνει γενικά μόνο κατά την φάση έναρξης της κατάπτωσης. Κατά την αύξηση της κλίσης του πρανούς το τέμαχος από τη φάση ολίσθησης μπορεί να μεταβεί σε ελεύθερη πτώση, κύλιση ή και αναπήδηση (Bozzolo & Pamini, 1986).



Εικόνα 4: Αποτελέσματα από διαδοχικές θέσεις βραχοτεμάχους. (Πηγή: D. Bozzolo and R. Pamini, 1986)

Όταν συμβαίνει η ολίσθηση το σώμα είναι σε συνεχής επαφή με το έδαφος και η ολίσθηση συμβαίνει όταν ο συντελεστής τριβής είναι μικρότερος από την εφαπτομένη της γωνίας κλίσης του πρανούς.

Μέσω της κάθετης συνιστώσας του βάρους ορίζεται η τριβή ολίσθησης σύμφωνα με το νόμο Coulomb, που παρέχει χρήσιμες πληροφορίες όσον αφορά την ποιοτική προσέγγιση του φαινομένου της ολίσθησης:

$$F_f = \mu_f \cdot N = \mu_f \cdot m \cdot g \cdot \cos \beta \quad (2.3)$$

Όπου,

μ_f : ο συντελεστής τριβής

m : η μάζα του τεμάχους

g : η επιτάχυνση λόγω βαρύτητας (9,81 m/s²)

β : η γωνία κλίσης του πρανούς

Η φορά της δύναμης F_f είναι αντίθετη της ταχύτητας του βραχοτεμάχους και εφαρμόζεται στο σημείο επαφής. Τυπικές τιμές του συντελεστή τριβής μ_f κυμαίνονται από 0,6 έως 1.

Συνεπώς, η ενέργεια κατά την ολίσθηση προκύπτει από τη σχέση:

$$E_{kin} + E_{trans} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 + F_f \cdot s = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 + \mu_f \cdot m \cdot g \cdot \cos \beta \cdot s \quad (2.4)$$

Όπου, s : η απόσταση που διανύθηκε

2.3.1.3. Κύλιση

Όταν η μέση κλίση του πρανούς είναι μικρότερη των 45° , έχουμε σταδιακή μετατροπή της αναπήδησης σε κύλιση. Στην περίπτωση αυτή το βραχοτέμαχος έρχεται σε επαφή με το έδαφος και εμφανίζεται μόνο το φαινόμενο της περιστροφικής κίνησης. Η κύλιση πολλές φορές συνδυάζεται με την ολίσθηση, όπου προκύπτει ένα πιο πολύπλοκο φαινόμενο το οποίο κάθε φορά πρέπει να αναλύεται σε δύο συνιστώσες.

Στο φαινόμενο της κύλισης συμβάλλει πολύ και το σχήμα του τεμάχους, αυξάνεται δηλαδή η πιθανότητα της εμφάνισης της κύλισης όσο το κέντρο βάρους του τεμάχους προσεγγίζει το γεωμετρικό του κέντρο.

Η εξίσωση της κινητικής ενέργειας σε αυτή την περίπτωση παίρνει τη μορφή:

$$E_{kin} = E_{trans} + E_{rot} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 + \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2 \quad (2.5)$$

Όπου,

m : η μάζα του τεμάχους

v : η ταχύτητα του τεμάχους ($v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$)

I : η ροπή αδράνειας ως προς το κέντρο μάζας του τεμάχους

ω : η περιστροφική ταχύτητα του κέντρου μάζας του τεμάχους

Υπάρχει ένας διαχωρισμός όσον αφορά την κύλιση : ως καθαρή κύλιση και ως συνδυασμός κύλισης ολίσθησης. Σύμφωνα με τον Statham (1979), ο οποίος διεξήγαγε μια σειρά εργαστηριακών και επί τόπου πειραμάτων, μια πιο ακριβής περιγραφή αυτού του συνδυασμού μπορεί να περιγραφεί χρησιμοποιώντας και πάλι τον νόμο του Coulomb με τον συντελεστή τριβής μ_r να εξαρτάται κυρίως από τις ιδιότητες του πρανούς, από την παρακάτω σχέση:

$$F_r = \mu_r \cdot m \cdot g \cdot \cos \beta \quad (2.6)$$

Ο συντελεστής τριβής μ_r στην κύλιση μπορεί να εκφραστεί ως η εφαπτομένη της γωνίας για την οποία το τεμάχος κινείται με σταθερή ταχύτητα επί του πρανούς. Η γωνία αυτή εξαρτάται από τον τύπο και το σχήμα του τεμάχους, αλλά και από την ταχύτητα της επιφάνειας και την κλίση του πρανούς.

Ο συντελεστής τριβής δίνεται από τη σχέση:

$$\mu_r = \mu_o + k \cdot \frac{d}{D} \quad (2.7)$$

Όπου,

μ_o : η επιτάχυνση του βραχοτεμάχους

g : η επιτάχυνση λόγω βαρύτητας (9,81 m/s²)

k : εμπειρικός συντελεστής σχήματος (0,17÷0,26)

d : η μέση διάμετρος των τεμαχών του πρανούς

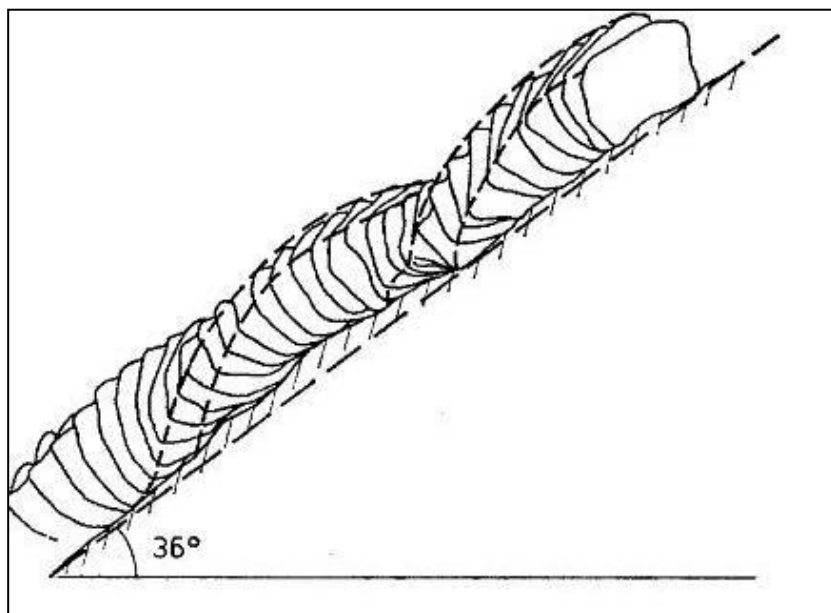
D : η διάμετρος του τεμάχους

Οι τιμές του μ_0 σύμφωνα με Statham (1976) και τους Bozzolo & Pamini (1986) κυμαίνονται μεταξύ $0,37 \div 0,67$ για γωνία τριβής φ_0 που ανήκει στο διάστημα ($20^\circ \div 33^\circ$).

Άρα, η ενέργεια κατά την κύλιση προκύπτει από τη σχέση:

$$E_{kin} + E_{trans} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 + F_r \cdot s = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 + \mu_r \cdot m \cdot g \cdot \cos \beta \cdot s \quad (2.8)$$

Όπου, s : η απόσταση που διανύθηκε.



Εικόνα 5: Απεικόνιση της κύλισης του βραχοτεμάχου. (Πηγή: D. Bozzolo and R. Pamini, 1986)

2.3.1.4. Αναπήδηση

Από τους προηγούμενους πιθανούς τύπους κίνησης που αναφέρθηκαν, η αναπήδηση έχει τα περισσότερα στοιχεία πολυπλοκότητας και είναι ιδιαίτερα απρόβλεπτη, έτσι αυξάνει γενικά η δυσκολία κατανόησης και προσομοίωσης της. Συγκεκριμένα το φαινόμενο της αναπήδησης συμβαίνει όταν το τέμαχος έρθει σε επαφή με το πρηνές, όπου τα βραχοτεμάχη έχουν την τάση να αποσπαστούν σε μικρότερα. Εξαιτίας των παραμορφώσεων υπάρχει απώλεια ενέργειας της τάξης του 75-86% κατά την κρούση, είτε έχουμε απόσπαση του τεμάχου σε μικρότερα τμήματα είτε όχι (Broilli, 1977 ; Hungr & Evans, 1996).

Από πειραματικές αναλύσεις έχει προκύψει ότι η φορά της κίνησης του τεμάχους μετά την κρούση εξαρτάται κατά κύριο λόγο από το σχήμα, τη γεωμετρία του πρανούς και το ποσοστό απώλειας της ενέργειας, το οποίο οφείλεται στα γεωμηχανικά χαρακτηριστικά του τεμάχους και του πρανούς αλλά και στη γωνία πρόσκρουσης. Το φαινόμενο της αναπήδησης διέπεται μαθηματικά από τους συντελεστές αναπήδησης, που αποτελούν γενικά τις πιο σημαντικές παραμέτρους για την προσομοίωση της τροχιάς, τον προσδιορισμό της απώλειας ταχύτητας και ενέργειας κατά τη διάρκεια της κρούσης. Παρακάτω παρατίθενται ενδεικτικά οι παράμετροι που επηρεάζουν τους συντελεστές αναπήδησης κατά (Heidenreih, 2004).

Πίνακας 1: Παράμετροι που επηρεάζουν τους συντελεστές αναπήδησης (Heidenreih, 2004)

Παράμετροι		R_v	R_n	R_t	R_E	Εδαφικό υλικό	Αναφορά
Τέμαχος	μάζα τεμάχους ↗		↘			σκυρόδεμα, βράχος	Ushiro et al., 2000
		↘				σκυρόδεμα	Kamijo, 2000
	γωνιότητα ↗ (από σφαιρικό σε γωνιώδες)		↘	↗ (ελαφρώς)	↘	γρανίτης	Wong et al., 2000
			30°<β<60° - 60°<β<75° ↗	↘ (ελαφρώς)	↘ (ελαφρώς)	γύψος	Chau et al., 1999b
Εδαφικό υλικό	Μέτρο Ελαστικότητας ↗		↗	↗		φυσικά πρανή	Pfeiffer & Bowen, 1989
			↗	↗		φυσικά πρανή	Formaro & al., 1990
			↗	↗		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., 1999a
		Φυσική υγρασία ↗		$w < w_{opt}$: - $w > w_{opt}$: ↗	$w < w_{opt}$: - $w > w_{opt}$: ↘	$w < w_{opt}$: - $w > w_{opt}$: ↘	έδαφος, γύψος

Πίνακας 2(Συνέχεια): Παράμετροι που επηρεάζουν τους συντελεστές αναπήδησης (Heidenreich, 2004)

Παράμετροι		R_v	R_n	R_t	R_E	Εδαφικό υλικό	Αναφορά
Κινηματικά χαρακτηριστικά	Γωνία πρόσκρουσης θ ↗ & κλίση πρανούς β ↘		↘	↗ (ελαφρώς)		ξύλο, βράχος	Wu, 1985
			↘ (ελαφρώς)			γρανίτης, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα	Wong et al., 2000
			↘			γύψος, έδαφος	
		↘	↘ (ελαφρώς)	-	↘	γρανίτης, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα	Chau et al., 2002
		↘	↘	-	↘	γύψος, έδαφος	
	ύψος ρίψης H ↗ & ταχύτητα πρόσκρουσης ↘		↘ (λιγότερο από τον $R_t, R_{E,t}$)	↘	↘ ($R_t, R_{E,t}$)	ασβεστόλιθος	Urciuoli, 1988
		↘				σκυρόδεμα	Kamijo, 2000
			↘ (ελαφρώς)	-		σκυρόδεμα, βράχος	Ushiro et al., 2000

Παρ' όλα αυτά, στην βιβλιογραφία συναντάται συχνά οι συντελεστές αναπήδησης να είναι άμεσα εξαρτημένοι από τις ιδιότητες του τεμάχους και της επιφάνειας του πρανούς. Για αυτόν τον λόγο, έχουν αναπτυχθεί πίνακες με βάση τους οποίους εκτιμούνται οι συντελεστές αναπήδησης βασιζόμενοι σε γεωλογικές περιγραφές του υλικού του τεμάχους και των χαρακτηριστικών του πρανούς (τραχύτητα, βαθμός συμπύκνωσης του εδαφικού υλικού ή φυτοκάλυψη).

Παρακάτω δίνεται ένας πίνακας παραμέτρων που επιδρούν στο φαινόμενο της αναπήδησης (Πίνακας 3).

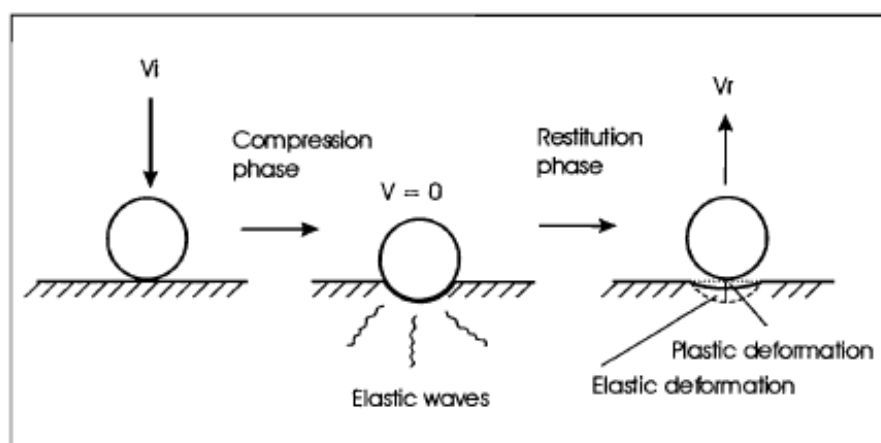
Πίνακας 3: Παράμετροι που επηρεάζουν το φαινόμενο της αναπήδησης (Labiouse&Descoedres, 1999)

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	

2.3.2. Μαθηματική Προσέγγιση Φαινομένου Αναπήδησης

Η περιστροφή, η κατεύθυνση και το ύψος της αναπήδησης εξαρτώνται από τις συνθήκες της κρούσης που και αυτές με τη σειρά τους εξαρτώνται από μια πληθώρα παραμέτρων. Ένα ορισμένο ποσό ενέργειας διαχέεται εξαιτίας της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς του εδάφους, της αντίστασης στην κύλιση και την ολίσθηση και της δημιουργίας ελαστικού κύματος κατά τη διάρκεια της κατάπτωσης (Gianni, 1992).

Γενικά, επιδρούν διαφορετικοί μηχανισμοί στην αντίσταση κίνησης, κάθετα και εφαπτομενικά, στην επιφάνεια της κλίσης του πρανούς και χρησιμοποιούνται διαφορετικές σχέσεις για τον υπολογισμό της κίνησης. Το μέτρο αντίστασης στην κάθετη στην κλίση του πρανούς επιφάνεια, ονομάζεται κάθετος συντελεστής αναπήδησης και αντίστοιχα στην παράλληλη ονομάζεται εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης.



Εικόνα 6: Παραμόρφωση του εδάφους κατά την πρόσπτωση σφαίρας. (Πηγή: Baishan Peng, 2000)

Λόγω της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς του υλικού που γίνεται η κρούση, ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης συνδέεται συνήθως με την απώλεια της ενέργειας. Ο εφαπτομενικός συντελεστής συσχετίζεται με την τριβή που αναπτύσσεται εξαιτίας της τραχύτητας της επιφάνειας κρούσης.

Υπάρχουν πολλά μοντέλα που προτάθηκαν για την περιγραφή του μηχανισμού κρούσης από τη μαθηματική σκοπιά, τα περισσότερα διαδεδομένα περιλαμβάνουν όρους ταχυτήτων και ενεργειών. Γενικά σύμφωνα με τον Newton ο συντελεστής αναπήδησης ορίζεται μόνο από την ταχύτητα.

2.3.2.1. Μοντέλο Ταχυτήτων

Η θεωρία του Νεύτωνα, για κεντρική κρούση σωματιδίων καθορίζει έναν συντελεστή αναπήδησης R ως:

$$R_v = \frac{v_{r,2} - v_{r,1}}{v_{i,2} - v_{i,1}} \quad (2.9)$$

Όπου,

v_i : η ταχύτητα των σωμάτων πριν από την κρούση

v_r : η ταχύτητα των σωμάτων μετά την κρούση

Οι τιμές του συντελεστή R κυμαίνονται από 0 έως 1, για $R=0$ η κρούση είναι τελείως πλαστική, ενώ για $R=1$ η κρούση είναι τελείως ελαστική.

Όταν η κρούση συμβαίνει μεταξύ ενός βραχοτεμάχους και του πρανούς, το οποίο $v_i = v_r = 0$, χρησιμοποιείται η απλοποιημένη σχέση:

$$R_v = \frac{v_r}{v_i} \quad (2.10)$$

Για καταπτώσεις με αρχικό τύπο κίνησης ελεύθερη πτώση, η παραπάνω σχέση παίρνει τη μορφή:

$$R = \sqrt{\frac{H_r}{H_i}} \quad (2.11)$$

Όπου, H_i , H_r : το ύψος έναρξης της κίνησης και το μέγιστο μετά την κρούση ύψος αναπήδησης.

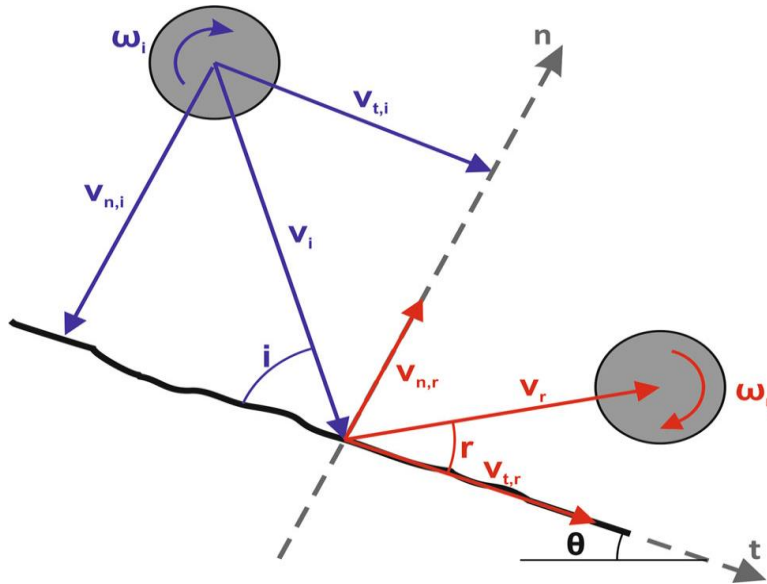
Επίσης επιτυγχάνεται καλύτερη προσομοίωση της αναπήδησης σύμφωνα με ορισμένους ερευνητές με τον διαχωρισμό σε κάθετη σε εφαπτομενική συνιστώσα του συντελεστή αναπήδησης. Τότε οι συντελεστές ορίζονται ως εξής:

$$R_n = -\frac{v_{n,r}}{v_{n,i}} \quad (2.12)$$

$$R_t = \frac{v_{t,r}}{v_{n,i}} \quad (2.13)$$

Όπου, v_n , v_t : η κάθετη και η εφαπτομενική συνιστώσα της ταχύτητας σε σχέση με την επιφάνεια κλίσης.

Στη διάρκεια της κρούσης, η κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας αλλάζει πρόσημο, οπότε για να οριστεί θετικά πρέπει να συμπεριληφθεί στη σχέση ο παράγοντας -1. Όπως αναμένεται και οι δύο συντελεστές αναπήδησης ορίζονται για ταχύτητα πριν από τη κρούση v_i μεγαλύτερη του μηδενός. Οι ταχύτητες που χρησιμοποιούνται για να ορίσουν τους συντελεστές αναπήδησης αντιστοιχούν στο κέντρο βάρους του τεμάχους και όχι στο σημείο επαφής της κρούσης.



Εικόνα 7: Οι ταχύτητες που αναπτύσσονται κατά την πρόσπτωση. (Πηγή: Asteriou & Tsiambaos, 2015)

Οι παραπάνω σχέσεις γενικά αφορούν τη μεταθετική κίνηση του κέντρου μάζας του τεμάχους, οι διάφορες τιμές του R_n λαμβάνονται ως σταθερές του υλικού χωρίς να συμπεριλαμβάνεται η εξάρτησή τους και από άλλους παράγοντες, όπως τα γεωλογικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά του πρανούς. Μία σημαντική έλλειψη των παραπάνω εκφράσεων είναι ότι δε λαμβάνουν υπόψη την περιστροφή του τεμάχους.

2.3.2.2. Μοντέλο Ενέργειών

Ένα άλλο μοντέλο που παρουσιάζεται αναφέρεται στην απώλεια της κινητικής ενέργειας κατά την κρούση. Οι Bozzolo και Pamini, (1986), Azzoni *et al.*, (1995) και οι Chau *et al.*, (1999) εκφράζουν το συντελεστή αναπήδησης μέσω της μεταθετικής ενέργειας του βραχοτεμάχους πριν και μετά την κρούση, ως εξής:

$$R_E = \frac{E_{trans,r}}{E_{trans,i}} = \frac{0,5 \cdot m \cdot v_r^2}{0,5 \cdot m \cdot v_i^2} = \frac{v_r^2}{v_i^2} \quad (2.14)$$

Όπου, m : η μάζα του τεμάχους

v_i, v_r : η ταχύτητα του τεμάχους πριν και μετά από την κρούση

Η παραπάνω εξίσωση δεν ισχύει σε περίπτωση μεταβολής της μάζας, εξαιτίας θραύσης του τεμάχου σε μικρότερα τεμάχια κατά την κρούση.

Ο Ursioli (1988) πρότεινε μια ελαφρά παραλλαγή αυτής της σχέσης, διαχωρίζοντας σε κανονική και εφαπτομενική συνιστώσα της κινητικής ενέργειας:

$$R_{E,n} = \frac{v_{n,r}^2}{v_{n,i}^2 + v_{t,i}^2} = \frac{v_{n,r}^2}{v_i^2} \quad (2.15)$$

$$R_{E,t} = \frac{v_{t,r}^2}{v_{n,i}^2 + v_{t,i}^2} = \frac{v_{t,r}^2}{v_i^2} \quad (2.16)$$

Δεδομένου ότι υπάρχει τριβή μεταξύ του βραχοτεμάχου και της επιφάνειας του πρανού, τμήμα της ενέργειας καταναλώνεται κατά την επαφή. Έτσι προκαλείται στροφή στο τεμάχος κατά τη διάρκεια της κεκλιμένης πρόσκρουσης, η οποία δεν είναι αμελητέα. Ένας ακόμη μαθηματικός ορισμός του συντελεστή αναπήδησης που καλύπτει το σύνολο της ενέργειας του βραχοτεμάχου, προτείνεται ως εξής:

$$R_{TE} = \frac{E_{tot,r}}{E_{tot,i}} = \frac{0,5 \cdot (m \cdot (v_{n,r}^2 + v_{t,r}^2) + I \cdot \omega_r^2)}{0,5 \cdot (m \cdot (v_{n,i}^2 + v_{t,i}^2) + I \cdot \omega_i^2)} \quad (2.17)$$

Όπου,

I : η ροπή αδράνειας ως προς το κέντρο μάζας του τεμάχου

ω : περιστροφική ταχύτητα του κέντρου μάζας του τεμάχου

Μέχρι σήμερα, λίγοι συγγραφείς (Azzoni and DeFreitas, 1995; Yoshida, 1998; και Chau *et al.*, 2002) έχουν ερευνήσει την περιστροφική ενέργεια κατά τη διάρκεια της πρόσκρουσης. Εάν χρησιμοποιηθούν οι παραπάνω σχέσεις η διεύθυνση αναπήδησης δεν μπορεί να καθοριστεί. Ενώ, ακόμα και αν η περιστροφή του τεμάχου ληφθεί υπόψη, οι συντελεστές αναπήδησης R_E και R_{TE} εξακολουθούν να είναι τιμές καθορισμένες για ένα συγκεκριμένο γεωλικό και ανεξάρτητες από άλλους παράγοντες, όπως η ταχύτητα και η γωνία πρόσκρουσης.

Για τον υπολογισμό της περιστροφικής ταχύτητας του τεμάχους μετά την κρούση (ω_r), είναι αναγκαίο να καθοριστεί η σχέση μεταξύ της μεταφορικής και περιστροφικής ενέργειας. Συνήθως ορίζεται $\omega_r \cdot r = v_r$. Αυτή η σχέση ωστόσο συνεπάγεται ότι το τέμαχος κυλά χωρίς να ολισθαίνει. Η θεώρηση αυτή δεν ισχύει για εδαφικά ή κοκκώδη, αλλά μόνο για βραχώδη πρανή. Ένα άγνωστο μέγεθος βέβαια παραμένει και η κατεύθυνση της αναπήδησης.

Ένα ακόμη μαθηματικό μοντέλο για να εκφραστεί ο συντελεστής αναπήδησης προτείνεται από τον Stronge, (1990). Ο συντελεστής αναπήδησης εκφράζεται από το λόγο του έργου των κάθετων δυνάμεων κατά τη διάρκεια της συμπίεσης που προκαλείται από την κρούση προς το έργο κατά τη διάρκεια της αποτόνωσης. Ο ορισμός αυτός είναι μια καλύτερη προσέγγιση για τον προσδιορισμό μιας σταθεράς υλικού σε σχέση με τους συντελεστές αναπήδησης που ορίζονται από το λόγο των ενεργειών ή των ταχυτήτων (Heidenreich, 2004). Ωστόσο, ο ορισμός αυτός δεν έχει ακόμη χρησιμοποιηθεί στα πλαίσια ερευνών καταπτώσεων.

Έως σήμερα φαίνεται να μην υπάρχει συμφωνία για το ποιά μαθηματική σχέση είναι καταλληλότερη για την περιγραφή του φαινομένου των καταπτώσεων. Οι περισσότερες χρησιμοποιούμενες σχέσεις είναι εκφρασμένες σε όρους ταχύτητας ή ενέργειας, ενώ συναντώνται στην βιβλιογραφία και σχέσεις που χρησιμοποιούν τον λόγο της ώθησης πριν και μετά την κρούση (Descoeudres και Zimmermann, 1987; Bozzolo και Pamini, 1988).

2.3.2.3. Τιμές Συντελεστών Αναπήδησης από τη Βιβλιογραφία

Όταν υπάρχει αδυναμία πραγματοποίησης επί τόπου δοκιμών ή μελέτης φυσικών καταπτώσεων, για την εύρεση των τιμών των συντελεστών που απαιτούνται ως παράμετροι εισόδου σε υπολογιστικά προγράμματα, χρησιμοποιούνται οι τιμές από τη βιβλιογραφία. Οι τιμές αυτές συνδέονται με τα χαρακτηριστικά του πετρώματος ή του εδάφους. Η αβεβαιότητα στον ορισμό των τιμών, φανερώνει το μεγάλο εύρος αυτών ακόμα και για υλικά παρόμοιων χαρακτηριστικών.

Ένα γενικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι τα βραχώδη υλικά έχουν μεγαλύτερες τιμές συντελεστών από ότι στα εδαφικά υλικά. Αξίζει να σημειωθεί ότι η κάλυψη του πρανού με βλάστηση, βοηθάει στην μείωση της τιμής του συντελεστή αναπήδησης.

Πίνακας 4: Τιμές συντελεστών αναπήδησης από τη βιβλιογραφία.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ	R	R _n	R _t	R _E	R _{TE}	ΣΧΟΛΙΑ
Habib (1977)	0,75-0,80					Από εμπειρία στην Ιταλία
	0,50-0,60					Από εμπειρία στη Νορβηγία
Descœudres & Zimmermann (1987)	0,40					Σε πρανές με αμπελώνες
	0,85					Σε βραχώδεις πρανές
Brioli (from Pasquero, 1987)	0,75-0,80					Βράχος πάνω σε βράχο
	0,20-0,35					Βράχος πάνω σε βράχο
Piteau & Clayton (1987)		0,80-0,90	0,65-0,75			Συμπαγής βράχος
		0,50-0,80	0,45-0,65			Κορήματα μαζί με μεγάλη τεμάχη βράχου
		0,40-0,50	0,35-0,45			Συμπαγή κορήματα μαζί με μικρά τεμάχη
		0,20-0,40	0,20-0,30			Πλαγιές με φυτοκάλυψη
Wu (1985)		0,20-0,80	0,50-0,75			Βράχος πάνω σε βράχο ή σε ξύλινη επιφάνεια
Heierli (1985)		0,95		0,90		Βράχος
		0,55		0,30		Χαλίκια (στρώση 35 cm)
		0,45		0,20		Χαλίκια (στρώση 70 cm)
		0,45		0,20		Κορήματα
Bozzolo & Pamini (1986)					0,70	Βράχος σε πρανές με κλίση 44°
					0,55	Κορήματα σε πρανές κλίσης 57°
Hoek (1987)		0,53	0,99			Συμπαγής βράχος
		0,40	0,90			Ασφαλτοστρωμένος δρόμος
		0,35	0,85			Χαλαρά κορήματα, ογκόλιθοι
		0,32	0,82			Κορήματα
		0,32	0,80			Κορήματα με φυτοκάλυψη
		0,30	0,80			Εδαφικό υλικό, λίγη βλάστηση
Urciuoli (1988)		0,05-0,35	0,50-	0,02-1		Βραχώδη τεμάχη

			1,00			ασβεστόλιθου
		~0	0,24			Κορήματα
Pfeiffer & Bowen (1989)		0,37-0,42	0,87- 0,92			Λεία, σκληρή επιφάνεια στρώσης 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 λιγοστή βλάστηση
		0,30-0,33	0,80- 0,83			Κορήματα με βλάστηση
		0,28-0,32	0,80- 0,83			Εδαφικό υλικό με λιγοστή βλάστηση
		0,28-0,32	0,78- 0,82			Εδαφικό υλικό με βλάστηση
Gianni (1992), Barbieri & al. (1988)		0,50	0,95			Βράχος
		0,35	0,85			Βράχος με ογκόλιθους
		0,30	0,70			Κορήματα με ομοιόμορφη κατανομή στοιχείων
		0,25	0,55			Έδαφος με βλάστηση
Azzoni & al. (1991)		0,45-0,85	0,45- 0,75			Κορήματα βραχώδους υλικού με κλίση πρανούς 30-80°
		0,30	0,66			Κορήματα με κλίση πρανούς 40°
		0,62	0,66			Κορήματα με έδαφος με κλίση πρανούς 25°
		1,22	0,80			Μεγάλα κορήματα με κλίση πρανούς 40°
Evans & Hungr (1993)		0,90	0,90			Μικρά τεμάχια σε καθαρό βράχο
		0,70	20,80			Μεγάλα τεμάχια σε κορήματα
Budetta & Santo (1994)		0,20	0,53			Βράχος (από βαθμονόμηση προγράμματος)
Azzoni & Freitas (1995)	0,51-0,92					Βραχώδη πρανή
	0,32-0,65					Πρανή με κορήματα
Azzoni & al. (1995)					0,75- 0,90	Βράχος (ασβεστόλιθος)
					0,55- 0,60	Κορήματα και έδαφος συμπυκνωμένα
					0,35- 0,45	Κορήματα και έδαφος χαλαρά
					0,45- 0,50	Μέτρια συγκολλημένα κορήματα με θραύσματα βράχου
					0,40- 0,50	Μέτρια συγκολλημένα κορήματα με κλαδιά δέντρων
					0,55-	Κορήματα με

					0,70	θραύσματα βράχου
					0,50-0,60	Έδαφος με φυτοκάλυψη
					<0,20	Τάφρος με λάσπη
					0,50-0,65	Επίπεδη επιφάνεια ή τεχνητά συμπυκνωμένο έδαφος
					0,75	Ασφαλτος
Gerber (1995)		0,17-0,43	0,45-0,88			Βράχος (ασβεστόλιθος)
Robotham et al. (1995)		0,315	0,712			Ασβεστόλιθος
		0,303	0,613			Χαλαρά ασβεστολιθικά κορήματα με μερική κάλυψη από βλάστηση
		0,315	0,712			Ασβεστόλιθος χωρίς βλάστηση
		0,251	0,489			Ασβεστόλιθος με κάλυψη από βλάστηση
Rayudu (1997)		0,33-0,77				Σφαιρικά τεμάχια από χάλυβα πάνω σε πλάκες από βράχο
Chau et al. (1998)	0,487	0,197	0,910			Βραχώδη πρανή
	0,393	0,290	0,567			Εδαφικά πρανή
	0,453	0,263	0,737			Πρανή από σκυρόδεμα
Kamijo (2000)		0,10-0,35				Κατακόρυφη πτώση τεμάχους 220kg σε σκληρή επιφάνεια
		0,10				Κατακόρυφη πτώση τεμάχους 800kg σε σκληρή επιφάνεια
Ushiro & al. (2000)		0,10-0,40	0,71			-
Jones & 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
		0,12-0,30	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			Οφιολιθικός βράχος, μέσης κλίσης 27,5°
		0,25	0,47			Αποσαθρωμένος γρανιτικός βράχος, μέσης κλίσης 36°
Cagnoli & Manga (2003)		0,15				Ελαφρόπετρες (γωνία πρόσπτωσης ίση με 80°)
		0,55				Ελαφρόπετρες (γωνία

						πρόσπτωσης ίση με 25°)
Dorren et al. (2005)		0,77	0,36			Δασική περιοχή (μέση κλίση πρανών 38°)
		0,70	0,26			Μη δασική περιοχή (μέση κλίση πρανών 38°)
Topal et al. (2007)		0,46	0,71			Ανδεσίτες (ανάδρομες αναλύσεις)
Labiouse & Heidenreich (2009)		0,003-0,257	0,07-1,00			Πειράματα εργαστηρίου και μέσης κλίμακας πάνω σε στρώση άμμου -δοκίμια σκυροδέματος
Spadari et al. (2012)		1,06	0,74			Αλκαλικός βασάλτης
		1,15	0,73			Χαλαζιακός ψαμμίτης
		1,18	0,78			Ψαμμίτης
Asteriou & Efthymiou (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
Saroglou et al. (2012)		0,48	0,77			Σφαιρικά δοκίμια από ασβεστόλιθο (εργαστήριο)
		0,46	0,83			Σφαιρικά δοκίμια από ασβεστόλιθο (ανάδρομες αναλύσεις)
Giacomini et al. (2012)		0,61-1,14	0,40-0,83			Ψαμμίτης
		0,59-0,93	0,52-0,83			Ιλυόλιθος
		0,11-0,22	0,40-0,80			Αποσαθρωμένα κορήματα
		0,41	0,64			Γαιάνθρακας
Ansari et al. (2013)		0,35	0,85			Βασάλτης (ανάδρομες αναλύσεις)
Asteriou et al. (2013)	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				Πράσινος σχιστόλιθος

	0,36	0,33				Μάργα
	0,56	0,54				Ένεμα SikaDur
	0,49	0,47				Ένεμα SikaGrout
	0,59	0,56				Πολυεστέρας

(*). Οι τιμές μεγαλύτερες της μονάδας προέκυψαν από ανάδρομες αναλύσεις όπου η αρχική ταχύτητα ήταν πολύ μικρή ή και μηδενική. Η τιμή πρακτικά εκφράζει την αλλαγή κατεύθυνσης παρά το συντελεστή αναπήδησης.

2.3.3. Συντελεστής Περιστροφής

Ορισμένοι ερευνητές χρησιμοποιούν ένα ακόμα συντελεστή στις αναλύσεις τους, τον συντελεστή περιστροφής. Ειδικά για πρανή με κλίση μικρότερη των 45° , στα οποία ο κύριος τύπος κίνησης που αναπτύσσεται είναι η κύλιση, αυτή προκαλεί επίσης απώλεια της ενέργειας ή αύξηση της ενέργειας εξαιτίας της βαρύτητας, η οποία μπορεί να περιγραφεί ως μια γρήγορη διαδοχή ελαφρών αναπηδήσεων και εναέριων περιστροφών, η αλληλεπίδραση στην κίνηση του τεμάχους περιγράφεται από το συντελεστή αυτό, εκφράζοντας την αντίσταση στην περιστροφή.

Ο μαθηματικός τύπος έχει εκφραστεί από τους (Giani et al., 2004) ως εξής:

$$v = \sqrt{v_0 - 2 \cdot g \cdot (I - I_0) \cdot (\sin \beta - \mu \cdot \cos \beta)} \quad (2.18)$$

Όπου,

β : η κλίση του πρανούς

$I - I_0$: η διανυόμενη απόσταση

v, v_0 : οι ταχύτητες του τεμάχους στην αρχή και στο τέλος της απόστασης $I - I_0$

μ : συντελεστής περιστροφής

2.3.4. Μείωση Ταχύτητας Τεμαχών κατά την Κατάπτωση

Η κίνηση σωματιδίων πάνω σε μια επιφάνεια με τριβή, μπορεί να προσομοιώσει μια κατάπτωση (Statham, 1978; Japan Road Association, 1983). Η Japan Road Association όρισε έναν συντελεστή, εκφράζοντας τη μέση μείωση της ταχύτητας κατά την επιφάνεια κλίσης του πρανούς, κατά την κατάπτωση ενός βραχοτεμάχους:

$$v = a \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \quad (2.19)$$

Όπου,

v: η ταχύτητα του τεμάχους

H : το ύψος της ελεύθερης πτώσης του τεμάχους

Όταν το τέμαχος δεν προσκρούει στην επιφάνεια κλίσης του πρανούς, ο συντελεστής λαμβάνεται $\alpha=1$ (ελεύθερη πτώση). Σε αντίθετη περίπτωση, η ταχύτητα v μειώνεται και άρα $\alpha < 1$.

Ο συντελεστής αυτός μπορεί να εκφραστεί και από τη σχέση:

$$a = \sqrt{1 - \frac{\mu}{\tan \beta}} \quad (2.20)$$

Όπου,

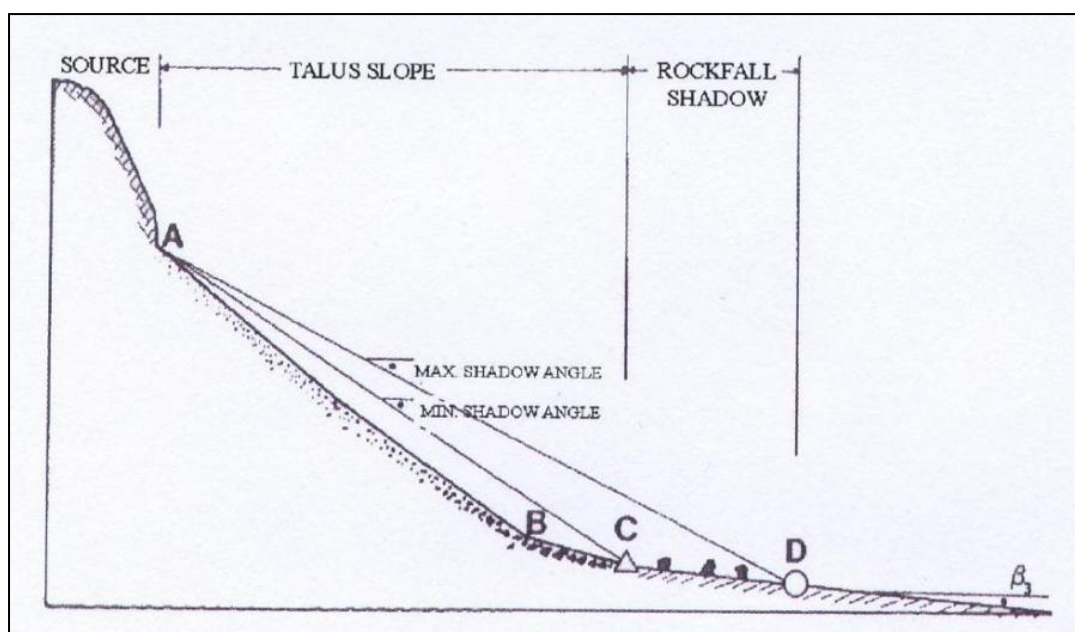
β : η γωνία κλίσης του πρανούς

μ : ο συντελεστής τριβής

Συνεκτιμώντας και όλα τα παραπάνω, ο συντελεστής α πρέπει να χαρακτηριστεί ως εμπειρική παράμετρος και να καθορίζεται από δοκιμές πεδίου ή ανάστροφες αναλύσεις.

2.3.5. Ζώνη Απόθεσης

Ο καθορισμός της γίνεται μέσω της γωνίας «σκίασης» (shadow angle) μεταξύ της ζώνης απόθεσης του βραχοτεμάχους και της κορυφής του πρανούς. Η τιμή της συγκεκριμένης γωνίας βοηθά για μια προκαταρκτική εκτίμηση της μέγιστης εκτροπής της κατάπτωσης. Έχει επεκταθεί η μέθοδος αυτή και στις τρεις διαστάσεις (κωνική μέθοδος) από τους Jaboyedoff & Labiouse (2003).



Εικόνα 8: Χαρακτηριστικό προφίλ διαδρομής βραχοπτώσεων. (Πηγή: Hungr 1989)

2.4. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση Δοκιμών Καταπτώσεων με Τριδιάστατη Ανάλυση Τροχιάς

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται διερευνήσεις καταπτώσεων που έχουν διεξαχθεί με καταγραφή της κίνησης στις τρεις διαστάσεις, με σκοπό την τριδιάστατη ανάλυση της τροχιάς.

- Τριδιάστατη πειραματική διερεύνηση βραχοπτώσεων. (Αστερίου, 2014)

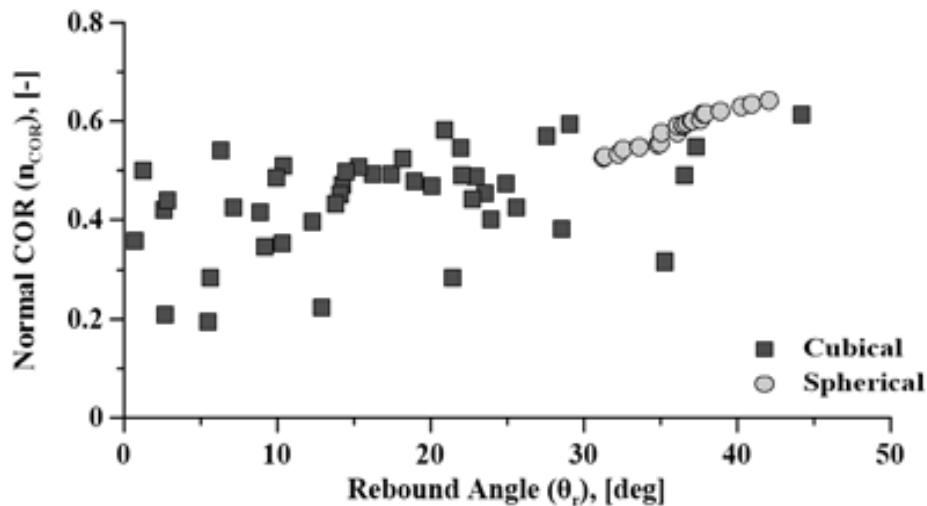
Παρακάτω γίνεται η παρουσίαση και εκτίμηση των αποτελεσμάτων :

Γενικώς υπάρχουν πολλοί ορισμοί για τον συντελεστή αναπήδησης (COR), επομένως όταν προσομοιώνεται μια βραχύπτωση με κάποιο λογισμικό πρόγραμμα, πρέπει να υπάρχει σαφής κατανόηση των ορισμών αυτών ώστε με κατάλληλες θεωρήσεις να εξαγάγουμε λογικές τιμές. Χρησιμοποιώντας τις προτεινόμενες τιμές του συντελεστή αναπήδησης καταλήγουμε σε κάποια σταθερά αποτελέσματα, στη σχετική βιβλιογραφία αναφέρεται ότι ο συντελεστής αναπήδησης εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους (ταχύτητα, γωνία πρόσπτωσης, σχήμα τεμάχους, μάζα κλπ.).

Η επιρροή του σχήματος παίζει σημαντικό ρόλο στις τιμές του συντελεστή αναπήδησης (COR). Όπως έχουν προκύψει οι μέσες τιμές του κινηματικού συντελεστή αναπήδησης v_{COR} είναι 0.44 και 0.76 για τα κυβικά και τα σφαιρικά δοκίμια αντίστοιχα. Ο κινηματικός συντελεστής αναπήδησης v_{COR} πρέπει να χρησιμοποιείται γενικά με συσχετισμούς τιμών, γιατί περιέχει περισσότερες σταθερές τάσεις σε σύγκριση με τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης n_{COR} (Asteriou et al., 2012).

Ένα άλλο φαινόμενο που επιδρά σημαντικά στο σχήμα είναι η γωνία αναπήδησης όπως φαίνεται και στο (Διάγραμμα 1), τα άνω όρια για τις γωνίες αναπήδησης για τα κυβικά αλλά και τα σφαιρικά δοκίμια είναι παρόμοια. Ωστόσο όσον αφορά τα σφαιρικά δοκίμια, διακρίνεται μια συγκέντρωση τιμών σε ένα στενό εύρος, σε αντίθεση με τα κυβικά δοκίμια όπου οι γωνίες αναπήδησης έχουν χαμηλότερες τιμές προσεγγίζοντας τις 0°, αυτό το φαινόμενο μπορεί να υποδηλώνει ολίσθηση του τεμάχους αντί για αναπήδηση. Ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης n_{COR} επηρεάζεται κι αυτός σημαντικά από το σχήμα του δοκιμίου όπως φαίνεται και πάλι στο (Διάγραμμα 1). Η αυξανόμενη τάση του κάθετου

συντελεστή αναπήδησης n_{COR} όσο αυξάνεται και η γωνία αναπήδησης, όπως φαίνεται στο σχήμα περιγράφει την απόκριση των δύο σχημάτων (σφαιρικό, κυβικό). Αυτό είναι περισσότερο εμφανές για τα σφαιρικά τεμάχια, λόγω του ότι τεμάχια αυτού του σχήματος κατά την διαμόρφωσή τους δεν επηρεάζονται σημαντικά από τον αριθμό των επαναλήψεων της δοκιμής.



Διάγραμμα 1: Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει γωνίας αναπήδησης. (Asteriou et al., 2012)

Η εφαπτομενική συνιστώσα του συντελεστή αναπήδησης έχει γενικά σταθερές τιμές και για τα δύο σχήματα, ενώ καμία τέτοια τάση δε φαίνεται για την γωνία αναπήδησης. Με βάση το συνολικό ορισμό της ενέργειας, οι τιμές του συντελεστή αναπήδησης COR μπορούν να υπολογιστούν με μια σωστή θεώρηση της περιστροφικής κίνησης επεκτείνοντας την (Εξίσωση 2.21) σε τριδιάστατο χώρο.

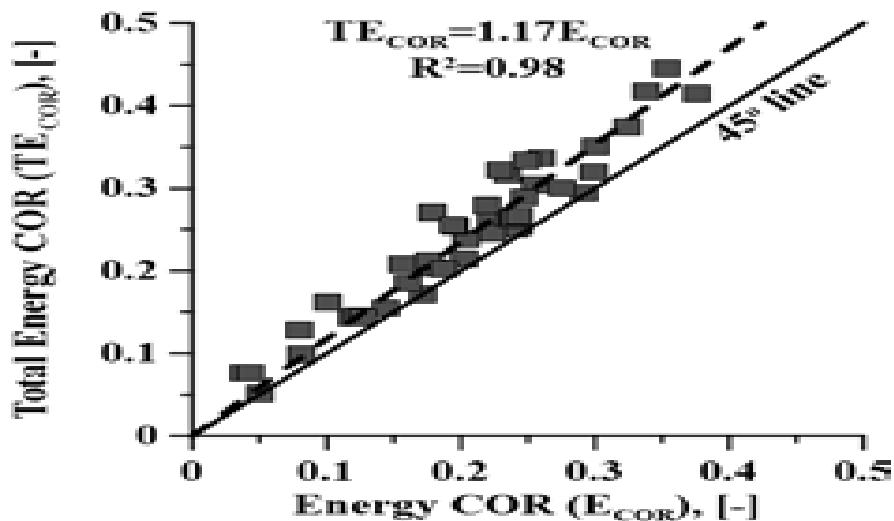
$$ET_{COR} = (0,5 \cdot m \cdot v_r^2 + I \cdot \omega_r^2) / (0,5 \cdot m \cdot v_i^2 + I \cdot \omega_i^2) \quad (2.21)$$

Όπου,

I : ροπή αδράνειας

ω : γωνιακή ταχύτητα

Ο συνολικός συντελεστής ενέργειας ET_{COR} σε σύγκριση με τον συντελεστή ενέργειας E_{COR} παρουσιάζεται στο (Διάγραμμα 2).

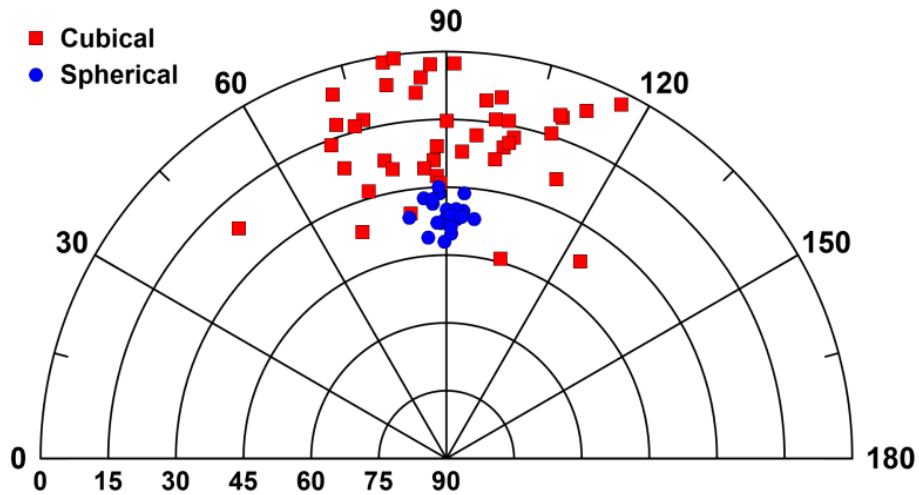


Διάγραμμα 2: Η συνολική ενέργεια E_{TCOR} συναρτήσει της ενέργειας E_{COR} για κυβικά δοκίμια. (Asteriou et al., 2012)

Επιπλέον, στη γραφική παράσταση η γραμμή των 45° αποτελεί το όριο, πέρα από το οποίο τα αποτελέσματα φτάνουν στην μεγαλύτερη τους τιμή. Είναι προφανές ότι ο συντελεστής συνολικής ενέργειας E_{TCOR} παρουσιάζει τιμές μεγαλύτερες από τον συντελεστή ενέργειας E_{COR} , οι δύο αυτές τιμές ενέργειας συσχετίζονται με το γραμμικό μοντέλο όπως φαίνεται στο (Διάγραμμα 2), το οποίο επιτρέπει την εκτίμηση της συνολικής κινητικής ενέργειας του συντελεστή αναπήδησης που είναι εύκολο να την αποκτήσουν εξ ορισμού.

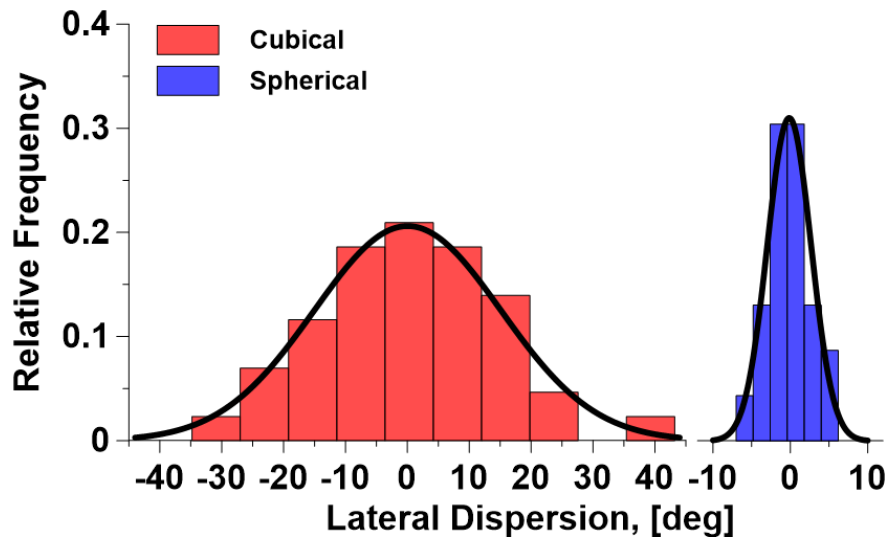
Όσον αφορά την εκτροπή του δοκιμίου και την επίδραση του σχήματος στην εκτροπή, έγινε σύγκριση αποτελεσμάτων των σφαιρικών δοκιμίων με αποτελέσματα τα κυβικά δοκίμια, προερχόμενα από σειρές δοκιμών.

Από δοκιμές με οριζόντιο επίπεδο πρόσκρουσης, γίνεται φανερό ότι τα κυβικά δοκίμια παρουσιάζουν σημαντική διασπορά στην εκτροπή σε σχέση με τα σφαιρικά δοκίμια (Διάγραμμα 3).



Διάγραμμα 3: Διεύθυνση τροχιάς μετά την κρούση για κυβικά και σφαιρικά δοκίμια.

Τα αποτελέσματα εκτροπής των σφαιρικών δοκιμίων και σε αυτήν την περίπτωση ακολουθούν την κανονική κατανομή. Ενώ ένα κυβικό δοκίμιο έχει 68% πιθανότητα να εκτραπεί από την διεύθυνση τροχιάς του κατά $\pm 15^\circ$, ένα σφαιρικό έχει 95% πιθανότητα να εκτραπεί λιγότερο από $\pm 10^\circ$ (Διάγραμμα 4).



Διάγραμμα 4: Ιστόγραμμα εκτροπής της διεύθυνσης μετά την κρούση για κυβικά και σφαιρικά δοκίμια.

Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα δοκιμών σφαιρικών δοκιμών με επίπεδα πρόσκρουσης διαφορετικής διεύθυνσης, η μεταβολή της διεύθυνσης του επιπέδου πρόσπτωσης επηρεάζει τη διεύθυνση της τροχιάς μετά την κρούση. Η επίδραση αυτή είναι εντονότερη στα κυβικά δοκίμια από ότι στα σφαιρικά. Παρατηρήθηκε επίσης, ότι ενώ στα κυβικά δοκίμια το εύρος της εκτροπής αυξανόταν σημαντικά με τη μεταβολή του προσανατολισμού του επιπέδου πρόσκρουσης, στα σφαιρικά δοκίμια το εύρος εκτροπής μεταβάλλεται ελάχιστα ή και παραμένει σταθερό.

Κατά το στάδιο σχεδιασμού μέτρων αναχαίτισης βραχοπτώσεων είναι σύνηθες η εκτίμηση να γίνεται για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% και η εκτροπή του τεμάχους μετά την κρούση έχει σημαντική επίδραση. Στις διδιάστατες αναλύσεις αυτό δεν μπορεί να ληφθεί υπόψη, και αυτό μπορεί να αποβεί καταστροφικό για τις γειτονικές κατασκευές σε πρηνή που μπορεί να συμβεί μια φυσική κατάπτωση βράχων.

- Ημι-εμπειρική Μέθοδος Προσδιορισμού της Εκτροπής. (Μώρου, 2013)

Η Ημι-εμπειρική Μέθοδος Προσδιορισμού της Εκτροπής, (Μώρου, 2013), καταρτίστηκε για να προσδιοριστεί πιθανοτικά η διεύθυνση ενός τεμάχους μετά την κρούση.

Για δεδομένη διεύθυνση πρηνούς και διεύθυνση τροχιάς, χρησιμοποιώντας τη σχέση (2.22) προσδιορίζεται το γινόμενο $b \cdot \Delta\epsilon$.

$$b \cdot \Delta\epsilon = 0,00745 \cdot \Delta\beta \frac{\Delta\beta}{90} + 0,171 \cdot \Delta\beta + 1,402 \quad (2.22)$$

Όπου, $\Delta\beta$: η διαφορά διεύθυνσης κίνησης του τεμάχους από τη φορά μέγιστης κλίσης του επιπέδου πρόσπτωσης ($^{\circ}$).

Η παράμετρος b , περιγράφεται από την κατανομή Rayleigh και κυμαίνεται στο διάστημα $[0,320 \div 0,398]$, έτσι θεωρήθηκε ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέση τιμή ($b=0,35$).

Επομένως, έχοντας υπολογίσει το γινόμενο $b \cdot \Delta\epsilon$ και θέτοντας $b=0,356$, εκτιμάται το εύρος της εκτροπής ($\Delta\epsilon$) του τεμάχους.

Επιπλέον, θεωρώντας το $b=0,35$ και $\mu = b \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}}$, υπολογίζεται η κανονικοποιημένη μέση τιμή της διεύθυνσης του τεμάχους μετά την κρούση από τη σχέση :

$$Normalized(\beta_r) = b \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} \rightarrow Normalized(\beta_r) = 0,356 \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} \rightarrow Normalized(\beta_r) = 0,446$$

Προκειμένου η κανονικοποιημένη μέση τιμή της διεύθυνσης του τεμάχους μετά την κρούση, να εκφραστεί σε μοίρες χρησιμοποιείται η σχέση (2.23).

$$Normalized(x_i) = \frac{x_i - min}{max - min} \quad (2.23)$$

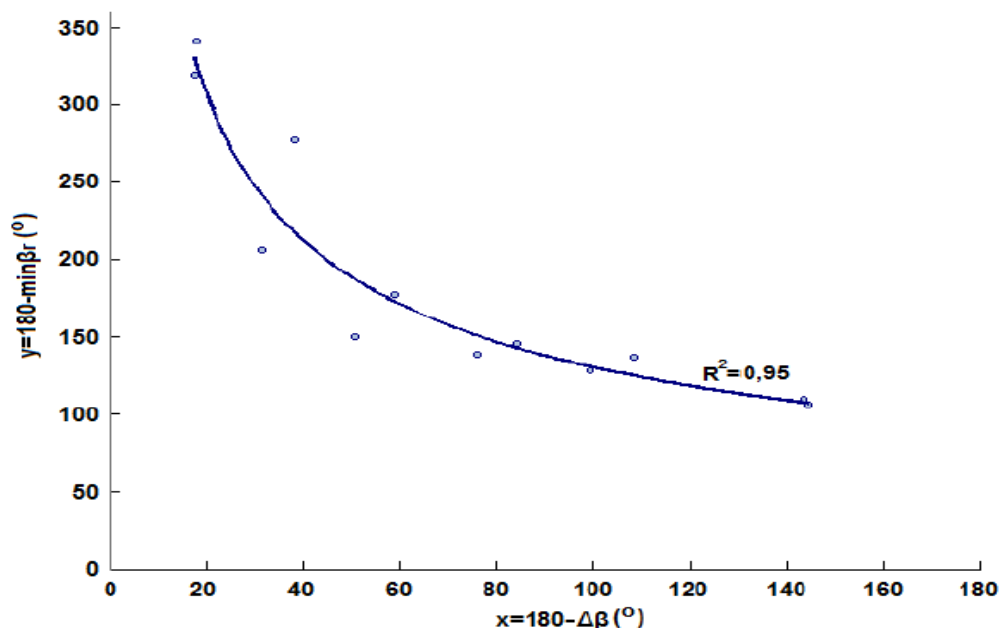
Όπου,

$Normalized(x_i)$: η κανονικοποιημένη τιμή της I μεταβλητής του δείγματος

x_i : η τιμή της i μεταβλητής

max : η μέγιστη τιμή της μεταβλητής

min : ελάχιστη τιμή της μεταβλητής



Διάγραμμα 5: Διάγραμμα προσδιορισμού ελάχιστης τιμής διεύθυνσης μετά την κρούση ($min\beta_r$) (Μώρου, 2014).

Επομένως, η ελάχιστη τιμή της διεύθυνσης μετά την κρούση ($\min\beta_r$), προκύπτει από τη σχέση (2.24):

$$\min\beta_r = 180 - 1498,5 \cdot (180 - \Delta\beta)^{-0,53} \quad (2.24)$$

Όπου, $\Delta\beta$: η διαφορά διεύθυνσης πρόσπτωσης του τεμάχους από τη φορά μεγίστης κλίσης του επιπέδου πρόσπτωσης (0).

Τελικά, η μέση τιμή της διεύθυνσης του τεμάχους μετά την κρούση προκύπτει ως:

$$\beta_r = \text{Normalized}(\beta_r) \cdot \Delta\epsilon + \min\beta_r \rightarrow \beta_r = 0,446 \cdot \Delta\epsilon + \min\beta_r \quad (2.25)$$

Όπου, $\Delta\epsilon$: το εύρος των διευθύνσεων μετά την κρούση (0)

$\min\beta_r$: η ελάχιστη τιμή διεύθυνσης μετά την κρούση (0)

Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να υπολογιστεί εμπειρικά η μέση τιμή της διεύθυνσης του τεμάχους μετά την κρούση ανάλογα με τη διεύθυνση του επιπέδου πρόσκρουσης και τη διεύθυνση πτώσης του τεμάχους, αλλά και η πιθανότητα εκτροπής ενός τεμάχους προς κάποια συγκεκριμένη διεύθυνση. Επομένως, δίνεται η δυνατότητα μιας προκαταρκτικής μελέτης οριοθέτησης των περιοχών και τοποθέτησης των κατάλληλων μέτρων προστασίας.

Εφαρμογή της Ημι-Εμπειρικής Μεθόδου

Προκειμένου να εξεταστεί η καλή προσαρμογή της ημι-εμπειρικής μεθόδου στα εργαστηριακά αποτελέσματα παρατέθηκαν τέσσερις εφαρμογές. Η πρώτη αφορούσε κατάπτωση τεμάχους με διαφορά διεύθυνσης ρίψεως από τη ΦΜΚ του επιπέδου πρόσκρουσης 30^0 , η δεύτερη με διαφορά διεύθυνσης 70^0 , η τρίτη με 120^0 και η τέταρτη 150^0 .

Πίνακας 5: Αποτελέσματα δοκιμών προσδιορισμού της τροχιάς πριν και μετά την κρούση.

ΔΙΑΦΟΡΑ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗΣ Δβ (^ο)	ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΚΡΟΥΣΗ ΑΠΟ ΤΟ ΕΜΠΕΙΡΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ			
	b·Δε	ΕΥΡΟΣ Δε (^ο)	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ minβ _r (^ο)	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ μ (^ο)
30	6,5	18,4	74,9	83,1
70	13,6	38,1	56,1	73,1
120	26,3	73,9	9,1	42,1
150	58,6	164,6	-66,8	6,6

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν, ήταν πολύ κοντά με αυτά από τις εργαστηριακές δοκιμές κάτι που φανερώνει την καλή προσαρμογή της μεθόδου.

Η ελάχιστη τιμή της διεύθυνσης του δοκιμίου μετά την κρούση, προκύπτει με δεδομένη διεύθυνση ρίψης 090^ο, για αριστερόστροφη στροφή του επιπέδου πρόσπτωσης. Προκειμένου η μέση τιμή της διεύθυνσης του τεμάχους μετά την κρούση να αναχθεί στο γεωγραφικό Βορρά, με δεδομένο το αζιμούθιο του επιπέδου πρόσπτωσης, πρέπει να γίνει στροφή προς την πραγματική φορά μεγίστης κλίσης του επιπέδου (ΦΜΚ).

Εντούτοις διαπιστώθηκε ότι απαιτείται επέκταση αυτής της ημι-εμπειρικής μεθόδου δεδομένου ότι δεν υπεισέρχεται η επίδραση της κλίσεως του επιπέδου στον υπολογισμό των αποτελεσμάτων.

- Ημι-αυτόματος καθορισμός της τροχιάς των βραχοπτώσεων. (*Klette&Volkwein, 2013*)

Ο σκοπός της διερεύνησης αυτής ήταν η ακριβέστερη πρόβλεψη της τροχιάς των καταπτώσεων, ώστε να χρησιμοποιηθεί για τη βαθμονόμηση και την αξιολόγηση των αριθμητικών μοντέλων.

Η ανάλυση της κίνησης έγινε με τη χρήση ενός νέου αισθητήρα, ο οποίος μπορεί να εγκατασταθεί μέσα στα φυσικά τεμάχια. Περιλαμβάνει ένα επιταχυνσιόμετρο που καταγράφει στις τρεις διαστάσεις, ένα τριδιάστατο αισθητήρα περιστροφής (2000°/s) και

ένα σύστημα εντοπισμού θέσης σε ένα τοπικό σύστημα αναφοράς (local positioning system-LPS). Η λειτουργία του LPS μοιάζει αρκετά με αυτή του GPS. Ένας κινούμενος πομπός εκπέμπει σήματα τα οποία καταγράφονται από πολλαπλούς συγχρονισμένους δέκτες οι οποίοι τοποθετούνται γύρω από το χώρο των δοκιμών. Με βάση αυτά τα δεδομένα υπολογίζεται η διδιάστατη θέση, χωρίς πληροφορία ύψους. Η αναμενόμενη ακρίβεια τροχιάς κυμαίνεται από 0,5 έως 1 m. Οι περιορισμοί της συγκεκριμένης εφαρμογής είναι το περιορισμένο εύρος του σήματος του LPS και η απαίτηση για ανεμπόδιστο οπτικό πεδίο μεταξύ του αισθητήρα LPS και των δεκτών.

- Πειραματική μελέτη καταπτώσεων σε τμήματα με εγκατεστημένα μεταλλικά πλέγματα σε περιοχή ανοιχτής εξόρυξης. (Giacomini et al., 2012)

Η παρούσα μελέτη παρουσιάζει επί τόπου δοκιμές μεγάλης κλίμακας (full scale) που πραγματοποιήθηκαν σε ορυχείο ανοιχτής εξόρυξης στην περιοχή της Νέας Νότιας Ουαλίας, στην Αυστραλία. Σκοπός της έρευνας ήταν η βελτίωση εφαρμογής μεταλλικών πλεγμάτων για την προστασία έναντι καταπτώσεων σε περιβάλλον ορυχείου.

Απελευθερώθηκαν τεμάχια από την κορυφή δύο θέσεων. Στη μία ήταν εγκατεστημένο σύστημα πλέγματος για περισσότερο από έξι χρόνια σε καλή κατάσταση και στην άλλη θέση ήταν το φυσικό πρανές. Η κλίση του πρανούς ήταν περίπου 70° , και το ύψος του κυμαινόταν από 40m έως 50m. Το γεωλογικό προφίλ των δύο αυτών τμημάτων περιλάμβανε επτά διαφορετικές στρώσεις. Στην κορυφή εμφανιζόταν ένας σχηματισμός ο οποίος αποτελούνταν από τρεις κύριες στρώσεις ψαμμίτη, πηλόλιθο και κατακερατισμένο πηλόλιθο. Αμέσως κάτω από το σχηματισμό αυτό υπήρχε ακολουθία στρωμάτων ψαμμίτη και πηλόλιθου, στη συνέχεια πηλόλιθου και αργίλου και τέλος, το κατώτερο στρώμα αποτελούνταν από συμπαγή βράχο.

Χρησιμοποιήθηκαν δεκατρία τεμάχια σκυροδέματος, μάζας 44,5 kg, το σχήμα των οποίων ήταν σύμφωνο με αυτό που προτείνεται από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Τεχνικών Εγκρίσεων (EOTA) για την μελέτη των φραχτών ανάσχεσης. Το μέγεθος τους επιλέχτηκε να είναι περίπου 30 cm με βάση τα στοιχεία προηγούμενων καταπτώσεων. Τα τεμάχια ήταν βαμμένα με κίτρινο χρώμα και με ένα μοναδικό μοτίβο σε κάθε μια από τις έξι

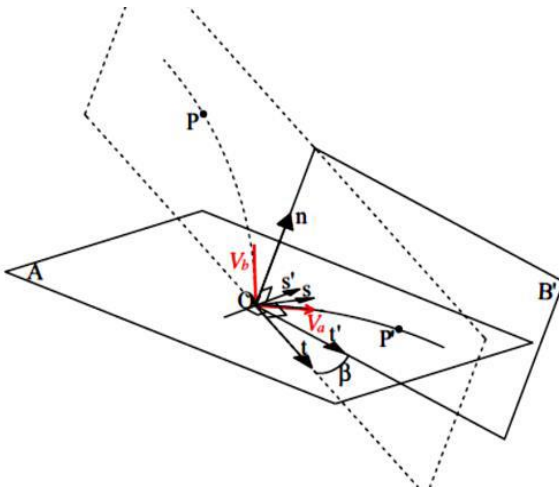
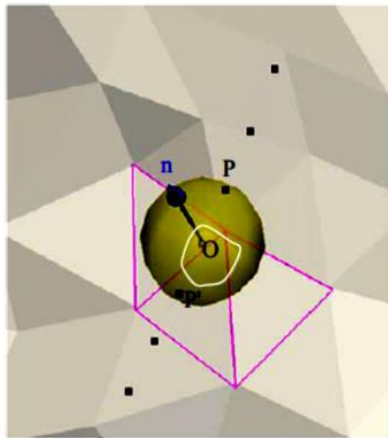
πλευρές, προκειμένου να μετρηθεί και η περιστροφική κίνηση κατά τη διάρκεια της πτώσης.

Με συγχρονισμένες φωτογραφικές μηχανές ταχείας λήψης καταγράφηκαν οι τροχιές των τεμαχών και πραγματοποιήθηκε τριδιάστατη ανάλυση, χρησιμοποιώντας φωτογραμμετρικές μεθόδους. Για την καταγραφή της κίνησης στην κορυφή του πρανούς χρησιμοποιήθηκαν φωτογραφικές μηχανές Canon EOS 7D (60fps, ανάλυση 720×1280 pixel και 45 mm εστιακό βάθος), ενώ στη βάση του πρανούς χρησιμοποιήθηκαν φωτογραφικές μηχανές Ortronics CR 600 (500fps, ανάλυση 1024×1080 pixel και εστιακό βάθος 35 mm). Η επικάλυψη των δυο αυτών συστημάτων καταγραφής ήταν περίπου 10 m, ώστε να μπορεί να γίνει η σύνθεση της κίνησης. Ακόμη δύο φωτογραφικές μηχανές υψηλής ταχύτητας λήψης (Phantom v 9.1 – 1000 fps, 1632×1200 pixel– και Phantom MiroeX - series – 500 fps, 800×600 pixel) με διαφορετικούς φακούς χρησιμοποιήθηκαν για την καταγραφή των λεπτομερειών της πτώσης καθώς και των αναπηδήσεων. Όλες οι φωτομηχανές τοποθετήθηκαν σε απόσταση 40 m έως 50 m μπροστά από τα πρανά. Προκειμένου να γίνει η αναγωγή κλίμακας και ο εντοπισμός της κίνησης σε ένα σύστημα αναφοράς, δέκα σημεία ελέγχου σημάνθηκαν επί του πρανούς και μετρήθηκαν από ηλεκτρονικό θεοδόλιχο ακριβείας.

Στο σύνολο πραγματοποιήθηκαν δεκαπέντε δοκιμές, χρησιμοποιώντας τα δεκατρία τεμάχια σκυροδέματος και δύο φυσικά τεμάχια από ψαμμίτη. Μετά από φωτογραμμετρική επεξεργασία προέκυψαν οι τριδιάστατες συντεταγμένες με ακρίβεια $\pm 15 - 19$ mm στην πρώτη περιοχή και $\pm 18 - 21$ mm στην δεύτερη.

Στη συνέχεια οι ταχύτητες υπολογίστηκαν από τις συντεταγμένες της τροχιάς των τεμαχών, ως το πηλίκο της απόστασης που διανύθηκε μεταξύ δύο καρέ προς το χρόνο λήψης μεταξύ αυτών. Ξεχωριστά μελετήθηκε η περιστροφική κίνηση των τεμαχών. Από τις εικόνες μπορεί να προκύψει κάθε φορά μόνο η κυρίαρχη περιστροφή, έτσι η γωνιακή ταχύτητα υπολογίστηκε μετρώντας τον αριθμό των καρέ μέχρι να ολοκληρωθεί ένα τέταρτο ή μισή από την περιστροφή. Για τον καθορισμό των συντελεστών αναπήδησης καθορίστηκε ένα μέσο επίπεδο πρόσπτωσης με τη χρήση της μεθόδου του τριγωνισμού. Αρχικά, προσδιορίστηκε το σημείο κρούσης και ακολούθως, τα τρίγωνα που

αλληλεπιδρούσαν με το τέμαχος. Η τροχιά του τεμάχους πριν και μετά την κρούση παρέμενε σε δύο επίπεδα κάθετα στο επίπεδο που προέκυπτε από τα τρίγωνα που αλληλοεπιδρούσαν με το τέμαχος.



Εικόνα 9: Επίπεδα πρόσπτωσης του βραχοτεμάχους. (Πηγή: Giakomini et al., 2012)

Συνολικά καταγράφηκαν 53 αναπήδησεις, εκ των οποίων στις 49 ήταν δυνατός ο υπολογισμός της κάθετης και εφαπτομενικής συνιστώσας του συντελεστή αναπήδησης. Οι τιμές των συντελεστών που προέκυψαν ήταν σύμφωνες με αυτούς από τη βιβλιογραφία.

Πίνακας 6: Αποτελέσματα δοκιμών σε περιοχή ανοιχτής εξόρυξης. (Πηγή: Giakomini et al., 2012)

Material	Site	N. of impacts	k_n	St_dev	k_t	St_dev
Sandstone	Site 1	2	1.14	0.2	0.4	0.15
Mudstone	Site 1	5	0.61	0.16	0.78	0.11
	Site 2	2	0.59	0.09	0.52	0.08
Mudstone debris	Site 1	1	0.11	/	0.8	/
Coal	Site 2	1	0.41	/	0.64	/
Sand./Mud.	Site 1	6	0.71	0.33	0.83	0.11
	Site 2	10	0.61	0.29	0.75	0.17
Mud./Sand.	Site 1	4	0.93	0.42	0.63	0.10
Debris	Site 1	5	0.22	0.08	0.4	0.13
	Site 1	4	0.13	0.05	0.15	0.13

- Αξιολόγηση της ποιότητας της τριδιάστατης ανάλυσης σε μεγάλης κλίμακας δοκιμές καταπτώσεων βράχων. (A. Volkwein et al., 2012)

Σε αυτά τα πειράματα έγινε ο προσδιορισμός της τριδιάστατης τροχιάς ενός βραχοτεμάχους κατά μήκος ενός πρανούς και στη συνέχεια αξιολογήθηκαν διαφορετικές μεθοδολογίες, οι οποίες διαφέρουν στον καθορισμό των συντελεστών κλίμακας μεταξύ των εικόνων και της πραγματικότητας. Για αυτό το λόγο, τοποθετήθηκαν στο πρανές κλίμακες και στόχοι γνωστών διαστάσεων.

Οι μεθοδολογίες που εφαρμόστηκαν περιγράφονται ως εξής:

- 1) Η ψηφιακή εικόνα διορθώνεται λόγω κλίμακας με βάση το στόχο στον οποίο αναγράφεται η κλίμακα, στη συνέχεια επαναπροσδιορίζεται στο επίπεδο της τροχιάς του βραχοτεμάχους από τη μετρημένη θέση της πλησιέστερης αναπήδησης σε σχέση με την απόσταση από τη φωτομηχανή. Η απόσταση μεταξύ της

φωτομηχανής, των στόχων και του βραχοτεμάχους, προκύπτει από τοπογραφικές μετρήσεις.

2) Η ψηφιακή εικόνα διορθώνεται λόγω κλίμακας με βάση τέσσερις στόχους και σαν συντελεστής κλίμακας λαμβάνεται ο μέσος όρος τους.

3) Η ψηφιακή εικόνα διορθώνεται λόγω κλίμακας με βάση την τροχιά του τεμάχους που μελετάται. Ο συντελεστής κλίμακας κάθε τροχιάς υπολογίζεται με την εξισορρόπηση των μέσων συντελεστών κλίμακας που προκύπτουν από τους δύο πλησιέστερους και τους δύο απομακρυσμένους στόχους, σε σχέση με τη μέση απόσταση από αυτήν.

4) Ίδια μεθοδολογία με την τρίτη αλλά με διαφορετικούς συντελεστές κλίμακας κατά μήκος της τροχιάς.

Έχει αποδειχτεί ότι η αναγωγή κλίμακας από απευθείας μετρήσεις των στόχων με αναγραφόμενη κλίμακα είναι ακριβέστερη. Εάν θεωρηθεί ένα σταθερό επίπεδο τροχιάς το οποίο δεν λαμβάνει υπόψη τις πλευρικές αποκλίσεις, υπεισέρχονται σφάλματα στην ανάλυση. Άρα, ένας συνδυασμός των μεθοδολογιών (1) και (4) θεωρείται ότι έχει καλύτερα αποτελέσματα. Το σφάλμα από την αναγωγή κλίμακας των εικόνων αξιολογείται με τη σύγκριση της κατακόρυφης συνιστώσας της τροχιάς με το θεωρητικό πολυώνυμο σύμφωνα με την βαρύτητα. Οι διαφορετικές μεθοδολογίες που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της θέσης του κέντρου βάρους των τεμαχών είχαν μικρό σφάλμα, αποδεκτό για την ανάλυση της τροχιάς. Όμως, κατά τον υπολογισμό των στιγμιαίων ταχυτήτων προκύπτει μη αποδεκτό σφάλμα και για αυτό το λόγο με ανάλυση παλινδρόμησης βελτιστοποιούνται τα αποτελέσματα.

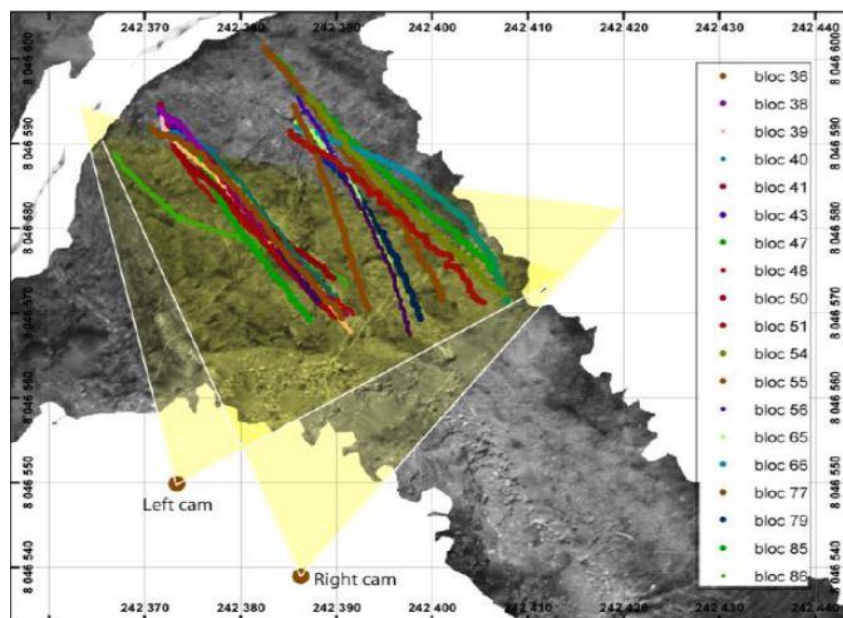
- Τριδιάστατη παρακολούθηση τεμαχών καταπτώσεων σε διαβρωμένο ηφαιστειακό περιβάλλον, Ταϊτή, Γαλλική Πολυνησία. (Dewez et al., 2010)

Η βασική ιδέα ήταν η παρακολούθηση της τροχιάς κατάπτωσης βραχοτεμαχών και έπειτα η χρησιμοποίηση των αποτελεσμάτων για τη βαθμονόμηση αριθμητικών μοντέλων.

Απελευθερώθηκαν ενενήντα τεμάχια από βασάλτη σε πρηνές 150 m, το οποίο αποτελούνταν από φλέβες βασάλτη, κορήματα και διαβρωμένα τμήματα. Τα τεμάχια ήταν σφαιρικά, παραλληλεπίπεδα ή ελλειψοειδή, ενώ η μάζα τους κυμαινόταν από 300 kg έως και μεγαλύτερη των 5000 kg. Το σημείο ρίψης επιλέχτηκε ώστε οι αναπηδήσεις να γίνονται στα τμήματα βασάλτη και στις περιοχές κορημάτων.

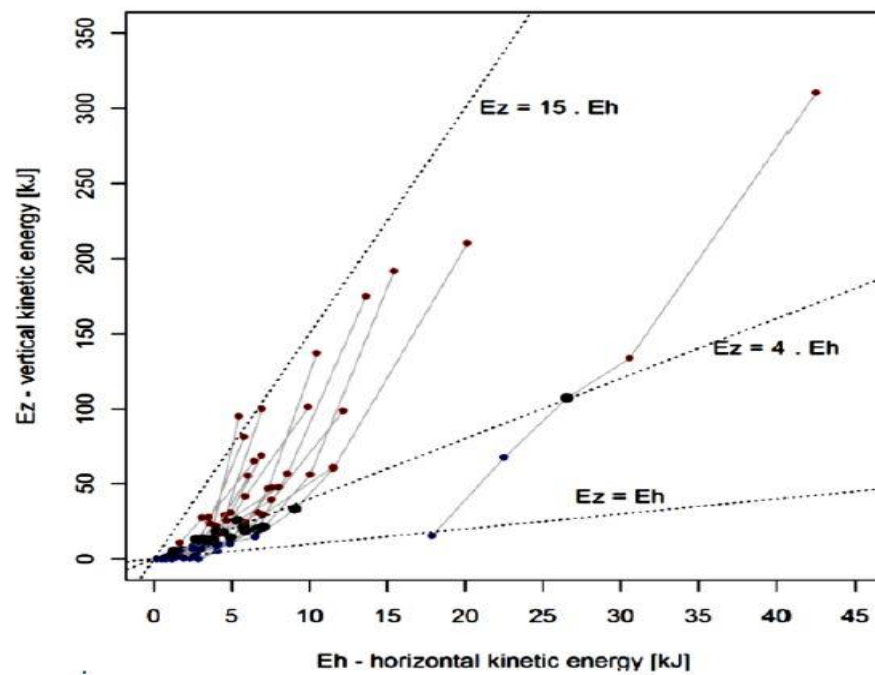
Για την τριδιάστατη παρακολούθηση της τροχιάς των τεμαχών αναπτύχθηκε τεχνική που αφορούσε στην επεξεργασία εικόνων από δύο φωτογραφικές μηχανές Panasonic GH1 (50 fps, ανάλυσης 1280x720 pixel), αυτές εγκαταστάθηκαν σε κατάλληλα σημεία ώστε να μπορεί να καταγραφεί όλη η τροχιά των τεμαχών.

Από τοπογραφικές μετρήσεις, με χρήση EDM Total Station, σημείων ελέγχου επί του εδάφους, με ακρίβεια εκατοστού, έγινε ο προσανατολισμός του στερεοζεύγους σε ένα τοπικό σύστημα αναφοράς.



Εικόνα 10: Τροχιές βραχοτεμαχών σε ηφαιστειακό περιβάλλον. (Πηγή: Dewez et al., 2010)

Με ημι-αυτόματο τρόπο έγινε η επεξεργασία των παραπάνω αποτελεσμάτων, προσδιορίστηκε η τροχιά των τεμαχών και στη συνέχεια υπολογίστηκαν παράμετροι όπως η ταχύτητες (οριζόντια, κατακόρυφη, περιστροφής) πριν και μετά την κρούση, ο αριθμός των αναπηδήσεων, αλλά και το ύψος αναπήδησης σε κάθε τύπο επιφάνειας.



Εικόνα 11: Αποτελέσματα πειραμάτων στην Ταϊτή. (Πηγή: Dewez et al., 2010)

3. Πειραματική Διερεύνηση

3.1. Στόχοι Διερεύνησης

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας εκτελέστηκαν δοκιμές στο πεδίο και υπό κλίμακα στο εργαστήριο, οι οποίες είχαν ως σκοπό:

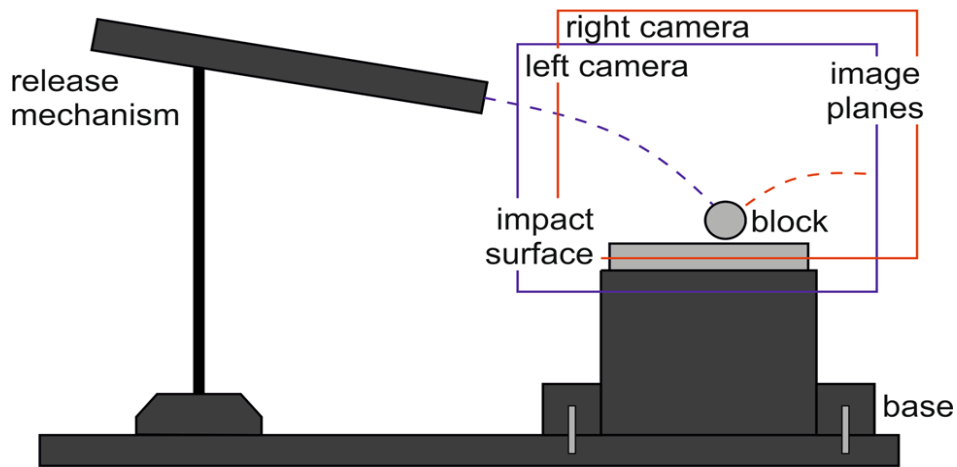
- την τριδιάστατη προσομοίωση της τροχιάς τεμαχών
- τον υπολογισμό της εκτροπής μετά την κρούση, συναρτήσει της κλίσης του επιπέδου πρόσκρουσης και της διεύθυνσης ρίψεως τεμάχους
- την κατάρτιση μιας πιθανοτικής συσχέτισης για την εκτροπή, με τα γεωμετρικά στοιχεία της επιφάνειας πρόσκρουσης
- τη σύγκριση των συντελεστών αναπήδησης μεταξύ των δοκιμών πεδίου και εργαστηρίου, αφού η ενέργεια πρόσκρουσης μεταβάλλεται σημαντικά
- τον προσδιορισμό της επίδρασης της περιστροφής στους συντελεστές αναπήδησης

Η εργασία αυτή αποτελεί την συνέχεια παλαιότερης διπλωματικής εργασίας που εκπονήθηκε στο εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Βραχομηχανικής του Ε.Μ.Π. υπό την κ. Παναγιώτα Μώρου, με τίτλο «Τριδιάστατη Ανάλυση Τροχιάς Βροχοπτώσεων Με Δεδομένα Εργαστηριακής Διερεύνησης.» Σκοπός είναι η απόκτηση περισσότερων δεδομένων για την επαλήθευση μιας πολλά υποσχόμενης μεθόδου που προτάθηκε για την εκτίμηση της πλευρικής εκτροπής των τεμαχών στις καταπτώσεις βράχων.

3.2. Διάταξη Εργαστηρίου

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε έχει αναπτυχθεί στο εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Βραχομηχανικής του Τομέα Γεωτεχνικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών (Εικόνα 12, 13).

Για τη ρίψη των τεμαχών, χρησιμοποιήθηκε ένας ορθοστάτης στον οποίο είναι προσαρμοσμένος σωλήνας, το ύψος και η κλίση του οποίου είναι ρυθμιζόμενα ώστε να μπορούν να ελεγχθούν τα χαρακτηριστικά της κίνησης του τεμάχους κατά την κρούση, δηλαδή η γωνία πρόσκρουσης και η ταχύτητα. Η ρίψη των τεμαχών γίνεται με την εισαγωγή τους στη μια άκρη του σωλήνα, η καταγραφή της τροχιάς τους αρχίζει με την εξαγωγή τους από αυτόν.



Εικόνα 12: Πειραματική συσκευή (Πηγή: Asteriou & Tsiambaos, 2015).



Εικόνα 13: Εργαστηριακή διάταξη.

Χρησιμοποιήθηκαν για την καταγραφή και την τριδιάστατη ανάλυση της τροχιάς των τεμαχών δύο φωτογραφικές μηχανές Canon D600 EOS (Εικόνα 14), υψηλής ευκρίνειας 18 megapixel με δυνατότητα λήψης 60 fps. Για την επίτευξη της σταθερότητας κατά την καταγραφή οι μηχανές τοποθετήθηκαν πάνω σε ειδικούς τρίποδες, με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχει αλληλοκάλυψη της περιοχής ενδιαφέροντος και η κρούση να καταγράφεται

στο μέσον της εικόνας, για την αποφυγή παραμορφώσεων λόγω ακτινικής διαστρόφης. Με την καταγραφή ενός καννάβου γνωστών διαστάσεων καλύπτεται όλη η περιοχή της τροχιάς και της κρούσης των τεμαχών. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται η βαθμονόμηση των φωτογραφικών μηχανών. Στη συνέχεια με την απενεργοποίηση των μηχανών και την αποθήκευση του αρχείου ηλεκτρονική μορφή (.avi), αρχίζει το στάδιο της επεξεργασίας των πειραματικών δοκιμών.



Εικόνα 14: Φωτογραφικές μηχανές Canon D600 EOS (www.dpreview.com).

Πίνακας 7: Τεχνικά χαρακτηριστικά φωτογραφικής μηχανής Canon D600 EOS.

Αισθητήρας Εικόνας (mm)	CMOS 22,3 × 14,9
Ενεργές Εικονοψηφίδες (Μ)	18,0
Μέγεθος Εικόνας (pixels)	1280 × 720
Εστιακή Απόσταση	Ισοδύναμη με 1,6 της εστιακής απόστασης του φακού
Κλείστρο	Ηλεκτρονικά ελεγχόμενο κλείστρο εστιακού επιπέδου

Επίσης χρησιμοποιήθηκαν προβολείς, που τοποθετήθηκαν σε κατάλληλη θέση, παρέχοντας επαρκή φωτισμό ώστε η καταγραφείσα τροχιά να είναι ευκρινέστερη στο μετέπειτα στάδιο της επεξεργασίας. Στο υπόβαθρο τοποθετήθηκε μαύρο χαρτόνι για την αποφυγή σκιάς των τεμαχών στην περιοχή της λήψης.

Ο προσανατολισμός της κλίσης του επιπέδου πρόσκρουσης επιτεύχθηκε με τη χρήση της γεωλογικής πυξίδας και ηλεκτρονικού αποστασιόμετρου τύπου Disto D3 της εταιρείας Leica (απόκλιση γωνιών $\pm 0,1^{\circ}$). Η εύρεση του κατακόρυφου άξονα έγινε με το νήμα της στάθμης, στο οποίο είχαν τοποθετηθεί ειδικά σημεία (Εικόνα 15).



Εικόνα 15: Νήμα της στάθμης και ηλεκτρονικό αποστασιόμετρο (www.geoshop.gr).

Τέλος, για την κατασκευή των δοκιμίων καθώς και τον έλεγχο των διαστάσεών τους χρησιμοποιήθηκαν ηλεκτρονικός ζυγός ακριβείας ($\pm 0,01$ gr), καθώς και ηλεκτρονικό παχύμετρο ($\pm 0,01$ mm).

3.2.1. Επιλογή Σχήματος Δοκιμίων

Το σχήμα του δοκιμίου που επιλέχτηκε για τις εργαστηριακές δοκιμές ήταν ο κύβος, καθώς ο κύβος προσομοιάζει καλύτερα τα φυσικά τεμάχια, συγκριτικά με την σφαίρα, ενώ η γεωμετρική κανονικότητά του διευκολύνει την περαιτέρω επεξεργασία.

Πιο συγκεκριμένα, κατά την φωτογραμμετρική επεξεργασία της τροχιάς του παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα όσον αφορά στον προσδιορισμό της περιστροφικής κίνησης, με τον υπολογισμό των γωνιακών ταχυτήτων.

Η διάσταση πλευράς των κυβικών δοκιμίων ήταν 3,0 cm, έγινε προσήμανση κάθε πλευράς των δοκιμίων με διαφορετικό χρώμα, ώστε να δίνεται η δυνατότητα κωδικοποίησης κατά

το στάδιο της επεξεργασίας. Για την αποφυγή της φθοράς κατά την κρούση των δοκιμίων κατασκευάστηκαν συνολικά 74 κυβικά δοκίμια, εκ των οποίων κάθε φορά χρησιμοποιούνταν 12 στο στάδιο της ρίψης στο εργαστήριο.



Εικόνα 16: Κυβικά δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη ρίψη στο εργαστήριο.

3.2.2. Επιλογή Υλικού Δοκιμίων

Για τη διαμόρφωση των κυβικών δοκιμίων χρησιμοποιήθηκαν ειδικά καλούπια σιλικόνης. Το υλικό των δοκιμίων ήταν ένεμα υψηλής αντοχής SikaGrout 212, με ειδικό βάρος $\gamma=2200 \text{ kg/m}^3$. Πιο συγκεκριμένα, το SikaGrout 212 είναι ενός συστατικού, έτοιμο προς χρήση, τσιμεντοειδούς βάσης κονίαμα, όπου με απλή ανάμιξη νερού σχηματίζεται ένα διογκούμενο, ρευστό και ομοιογενές χυτό κονίαμα που παρουσιάζει υψηλές μηχανικές αντοχές μετά από σύντομο χρόνο ωρίμανσης. Η θλιπτική αντοχή του υλικού μετά από 28 ημέρες δίνεται από τον κατασκευαστή ίση με 50 MPa.

Μετά την τοποθέτηση των δοκιμίων για 28 μέρες σε νερό, πραγματοποιήθηκε λείανση των πλευρών τους με χρήση της συσκευής λείανσης βραχωδών δοκιμίων του εργαστηρίου. Μετρήθηκε η μέση μάζα των κυβικών δοκιμίων η οποία ήταν 58,5 gr.

Από το ίδιο υλικό παρασκευής τεμαχών, διαμορφώθηκε και η επιφάνεια πρόσκρουσης με χρήση της πρότυπης κυβικής μήτρας δοκιμίων σκυροδέματος με διάσταση πλευράς 15 cm.



Εικόνα 17: Μεταλλικό καλούπι και η επιφάνεια πρόσκρουσης.

Με τη χρήση τεχνητού υλικού μπορεί να επιτευχθεί τέμαχος με οποιοδήποτε σχήμα το οποίο προσομοιώνεται μέσω γνωστών μηχανικών ιδιοτήτων με αυτές του πεδίου.

Για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των δοκιμίων έγιναν οι κάτωθι εργαστηριακές δοκιμές βραχομηχανικής.

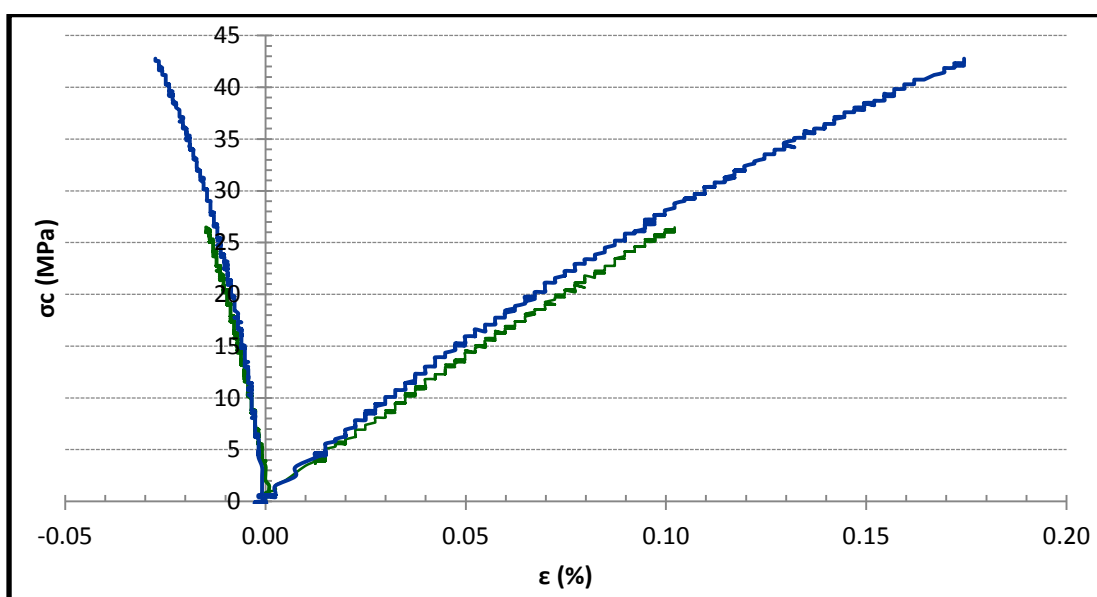
3.2.2.1. Δοκιμή Μονοαξονικής Θλίψης

Η εργαστηριακή δοκιμή μονοαξονικής θλίψης (Uniaxial Compression Strength Test) χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής σ_{ci} , καθώς και των ελαστικών σταθερών E και ν του δοκιμίου.

Πίνακας 8: Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.

ΥΛΙΚΟ	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ			ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ		ΤΑΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ	ΦΟΡΤΙΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ	E (GPa)	ν	$\sigma_{c(50)}$ (MPa)
	\varnothing (mm)	L (mm)	A (mm ²)	rate (KN/s)	time (min)	$\sigma_{αστ.}$ (MPa)	$P_{αστ.}$ (KN)			
Ένεμα SikaGrout 212	54,7	116,0	2350,0	0,20	7,7	39,04	91,74	37,9	0,311	39,68
	55,6	115,0	2427,9	0,15	18,1	67,11	162,94	20,8	0,159	68,40
								29,4	0,235	

Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν παραπάνω (Πίνακας 8) όπως επίσης και το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων (Διάγραμμα 6).

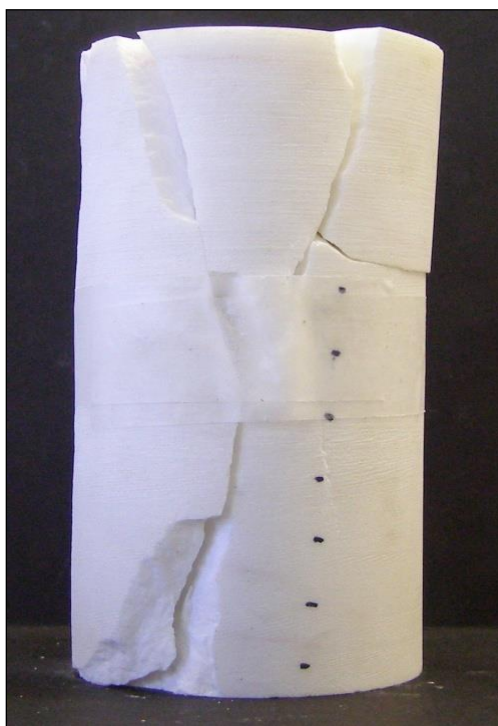


Διάγραμμα 6: Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων για δοκίμιο ενέματος.

Κατά τη δοκιμή αυτή, ένα κυλινδρικό δοκίμιο φορτίζεται με σταθερό ρυθμό θλιπτικά μέχρι να αστοχήσει. Πάνω στο δοκίμιο είναι τοποθετημένα ειδικά μηκυσιόμετρα με σκοπό να καταγραφεί τόσο η αξονική όσο και η πλευρική παραμόρφωσή του. Με τον τρόπο αυτό, κατασκευάζονται καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων και προσδιορίζονται το μέτρο ελαστικότητας Young (E) και ο λόγος Poisson (ν).



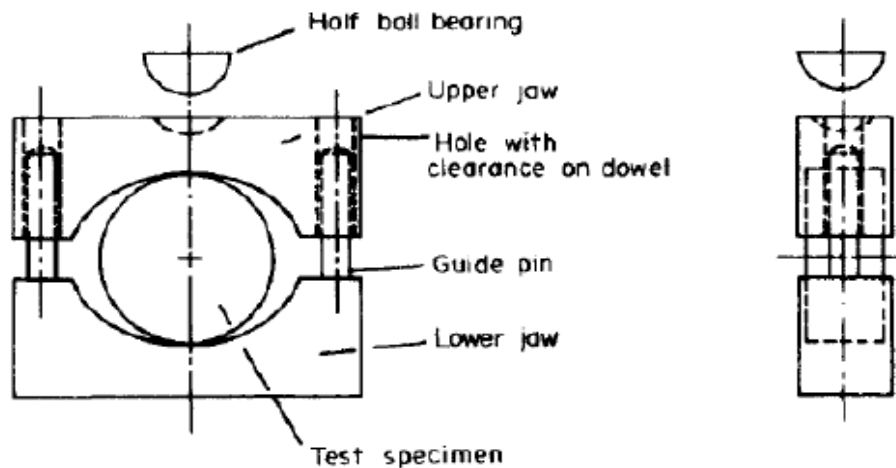
Εικόνα 18: Συσκευή μονοαξονικής θλίψης.



Εικόνα 19: Τυπική εικόνα αστοχίας μαρμάρου κατά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.

3.2.2.2. Δοκιμή Αντιδιαμετρικής Θλίψης

Η εργαστηριακή δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης (Brazilian Test) χρησιμοποιείται για την έμμεση μέτρηση της αντοχής του δοκιμίου σε μονοαξονικό εφελκυσμό, όπου δοκίμιο μορφής δίσκου υποβάλλεται σε αντιδιαμετρική θλίψη μέχρι θραύσης (Πίνακας 9). Για να θεωρηθεί η δοκιμή επιτυχημένη πρέπει να επέλθει αστοχία του δοκιμίου κατά τη διάμετρο φόρτισης σε εφελκυσμό.



Εικόνα 20: Σχηματική αναπαράσταση συσκευής Brazilian test (www.rockeng.snu.ac.kr)

Για τον υπολογισμό της εφελκυστικής αντοχής του δοκιμίου (σ_t), χρησιμοποιείται η σχέση:

$$\sigma_t = 0,636 \cdot \frac{P}{d \cdot t} \quad (3.1)$$

Όπου,

P: το φορτίο θραύσης του δοκιμίου

d: η διάμετρος του κυλινδρικού δοκιμίου

t: το πάχος του κυλινδρικού δοκιμίου

Πίνακας 9: Δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης.

ΥΛΙΚΟ	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ				rate (KN/s)	ΦΟΡΤΙΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ P (KN)	σ_t (MPa)
	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	d (mm)	t (mm)			
Ένεμα	55,4	55,6	55,5	31,2	0,2	20,10	7,39
SikaGrout	55,6	55,5	55,5	28,3	0,2	18,90	7,66
212	55,5	55,6	55,5	28,7	0,2	18,60	7,43
							7,50

3.2.2.3. Σύγκριση Φυσικών και Τεχνητών Δοκιμών

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των παραπάνω εργαστηριακών δοκιμών, που πραγματοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών των τεχνητών δοκιμών, με τα αντίστοιχα για φυσικά δοκίμια πετρωμάτων (Πίνακας 10), προκύπτει το συμπέρασμα ένα δοκίμιο από τσιμεντένεμα μπορεί να προσομοιωθεί με βραχώδες.

Πίνακας 10: Μηχανικές ιδιότητες φυσικών και τεχνητών δοκιμών. (Πηγή: Asteriou et al., 2013).

ΤΥΠΟΣ ΥΛΙΚΟΥ	ρ (KN/m ³)	σ_{ci} (MPa)	E (GPa)	ν	σ_t (MPa)	SHV
Μάρμαρο	25.2	66.1	40.2	0.261	6.2	38.2
Σχιστόλιθος	23.6	17.5	2.4	0.157	4.7	22.3
Ασβεστόλιθος	26.2	67.0	44.2	0.221	5.0	36.1
Ψαμμίτης	25.2	107.5	35.4	0.252	11.3	44.7
Μάργα	22.1	2.6	1.8	0.123	0.5	18.2
Τσιμεντοκονίαμα	21.9	68.4	29.4	0.235	7.5	33.4

3.3. Πρόγραμμα Δοκιμών Εργαστηρίου

Οι πειραματικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο, οργανώθηκαν σε 5 σειρές δοκιμών, με συνολικά 120 ρίψεις (Πίνακας 11). Σε κάθε σειρά δοκιμών, η κλίση του επιπέδου πρόσκρουσης ήταν σταθερή στις 40° ενώ η φορά μεγίστης κλίσης του επιπέδου μεταβαλλόταν ανά 45° σε κάθε σειρά, σαρώνοντας έτσι ένα ημικόκλιο.

Με αντίστοιχη λογική, είχαν εκτελεστεί στα πλαίσια της παλαιότερης διπλωματικής εργασίας της κ. Μώρου δοκιμές για κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης 10° και 20°.

Πίνακας 11: Εργαστηριακές δοκιμές που εκτελέστηκαν.

ΣΕΙΡΑ ΔΟΚΙΜΗΣ	ΚΛΙΣΗ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ (^ο)	ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ (^ο)	ΑΡΙΘΜΟΣ ΡΙΨΕΩΝ
1		0 ^ο	24
2		45 ^ο	24
3	40 ^ο	90 ^ο	24
4		135 ^ο	24
5		180 ^ο	24

3.4. Διαδικασία Εκτέλεσης Δοκιμών

Για την επίτευξη διαφορετικών διευθύνσεων ρίψεων των τεμαχίων πραγματοποιούνταν μεταβολή της διεύθυνσης του επιπέδου πρόσκρουσης, διατηρώντας σταθερό το βραχίονα ρίψης. Η ακριβής θέση τοποθέτησης της βάσης στήριξης έγινε μετά από κάποιες δοκιμαστικές ρίψεις, ακολουθούσε ενεργοποίηση των μηχανών και η υλοποίηση της κατακορύφου με το νήμα της στάθμης, έπειτα γινόταν η λήψη εικόνων για τη βαθμονόμηση και την αποτύπωση της επιφάνειας πρόσκρουσης και η τελική καταγραφή των ρίψεων.

3.5. Σχεδιασμός Δοκιμών Πεδίου

3.5.1. Διάταξη Πεδίου

Η διαμόρφωση των δοκιμών έγινε με τη χρήση πρότυπης κυβικής μήτρας σκυροδέματος με διάσταση πλευράς 15cm (Εικόνα 21).

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε με σκοπό την προσομοίωση του βραχώδους τεμάχους ήταν το ένεμα υψηλής αντοχής SikaGrout 212 της εταιρείας Sika, όμοιο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές εργαστηρίου. Οι ιδιότητες του υλικού παρουσιάζονται στην ενότητα 3.2.2.

3.5.2. Πρόγραμμα Δοκιμών

Το μέγεθος και άρα το βάρος των δοκιμών επιλέχτηκε λαμβάνοντας υπόψη τις δυσκολίες μεταφοράς των δοκιμών στο χώρο διεξαγωγής πειραμάτων και εκτέλεσης των ρίψεων. Ωστόσο, το μέγεθος αυτό προσομοιάζει επιτυχώς ένα φυσικό κομμάτι βράχου, μικρών διαστάσεων.

Τέλος, τα δοκίμια βάφτηκαν με κατάλληλο χρώμα σε κάθε έδρα του κύβου (μπλε, γαλάζιο, πράσινο, κίτρινο, κόκκινο, ροζ) προκειμένου να είναι ευδιάκριτα από τις φωτογραφικές μηχανές.

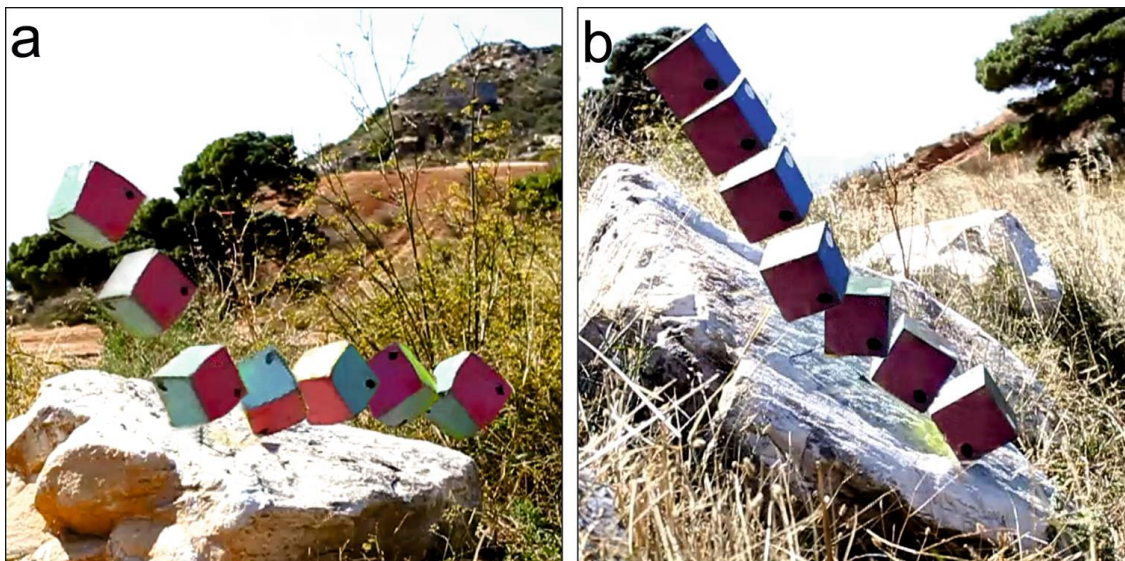


Εικόνα 21: Δοκίμια πειράματος πεδίου.

Σαν επιφάνεια πρόσκρουσης επιλέχτηκε το μάρμαρο της Πεντέλης, με διαφορετική κλίση κάθε φορά. Στην ενότητα 3.2.2.3 παρουσιάζονται οι ιδιότητες του εν λόγω μαρμάρου, από όπου προκύπτει ότι ομοιάζουν ικανοποιητικά με αυτές του τσιμεντενέματος. Έτσι, η μεταξύ τους σύγκριση είναι δυνατή.

3.5.3. Διαδικασία Εκτέλεσης Δοκιμών

Έγινε ρίψη σε επιφάνειες με κλίση 20° και 45° , μεταβάλλοντας την διεύθυνση ρίψης των τεμαχών σαρώνοντας μια περιοχή ανά 45° . Έτσι έγιναν 4 σειρές δοκιμών με συνολικά 96 ρίψεις για κάθε επιφάνεια πρόσκρουσης (Πίνακας 12,13).



Εικόνα 22: Τροχιές δοκιμών δοκιμών πεδίου για γωνία κλίσης 20° και 45° αντίστοιχα (Asteriou, P., & Tsiambaos, G. 2015).

Σημειώνεται, ότι στο πεδίο δεν έγιναν οι δοκιμές με διαφορά διεύθυνσης 180°, δηλαδή αντίρροπες της κλίσης του πρανούς, αφού ενείχε κινδύνους, καθώς η τροχιές των τεμαχών εμφάνιζαν σημαντική διασπορά.

Πίνακας 12: Δοκιμές πεδίου που εκτελέστηκαν.

ΣΕΙΡΑ ΔΟΚΙΜΗΣ	ΚΛΙΣΗ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ (°)	ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ (°)	ΑΡΙΘΜΟΣ ΡΙΨΕΩΝ
1		0°	24
2		40°	24
3	20°	90°	24
4		150°	24

Πίνακας 13: Δοκιμές πεδίου που εκτελέστηκαν.

ΣΕΙΡΑ ΔΟΚΙΜΗΣ	ΚΛΙΣΗ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ ($^{\circ}$)	ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ ($^{\circ}$)	ΑΡΙΘΜΟΣ ΡΙΨΕΩΝ
1		0 $^{\circ}$	24
2		40 $^{\circ}$	24
3	45 $^{\circ}$	90 $^{\circ}$	24
4		150 $^{\circ}$	24



Εικόνα 23: Απεικόνιση μαρμάρου της Πεντέλης.



Εικόνα 24: Άποψη μετά την εκτέλεση δοκιμών στο τέμαχος με 45° κλίση.

4. Επεξεργασία Δοκιμών

Η ανάλυση της καταγραφείσας τροχιάς των τεμαχών, σκοπεύει στον υπολογισμό των ταχυτήτων και ακολούθως των συντελεστών αναπήδησης. Αυτό επιτυγχάνεται με την φωτογραμμετρική επεξεργασία των εικόνων, από όπου προκύπτει η θέση των δοκιμών στο χώρο στις τρεις διαστάσεις.

Αρχικά γίνεται η βαθμονόμηση των φωτομηχανών για να μπορούν να υπολογιστούν οι παράμετροι του εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού, οι οποίοι θα χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή της τριδιάστατης θέσης οποιουδήποτε σημείου προβάλλεται και στις δυο εικόνες, μέσω της φωτογραμμετρικής εμπροσθοτομίας.

Ακολουθεί η μετάθεση και η στροφή των αξόνων του τοπικού τριδιάστατου συστήματος συντεταγμένων του συστήματος καταγραφής, ώστε η νέα του θέση να είναι στην επιφάνεια πρόσκρουσης, με τον κατακόρυφο άξονα να ταυτίζεται με την κατεύθυνση της βαρύτητας και οι οριζόντιοι άξονες να ταυτίζονται με την φορά μεγίστης κλίσης και την

διεύθυνση της επιφάνειας πρόσκρουσης. Για να είναι εφικτή η μετατροπή αυτή πρέπει να προηγηθεί η αποτύπωση της κάθε επιφάνειας πρόσκρουσης μέσω τεχνικών συσχέτισης εικόνων.

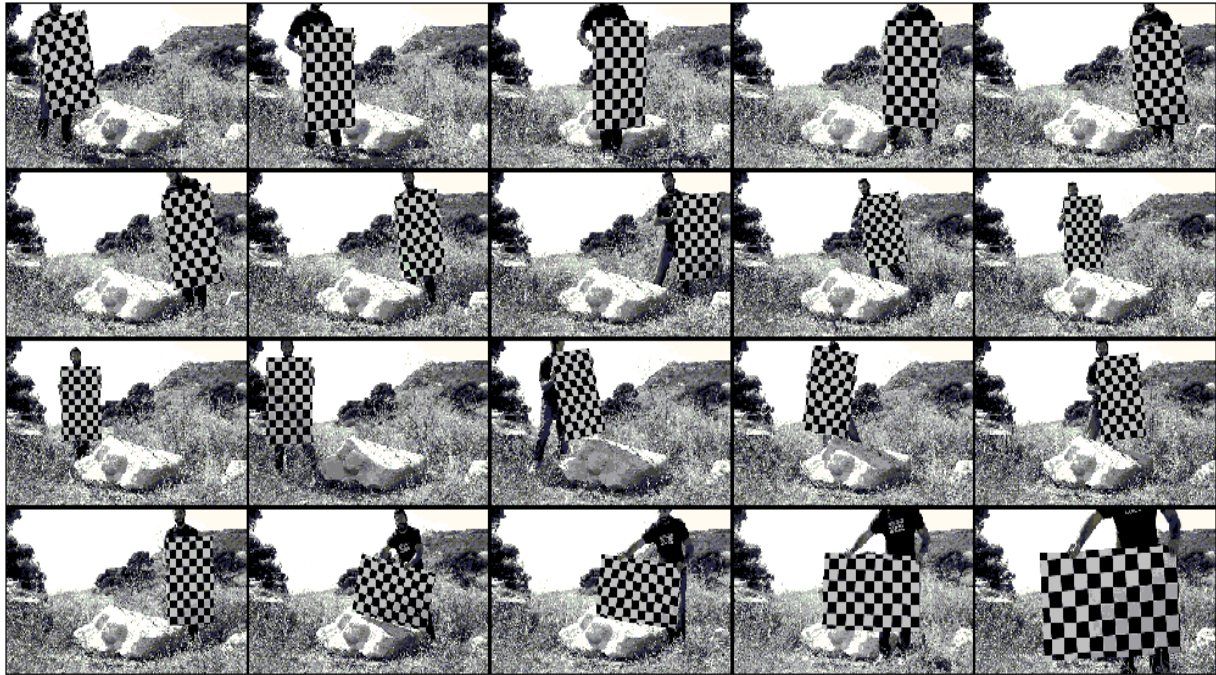
Στο τέλος γίνεται η επεξεργασία και η τριδιάστατη ανάλυση της κίνησης των δοκιμίων, η οποία πραγματοποιείται σε τρία στάδια. Στο πρώτο στάδιο έχουμε την ανακατασκευή του δοκιμίου, στο δεύτερο στάδιο γίνεται ο προσδιορισμός της θέσης του στον χώρο και τέλος στο τρίτο στάδιο πραγματοποιείται η ανακατασκευή της τροχιάς του δοκιμίου.

Οι αναλύσεις και οι επεξεργασίες της καταγραφείσας τροχιάς, αλλά και οι υπολογισμοί των διαφόρων συντελεστών έλαβαν χώρα στο προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab.

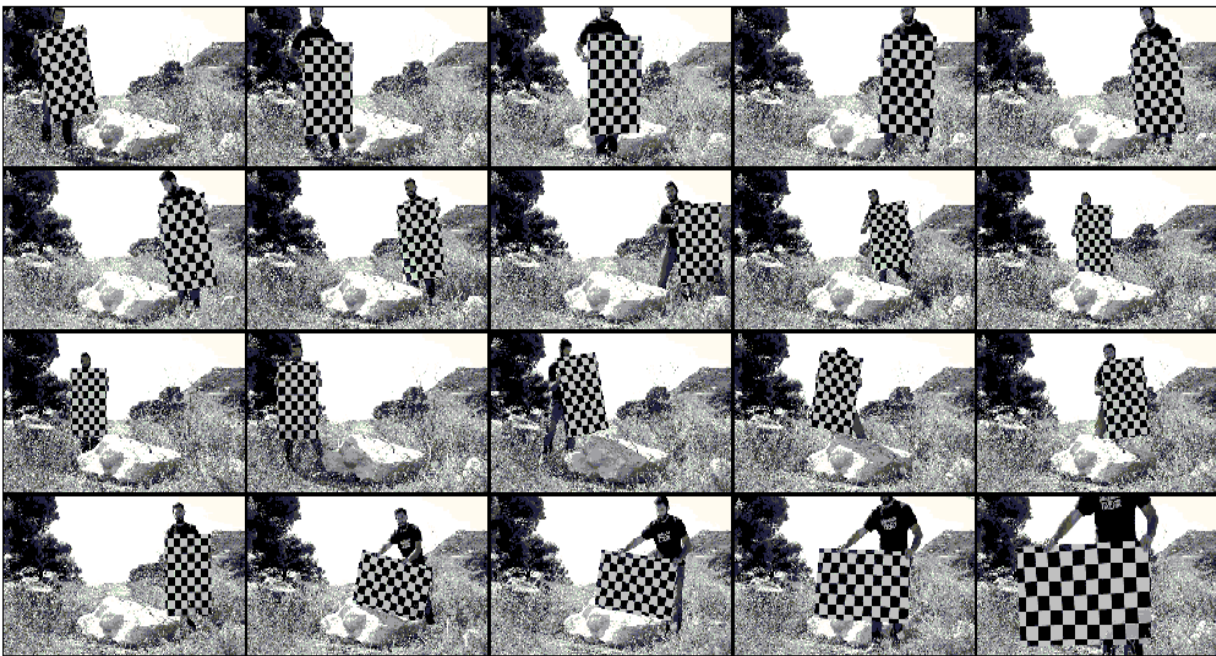
4.1. Βαθμονόμηση Φωτογραφικών Μηχανών

Η βαθμονόμηση έγινε με τη χρήση του Camera Calibration Toolbox στο περιβάλλον της Matlab. Γενικά, οι έγχρωμες εικόνες αποτελούνται από τρεις φασματικές περιοχές, οι οποίες ορίζονται με τη βοήθεια τριών ίδιου μεγέθους εικονοπινάκων. Στο υπολογιστικό περιβάλλον της Matlab, κάθε εικόνα αναπαρίσταται από τρεις πίνακες, έναν για κάθε χρωματικό κανάλι (RGB).

Με την τεχνική αυτή της βαθμονόμησης, οι δυο φωτογραφικές μηχανές καταγράφουν ταυτόχρονα έναν κάρναβο, γνωστών διαστάσεων, σε διαφορετικές θέσεις πλησίον της περιοχής που θα γίνουν οι μετρήσεις των συντεταγμένων των τροχιών. Στη συνέχεια, οι εικόνες αυτές μεταφέρονται στο υπολογιστικό περιβάλλον, όπου αρχίζει η επεξεργασία τους.



Εικόνα 25: Καταγραφή καννάβου από την αριστερή φωτομηχανή.

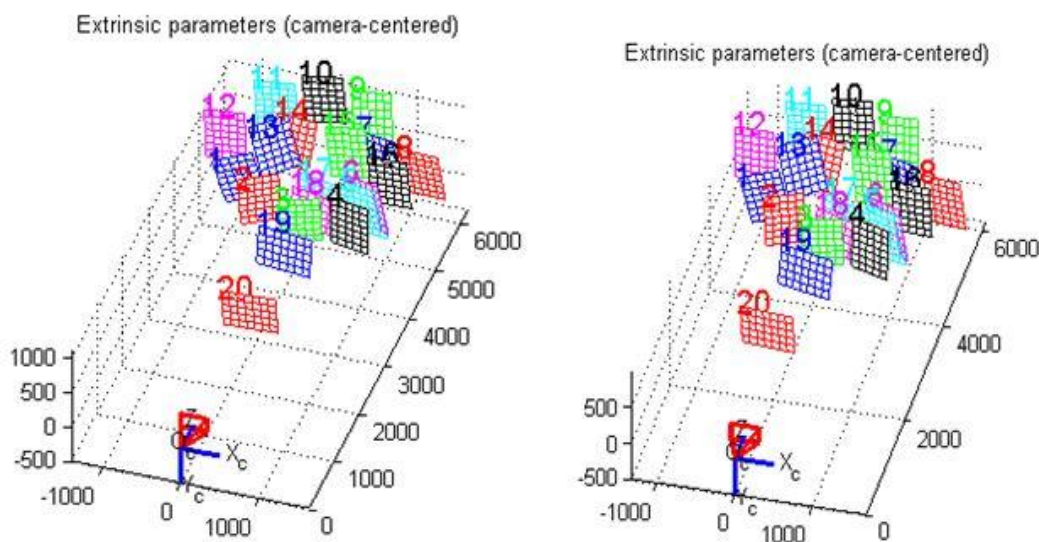


Εικόνα 26: Καταγραφή καννάβου από την δεξιά φωτομηχανή.

Προσδιορίζονται τα όρια του καννάβου από το χρήστη, επιλέγοντας τα αντίστοιχα σημεία για τις εικόνες κάθε φωτομηχανής ξεχωριστά. Με έναν αλγόριθμο αυτόματου εντοπισμού και καταμέτρησης του αριθμού των τετραγώνων στον κάνναβο, που βασίζεται στη διαφοροποίηση του χρώματος, και εισάγοντας το μήκος της πλευράς των τετραγώνων, προσδιορίζεται κάθε εσωτερική γωνία.

Μπορεί να εισαχθεί το μέγεθος της ακτινικής διαστρωφής των φακών σε περίπτωση που το αποτέλεσμα του προσδιορισμού των εσωτερικών γωνιών του καννάβου δεν είναι ικανοποιητικό.

Μετά την ολοκλήρωση του εντοπισμού των παραπάνω γωνιών στις εικόνες κάθε φωτομηχανής (Εικόνα 27), πραγματοποιείται η βαθμονόμηση για κάθε φωτογραφική μηχανή ξεχωριστά σε δύο στάδια. Στην αρχή υπολογίζονται οι παράμετροι της βαθμονόμησης χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η διαστρόφη του φακού. Μετά ελαχιστοποιείται το συνολικό σφάλμα ανακατασκευής σε όλες τις παραμέτρους, γίνεται δηλαδή μη γραμμική βελτιστοποίηση με επαναληπτικούς κλειστούς υπολογισμούς του Ιακωβιανού πίνακα.



Εικόνα 27: Προσδιορισμός των εξωτερικών παραμέτρων για τις δύο φωτομηχανές, αριστερή και δεξιά αντίστοιχα (σε mm).

Παρακάτω φαίνονται τα στοιχεία εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού που υπολογίζονται από την βαθμονόμηση κάθε φωτομηχανής:

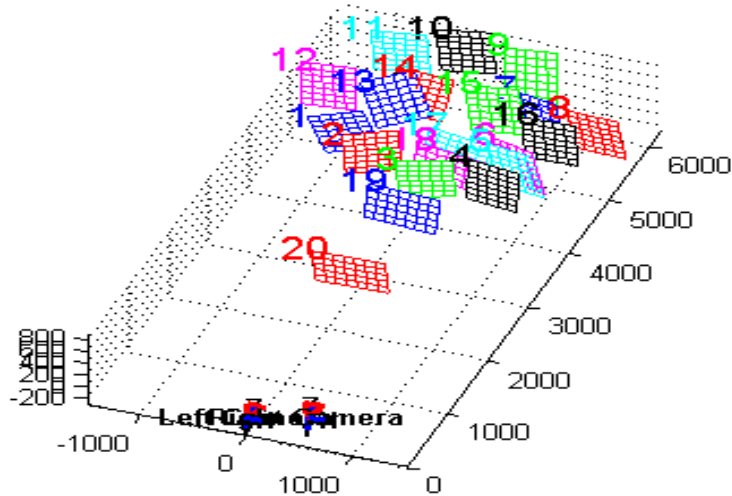
- εστιακό βάθος (f_c)
- πρωτεύον σημείο (cc)
- αφινικότητα (α_c) : καθορίζει τη γωνία μεταξύ των αξόνων x και y
- συντελεστής διαστροφής (k_c) : περιλαμβάνει την ακτινική και εφαπτομενική διαστροφή

Οι παράμετροι του εσωτερικού προσανατολισμού κάθε φωτογραφικής μηχανής είναι 9 (πρωτεύον σημείο (2), εστιακό βάθος (2), και διαστροφή φακού (5)) και 6 για κάθε εικόνα ((3) για την μεταφορά και (3) για την στρόφι).

Μέσω αυτού του προγράμματος δίνεται η δυνατότητα προσδιορισμού της θέσης των καννάβων σε σχέση με τη φωτομηχανή, ακριβέστερα ο υπολογισμός του εξωτερικού προσανατολισμού των εικόνων. Υπάρχει η απαίτηση να έχουμε γνωστό τον εσωτερικό προσανατολισμό. Τα στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού για κάθε εικόνα που προκύπτουν είναι:

- ο πίνακας στρόφης R_c
- ο πίνακας μετάθεσης T_c

Όπως στη συγκεκριμένη περίπτωση όπου η λήψη πραγματοποιείται ταυτόχρονα από δύο φωτογραφικές μηχανές, υπολογίζεται και ο σχετικός προσανατολισμός του στερεοζεύγους, και ως αρχή συστήματος χώρου θεωρείται το σύστημα αριστερής φωτομηχανής.



Εικόνα 28: Προσδιορισμός των εξωτερικών παραμέτρων του στερεοζεύγους (σε mm).

Στα επόμενα στάδια επεξεργασίας, όλες οι εικόνες από κάθε καταγραφή διορθώθηκαν ώστε να εξαλειφθούν τα σφάλματα από τη διαστρόφη των φακών, εισάγοντας το μοντέλο διαστρόφης που προέκυψε από το στάδιο της βαθμονόμησης. Κάθε διάνυσμα παριστάνει τη μετάθεση του κάθε εικονοστοιχείου λόγω της συνολικής, ακτινικής και εφαπτομενικής, διαστρόφης του φακού.

4.2. Υπολογισμός Τριδιάστατης Θέσης Σημείων

Η τριδιάστατη θέση μιας ομάδας σημείων υπολογίζεται με τη μέθοδο της εμπροσθοτομίας. Προσδιορίζονται τα X,Y,Z σημεία του τρισδιάστατου χώρου από δύο εικόνες, δηλαδή ο υπολογισμός του σημείου τομής στο χώρο των ομόλογων ακτινών από τις δύο εικόνες.

Έχοντας γνωστό τον εσωτερικό προσανατολισμό των μηχανών και τον εξωτερικό προσανατολισμό των εικόνων, μετρώνται οι εικονοσυντεταγμένες δύο ομόλογων σημείων. Η σχέση μεταξύ των συντεταγμένων x,y ενός εικονοστοιχείου και των συντεταγμένων X,Y,Z του σημείου του φωτογραφισθέντος αντικειμένου δίνεται από τις σχέσεις της συνθήκης συγγραμμικότητας:

$$\begin{bmatrix} x - x_o \\ y - y_o \\ -f \end{bmatrix} = \frac{1}{k} \cdot R \cdot \begin{bmatrix} X - X_o \\ Y - Y_o \\ Z - Z_o \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

k : η κλίμακα του υπό εξέταση σημείου

x_o, y_o : οι εικονοσυντεταγμένες του πρωτεύοντος σημείου

f : η σταθερά της μηχανής

R : ο πίνακας στροφής

4.3. Μετασχηματισμός Συστήματος Συντεταγμένων και Αποτύπωση της Επιφάνειας Πρόσκρουσης

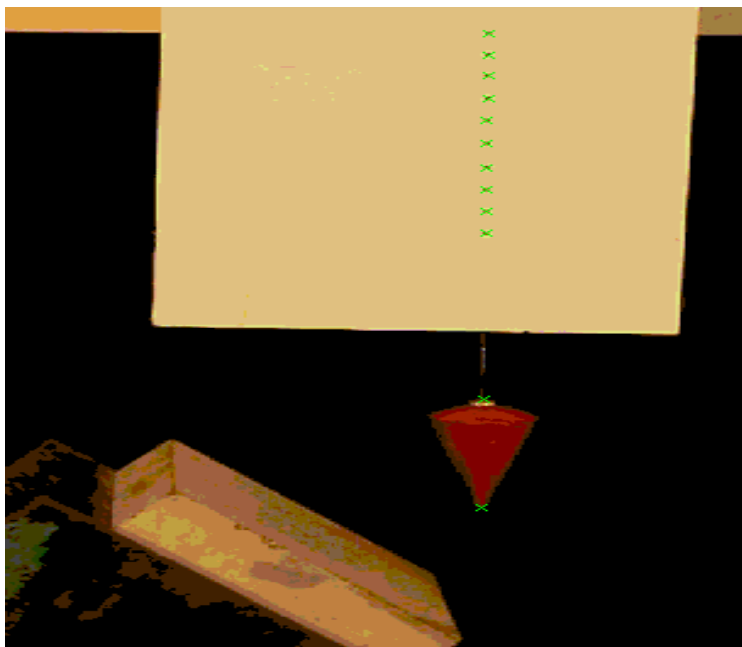
Προκειμένου να υπολογιστούν οι συντελεστές αναπήδησης, προηγείται ο μετασχηματισμός του τοπικού συστήματος συντεταγμένων της φωτομηχανής σε ένα σύστημα συντεταγμένων του οποίου ένας άξονας θα ταυτίζεται με την κατακόρυφο, δηλαδή να έχει την κατεύθυνση της βαρύτητας.

Για την αναγωγή των μεγεθών σε επίπεδα κάθετα και εφαπτομενικά στην επιφάνεια πρόσκρουσης αλλά και την μετάθεση των αξόνων, απαραίτητη είναι η αποτύπωση της επιφάνειας για κάθε σειρά δοκιμών.

Τέλος, ο μετασχηματισμός του συστήματος συντεταγμένων πραγματοποιήθηκε προκειμένου οι συντεταγμένες από το τοπικό σύστημα αναφοράς της αριστερής φωτογραφικής μηχανής να αναχθούν σε ένα άλλο επίσης τοπικό σύστημα συντεταγμένων στο κέντρο της επιφάνειας πρόσκρουσης.

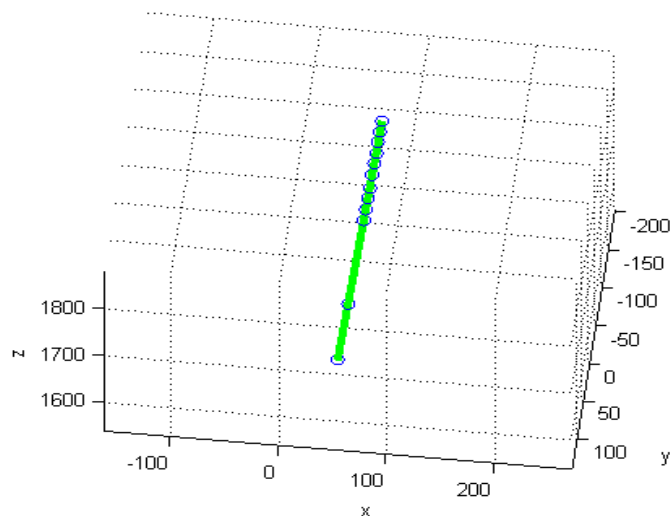
4.3.1. Υλοποίηση Κατακόρυφου Άξονα

Με χρήση νήματος της στάθμης επιτεύχθηκε η υλοποίηση του κατακόρυφου άξονα. Προκειμένου να γίνει εντοπισμός των ομόλογων σημείων, τοποθετήθηκαν μάρτυρες πάνω στο νήμα της στάθμης (Εικόνα 29) ώστε να είναι ορατά από τις δυο φωτομηχανές.



Εικόνα 29: Υλοποίηση σημείων πάνω στο νήμα της στάθμης.

Μετά το πέρας της καταγραφής του νήματος στάθμης και από τις δύο φωτογραφικές μηχανές, εισάγοντας τα ομόλογα σημεία από τις δύο εικόνες και υπολογίζοντας τις τριδιάστατες συντεταγμένες τους, μέσω της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων προσδιορίστηκε η βέλτιστη ευθεία που διέρχεται από αυτά. Η ευθεία αυτή, που αποτελεί τον κατακόρυφο άξονα βαρύτητας, ως προς το τριδιάστατο σύστημα συντεταγμένων της αριστερής φωτομηχανής.

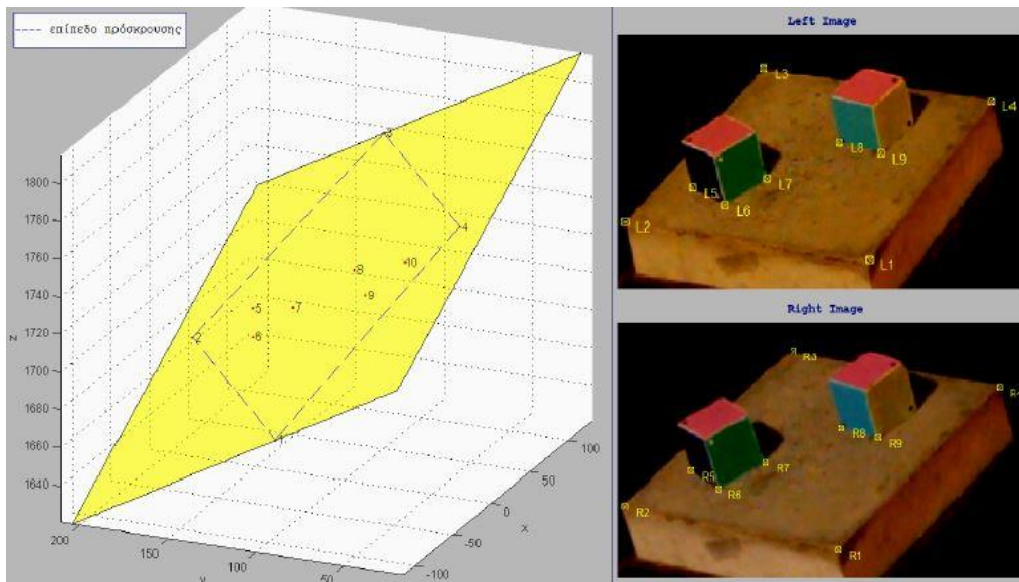


Εικόνα 30: Κατακόρυφος άξονας βαρύτητας στο σύστημα συντεταγμένων της αριστερής φωτομηχανής.

4.3.2. Αποτύπωση Επιφάνειας Πρόσκρουσης

Σε κάθε σειρά δοκιμών η κλίση και ο προσανατολισμός της επιφάνειας πρόσκρουσης ήταν διαφορετικοί, η αποτύπωση της επιφάνειας ήταν απαραίτητη ώστε να γίνουν οι μετέπειτα υπολογισμοί.

Για τον προσδιορισμό ενός επιπέδου απαραίτητα είναι τουλάχιστον τρία σημεία γνωστών συντεταγμένων που κείτονται επί του επιπέδου. Για τον ακριβέστερο προσδιορισμό της επιφάνειας υλοποιήθηκαν επιπλέον σημεία, ώστε να είναι δυνατός ο υπολογισμός των τριδιάστατων συντεταγμένων δέκα σημείων του επιπέδου κρούσης των τεμαχών (Εικόνα 31).



Εικόνα 31: Αποτύπωση της επιφάνειας πρόσκρουσης με εφαρμογή της φωτογραμμετρικής εμπροσθοτομίας.

Με τη χρήση της φωτογραμμετρικής εμπροσθοτομίας έγινε η αποτύπωση, για κάθε σειρά δοκιμών, της επιφάνειας πρόσκρουσης ως το βέλτιστο επίπεδο που διέρχεται από τα σημεία αυτά.

4.3.3. Μετασχηματισμός Συστήματος Συντεταγμένων

Για τον μετασχηματισμό ενός συστήματος συντεταγμένων σε ένα άλλο, απαιτείται μια μετάθεση και μια στροφή. Πραγματοποιήθηκε μετασχηματισμός του τοπικού συστήματος συντεταγμένων της αριστερής φωτομηχανής, όπου ο άξονας Z ταυτίζεται με τον άξονα της λήψης, σε ένα τοπικό τρισσορθογώνιο σύστημα αναφοράς όπου η αρχή των αξόνων βρίσκεται στο άνω άκρο της επιφάνειας πρόσκρουσης και ο άξονας Z συμπίπτει με τον κατακόρυφο άξονα βαρύτητας.

Ο συγκεκριμένος μετασχηματισμός πραγματοποιήθηκε με μια μετάθεση της αρχής του συστήματος αναφοράς και μια στροφή αξόνων, ώστε ο άξονας Z από άξονα λήψης να έχει την διεύθυνση της βαρύτητας. Αυτοί οι νέοι άξονες X και Y βρίσκονται επί του κάθετου στον άξονα Z επιπέδου ούτως ώστε η διεύθυνση της επιφάνειας πρόσκρουσης να ταυτίζεται με τον άξονα X και άρα, η προβολή της φοράς μέγιστης κλίσης της επιφάνειας στο επίπεδο XY να ανήκει στο ίδιο κατακόρυφο επίπεδο με τον άξονα Y.

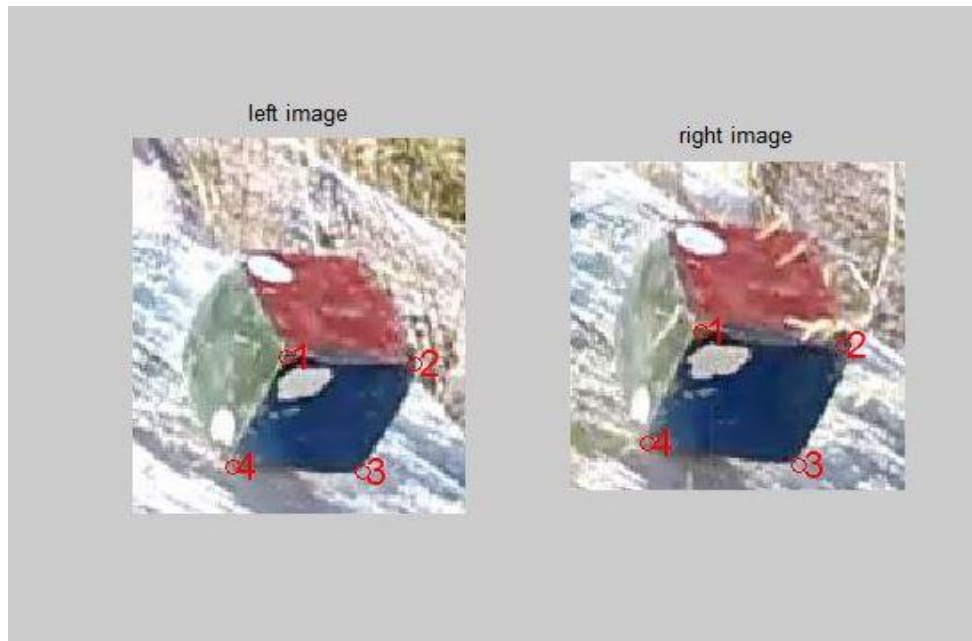
4.4. Ανάλυση της Καταγραφείσας Τροχιάς

Με την ανακατασκευή του σχήματος του δοκιμίου και την εύρεση της θέσης του στο τρισδιάστατο τοπικό σύστημα συντεταγμένων αρχίζει το στάδιο της ανάλυσης της τροχιάς. Ο προσδιορισμός της τροχιάς του τεμάχους προκύπτει με τον υπολογισμό των μεταφορικών και γωνιακών ταχυτήτων σε κάθε άξονα, διαχωρίζοντας την τροχιά πριν και μετά την κρούση.

4.4.1. Ανακατασκευή του Σχήματος του Δοκιμίου

Προκειμένου να είναι δυνατός ο υπολογισμός της περιστροφικής κίνησης, οι γωνίες των κυβικών δοκιμίων κωδικοποιήθηκαν. Από το χρώμα της πλευράς που καταγραφόταν και ανάλογα με ποια γωνία της πλευράς του δοκιμίου ήταν προσημασμένη, προέκυπτε η ταυτοποίηση των σημείων των οποίων υπολογίζεται η τριδιάστατη θέση.

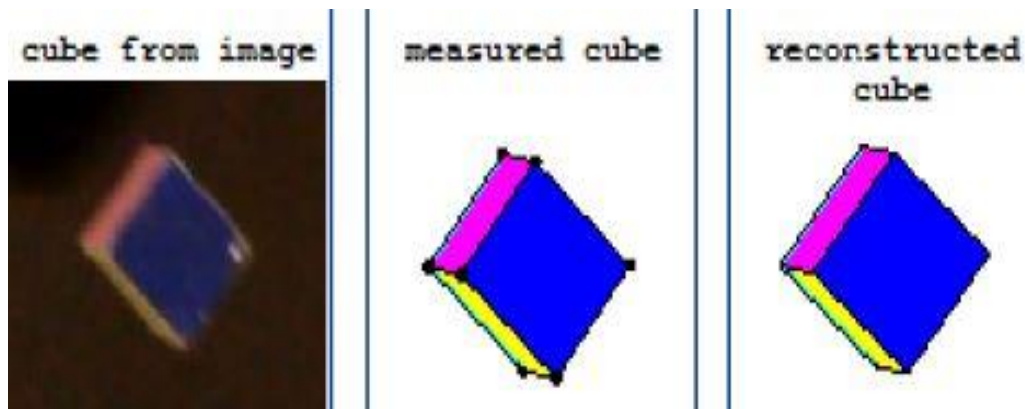
Γινόταν μια επαναληπτική διαδικασία για κάθε λήψη. Εισάγεται αρχικά το χρώμα της πλευράς του δοκιμίου, της οποίας όλες οι γωνίες είναι ορατές. Έπειτα, εισάγονται οι εικονοσυντεταγμένες, μέσω της επιλογής από το χρήστη, των τεσσάρων γωνιών του δοκιμίου, για κάθε εικόνα (αριστερή και δεξιά) (Εικόνα 32).



Εικόνα 32: Εισαγωγή γωνιών κυβικών δοκιμίων.

Εφόσον υπολογιστούν οι τριδιάστατες συντεταγμένες των γωνιών της ορατής πλευράς με φωτογραμμετρική εμπροσθοτομία, στη συνέχεια μέσω της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων υπολογίζεται το βέλτιστο επίπεδο που διέρχεται από αυτά καθώς και η διεύθυνση του κάθετου σε αυτό διανύσματος. Αφού η πλευρά των δοκιμίων είναι γνωστών διαστάσεων, γίνεται παράλληλη μετάθεση του βέλτιστου αυτού επιπέδου προς τη διεύθυνση του κάθετου διανύσματος.

Με τον υπολογισμό του κέντρου βάρους του ολοκληρώνεται η ανακατασκευή του σχήματος του δοκιμίου, με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων, και την προσαρμογή του σε κύβο διάστασης 3,0 cm για τα εργαστηριακά δοκίμια και 15 cm για τα δοκίμια του πεδίου.



Εικόνα 33: Ανακατασκευή σχήματος δοκιμίου.

Ο έλεγχος της ορθότητας της ανακατασκευής του σχήματος γίνεται με σύγκριση των μετρημένων αποστάσεων του δοκιμίου με τις πραγματικές αλλά και μέσω της ταύτισης του ανακατασκευασμένου σχήματος του δοκιμίου με αυτό που φαίνεται στην αντίστοιχη λήψη.

4.4.2. Προσδιορισμός της Θέσης του Δοκιμίου

Από την προηγούμενη επεξεργασία είναι γνωστή η θέση του δοκιμίου σε κάθε λήψη, ακολουθεί το στάδιο της εύρεσης της μετάθεσης και στροφής μεταξύ διαδοχικών θέσεων, ως προς το τοπικό τριδιάστατο σύστημα που έχει οριστεί. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη μέθοδο Rigid Body Motion (Challis, 1995).

Η σχέση που περιγράφει τη μετάθεση και την στροφή ενός στερεού σώματος από τη μία θέση στην άλλη είναι

$$y_i = [R] \cdot x_i + v \quad (4.2)$$

Όπου,

y_i : η θέση του i σημείου του σώματος II

x_i : η θέση του i σημείου του σώματος στη θέση I

R: ο πίνακας στροφής

v: το διάνυσμα μετάθεσης

Για τον προσδιορισμό του πίνακα στροφής R και του διανύσματος μετάθεσης v , χρησιμοποιείται η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων.

4.4.3. Ανακατασκευή της Τροχιάς

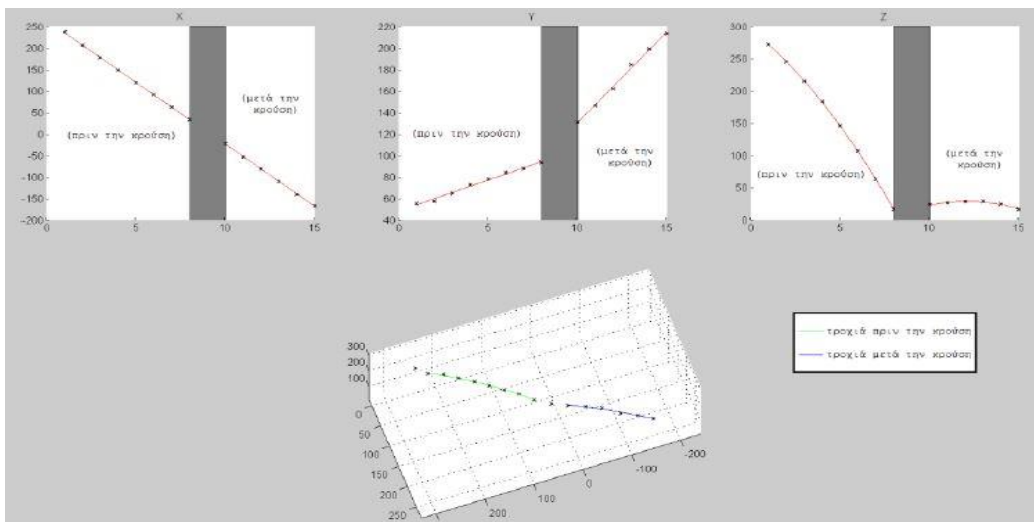
Με την ανακατασκευή της τροχιάς κάθε δοκιμίου ολοκληρώνεται το στάδιο της ανάλυσης της καταγραφείσας τροχιάς, για κάθε πειραματική ρίψη.

Η ανακατασκευή της τροχιάς πραγματοποιείται με τον προσδιορισμό της μεταφορικής και της περιστροφικής κίνησης, μέσω του υπολογισμού των γραμμικών ταχυτήτων και γωνιακών ταχυτήτων αντίστοιχα.

4.4.3.1. Προσδιορισμός της Μεταφορικής Κίνησης

Στην αρχή γίνεται διαχωρισμός της τροχιάς σε τμήματα, πριν και μετά την κρούση, με εισαγωγή του αριθμού των λήψεων στο οποίο το τέμαχος έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια πρόσπτωσης.

Στη συνέχεια, δημιουργούνται διαγράμματα στα οποία απεικονίζεται η μεταβολή της θέσης του δοκιμίου σε κάθε άξονα (X,Z,X) (Εικόνα 34) του τοπικού συστήματος αναφοράς, για το στάδιο πριν και μετά την κρούση αντίστοιχα. Η μεταβολή της θέσης του δοκιμίου σε κάθε λήψη προκύπτει από τη διαφορά των συντεταγμένων του κέντρου βάρους του δοκιμίου μεταξύ των διαδοχικών θέσεων, με τον τρόπο που αυτές προσδιορίστηκαν προηγουμένως.



Εικόνα 34: Ανακατασκευή σχήματος δοκιμίου (Μώρου, 2014).

Γνωρίζοντας ότι η επίδραση της επιτάχυνσης της βαρύτητας είναι μόνο κατά τον άξονα Z και θεωρώντας την επίδραση του αέρα αμελητέα, η μετατόπιση του τεμάχους στους άξονες X και Y πρέπει να είναι γραμμική, αφού δεν επιδρούν εξωτερικές δυνάμεις στο τεμάχος.

Προκύπτει η μεταβολή της θέσης του δοκιμίου σε κάθε άξονα από τον υπολογισμό της βέλτιστης ευθείας (για τους άξονες X και Y) και παραβολής (για τον άξονα Z) που υπολογίζεται από τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων.

Οι ταχύτητες v_x^{pre} , v_y^{pre} , v_z^{pre} πριν την κρούση και οι αντίστοιχες v_x^{post} , v_y^{post} , v_z^{post} μετά την κρούση υπολογίζονται ως η πρώτη παράγωγος της μετατόπισης σε κάθε άξονα. Λόγω του ότι όλα τα διαγράμματα μετατοπίσεων έχουν απεικονιστεί συναρτήσει του αριθμού των λήψεων, πρέπει να γίνει αναγωγή στη χρονική διάρκεια που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών καταγραφών εικόνων, ώστε η ταχύτητα να εκφραστεί σε μονάδες m/s. Οι δοκιμές κατεγράφησαν με ταχύτητα λήψης 59,94 fps. Επομένως, η πρώτη παράγωγος της μετατόπισης σε κάθε άξονα πρέπει να πολλαπλασιαστεί με το 59,94 s.

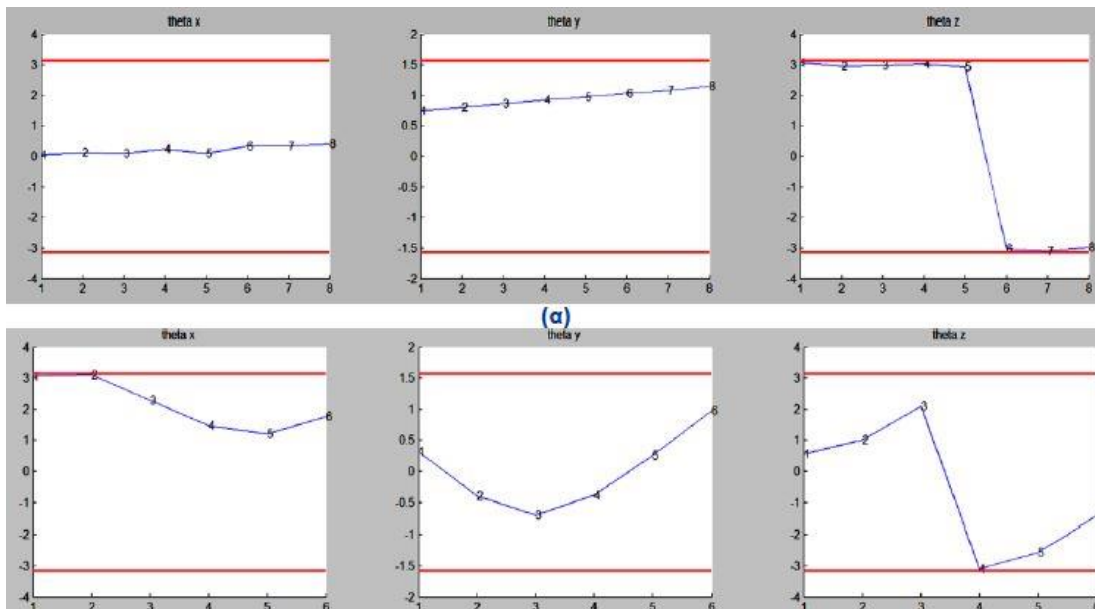
Με τον τρόπο αυτόν προσδιορίζεται η μεταφορική κίνηση του δοκιμίου για κάθε ρίψη, πριν και μετά την κρούση.

4.4.3.2. Προσδιορισμός της Περιστροφικής Κίνησης

Κατ' αντίστοιχο τρόπο γίνεται και ο προσδιορισμός της περιστροφικής κίνησης του δοκιμίου στην τροχιά πριν και μετά την κρούση. Σε αυτήν όμως την περίπτωση, η μεταβολή της γωνιακής ταχύτητας και στους τρεις άξονες είναι γραμμική.

Η στροφή του δοκιμίου μεταξύ διαδοχικών θέσεων, υπολογίζεται από τον πίνακα στροφής (R) όπως αυτός προέκυψε από το στάδιο της ανακατασκευής. Από τον πίνακα R, διαστάσεων $[3 \times 3]$, γίνεται εξαγωγή των γωνιών στροφής θ_x (στροφή στον άξονα X), θ_y (στροφή στον άξονα Y) και θ_z (στροφή στον άξονα Z). Οι στροφές θ_x και θ_z ανήκουν στο πεδίο τιμών $[-\pi, \pi]$ (rad), ενώ η στροφή θ_y στο $\left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$ (rad).

Επειδή οι γωνίες στροφής έχουν πεδίο ορισμού, τα διαγράμματα μεταβολής των γωνιών στροφής παρουσίαζαν σε μερικές περιπτώσεις ασυνέχεια (στα διαγράμματα μεταβολής θ_z) (Εικόνα 35 (α)) ή και αλλαγή κλίσης της ευθείας (στα διαγράμματα μεταβολής θ_y) (Εικόνα 35 (β)).



Εικόνα 35: Διάγραμμα μεταβολής των γωνιών στροφής μεταξύ διαδοχικών λήψεων εικόνων.

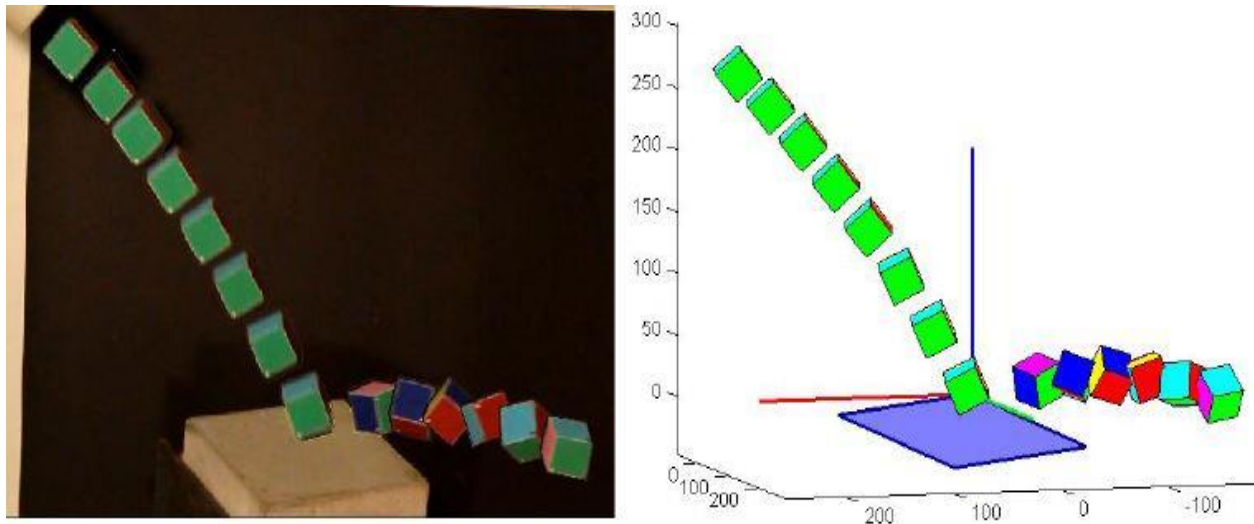
Προς αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, γινόταν από το χρήστη εισαγωγή των τμημάτων που έπρεπε να μετατραπούν. Στο διάγραμμα μεταβολής της γωνίας στροφής θ_z , υπολογίζεται η βέλτιστη ευθεία που διέρχεται από τα σημεία των τμημάτων αφού το τμήμα με την αναδίπλωση μετατεθεί κατά $\pm 2\pi$, ενώ στο διάγραμμα μεταβολής της γωνίας στροφής θ_y υπολογίζεται η βέλτιστη ευθεία αφού αντιστραφεί η κλίση του τμήματος με την αναδίπλωση.

Τελικά, οι γωνιακές ταχύτητες ω_x^{pre} , ω_y^{pre} , ω_z^{pre} πριν την κρούση και οι αντίστοιχες ω_x^{post} , ω_y^{post} , ω_z^{post} μετά την κρούση υπολογίζονται ως η εφαπτομένη (κλίση) της βέλτιστης ευθείας, διαιρεμένη με τη χρονική διάρκεια που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών frames (0,017 s).

Κατά αυτόν τον τρόπο προσδιορίζεται η περιστροφική κίνηση του δοκιμίου για κάθε ρίψη, πριν και μετά την κρούση.

4.4.3.3. Απεικόνιση της Τροχιάς του Δοκιμίου

Εφόσον προσδιορίστηκε η μεταφορική και η περιστροφική κίνηση μέσω του υπολογισμού των γραμμικών και γωνιακών ταχυτήτων, γίνεται αναπαράσταση της τροχιάς του δοκιμίου (Εικόνα 36).



Εικόνα 36: Ανακατασκευασμένη τροχιά δοκιμίου και έλεγχος με την καταγραφείσα.

Για τον έλεγχο της ορθότητας της ανακατασκευής της τροχιάς γίνεται, για κάθε ρίψη, σύγκριση με την καταγεγραμμένη τροχιά από τις φωτομηχανές.

4.5. Υπολογισμός Συντελεστών Αναπήδησης

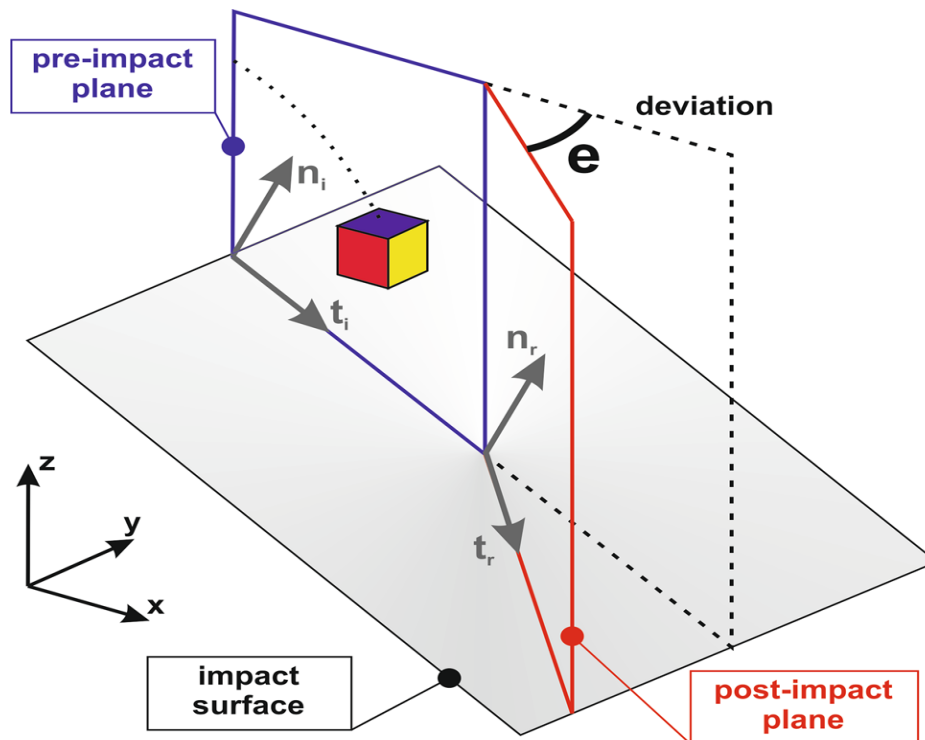
Αφού προσδιορίστηκε η τροχιά κάθε δοκιμίου για κάθε πειραματική ρίψη, στο τοπικό τριδιάστατο σύστημα αναφοράς, σειρά έχει ο υπολογισμός των συντελεστών αναπήδησης σύμφωνα με τις διάφορες μαθηματικές προσεγγίσεις που έχουν αναπτυχθεί αλλά και των άλλων συσχετιζόμενων με την τροχιά μεγεθών.

4.5.1. Υπολογισμός Διεύθυνσης Πρόσπτωσης και Αναπήδησης

Δεδομένου ότι όλοι οι υπολογισμοί γίνονται σε τοπικό σύστημα αξόνων, θεωρήθηκε αυθαίρετα ότι η διεύθυνση του Βορρά ταυτίζεται με την κατεύθυνση του άξονα X.

Έτσι προκύπτει ότι η διεύθυνση της φοράς μεγίστης κλίσης της επιφάνειας πρόσπτωσης είναι 90° . Επομένως, για κάθε διαφορετική σειρά δοκιμών μπορεί να θεωρηθεί ισοδύναμα ότι οι ρίψεις γίνονται με διαφορετική διεύθυνση, σαρώνοντας ένα ημικύκλιο ανά 45° .

Οι διευθύνσεις πρόσπτωσης και αναπήδησης υπολογίζονται διανυσματικά, ως η διεύθυνση της προβολής των διανυσμάτων πρόσπτωσης και αναπήδησης αντίστοιχα στο επίπεδο XY. Η διαφορά μεταξύ διεύθυνσης πρόσπτωσης του δοκιμίου και της διεύθυνσης αναπήδησης ονομάζεται εκτροπή (Εικόνα 37).



Εικόνα 37: Υπολογισμός των διευθύνσεων πρόσπτωσης και αναπήδησης δοκιμίου (Πηγή: Asteriou & Tsiambaos, 2015).

4.5.2. Υπολογισμός Γωνιών Πρόσπτωσης και Αναπήδησης

Για κάθε σειρά δοκιμών υπολογίζεται η κλίση του επιπέδου πρόσκρουσης επί του επιπέδου XY, η οποία αντιστοιχεί στη μέγιστη πραγματική κλίση του επιπέδου (plane_dip). Η τιμή της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης, αποτελεί στοιχείο ελέγχου της ορθότητας

στην αποτύπωση με φωτογραμμετρική εμπροσθοτομία, αφού γίνεται σύγκριση με την μέτρηση από τη γεωλογική πυξίδα και το ηλεκτρονικό κλισίμετρο χειρός.

Για κάθε ρίψη υπολογίζεται και η φαινόμενη κλίση του επιπέδου πρόσπτωσης (app_dip) για κάθε τροχιά, προκειμένου να υπολογιστούν οι γωνίες πρόσπτωσης των δοκιμίων. Υπολογίζεται δηλαδή η κλίση της ευθείας που προκύπτει από την τομή του επιπέδου στο οποίο ανήκει το διάνυσμα πρόσπτωσης (και αναπήδησης αντίστοιχα) με το επίπεδο πρόσκρουσης. Επίσης, υπολογίζονται οι γωνίες των διανυσμάτων πρόσπτωσης (dip_i) και αναπήδησης (dip_r) ως προς το επίπεδο ΧΥ.

Τελικά οι γωνίες πρόσπτωσης και αναπήδησης υπολογίζονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$i = \begin{cases} i = dip_i - app_dip \\ i = 180^\circ - (dip_i + app_dip) \end{cases} \quad (4.3)$$

$$r = \begin{cases} r = dip_r - app_dip \\ r = 180^\circ - (app_dip \pm dip_r) \end{cases} \quad (4.4)$$

Όπου, για κάθε περίπτωση ρίψης χρησιμοποιείται η κατάλληλη σχέση.

Σύμφωνα με τη σύμβαση αυτή όταν το διάνυσμα που περιγράφει την τροχιά κλίνει προς την ίδια κατεύθυνση με την επιφάνεια πρόσκρουσης, η γωνία πρόσκρουσης μπορεί να λάβει τιμές μέχρι 90° , ενώ όταν η επιφάνεια πρόσκρουσης κλίνει αντίρροπα τότε η γωνία πρόσκρουσης θα είναι μεγαλύτερη από 90° .

Η γωνία αναπήδησης προκύπτει μικρότερη των 90° όταν το διάνυσμα κίνησης διατηρεί την κατεύθυνση που είχε πριν την κρούση, στην περίπτωση που η κατεύθυνση ρίψεως είναι αντίθετη της διεύθυνσης φοράς μεγίστης κλίσης του επιπέδου πρόσκρουσης. Προκύπτει μεγαλύτερη των 90° στις υπόλοιπες περιπτώσεις, όπου η διεύθυνση ρίψεως είναι ομόρροπη με τη διεύθυνση φοράς μεγίστης κλίσης του επιπέδου και όταν το διάνυσμα κίνησης μετά την κρούση έχει αντίθετη φορά με αυτό πριν την κρούση.

4.5.3. Υπολογισμός Συντελεστών Αναπήδησης

Αφού υπολογίστηκαν τα διαγράμματα μεταβολής των ταχυτήτων σε κάθε άξονα, μπορεί εύκολα να υπολογιστεί η ταχύτητα που έχει το δοκίμιο αμέσως πριν και μετά την κρούση, εφόσον έχει προσδιοριστεί η χρονική στιγμή κατά την οποία το δοκίμιο έρχεται σε επαφή με το επίπεδο πρόσκρουσης.

Στην αρχή υπολογίζονται οι συντελεστές αναπήδησης που προκύπτουν από τη μαθηματική προσέγγιση του μοντέλου των ταχυτήτων.

$$R_v = \frac{v_r}{v_i} = \frac{\sqrt{(v_{x,r})^2 + (v_{y,r})^2 + (v_{z,r})^2}}{\sqrt{(v_{x,i})^2 + (v_{y,i})^2 + (v_{z,i})^2}} \quad (4.5)$$

Όπου,

v_i, v_r : η ταχύτητα του τεμάχους πριν και μετά από την κρούση

v_x, v_y, v_z : η ταχύτητα του τεμάχους σε κάθε άξονα

Επίσης, οι μεταφορικές ταχύτητες (v_x, v_y, v_z) του δοκιμίου πριν και μετά την κρούση, αναλύονται στο κάθετο στην επιφάνεια πρόσκρουσης επίπεδο ($v_{x,n}, v_{y,n}, v_{z,n}$) ώστε να προκύψει ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης R_n . Αντίστοιχα, υπολογίζεται και ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης R_t , από τις εφαπτομενικές συνιστώσες των ταχυτήτων ($v_{x,t}, v_{y,t}, v_{z,t}$) στο επίπεδο πρόσκρουσης.

Τελικά, υπολογίζονται οι συντελεστές αναπήδησης (R_E, R_{TE}) που προκύπτουν από τη μαθηματική προσέγγιση του ενεργειακού μοντέλου. Οι γωνιακές ταχύτητες του κέντρου μάζας του δοκιμίου, αμέσως πριν και μετά την κρούση, προκύπτουν με ανάλογο τρόπο όπως και οι αντίστοιχες μεταφορικές ταχύτητες.

$$R_E = \frac{E_{trans,r}}{E_{trans,i}} = \frac{0,5 \cdot m \cdot v_r^2}{0,5 \cdot m \cdot v_i^2} = \frac{v_r^2}{v_i^2} = \frac{(v_{x,r})^2 + (v_{y,r})^2 + (v_{z,r})^2}{(v_{x,i})^2 + (v_{y,i})^2 + (v_{z,i})^2} \quad (4.6)$$

$$R_{TE} = \frac{E_{tot,r}}{E_{tot,i}} = \frac{0,5 \cdot (m \cdot (v_{n,r}^2 + v_{t,r}^2) + I \cdot \omega_r^2)}{0,5 \cdot (m \cdot (v_{n,i}^2 + v_{t,i}^2) + I \cdot \omega_i^2)} = \frac{m \cdot (v_{n,r}^2 + v_{t,r}^2) + I \cdot ((\omega_{x,r})^2 + (\omega_{y,r})^2 + (\omega_{z,r})^2)}{m \cdot (v_{n,i}^2 + v_{t,i}^2) + I \cdot ((\omega_{x,i})^2 + (\omega_{y,i})^2 + (\omega_{z,i})^2)} \quad (4.7)$$

Όπου,

E_{trans}, E_{tot} : η μεταφορική και ολική ενέργεια αντίστοιχα

ω_i, ω_r : η γωνιακή ταχύτητα του τεμάχους πριν και μετά από την κρούση

$\omega_x, \omega_y, \omega_z$: η γωνιακή ταχύτητα του τεμάχους σε κάθε άξονα

5. Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Έχοντας επεξεργαστεί και προσδιορίσει τα χαρακτηριστικά μεγέθη των τροχιών, για κάθε ρίψη στο εργαστήριο και στο πεδίο, αλλά και υπολογίσει τους συντελεστές αναπήδησης, γίνεται στο παρόν κεφάλαιο η παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

Αρχικά, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τον υπολογισμό της εκτροπής της τροχιάς μετά την κρούση συναρτήσει της διεύθυνσης και της κλίσης του επιπέδου πρόσκρουσης και της διεύθυνσης ρίψεως του δοκιμίου. Ο υπολογισμός της εκτροπής της τροχιάς ενός βραχοτεμάχους είναι καθοριστικής σημασίας, καθώς πολλά υπολογιστικά προγράμματα βασίζονται στην ανάλυση της τροχιάς μετά την κρούση για την πρόβλεψη περιοχών υψηλού κινδύνου από καταπτώσεις βράχων.

5.1. Διεύθυνση κρούσης – αναπήδησης

Στο υποκεφάλαιο αυτό θα ακολουθήσει η ανάλυση των διαγραμμάτων για τις δοκιμές εργαστηρίου αλλά και για αυτές του πεδίου. Τα διαγράμματα προέκυψαν από σειρά αναλύσεων η οποία πραγματοποιήθηκε στο υπολογιστικό περιβάλλον της Matlab.

Γενικώς, για την καλύτερη κατανόηση της διεύθυνσης των τεμαχών και της μεταβολής της εξαιτίας της κρούσης χρησιμοποιήθηκε η στερεογραφική προβολή Schmidt. Τα πράσινα σημεία δείχνουν την διεύθυνση και την γωνία πρόσκρουσης πριν την κρούση, ενώ τα κόκκινα δείχνουν τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά μετά την κρούση. Με το μπλε χρώμα προβάλλεται το επίπεδο πρόσκρουσης, ως μέγιστος κύκλος.

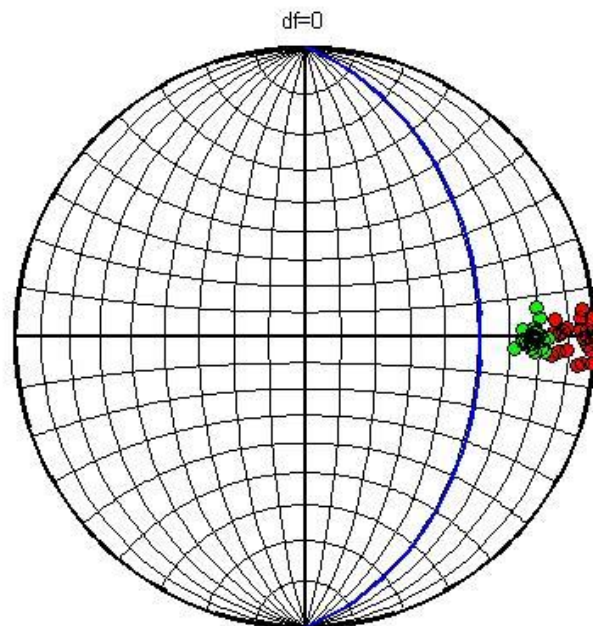
5.1.1. Δοκιμές Εργαστηρίου

Στο εργαστήριο εκτελέστηκαν 5 σειρές δοκιμών, για σταθερή κλίση του επιπέδου πρόσκρουσης στις 40° μεταβάλλοντας κάθε φορά την διεύθυνση ρίψης. Έτσι, γίνεται ο υπολογισμός της εκτροπής της τροχιάς εξαιτίας κρούσης.

Παρακάτω παρουσιάζονται με τη σειρά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις δοκιμές εργαστηρίου.

1^η σειρά δοκιμών :

- Κλίση του επιπέδου πρόσκρουσης 40°
- Διαφορά διεύθυνσης $d_i=0^\circ$

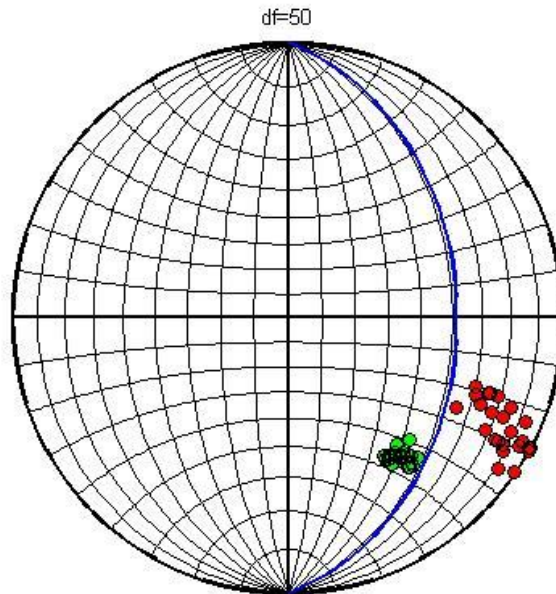


Εικόνα 38: Κύκλος Schmidt για κλίση του επιπέδου πρόσκρουσης 40° και διαφορά διεύθυνσης $d_i=0^\circ$

Σε αυτή την περίπτωση το τέμαχος προσκρούει με μια γωνία της τάξης $\sim 25^\circ$ και μετά την κρούση το τέμαχος εκτρέπεται λίγο από το επίπεδο πρόσκρουσης και αναπηδά με γωνία στο εύρος $0^\circ - 20^\circ$ κλίση.

2^η σειρά δοκιμών :

- Κλίση του επιπέδου πρόσκρουσης 40°
- Διαφορά διεύθυνσης $d_f=50^\circ$

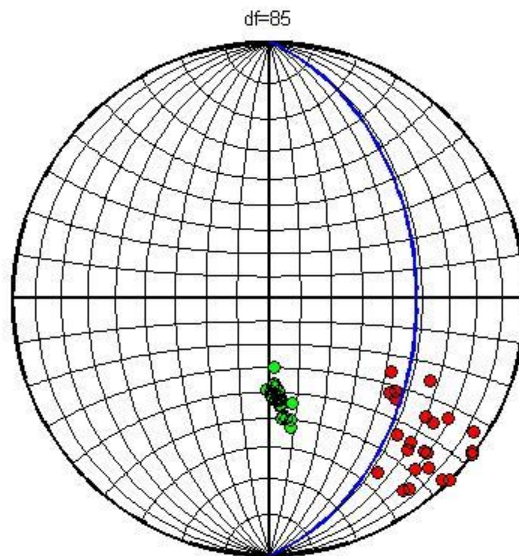


Εικόνα 39: Κύκλος Schmidt για κλίση του επιπέδου πρόσκρουσης 40° και διαφορά διεύθυνσης $d_f=50^\circ$

Η φορά μεγίστης κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης είναι σε κάθε περίπτωση στις 90° , αφού οι άξονες του τριδιάστατου συστήματος αναφοράς βασίζονται στην φορά μεγίστης κλίσης και την διεύθυνση της επιφάνειας. Το τέμαχος προσκρούει σε αυτή με οριζόντια γωνία (διαφορά διεύθυνσης) περίπου 45° με 50° . Μετά την πρόσκρουση το τέμαχος εκτρέπεται κατά 25° με 30° προς την φορά μεγίστης κλίσης του πρανούς. Έτσι, συμπεραίνεται ότι η εκτροπή του τεμάχους λαμβάνει χώρα σύμφωνα με την κλίση του πρανούς, αυτό ισχύει γενικά για όλες τις δοκιμές.

3^η σειρά δοκιμών :

- Κλίση του επιπέδου πρόσκρουσης 40°
- Διαφορά διεύθυνσης $d_f=85^\circ$

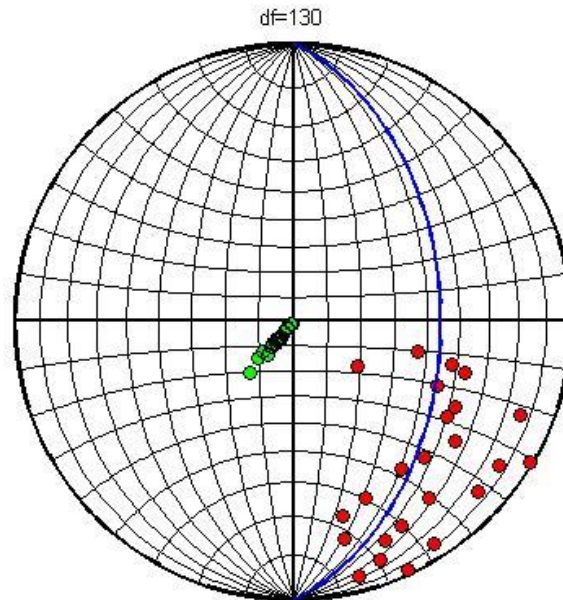


Εικόνα 40: Κύκλος Schmidt για κλίση του επιπέδου πρόσκρουσης 40° και διαφορά διεύθυνσης $d_f=85^\circ$

Στη σειρά δοκιμών που παρουσιάζεται, το τέμαχος προσκρούει στην επιφάνεια με διαφορά διεύθυνσης σχεδόν κάθετη $\sim 90^\circ$. Έτσι συναντά την επιφάνεια πρόσκρουσης κατά την διεύθυνση της παράταξης της, συνεπώς η φαινόμενη κλίση της είναι περίπου οριζόντια. Όπως και προηγουμένως το τέμαχος εκτρέπεται με μια γωνία κλίσης $\sim 50^\circ$, προς τα εκεί που κλίνει το πρανές, δηλαδή η επιφάνεια πρόσκρουσης.

4^η σειρά δοκιμών :

- Κλίση του επιπέδου πρόσκρουσης 40°
- Διαφορά διεύθυνσης $d_f=130^\circ$

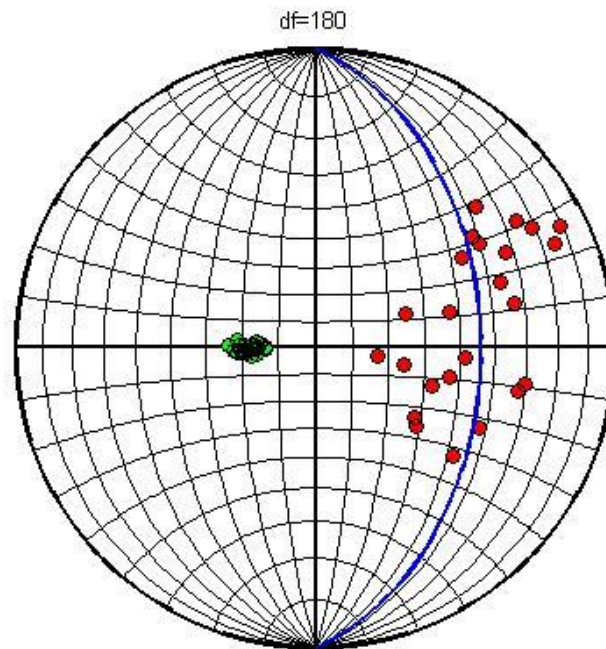


Εικόνα 41: Κύκλος Schmidt για κλίση του επιπέδου πρόσκρουσης 40° και διαφορά διεύθυνσης $d_f=130^\circ$

Το τέμαχος σε αυτή τη δοκιμή προσκρούει με μια γωνία $\sim 130^\circ$, όπως αυτό φαίνεται και στο πάνω σχήμα. Μετά την πρόσκρουση, παρατηρείται σημαντική διασπορά της εκτροπής σύμφωνα και με τον κύκλο Schmidt. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη διαφορά διεύθυνσης που είναι μεγαλύτερη των 90° , ουσιαστικά συναντάται η επιφάνεια πρόσκρουσης με αρνητική κλίση, Όπως παρατηρείται και σε αυτή την περίπτωση το τέμαχος εκτρέπεται προς την κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης.

5^η σειρά δοκιμών :

- Κλίση του επιπέδου πρόσκρουσης 40°
- Διαφορά διεύθυνσης $d_f=180^\circ$



Εικόνα 42: Κύκλος Schmidt για κλίση του επιπέδου πρόσκρουσης 40° και διαφορά διεύθυνσης $d_f=180^\circ$

Εδώ το τέμαχος συναντάει το πρανές εντελώς μετωπικά, δηλαδή προσκρούει στην επιφάνεια του πρανούς με 180° διαφορά διεύθυνσης. Παρατηρείται ότι μετά την πρόσκρουση τα τεμάχια εκτρέπονται προς τα πίσω, ακολουθούν και πάλι την κλίση του πρανούς.

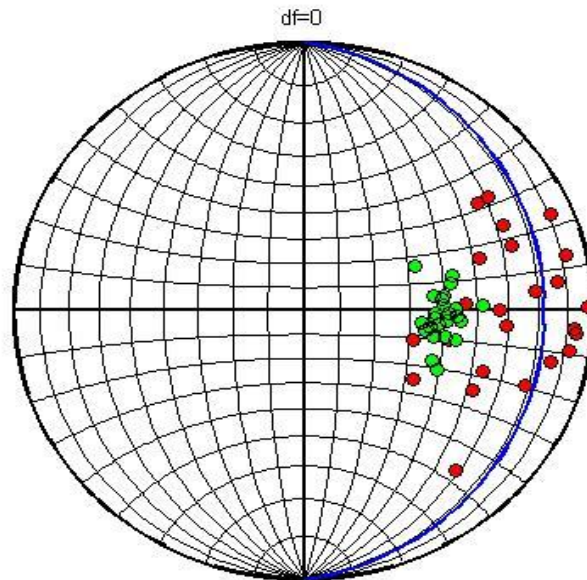
5.1.2. Δοκιμές Πεδίου

Δοκιμές πεδίου εκτελέστηκαν για κλίση επιφάνειας πρόσκρουσης 20° και 40° . Για κάθε κλίση πραγματοποιήθηκαν 4 σειρές δοκιμών σαρώνοντας ένα ημικύκλιο ανά $\sim 40^\circ$, αλλάζοντας την διεύθυνση ρίψης του τεμάχου. Τα αποτελέσματα των δοκιμών πεδίου παρουσιάζονται παρακάτω:

1) Κλίση του επιπέδου πρόσκρουσης 20°

1^η σειρά δοκιμών :

- Κλίση του επιπέδου πρόσκρουσης 20°
- Διαφορά διεύθυνσης $d_i=0^\circ$

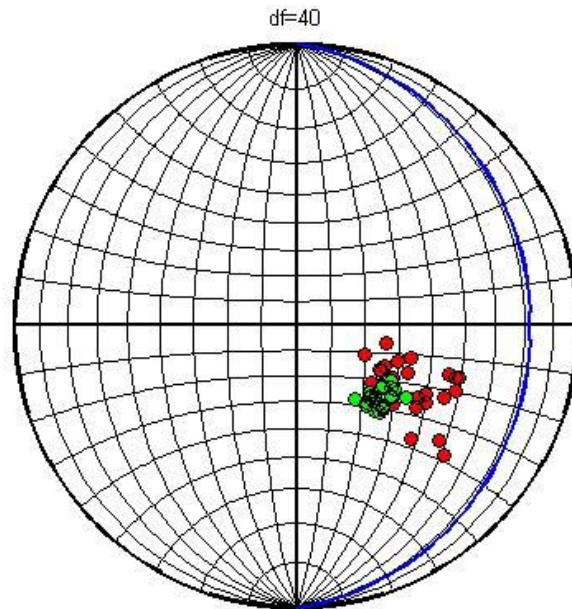


Εικόνα 43: Κύκλος Schmidt για κλίση του επιπέδου πρόσκρουσης 20° και διαφορά διεύθυνσης $d_i=0^\circ$

Σε αυτή την περίπτωση το τεμάχος προσκρούει με μια γωνία κλίσης $\sim 25^\circ$, η εκτροπή είναι της τάξης $\sim 20^\circ$, διακρίνουμε σχετικά μεγάλη διασπορά στις τιμές της γωνίας μετά την πρόσκρουση.

2^η σειρά δοκιμών :

- Κλίση του επιπέδου πρόσκρουσης 20°
- Διαφορά διεύθυνσης $d_i=40^\circ$

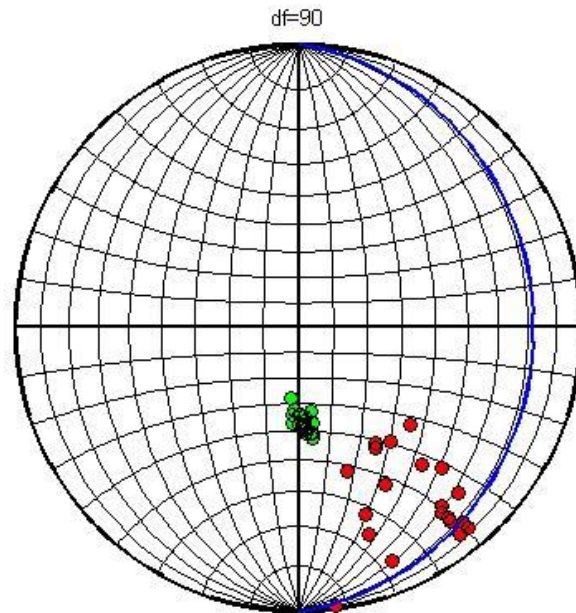


Εικόνα 44: Κύκλος Schmidt για κλίση του επιπέδου πρόσκρουσης 20° και διαφορά διεύθυνσης $d_i=40^\circ$

Σε αυτή την περίπτωση το τέμαχος προσκρούει με διαφορά διεύθυνσης $\sim 40^\circ$, η εκτροπή είναι της τάξης $\sim 25^\circ$, βλέπουμε και πάλι πως το τέμαχος τείνει μετά την πρόσκρουση να ακολουθεί την κλίση του πρανούς.

3^η σειρά δοκιμών :

- Κλίση του επιπέδου πρόσκρουσης 20°
- Διαφορά διεύθυνσης $d_i=90^\circ$

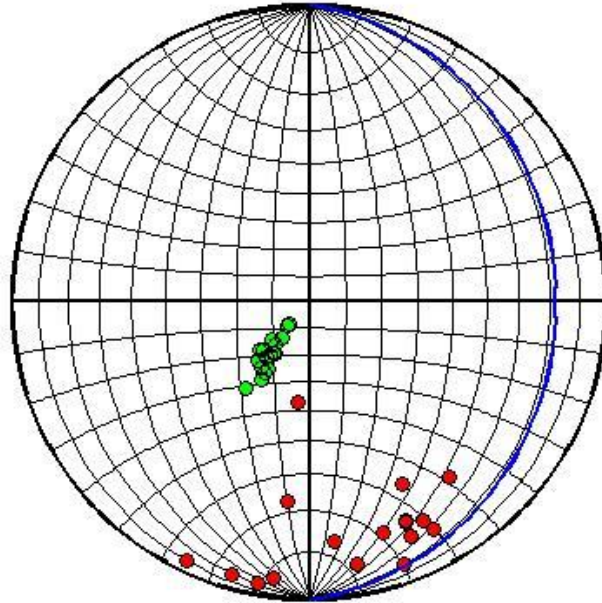


Εικόνα 45: Κύκλος Schmidt για κλίση του επιπέδου πρόσκρουσης 20° και διαφορά διεύθυνσης $d_i=90^\circ$

Σε αυτή την περίπτωση το τέμαχος προσκρούει με διαφορά διεύθυνσης $\sim 90^\circ$, η εκτροπή είναι της τάξης $\sim 35^\circ$, βλέπουμε και πάλι πως το τέμαχος τείνει μετά την πρόσκρουση να ακολουθεί την κλίση του πρανούς.

4^η σειρά δοκιμών :

- Κλίση του επιπέδου πρόσκρουσης 20°
- Διαφορά διεύθυνσης $d_i=150^\circ$



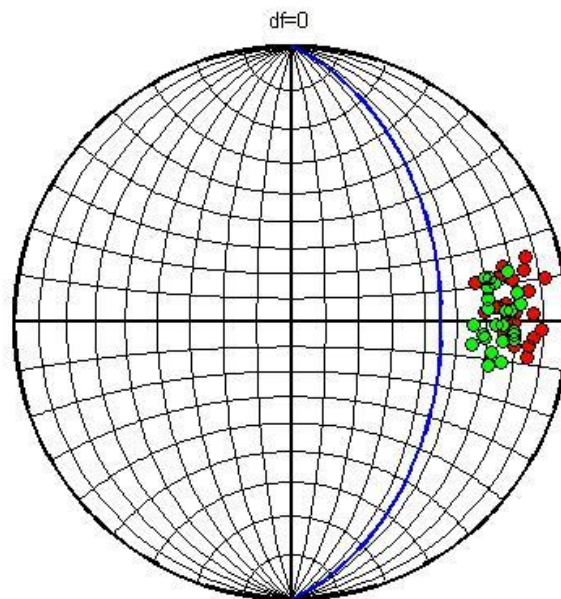
Εικόνα 46: Κύκλος Schmidt για κλίση του επιπέδου πρόσκρουσης 20° και διαφορά διεύθυνσης $d_i=150^\circ$

Σε αυτή την περίπτωση το τέμαχος προσκρούει με διαφορά διεύθυνσης $\sim 150^\circ$, η εκτροπή είναι της τάξης $\sim 55^\circ$, βλέπουμε και πάλι πως το τέμαχος τείνει μετά την πρόσκρουση να ακολουθεί την κλίση του πρανούς. Λόγω του ότι μπλέκονται πολύ οι γωνίες, έχουμε μεγάλη διασπορά και το διάγραμμα δεν είναι άμεσα αξιοποιήσιμο.

2) Κλίση του επιπέδου πρόσκρουσης 45°

1^η σειρά δοκιμών :

- Κλίση του επιπέδου πρόσκρουσης 45°
- Διαφορά διεύθυνσης $d_i=0^\circ$

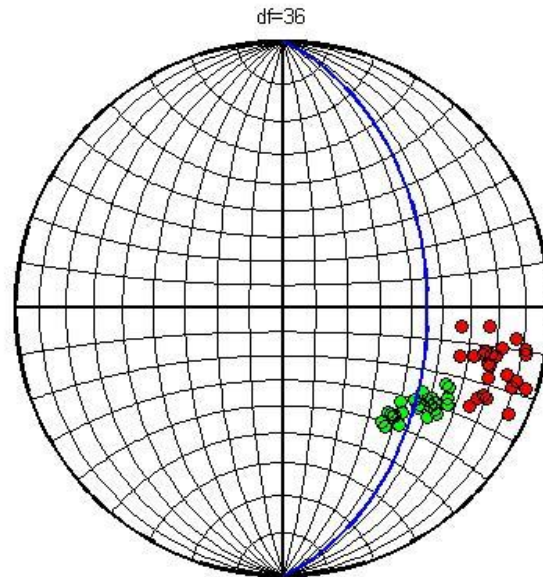


Εικόνα 47: Κύκλος Schmidt για κλίση του επιπέδου πρόσκρουσης 45° και διαφορά διεύθυνσης $d_i=0^\circ$

Σε αυτή την περίπτωση το τέμαχος προσκρούει ομόρροπα του πρανούς, η εκτροπή είναι της τάξης $\sim 20^\circ$, βλέπουμε και πάλι πως το τέμαχος τείνει μετά την πρόσκρουση να ακολουθεί την κλίση του πρανούς.

2^η σειρά δοκιμών :

- Κλίση του επιπέδου πρόσκρουσης 45°
- Διαφορά διεύθυνσης $d_f=40^{\circ}$

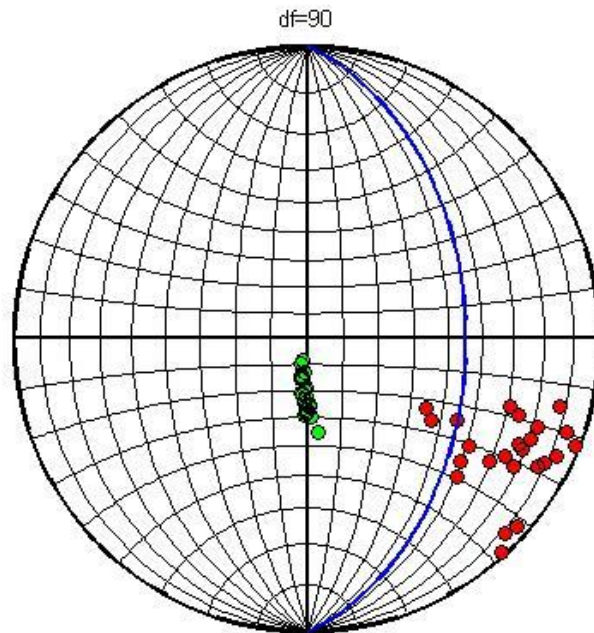


Εικόνα 48: Κύκλος Schmidt για κλίση του επιπέδου πρόσκρουσης 45° και διαφορά διεύθυνσης $d_f=40^{\circ}$

Η επιφάνεια πρόσκρουσης είναι πάντα στις 90° , το τέμαχος προσκρούει σε αυτήν με μια διαφορά διεύθυνσης $45^{\circ} - 50^{\circ}$. Μετά την πρόσκρουση το τέμαχος όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα εκτρέπεται με μια γωνία κλίσης $15^{\circ} - 20^{\circ}$.

3^η σειρά δοκιμών :

- Κλίση του επιπέδου πρόσκρουσης 45°
- Διαφορά διεύθυνσης $d_f=90^\circ$

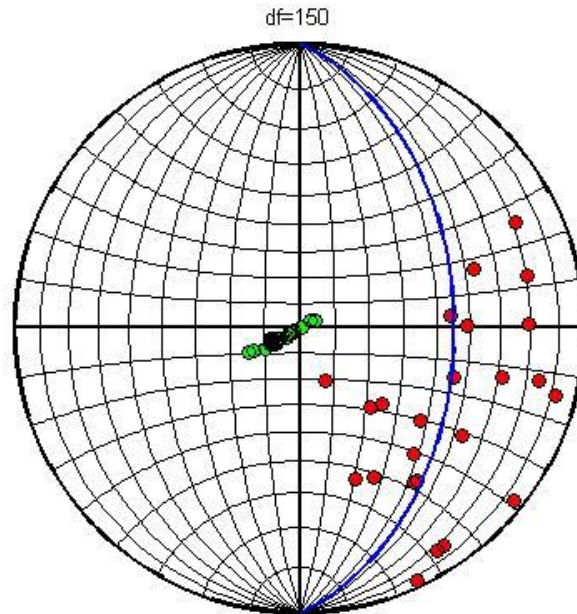


Εικόνα 49: Κύκλος Schmidt για κλίση του επιπέδου πρόσκρουσης 45° και διαφορά διεύθυνσης $d_f=90^\circ$

Σε αυτή την περίπτωση το τέμαχος προσκρούει με διαφορά διεύθυνσης $\sim 90^\circ$, η εκτροπή είναι της τάξης $\sim 30^\circ$, βλέπουμε και πάλι πως το τέμαχος τείνει μετά την πρόσκρουση να ακολουθεί την κλίση του πρανούς.

4^η σειρά δοκιμών :

- Κλίση του επιπέδου πρόσκρουσης 45°
- Διαφορά διεύθυνσης $d_f=150^{\circ}$



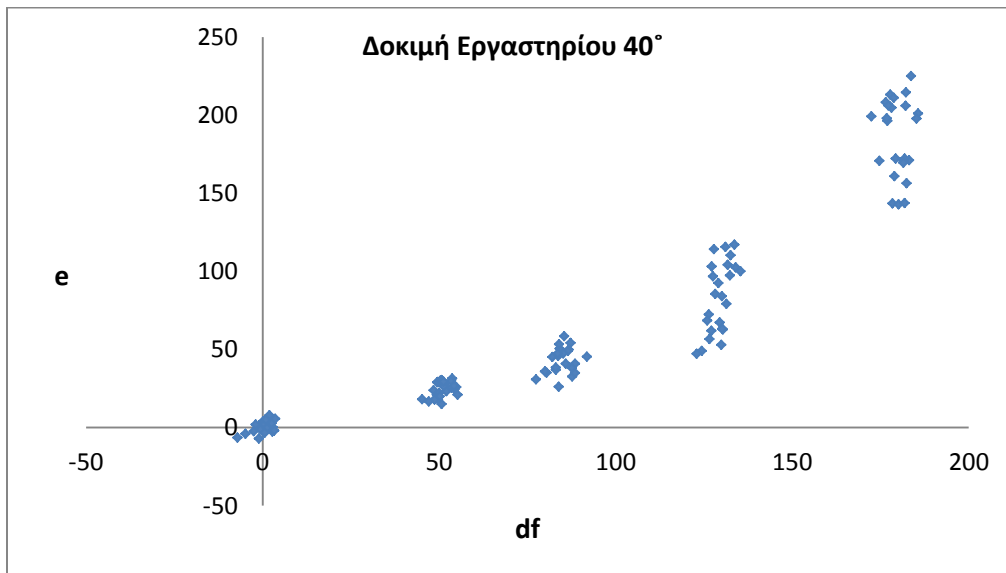
Εικόνα 50: Κύκλος Schmidt για κλίση του επιπέδου πρόσκρουσης 45° και διαφορά διεύθυνσης $d_f=150^{\circ}$

Το τέμαχος σε αυτή τη δοκιμή προσκρούει με μια γωνία $\sim 150^{\circ}$, όπως αυτό φαίνεται και στο πάνω σχήμα. Μετά την πρόσκρουση παρατηρείται σημαντική άυξήσή της. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη διαφορά διεύθυνσης που είναι μεγαλύτερη των 90° , ουσιαστικά το πρανές συναντάται με αρνητική κλίση. Λόγω των συνθηκών του πεδίου όπου εκτελέστηκε η δοκιμή, παρατηρείται ακόμα μεγαλύτερη διασπορά από ότι στο εργαστήριο, αυτό οφείλεται επιπρόσθετα στο ότι δεν έχουμε σταθερό μηχανισμό ρίψης όπως στις εργαστηριακές δοκιμές, καθώς οι ρίψεις πραγματοποιήθηκαν με το χέρι. Σε κάθε περίπτωση πάντως, το τέμαχος εκτρέπεται προς την φορά μεγίστης κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης.

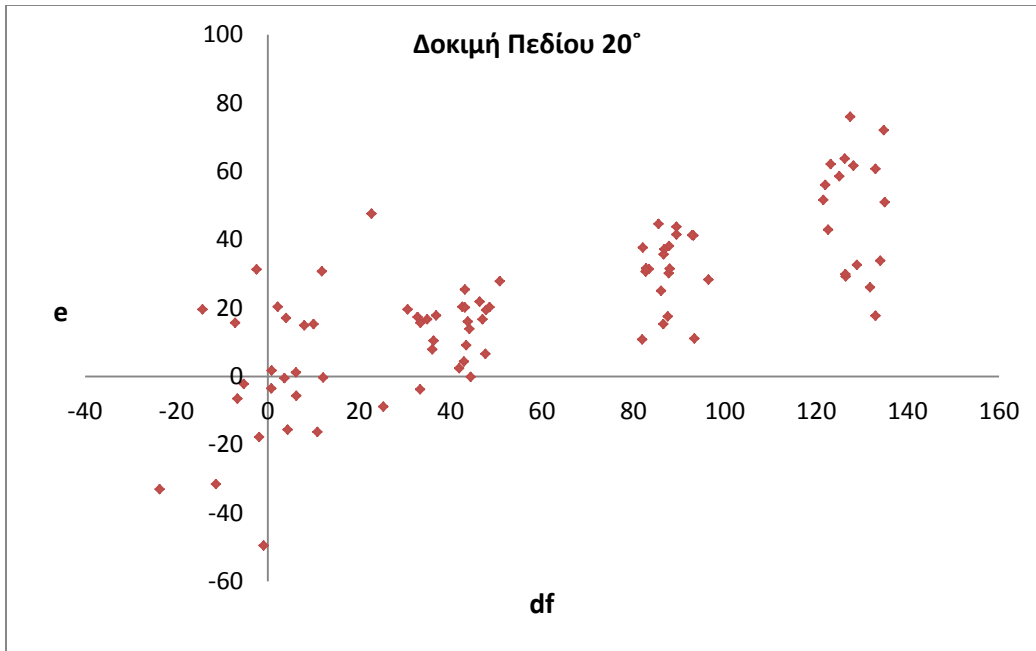
5.1.3. Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα

Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζονται τα διαγράμματα εκτροπής-διαφοράς διεύθυνσης για τις διαφορετικές κλίσεις της επιφάνειας πρόσκρουσης. Συνολικά παρουσιάζονται τρία διαγράμματα: για κλίση πρανούς 40° που αφορά στις δοκιμές που έγιναν στο εργαστήριο και για κλίσεις πρανούς 20° και 45° που αφορούν στις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο πεδίο. Θα εστιάσουμε στην σύγκριση των αποτελεσμάτων για την ίδια διαφορά διεύθυνσης d_f και διαφορετική κλίση πρανούς, αλλά και θα εισάγουμε στα αποτελέσματα κατά την σύγκριση και την έννοια της κλίμακας.

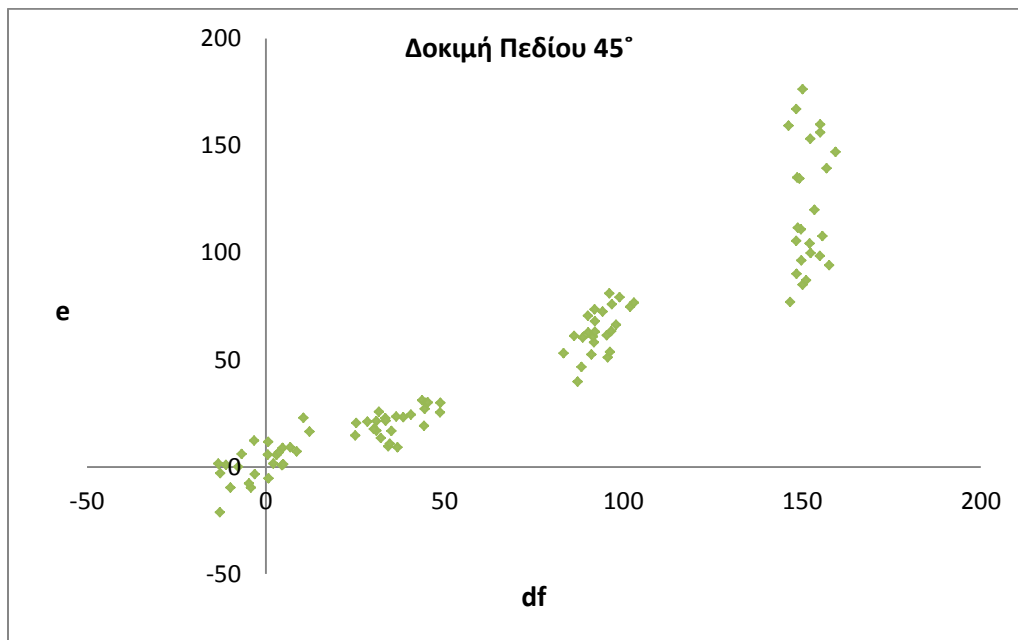
Παρακάτω φαίνονται συγκεντρωτικά τα προαναφερθέντα διαγράμματα:



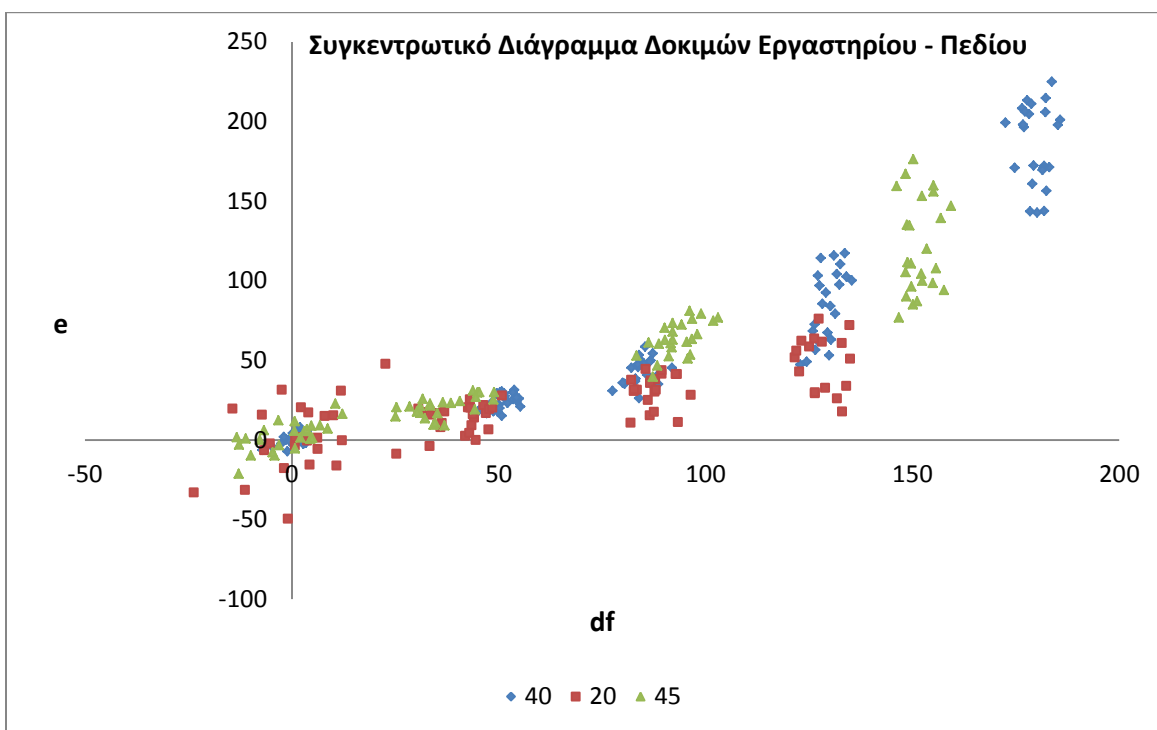
Διάγραμμα 7: Εκτροπή-διαφορά διεύθυνσης για κλίση πρανούς 40° (Εργαστήριο).



Διάγραμμα 8: Εκτροπή-διαφορά διεύθυνσης για κλίση πρανούς 20° (Πεδίο).



Διάγραμμα 9: Εκτροπή-διαφορά διεύθυνσης για κλίση πρανούς 45° (Πεδίο).



Διάγραμμα 10: Συγκεντρωτικό δοκιμών εργαστηρίου-πεδίου.

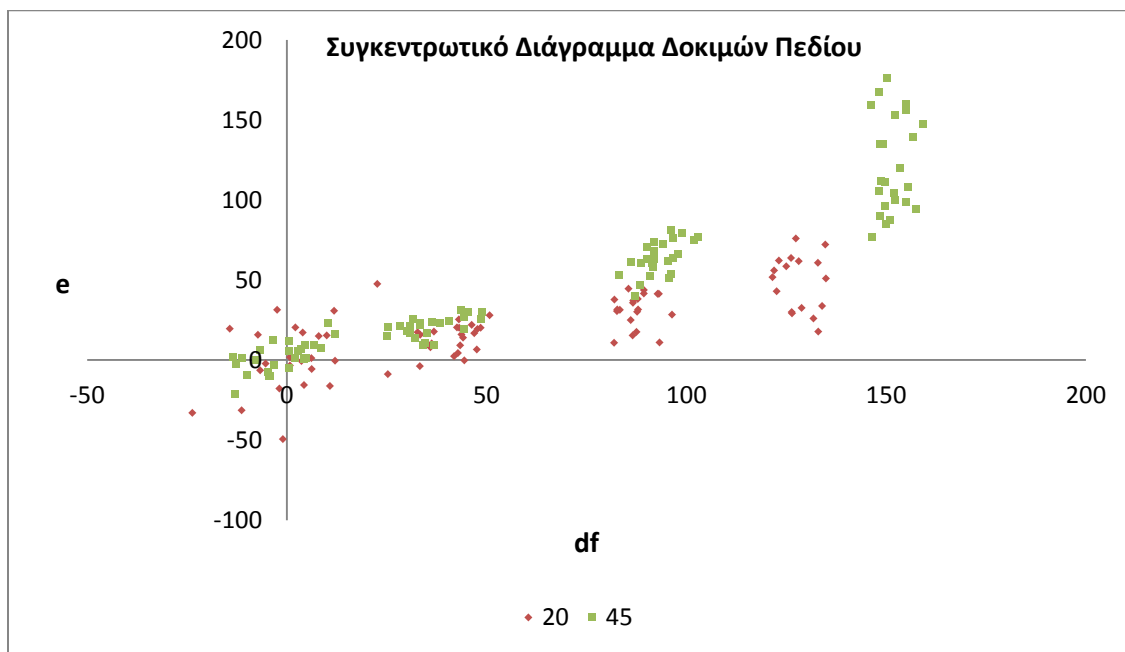
Από τη σύγκριση των διαγραμμάτων $e - d_f$, όπου το e είναι η εκτροπή και το d_f είναι η διαφορά διεύθυνσης, μπορούμε να εξάγουμε αρκετά χρήσιμα και σημαντικά συμπεράσματα για τον προσανατολισμό και για το πως συσχετίζεται η εκτροπή του τεμάχους με την κλίση του πρανούς. Γενικά στα διαγράμματα $e - d_f$ διακρίνουμε ξεκάθαρα ότι όσο μεγαλώνει η διαφορά διεύθυνσης, αυξάνεται η εκτροπή. Αυτό παρουσιάζεται ευκρινώς εξετάζοντας το συγκεντρωτικό διάγραμμα, δίνοντας έμφαση στα άνω - κάτω όρια των τιμών.

Συγκρίνοντας τα διαγράμματα εκτροπής (e) - διαφοράς διεύθυνσης (d_f) για 45° κλίση πρανούς στο πεδίο και 40° κλίση πρανούς στο εργαστήριο, διακρίνουμε σαφέστερες ομοιότητες, οι τιμές είναι πάρα πολύ κοντά η μια με την άλλη.

Γίνεται σαφές ότι οι τιμές της εκτροπής που προκύπτουν για κλίση πρανούς 45° στο πεδίο έχουν μεγαλύτερη διασπορά, δηλαδή μεγαλύτερο εύρος τιμών διαφοράς διεύθυνσης, αυτό

οφείλεται εν μέρει στις διαφορετικές συνθήκες απελευθέρωσης των τεμαχών. Το εύρος της διεύθυνσης πριν την κρούση κυμαίνεται μεταξύ $\pm 12^\circ$ στις δοκιμές πεδίου ενώ για τις δοκιμές εργαστηρίου για κλίση πρανούς 40° το αντίστοιχο εύρος είναι $\pm 5^\circ$. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι η ρίψη τεμαχών πραγματοποιήθηκε με το χέρι στο πεδίο, οπότε η πορεία της ρίψης δεν ήταν δυνατό να είναι πανομοιότυπη σε κάθε επανάληψη, εν αντιθέσει με τις συνθήκες του εργαστηρίου όπου η ρίψη τεμαχών γινόταν μέσω ειδικού σωλήνα,. Παρόλα αυτά η σύγκριση των δύο περιπτώσεων του πεδίου και του εργαστηρίου για τις συγκεκριμένες κλίσεις πρανούς είναι πάρα πολύ καλή.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρατίθενται οι δοκιμές πεδίου, παρατηρούνται σημαντικές διαφοροποιήσεις στο μέγεθος της εκτροπής που προφανώς οφείλονται στην κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης.



Διάγραμμα 11: Συγκεντρωτικό δοκιμών πεδίου.

Γενικώς, ισχύει ότι μεγαλύτερη εκτροπή τεμαχών εμφανίζεται για μικρότερη κλίση του πρανούς, κάτι που επαληθεύεται και από προηγούμενες μελέτες, συνεπώς τα αποτελέσματα είναι μεταξύ τους συμβατά. Η μεγαλύτερη εκτροπή για μικρότερης κλίσης

πρανές οφείλεται ακόμη και στο γεγονός του ότι όταν το πρανές είναι απότομο, το τεμάχος ολισθαίνει και απομακρύνεται γρήγορα, δηλαδή η επαφή είναι σαφώς ηπιότερη. Στην αντίθετη περίπτωση όπου το πρανές έχει ήπια κλίση η επαφή είναι σφοδρότερη και γενικώς η διαδικασία αναδιάταξης του τεμάχους καθίσταται πολύπλοκη, με αποτέλεσμα να είναι αυξημένη η διασπορά.

Αξίζει να αναφερθεί σε αυτό το στάδιο ότι η επιρροή της κλίμακας σε σχέση με τα αποτελέσματα των δοκιμών τόσο του εργαστηρίου όσο και του πεδίου ήταν μηδενική, δηλαδή η κλίμακα δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα των δοκιμών αναφορικά με την εκτροπή των τεμαχών.

5.2. Συντελεστές Αναπήδησης

Οι συντελεστές αναπήδησης υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας τις σχέσεις των διαφόρων μαθηματικών προσεγγίσεων που παρουσιάζονται στις προηγούμενες ενότητες, με τα πρωτογενή αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών από το εργαστήριο και το πεδίο και συνοψίζονται ακολούθως πινακοποιημένα.

Πίνακας 14: Τιμές συντελεστών αναπήδησης

ΣΕΙΡΑ ΔΟΚΙΜΩΝ	R_v	R_n	R_t	R_E	R_{ET}
1	0.794 ±0.092	0.240 ±0.187	0.850 ±0.099	0.639 ±0.144	0.671 ±0.148
2	0.818 ±0.064	0.325 ±0.221	0.964 ±0.102	0.672 ±0.105	0.721 ±0.131
3	0.714 ±0.111	0.254 ±0.168	1.250 ±0.262	0.522 ±0.157	0.577 ±0.156
4	0.420 ±0.115	0.179 ±0.124	-4.743 ±4.712	0.189 ±0.093	0.262 ±0.132
5	0.369 ±0.119	0.243 ±0.119	-0.891 ±0.391	0.150 ±0.097	0.197 ±0.112
6	0.535 ±0.170	0.295 ±0.217	0.728 ±0.263	0.314 ±0.188	0.319 ±0.185
7	0.516 ±0.089	0.463 ±0.102	0.608 ±0.186	0.273 ±0.098	0.470 ±0.321
8	0.368 ±0.099	0.174 ±0.103	0.705 ±0.233	0.145 ±0.075	0.262 ±0.148
9	0.327 ±0.143	0.116 ±0.134	1.022 ±0.471	0.126 ±0.103	0.280 ±0.260
10	0.652 ±0.098	0.526 ±0.205	0.680 ±0.102	0.435 ±0.134	0.437 ±0.140
11	0.655 ±0.100	0.356 ±0.181	0.771 ±0.093	0.438 ±0.129	0.455 ±0.142
12	0.602 ±0.093	0.210 ±0.149	2.395 ±1.041	0.371 ±0.116	0.409 ±0.149
13	0.342 ±0.123	0.174 ±0.116	-0.750 ±9.842	0.131 ±0.082	0.162 ±0.095

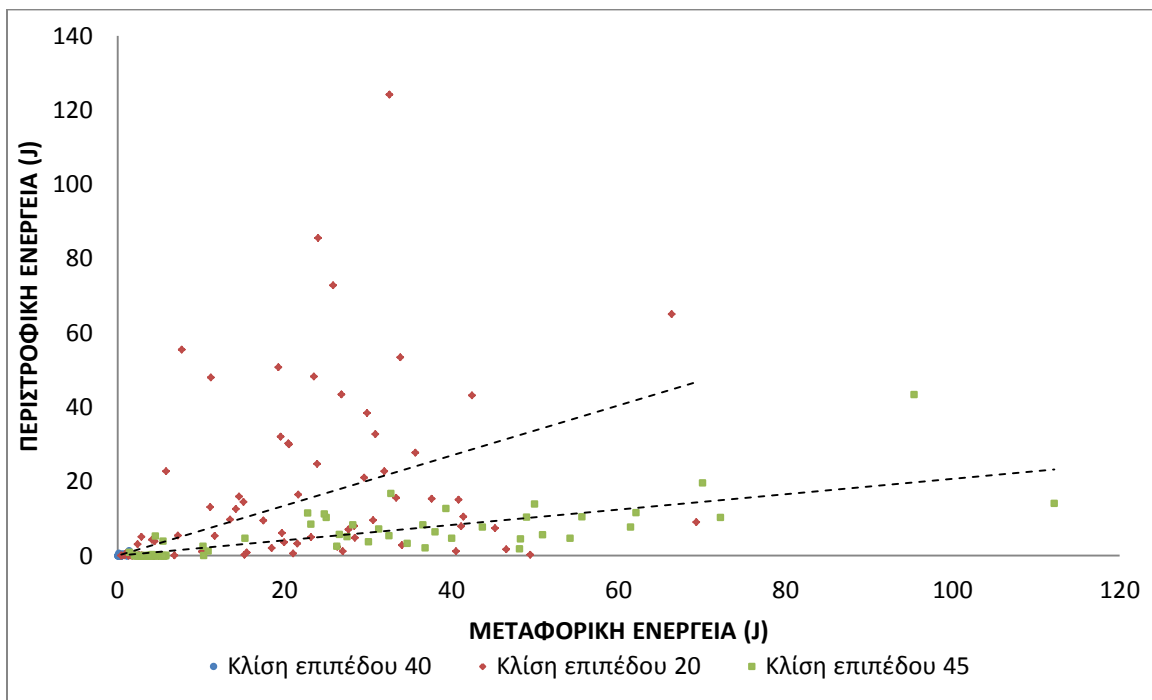
Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, προκύπτει ότι οι συντελεστές αναπήδησης που υπολογίζονται με βάση τα ενεργειακά μοντέλα (R_E , R_{ET}) έχουν μικρότερη διασπορά από ότι οι συντελεστές που προκύπτουν από τα μοντέλα ταχυτήτων.

5.2.1. Επίδραση της Περιστροφής στους Συντελεστές Αναπήδησης

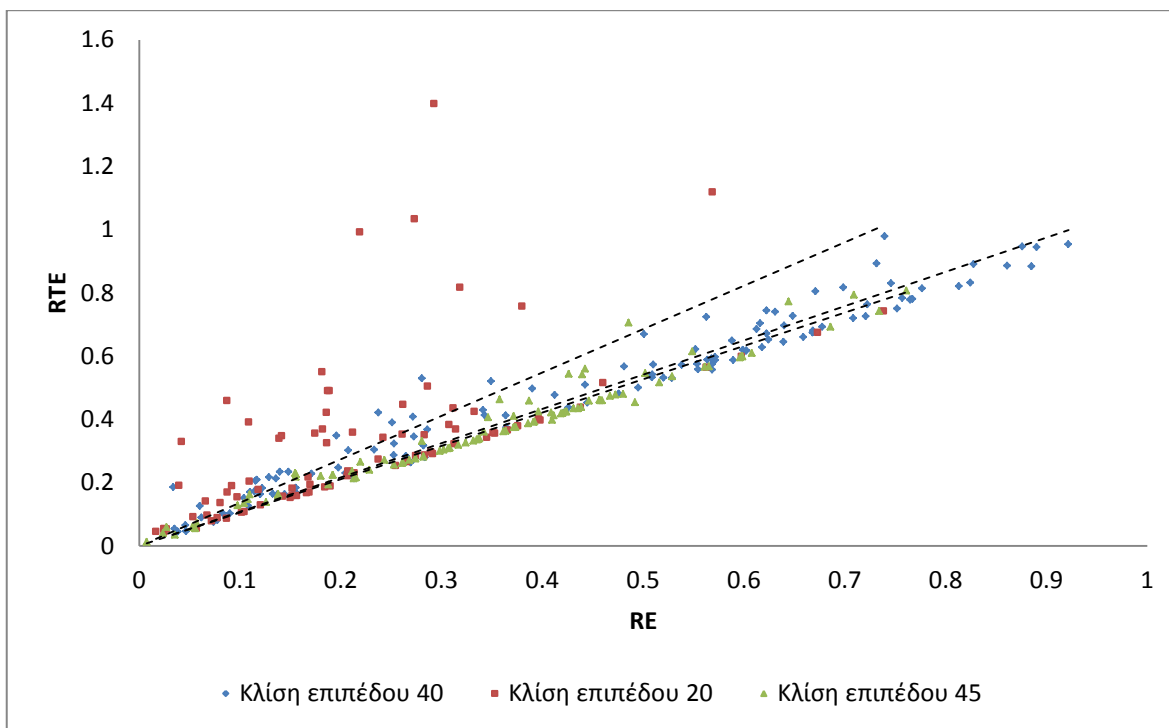
Γενικώς, πολύ λίγες μελέτες έχουν ασχοληθεί με την διερεύνηση του φαινομένου επίδρασης της περιστροφής στις τιμές των συντελεστών αναπήδησης.

Σύμφωνα με τη Japan Road Association (JRA), με βάση 60 δοκιμές πεδίου που πραγματοποιήθηκαν σε διαφορετικές περιοχές της Ιαπωνίας, ο μέσος λόγος της περιστροφικής προς τη μεταφορική ενέργεια μετά την κρούση είναι 10%, με μέγιστη τιμή το 40%.

Έχοντας πραγματοποιήσει εργαστηριακές δοκιμές αλλά και δοκιμές πεδίου στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, προέκυψε ότι ο μέσος λόγος της περιστροφικής και μεταφορικής ενέργειας μετά την κρούση του τεμάχου είναι 20%, με μέγιστη τιμή το 67%.



Διάγραμμα 12: Επίδραση της περιστροφής στην ενέργεια αμέσως μετά την κρούση.



Διάγραμμα 13: Επίδραση της περιστροφής στους συντελεστές αναπήδησης.

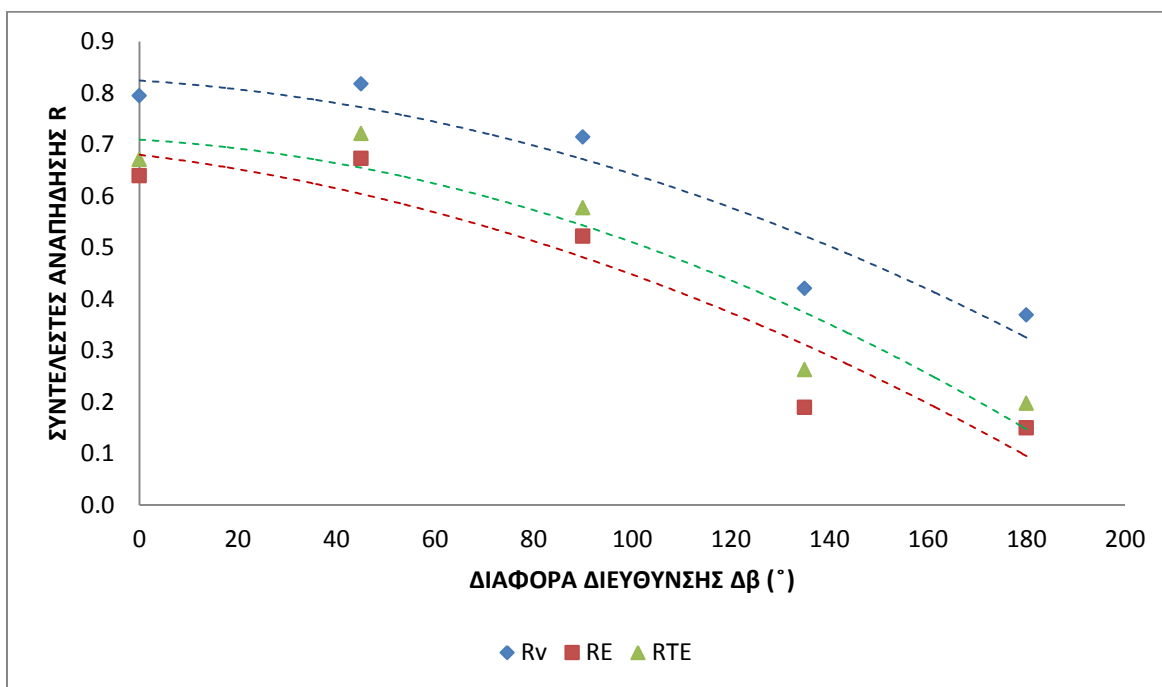
Επομένως η επίδραση της περιστροφής δεν πρέπει να αγνοείται, ειδικά για μικρές τιμές της μεταφορικής ενέργειας η επίδραση αυτή είναι αρκετά σημαντική. Ο συντελεστής αναπήδησης που υπολογίζεται με τη συμμετοχή της περιστροφικής ενέργειας (R_{TE}) προκύπτει μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο συντελεστή αναπήδησης που αγνοεί την περιστροφή (R_E). Επίσης, παρατηρείται ότι όσο η κλίση του επιπέδου αυξάνεται, τόσο μειώνεται η τιμή του συντελεστή αναπήδησης R_{TE} , μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο την επίδραση της περιστροφικής ενέργειας στον υπολογισμό των συντελεστών αναπήδησης.

5.2.2. Επίδραση των Χαρακτηριστικών της Τροχιάς στους Συντελεστές Αναπήδησης

Οι τιμές των συντελεστών αναπήδησης εξαρτώνται τόσο από τα χαρακτηριστικά του επιπέδου πρόσπτωσης, όσο και από τη διεύθυνση και γωνία κατά την πρόσπτωση και αναπήδηση.

5.2.2.1. Επίδραση της Διεύθυνσης Πρόσκρουσης στους Συντελεστές Αναπήδησης

Γενικά παρατηρείται ότι όσο η διεύθυνση πρόσκρουσης αποκλίνει από τη διεύθυνση μέγιστης κλίσης του επιπέδου πρόσπτωσης, τόσο μειώνονται και οι τιμές των συντελεστών αναπήδησης.



Διάγραμμα 13 : Συντελεστές αναπήδησης συναρτήσει της διεύθυνσης πρόσκρουσης.

Αξιοσημείωτο είναι ότι η μέγιστη τιμή των συντελεστών αναπήδησης προκύπτει στην περίπτωση που η τροχιά του τεμάχους είναι ομόρροπη με τη φορά της μέγιστης κλίσης του πρανούς.

5.2.2.2. Επίδραση της Γωνίας Πρόσπτωσης στους Συντελεστές Αναπήδησης

Η γωνία πρόσπτωσης είναι ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τις τιμές των συντελεστών αναπήδησης. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι μέσες τιμές των συντελεστών αναπήδησης ανάλογα με τη γωνία πρόσπτωσης του τεμάχους στην επιφάνεια πρόσπτωσης.

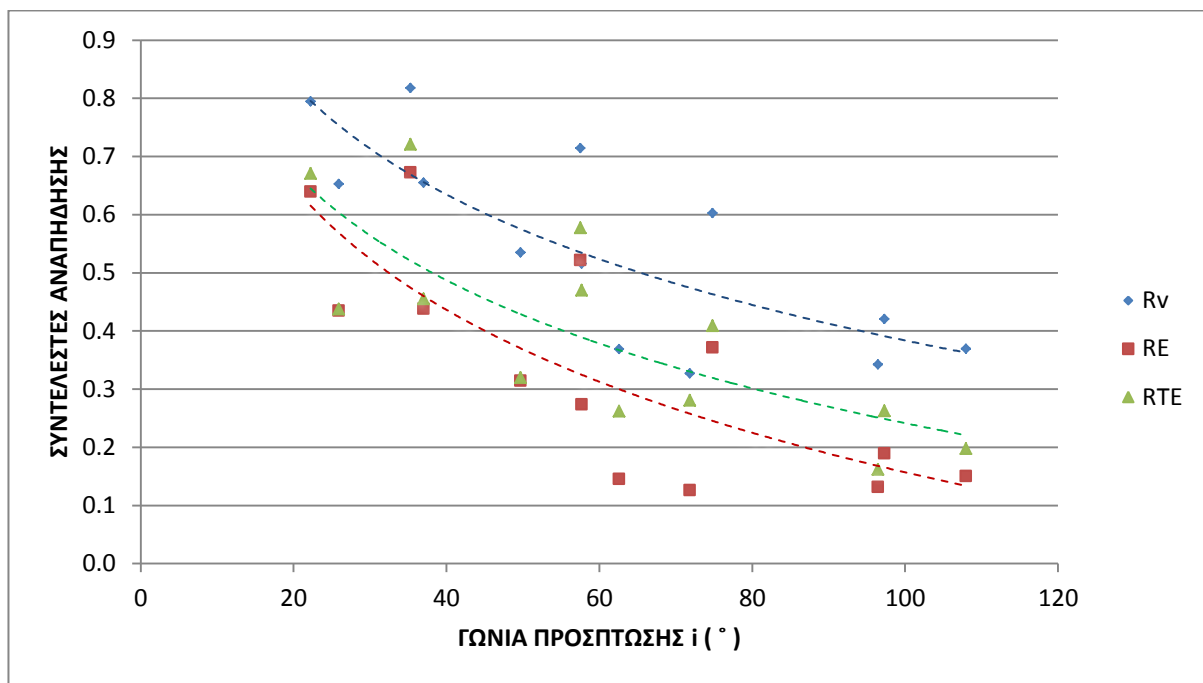
Πίνακας 15: Τιμές συντελεστών αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης.

ΣΕΙΡΑ ΔΟΚΙΜΩΝ	ΓΩΝΙΑ ΠΡΟΣΠΤΩΣΗΣ i		R_v	R_n	R_t	R_E	R_{ET}
	Μέση τιμή (°)	Τυπική απόκλιση (°)					
1	22.208	±2.7	0.794 ±0.092	0.240 ±0.187	0.850 ±0.099	0.639 ±0.144	0.671 ±0.148
2	35.290	±2.6	0.818 ±0.064	0.325 ±0.221	0.964 ±0.102	0.672 ±0.105	0.721 ±0.131
3	57.517	±4.7	0.714 ±0.111	0.254 ±0.168	1.250 ±0.262	0.522 ±0.157	0.577 ±0.156
4	97.293	±4.3	0.420 ±0.115	0.179 ±0.124	-4.743 ±4.712	0.189 ±0.093	0.262 ±0.132
5	107.977	±2.7	0.369 ±0.119	0.243 ±0.119	-0.891 ±0.391	0.150 ±0.097	0.197 ±0.112
6	49.703	±4.1	0.535 ±0.170	0.295 ±0.217	0.728 ±0.263	0.314 ±0.188	0.319 ±0.185
7	57.688	±2.6	0.516 ±0.089	0.463 ±0.102	0.608 ±0.186	0.273 ±0.098	0.470 ±0.321
8	62.563	±2.9	0.368 ±0.099	0.174 ±0.103	0.705 ±0.233	0.145 ±0.075	0.262 ±0.148
9	71.823	±5.5	0.327 ±0.143	0.116 ±0.134	1.022 ±0.471	0.126 ±0.103	0.280 ±0.260
10	25.911	±4.7	0.652 ±0.098	0.526 ±0.205	0.680 ±0.102	0.435 ±0.134	0.437 ±0.140
11	36.993	±4.6	0.655 ±0.100	0.356 ±0.181	0.771 ±0.093	0.438 ±0.129	0.455 ±0.142
12	74.809	±5.2	0.602 ±0.093	0.210 ±0.149	2.395 ±1.041	0.371 ±0.116	0.409 ±0.149
13	96.442	±5.0	0.342 ±0.123	0.174 ±0.116	-0.750 ±9.842	0.131 ±0.082	0.162 ±0.095

Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι κατά τη διαδικασία ρίψεων τεμαχών οι γωνίες πρόσπτωσης κυμαίνονταν από 20° έως 110°, χωρίς να παρατηρηθούν γωνίες πρόσπτωσης στο διάστημα [70°÷80°], κάτι που οφείλεται στη πειραματική διάταξη. Ανεξαρτήτως της κλίσης της επιφάνειας πρόσπτωσης παρατηρείται μικρότερη διασπορά τιμών στις τιμές των συντελεστών αναπήδησης R_v , R_E και R_{TE} , σε σύγκριση με αυτές του κάθετου και εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης, αυτό σημαίνει ότι η συσχέτιση της γωνίας πρόσπτωσης με αυτούς τους συντελεστές αναπήδησης είναι καλύτερη.

Από το διάγραμμα που ακολουθεί (Διάγραμμα 14) είναι σαφές ότι για μικρές γωνίες πρόσπτωσης στο διάστημα $[20^\circ \div 40^\circ]$ παρατηρήθηκαν οι μέγιστες τιμές των συντελεστών αναπήδησης.

Προκύπτει επίσης το συμπέρασμα ότι στο διάστημα $[20^\circ \div 80^\circ]$, καθώς η γωνία πρόσπτωσης αυξάνεται, οι τιμές των συντελεστών αναπήδησης μειώνονται παίρνοντας τις ελάχιστες τιμές $[60^\circ \div 70^\circ]$. Για γωνίες πρόσπτωσης στο διάστημα $[80^\circ \div 110^\circ]$, οι τιμές των συντελεστών αναπήδησης αυξάνονται σαν συνέπεια το σημείο καμψής της καμπύλης συσχέτισης παρουσιάζεται για γωνίες πρόσπτωσης 90° .



Διάγραμμα 14: Συντελεστές αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης.

5.2. Επίδραση της Γωνίας Πρόσπτωσης στην Γωνία Αναπήδησης

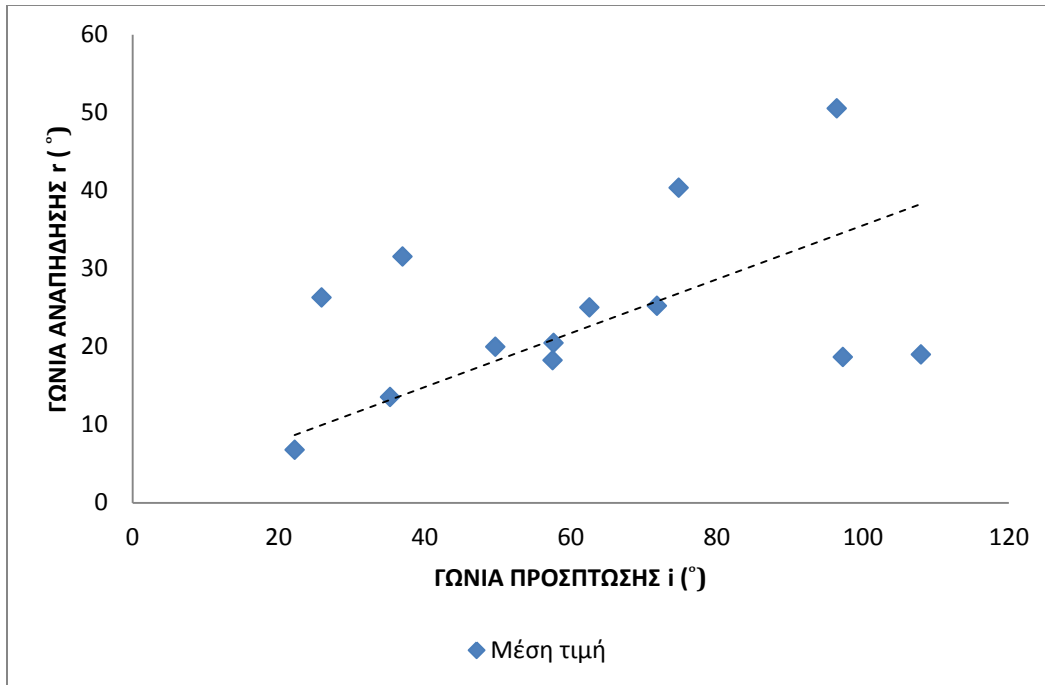
Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές που μπορεί να λάβει η γωνία αναπήδησης, συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης, όπως προέκυψαν από τις δοκιμές εργαστηρίου και πεδίου (Πίνακας 16).

Πίνακας 16: Μέγιστες και ελάχιστες τιμές γωνιών αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης.

ΣΕΙΡΑ ΔΟΚΙΜΩΝ	ΓΩΝΙΑ ΠΡΟΣΠΤΩΣΗΣ i (°)		ΓΩΝΙΑ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ r (°)		
			ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ (°)	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ (°)	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ (°)
1	22.2	±2.7	6.781	15.759	0.054
2	35.3	±2.6	13.532	31.310	0.014
3	57.5	±4.7	18.240	44.154	0.032
4	97.3	±4.3	18.646	66.947	1.155
5	108.0	±2.7	18.990	73.056	9.423
6	49.7	±4.1	19.954	57.581	2.619
7	57.7	±2.6	20.453	68.290	30.998
8	62.6	±2.9	25.010	49.609	1.475
9	71.8	±5.5	25.217	62.202	4.351
10	25.9	±4.7	26.289	32.717	7.807
11	37.0	±4.6	31.522	33.220	4.678
12	74.8	±5.2	40.356	51.253	1.384
13	96.4	±5.0	50.518	73.464	2.400

Παρατηρείται ότι υπάρχει μεγάλη διακύμανση μεταξύ των πιθανών γωνιών αναπήδησης για τις διάφορες γωνίες πρόσπτωσης. Όσον αφορά στις ελάχιστες τιμές από τον παραπάνω πίνακα παρατηρείται ότι κυμαίνονται κοντά στο μηδέν, που σημαίνει ότι το τέμαχος μετά την κρούση μπορεί είτε να ολισθήσει επί της επιφάνειας είτε το ύψος αναπήδησης να είναι αμελητέο, συμπεριφορά σύμφωνη με τις εργαστηριακές παρατηρήσεις αλλά και παρατηρήσεις πεδίου.

Εξετάζοντας το παρακάτω διάγραμμα μπορεί να προκύψει το συμπέρασμα ότι η μέση τιμή της γωνίας αναπήδησης αυξάνει καθώς αυξάνει η τιμή της γωνίας πρόσπτωσης.



Διάγραμμα 15: Γωνία αναπήδησης (r) συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης (i).

6. Πρόταση Εμπειρικού Μοντέλου

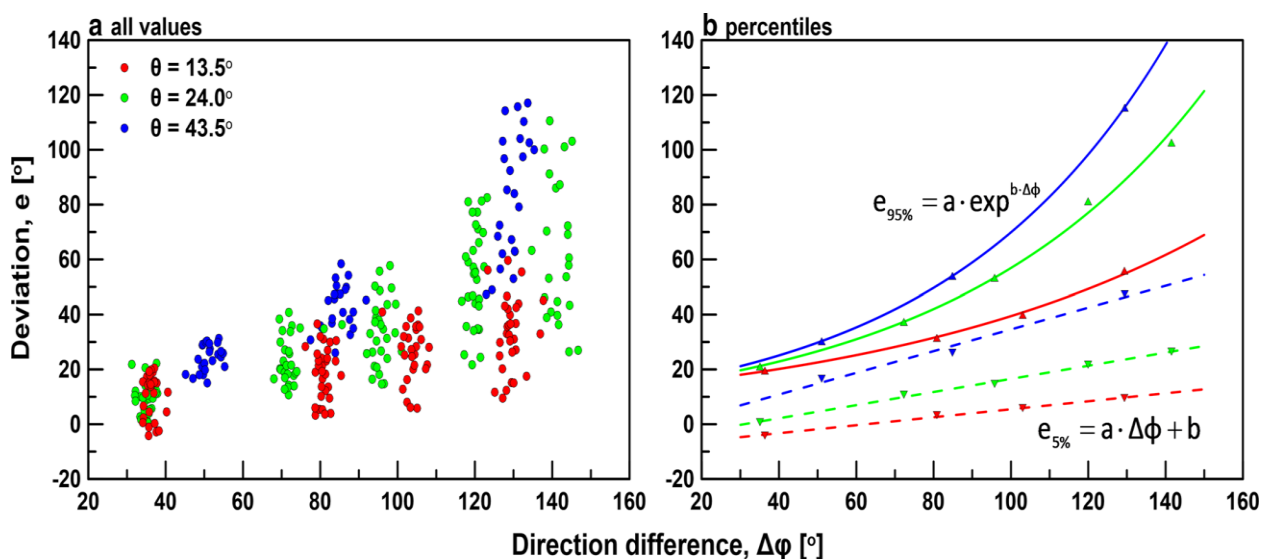
Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η πρόταση ενός εμπειρικού μοντέλου για την πρόβλεψη της πλευρικής εκτροπής των τεμαχών κατά την πρόσκρουση.

6.1. Επίδραση της Κλίσης και της Διεύθυνσης της Επιφάνειας Πρόσκρουσης σε Κρούσεις με Διαφορά Διεύθυνσης

Η κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης θα σχηματίσει μια γωνία με την διεύθυνση πρόσκρουσης της τροχιάς, επομένως είναι λογικό να περιμένουμε ότι η κλίση του επιπέδου θα οδηγήσει το τέμαχος ως προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Για να ποσοτικοποιηθεί αυτή η κατάσταση, εφαρμόστηκε η πειραματική έρευνα που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 5. Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν για την κατάρτιση του εμπειρικού μοντέλου τα

αποτελέσματα των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στην διπλωματική εργασία της κ. Παναγιώτας Μώρου.

Συνοψίζοντας, εκτελέστηκαν δοκιμές με διαφορετική κάθε φορά διεύθυνση ρίψης περιστρέφοντας την διεύθυνση δεξιόστροφα από 30° έως 150° διατηρώντας την κλίση του επιπέδου πρόσκρουσης σταθερή. Το παρακάτω (Διάγραμμα 17a) απεικονίζει τα αποτελέσματα των δοκιμών σε όρους διαφοράς διεύθυνσης $\Delta\phi$ (άξονας x) και εκτροπής e (άξονας y), όπου παρουσιάζονται όλες οι μετρήσεις από τις δοκιμές στο εργαστήριο. Είναι προφανές όπως φαίνεται και στο σχήμα ότι όσο αυξάνεται η διαφορά διεύθυνσης $\Delta\phi$, αυξάνεται κι η εκτροπή e , αυτό παρουσιάζεται ευκρινώς στο εξεταζόμενο σχήμα, όπου δίνεται έμφαση στα άνω - κάτω όρια των τιμών. Το μέγεθος της διασποράς των τεμαχών επηρεάζεται από την κλίση του επιπέδου πρόσκρουσης. Συγκεκριμένα το τέμαχος εμφανίζει μεγαλύτερη εκτροπή για μικτότερη κλίση επιφάνειας. Αυτό είναι ιδιαίτερα εμφανές στο (Διάγραμμα 17b), όπου απεικονίζονται τα ποσοστημόρια 5% και 95% των δοκιμών. Επειδή οι κατανομές της εκτροπής δεν είχαν μια κοινή μορφή για τις διαφορετικές σειρές δοκιμών που εκτελέστηκαν, χρησιμοποιήθηκαν τα ποσοστημόρια για την κατάρτιση του εν λόγω εμπειρικού μοντέλου.



Διάγραμμα 16(a,b): Εκτροπή e ως συνάρτηση της διαφοράς διεύθυνσης $\Delta\phi$, α) όλες οι τιμές, β) ποσοστιαίες τιμές (Πηγή: Asteriou & Tsiambaos, 2015).

Το εύρος της διασποράς εκτροπής μειώνεται καθώς η κλίση γίνεται πιο απότομη για διαφορά διεύθυνσης ρίψης έως 90°, αυτή η συμπεριφορά όμως διαφοροποιείται για διαφορές διεύθυνσης μεγαλύτερες των 90°.

6.2. Μοντέλο Εκτροπής

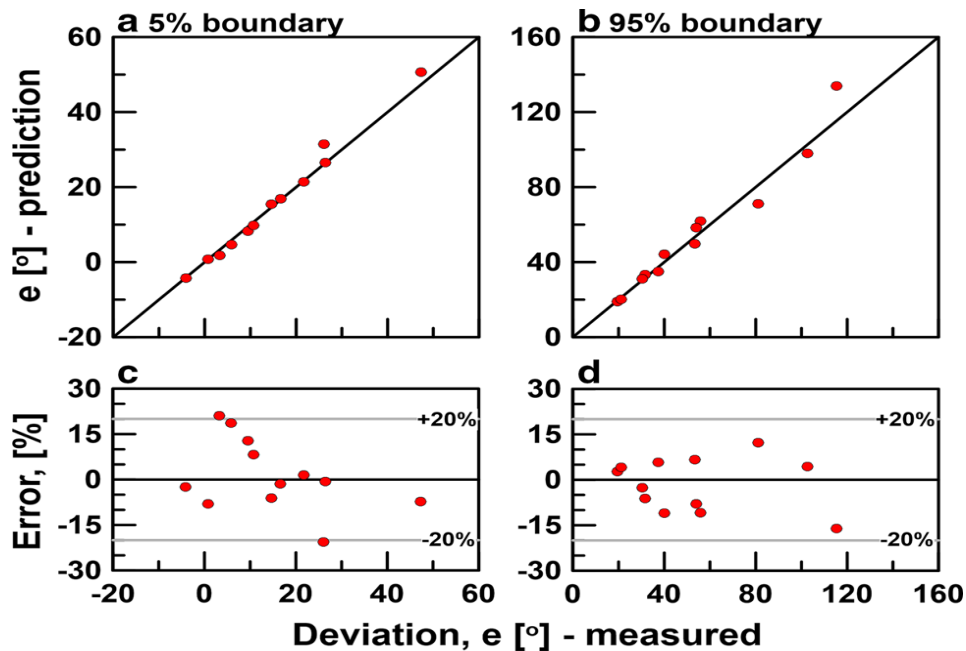
Για την δημιουργία ενός εμπειρικού μοντέλου που να προβλέπει την πλευρική εκτροπή, χρησιμοποιήθηκαν τα παραπάνω δεδομένα. Οι μέσες τιμές της εκτροπής δεν μπορούν να περιγράψουν την διεύθυνση μετά την πρόσκρουση, καθώς η απόκριση περιγράφεται από ένα μεγάλο εύρος. Έτσι, χρησιμοποιήθηκαν τα ποσοστιαία 5% και 95%. Το (Διάγραμμα 17b) δείχνει ότι για οποιαδήποτε γωνία κλίσης επιπέδου, το σύνολο των τιμών για το ποσοστιαίο 5%, το οποίο αντιπροσωπεύεται καλύτερα από μια γραμμική συνάρτηση, ενώ το σύνολο του ποσοστιαίου 95% εκφράζεται καλύτερα από μια εκθετική συνάρτηση. Ως εκ τούτου, με την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων προσδιορίστηκαν οι συντελεστές a και b για κάθε ορίο. Οι συντελεστές αυτοί συσχετίστηκαν με τις γωνίες κλίσης επιπέδου, πάλι με την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων. Έτσι προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$e_{5\%} = \theta \Delta\varphi / 100 + 0.13\theta - 10.8 \quad (6.1)$$

$$e_{95\%} = 12e^{\Delta\varphi(0.0002\theta + 0.01)} \quad (6.2)$$

Για να εξασφαλιστεί ότι η διαδικασία παραγωγής του μοντέλου είναι σύμφωνη με τα πειραματικά αποτελέσματα, συγκρίνονται οι μετρούμενες τιμές για επίπεδα εμπιστοσύνης του 5% και του 95% με την τιμές της εκτροπής που προέκυψαν από τα εμπειρικά μοντέλα *Διαγράμματα 18a* και *18b* αντίστοιχα. Είναι φανερό ότι οι προβλέψεις του μοντέλου συσχετίζονται πολύ καλά με τα πειραματικά αποτελέσματα, καθώς και το μέγιστο σφάλμα περιορίζεται στο 20%, *Διαγράμματα 18c* και *18d*.

Το συγκεκριμένο μοντέλο επαληθεύεται και με τα αποτελέσματα των δοκιμών πεδίου, όπως παρουσιάζεται στην επόμενη ενότητα.



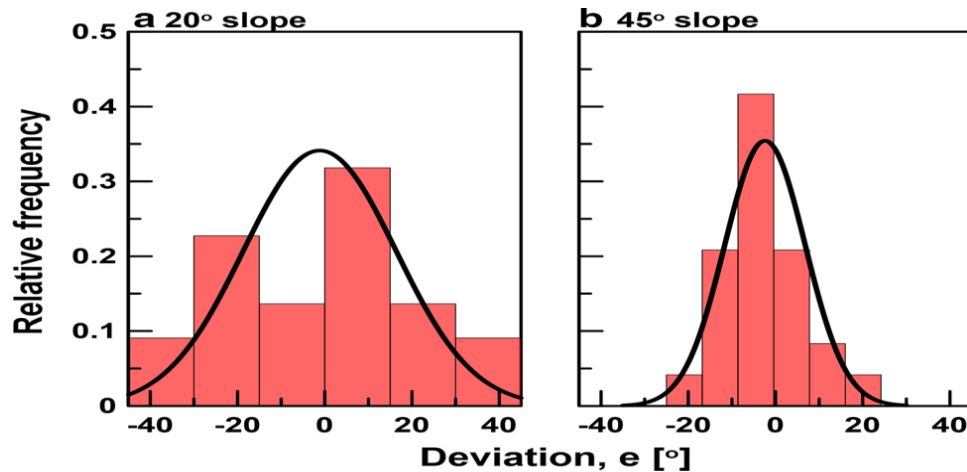
Διάγραμμα 17(a,b,c,d): Σύγκριση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και προβλέψεις εμπειρικού μοντέλου (Πηγή: Asteriou & Tsiambaos, 2015).

6.3. Επαλήθευση Αποτελεσμάτων με τις Δοκιμές Πεδίου Μικρής Κλίμακας

Για την αξιολόγηση – αποτίμηση του εμπειρικού μοντέλου των εργαστηριακών δοκιμών, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές πεδίου μικρής κλίμακας στην περιοχή της Πεντέλης στην Αττική.

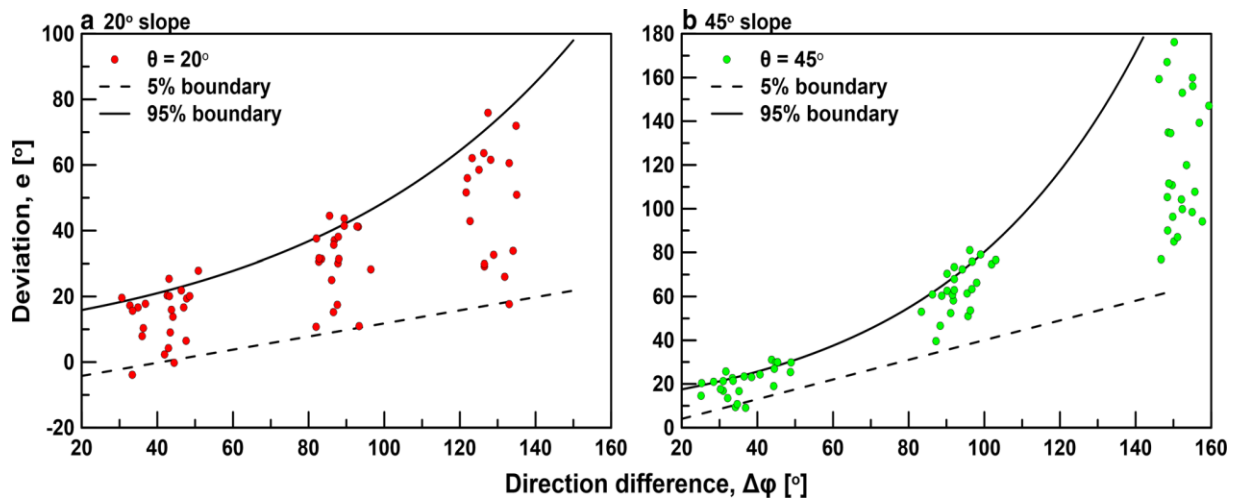
Λόγω του ότι τα κυβικά δοκίμια στο πεδίο απελευθερώθηκαν με το χέρι, το σφάλμα της διαφοράς διεύθυνσης τροχιάς έχει ένα εύρος $\pm 20^\circ$, τιμή αρκετά μεγαλύτερη από το εύρος των δοκιμών εργαστηρίου που κυμαίνεται στο $\pm 5^\circ$. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι σε συνθήκες εργαστηρίου η τροχιά ακολουθεί ελεγχόμενη πορεία, μέσω ενός ειδικού μηχανισμού, άρα τα μεγέθη διασποράς της εκτροπής που προκύπτουν δεν είναι αρκετά συγκρίσιμα για την περίπτωση συγγραμικότητας.

Ωστόσο, το (Διάγραμμα 19) επαληθεύει το ότι όταν η κλίση είναι πιο απότομη, αυτό έχει σαν συνέπεια η πλευρική διασπορά να μειώνεται σημαντικά. Συγκεκριμένα για κλίση επιπέδου πρόσκρουσης 20° η εκτροπή είναι της τάξης $\pm 45^\circ$, ενώ για την κλίση επιπέδου πρόσκρουσης 45° , το εύρος της εκτροπής περιορίζεται σε $\pm 25^\circ$.



Διάγραμμα 18: Ιστόγραμμα της πλευρικής διασποράς για παράλληλη πρόσκρουση (Πηγή: Asteriou & Tsiambaos, 2015).

Το (Διάγραμμα 20) δείχνει την εκτροπή ως συνάρτηση της διαφοράς διεύθυνσης για τις δύο κλίσεις επιφάνειας (20° , 45°), επιπλέον προβάλλονται τα άνω και κάτω όρια όπως προκύπτουν από το εμπειρικό μοντέλο που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα.



Διάγραμμα 19: Σύγκριση της εκτροπής για τις δοκιμές πεδίου, με το εμπειρικό μοντέλο πρόβλεψης για κλίσεις 20° και 45° (Πηγή: Asteriou & Tsiambaos, 2015).

Είναι προφανές ότι το εμπειρικό μοντέλο περιγράφει ικανοποιητικά την διασπορά της εκτροπής μετά την πρόσκρουση των τεμαχών. Αναλύοντας το (Διάγραμμα 20) διακρίνεται ότι για τις δοκιμές του πεδίου και για την κλίση των 20° της επιφάνειας πρόσκρουσης το 5% και το 10% των δοκιμών βρίσκονται εκτός των ορίων 5% και 95%, ενώ το 3% και το 11% δεν εμπίπτουν στα παραπάνω όρια όσον αφορά την κλίση επιφάνειας των 45° . Επιπρόσθετα, το σχετικό σφάλμα είναι μικρότερο από 20% και το μέγιστο απόλυτο σφάλμα είναι 5° .

Επειδή το μοντέλο που προέρχεται από τις εργαστηριακές δοκιμές περιγράφει και ταιριάζει επαρκώς με τις δοκιμές του πεδίου, προκύπτει ένα εύλογο συμπέρασμα: ότι η εκτροπή δεν επηρεάζεται από το μέγεθος των τεμαχών ή την ταχύτητα πρόσκρουσης, όταν βέβαια όλες οι άλλες παράμετροι είναι παρόμοιες. Επομένως, αυτό το εμπειρικά εξαγόμενο μοντέλο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της εκτροπής μετά την πρόσκρουση σε βραχώδη πρανή. Ωστόσο, η εκτροπή επηρεάζεται σημαντικά από το σχήμα του δοκιμίου – τεμάχους. Εδώ κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί ότι, επιπρόσθετα πειράματα με διαφορετικά σχήματα των δοκιμίων θα βοηθούσαν σημαντικά στην καλύτερη και πιο βάσιμη εξαγωγή αποτελεσμάτων. Επίσης, για την περαιτέρω επαλήθευση αυτού του εμπειρικού μοντέλου θα ήταν χρήσιμο να χρησιμοποιηθούν δεδομένα από πραγματικά φαινόμενα βραχοπτώσεων, σαφώς και από δοκιμές μεγαλύτερης κλίμακας.

7. Σύνοψη - Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία των εργαστηριακών δοκιμών και των δοκιμών πεδίου μικρής κλίμακας που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

7.1. Συμπεράσματα

7.1.1 Εκτροπή της Τροχιάς των Δοκιμίων

Η μοντελοποίηση της τροχιάς των βραχοπτώσεων εμπεριέχει πολλές αβεβαιότητες, λόγω πολλών σύνθετων παραγόντων που εμπλέκονται. Ειδικότερα η τροχιά των τεμαχών μετά την πρόσκρουση στην επιφάνεια επηρεάζεται από πολλές παραμέτρους. Η διεύθυνση της τροχιάς των δοκιμίων μετά την κρούση εξαρτάται τόσο από τη διεύθυνση της τροχιάς πριν την κρούση σε σχέση με τη διεύθυνση του επιπέδου όσο και από το σχήμα του βραχοτεμάχους.

Η τάση του τεμάχους είναι να ακολουθεί τη διεύθυνση του επιπέδου πρόσπτωσης, η εκτροπή επηρεάζεται από τη γωνία κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης και μειώνεται καθώς αυξάνεται η κλίση επιπέδου πρόσκρουσης. Επιπλέον, η διεύθυνση τροχιάς πριν τη πρόσκρουση έχει άμεση σχέση με την κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης, η οποία θα καθορίσει την μετέπειτα διεύθυνση της τροχιάς μετά την πρόσκρουση, ενώ η γωνία κλίσης επηρεάζει το μέγεθος απόκλισης των τεμαχών μετά τη πρόσκρουση.

Επιπλέον, συμπεραίνεται ότι όταν η διεύθυνση μεγίστης κλίσης του επιπέδου αποκλίνει από τη διεύθυνση ρίψεως, η τυπική απόκλιση της εκτροπής αυξάνεται, εφράζοντας έτσι την αυξημένη διασπορά στις διευθύνσεις των τεμαχών. Το εύρος της διασποράς εκτροπής μειώνεται καθώς η κλίση γίνεται πιο απότομη για διαφορά διεύθυνσης ρίψης έως 90° , αυτή η συμπεριφορά όμως διαφοροποιείται για διαφορές διεύθυνσης μεγαλύτερες των 90° .

Σημαντική είναι κι η επίδραση του σχήματος των δοκιμίων στην εκτροπή όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα. Γενικώς τα κυβικά δοκίμια παρουσιάζουν σημαντική διασπορά στην εκτροπή σε σχέση με τα σφαιρικά δοκίμια. Στη φύση τα τεμάχια που αποσπώνται από τα πρηνή είναι συνήθως γωνιώδη, άρα τα κυβικά δοκίμια προσομοιώνουν καλύτερα το

φαινόμενο της βραχύπτωσης σε σύγκριση με τα σφαιρικά δοκίμια. Συνεπώς είναι απαραίτητο να λαμβάνεται υπόψη και το σχήμα του τεμάχους στις αναλύσεις.

Όπως διαπιστώθηκε και από τα αποτελέσματα των δοκιμών τόσο του εργαστηρίου όσο και του πεδίου, η επιρροή της κλίμακας ήταν αμελητέα, συνεπώς δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα των δοκιμών αναφορικά με την εκτροπή του τεμάχους. Αυτό προκύπτει καθώς το μοντέλο που προέρχεται από τις εργαστηριακές δοκιμές περιγράφει και ταιριάζει επαρκώς με τις δοκιμές του πεδίου, προκύπτει ένα εύλογο συμπέρασμα: ότι η εκτροπή δεν επηρεάζεται από το μέγεθος των τεμαχών ή την ταχύτητα πρόσκρουσης, όταν βέβαια όλες οι άλλες παράμετροι είναι παρόμοιες.

Με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν μετά από εκτενή εργαστηριακά πειράματα, προτάθηκε ένα εμπειρικό μοντέλο. Το μοντέλο αυτό πρόβλεψης της διεύθυνσης εκτροπής μετά την πρόσκρουση του τεμάχους, συσχετίζεται πολύ καλά με τις δοκιμές πεδίου μικρής κλίμακας που διεξήχθησαν. Άρα το πειραματικό μοντέλο που προέκυψε, θα μπορούσε να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο για την προσομοίωση του φαινομένου σε λογισμικά τριδιάστατης ανάλυσης, τα οποία τα τελευταία χρόνια γίνονται όλο και πιο δημοφιλή στην πρακτική σχεδιασμού.

7.1.2. Συντελεστές Αναπήδησης

Όπως προέκυψε από τα εργαστηριακά αποτελέσματα αλλά και από τα αποτελέσματα δοκιμών πεδίου, οι συντελεστές αναπήδησης που εξάγονται από τις μαθηματικές προσεγγίσεις με βάση ενεργειακά μοντέλα (R_E , R_{TE}) έχουν μικρότερη διασπορά από ότι οι συντελεστές που προκύπτουν από τα μοντέλα ταχυτήτων. Άρα οι τιμές με βάση τα ενεργειακά μοντέλα είναι καλύτερες για χρήση σε συσχετίσεις. Οι μέγιστες τιμές συντελεστών λαμβάνονται από τον συντελεστή που υπολογίζεται με βάση το μοντέλο ταχυτήτων R_v , επίσης σε σύγκριση με τις αντίστοιχες μέσες τιμές του συντελεστή R_E , παρατηρείται μεγάλη απόκλιση.

Επηρεάζει σημαντικά επίσης τους συντελεστές αναπήδησης η κλίση της γωνίας πρηνούς, καθώς η κλίση είναι πιο απότομη αυξάνεται ο κινηματικός και ο κανονικός συντελεστής αναπήδησης. Η αυξητική τάση του συντελεστή αναπήδησης είναι πιο εμφανής για τον κινηματικό συντελεστή αναπήδησης ο οποίος έχει πιο στενό εύρος τιμών, σε σχέση με τον

κανονικό συντελεστή αναπήδησης. Ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης όπως δείχνουν τα αποτελέσματα, δεν επηρεάζεται από τη γωνία κλίσης της επιφάνειας.

Η ενέργεια και η συνολική ενέργεια του συντελεστή αναπήδησης ακολουθούν την ίδια τάση με το κινηματικό συντελεστή αναπήδησης, όπου η συνολική ενέργεια του συντελεστή αναπήδησης έχει ελαφρώς υψηλότερες τιμές σε σύγκριση με την ενέργεια του συντελεστή αναπήδησης. Αυτή η αυξητική τάση οφείλεται στη γωνιακή ταχύτητα, που φαίνεται αμελητέα σε σχέση με τη συνολική μεταβλητότητα του συντελεστή αναπήδησης. Προκύπτει το συμπέρασμα ότι ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης είναι πιο ευαίσθητος στη μεταβολή των παραμέτρων του δοκιμίου, αφού περιγράφεται από μεγαλύτερο φάσμα τιμών. Οπότε η πρακτική επιλογής κάθετου συντελεστή αναπήδησης με βάση το υλικό, όπως προτείνεται στην σχετική βιβλιογραφία.

Όσον αφορά στην περιστροφική κίνηση του τεμάχους, ο μέσος λόγος της περιστροφικής και μεταφορικής ενέργειας μετά την κρούση του τεμάχους κυμαίνεται στο 20%, με τη μέγιστη τιμή να φτάνει το 67%, σύμφωνα με τη Japan Road Association (JRA), με βάση 60 δοκιμές πεδίου που πραγματοποιήθηκαν σε διαφορετικές περιοχές της Ιαπωνίας, ο μέσος λόγος της περιστροφικής προς τη μεταφορική ενέργεια μετά την κρούση είναι 10%, με μέγιστη τιμή το 40%.

Ο συντελεστής αναπήδησης που υπολογίζεται με τη συμμετοχή της περιστροφικής ενέργειας (R_{TE}) προκύπτει πάντα μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο συντελεστή αναπήδησης που αγνοεί την περιστροφή (R_E), άρα η επίδραση της περιστροφικής κίνησης είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη.

Όσον αφορά την επίδραση της διεύθυνσής της τροχιάς στους συντελεστές αναπήδησης προκύπτει ότι όσο η διεύθυνση πρόσκρουσης αποκλίνει από τη διεύθυνση του επιπέδου πρόσπτωσης, τόσο μειώνονται και οι τιμές των συντελεστών αναπήδησης.

Παρατηρείται μικρότερη διασπορά τιμών στις τιμές των συντελεστών αναπήδησης R_V , R_E και R_{TE} , σε σύγκριση με αυτές του κάθετου (R_n) και εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης (R_t), ανεξαρτήτως της κλίσης της επιφάνειας πρόσπτωσης. Συμπεραίνουμε

ότι είναι καλύτερη η συσχέτιση της γωνίας πρόσπτωσης με αυτούς τους συντελεστές αναπήδησης.

Η γωνία αναπήδησης ακολουθεί γραμμική τάση και σχετίζεται μόνο με τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης.

7.2. Προτάσεις για Έρευνα στο Μέλλον

Στη παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκαν δοκιμές εργαστηρίου αλλά και δοκιμές πεδίου μικρής κλίμακας.

Όπως δείχνουν και τα αποτελέσματα των δοκιμών, η εκτροπή επηρεάζεται σημαντικά από το σχήμα του δοκιμίου. Έτσι, επιπρόσθετα πειράματα με διαφορετικά σχήματα των δοκιμίων θα βοηθούσαν σημαντικά στην καλύτερη και πιο βάσιμη εξαγωγή αποτελεσμάτων.

Επίσης, για την περαιτέρω επαλήθευση αυτού του εμπειρικού μοντέλου θα ήταν χρήσιμο να χρησιμοποιηθούν δεδομένα από πραγματικά φαινόμενα βραχοπτώσεων ή και από δοκιμές μεγαλύτερης κλίμακας.

Στο εργαστήριο αλλά και στο πεδίο μπορεί επίσης να γίνει μια διερεύνηση της επίδρασης κλίμακας μεταβάλλοντας τις διαστάσεις των τεμαχίων, αλλά και χρησιμοποιώντας δοκίμια πολυγωνικού, κωνικού και ακανόνιστου σχήματος για τον προσδιορισμό της επίδρασης του σχήματος.

Το ίδιο φαινόμενο μπορεί να μελετηθεί και σε εδαφικές επιφάνειες πρόσπτωσης, τόσο στο εργαστήριο όσο και στο πεδίο, έτσι θα μπορούσε να προσομοιωθεί ένα πρανές καλυμμένο με κορήματα κάτι που συναντάται αρκετά συχνά σε πρακτικές εφαρμογές.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

ANSARI, M. K., AHMAD, M., SINGH, R. & SINGH, T. N. 2013. Rockfall hazard assessment at Ajanta Cave, Aurangabad, Maharashtra, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 1-8.

ASTERIOU, P., & TSIAMBAOS, G. 2015. Empirical Model for Predicting Rockfall Trajectory Direction. doi : 10.1007/s00603-015-0798-7 .

ASTERIOU, P. 2014. Rockfall Experimental Investigation in 3D Space. Proceedings of the 23rd European Young Geotechnical Engineers Conference, Barcelona

ASTERIOU, P., SAROGLU, H. & TSIAMBAOS, G. 2013. Rockfalls: Influence of Rock Hardness on the Trajectory of Falling rock Blocks. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, XLVII.

ASTERIOU, P., SAROGLU, H. & TSIAMBAOS, G. 2012. Geotechnical and kinematic parameters affecting the coefficients of restitution for rock fall analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 54, 103-113.

AZZONI, A. & DE FREITAS, M. H. 1995. Experimentally gained parameters, decisive for rock fall analysis. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 28, 111-124.

AZZONI, A., LA BARBERA, G. & ZANINETTI, A. 1995. Analysis and prediction of rockfalls using a mathematical model. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 32, 709-724.

BAISHAN, P. (2000). "Rockfall Trajectory Analysis: Parameter Determination and Application : a Thesis Submitted in Partial Fulfilment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Engineering Geology in the University of Canterbury".

BOUGUET, J. Y. 2008. Camera calibration toolbox for Matlab.

BOZZOLO, D. & PAMINI, R. 1986. Simulation of rock falls down a valley side. *Acta Mechanica*, 63, 113-130.

BROILLI, L. 1977. Relations between scree slope morphometry and dynamics of accumulation processes. *Rock Fall Dynamics and Protective Work Effectiveness*, 90, 11-23

CAGNOLI, B. & MANGA, M. 2003. Pumice-pumice collisions and the effect of the impact angle. *Geophysical Research Letters*, 30, 38-1.

CAMPONUOVO, G. F. 1977. ISMES experience on the model of S. Martino. *Rockfall dynamics and protective work effectiveness*, 90, 25-38.

CHALLIS, J. H. 1995. A procedure for determining rigid body transformation parameters. *Journal of Biomechanics*, 28, 733-737.

Chan, Y. C., C. F. Chan and S. W. C. Au. "Design of a Boulder Fence in Hong Kong." *Rock engineering and excavation in an urban environment. Proc. conference, Hong Kong, 1986, (Institution of Mining & Metallurgy, London; IMM N.American Publications Center, Brookfield, VT), (1986): 87-96.*

CHAU, K. T., WONG, R. H. C., LIU, J., WU, J. J. & LEE, C. F. Shape effects on the coefficient of restitution during rockfall impacts. 1999. 541-544.

CHAU, K. T., WONG, R. H. C. & WU, J. J. 2002. Coefficient of restitution and rotational motions of rockfall impacts. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39, 69-77.

DESCOEUDRES, F. & ZIMMERMANN, T. 1987. Three-dimensional dynamic calculation of rockfalls. Proc. 6th Congress International Society for Rock Mechanics, Montreal, 1987. Vol. 1, 337-342.

DEWEZ, T., NACHBAUR, A., MATHON, C., SEDAN, O., KOBAYASHI, H., RIVIERE, C., BERGER, F., DES GARETS, E. & NOWAK, E. OFAI: 3D block tracking in a real-size rockfall experiment on a weathered volcanic rocks slope of Tahiti, French Polynesia. Rock Slope Stability 2010, 2010 Paris.

DORREN, L. K. A., BERGER, F., LE HIR, C., MERMIN, E. & TARDIF, P. 2005. Mechanisms, effects and management implications of rockfall in forests. Forest Ecology and Management, 215, 183-195.

GIACOMINI, A., THOENI, K., LAMBERT, C., BOOTH, S. & SLOAN, S. W. 2012. Experimental study on rockfall drapery systems for open pit highwalls. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 56, 171-181.

GIANI, G. P. 1992. Rock Slope Stability Analysis.

GIANI, G. P., 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.

HABIB, P. 1977. Note sur le rebondissement des blocs rocheux. Proceedings of the Meeting on Rockfall Dynamics and Protective Works Effectiveness, 25-38.

HEGG, C. & KIENHOLZ, H. 1995. Determining paths of gravity-driven slope processes - The 'Vector Tree Model'. Geographic Information Systems in Assessing Natural Hazards, 79-92.

HEIDENREICH, B. 2004. Small- and half-scale experimental studies of rockfall impacts on sandy slopes. Ph.D Thesis, EPFL.

HOEK, E. 2000. Analysis of rockfall hazards [Online]. www.rocsience.com.

HUNGR, O. & EVANS, S. G. 1996. Rock avalanche runout prediction using a dynamic model. Proceedings of the 7th International Symposium on Landslides, 1, 233-238.

- JABOYEDOFF, M. & LABIOUSE, V. 2003. Preliminary assessment of rockfall hazard based on GIS data. ISRM 2003 - Technology Roadmap for Rock Mechanics, 1, 575-578.
- KLETTE J., VOLKWEIN A. (2013). "Semi-Automatic Determination of Rockfall Trajectories". Geophysical Research Abstracts Vol. 15, EGU2013: 717-1.
- Labieuse, V. and F. Descoedres. "Possibilities and Difficulties in Predicting Rockfall Trajectories." Joint Japan-Swiss Scientific Seminar on Impact Load by Rock Falls and Design of Protection Structures, (1999): 29-36.
- LABIOUSE, V. & HEIDENREICH, B. 2009. Half-scale experimental study of rockfall impacts on sandy slopes. Natural Hazards and Earth System Science, 9, 1981-1993.
- LIED, K. 1977. Rockfall problems in Norway. Rockfall Dynamics and Protective Work Effectiveness, 90, 51-53.
- PIERSON, L. A., DAVIS, S. A. & VAN VICKLE, R. 1990. Rockfall hazard rating system implementation manual. Rockfall Hazard Rating System Implementation Manual.
- RICHARDS, L. R. 1988. Rockfall protection: A review of current analytical and design methods. Proc. II Ciclo di Conferenze di Meccanica e Ingegneria Delle Rocce, 11, 1-13.
- RITCHIE, A. M. 1963. Evaluation of rockfall and its control. Highway Research Record, 17, 13-28.
- SAROGLU, H., MARINOS, V., MARINOS, P. & TSIAMBAOS, G. 2012. Rockfall hazard and risk assessment: an example from a high promontory at the historical site of Monemvasia, Greece. Natural Hazards and Earth System Science, 12, 1823-1836.
- SCHENK T. (2005). "Introduction to Photogrammetry". Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science, Ohio State University.
- SPADARI, M., GIACOMINI, A., BUZZI, O., FITYUS, S. & GIANI, G. P. 2012. In situ rockfall testing in New South Wales, Australia. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 49, 84-93.

- SPANG, R. M. & RAUTENSTRAUCH, R. W. 1988. Empirical and mathematical approaches to rockfall protection and their practical applications. Landslides. Proc. 5th symposium, Lausanne, 1988. Vol. 2, 1237-1243.
- SPANG, R. M. & SÖNSER, T. 1995. Optimized rockfall protection by "ROCKFALL". Proceedings of the 8th International Congress on Rock Mechanics, 3, 1233-1242.
- STATHAM, I. 1976. A scree slope rockfall model. Earth Surface Processes, 1, 43-62.
- STRONGE, W. J. 1990. Rigid body collisions with friction. Proc. R. Soc. Lond., 431, 169-181.
- TOPAL, T., AKIN, M. & OZDEN, U. A. 2007. Assessment of rockfall hazard around Afyon Castle, Turkey. Environmental Geology, 53, 191-200.
- 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.
- VOLKWEIN A., GLOVER J., BOURRIER F., GERBER W. (2012). "A Quality Assessment of 3D Video Analysis for Full Scale Rockfall Experiments". Geophysical Research Abstracts Vol. 14, EGU2012: 12728.
- YOSHIDA, H. 1998. Movement of boulders on slope and its simulation, Recent studies on rockfall control in Japan. Tech. Rep.
- WANG I.T., LEE C.Y. (2010). "Influence of Slope Shape and Surface Roughness on the Moving Paths of a Single Rockfall". World Academy of Science, Engineering and Technology 41: 1021-1027.

Ελληνική Βιβλιογραφία

ΑΣΤΕΡΙΟΥ Π., ΕΥΘΥΜΙΟΥ Β. (2011). "Διερεύνηση Χαρακτηριστικών Τροχιάς Καταπτώσεων σε Βραχώδη Πρανή - Επίδραση Κινηματικών Παραμέτρων". Διπλωματική Εργασία. ΕΜΠ.

ΒΟΥΔΡΗΣ Α, ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ Η. (2013). "Τριδιάστατη Ανάλυση Βραχοπτώσεων - Εφαρμογές στο Πεδίο και στο Εργαστήριο". Διπλωματική Εργασία. ΕΜΠ.

ΜΩΡΟΥ Π. (2014). "Τριδιάστατη Ανάλυση Τροχιάς Βραχοπτώσεων με Δεδομένα Εργαστηριακής Διερεύνησης". Διπλωματική Εργασία. ΕΜΠ.

ΣΑΚΕΛΛΑΡΙΟΥ, Μ., ΚΟΖΑΝΗΣ, Σ., ΓΟΥΛΑΚΟΣ, Σ. 'Το πρόβλημα των καταπτώσεων βραχοτεμαχών και η αντιμετώπιση του σε συγκοινωνιακά έργα'. Πρακτικά 1ου πανελληνίου συνεδρίου οδοποιίας, (1995).