

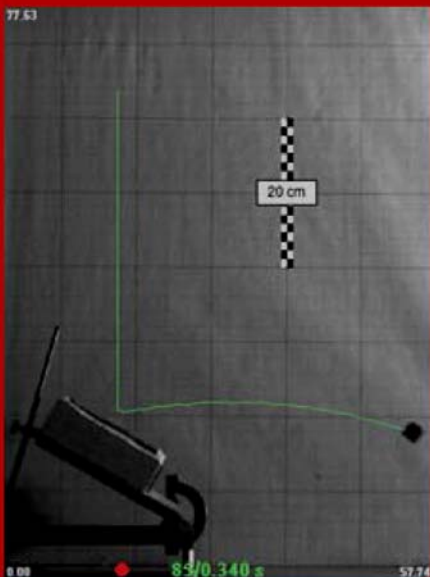


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΡΟΧΙΑΣ ΚΑΤΑΠΤΩΣΕΩΝ
ΣΕ ΒΡΑΧΩΔΗ ΠΡΑΝΗ

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ



ΑΣΤΕΡΙΟΥ ΠΑΥΛΟΣ

Επιβλέπων καθηγητής :
ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2011

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αντιμετώπιση του φαινομένου των καταπτώσεων βράχων προϋποθέτει συνήθως την κατασκευή έργων αναχαίτισης, η διαστασιολόγηση των οποίων γίνεται πλέον με τη χρήση ειδικών λογισμικών. Ωστόσο, παρόλη την έρευνα που έχει ήδη γίνει από πολλούς μελετητές, η απόκριση των βραχοτεμαχών την στιγμή της πρόσκρουσης σε μία πλαγιά παραμένει σε μεγάλο βαθμό αδιευκρίνιστη, γεγονός που προκαλεί πολλές δυσκολίες στην ακριβή προσομοίωση της εκτελούμενης τροχιάς. Η λύση που υιοθετείται μέχρι τώρα βασίζεται στον προσδιορισμό της απώλειας ταχύτητας (ή ενέργειας) με έναν ή δύο συντελεστές (συντελεστές αναπήδησης). Στην βιβλιογραφία, προτείνονται διάφορες τιμές των συντελεστών αυτών που συνδέονται με ένα ορισμένο γεωυλικό. Ωστόσο, κρίνεται ιδιαίτερα απλουστευτικό να θεωρείται ότι οι συντελεστές αναπήδησης είναι ανεξάρτητοι από άλλους παράγοντες, όπως τα χαρακτηριστικά του τεμάχους (βάρος, μέγεθος, σχήμα, αντοχή, στιβαρότητα), την κινηματική του (ταχύτητα πρόσκρουσης μεταφορική ή γωνιακή, γωνία πρόσκρουσης, προσανατολισμός του τεμάχους), ή τα χαρακτηριστικά της βραχώδους επιφάνειας της πλαγιάς (κλίση, τραχύτητα, αντοχή, στιβαρότητα). Έτσι στα πλαίσια αυτής της έρευνας, που σκοπό είχε τη διευκρίνιση της επίδρασης συγκεκριμένων από τους προαναφερθέντες παράγοντες, πραγματοποιήθηκαν 30 ολοκληρωμένες διερευνήσεις που περιλάμβαναν 277 δοκιμές στο εργαστήριο και 16 δοκιμές στο πεδίο. Η τροχιά των τεμαχών καταγραφόταν από ειδική κάμερα και αναλυόταν ώστε να προσδιοριστεί η ταχύτητά του τεμάχους πριν και μετά την κρούση και έτσι να υπολογιστούν οι αντίστοιχοι συντελεστές της αναπήδησης. Αρχικά, η έρευνα επικεντρώθηκε σε εργαστηριακές δοκιμές και ιδιαίτερα στην ανάλυση της συμπεριφοράς ενός συγκεκριμένου γεωυλικού, του μάρμαρου Πεντέλης. Έτσι εξετάσθηκε η επίδραση της μάζας (και κατά συνέπεια του μεγέθους) του τεμάχους στον ολικό συντελεστή αναπήδησης εκτελώντας δοκιμές ελεύθερης πτώσης σε οριζόντιο επίπεδο. Εκτελέσθηκαν σειρές δοκιμών με ίδιες συνθήκες (γεωυλικό, ύψος πτώσης, κλίση επιπέδου πρόσκρουσης, μορφή τεμαχίου) αλλά με διαφορετικές μάζες. Στη συνέχεια αναλύθηκε η επίδραση της ταχύτητας πρόσκρουσης στον ολικό συντελεστή αναπήδησης, εκτελώντας σειρές δοκιμών ελεύθερης πτώσης με διαφορετικό ύψος πτώσης για κάθε δοκιμή. Ακόμα, μελετήθηκε η επίδραση της ταχύτητας πρόσκρουσης στον κάθετο και εφαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης. Ακολούθως, ερευνήθηκε η επίδραση της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης στους συντελεστές αναπήδησης, εκτελώντας δοκιμές ελεύθερης πτώσης σε επιφάνεια με διάφορες τιμές κλίσης. Έπειτα, έγιναν δοκιμές που σκοπό είχαν την αξιολόγηση της επίδρασης της γωνίας πρόσπτωσης. Το σημείο που διαφοροποιεί τη συγκεκριμένη σειρά δοκιμών είναι ότι το τεμάχιο προσκρούει στην επιφάνεια έχοντας εκτός από μεταφορική και γωνιακή ταχύτητα. Σε μία προσπάθεια συσχετισμού της απόκρισης, υπό κλίμακα, των τεμαχίων που μελετήθηκαν στο εργαστήριο με την

πραγματική συμπεριφορά σε πρηνή, η έρευνα μεταφέρθηκε στο πεδίο. Εκεί, οι δοκιμές έγιναν σε φυσική κλίμακα και περιελάμβαναν φυσικά χαρακτηριστικά του φαινομένου όπως το φυσικό ανάγλυφο της πλαγιάς και την τραχύτητα, τα οποία δεν υπήρχαν στις δοκιμές εργαστηρίου. Ακολουθώντας, η έρευνα επεκτάθηκε, μελετώντας στο εργαστήριο 4 ακόμα γεωυλικά που συναντώνται στον ελλαδικό χώρο (ασβεστόλιθος, σχιστόλιθος, χαλαζιακός ψαμμίτης, μάρμα). Οι συνθήκες των δοκιμών για τα παραπάνω γεωυλικά ήταν αντίστοιχες με αυτές του μαρμάρου, ώστε να υπάρχει ευχέρεια σύγκρισης και συνολικής αξιολόγησης. Από την συγκριτική ανάλυση των αποτελεσμάτων προέκυψε ότι ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης εξαρτάται από την γωνιακή ταχύτητα, την ταχύτητα πρόσκρουσης, και την κλίση του επιπέδου πρόσκρουσης. Ο εφασπτομενικός συντελεστής αναπήδησης φάνηκε να είναι ανεξάρτητος από τους παραπάνω παράγοντες. Ακόμα, παρατηρήθηκε ότι ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης αυξάνεται με την αύξηση της σκληρότητας του γεωυλικού και την μείωση της τραχύτητας της επιφάνειας πρόσκρουσης. Για την συσχέτιση της σκληρότητας του γεωυλικού με τον συνολικό συντελεστή αναπήδησης προτάθηκε μία σχέση, καθώς επίσης προτάθηκαν τιμές των συντελεστών αναπήδησης για τα 5 γεωυλικά που μελετήθηκαν

ABSTRACT

Addressing the phenomenon of rock falls presupposes the manufacture of retaining structures, the design of which happens henceforth with the use of special software. Despite the research done by many scholars, the response of the rock block, the moment of impact on a slope, remains to a great degree unclear, fact that causes a lot of difficulties in the precise simulation of the executed orbit. The solution adopted up to now, quantifies the loss of speed (or energy) with one or two coefficients (coefficient of restitution). In bibliography, various figures of these coefficients proposed, are connected with certain geological material. However, it is judged as very simplistic to assume that the bounce phenomenon is independent from other parameters, such as the block properties (weight, size, form, strength, rigidity), the kinematics (impact velocity and angle, block orientation) or the slope characteristics (strength, inclination, roughness, rigidity). Thus in this research, that aimed the clarification of the effect of some from the mentioned above parameters, 30 different series of laboratory tests were performed which included 277 trials and 16 field tests.

A special camera recorded the orbit of the block, which was analyzed in order to calculate the block's speed before and after the impact and the coefficients of restitution. Initially, the study was focused on laboratory tests and particularly in the analysis of the behavior of Penteli marble. The effect of block's mass (and accordingly to

size) in the total coefficient of restitution was examined, executing trials of free fall in horizontal level. Three series of tests were executed, with the same conditions (rock material, height of fall, block shape) but with different masses. Subsequently the effect of the impact velocity in the total factor of bounce was analyzed, implementing tests series of free fall from a different height. Then, the effect of the slope inclination and impact velocity, in the normal and tangential coefficient of restitution, was studied, executing tests of free fall on surface with various inclinations. Consequently, tests that aimed the evaluation of the effect of impact angle were also conducted. What differentiates the particular series of tests is that the block crashes to the surface having not only-translational but rotational velocity too. In order to correlate the response of the block, that was studied in the laboratory with the real behavior that occurs in nature, the research continued in the field. True scale in situ tests were conducted including natural characteristics as the slope roughness which was not present in laboratory tests. Then, the research was extended, studying via laboratory tests 4 geological materials frequently found in Greece (limestone, schist, sandstone, marl). The conditions of the tests were corresponding to those of marble, so that comparison and total evaluation of the result to occur. From the comparative analysis of results we concluded that the normal coefficient of restitution depends from the rotational velocity, the velocity of impact, and the stiffness of the slope. The tangential coefficient of restitution was found to be independent from the parameters mentioned above. Furthermore, it was observed that the normal coefficient of restitution is increased with the increase of hardness and the reduction of slope's roughness. Concluding this thesis, a correlation of hardness with the total coefficient of restitution as well as values for the coefficient of restitution of the 5 geological materials that were studied are proposed .

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
	1.1. ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	1
	1.2. ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	2
	1.3. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	3
2.	ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΤΑΠΤΩΣΕΩΝ ΒΡΑΧΩΝ	5
	2.1. ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	5
	2.2. ΑΙΤΙΑ ΚΑΤΑΠΤΩΣΕΩΝ.....	6
	2.2.1. Γεωλογικές - υδρογεωλογικές διεργασίες.....	6
	2.2.2. Σεισμική φόρτιση	7
	2.2.3. Ανθρώπινη δραστηριότητα	7
	2.3. ΜΕΤΡΑ ΑΝΑΧΑΙΤΙΣΗΣ ΚΑΤΑΠΤΩΣΕΩΝ.....	8
	2.4. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑΠΤΩΣΕΩΝ.....	10
	2.5. ΜΕΛΕΤΕΣ ΤΡΟΧΙΑΣ	12
	2.5.1. Ανάδρομες αναλύσεις φυσικών καταπτώσεων	14
	2.5.2. Επί τόπου δοκιμές	15
	2.5.3. Εργαστηριακές δοκιμές.....	16
	2.6. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ.....	17
	2.6.1. Σχέσεις ταχυτήτων	18
	2.6.2. Σχέσεις που βασίζονται στην ενέργεια	21
	2.6.3. Τιμές συντελεστών αναπήδησης.....	22
	2.7. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΠΑΛΑΙΟΤΕΡΩΝ ΕΡΕΥΝΩΝ	22
	2.8. ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΜΕΤΡΩΝ ΑΝΑΧΑΙΤΙΣΗΣ.....	33
	2.8.1. Εμπειρικές μέθοδοι σχεδιασμού.....	35
	2.8.1.1. Federal Highway Administration FHWA, (1989)	35
	2.8.1.2. Oregon Department Of Transportation ODOT, (1994).....	35
	2.8.1.3. Κανονισμός Μελετών Έργων (ΚΜΕ §1.7.7.3, 2003).....	37
	2.8.2. Αναλύσεις με χρήση προγραμμάτων Η/Υ	38
3.	ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΔΟΚΙΜΗ	41
	3.1. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ.....	42
	3.2. ΟΡΓΑΝΑ ΚΑΙ ΣΥΣΚΕΥΕΣ	42
	3.2.1. Βάση στήριξης	42
	3.2.2. Συσκευή ρίψης βραχοτεμαχίου.....	44
	3.2.2.1. Δοκιμές ελεύθερης πτώσης	44
	3.2.2.2. Δοκιμές με αρχική ταχύτητα.....	45
	3.2.3. Φωτογραφική μηχανή ταχείας λήψης.....	45
	3.2.4. Φωτισμός.....	46
	3.2.5. Συμπληρωματικά όργανα – συσκευές.....	47
	3.3. ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	47
	3.3.1. Επιφάνεια πρόσκρουσης.....	47
	3.3.2. Πίπτων τέμαχος.....	49
	3.4. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ.....	50
	3.5. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	50
	3.5.1. Ανάλυση καταγραφείσας τροχιάς	50
	3.5.2. Επεξεργασία τροχιάς.....	51
	3.5.3. Ελεύθερη πτώση σε οριζόντια επιφάνεια	51
	3.5.3.1. Φύλλο δεδομένων	52
	3.5.3.2. Φύλλο υπολογισμών	52
	3.5.3.3. Φύλλο παρουσίασης.....	53
	3.5.4. Ελεύθερη πτώση σε κεκλιμένο επίπεδο	53
	3.5.4.1. Φύλλο δεδομένων	53
	3.5.4.2. Φύλλο υπολογισμών	53
	3.5.4.3. Φύλλο παρουσίασης.....	54
	3.5.5. Παραβολική ρίψη	55
	3.5.5.1. Φύλλο δεδομένων	55
	3.5.5.2. Φύλλο υπολογισμών	55
	3.5.5.3. Φύλλο παρουσίασης.....	56
	3.6. ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΔΟΚΙΜΩΝ	56

4.	ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ	59
4.1.	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΜΑΖΑΣ	61
4.2.	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ	68
4.3.	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΙΝΗΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	73
4.4.	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΛΙΣΗΣ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ.....	74
4.4.1.	Κλίση επιπέδου πρόσκρουσης 15°	74
4.4.2.	Κλίση επιπέδου πρόσκρουσης 30°	76
4.4.3.	Κλίση επιπέδου πρόσκρουσης 45°	78
4.4.4.	Κλίση επιπέδου πρόσκρουσης 60°	80
4.4.5.	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα	82
4.5.	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΓΩΝΙΑΣ ΠΡΟΣΠΤΩΣΗΣ.....	84
5.	ΔΟΚΙΜΕΣ ΠΕΔΙΟΥ	95
5.1.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ.....	96
5.2.	ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΠΡΑΝΟΥΣ	99
5.3.	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ ΔΟΚΙΜΩΝ.....	100
5.4.	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ ΔΟΚΙΜΩΝ	100
5.4.1.	Ανάλυση τροχιάς	100
5.4.2.	Επεξεργασία τροχιάς	100
5.4.2.1.	Φύλλο δεδομένων	101
5.4.2.2.	Φύλλο επεξεργασίας κρούσης.....	101
5.5.	ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ ΔΟΚΙΜΩΝ	107
6.	ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	111
6.1.	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΜΑΖΑΣ ΣΤΟΝ ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ.....	111
6.2.	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ ΣΤΟΝ ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ.....	112
6.3.	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ ΣΤΟΥΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΚΑΘΕΤΗΣ ΚΑΙ ΕΦΑΠΤΟΜΕΝΙΚΗΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ	114
6.4.	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΓΩΝΙΑΣ ΚΛΙΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ ΣΤΟΥΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ	117
6.5.	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΓΩΝΙΑΣ ΠΡΟΣΠΤΩΣΗΣ.....	119
6.6.	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ.....	125
7.	ΣΥΝΟΨΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	131
7.1.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	131
7.1.1.	Συνολικός συντελεστής αναπήδησης	131
7.1.2.	Κάθετος συντελεστής αναπήδησης	131
7.1.3.	Εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης.....	132
7.1.4.	Επίδραση σκληρότητας σφύρας Schmidt και ξηρής πυκνότητας γεωυλικών.....	133
7.2.	ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΕΣ ΤΙΜΕΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ.....	134
7.3.	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	135
8.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	137
8.1.	ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	137
8.2.	ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	137
8.3.	ΠΗΓΕΣ ΑΠΟ ΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ.....	144

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΠΕΔΙΟΥ

Σύμβολο	Ορισμός
E_{tot}	συνολική ενέργεια
E_{trans}	μεταφορική ενέργεια
H_i ή H_D	ύψος εκκίνησης ελεύθερης πτώσης
H_r	ύψος αναπήδησης
I	κεντροβαρική ροπή αδράνειας
m	μάζα
R	συντελεστής αναπήδησης - επιστροφής
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
SHV	σκληρότητα κρουσιμέτρησης Schmidt
v_i	ταχύτητα πριν την κρούση
v_n	κάθετη ταχύτητα
v_r	ταχύτητα μετά την κρούση
v_t	εφαπτομενική ταχύτητα
β	γωνία πρόσπτωσης
ρ	πυκνότητα
ω	γωνιακή ταχύτητα του κέντρου μάζας

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η αντιμετώπιση του φαινομένου των καταπτώσεων βράχων προϋποθέτει συνήθως την κατασκευή έργων αναχαίτισης, η διαστασιολόγηση των οποίων γίνεται πλέον με τη χρήση ειδικών λογισμικών. Ωστόσο, παρόλη την έρευνα που έχει ήδη γίνει από πολλούς μελετητές, η συμπεριφορά των βραχοτεμαχών την στιγμή της πρόσκρουσης σε μία πλαγιά παραμένει σε μεγάλο βαθμό αδιευκρίνιστη, γεγονός που προκαλεί πολλές δυσκολίες στην προσομοίωση της εκτελούμενης τροχιάς.

Η λύση που υιοθετείται μέχρι τώρα βασίζεται στον προσδιορισμό της απώλειας ταχύτητας (ή ενέργειας) με έναν ή δύο συντελεστές (συντελεστές αναπήδησης). Στην βιβλιογραφία, προτείνονται διάφορες τιμές των συντελεστών αυτών που συνδέονται με ένα ορισμένο γεωλογικό υλικό. Ωστόσο, κρίνεται ιδιαίτερα απλουστευτικό να θεωρείται ότι οι συντελεστές αναπήδησης είναι ανεξάρτητοι από άλλους παράγοντες, όπως τα χαρακτηριστικά του τεμάχους (βάρος, μέγεθος, σχήμα, αντοχή, στιβαρότητα), την κινηματική του (ταχύτητα πρόσκρουσης μεταφορική ή γωνιακή, γωνία πρόσκρουσης, προσανατολισμός του τεμάχους), ή τα χαρακτηριστικά της βραχώδους επιφάνειας της πλαγιάς (κλίση, τραχύτητα, αντοχή, στιβαρότητα).

Έτσι στα πλαίσια αυτής της έρευνας, που σκοπό είχε τη διερεύνηση της επίδρασης συγκεκριμένων από τους προαναφερθέντες παράγοντες, πραγματοποιήθηκαν 30 ολοκληρωμένες διερευνήσεις που περιλάμβαναν 277 δοκιμές στο εργαστήριο και 16 δοκιμές στο πεδίο. Η τροχιά των τεμαχών καταγραφόταν από ειδική κάμερα και αναλύοταν ώστε να προσδιοριστεί η ταχύτητα του τεμάχους πριν και μετά την κρούση και έτσι να υπολογιστούν οι αντίστοιχοι συντελεστές της αναπήδησης.

Αρχικά, η έρευνα επικεντρώθηκε στην ανάλυση της συμπεριφοράς ενός συγκεκριμένου γεωυλικού, του μάρμαρου Πεντέλης. Έτσι εξετάστηκε η επίδραση της μάζας (και κατά συνέπεια του μεγέθους) του τεμάχους στον ολικό συντελεστή αναπήδησης εκτελώντας δοκιμές ελεύθερης πτώσης σε οριζόντιο επίπεδο. Εκτελέστηκαν σειρές δοκιμών με ίδιες συνθήκες (γεωυλικό, ύψος πτώσης, κλίση επιπέδου πρόσκρουσης, μορφή τεμάχους) αλλά με διαφορετικές μάζες. Στη συνέχεια εξετάστηκε η επίδραση της ταχύτητας πρόσκρουσης στον ολικό συντελεστή αναπήδησης, εκτελώντας σειρές δοκιμών ελεύθερης πτώσης με διαφορετικό ύψος πτώσης για κάθε δοκιμή. Ακόμα, μελετήθηκε η επίδραση της ταχύτητας πρόσκρουσης στον κάθετο και εφαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης. Ακολούθως, εξετάστηκε η επίδραση της κλίσης της επιφάνειας

νειας πρόσκρουσης στους συντελεστές αναπήδησης, εκτελώντας δοκιμές ελεύθερης πτώσης σε επιφάνεια με διάφορες τιμές κλίσης. Έπειτα, έγιναν δοκιμές που σκοπό είχαν την αξιολόγηση της επίδρασης της γωνίας πρόσπτωσης. Το σημείο που διαφοροποιεί τη συγκεκριμένη σειρά δοκιμών είναι ότι το τέμαχος προσκρούει στην επιφάνεια έχοντας και γωνιακή ταχύτητα.

Σε μία προσπάθεια συσχέτισμού της συμπεριφοράς, υπό κλίμακα, των τεμαχών που μελετήθηκαν στο εργαστήριο με την πραγματική συμπεριφορά σε πρανή, η έρευνα μεταφέρθηκε στο πεδίο. Εκεί, οι δοκιμές έγιναν σε φυσική κλίμακα και περιελάμβαναν φυσικά χαρακτηριστικά του φαινομένου όπως το φυσικό ανάγλυφο του πρανού και την τραχύτητα, παράμετροι που δεν υπήρχαν στις δοκιμές εργαστηρίου.

Ακολούθως, η έρευνα επεκτάθηκε, μελετώντας στο εργαστήριο 4, ακόμα γεωυλικά που συναντώνται στον ελλαδικό χώρο (ασβεστόλιθος, σχιστόλιθος, χαλαζιακός ψαμμίτης, μάρμα). Οι συνθήκες των δοκιμών για τα παραπάνω γεωυλικά ήταν αντίστοιχες με αυτές του μαρμάρου, ώστε να υπάρχει ευχέρεια σύγκρισης και συνολικής αξιολόγησης.

Η έρευνα αυτή εκπονήθηκε στα πλαίσια ολοκλήρωσης του κύκλου σπουδών του Διατμηματικού Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων» υπό την επίβλεψη του καθηγητή του τομέα Γεωτεχνικής του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Δρ. Τσιαμπάο Γεώργιο.

Εξ αιτίας της μεγάλης έκτασης της έρευνας και της φύσης των δοκιμών η εκπόνησή της ήταν αδύνατη από έναν μεταπτυχιακό φοιτητή. Συνεπώς, εκπονήθηκε από κοινού με τον συνάδελφο Ευθυμίου Βίκτωρ που ανέλαβε την ενότητα της επίδρασης των γεωτεχνικών παραμέτρων. Λόγω του συμπληρωματικού χαρακτήρα των δυο εργασιών, αποφασίστηκε η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων από κοινού, ώστε να είναι δυνατή κάθε μορφής σύγκριση και συσχέτιση των εξεταζομένων παραμέτρων.

1.2. ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναπτύσσονται τα αίτια των καταπτώσεων, ο τρόπος αντιμετώπισής τους και γίνεται αναφορά σε δυο συστήματα ταξινόμησης της επικινδυνότητας εξ αιτίας των καταπτώσεων. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ο τρόπος που μελετάται η εκτελούμενη τροχιά, αναφέρονται οι βασικές μαθηματικές σχέσεις για την εξαγωγή των συντελεστών αναπήδησης και δίνονται τιμές αυτών από την βιβλιογραφία. Επιπλέον, παρουσιάζονται συνοπτικά, στοιχεία από προηγούμενες ερευνητικές ερ-

γασίες. Τέλος, γίνεται αναφορά στις μεθόδους διαστασιολόγησης των μέτρων αναχαίτισης.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται η εργαστηριακή πειραματική διάταξη που αναπτύχθηκε για την έρευνα αυτή, παρουσιάζεται η διαδικασία εκτέλεσης των δοκιμών και ο τρόπος επεξεργασίας αυτών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών που έγιναν και γίνεται ένας πρώτος σχολιασμός των αποτελεσμάτων.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η διάταξη και η διαδικασία εκτέλεσης των επί τόπου δοκιμών και περιγράφεται ο τρόπος επεξεργασίας των αποτελεσμάτων. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα τους.

Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται μια συγκεντρωτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, όπου αυτά σχολιάζονται, διατυπώνονται τα αντίστοιχα συμπεράσματα και συγκρίνονται με τα αντίστοιχα από παλαιότερες ερευνητικές εργασίες.

Τέλος, στο έβδομο κεφάλαιο, παρουσιάζονται συνοπτικά τα κύρια συμπεράσματα, δίνονται προτεινόμενες τιμές των συντελεστών αναπήδησης για τα πετρώματα που εξετάστηκαν, καθώς και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

1.3. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά, στον συνάδελφο και συμφοιτητή Ευθυμίου Βίκτωρ για την άριστη συνεργασία κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Στον επιβλέποντα καθηγητή Δρ. Τσιαμπάο Γεώργιο για την καθοδήγηση κατά την διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής.

Στον Δρ. Σαρόγλου Χάρη, για την διαρκή ενασχόλησή του με το θέμα, τις προτάσεις για βελτιώσεις, τις επισημάνσεις των ελλείψεων, τον σχολιασμό των κειμένων και την άριστη συνεργασία κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Στον Δρ. Χρήστο Τσατσανίφο, διευθύνοντα σύμβουλο της εταιρείας «Πανγαία Σύμβουλοι Μηχανικοί Ε.Π.Ε.» με την οποία συνεργάζομαι, για την παραχώρηση εργαστηριακού εξοπλισμού και τις διευκολύνσεις που μου παρείχε για την φοίτηση στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών.

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΤΑΠΤΩΣΕΩΝ ΒΡΑΧΩΝ

2.1. ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Ως κατάπτωση βράχων ή βραχόπτωση (rock fall) νοείται το φαινόμενο όπου ένα βραχώδες τεμάχιο αποκολλάται από την φυσική του θέση στο πρανές, και με την επίδραση της βαρύτητας κινείται προς τα κάτω προσκρούοντας και αναπηδώντας στην επιφάνεια του πρανού, μέχρι την θέση τελικής ηρεμίας.

Αποτελεί δε, σημαντικό κίνδυνο για την ανθρώπινη ζωή και δραστηριότητα, όταν λαμβάνει χώρα κοντά σε συγκοινωνιακά δίκτυα ή οικισμούς.

Για την μείωση του κινδύνου των καταπτώσεων χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι. Η διαφοροποίηση αυτών έγκειται είτε στην πρόληψη των συμβάντων είτε στο μεγαλύτερο δυνατό περιορισμό των συνέπειών τους. Η πρώτη μέθοδος προσπαθεί να αποτρέψει την αποκόλληση του τεμάχους με την βελτίωση – ενίσχυση της βραχομάζας. Η δεύτερη έχει ως στόχο την διακοπή της ανεξέλεγκτης κίνησης του τεμάχους πριν προκαλέσει βλάβες ή και απώλεια ανθρωπίνων ζωών.



Εικόνα 2.1. Άποψη από την κατάπτωση βράχων στο εθνικό οδικό δίκτυο, στην κοιλάδα των Τεμπών (Δεκέμβριος 2009)

2.2. ΑΙΤΙΑ ΚΑΤΑΠΤΩΣΕΩΝ

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι κυριότεροι λόγοι οι οποίοι δύνανται να προκαλέσουν καταπτώσεις βράχων.

2.2.1. Γεωλογικές - υδρογεωλογικές διεργασίες

Ο τρόπος γένεσης και η επακόλουθη τεκτονική καταπόνηση κάθε πετρώματος, με την ρωγμάτωσή του, έχουν σαν αποτέλεσμα να προσδίδονται σε αυτό διαφορετικές ιδιότητες και χαρακτηριστικά. Ακόμα περισσότερο, η διαφορετική ορυκτολογική σύσταση και η αντοχή κάθε επιμέρους ορυκτού, που συνιστά το πέτρωμα, έχουν ιδιαίτερη βαρύτητα στη τιμή της αντοχής και στην ευκολία αποσάθρωσης του σχηματισμού, και έτσι στο μεγάλο εύρος διαφορετικών γεωλογικών συμπεριφορών.

Το φαινόμενο της αποσάθρωσης καθορίζει κυρίως την ποιότητα της βραχομάζας. Διακρίνεται στη μηχανική αποσάθρωση (θρυμματισμός του πετρώματος χωρίς αλλαγή της χημικής σύστασής του) και τη χημική αποσάθρωση. Κύριοι συντελεστές της μηχανικής αποσάθρωσης είναι:

- η παγετώδης αποσφήνωση (η διόγκωση του περιεχόμενου νερού, στους πόρους και τις ρωγμές, λόγω της πήξης του προκαλεί μεγάλες δυνάμεις επί του πετρώματος),
- η κρυστάλλωση αλάτων (όμοια με τον πάγο, διαλυμένα άλατα που βρίσκονται σε πόρους, ρωγμές ή εξωτερικά έγκοιλα του πετρώματος όταν κρυσταλλωθούν αυξάνουν σε όγκο),
- η θερμική διαστολή και συστολή (τα διάφορα ορυκτά του πετρώματος έχουν διαφορετική τιμή συστολής ή διαστολής),
- η βιογενής ενέργεια (οι ρίζες των φυτών ή οι υπόγειες εκσκαφές από ζώα, διευρύνουν τις ρωγμές και χαλαρώνουν το πέτρωμα).

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

- η διάλυση (η παρουσία ακόμα και μικρής ποσότητας οξέως στο νερό αυξάνει τη διαλυτική του ικανότητα),

- η υδρόλυση (θετικά ιόντα του πλέγματος των ορυκτών αντικαθίστανται από ελεύθερα ιόντα υδρογόνου του νερού, με αποτέλεσμα τα ορυκτά να αποσυντίθενται),
- η οξειδωση (χημικές ενώσεις με το οξυγόνο).

Οι βροχοπτώσεις έχουν και αυτές σημαντική επίδραση στην ποιότητα της βραχομάζας. Το επιφανειακό νερό εισέρχεται στις ανοιχτές ρωγμές-ασυνέχειες που αναπτύσσονται συνήθως στην επιφανειακή ζώνη της βραχομάζας των πρανών με αποτέλεσμα:

- να παρέχει το νερό για την επίτευξη του φαινομένου της παγετώδους αποσφένωσης,
- σε περίπτωση μη επαρκούς αποστράγγισης, να ασκεί υδροστατική πίεση στη βραχομάζα συμβάλλοντας έτσι σε καταπτώσεις ήδη ασταθών τεμαχών,
- κατά την ροή του δια μέσω των ασυνεχειών, ξεπλένει το εδαφικό υλικό από αυτές, χαλαρώνοντας περαιτέρω τη βραχομάζα,
- να έχει διαβρωτική δράση εντείνοντας έτσι τις διεργασίες χημικής αποσάθρωσης.

2.2.2. Σεισμική φόρτιση

Πολλές φορές οι σεισμικές δονήσεις μπορούν να προκαλέσουν το έναυσμα για βραχοπτώσεις. Τεμάχη τα οποία είναι ασταθή ή βρίσκονται σε οριακή ισορροπία είναι πολύ πιθανό να εξαναγκαστούν σε κίνηση υπό την σεισμική διέγερση. Η επιτάχυνση του εδάφους έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση του αλληλοκλειδώματος μεταξύ των κόκκων με επακόλουθη τη μείωση της συνοχής και της γωνίας τριβής του πετρώματος - εδάφους. Έτσι εδάφη που η σύσταση τους είναι χαλαρή ή εμφανίζουν μικρή συνεκτικότητα καθώς και πρανή που επηρεάζονται από νεοτεκτονικές διεργασίες παρουσιάζουν αυξημένο κίνδυνο καταπτώσεων λόγω της σεισμικής καταπόνησης.

2.2.3. Ανθρώπινη δραστηριότητα

Ένας ακόμα παράγοντας που μπορεί να προκαλέσει βραχοπτώσεις είναι η ανθρώπινη δραστηριότητα. Για παράδειγμα, σε προγραμματισμένες εργασίες καθαίρεσης, η ελεγχόμενη απομάκρυνση ενός μικρού τεμάχους μπορεί να προκαλέσει την αποσφένωση ενός μεγαλύτερου βράχου. Ακόμα, οι εργασίες ανατίναξης βραχωδών όγκων

προκαλούν δυναμική διέγερση (τεχνητές δονήσεις) παρόμοια με αυτή των σεισμικών φαινομένων, με διαφορά την πολύ μικρότερη έντασή της. Έτσι, με τον μηχανισμό που προαναφέρθηκε δύνανται να αποκολληθούν επισφαλή τεμάχια.

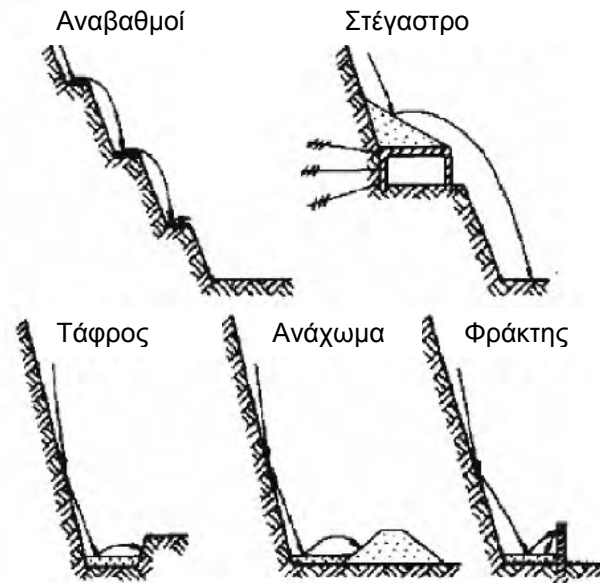
2.3. ΜΕΤΡΑ ΑΝΑΧΑΙΤΙΣΗΣ ΚΑΤΑΠΤΩΣΕΩΝ

Όταν μια περιοχή θεωρείται ως υψηλής επικινδυνότητας όσον αφορά στις βραχοπτώσεις, κρίνεται αναγκαία η λήψη μέτρων προστασίας. Τα μέτρα πρόληψης ή μετριασμού του κινδύνου, που υιοθετούνται για μία συγκεκριμένη τοποθεσία εξαρτώνται τόσο από τα χαρακτηριστικά αυτής όσο και από τα επιθυμητά αποτελέσματα.

Η θέση και ο σχεδιασμός ενός μέτρου αντιμετώπισης μιας κατάπτωσης επιλέγεται βάσει δύο παραγόντων: την πιθανή κινητική ενέργεια και την πιθανή πορεία των βραχοτεμαχίων.

Μερικά από τα μέτρα που έχουν χρησιμοποιηθεί σε έργα αναχαίτισης βραχοπτώσεων είναι και τα ακόλουθα:

- i) Προσεκτική παρατήρηση του πρανούς και ελεγχόμενη αποκόλληση-καθαίρεση επισφαλών όγκων. Χρησιμοποιείται ευρέως, αφού είναι πολύ οικονομική μέθοδος, έχει όμως το μειονέκτημα ότι τα επισφαλή τεμάχια τις περισσότερες φορές δεν είναι αρκετά εμφανή.
- ii) Εφαρμογή μέτρων που σκοπό έχουν τον περιορισμό της δυνατότητας κίνησης του τεμάχους. Τέτοια μέτρα μπορούν να είναι (εικόνα 2.2) :
 - αλλαγή κλίσης του πρανούς ή διαμόρφωση αναβαθμών (ευρεία χρήση),
 - κατασκευή βραχο-στεγάστρου (χρήση σε απότομα πρανή, μειονεκτεί ως προς την ικανότητα προστασίας έναντι ογκωδών τεμαχίων σε διελεύσεις μεγάλου πλάτους),
 - κατασκευή τάφρου (βραχοπαγίδας) στον πόδα του πρανούς,
 - κατασκευή αναχωμάτων, τοιχίων ή φραχτών αναχαίτησης (εικόνα 2.3),
 - εφαρμογή μεταλλικών πλεγμάτων (εικόνα 2.4) στο πρανές.



Εικόνα 2.2. Μέτρα αναχαίτισης της κίνησης βραχοτεμαχίων
(Spang, 1988)



Εικόνα 2.3. Φράκτης συλλογής βραχοτεμαχίων (πηγή Geobrugg)



Εικόνα 2.4. Πλέγμα συγκράτησης βραχοτεμαχίων (πηγή Geobrugg)

iii) Υιοθέτηση μεθόδων που έχουν ως στόχο την μεταβολή των παραγόντων που επιδρούν στην ολίσθηση, είτε με μείωση αυτών που προκαλούν την ολίσθηση, είτε με αύξηση αυτών που αντιτίθενται σε αυτήν. Οι πιο διαδεδομένες τέτοιες μέθοδοι σταθεροποίησης είναι οι αγκυρώσεις.

Οι ενεργητικές αγκυρώσεις εξασκούν μία θλιπτική τάση (λόγω προέντασης) στην επιφάνεια έδρασης και έτσι αυξάνουν την διατμητική αντοχή των ασυνεχειών της βραχομάζας. Οι παθητικές αγκυρώσεις ενεργοποιούνται με την μετακίνηση του τεμάχους. Χρησιμοποιούνται ευρύτατα εδώ και δεκαετίες με πολύ καλά αποτελέσματα.

iv) Επίσης, άλλη μια μέθοδος που εφαρμόζεται είναι η επένδυση του πρανούς με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Χρησιμοποιείται για την σταθεροποίηση τεμαχών και τμημάτων του πρανούς που είναι ασταθή, καθώς και για τη μείωση του φαινομένου της αποσάθρωσης και διάβρωσης του πετρώματος. Αντενδείκνυται γενικά, εκτός ειδικών περιπτώσεων, για περιβαλλοντικούς και αισθητικούς λόγους.

2.4. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑΠΤΩΣΕΩΝ

Η εκτίμηση του κινδύνου έναντι καταπτώσεων σε ορεινές περιοχές (κατοικημένες περιοχές, οδικά-σιδηροδρομικά δίκτυα) έχει ιδιαίτερη σημασία, αφού ο σχεδιασμός των μέτρων προστασίας γίνεται έχοντας ως βάση αυτή την εκτίμηση. Το μέγεθος του κινδύνου εκδήλωσης καταπτώσεων σε μία περιοχή εξαρτάται από πλήθος παραμέτρων, γεγονός που προκαλεί δυσκολίες στην ανάλυση και προστασία έναντι του φαινομένου. Έχει κριθεί σκόπιμο για την εκτίμηση - ποσοτικοποίηση του κινδύνου να υιοθετείται κάποιο σύστημα ταξινόμησης.

Ένα σύστημα ταξινόμησης κινδύνου έναντι βραχοπτώσεων που είναι ευρέως διαδεδομένο και χρησιμοποιείται σε πολλές πολιτείες της Αμερικής, ονομάζεται Rockfall Hazard Rating System (RHRS) και αναπτύχθηκε από τους Pierson et al. (1990) για το τμήμα αυτοκινητοδρόμων της πολιτείας του Oregon, (ODOT). Οι παράμετροι που αξιολογούνται και βαθμονομούνται είναι :

- το ύψος του πρανούς,
- η αποτελεσματικότητα της τάφρου της οδού,
- η πιθανότητα παρουσίας οχήματος στην περιοχή της κατάπτωσης,
- η επάρκεια του χρόνου αντίδρασης του οδηγού,

- το πλάτος του οδοστρώματος (για την δυνατότητα του οδηγού να προβεί σε απότομους ελιγμούς),
- η κατάσταση των ασυνεχειών (τραχύτητα) καθώς και ο προσανατολισμός τους,
- ο βαθμός και ο ρυθμός αποσάθρωσης - διάβρωσης των πετρωμάτων,
- το μέγεθος και η ποσότητα των τεμαχίων,
- το κλίμα και η παρουσία νερού στο πρανές,
- το ιστορικό καταπτώσεων στην υπό μελέτη περιοχή.

Το σύστημα ταξινόμησης RHRS δεν προτείνει μέτρα προστασίας για τις διάφορες κατηγορίες βαθμονόμησης για διάφορους λόγους. Όμως, οι συγγραφείς του συστήματος θεωρούν τα πρανή που συγκεντρώνουν βαθμολογία μικρότερη του 300 ως θέσεις που δεν απαιτούν ιδιαίτερα μέτρα, ενώ τα πρανή με βαθμολογία μεγαλύτερη του 500 απαιτούν άμεσες ενέργειες προστασίας.

Πρόσφατα προτάθηκε ένα νέο σύστημα βαθμονόμησης του κινδύνου βασισμένο σε εμπειρία από τον ελλαδικό χώρο (Marinos et al., 2009), το οποίο αναφέρεται σε υψηλά βραχώδη πρανή. Το σύστημα αυτό εξετάζει 19 παραμέτρους οι οποίες ομαδοποιούνται σε τρεις κύριες κατηγορίες ανάλογα με τον κίνδυνο, και φέρουν διαφορετικό συντελεστή βαρύτητας για την εκτίμηση της συνολικής επικινδυνότητας.

Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τις παραμέτρους: κλίση πλαγιάς, αποσάθρωση, κατάσταση ασυνεχειών, μέγεθος τεμάχους, περατότητα βραχομάζας, δυνατότητα αποστράγγισης

Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει: αριθμό πιθανών τεμαχίων, πλήθος προηγούμενων καταπτώσεων που έχουν συμβεί, βροχοπτώσεις, σεισμική δραστηριότητα.

Η τρίτη κατηγορία περιλαμβάνει: ύψος πλαγιάς, ύψος αναπήδησης, διαθεσιμότητα και γεωμετρία λεκάνης στον πόδα, προσβασιμότητα πλαγιάς, πιθανές επιπτώσεις της κατάπτωσης, σπουδαιότητα κατασκευών και οδών.

Τα αντίστοιχα βάρη για τις τρεις κατηγορίες είναι 55, 15, 30 (%).

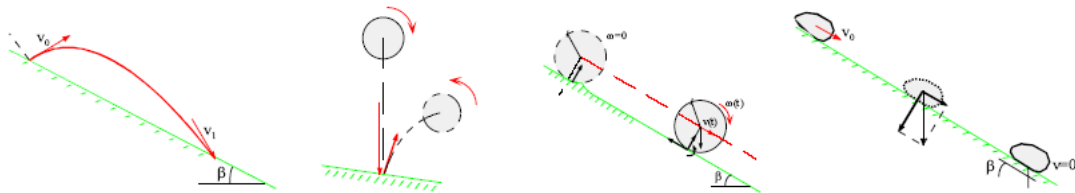
Το αποτέλεσμα από την εφαρμογή της ταξινόμησης είναι ο διαχωρισμός της περιοχής σε ζώνες κινδύνου καθώς και η σύνταξη χαρτών επικινδυνότητας. Έτσι προτείνεται η αναγκαιότητα ή μη της χρήσης προστατευτικών μέτρων και σε ορισμένες περιπτώσεις τίθενται και περιορισμοί δόμησης.

2.5. ΜΕΛΕΤΕΣ ΤΡΟΧΙΑΣ

Η πρώτη βιβλιογραφική αναφορά του φαινομένου έγινε το 1882 από τον Heim, προσεγγίζοντας το θέμα από γεωλογική σκοπιά.

Η τροχιά ενός τεμάχους που εκτελεί κατάπτωση, μπορεί να προσομοιωθεί ως ένας συνδυασμός τεσσάρων τύπων κίνησης. Με βάση τον Descoeudres (1997), οι τύποι κίνησης είναι (κατά σειρά, σύμφωνα με το σχήμα 2.1):

- ελεύθερη πορεία (free flight),
- αναπήδηση (bouncing),
- κύλιση (rolling),
- ολίσθηση (sliding).

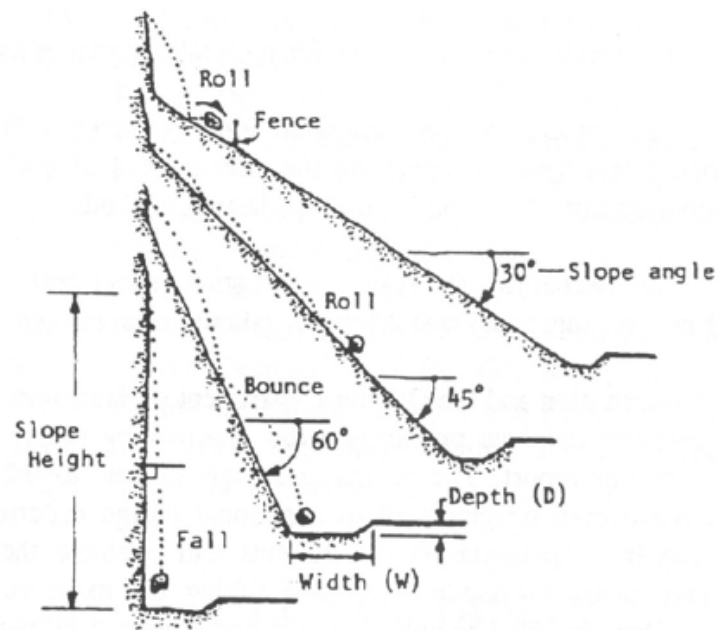


Σχήμα 2.1. Τύποι κίνησης που συνθέτουν το φαινόμενο της κατάπτωσης.
(Descoeudres, 1997)

Αναπήδηση συμβαίνει όταν το τέμαχος προσκρούει στην επιφάνεια της πλαγιάς, σε δέντρα ή άλλα εμπόδια. Λόγω της πολυπλοκότητάς της, θεωρείται ως το τμήμα της τροχιάς το οποίο έχει κατανοηθεί λιγότερο από όλα και είναι το πιο δύσκολο να προβλεφθεί.

Η ελεύθερη παραβολική πορεία του τεμάχους μπορεί να περιγραφεί από μια παραβολική τροχιά (Ritchie, 1963). Εκτελώντας τεχνητές επί τόπου (in situ) δοκιμές, παρατήρησε ότι το κύριο είδος της κίνησης (σχήμα 2.2) ανά κατηγορία είναι:

- κύλιση σε πλαγιές με κλίση μέχρι 45° (όπου γωνία κλίσης η η γωνία μεταξύ οριζόντιου επιπέδου και επιπέδου πρανούς),
- αναπήδηση για γωνίες κλίσης μεταξύ 46° και 63° , και
- ελεύθερη πτώση για γωνίες κλίσης μεγαλύτερες από 64° .



Σχήμα 2.2. Είδη κίνησης ανάλογα με την κλίση του πρανούς (Ritchie, 1963)

Σε γενικές γραμμές, τα τεμάχια μεγάλου όγκου διανύουν μεγάλες αποστάσεις και τείνουν να κυλίσουν ή και να ολισθαίνουν κατά μήκος του πρανούς παραμένοντας κοντά στην επιφάνεια του [(Ritchie, 1963), (Bozzolo & Pamini, 1986)].

Τα μικρά τεμάχια συνήθως ολοκληρώνουν την κίνησή τους, κοντά στο σημείο εκκίνησής τους (Evans & Hungr, 1993). Αυτό οφείλεται στη σχετική τραχύτητα μεταξύ του τεμάχου και της επιφάνειας του πρανούς, όπου οι τοπικές ανωμαλίες της πλαγιάς προκαλούν στα μικρά τεμάχια κάποιου βαθμού αλληλοεμπλοκή, με αποτέλεσμα να περιορίζεται η δυνατότητα μετακίνησης, σε αντίθεση με τα μεγάλα τεμάχια που επηρεάζονται και εκτρέπονται λιγότερο από την τραχύτητα της πλαγιάς (Statham, 1979).

Οι περισσότερες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται σήμερα αναπαριστούν την αναπήδηση με έναν απλοποιημένο τρόπο, χρησιμοποιώντας συντελεστές για να περιγράψουν την απώλεια ταχύτητας που συμβαίνει κατά την διάρκεια της πρόσκρουσης. Οι συντελεστές αυτοί καλούνται συντελεστές αναπήδησης και εκφράζουν το ποσό της ταχύτητας ή ενέργειας που χάνεται κατά την κρούση.

Η μαθηματική έκφραση των συντελεστών αναπήδησης δεν είναι καθολικά καθορισμένη, αποδεικνύοντας την φτωχή κατανόηση του φαινομένου. Ωστόσο, οι συντελεστές αναπήδησης αποτελούν την πιο κρίσιμη παράμετρο για την προσομοίωση της

τροχιάς, και τον έλεγχο της απώλειας ταχύτητας και κινητικής ενέργειας κατά την κρούση. Συνεπώς η αξιοπιστία οποιασδήποτε ανάλυσης τροχιάς εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την σωστή επιλογή παραμέτρων υπολογισμού, γεγονός που συμπεριλαμβάνει και την ορθολογική απόδοση των συντελεστών αναπήδησης.

Έτσι για την εκτέλεση μιας πιο ορθολογικής ανάλυσης όπως και την επίτευξη πιο λογικών προβλέψεων είναι επιβεβλημένη η καλύτερη δυνατή γνώση του φαινομένου της αναπήδησης και της απώλειας ενέργειας κατά την κρούση.

Συνεπώς κρίνεται απαραίτητη η ακριβής παρατήρηση και ανάλυση του φαινομένου για την εξακρίβωση των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στις μεθόδους ανάλυσης καταπτώσεων. Για την συλλογή αυτών των πληροφοριών χρησιμοποιούνται οι παρακάτω μέθοδοι:

- Ανάδρομες αναλύσεις φυσικών συμβάντων καταπτώσεων,
- Ειδικές επί τόπου δοκιμές (in situ)
- Εργαστηριακές δοκιμές υπό κλίμακα.

2.5.1. Ανάδρομες αναλύσεις φυσικών καταπτώσεων

Μετά την ολοκλήρωση φυσικών φαινομένων βραχοπτώσεων, η ανάλυση των τροχιών στο πρανές και η τελική θέση ηρεμίας βοηθούν στην κατανόηση και τη συλλογή χρήσιμων πληροφοριών για την εκτελεσθείσα τροχιά (π.χ. μέγεθος τεμαχών, οριζόντια και πλευρική απόσταση που διανύθηκε, ύψος ή και μήκος αναπήδησης).

Εκτελώντας ανάδρομες αναλύσεις μπορεί να εκτιμηθεί η αναπτυσσόμενη ταχύτητα ή ενέργεια, καθώς και το ποσοστό της ταχύτητας ή ενέργειας που χάθηκε κατά την πρόσκρουση [(Lied, 1977), (Evans & Hungr, 1993)].

Οι παρατηρήσεις αυτές θα πρέπει να χρησιμοποιούνται για τη βαθμονόμηση των προγραμμάτων ηλεκτρονικών υπολογιστών (βλέπε § 2.8.2) για αναλύσεις τροχιάς στο χώρο ενδιαφέροντος ή σε άλλα πεδία με παρόμοια χαρακτηριστικά (Labieuse & al, 2001).

Αν και η παρατήρηση και ανάδρομη ανάλυση φυσικών φαινομένων είναι απαραίτητη για την ορθή βαθμονόμηση των προγραμμάτων ανάλυσης τροχιάς, αυτό το είδος της έρευνας καταπτώσεων δεν είναι κατάλληλο για παραμετρική μελέτη ή για εξαγωγή στατιστικώς σημαντικών συμπερασμάτων. Αυτό οφείλεται στη φυσική ανομοιογένεια

του υλικού που μελετάται (τραχύτητα επιφάνειας, σχήμα και μέγεθος τεμαχίων, γωνία κλίσης κ.α.).

2.5.2. Επί τόπου δοκιμές

Εκτός από την παρατήρηση των φυσικών φαινομένων, οι επί τόπου δοκιμές (in situ tests) παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για την μελέτη του φαινομένου, την αξιολόγηση των σχετικών φυσικών παραμέτρων καθώς και για την ορθή βαθμονόμηση των αριθμητικών μοντέλων.

Στην επί τόπου δοκιμή, το τεμάχος απελευθερώνεται στην κορυφή μίας πλαγιάς με γνωστά γεωλογικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά. Η τροχιά του καταγράφεται από ειδική φωτογραφική μηχανή και αναλύεται ώστε να προσδιοριστεί η ταχύτητα του τεμαχίου σε διάφορες θέσεις, το ύψος αναπήδησης σε κάθε κρούση και οι αποστάσεις που διανύθηκαν. Για κάθε κρούση του τεμαχίου υπολογίζονται η μεταφορική και η περιστροφική ταχύτητα πριν και μετά την κρούση, και κατά συνέπεια, προκύπτουν οι συντελεστές αναπήδησης (βλ. § 2.6).

Πολλά πειράματα έχουν ήδη πραγματοποιηθεί και αναλυθεί σε παγκόσμιο επίπεδο [(Ritchie, 1963), (Broili, 1977), (Lied, 1977), (Statham, 1979), (Wu, 1985), (Bozzolo & al, 1988), (Pfeiffer & Bowen, 1989), (Fornaro & al, 1990), (Kobayashi & al, 1990), (Azzoni & al, 1992), (Giani, 1992), (Evans & Hungr, 1993), (Azzoni & De Freitas, 1995), (Urciuoli, 1996), (Yoshida, 1998), (Teraoka & al, 2000), (Heidenreich, 2004)].

Μεταξύ αυτών των επί τόπου δοκιμών, η πιο πλήρης σειρά έγινε από το Ιταλικό ινστιτούτο πειραματικών μοντέλων και κατασκευών (ISMES) μεταξύ του 1989 και 1995, σε πρανή διαφόρων γεωλογικών και γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών. Οι δοκιμές αυτές επέτρεψαν την ανάλυση της επιρροής των παραμέτρων τόσο του τεμαχίου (μέγεθος, σχήμα, μηχανικά χαρακτηριστικά), όσο και του εδάφους (γεωλογική σύσταση, γεωμετρία) στην τροχιά που ακολουθείται [(Azzoni et al, 1992), (Azzoni & De Freitas, 1995)].

Οι επί τόπου δοκιμές είναι εξαιρετικά σημαντικές για την μελέτη των κατολισθήσεων, διότι αυτές μόνο επιτρέπουν την οπτικοποίηση πολλών διαφορετικών και περίπλοκων πτυχών αυτού του εξαιρετικά τυχαίου φαινομένου. Επίσης επιτρέπουν τόσο τη μελέτη του φαινομένου και την αξιολόγηση των σχετικών φυσικών παραμέτρων, όσο και τη σωστή βαθμονόμηση των μαθηματικών μοντέλων (Azzoni & De Freitas, 1995).

Οι συντελεστές αναπήδησης που προκύπτουν από επί τόπου δοκιμές, σε συνδυασμό με τη γεωμετρία του πρανούς και τις ιδιότητες των τεμαχίων, θεωρούνται ως οι πλέον κατάλληλες παράμετροι για τον ορισμό των χαρακτηριστικών των καταπτώσεων.

Ωστόσο, οι επί τόπου δοκιμές είναι δαπανηρές και χρονοβόρες και (ως φυσικά φαινόμενα) δεν είναι ιδιαίτερα κατάλληλες για τη στατιστική και παραμετρική ανάλυση. Ως εκ τούτου, οι δοκιμές εργαστηριακής κλίμακας αποτελούν σημαντικό συμπλήρωμα για την ακριβή πειραματική έρευνα.

2.5.3. Εργαστηριακές δοκιμές

Οι πειραματικές μελέτες που πραγματοποιούνται σε εργαστήρια περιλαμβάνουν την εκτέλεση δοκιμών σε μικρής κλίμακας ομοιώματα. Σε ορισμένες περιπτώσεις, προσομοιώνεται ολόκληρη η εκτελούμενη τροχιά [(Campronuono, 1977), (Azimi & Desvarreux, 1977, (Azimi & al, 1982), (Statham, 1979), (Ujihira & al 1993), (Murata & Shibuya, 1997)], ενώ άλλες πειραματικές εργασίες επικεντρώνονται στην κρούση [(Kawahara & Muro, 1999), (Kamijo & al, 2000), (Wong & al, 1999 και 2000), (Ushiro & al, 2000), (Chau & al 1998a-b, 1999a-b, 2002), (Richards et al, 2001), (Heidenreich, 2004), (Μπεκρή, 2010), (Σαρόγλου κ.α., 2010)].

Τα πειράματα εργαστηρίου είναι πολύ χρήσιμα για την κατανόηση του μηχανισμού της αναπήδησης και για τον προσδιορισμό των κρίσιμότερων παραμέτρων. Ωστόσο, η ποσοτική ερμηνεία των αποτελεσμάτων δεν είναι απλή, λόγω της δυσκολίας συσχέτισμού της προσομοίωσης με όλες τις παραμέτρους που υπεισέρχονται στην δυναμική διαδικασία.

Βασισμένος σε μικρής κλίμακας πειράματα, ο Campronuono (1977) τονίζει ότι, ενώ είναι εφικτό να συσχετισθούν τα στατικά χαρακτηριστικά των υλικών (παραμορφωσιμότητα, δύναμη, πυκνότητα, στατική γωνία τριβής), με το ομοίωμα ανεξάρτητα από μέγεθός του, ο συσχετισμός με τα δυναμικά χαρακτηριστικά που συμμετέχουν στο φαινόμενο της πρόσκρουσης (συντελεστής αναπήδησης, αντοχή στην κρούση, δυναμική γωνία τριβής) δεν είναι προφανής. Για παράδειγμα, αναφέρει ότι σε δοκιμή υπό κλίμακα, που επαληθεύει τις απαιτήσεις μηχανικής προσομοίωσης, η αναπήδηση δίδει αρκετά χαμηλότερη ενέργεια από εκείνη που παρατηρήθηκε στις πλήρους κλίμακας δοκιμές.

2.6. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ

Την στιγμή που ένα τεμάχος προσκρούει στην επιφάνεια του πρανούς, ασκεί μια δύναμη στο πρανές και από αντίδραση αναπηδά προς την αντίθετη κατεύθυνση. Το ύψος της αναπήδησης, η κατεύθυνση και η ταχύτητα (μεταφοράς και περιστροφής) που προκαλείται στο τέμαχος κατά τη διάρκεια της πρόσκρουσης εξαρτάται από τις συνθήκες πρόσκρουσης οι οποίες με τη σειρά τους εξαρτώνται από ένα μεγάλο αριθμό παραμέτρων.

Κατά τη διάρκεια της σύγκρουσης, ένα ορισμένο ποσό ενέργειας απελευθερώνεται. Η διάχυση της ενέργειας οφείλεται στην ελαστοπλαστική συμπεριφορά του γεωυλικού του πρανούς, στη δημιουργία ελαστικού κύματος, στην αντίσταση κύλισης και ολίσθησης ή και σε ενδεχόμενη καταστροφή του (Giani, 1992).

Σε γενικές γραμμές, διακρίνονται δύο κύριες λειτουργίες διάχυσης της ενέργειας. Η κινητική ενέργεια κάθετα στην επιφάνεια του πρανούς καθορίζεται από την πλαστικότητα του εδαφικού υλικού και η αντίσταση παράλληλα με το επίπεδο πρόσκρουσης εξαρτάται από την τριβή ολίσθησης και κύλισης.

Συνεπώς, λόγω των διαφορετικών μηχανισμών που εμπλέκονται στην αντίσταση της κίνησης κατά την κάθετη και την εφαπτομενική συνιστώσα (ως προς το πρανές), χρησιμοποιούνται επί μέρους ορισμοί για τη μέτρηση της αντίστασης. Το μέτρο της αντίστασης κάθετα στο επίπεδο του πρανούς ονομάζεται κάθετος συντελεστής αναπήδησης (normal coefficient of restitution), ενώ το μέτρο της αντίστασης παράλληλα στο επίπεδο του πρανούς ονομάζεται εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης (tangential coefficient of restitution).

Ανάλογα με τις συνθήκες, η πρόσκρουση διαφοροποιείται περαιτέρω την στιγμή της επαφής του τέμαχους με το πρανές. Αν η εφαπτομενική ταχύτητα του τμήματος του τεμάχους που έρχεται σε επαφή με το πρανές είναι μηδέν, η πρόσκρουση καλείται πρόσκρουση “προσκόλλησης” (sticking impact) και μπορεί να περιγραφεί ως μια καθαρή στιγμιαία κύλιση. Στην περίπτωση μη μηδενικής εφαπτομενικής συνιστώσας της ταχύτητας στο σημείο επαφής, η πρόσκρουση καλείται πρόσκρουση κύλισης ή ολίσθησης (sliding ή slipping impact). Στην περίπτωση αυτή, η κίνηση του τεμάχους είναι ένας συνδυασμός ανάμεσα στις δύο κινήσεις.

Από μαθηματική σκοπιά, διάφορες σχέσεις έχουν προταθεί για να περιγράψουν τους μηχανισμούς που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της πρόσκρουσης.

Ως σήμερα φαίνεται να μην υπάρχει συμφωνία για το ποία μαθηματική σχέση είναι καταλληλότερη για την περιγραφή του φαινομένου των καταπτώσεων.

Οι περισσότερο χρησιμοποιούμενες σχέσεις είναι εκφρασμένες σε όρους ταχύτητας ή ενέργειας, ενώ συναντούνται στην βιβλιογραφία και σχέσεις που χρησιμοποιούν τον λόγο της ώθησης πριν και μετά την κρούση [(Descoeudres & Zimmermann, 1987) και (Bozzolo & al 1988)].

Οι συντελεστές αυτοί, που εκφράζουν το ποσό της ταχύτητας ή ενέργειας που χάνεται κατά την κρούση, αποκαλούνται "συντελεστές αναπήδησης", ακόμη και αν αυτή η ορολογία δεν είναι απολύτως σωστή όπως διατυπώθηκε από τον Νεύτωνα, ο οποίος ορίζει τον συντελεστή επιστροφής - αναπήδησης μόνο από την αναλογία των ταχυτήτων.

Στην ελληνική βιβλιογραφία, εκτός του όρου «συντελεστής αναπήδησης» συναντάται ο όρος «συντελεστής απορρόφησης ενέργειας». Ο τελευταίος ορισμός κρίνεται εσφαλμένος διότι υπονοεί την απώλεια της ενέργειας σε αντίθεση με τον συντελεστή αναπήδησης που περιγράφει το ποσό ενέργειας που διατηρείται μετά την κρούση.

Στη συνέχεια αναφέρονται οι μαθηματικές σχέσεις που χρησιμοποιούνται πιο συχνά στα πλαίσια της ανάλυσης καταπτώσεων.

2.6.1. Σχέσεις ταχυτήτων

Σύμφωνα με τη θεωρία του Νεύτωνα για κεντρική σύγκρουση δύο σωματιδίων, ο συντελεστής αναπήδησης (επιστροφής) R είναι:

$$R = \frac{V_{r,2} - V_{r,1}}{V_{i,2} - V_{i,1}} \quad (2.1)$$

όπου η v_i αντιπροσωπεύει την αρχική ταχύτητα των σωματιδίων και v_r η ταχύτητα μετά την σύγκρουση των δύο σωματιδίων 1 και 2 (οι δείκτες i και r αντιπροσωπεύουν αντίστοιχα τα μεγέθη πριν την κρούση (incident) και μετά την κρούση (rebound)).

Ο συντελεστής αναπήδησης R μπορεί να πάρει τιμές μεταξύ 0 και 1. Για $R=0$ συμβαίνει απολύτως ανελαστική σύγκρουση ενώ ο συντελεστής $R=1$ περιγράφει την τέλεια ελαστική σύγκρουση.

Σε περίπτωση που ένα τέμαχος προσκρούσει σε ακλόνητη επιφάνεια, π.χ. ένα βραχώδες πρανές, ο συντελεστής αναπήδησης απλοποιείται ως εξής:



$$R = \frac{V_r}{V_i} \quad (2.2)$$

όπου v_i και v_r είναι τα μέτρα των ταχυτήτων πριν και μετά την κρούση αντίστοιχα (Σχήμα 2.3).

Ο ορισμός αυτός χρησιμοποιείται από πολλούς συγγραφείς [(Habib, 1977), (Spang & Rautenstrauch, 1988), (Paronuzzi, 1989), (Spang & Sönsner, 1995), (Kamijo, 2000), (Μπεκρή, 2010), (Σαρόγλου κ.α., 2010)].

Για δοκιμές με αρχική ελεύθερη πτώση, η εξίσωση (2.2) μπορεί να γραφτεί ως:

$$R_H = \sqrt{\frac{H_r}{H_i}} \quad (2.3)$$

όπου H_i και H_r είναι το ύψος εκκίνησης της πτώσης και το ύψος της αναπήδησης, αντίστοιχα.

Πειραματικά στοιχεία δείχνουν ότι ο καλύτερος ορισμός λαμβάνεται από διαχωρισμό σε κάθετη και εφαπτομενική συνιστώσα της ταχύτητας πριν και μετά την κρούση. Οι συντελεστές αναπήδησης R_n και R_t , ορίζονται ως εξής:

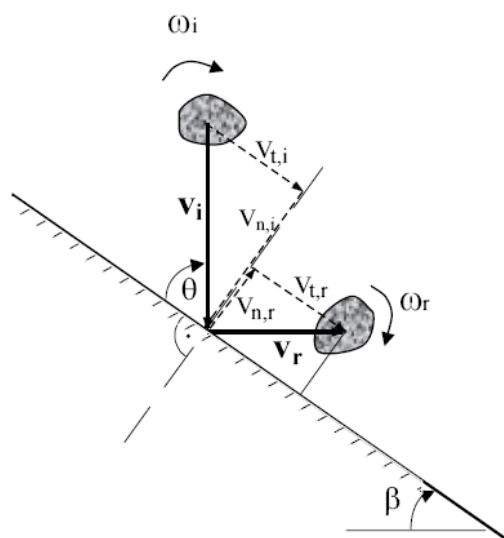
$$R_n = - \frac{V_{n,r}}{V_{n,i}} \quad (2.4)$$

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

όπου v_n και v_t είναι οι κάθετες και εφαπτομενικές συνιστώσες των ταχυτήτων του τεμάχους σε σχέση με την κλίση της επιφάνειας (σχήμα 2.3).

Κατά τη διάρκεια της κρούσης, η κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας αλλάζει πρόσημο. Για να υπάρξει ένας θετικός ορισμός του συντελεστή της αναπήδησης και σύμφωνα με το νόμο του Νεύτωνα για την κρούση, η έκφραση περιλαμβάνει τον πολλαπλασιαστικό συντελεστή (-1).

Ο ορισμός αυτός χρησιμοποιείται από πολλούς συγγραφείς [(Piteau & Clayton, 1977), (Wu, 1985), (Urciuoli, 1988), (Pfeiffer & Bowen, 1989), (Fornaro & al, 1990), (Hoek, 1987), (Kobayashi & al, 1990), (Giani, 1992), (Evans & Hungr, 1993), (Budetta & Santo, 1994), (Ushiro & al, 2000), (Richards et al, 2001), (Heidenreich, 2004), (Μπεκρή, 2010), (Σαρόγλου κ.α., 2010)].



Σχήμα 2.3. Συνιστώσες ταχυτήτων πριν (i) και μετά την αναπήδηση (r)
(Heidenreich, 2004)

Οι συντελεστές αναπήδησης R_n και R_t , που ορίζονται από το λόγο της ορθής και εφαπτομενικής συνιστώσας της ταχύτητας του κέντρου μάζας πριν και μετά την κρούση, αναφέρονται στο ποσοστό των μεταφορικών ταχυτήτων που χάνονται κατά τη διάρκεια της πρόσκρουσης.

Στην βιβλιογραφία, προτείνονται διάφορες τιμές που συνδέονται με ένα ορισμένο γεωυλικό (βλ. Πίνακα 2.1). Ωστόσο, οι τιμές των συντελεστών δίνονται ως σταθερές, αγνοώντας άλλους παράγοντες, όπως τα χαρακτηριστικά του τεμάχους (βάρος, μέγεθος, σχήμα, αντοχή, στιβαρότητα), την κινηματική του (ταχύτητα πρόσκρουσης μεταφορική ή γωνιακή, γωνία πρόσκρουσης, προσανατολισμός του τεμάχους), ή τα χαρακτηριστικά της πλαγιάς (αντοχή, κλίση, τραχύτητα, στιβαρότητα). Οι παραγόντες αυτοί, σύμφωνα με αρκετές επιστημονικές εργασίες, έχουν σημαντική επίδραση στην εκτελούμενη τροχιά και τη συνολική ενέργεια του.

Για να ληφθεί υπόψη η περιστροφή του τεμάχους, έχουν αναπτυχθεί μαθηματικές σχέσεις που προσδιορίζουν τους συντελεστές αναπήδησης με ενεργειακούς όρους.

Επίσης έχουν προταθεί σχέσεις από διάφορους ερευνητές που βασίζονται στην ασκούμενη ώθηση από την κρούση [(Descoedres & Zimmerman, 1987), (Bozzolo & al, 1988)], καθώς και σχέσεις που αφορούν κρούσεις σε εδαφικό υλικό, όπου ο μηχανισμός αναπήδησης διαφέρει εξ αιτίας της διείδυσης του τεμάχους κατά την πρόσκρουση [(Azimi & Desvarreux, 1977), (Pfeiffer & Bowen 1989), (Ushiro, 2000), (Hei-

denreich, 2004)]. Οι παραπάνω σχέσεις δεν κρίνεται σκόπιμο να αναλυθούν περαιτέρω στα πλαίσια της παρούσης εργασίας.

2.6.2. Σχέσεις που βασίζονται στην ενέργεια

Οι σχέσεις που παρουσιάζονται παρακάτω εκφράζουν την αναπήδηση μέσω της ενέργειας του τεμάχους πριν και μετά την κρούση. Οι περισσότεροι ερευνητές [(Bozzolo & Pamini, 1986), (Azzoni & al, 1995), (Chau & al. 1999-b)] εκφράζουν το συντελεστή της αναπήδησης μέσω της μεταφορικής ενέργειας του βραχοτεμαχίου πριν και μετά την κρούση, σύμφωνα με την σχέση:

$$R_E = \frac{E_{trans,r}}{E_{trans,i}} = \frac{0.5 \times m \times v_r^2}{0.5 \times m \times v_i^2} = \frac{v_r^2}{v_i^2} \quad (2.6)$$

όπου m είναι η μάζα του τεμάχους και v_i και v_r είναι ταχύτητα του κέντρου βάρους της μάζας πριν και μετά την κρούση, αντίστοιχα. Η εξίσωση δεν ισχύει σε περίπτωση μεταβολής της μάζας, εξ αιτίας θραύσης του τεμάχους σε μικρότερα τεμάχη κατά την κρούση.

Ο Ursioli (1988), προτείνει μια ελαφρά παραλλαγή του ίδιου τύπου, διαχωρίζοντας σε κανονική και εφαπτομενική συνιστώσα της ενέργειας επιστροφής :

$$R_{E,n} = \frac{v_{n,r}^2}{v_{n,i}^2 + v_{t,i}^2} = \frac{v_{n,r}^2}{v_i^2} \quad (2.7)$$

$$R_{E,t} = \frac{v_{t,r}^2}{v_{n,i}^2 + v_{t,i}^2} = \frac{v_{t,r}^2}{v_i^2} \quad (2.8)$$

Με δεδομένο ότι υπάρχει τριβή μεταξύ του βραχοτεμαχίου και της επιφάνειας του πρανούς, τμήμα της ενέργειας καταναλώνεται κατά την επαφή. Ως εκ τούτου, προκαλείται περιστροφή στο τέμαχος κατά τη διάρκεια της κεκλιμένης πρόσκρουσης, η οποία δεν είναι αμελητέα. Έτσι, προτείνεται ένας ακόμη μαθηματικός ορισμός του συντελεστή αναπήδησης, καλύπτοντας το σύνολο της ενέργειας του βραχοτεμαχίου:

$$R_{TE} = \frac{E_{tot,r}}{E_{tot,i}} = \frac{0.5 \left[m (v_{n,r}^2 + v_{t,r}^2) + I \times \omega_r^2 \right]}{0.5 \left[m (v_{n,i}^2 + v_{t,i}^2) + I \times \omega_i^2 \right]} \quad (2.9)$$

όπου v και ω η μεταφορική και περιστροφική ταχύτητα του κέντρου βάρους της μάζας αντίστοιχα, m είναι η μάζα και I η κεντροβαρική ροπή αδράνειας του τεμάχους.

Μέχρι σήμερα, μόνο λίγοι μελετητές [(Japan Road association, 1983), (Azzoni & De Freitas, 1995), (Yoshida, 1998), (Chau & al, 2002)] έχουν ερευνήσει και λάβει υπόψη τους την περιστροφική ενέργεια που προκαλείται κατά τη διάρκεια της πρόσκρουσης.

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω σχέσεις, η διεύθυνση αναπήδησης δεν μπορεί να καθοριστεί. Ενώ, ακόμα και αν η περιστροφή του τεμάχους ληφθεί υπόψη, οι συντελεστές αναπήδησης R_E και R_{TE} εξακολουθούν να είναι τιμές καθορισμένες για ένα συγκεκριμένο γεωυλικό και ανεξάρτητες από άλλους παράγοντες, όπως την ταχύτητα ή την γωνία πρόσκρουσης, κ.α.

Ένα ακόμη μαθηματικό μοντέλο για να εκφραστεί ο συντελεστής αναπήδησης προτείνεται από τον Stronge, (1990). Εκφράζει ως συντελεστή αναπήδησης τον λόγο του έργου της κάθετης δύναμης 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.

2.6.3. Τιμές συντελεστών αναπήδησης

Στον πίνακα 2.1 παραθέτονται τιμές για τους συντελεστές αναπήδησης που αναφέρονται στην βιβλιογραφία.

2.7. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΠΑΛΑΙΟΤΕΡΩΝ ΕΡΕΥΝΩΝ

Για την καλύτερη κατανόηση του φαινομένου της αναπήδησης, συνοψίζονται στην ενότητα αυτή τα συμπεράσματα ερευνών που έχουν διεξαχθεί στο παρελθόν.

Ο Szabo (1966) βασιζόμενος στην Νευτώνεια φυσική και την θεωρία της κρούσης διατύπωσε ότι η αναπήδηση μεταξύ σωμάτων δεν είναι σταθερά του υλικού, αλλά εξαρτάται από την ταχύτητα, την σύσταση και την γεωμετρία των σωμάτων.

Πίνακας 2.1. Τιμές συντελεστών αναπήδησης

Αναφορές	R_n	R_t	R_E	R_{TE}	Σχόλια
Habib (1977)	0.75 - 0.80				Βασισμένο σε εμπειρία στην Ιταλία
	0.5 - 0.6				Βασισμένο σε εμπειρία στη Νορβηγία
Piteau & Clayton (1977)	0.8 - 0.9	0.65 - 0.75			Συμπαγής βράχος
	0.5 - 0.8	0.45 - 0.65			Κορήματα μαζί με μεγάλα τεμάχια βράχου
	0.4 - 0.5	0.35 - 0.45			Συμπαγή κορήματα μαζί με μικρά τεμάχια
	0.2 - 0.4	0.2 - 0.3			Πλαγιές με φυτοκάλυψη
Wu (1985)	0.2 - 0.8	0.5 - 0.75			Βράχος πάνω σε βράχο ή σε ξύλινη επιφάνεια
Heierli (1985)	0.95		0.9		Βράχος
	0.55		0.3		Χαλίκια (στρώση 35 cm)
	0.45		0.2		Χαλίκια (στρώση 70 cm)
	0.45		0.2		Κορήματα
Bozzolo & Pamini (1986)				0.7	Βράχος σε πλαγιά κλίσης 44°
				0.55	Κορήματα σε πλαγιά κλίσης 57°
Hoek (1987)	0.53	0.99			Συμπαγής βράχος
	0.4	0.9			Ασφαλτοστρωμένος δρόμος
	0.35	0.85			Σάρρες, ογκόλιθοι
	0.32	0.82			Κορήματα
	0.32	0.8			Κορήματα με φυτοκάλυψη
	0.3	0.8			Εδαφικό υλικό, λίγη βλάστηση
Urciuoli (1988) **	0.05 - 0.35	0.5 - 1	0.02 - 1		Βραχώδη τεμάχια ασβεστολίθου
	0	0.24			Κορήματα
Pfeiffer & Bowen (1989) ***	0.37 - 0.42	0.87 - 0.92			Λεία, σκληρή επιφάνεια σαν στρώσεις βράχου
	0.33 - 0.37	0.83 - 0.87			Βράχοι ή ογκόλιθοι με λίγη βλάστηση ή έδαφος
	0.30 - 0.33	0.83 - 0.87			Κορήματα με 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)	0.5	0.95			Βράχος
	0.35	0.85			Βράχος με ογκόλιθους
	0.3	0.7			Κορήματα με ομοιόμορφη κατανομή στοιχείων
	0.25	0.55			Έδαφος με βλάστηση
Evans & Hungr (1993)	0.9	0.9			Μικρά τεμάχια σε καθαρό βράχο
	0.7	20.8*			Μεγάλα τεμάχια σε κορήματα

Αναφορές	R_n	R_t	R_E	R_{TE}	Σχόλια
Azzoni & al. (1995)				0.75 - 0.90	Βράχος (ασβεστόλιθος)
				0.55 - 0.60	Κορήματα και έδαφος συμπτυκνωμένα
				0.35 - 0.45	Κορήματα και έδαφος χαλαρά
				0.45 - 0.50	Μέτρια συγκολλημένα κορήματα με θραύσματα βράχου
				0.4 - 0.50	Μέτρια συγκολλημένα κορήματα με κλαδιά δέντρων
				0.55 - 0.70	Κορήματα με θραύσματα βράχου
				0.50 - 0.60	Έδαφος με φυτοκάλυψη
				<0.20	Τάφος με λάσπη
				0.50 - 0.65	Επίπεδη επιφάνεια ή τεχνητά συμπτυκνωμένο έδαφος
			0.75	Ασφαλτός	
Gerber (1995)	0.17 - 0.43	0.45 - 0.88			Βράχος (ασβεστόλιθος)
Kamijo (2000)	0.1 - 0.35				Κατακόρυφη πτώση τεμάχους 220 kg σε σκληρή επιφάνεια
	0.1				Κατακόρυφη πτώση τεμάχους 800 kg σε σκληρή επιφάνεια
Ushiro & al. (2000)	0.1 - 0.4	0.71			?
Jones & al. (2000) ***	0.6 - 1.0	0.9 - 1.0			Λεία και στρωσιγενής επιφάνεια
	0.15 - 0.30	0.75 - 0.95			Βράχος και ογκόλιθοι
	0.12 - 0.20	0.65 - 0.95			Κορήματα και πλαγιές με έδαφος
	0.1 - 0.20	0.5 - 0.8			Πλαγιές με χαλαρό έδαφος
Budetta & Santo (1994)	0.2	0.53			Βράχος (από βαθμονόμηση προγράμματος)
Σαρόγλου, Μπεκρή & Τσιαμπάος (2010)	0.48	0.77			Ασβεστόλιθος (εργαστηριακή δοκιμή)

* 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 διεύθυνσης παρά τον συντελεστή αναπήδησης.

** Ο Ursioli (1988) αναφέρει ότι οι συντελεστές εξαρτώνται από την ταχύτητα πρόσκρουσης.

*** Οι Pfeiffer & Bowen (198)] και Jones & al. (2000) δίνουν τους συντελεστές σαν σταθερά υλικού με ταυτόχρονη συμμετοχή άλλων παραμέτρων μέσω συντελεστών κλίμακας.

Όμως, στην βιβλιογραφία συχνά οι συντελεστές αναπήδησης αναφέρονται ως ιδιότητα του υλικού εξαρτώμενοι αποκλειστικά από την φύση του, η οποία και καθορίζει πλήρως την εκτελούμενη τροχιά. Συνεπώς, έχουν αναπτυχθεί πίνακες εκτίμησης των συντελεστών βασιζόμενοι σε μια γεωλογική κυρίως περιγραφή του υλικού και σε ορισμένες περιπτώσεις επικουρικά από την τραχύτητα της πλαγίας, τον βαθμό συμπύκνωσης για τα εδαφικά πρανή ή την φυτοκάλυψη.

Πολλοί ερευνητές που έχουν ασχοληθεί είτε με φυσικές είτε με τεχνητές βραχοπτώσεις, καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι η εκτελούμενη τροχιά εξαρτάται εκτός από την φύση του υλικού και από παραμέτρους που σχετίζονται με το τέμαχος και τις κινηματικές συνθήκες κατά την διάρκεια της κρούσης.

Συγκεντρωτικά, οι παράμετροι που επηρεάζουν το φαινόμενο της αναπήδησης συνοψίζονται ως έξι (Labiousse & Descoeudres, 1999):

Χαρακτηριστικά πλαγιάς

- Αντοχή
- Στιβαρότητα (δυσκαμψία)
- Τραχύτητα σε συνάρτηση με το μέγεθος του τεμάχους
- Κλίση

Χαρακτηριστικά βραχοτεμάχους

- Αντοχή
- Στιβαρότητα (δυσκαμψία)
- Βάρος - μέγεθος
- Σχήμα

Κινηματικές συνθήκες

- Ταχύτητα πρόσκρουσης (μεταφορική και περιστροφική)
- Γωνία πρόσκρουσης
- Προσανατολισμός του τεμάχους προ της κρούσης

Ακολουθούν ορισμένα συμπεράσματα και διαπιστώσεις από διάφορες ερευνητικές εργασίες, (Heidenreich, 2004).

Ritchie (1963)

Βάσει επί τόπου δοκιμών, διατύπωσε ότι η κλίση του πρανούς και οι τοπικές ανωμαλίες της επιφάνειάς του, είναι οι βασικοί παράμετροι που καθορίζουν την εκτελούμενη τροχιά. Χωρίς να καθορίσει αριθμητικά συντελεστές αναπήδησης, εξέφρασε ότι:



- Η απώλεια ενέργειας είναι μεγαλύτερη όσο αυξάνει η τραχύτητα του πρανούς σε σχέση με την διάμετρο του τεμάχους.
- Η απώλεια ενέργειας αυξάνει με την αύξηση της πλαστικής συμπεριφοράς του υλικού.
- Η απώλεια ενέργειας αυξάνεται με την αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης. Δυσμενέστερη συνθήκη (μεγαλύτερη οριζόντια αναπήδηση) παρατηρείται όταν το διάνυσμα των ταχυτήτων του τεμάχους σχηματίζει γωνία ίση με 45° με την πλαγία.

Brioli (1974)

Επίσης από επί τόπου δοκιμές, παρατήρησε εκτός των άλλων, την επίδραση της σχέσης μεταξύ ορθής και εφαπτομενικής ταχύτητας. Για εφαπτομενική ταχύτητα τέσσερις φορές μεγαλύτερη της ορθής, δηλαδή για γωνία πρόσπτωσης περί των 14° , η περιστροφή που προκαλείται από την πρόσκρουση δημιουργεί μια αύξηση της ορθής ταχύτητας μετά την κρούση με αντίστοιχη μείωση της εφαπτομενικής.

Habib (1977)

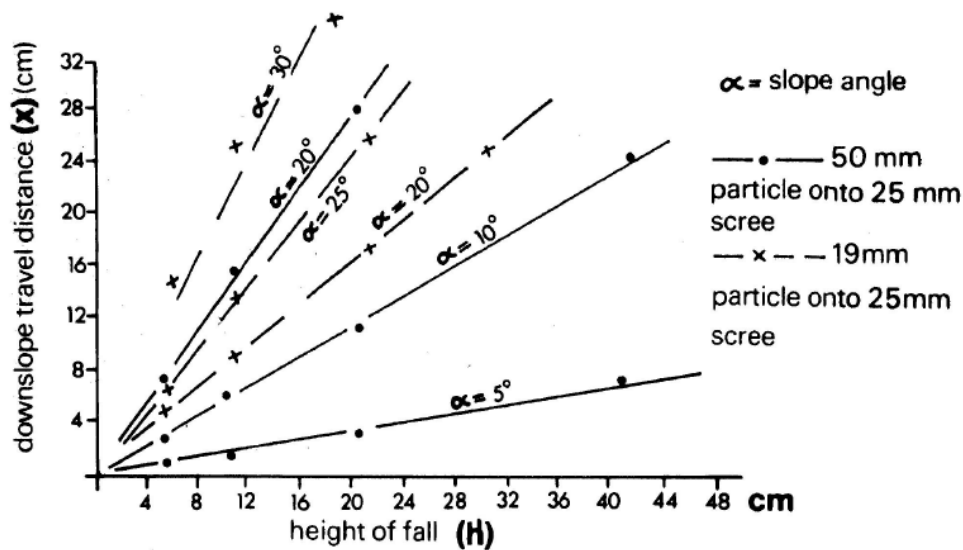
Τόνισε ότι ο συντελεστής αναπήδησης δεν είναι σταθερά εξαρτώμενη από το γεωυλικό, αλλά μεταβάλλεται ανάλογα με την ταχύτητα, την περιστροφή, την μάζα, το σχήμα και την γωνία πρόσπτωσης.

Statham (1979)

Προσομοίασε την τροχιά ενός τεμάχους στο εργαστήριο και σε δοκιμές πεδίου μικρής κλίμακας. Παρατήρησε μια γραμμική συσχέτιση ανάμεσα στο αρχικό ύψος πτώσης και την διανυόμενη απόσταση κατά μήκος του πρανούς. Η σχέση (σχήμα 2.4) επηρεάζεται από την κλίση της πλαγιάς και το μέγεθος του τεμάχους σε σχέση με τα αυτά που αποτελούν το πρανές.

Bozzolo & Pamini (1986)

Μέσω ανάστροφων αναλύσεων από καταγραφείσες επί τόπου δοκιμές, παρατηρήθηκε ότι η ταχύτητα του τεμάχους στο σημείο επαφής εφαπτομενικά με την πλαγία είναι σχεδόν πάντα μηδενική. Συνεπώς, η διαδικασία της κρούσης μπορεί να περιγραφεί σαν μια στιγμιαία κύλιση.



Σχήμα 2.4. Συσχετισμός ύψους πτώσης με την διανυόμενη απόσταση
(Statham, 1979)

Για κρούση σε μη συνεκτικό υλικό, η επαπτομενική ταχύτητα στο σημείο επαφής δεν είναι μηδενική και παρατηρείται ολίσθηση του τεμάχους στην πλάγια, οπότε το σημείο επαφής δεν αποτελεί στιγμιαίο κέντρο περιστροφής.

Με δεδομένο ότι η ολίσθηση ενός τεμάχους απαιτεί μεγαλύτερη ενέργεια από την περιστροφή του, προκύπτει ότι η απώλεια ενέργειας είναι μικρότερη για περιστροφικές συγκρούσεις δηλαδή για βραχώδη πρανή και άρα ο συντελεστής αναπήδησης είναι μεγαλύτερος.

Gerber (1995)

Εκτελώντας επί τόπου δοκιμές διατύπωσε το συμπέρασμα ότι η γωνία πρόσπτωσης έχει σημαντική επίδραση στην αναπτυσσόμενες ταχύτητες μετά την κρούση. Συγκεκριμένα, όσο πιο επαπτομενική είναι η κρούση τόσο μεγαλύτερες είναι οι ταχύτητες αναπήδησης ή άλλως με την αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης παρατηρείται μείωση των ταχυτήτων αναπήδησης.

Barbieri et al. (1988), Azzoni et al. (1992, 1995-b)

Στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος από την ISMES εκτελέστηκαν πλήθος επί τόπου δοκιμών σε πληθώρα πρανών, διαφορετικής γεωλογικής σύστασης με ρίψεις τεμαχών διαφορετικού σχήματος και μεγέθους. Οι ρίψεις κατεγράφησαν με κάμερες υψηλών ταχυτήτων και υπολογίστηκαν οι συντελεστές αναπήδησης σε όρους κάθε-

της και εφαπτομενικής αναπήδησης καθώς και ολικής ενέργειας. Διατυπώθηκαν τα συμπεράσματα:

- Η συνολική κινητική ενέργεια είναι μικρότερη για ρίψεις σε «μαλακά» γεωυλικά από ότι σε βραχώδη πρανή.
- Όσο πιο λεία είναι η επιφάνεια του πρανούς, τόσο μικρότερη είναι η απορρόφηση ενέργειας, με αποτέλεσμα η αναπήδηση και η περιστροφή να είναι αυξημένη.
- Η απώλεια μάζας του τεμάχους (θραύση) επιδρά σημαντικά στην αναπτυσσόμενη κινητική ενέργεια με μη συστηματικό τρόπο.

Wu (1985)

Προσδιόρισε τους συντελεστές αναπήδησης από εργαστηριακές και επί τόπου δοκιμές, μελετώντας την επίδραση της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης στους συντελεστές αναπήδησης, εκτελώντας δοκιμές ελεύθερης πτώσης με κρούση σε επιφάνειες ξύλου και βράχου.

Παρά την μεγάλη διασπορά τιμών, παρατηρήθηκε ότι οι μέσες τιμές των συντελεστών εμφανίζουν γραμμική συσχέτιση με την κλίση του επιπέδου πρόσκρουσης (ή την γωνία πρόσπτωσης).

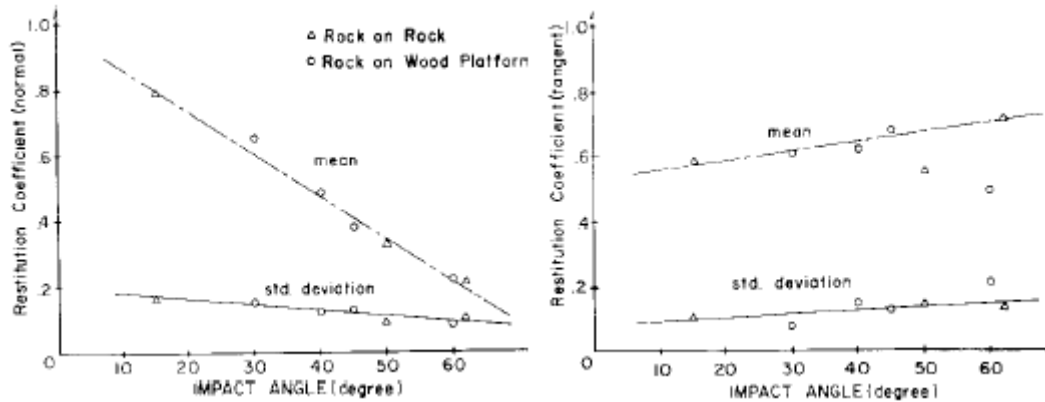
Με την αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης, ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης μειώνεται ενώ ο εφαπτομενικός αυξάνει με πολύ μικρό ρυθμό. (σχήμα 2.5)

Η τάση των συντελεστών αναπήδησης περιγράφεται από τις σχέσεις:

$$R_n = 0.995 - 0.013 \times \theta \quad (2.10)$$

$$R_t = 0.535 + 0.028 \times \theta \quad (2.11)$$

Όπου θ η γωνία πρόσπτωσης σε μοίρες.

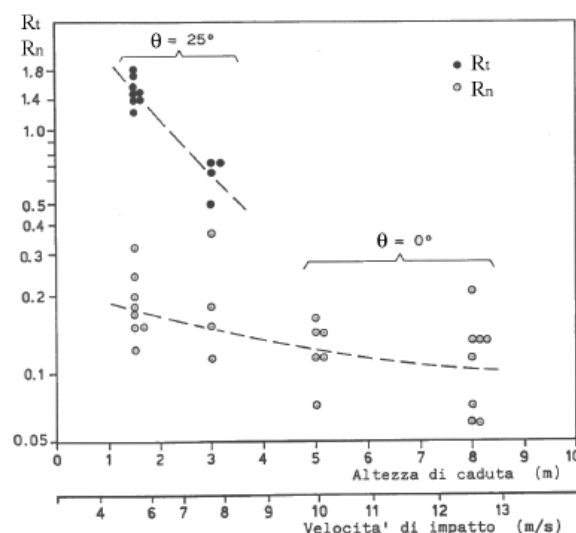


Σχήμα 2.5. Επίδραση γωνίας πρόσπτωσης στους συντελεστές αναπήδησης
(Wu, 1985)

Urciuoli (1988)

Εκτελώντας επί τόπου δοκιμές σε ασβεστόλιθο, υπολόγισε τους συντελεστές αναπήδησης (κάθετο και εφαπτομενικό). Συμπέρανε ότι οι τιμές εξαρτώνται από την κλίση του πρανού, από το ύψος ελεύθερης πτώσης και άρα την αντίστοιχη ταχύτητα κρούσης, από το σχήμα του τεμάχους καθώς και από την σχετική του θέση προ της κρούσης.

Οι συντελεστές αναπήδησης μειώνονται με την αύξηση της ταχύτητας πρόσκρουσης, ενώ ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης επηρεάζεται περισσότερο σε σχέση με τον κάθετο από την ταχύτητα πρόσκρουσης.



Σχήμα 2.6. Επίδραση ταχύτητας πρόσκρουσης στους συντελεστές αναπήδησης
(Urciuoli, 1988)

Pfeiffer and Bowen (1989)

Εκτελώντας μια σειρά επί τόπου δοκιμών, για την βαθμονόμηση του λογισμικού CRISP παρατήρησαν ότι ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης επηρεάζεται περισσότερο συγκριτικά με τον εφαπτομενικό από τις συνθήκες πρόσκρουσης.

Παρατήρησαν ότι η επίδραση της ταχύτητας πρόσκρουσης είναι ελάχιστη για λεία βραχώδη πρανή, ενώ έχει μεγαλύτερη βαρύτητα σε μαλακά. Επίσης, με την αύξηση της διαμέτρου του τεμάχους, μειώνεται η επίδραση του μεγέθους στην αναπτυσσόμενη ταχύτητα κίνησης. Αυτό υποδηλώνει ότι κρίσιμη παράμετρος είναι η έμπηξη του τεμάχους κατά την κρούση, η οποία είναι πρακτικά μηδενική σε σκληρά βραχώδη πρανή.

Συνεπώς, σε μαλακά πρανή, οι αναπτυσσόμενες ταχύτητες και οι αναπηδήσεις είναι μικρότερες και άρα κατά την διάρκεια μιας κίνησης παρατηρούνται περισσότερες κρούσεις με αποτέλεσμα το μικρότερο μήκος τροχιάς σε σχέση με αντίστοιχη κίνηση σε σκληρότερο υλικό.

Kamijo (2000)

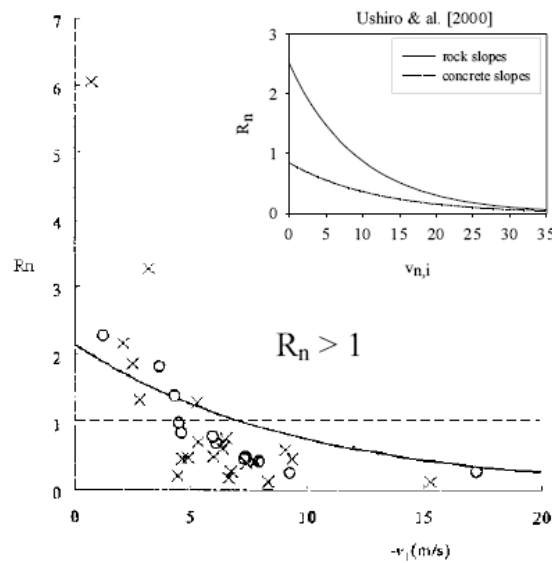
Μελέτησε την αναπήδηση δυο τεμαχών βάρους 220 kg και 800 kg αντίστοιχα, υπό ελεύθερη πτώση από διάφορα ύψη (έως 3 m), σε βάση από τσιμέντο. Παρατήρησε ότι ο συνολικός συντελεστής αναπήδησης R μειώνεται με την αύξηση της ταχύτητας και την αύξηση της μάζας του τεμάχους.

Ushiro et al. (2000)

Εξέτασε μέσω δοκιμών μικρής κλίμακας την επίδραση της ταχύτητας πρόσκρουσης στους συντελεστές αναπήδησης. Παρατήρησε ότι ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης είναι ανεξάρτητος της ταχύτητας πρόσκρουσης, ενώ ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης μειώνεται με την αύξηση της ταχύτητας πρόσκρουσης. Προτάθηκε η σχέση :

$$R_n = 2.056 \times e^{-0.1053 \times (-v_n)} \quad (2.12)$$

Επίσης, παρατηρήθηκε ότι ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης μειώνεται με την αύξηση της μάζας του τεμάχους ανεξάρτητα από την ταχύτητα πρόσκρουσης.

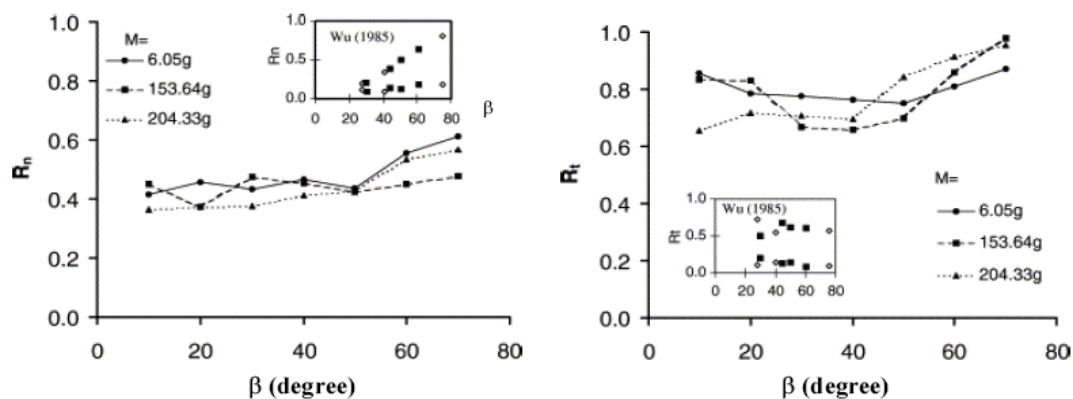


Σχήμα 2.7. Επίδραση ταχύτητας πρόσκρουσης στον συντελεστή κάθετης αναπήδησης (Ushiro et al., 2000)

Chau et al. (1999-b)

Εκτελέστηκαν δοκιμές μικρής κλίμακας, ελεύθερης πτώσης σε τεμάχια γύψου, για την διερεύνηση της επίδρασης του σχήματος. Παρατηρήθηκε ότι ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης για κλίσεις πρανούς μεταξύ 30° και 50° είναι ανεξάρτητος του σχήματος του τεμαχίου, ενώ για μεγαλύτερες κλίσεις ο συντελεστής αυξάνει με την κλίση για κυβικά και εξαγωνικά τεμάχια ενώ παραμένει σταθερός για σφαιρικά και κυλινδρικά.

Ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης παραμένει γενικά ανεξάρτητος του σχήματος για οποιαδήποτε κλίση πρανούς. Παρατηρήθηκε ότι τα σφαιρικά τεμάχια έχουν μεγαλύτερη εφαπτομενική συνιστώσα αναπήδησης από τα κυβικά.



Σχήμα 2.8. Συντελεστές κάθετης και εφαπτομενικής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης (Chau et al., 1999-b)

Wong et al. (2000)

Μελετήθηκε η επίδραση του σχήματος του βραχοτεμάχους στους συντελεστές αναπήδησης για κρούσεις σε βάση γρανίτη. Βρέθηκε ότι ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης μειώνεται με την μετάβαση από στρογγυλεμένο σε γωνιώδες σχήμα του τεμάχους, σε αντίθεση με το συμπέρασμα της προαναφερθείσας έρευνας (Chau et al., 1999-b).

Μελετήθηκε επίσης, η επίδραση της γωνίας πρόσπτωσης στους συντελεστές αναπήδησης εκτελώντας δοκιμές ελεύθερης πτώσης σε κεκλιμένη βάση. Παρατηρήθηκε ότι ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης μειώνεται με την αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης (ή με την μείωση της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης). Η επίδραση της κλίσης μειώνεται με την αύξηση της σκληρότητας του υλικού.

Για τον επαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης η τάση είναι λιγότερο προφανής. Για αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης παρατηρείται μικρή αύξηση του συντελεστή, με τις τιμές να εμφανίζουν μεγάλη διασπορά.

Richards et al. (2001)

Εκτελέστηκαν εργαστηριακές δοκιμές αναπήδησης σε 9 διαφορετικά γεωυλικά, με τεμάχη διαφόρων διαστάσεων και τραχύτητας. Διατυπώθηκε η παρακάτω σχέση για τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης συναρτήσει της σκληρότητας Schmidt.

$$R_n = \frac{(-110 + 9 \times S_{\text{slab}} + 4 \times S_{\text{ball}} + 4a)}{1000} \quad (2.13)$$

Όπου S_{slab} και S_{ball} η σκληρότητα σφύρας Schmidt της επιφάνειας πρόσκρουσης και του τεμάχους αντίστοιχα, και a η κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης σε μοίρες.

Η σχέση διατυπώθηκε σαν συνάρτηση της σκληρότητας τόσο του τεμάχους όσο και της επιφάνειας πρόσκρουσης, αφού παρατηρήθηκε ότι η σκληρότητα των τεμαχίων διαφοροποιούταν με το μέγεθός τους. Όπως φαίνεται από την σχέση 2.13 η επίδραση της σκληρότητας της επιφάνειας πρόσκρουσης είναι διπλάσια από αυτήν του τεμάχους.

Οι τιμές του συντελεστή κάθετης αναπήδησης για ομαλά – λεία τεμάχη προέκυψαν έως και 3 φορές μεγαλύτερες, από αυτές για ακανόνιστης μορφής τεμάχη. Αυτό αποδεικνύει την σημαντικότητα του σχήματος του τεμάχους. Έτσι εκτελώντας πρόσθετες δοκιμές, διατυπώθηκε η παρακάτω σχέση όπου υπεισέρχεται η τραχύτητα του τεμάχους.

$$R_{\text{η-ακανόνιστο}} = \frac{(-9 + 49 \times R_{\text{η-λείο}})}{100} \quad (2.14)$$

Ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης δεν φάνηκε στην εν λόγω έρευνα να επηρεάζεται από την σκληρότητα σφύρας Schmidt, και για αυτό δεν εκβαθύνθηκε η έρευνα προς αυτή τη κατεύθυνση.

Σαρόγλου, Τσιαμπάος, Μπεκρή (2010)

Διαμορφώθηκε για πρώτη φορά στον Ελλαδικό χώρο εργαστηριακή δοκιμή για τον υπολογισμό των συντελεστών αναπήδησης, οι οποίοι και προσδιορίστηκαν για ασβεστολιθικούς κυρίως σχηματισμούς και έγινε σύγκριση με αποτελέσματα ανάδρομων αναλύσεων γνωστών καταπτώσεων.

Δόθηκαν τιμές για τους συντελεστές αναπήδησης ασβεστόλιθου. Διαπιστώθηκε ότι η κλίση του επίπεδου πρόσκρουσης επηρεάζει κυρίως τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης και προσδιορίστηκε ότι αυτός αυξάνεται γραμμικά με την σκληρότητα του γεωλογικού υλικού που συναντάται στο πρανές σύμφωνα με την σχέση :

$$R_n = 0.0086 \times SHV + 0.19 \quad (2.15)$$

Συγκεντρωτικά, οι παράμετροι και ο τρόπος που αυτοί επηρεάζουν τους συντελεστές αναπήδησης, συνοψίζονται στον πίνακα 2.2.

2.8. ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΜΕΤΡΩΝ ΑΝΑΧΑΙΤΙΣΗΣ

Για την αντιμετώπιση του φαινομένου των καταπτώσεων, κατασκευάζονται εφ' όσον απαιτηθεί, έργα αναχαίτισης σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2.3

Στην πράξη η διαστασιολόγηση γίνεται είτε με εμπειρικές μεθόδους, είτε με αριθμητικές αναλύσεις με χρήση ειδικών λογισμικών.

Οι εμπειρικές μέθοδοι προτείνουν συγκεκριμένες κατασκευαστικές λύσεις, συναρτήσει του ύψους πτώσης και της κλίσης του πρανούς, αγνοώντας την φύση του υλικού, το μέγεθος του τεμάχους καθώς και άλλες κρίσιμες παραμέτρους.

Πίνακας 2.2. Επίδραση παραμέτρων στους συντελεστές αναπήδησης

Παράμετρος		R_v	R_n	R_t	Γεωλικό	Αναφορές
Τέμαχος	Μάζα ↗		↙		τσιμέντο, βράχος	Ushiro et al. (2000)
		↙			τσιμέντο	Kamijo (2000)
	Γωνιότητα ↗		↙	↗	γρανίτης	Wong et al. (2000)
			$60^\circ < \beta < 75^\circ$ ↗	↙ (ελαφρά)	γύψος	Chau et al. (1999)
Γεωλικό	Μέτρο ελαστικότητας ↗		↗	↗	φυσικά πρανή	Pfeiffer & Bowen (1989)
			↗	↗	φυσικά πρανή	Fornaro et al. (1990)
			↗	↗	έδαφος, γύψος, βράχος	Chau et al. (1999)
Κινηματική	Γωνία πρόσπτωσης ↗ ή Κλίση επιπέδου πρόσκρουσης ↙		↙	↗ (ελαφρά)	ξύλο, βράχος	Wu (1985)
			↙ (ελαφρά)		γρανίτης, Ε.Σ.	Wong et al. (2000)
			↙	↙	γύψος, έδαφος	
		↙	↙	-	γρανίτης, Ε.Σ.	Chau et al. (1999)
	↙	↙	-	γύψος, έδαφος		
	Ύψος πτώσης ή Ταχύτητα πρόσκρουσης ↗		↙	↙	ασβεστόλιθος	Urciuoli (1988)
		↙			τσιμέντο	Kamijo (2000)
			↙		τσιμέντο, βράχος	Ushiro et al. (2000)

Η χρήση λογισμικών, με τον υπολογισμό της τροχιάς των βραχοτεμαχών, αποτελεί σήμερα την πλέον διαδεδομένη μέθοδο για τη διαστασιολόγηση των μέτρων αντιμετώπισης των βραχοπτώσεων ή ακόμα και τον προσδιορισμό περιοχών που διατρέχουν κίνδυνο. Επισημαίνεται ότι τα μοντέλα τροχιάς χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση μεμονωμένου τεμάχους και καλύπτουν μικρές περιοχές έρευνας. Για την διερεύνηση μεγάλων περιοχών μπορούν να χρησιμοποιηθούν άλλες προσεγγίσεις, όπως μοντέλα κώνου ή τα πλέον σύγχρονα μοντέλα GIS.

2.8.1. Εμπειρικές μέθοδοι σχεδιασμού

Παρατίθενται ενδεικτικά δυο εμπειρικές μέθοδοι σχεδιασμού από την διεθνή βιβλιογραφία, καθώς και η προτεινόμενη από τον ελληνικό κανονισμό μελετών έργων (Κ.Μ.Ε.)

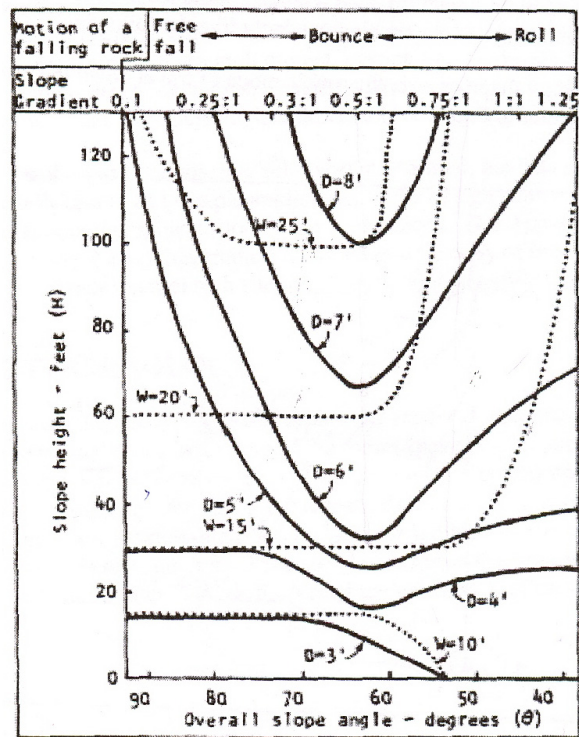
2.8.1.1. Federal Highway Administration FWHA, (1989)

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στο εμπειρικό διάγραμμα (σχήμα 2.9) που προέκυψε από τις μελέτες του Ritchie, πρωτοπόρου στις μελέτες βραχοπτώσεων, από όπου προκύπτουν οι διαστάσεις τραπεζοειδούς τάφρου που κατασκευάζεται στον πόδα του πρανούς, ενώ προσδιορίζεται και το είδος της τροχιάς που θα ακολουθήσουν τα βραχοτεμάχια.

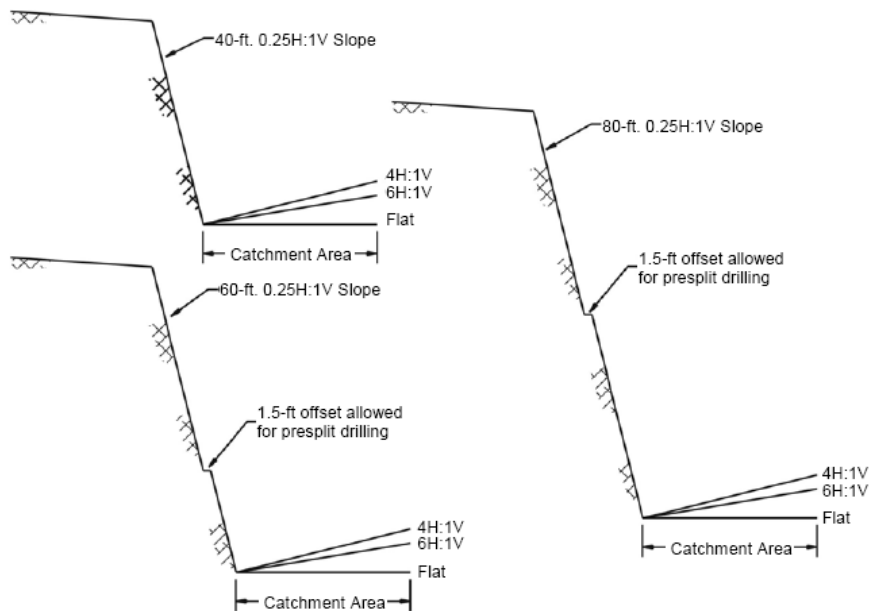
Η φιλοσοφία σχεδιασμού της μεθόδου είναι η δημιουργία μια τάφρου (βραχοπαγίδας) με απότομα τοιχώματα, ώστε τα βραχοτεμάχια μετά την πρόσκρουση στον πυθμένα της τάφρου (καλυμμένο με εδαφικό υλικό) να επαναπροσκρούσουν στο τοίχωμά της και να εκτραπούν προς την πλευρά του πρανούς.

2.8.1.2. Oregon Department Of Transportation ODOT, (1994)

Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε βάσει πειραματικών δοκιμών (σχήμα 2.10.) με σκοπό να αντιμετωπίσει ένα βασικό μειονέκτημα της μεθόδου FWHA. Ως μειονέκτημα θεωρείται η απότομη κλίση του τοιχώματος της τάφρου, το οποίο εφαιπτόμενο σε καταστρώματα οδών δημιουργεί σημεία υψηλής επικινδυνότητας για τα διερχόμενα οχήματα.

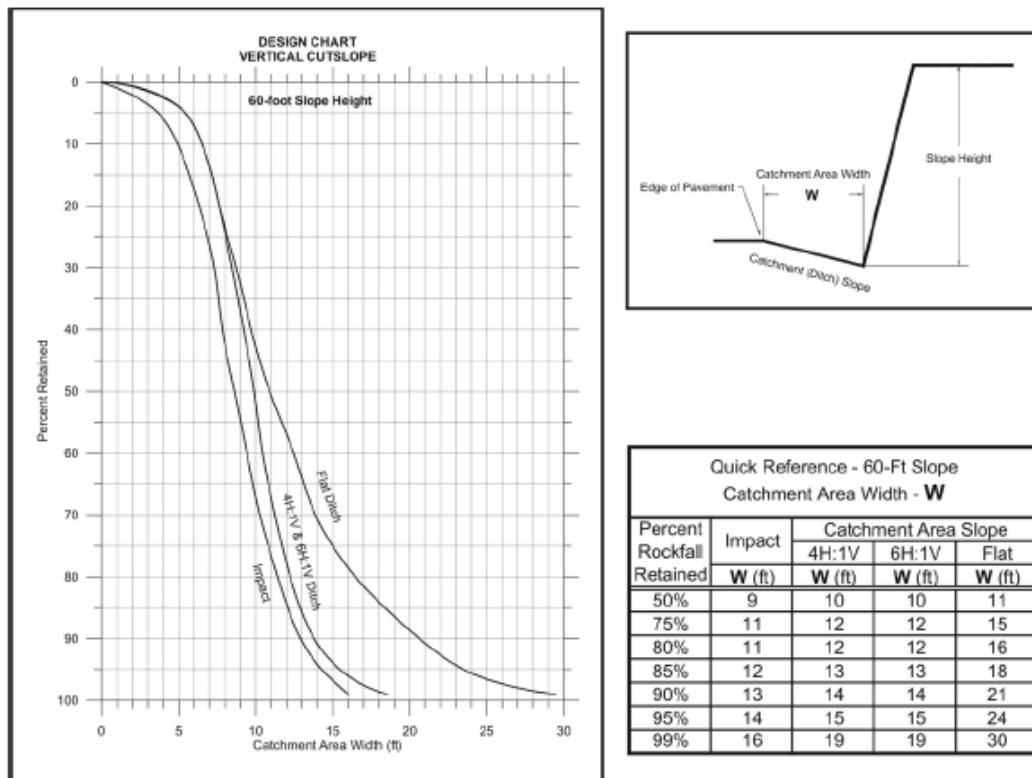


Σχήμα 2.9. Διάγραμμα προσδιορισμού διαστάσεων τάφρου κατά FWHA



Σχήμα 2.10. Διατομές επί τόπου δοκιμών για το σύστημα ODOT

Η μέθοδος αυτή με χρήση νομογραφημάτων (ενδεικτικά παρατίθεται το νομογράφημα για ύψος πρανούς 24.4 m, σχήμα 2.11) δίνει για διάφορα ύψη πρανών, την απόσταση πρώτης πρόσκρουσης και την απόσταση ολοκλήρωσης της κίνησης για ήπιες κλίσεις τάφρου (αντίρροτες του πρανούς). Τα νομογραφήματα περιορίζονται για πρανή με ύψη από 12.2 m έως 24.4 m καθιστώντας δύσκολη της παρεμβολή σε μεγαλύτερα ύψη.



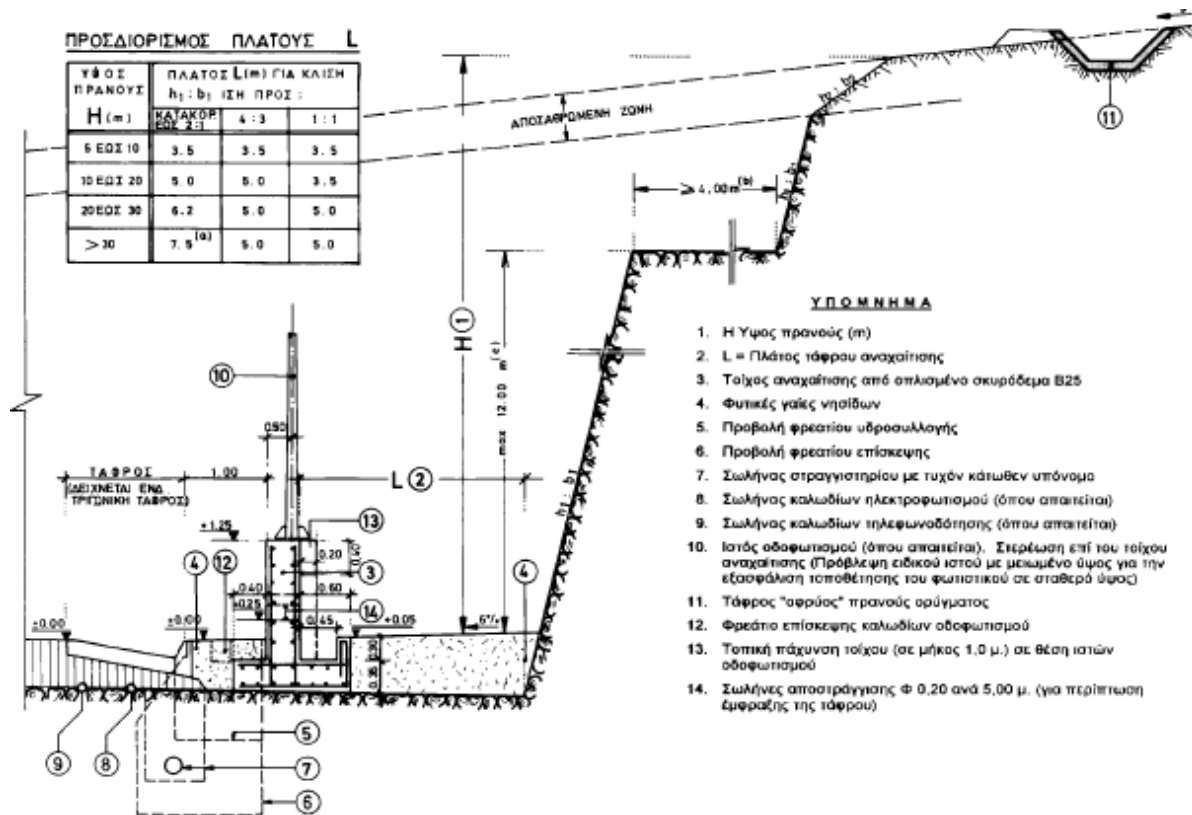
Σχήμα 2.11. Νομογράφημα σχεδιασμού με την μέθοδο ODOT

2.8.1.3. Κανονισμός Μελετών Έργων (ΚΜΕ §1.7.7.3, 2003)

Σύμφωνα με τον Ελληνικό Κανονισμό Μελετών Ερευνών ο γεωμετρικός σχεδιασμός τοίχου ανάσχεσης καταπτώσεων γίνεται βάσει του σχήματος 2.12. Παρατηρείται για πρανή μεγαλύτερα των 12.0 m προϋποθέτει την χρήση οριζόντιου αναβαθμού πλάτους μεγαλύτερου των 4.0 m.

Η φιλοσοφία σχεδιασμού με την μέθοδο αυτή είναι ότι όλα τα βροχοτεμάχια θα προσκρούσουν πίσω από τον τοίχο ανάσχεσης, σε μαλακή στρώση φυτικών γαιών (στρώση 4) όπου και θα απορροφηθεί το μεγαλύτερο ποσοστό της κινητικής ενέργειας. Ο τοίχος ανάσχεσης διαστασιολογείται σαν συνήθης τοίχος αντιστήριξης πληρωμένος με υλικά καταπτώσεων, που σχηματίζουν γωνία ίση με την γωνία εσωτερικής

τριβής τους, εφ' όσον δεν καταπονείται από μεγάλα κρουστικά φορτία, δηλαδή βραχοτεμάχια με υψηλή κινητική ενέργεια.



Σχήμα 2.12. Γεωμετρικά στοιχεία τοίχου ανάσχεσης κατά Κ.Μ.Ε.(2003)

2.8.2. Αναλύσεις με χρήση προγραμμάτων Η/Υ

Σήμερα, ύστερα από περίπου 40 χρόνια μελέτης, ανάλυσης και σύνθεσης των πληροφοριών που σχετίζονται με τις καταπτώσεις έχει δημιουργηθεί ένας πολύ μεγάλος αριθμός προγραμμάτων προσομοίωσής τους, τα οποία επιτρέπουν την εκτέλεση πιο ορθολογικών αναλύσεων τροχιάς. Τα βασικά παρεχόμενα στοιχεία από τις αναλύσεις είναι :

- πιθανές τροχιές κατάπτωσης,
- ύψη αναπηδήσεων, ταχύτητες και ενέργειες που σημειώθηκαν κατά την τροχιά
- μέγιστες διανυόμενες αποστάσεις, με στόχο τον καθορισμό των περιοχών που διατρέχουν κίνδυνο,
- υπό την προϋπόθεση ότι τα προγράμματα είναι καλά βαθμονομημένα, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι πολύ χρήσιμα για να αποκτηθούν ακριβείς

πληροφορίες για τις τιμές σχεδιασμού των προστατευτικών μέτρων και να προσδιορισθούν περιοχές αυξημένης επικινδυνότητας.

Τα υπάρχοντα λογισμικά μπορούν να διακριθούν σε δύο κύριες κατηγορίες [(Hungr & Evans, 1988), (Giani, 1992)] :

- στην αυστηρή μέθοδο,
- στην μέθοδο συγκεντρωμένης μάζας.

Η αυστηρή μέθοδος εξετάζει το τέμαχος σαν σώμα με το δικό του σχήμα και όγκο και υπολογίζει όλους τους τύπους κίνησης, περιλαμβανομένης και της περιστροφής. Σαν παραδείγματα προγραμμάτων από την κατηγορία αυτή είναι: Distinct Element Method [(Cundall, 1971), (Falcetta, 1985)], το τριδιάστατο πρόγραμμα EBOULEMENT [(Descoeudres & Zimmermann, 1987), (Dudt & Heidenreich, 2001)], το Rockfall Analysis [(Sakellariou et al. 2006), (Charalambous & Sakellariou, 2007)] κ.α.

Η μέθοδος συγκεντρωμένης μάζας εξετάζει το τέμαχος είτε σαν να μην έχει μάζα ή να έχει μάζα συγκεντρωμένη σε ένα σημείο. Δεν λαμβάνει υπόψη το σχήμα του ή την περιστροφική κίνηση. Αριθμητικά μοντέλα που βασίζονται σε αυτές τις υποθέσεις είναι το Computer Rockfall Model (Piteau, 1977), το RocFall (Hoek, 1987 και Stevens 1998), το Stone (Guzzetti & al, 2002).

Ορισμένα προγράμματα επωφελούνται από την εύκολη και γρήγορη προσομοίωση για την συγκεντρωμένη μάζα, αλλά θεωρούν και ορισμένα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά της πλαγιάς και του τεμάχους για την προσομοίωση των κρούσεων. Τα λογισμικά αυτά χαρακτηρίζονται ως υβριδικά, π.χ. το SASS (Bozzolo & Pamini, 1986).

Οι αυστηρές και οι υβριδικές μέθοδοι είναι καλύτερες από τη μέθοδο συγκεντρωμένης μάζας καθώς είναι ικανές να αναπαράγουν πιο πιστά τις διαφορετικές φάσεις του φαινομένου της κατάπτωσης.

Τα περισσότερα προγράμματα κάνουν ανάλυση τροχιάς σε δύο διαστάσεις. Ωστόσο σε πλαγιές με πολύπλοκη μορφολογία ένα πρόγραμμα τριών διαστάσεων μπορεί να φανεί πολύ χρήσιμο στον καθορισμό των κύριων τροχιών (Descoeudres & Zimmermann, 1987). Επιπλέον, τα προγράμματα τροχιάς διαφοροποιούνται ανάλογα με την περιγραφή και την ανάλυση του φαινομένου και είναι είτε στατιστικής ή ντετερμινιστικής θεώρησης.

Τα ντετερμινιστικά προγράμματα χρησιμοποιούν είτε μέσες τιμές των δεδομένων εισαγωγής ή την παραδοχή της «δυσμενέστερης περίπτωσης» για τον υπολογισμό της τροχιάς. Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης είναι είτε η μέση ή η δυσμενέστερη περίπτωση τροχιάς με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά (π.χ. ύψος αναπήδησης, αναπτυσσόμενη ενέργεια, διανυόμενη απόσταση). Ωστόσο, οι περισσότερες από τις σημαντικές παραμέτρους (όπως το σχήμα των τεμαχίων, τα μηχανικά χαρακτηριστικά του πρανούς, η τοπική γωνία κλίσης στο σημείο πρόσκρουσης, η περιοχή αποκόλλησης, κλπ.) δείχνουν μια φυσική ποικιλία συμπεριφοράς. Τα προγράμματα που ταξινομούνται ως «στατιστικά» [(Wu, 1985), (Azzoni & al, 1995) ή (Dudt & Heidenreich, 2001)] λαμβάνουν υπόψη αυτές τις διαφοροποιήσεις από την επιλογή τυχαίων τιμών των δεδομένων εισαγωγής εντός καθορισμένου εύρους. Έτσι, όχι μόνο μία, αλλά ένας μεγάλος αριθμός δυνατικών τροχιών προσομοιώνονται, και αξιολογούνται με στατιστική ερμηνεία των χαρακτηριστικών της πορείας (όπως το ύψος της αναπήδησης, ενέργειας, απόσταση που διανύεται).

Για την προσομοίωση της πρόσκρουσης-αναπήδησης του τεμάχους κατά τη διάρκεια της πορείας του, τα περισσότερα λογισμικά αναπαριστούν το φαινόμενο της αναπήδησης με ένα απλοποιημένο τρόπο, χρησιμοποιώντας τους συντελεστές αναπήδησης. Σε ορισμένα λογισμικά προσομοιώνεται και η απώλεια λόγω τριβής μέσω ενός πρόσθετου συντελεστή τριβής.

Ελέγχοντας την απώλεια ενέργειας ή ταχύτητας κατά την κρούση, οι συντελεστές αναπήδησης αποτελούν τις πλέον κρίσιμες παραμέτρους. Έτσι η αξιοπιστία κάθε προσομοίωσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό σε μια διεξοδική βαθμονόμηση του μοντέλου για την υπό μελέτη περιοχή, συμπεριλαμβανομένης της κατάλληλης εκτίμησης των συντελεστών αναπήδησης και της τριβής.

3. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΔΟΚΙΜΗ

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται οι δοκιμές μικρής κλίμακας που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο. Αρχικά παρουσιάζεται η εργαστηριακή διάταξη, εν συνεχεία η διαδικασία εκτέλεσης κάθε δοκιμής και η μέθοδος επεξεργασίας των δεδομένων και εξαγωγής των ζητούμενων αποτελεσμάτων.

Ακολουθεί η παρουσίαση του προγράμματος δοκιμών, όπου περιγράφονται οι διαφορετικές συνθήκες που ελήφθησαν σε κάθε ομάδα δοκιμών, ώστε κατά την σύγκριση τους να είναι εφικτός ο προσδιορισμός των κρίσιμων παραμέτρων του φαινομένου της αναπήδησης βραχώδων τεμαχών, σε λεία διαμορφωμένο βραχώδες επίπεδο.

Οι δοκιμές μικρής κλίμακας στο εργαστήριο είναι απαραίτητο εργαλείο για την έρευνα του φαινομένου των βραχοπτώσεων, αφού εξ αιτίας των ελεγχόμενων συνθηκών είναι δυνατός ο ποσοτικός προσδιορισμός της επίδρασης διαφόρων παραμέτρων που συμμετέχουν στο φαινόμενο της αναπήδησης.

Οι δοκιμές στο εργαστήριο χαρακτηρίζονται από:

- την επαναληψιμότητα λόγω των ελεγχόμενων συνθηκών,
- την δυνατότητα μεταβολής των συνθηκών κρούσης (γωνία πρόσπτωσης, ύψος ρίψης, υλικό, κ.α.),
- την σχετικά ταχεία εκτέλεση έκαστης δοκιμής (περί τα 20 min για την προετοιμασία, εκτέλεση και επεξεργασία).

Οι εργαστηριακές δοκιμές υστερούν έναντι των δοκιμών υπαίθρου επειδή θεωρείται από πολλούς ερευνητές ότι επηρεάζονται από τα φαινόμενα κλίμακας και επειδή προσομοιώνεται με στατικούς όρους ένα δυναμικό φαινόμενο.

Απώτερος στόχος όλων το ερευνητικών εργασιών στο εν λόγω θέμα, οφείλει να είναι η δημιουργία μιας τυποποιημένης εργαστηριακής δοκιμής η οποία να παρέχει στον μελετητή αξιόπιστες τιμές, βάσει κάποιας μεθοδολογίας σχεδιασμού, για την ορθότερη διαστασιολόγηση των μέτρων αναχαίτισης βραχοπτώσεων.

3.1. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε έχει αναπτυχθεί στο εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Βραχομηχανικής του Τομέα Γεωτεχνικής και έχει ήδη χρησιμοποιηθεί σε προηγούμενη έρευνα (Μπεκρή Ε., 2010). Στην παρούσα έρευνα έγιναν σημαντικές βελτιώσεις στην εργαστηριακή διάταξη. Η αναφερθείσα εργασία αποτελεί πρωτότυπη έρευνα για τον ελλαδικό χώρο και αφορούσε πειραματικό προσδιορισμό των παραμέτρων αναπήδησης βραχοτεμαχίων κυρίως σε ασβεστόλιθους. Η πειραματική διάταξη παρουσιάζεται στην εικόνα 3.1.

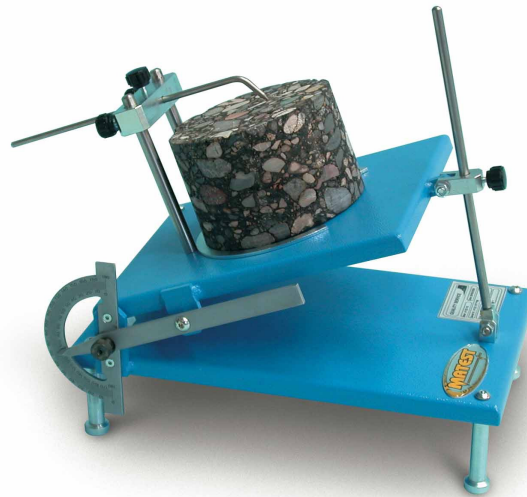


Εικόνα 3.1. Πειραματική διάταξη

3.2. ΟΡΓΑΝΑ ΚΑΙ ΣΥΣΚΕΥΕΣ

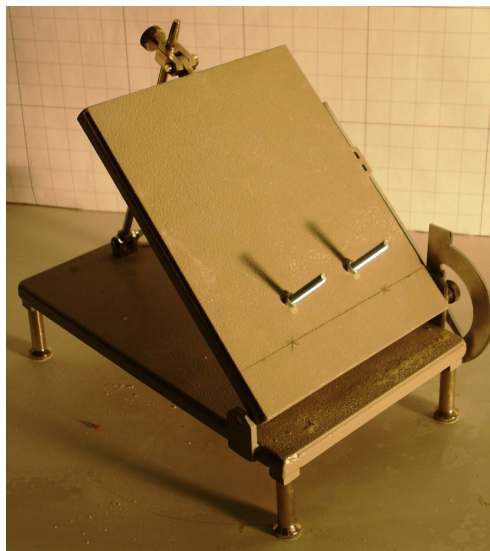
3.2.1. Βάση στήριξης

Η βάση στήριξης στην οποία τοποθετείται η βραχώδης βάση πάνω στην οποία γίνεται η πρόσκρουση του πίπτωντος τμήματος είναι η διάταξη της δοκιμής ολίσθησης επί κεκλιμένου επιπέδου (tilt test) και είναι της εταιρείας Matest (εικόνα 3.2).



Εικόνα 3.2. Διάταξη δοκιμής ολίσθησης επί κεκλιμένου επιπέδου (Tilt test)

Αφαιρώντας από την βάση τον εξοπλισμό για την συγκεκριμένη δοκιμή επιτυγχάνεται η δημιουργία μιας στέρεας βάσης με δυνατότητα μεταβολής της κλίσης του επιπέδου πρόσκρουσης. Η αρχική δυνατότητα της συσκευής ήταν η επίτευξη κλίσης του επιπέδου έως 60° από την οριζόντιο. Με κατάλληλη τροποποίηση επιτεύχθηκε κλίση μεγαλύτερη των 75° (εικόνα 3.3).



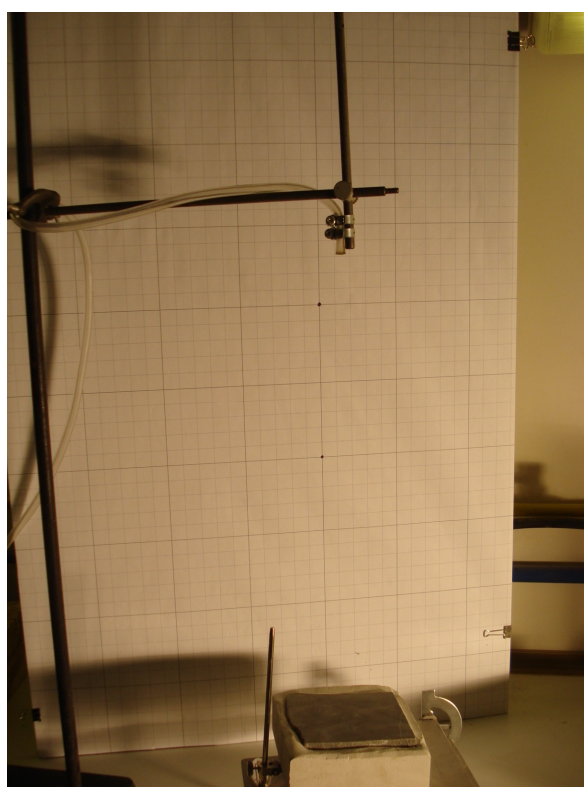
Εικόνα 3.3. Βάση στήριξης του υλικού πρόσκρουσης.

3.2.2. Συσκευή ρίψης βραχοτεμαχίου

3.2.2.1. Δοκιμές ελεύθερης πτώσης

Στην προηγούμενη έρευνα (Μπεκρή Ε., 2010) η ρίψη του τεμαχίου γινόταν με το χέρι από συγκεκριμένο ύψος (44 cm) ώστε η γωνιακή ταχύτητα να είναι μηδενική πριν την πρόσκρουση. Μετά από επανάληψη της συγκεκριμένης διαδικασίας παρατηρήθηκε ότι η ρίψη με το χέρι δεν οδηγεί σε επαναλήψιμα αποτελέσματα δεδομένου ότι ο τρόπος που αφήνεται το τέμαχος ενδέχεται να μην είναι πάντα όμοιος. Συνεπώς κατασκευάστηκε ένα σύστημα, στο οποίο δεν υπεισέρχεται το σφάλμα του ανθρώπινου παράγοντα στην διαδικασία της ρίψης.

Αυτό επιτεύχθηκε προσαρμόζοντας σε ορθοστάτη, ένα ακροφύσιο σε κατακόρυφη θέση συνδεδεμένο με αντλία κενού (Εικόνα 3.4). Έτσι, θέτοντας σε λειτουργία την αντλία κενού, δημιουργείται αναρρόφηση η οποία συγκρατεί το τέμαχος σε σταθερή θέση. Κλείνοντας την αντλία η υποπίεση στο σωλήνα σταδιακά μειώνεται μέχρι την στιγμή όπου το βάρος του τέμαχος την υπερβαίνει όποτε και αποκολλάται από το ακροφύσιο εκτελώντας ελεύθερη πτώση.



Εικόνα 3.4. Διάταξη συστήματος ρίψεως για δοκιμές ελεύθερης πτώσης

3.2.2.2. Δοκιμές με αρχική ταχύτητα

Για την εκτέλεση των δοκιμών με αρχική ταχύτητα προσαρμόστηκε στον ορθοστάτη βραχίονας ο οποίος φέρει στο άκρο του σωλήνα μήκους 20 cm. Στην μια άκρη του εισάγεται το τέμαχος με το χέρι, με αποτέλεσμα να απόκτα αρχική ταχύτητα και περιστροφή κατά τη διαδρομή του μέσα στο σωλήνα, και να εξάγεται από το άλλο άκρο (εικόνα 3.5).

Τόσο το ύψος όσο και η κλίση του βραχίονα, δύνανται να αλλάξουν με ελεγχόμενο τρόπο ώστε και να μεταβάλλονται οι αρχικές συνθήκες του πειράματος.



Εικόνα 3.5. Διάταξη συστήματος ρίψεως για δοκιμές παραβολικής ρίψης

3.2.3. Φωτογραφική μηχανή ταχείας λήψης

Για τον υπολογισμό των συντελεστών αναπήδησης απαιτείται η ακριβής αποτύπωση της εκτελούμενης τροχιάς. Για την καταγραφή της, χρησιμοποιήθηκε κάμερα ταχείας λήψης η οποία έχει την δυνατότητα καταγραφής από 50 έως 500 λήψεις το δευτερόλεπτο (frames per second - fps), με την απαιτούμενη κάθε φορά λεπτομέρεια της καταγραφής.

Η φωτογραφική μηχανή ταχείας λήψεως που χρησιμοποιήθηκε είναι η Trouble-Shooter LE κατασκευασμένη από τον οίκο Fastec Imaging, προορισμένη για ερευνητικές εφαρμογές. Διαθέτει φωτογραφικό φακό 16 mm τύπου C – mount.



Εικόνα 3.6. Φωτογραφική μηχανή ταχείας λήψεως

Όσο το πλήθος των καταγεγραμμένων λήψεων ανά δευτερόλεπτο αυξάνει, μειώνεται η ανάλυση της εικόνας. Συνεπώς πρέπει να επιλεγεί ένας συνδυασμός ταχύτητας καταγραφής – ανάλυσης εικόνας που να ικανοποιεί τις απαιτήσεις του πειράματος.

Μετά από προκαταρκτικές δοκιμές επιλέχθηκε καταγραφή 250 λήψεων ανά δευτερόλεπτο, παρέχοντας τον ακριβή προσδιορισμό της τροχιάς και την απαιτούμενη ανάλυση εικόνας. Η ανάλυση της εικόνας τέθηκε στα 640 x 480 εικονοστοιχεία (pixels), η οποία είναι και η μέγιστη διαθέσιμη της μηχανής, ώστε να επιτευχθεί ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια στον προσδιορισμό των συντεταγμένων της κίνησης. Αυτό είχε σαν μοναδικό μειονέκτημα την δημιουργία μεγάλων αρχείων και άρα μια σχετική καθυστέρηση κατά την αποθήκευση, μεταφορά και επεξεργασία αυτών.

Η κάμερα ταχείας λήψεως τοποθετήθηκε επί σταθερού φωτογραφικού τρίποδα σε συγκεκριμένη απόσταση και κάθετα στο διδιάστατο επίπεδο της κίνησης του τεμάχους, ώστε η καταγραφείσα εικόνα να είναι παράλληλη με την τροχιά του.

3.2.4. Φωτισμός

Με σκοπό την αποφυγή σκιάσεων στην εικόνα, οι οποίες δημιουργούν προβλήματα κατά την αυτόματη αναγνώριση της τροχιάς από το λογισμικό, χρησιμοποιήθηκε ένας προβολέας μεγάλης ισχύος. Εγκαταστάθηκε στο επίπεδο της τροχιάς ώστε να προβάλει την σκιά του τεμάχους εκτός της περιοχής λήψης της κάμερας. Η ισχύς του προβολέα ήταν μεγαλύτερη από όλες τις άλλες πηγές φωτός στον χώρο ώστε να εξαλείφονται οι παραγόμενες από αυτές σκιάσεις.

3.2.5. Συμπληρωματικά όργανα – συσκευές

Συμπληρωματικά χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω:

- Ηλεκτρονικό αποστασιόμετρο-κλισιόμετρο χειρός τύπου Disto D3 της εταιρείας Leica για το προσδιορισμό του ύψους πτώσης (απόκλιση οργάνου ± 0.2 mm) και της κλίσης του επιπέδου πρόσκρουσης (απόκλιση γωνιών $\pm 0.1^\circ$)
- Τραπεζοκόφτης βραχωδών υλικών
- Συσκευή λείανσης βραχωδών δοκιμίων
- Ηλεκτρονικός ζυγός ακριβείας (± 0.01 gr)
- Ογκομετρικοί κύλινδροι για τον προσδιορισμό της πυκνότητας
- Νήμα της στάθμης
- Ηλεκτρονικό παχύμετρο (± 0.01 mm)

3.3 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

3.3.1. Επιφάνεια πρόσκρουσης

Η επιφάνεια πρόσκρουσης είναι διαμορφωμένη από το ίδιο υλικό με το πύπτων τεμάχιο. Η επιφάνεια προήλθε από κοπή βραχωδών τεμαχίων που συλλέχθηκαν από την φυσική τους θέση σε διάφορες τοποθεσίες του ελλαδικού χώρου. Η κοπή έγινε σε εξειδικευμένο εργαστήριο μαρμαρογλυπτικής, καθότι το μέγεθος των τεμαχίων ήταν μεγαλύτερο από αυτό που είναι ικανό να επεξεργαστεί ο υφιστάμενος εργαστηριακός εξοπλισμός του εργαστηρίου Τεχνικής Γεωλογίας και Βραχομηχανικής. Αρχικά κόπηκαν πλάκες πάχους 5 cm ακανόνιστης περιμέτρου με μέγιστη διάσταση 15 cm (εικόνα 3.7).



Εικόνα 3.7. Κοπή τεμαχίων

Στη συνέχεια εγκιβωτίστηκαν σε πρότυπες μήτρες σκυροδέματος με συνδετική κονία γύψου – τσιμέντου ώστε να διαθέτουν τετραγωνική κάτοψη διαστάσεων 15 cm και πάχους περί των 7 cm.



Εικόνα 3.8. Διαμορφωμένες επιφάνειες πρόσκρουσης

Έτσι επιτεύχθηκε άριστη προσαρμογή της πλάκας πρόσκρουσης στην βάση στήριξης, ενώ αυξήθηκε το βάρος της βάσης ώστε να μην υφίσταται θέμα με την ταλάντωση της κατά την στιγμή της κρούσης.

3.3.2. Πίπτων τέμαχος

Το βέλτιστο σχήμα για την μελέτη των βραχοπτώσεων είναι η σφαίρα, αφού οι περισσότερες μαθηματικές σχέσεις που έχουν αναπτυχθεί για την περιγραφή του φαινομένου θεωρούν σφαιρικό τέμαχος. Αυτό συμβαίνει διότι η σφαίρα είναι συμμετρική προς οποιοδήποτε επίπεδο (που διέρχεται από το κέντρο της), και άρα παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα στην διατύπωση των μαθηματικών εξισώσεων.

Διαμόρφωση βραχώδων σφαιρικών δοκιμών στο εργαστήριο είναι πρακτικά αδύνατη. Συνεπώς επιλέχθηκε η διαμόρφωση κυβικών δοκιμών με λειασμένες κορυφές και ακμές, με σκοπό την κατά το δυνατόν καλύτερη προσέγγιση της σφαίρας.

Η διαμόρφωση των δοκιμών έγινε με χρήση του τραπεζοκόφτη και της συσκευής λείανσης βραχώδων δοκιμών. Αποτέλεσε δε, μια ιδιαίτερος επίπονη και χρονοβόρα διαδικασία.



Εικόνα 3.9. Διαδικασία λείανσης τεμαχών

3.4 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

Για την εκτέλεση μιας δοκιμής πρέπει να προσαρμοστεί κατάλληλα η επιφάνεια πρόσκρουσης στην βάση στήριξης και να τεθεί στην επιθυμητή κλίση. Στη συνέχεια, εάν πρόκειται για δοκιμή ελεύθερης πτώσης, τοποθετείται η βάση κεντρικά κάτω από το ακροφύσιο, με τη χρήση του νήματος της στάθμης, και γίνεται η ρύθμιση του ύψους πτώσης.

Στην περίπτωση που πρόκειται για δοκιμή παραβολικής ρίψης, η ακριβής θέση τοποθέτησης της βάσης στήριξης προσδιορίστηκε με κάποιες δοκιμαστικές ρίψεις.

Έπειτα ακολουθεί η ενεργοποίηση της κάμερας ταχείας λήψεως και του προβολέα και η πραγματοποίηση της ρίψης. Ακολουθεί η αποθήκευση του αρχείου σε μορφή .avi και η μεταφορά του σε ηλεκτρονικό υπολογιστή για τις περαιτέρω ενέργειες επεξεργασίας.

3.5 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

3.5.1 Ανάλυση καταγραφείσας τροχιάς

Η κίνηση του τεμάχους επεξεργάστηκε μέσω ενός απλού λογισμικού ανάλυσης εικόνας το MaxTraQ. Κάθε σημείο της εικόνας λαμβάνει συντεταγμένες βάση του εικονοστοιχείου (pixel) στο οποίο βρίσκεται. Με τον ορισμό στην εικόνα ενός δεδομένου μήκους, με την βοήθεια κάμναβου αναφοράς, ορίζονται αυτόματα οι συντεταγμένες (από pixel σε μονάδες μήκους).

Ως pixel (από το **PI**Cture και **EL**ement) ή εικονοστοιχείο νοείται ένα "σημείο" μιας εικόνας που εμφανίζεται στην οθόνη ενός υπολογιστικού συστήματος. Στον υπολογιστή η εικόνα αναπαριστάται υπό τη μορφή "ψηφιδωτού", έτσι ώστε το εικονοστοιχείο να είναι μια ψηφίδα του. Στην οθόνη ενός υπολογιστή οι εικόνες αναπαριστώνται με "υποδιαίρεση" της οθόνης σε ένα διδιάστατο πίνακα με στήλες και γραμμές. Κάθε στοιχείο σε ένα τέτοιο πίνακα είναι ένα εικονοστοιχείο. Ο αριθμός των υποδιαίρεσεων είναι επαρκώς μεγάλος, έτσι ώστε το ανθρώπινο μάτι να μη μπορεί να διακρίνει το ένα εικονοστοιχείο από το άλλο και να βλέπει την εικόνα ενιαία.

Είναι σαφές ότι όσο μεγαλύτερη η ανάλυση της εικόνας, τόσο ακριβέστερος ο προσδιορισμός των συντεταγμένων, καθώς επίσης και ότι βάση της αρχής της αναλογίας, όσο αυξάνει το μήκος καθορισμού της κλίμακας, τόσο μειώνεται το σφάλμα.

Ο χρόνος ορίζεται στο πρόγραμμα βάσει του αριθμού των λήψεων που κάνει η φωτογραφική μηχανή το δευτερόλεπτο. Συγκεκριμένα με την επιλεγμένη ταχύτητα των 250 fps (frames per second) ο χρόνος μεταξύ δυο διαδοχικών λήψεων είναι 0.004 sec.

Το λογισμικό αυτό, αφού του οριστεί ένα σημείο επί ενός αντικείμενου δύναται να ανιχνεύει αυτόματα ή χειροκίνητα την κίνησή του στις διαδοχικές λήψεις. Ως σημείο ορίζεται το κέντρο της περιμέτρου του τεμάχους το οποίο θεωρείται ότι ταυτίζεται με το κέντρο βάρους του. Ο αυτόματος εντοπισμός του σημείου εξαρτάται από την αντίθεση της φωτεινότητας του αντικείμενου με το υπόβαθρο. Σε ορισμένες περιπτώσεις η αυτόματη ανίχνευση αποτυγχάνει και απαιτείται χειροκίνητος εντοπισμός του σημείου.

Επιπλέον το λογισμικό είναι ικανό να υπολογίσει τις ταχύτητες και τις επιταχύνσεις στους άξονες x , y για κάθε λήψη - θέση και να τις παρουσιάσει σε διαγράμματα. Συνεπώς, μετά την ολοκλήρωση της επεξεργασίας με το λογισμικό MaxTraQ λαμβάνεται αρχείο μορφής .xls που εμπεριέχει πινακοποιημένα τα στοιχεία της κίνησης για κάθε σημείο, δηλαδή : ο αριθμός της λήψης, ο χρόνος (t) και οι συντεταγμένες (x , y).

3.5.2. Επεξεργασία τροχιάς

Για την επεξεργασία των στοιχείων της κίνησης (x , y , t) και την εξαγωγή των ζητούμενων μεγεθών η υπολογιστική διαδικασία έγινε με χρήση της εφαρμογής Microsoft Office Excel.

Ανάλογα με το είδος της δοκιμής ο προγραμματισμός της υπολογιστικής διαδικασίας διαφοροποιείται. Παρακάτω επεξηγούνται σε συντομία τα υπολογιστικά βήματα.

3.5.3. Ελεύθερη πτώση σε οριζόντια επιφάνεια

Η εφαρμογή διαχωρίστηκε σε 3 λογιστικά φύλλα Excel, συγκεκριμένα στο φύλλο δεδομένων (data), στο φύλλο υπολογισμών (calculation) και στο φύλλο παρουσίασης (output).

3.5.3.1. Φύλλο δεδομένων

Στο φύλλο δεδομένων εισάγονται τα δεδομένα κίνησης (x , y , t) από το αρχείο που προκύπτει από την επεξεργασία με το πρόγραμμα MaxTraQ.

3.5.3.2. Φύλλο υπολογισμών

1. Αρχικά συμπληρώνονται τα στοιχεία της δοκιμής, όπως αύξων αριθμός, όνομα δοκιμής, ύψος πτώσης, υλικό, βάρος και ακμή τεμάχους.
2. Καθορίζεται το σημείο πρόσκρουσης, και υπολογίζεται η απόκλιση της καταγραφείσας τροχιάς προ της κρούσης από την κατακόρυφο.

Είναι προφανές ότι κατά την διάρκεια που το τεμάχος εκτελεί ελεύθερη πτώση οι συντεταγμένες στον κατακόρυφο άξονα (y) κάθε λήψης θα πρέπει να ταυτίζονται. Η απόκλιση αυτή οφείλεται στην αδυναμία απόλυτης κατακορύφωσης της κάμερας ταχείας λήψης, εξ αιτίας της έλλειψης μηχανισμού κατακορύφωσης.

3. Για την διόρθωση του σφάλματος αυτού, γίνεται στροφή των συντεταγμένων της τροχιάς κατά την προαναφερθείσα γωνία απόκλισης, ενώ για λόγους παρουσίας και ομοιομορφίας γίνεται μεταφορά της τροχιάς ώστε το σημείο πρόσκρουσης να ταυτίζεται με την αρχή του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων.
4. Προσδιορίζεται το μέγιστο ύψος αναπήδησης h_R .
5. Ο υπολογισμός των ταχυτήτων και των επιταχύνσεων για όλη την διάρκεια της κίνησης όπως και οι αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις για κάθε άξονα ξεχωριστά γίνονται αυτόματα.
6. Χρησιμοποιώντας το σημείο πρόσκρουσης, η εφαρμογή υπολογίζει αυτόματα τις ταχύτητες για την κατακόρυφη συνιστώσα της κίνησης πριν και μετά την κρούση, εφαρμόζοντας ευθεία ελαχίστων τετραγώνων για δέκα διαδοχικά σημεία πριν και μετά την κρούση.

Η διαδικασία αυτή κρίθηκε απαραίτητη για την ομαλοποίηση της τροχιάς. Μεταξύ των διαδοχικών λήψεων και εξαιτίας της περιστροφής του τεμάχους το σημείο που αντιστοιχεί στο κέντρο βάρους δεν κινείται επί μίας ομαλής γραμμής αλλά επί μιας “πριονοειδούς” μορφής δημιουργώντας σφάλμα στον υπολογισμό των ταχυτήτων.

3.5.3.3. Φύλλο παρουσίασης

Τέλος, το φύλλο παρουσίασης συμπληρώνεται αυτόματα και παρουσιάζει:

1. Τα στοιχεία της δοκιμής.
2. Το διάγραμμα τροχιάς.
3. Την εικόνα με την τροχιά, όπως προέκυψε από το πρόγραμμα MaxTraQ.
4. Ένα διάγραμμα ταχυτήτων, όπου αποτυπώνονται οι ταχύτητες κατά τον οριζόντιο v_x (μπλε γραμμή) και τον κατακόρυφο v_y (κόκκινη γραμμή) άξονα, καθώς και οι ευθείες ελαχίστων τετραγώνων (μαύρες γραμμές).
5. Ένα διάγραμμα επιταχύνσεων, όπου φαίνονται οι επιταχύνσεις κατά τον οριζόντιο a_x (μπλε γραμμή) και τον κατακόρυφο a_y (κόκκινη γραμμή) άξονα.
6. Τις κατακόρυφες ταχύτητες πριν $v_{y,i}$ και μετά την κρούση $v_{y,r}$, βάσει των οποίων έγινε ο υπολογισμός του συντελεστή αναπήδησης R_v , καθώς και το μέγιστο ύψος αναπήδησης h_R .
7. Τους συντελεστές αναπήδησης όπως προσδιορίστηκαν από τις ταχύτητες R_v και τα ύψη R_H (βλ. σχέσεις 2.2 και 2.3).

3.5.4. Ελεύθερη πτώση σε κεκλιμένο επίπεδο

Ακολουθώντας την ίδια μεθοδολογία, έγινε πάλι διαχωρισμός με το ίδιο σκεπτικό.

3.5.4.1. Φύλλο δεδομένων

Ομοίως, στο φύλλο δεδομένων εισάγονται τα δεδομένα από το αρχείο που προκύπτει από το πρόγραμμα MaxTraQ.

3.5.4.2. Φύλλο υπολογισμών

1. Αρχικά συμπληρώνονται τα στοιχεία της δοκιμής, όπως αύξων αριθμός, όνομα δοκιμής, ύψος πτώσης, υλικό, βάρος και ακμή τεμάχους καθώς και η κλίση του επιπέδου πρόσκρουσης.

2. Καθορίζεται το σημείο πρόσκρουσης, και υπολογίζεται η απόκλιση της καταγραφείσας τροχιάς προ της κρούσης από την κατακόρυφο.
3. Γίνεται στροφή των συντεταγμένων της τροχιάς κατά την προαναφερθείσα γωνία απόκλισης, και μεταφορά της τροχιάς ώστε το σημείο πρόσκρουσης να ταυτίζεται με την αρχή του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων.
4. Ο υπολογισμός των ταχυτήτων και των επιταχύνσεων για όλη την διάρκεια της κίνησης γίνεται αυτόματα και γίνονται οι αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις για κάθε άξονα ξεχωριστά.
5. Γίνεται στροφή των ταχυτήτων και των επιταχύνσεων ως προς το νέο σύστημα συντεταγμένων (n, t όπου ο άξονας n κάθετος είναι στην επιφάνεια πρόσκρουσης, και ο άξονας t παράλληλος στην επιφάνεια, βλ. σχήμα 2.3).
6. Χρησιμοποιώντας το σημείο πρόσκρουσης, η εφαρμογή υπολογίζει αυτόματα τις ταχύτητες στο σύστημα συντεταγμένων n, t πριν και μετά την κρούση εφαρμόζοντας ευθεία ελαχίστων τετραγώνων για δέκα διαδοχικά σημεία πριν και μετά την κρούση.

3.5.4.3. Φύλλο παρουσίασης

Ομοίως, το φύλλο παρουσίασης συμπληρώνεται αυτόματα και παρουσιάζει:

1. Τα στοιχεία της δοκιμής.
2. Το διάγραμμα τροχιάς.
3. Την εικόνα με την τροχιά, όπως προέκυψε από το πρόγραμμα MaxTraQ.
4. Ένα διάγραμμα ταχυτήτων, όπου φαίνονται οι ταχύτητες κατά τον εφαπτομενικό v_t (μπλε γραμμή) και τον κάθετο v_n (κόκκινη γραμμή) άξονα, καθώς και οι αντίστοιχες ευθείες ελαχίστων τετραγώνων (μαύρες γραμμές).
5. Ένα διάγραμμα επιταχύνσεων, όπου φαίνονται οι επιταχύνσεις κατά τον εφαπτομενικό a_t (μπλε γραμμή) και τον κάθετο a_n (κόκκινη γραμμή) άξονα.
6. Οι ταχύτητες πριν και μετά την κρούση βάσει των οποίων έγινε οι υπολογισμοί του εφαπτομενικού και του κάθετου συντελεστή αναπήδησης.
7. Οι συντελεστές αναπήδησης R_n και R_t .

3.5.5. Παραβολική ρίψη

Και στην περίπτωση αυτή ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία, ως ανωτέρω.

3.5.5.1. Φύλλο δεδομένων

Ομοίως, στο φύλλο δεδομένων εισάγονται τα δεδομένα από το αρχείο που προκύπτει από το πρόγραμμα MaxTraQ.

3.5.5.2. Φύλλο υπολογισμών

1. Αρχικά συμπληρώνονται τα στοιχεία της δοκιμής, όπως αύξων αριθμός, όνομα δοκιμής, ύψος πτώσης, υλικό, βάρος και ακμή τεμάχους καθώς και η κλίση του επιπέδου.
2. Καθορίζεται το σημείο πρόσκρουσης.
3. Γίνεται μεταφορά της τροχιάς ώστε το σημείο πρόσκρουσης να ταυτίζεται με την αρχή του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων.
4. Υπολογίζονται αυτόματα οι ταχύτητες για όλη την διάρκεια της κίνησης.
5. Γίνεται στροφή των ταχυτήτων ως προς το σύστημα συντεταγμένων n, t , βάσει των οποίων πραγματοποιείται ο υπολογισμός των επιταχύνσεων, και στη συνέχεια γίνονται οι αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις για κάθε άξονα ξεχωριστά.
6. Χρησιμοποιώντας το σημείο πρόσκρουσης, η εφαρμογή υπολογίζει αυτόματα τις ταχύτητες (στο σύστημα συντεταγμένων n, t) πριν και μετά την κρούση, εφαρμόζοντας ευθεία ελαχίστων τετραγώνων για δεκαέξι διαδοχικά σημεία πριν και μετά την κρούση.

Επισημαίνεται ότι δεν είναι δυνατή η διόρθωση για τυχούσα απόκλιση της φωτογραφικής μηχανής από την κατακόρυφο, καθότι η τροχιά δεν έχει κάποιο κατακόρυφο τμήμα.

Όμως, βάσει των πειραμάτων ελεύθερης πτώσης η μέγιστη απόκλιση που παρατηρήθηκε ήταν μικρότερη από 1.5° ενώ η μέση ήταν περίπου 0.5° , συνεπώς θεωρείται ότι το υπεισερχόμενο σφάλμα είναι πρακτικώς αμελητέο.

3.5.5.3. Φύλλο παρουσίασης

Ομοίως, το φύλλο παρουσίασης συμπληρώνεται αυτόματα και παρουσιάζει:

1. Τα στοιχεία της δοκιμής.
2. Το διάγραμμα τροχιάς.
3. Την εικόνα με την τροχιά, όπως προέκυψε από το πρόγραμμα MaxTraQ.
4. Ένα διάγραμμα ταχυτήτων, όπου φαίνονται οι ταχύτητες κατά τον εφαπτομενικό v_t (μπλε γραμμή) και τον κάθετο v_n (κόκκινη γραμμή) άξονα, καθώς και οι αντίστοιχες ευθείες ελαχίστων τετραγώνων (μαύρες γραμμές).
5. Ένα διάγραμμα επιταχύνσεων, όπου φαίνονται οι επιταχύνσεις κατά τον εφαπτομενικό a_t (μπλε γραμμή) και τον κάθετο a_n (κόκκινη γραμμή) άξονα.
6. Οι ταχύτητες πριν και μετά την κρούση βάσει των οποίων έγινε οι υπολογισμοί του εφαπτομενικού και του κάθετου συντελεστή αναπήδησης, καθώς και η γωνία πρόσπτωσης.
7. Οι συντελεστές αναπήδησης R_n και R_t .

3.6. ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΔΟΚΙΜΩΝ

Μετά από βιβλιογραφική ανασκόπηση ερευνητικών εργασιών σχετικά με τις βραχοπτώσεις, και τις δυνατότητες εκτέλεσης δοκιμών, όπως προέκυψαν από την αναπτυχθείσα εργαστηριακή διάταξη καταρτίστηκε το πρόγραμμα δοκιμών ώστε:

1. Να προσδιοριστεί η επίδραση της μάζας στον κατακόρυφο συντελεστή αναπήδησης (χρησιμοποιώντας 3 διαφορετικές μάζες ομοίου σχήματος, του ίδιου υλικού, που εκτελούν ελεύθερη πτώση από το ίδιο ύψος).
2. Να προσδιοριστεί η επίδραση της ταχύτητας προσκρούσης στον κατακόρυφο συντελεστή αναπήδησης (μεταβάλλοντας το ύψος πτώσης 3 φορές σε ίδιο τέμαχος, που εκτελεί ελεύθερη πτώση πάνω σε οριζόντιο επίπεδο).
3. Να προσδιοριστεί η επίδραση της γωνίας κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης (ή της γωνίας πρόσπτωσης), στον κάθετο και στον εφαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης (χρησιμοποιώντας όμοιο τέμαχος το οποίο εκτελεί ελεύθερη πτώση από σταθερό ύψος, σε επιφάνεια πρόσκρουσης μεταβαλλόμενης κλίσης).

4. Να αξιολογηθεί η επίδραση της αρχικής περιστροφής του τεμάχους, καθώς και της γωνίας πρόσπτωσης εκτελώντας δοκιμές παραβολικής ρίψης σε οριζόντιες και κεκλιμένες επιφάνειες.
5. Να προσδιοριστούν οι συντελεστές αναπήδησης (κατακόρυφος, κάθετος και εφαπτομενικός) γεωυλικών που απαντώνται συχνά στον ελλαδικό χώρο.
6. Να συσχετισθούν οι συντελεστές αναπήδησης με τις φυσικές ιδιότητες των γεωυλικών, όπως η σκληρότητα και η πυκνότητα.

Για όλες τις δοκιμές μελετήθηκε το μάρμαρο Πεντέλης, ενώ για τις δύο τελευταίες μελετήθηκαν επί πλέον ο ασβεστόλιθος, η μάργα, ο σχιστόλιθος και ο χαλαζιακός ψαμμίτης.

Εξ αιτίας της μεγάλης διασποράς των αποτελεσμάτων, η οποία έχει παρατηρηθεί σε όλες τις ερευνητικές εργασίες έως τώρα, για κάθε είδος πειραματικής δοκιμής εκτελέστηκαν αρκετές επαναλήψεις ώστε να είναι δυνατή η εξαγωγή στατιστικά αξιόπιστων τιμών.

Το σύνολο των δοκιμών εκτελέστηκε σε συνεργασία με τον συνάδελφο Ευθυμίου Βίκτωρ. Στα πλαίσια της παρούσης διπλωματικής εργασίας παρουσιάζονται, στο επόμενο κεφάλαιο, τα αποτελέσματα των τεσσάρων πρώτων ενοτήτων, δηλαδή της επίδρασης των κινηματικών παραμέτρων στην εκτελούμενη τροχιά.

4. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών που εκτελέστηκαν για την αξιολόγηση της επίδρασης των κινηματικών και γεωμετρικών παραμέτρων των βραχοτεμαχίων.

Οι δοκιμές εκτελέστηκαν με μάρμαρο Πεντέλης, μοναδιαίου βάρους $\rho = 26.5 \text{ KN/m}^3$ και σκληρότητα σφύρας Schmidt ίση με 44.

Εξετάσθηκε αρχικά η επίδραση της μάζας (και κατά συνέπεια του μεγέθους) του τεμάχους στον συνολικό συντελεστή αναπήδησης. Εκτελέστηκαν τρεις σειρές δοκιμών με ίδιες συνθήκες (ύψος πτώσης, οριζόντιο επίπεδο πρόσκρουσης, μορφή τεμάχους) αλλά με διαφορετικές μάζες.

Στην συνέχεια, εξετάστηκε η επίδραση της ταχύτητας πρόσκρουσης στον συνολικό συντελεστή αναπήδησης, εκτελώντας δυο πρόσθετες σειρές δοκιμών με διαφορετικό ύψος ρίψης. Οι λοιπές συνθήκες, όπως το οριζόντιο επίπεδο πρόσκρουσης, η μάζα και η μορφή του τεμάχους ήταν ίδιες.

Συνδυάζοντας τις παραπάνω σειρές δοκιμών, αξιολογήθηκε η επίδραση της κινητικής ενέργειας.

Ακολούθως, εξετάστηκε η επίδραση της κλίσης της επιφάνειας πρόσπτωσης στον κάθετο και εφαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης. Όλες οι συνθήκες διατηρηθήκαν σταθερές μεταβάλλοντας μόνο την κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης σε τέσσερις χαρακτηριστικές γωνίες.

Τέλος, μελετήθηκε η επίδραση της γωνίας πρόσπτωσης στους συντελεστές αναπήδησης για ρίψεις με αρχική γωνιακή ταχύτητα. Εκτελέστηκαν 8 σειρές δοκιμών για ρίψεις υπό γωνία 20° και 40° σε τέσσερα επίπεδα διαφορετικής κλίσης επιφάνειας πρόσκρουσης.

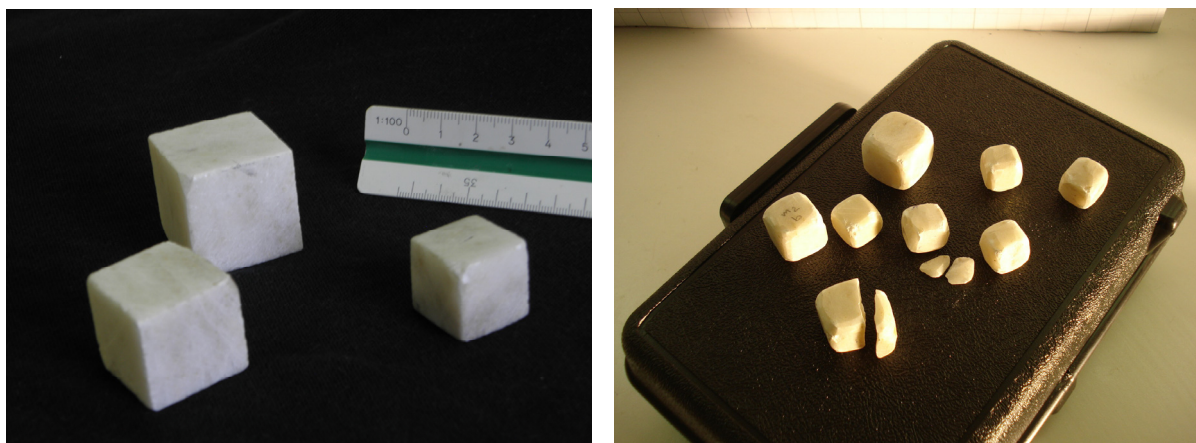
Στον πίνακα 4.1 φαίνονται συγκεντρωτικά οι δοκιμές που εκτελέστηκαν, στα πλαίσια διερεύνησης των παραπάνω.

Πίνακας 4.1. Διάρθρωση δοκιμών για την αξιολογής της επίδρασης των κινηματικών χαρακτηριστικών.

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΩΝ					
σκοπός	τύπος	σειρά	πλήθος	συνθήκες	προσδιορισμός
Επίδραση μάζας	A	1	11	μεταβλητή μάζα τεμάχους ~(20, 40, 80 gr)	R_v, R_H
	A	2, 3	14		
	A	4	12		
Επίδραση ταχύτητας πρόσκρουσης	A	1	11	μεταβλητό ύψος ρίψης (60, 80 και 120 cm)	R_v, R_H
	A	5	12		
	A	6	13		
Επίδραση κλίσης επιπέδου πρόσκρουσης	B	7	13	μεταβλητή κλίση επιπέδου πρόσκρουσης (15, 30, 45 και 60°)	R_n, R_t
	B	8	16		
	B	9	17		
	B	10	13		
Επίδραση γωνίας πρόσπτωσης	Γ	11	5	ρίψη υπό γωνία 20° σε μεταβλητή κλίση επιπέδου πρόσκρουσης (0, 15, 30, 45°)	β, R_n, R_t
	Γ	12	5		
	Γ	13	5		
	Γ	14	5		
	Γ	15	5	ρίψη υπό γωνία 40° σε μεταβλητή κλίση επιπέδου πρόσκρουσης (0, 15, 30, 45°)	
	Γ	16	5		
	Γ	17	5		
Γ	18	5			
όπου για τον τύπο δοκιμής:					
A: Ελεύθερη πτώση σε οριζόντιο επίπεδο					
B: Ελεύθερη πτώση σε κεκλιμένο επίπεδο					
Γ: Παραβολική ρίψη					

4.1. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΜΑΖΑΣ

Στην εικόνα 4.1 φαίνονται τα τεμάχια που χρησιμοποιήθηκαν για τις εν λόγω σειρές δοκιμών. Τα χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται στον πίνακα 4.2 (υπενθυμίζεται ότι τα τεμάχια είναι κυβικά με λειασμένες ακμές).



Εικόνα 4.1. Τεμάχια μαρμάρου Πεντέλης, πριν και μετά την διαμόρφωση.

Πίνακας 4.2. Γεωμετρικά στοιχεία τεμαχίων μαρμάρου

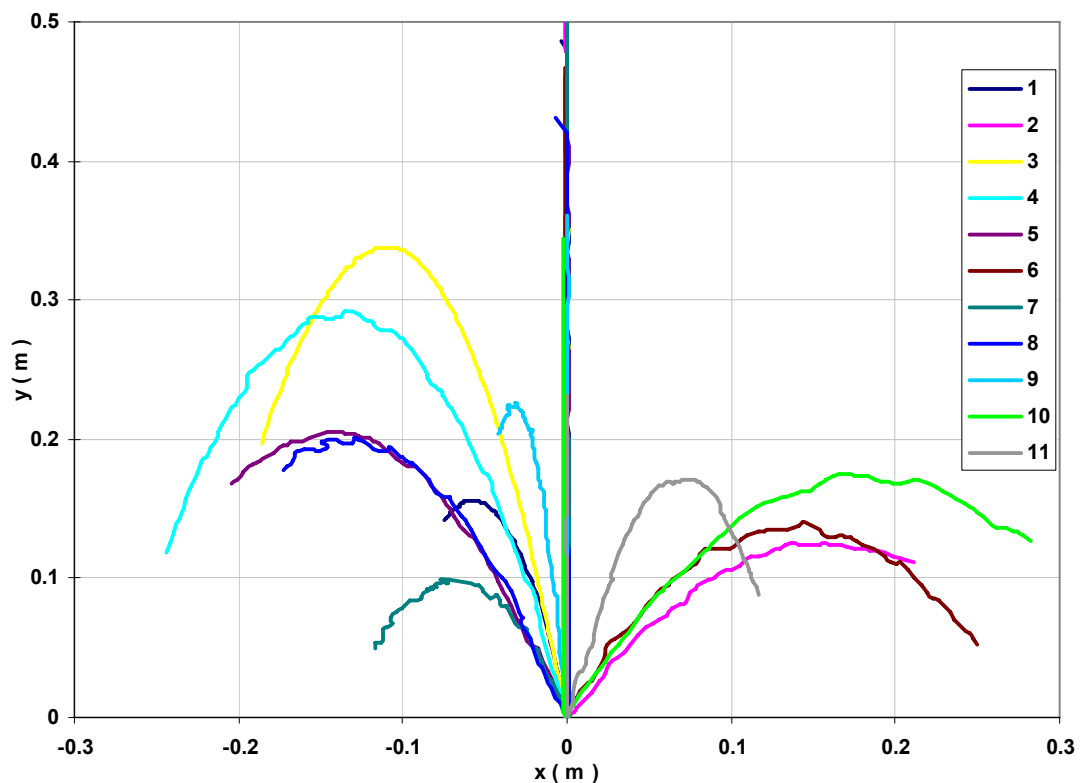
α/α	a	b1	b2	c
Ακμή (cm)	2.06	2.66	2.53	3.07
Βάρος (gr)	19.87	45.04	39.74	70.30

Κατά την διάρκεια των πειραμάτων, και συγκεκριμένα κατά την δεύτερη σειρά δοκιμών, το τέμαχος b1 θραύστηκε και για αυτό το λόγο διαμορφώθηκε νέο.

Εκτελέστηκαν 37 δοκιμές, τα αναλυτικά φύλλα των οποίων βρίσκονται στα παραρτήματα A-1 έως A-4 για τις μάζες a, b, b2 και c αντίστοιχα. Συγκεντρωτικά, τα αποτελέσματα φαίνονται στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 4.3. Αποτελέσματα σειράς δοκιμών μάζας a

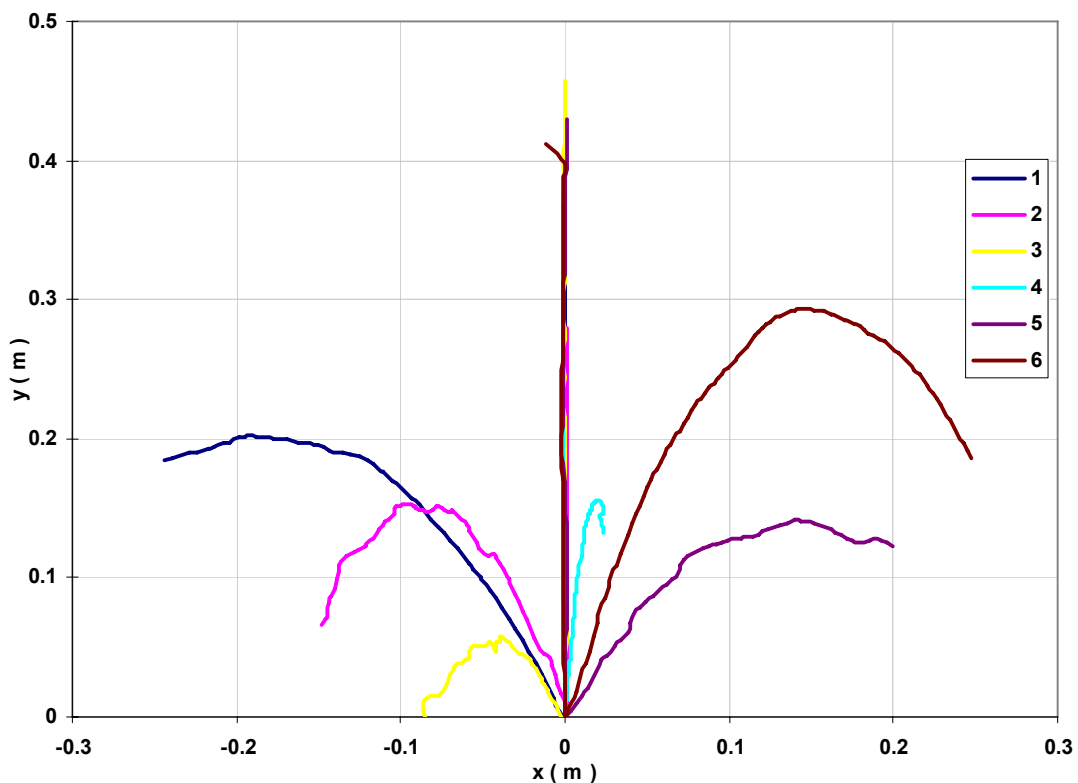
κωδικός	α/α	$v_{y,i}$	$v_{y,r}$	R_v	H_D	H_R	R_H	
		m/s	m/s	-	cm	cm	-	
m_ma_80_0_	1	1	-3.99	1.68	0.421	80.9	15.6	0.440
	2	2	-4.15	1.64	0.395	80.9	12.5	0.393
	3	3	-4.13	2.58	0.625	80.9	33.8	0.646
	4	4	-4.15	2.42	0.583	80.9	29.2	0.601
	5	5	-4.14	1.96	0.473	80.9	20.6	0.504
	6	6	-4.19	1.53	0.366	80.9	14.1	0.417
	7	7	-4.14	1.48	0.358	80.9	10.0	0.351
	8	8	-4.17	1.84	0.441	80.9	20.1	0.498
	9	9	-4.10	2.21	0.539	80.9	22.6	0.529
	10	10	-4.14	1.78	0.430	80.9	17.5	0.465
	11	11	-4.13	1.75	0.423	80.9	17.1	0.460
Μέση τιμή					0.459			0.482
Τυπική απόκλιση					0.087			0.087
Ελάχιστη τιμή					0.358			0.351
Μέγιστη τιμή					0.625			0.646



Διάγραμμα 4.1. Γραφική απεικόνιση τροχιών σειράς δοκιμών μάζας a

Πίνακας 4.4. Αποτελέσματα σειράς δοκιμών μάζας b1

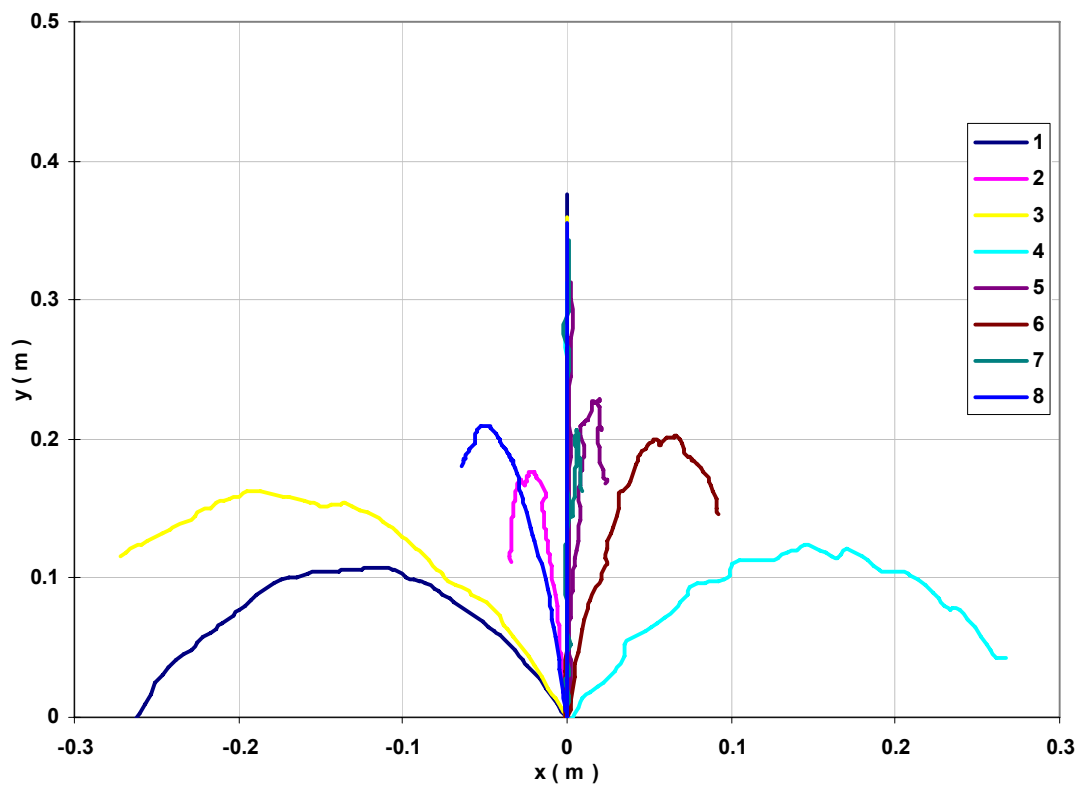
κωδικός	α/α	$v_{y,i}$	$v_{y,r}$	R_v	H_D	H_R	R_H	
		m/s	m/s	-	cm	cm	-	
m_mb_80_0_	1	12	-4.06	2.12	0.521	80.9	20.2	0.500
	2	13	-4.11	1.57	0.381	80.9	15.3	0.434
	3	14	-4.14	1.02	0.246	80.9	5.8	0.267
	4	15	-4.14	1.57	0.380	80.9	15.6	0.439
	5	16	-4.04	1.77	0.438	80.9	14.2	0.419
	6	17	-4.14	2.54	0.614	80.9	29.3	0.602
	7	<i>ΘΡΑΥΣΗ</i>						
Μέση τιμή					0.430			0.443
Τυπική απόκλιση					0.127			0.110
Ελάχιστη τιμή					0.246			0.267
Μέγιστη τιμή					0.614			0.602



Διάγραμμα 4.2. Γραφική απεικόνιση τροχιών σειράς δοκιμών μάζας b1

Πίνακας 4.5. Αποτελέσματα σειράς δοκιμών μάζας b2

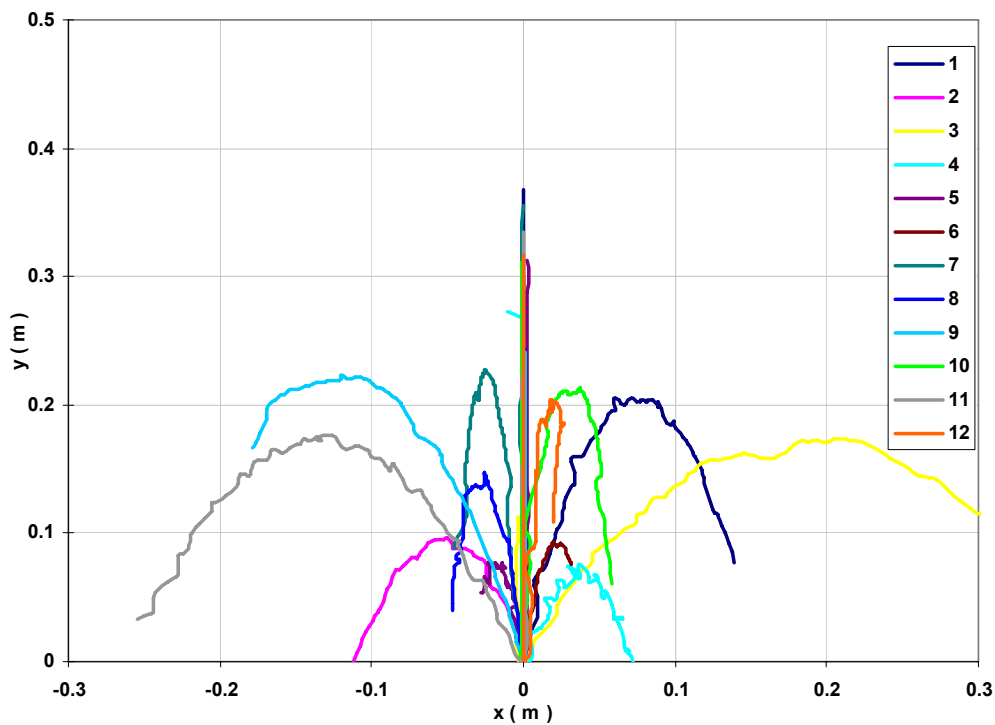
κωδικός	α/α	$v_{y,i}$	$v_{y,r}$	R_v	H_D	H_R	R_H	
		m/s	m/s	-	cm	cm	-	
m_mb2_80_0_	1	18	-4.13	1.58	0.382	80.9	10.7	0.365
	2	19	-4.09	1.72	0.421	80.9	17.6	0.466
	3	20	-4.09	2.04	0.499	80.9	16.2	0.448
	4	21	-4.20	1.65	0.392	80.9	12.4	0.391
	5	22	-4.13	2.15	0.521	80.9	22.8	0.531
	6	23	-4.06	2.08	0.511	80.9	20.3	0.500
	7	24	-4.12	2.07	0.502	80.9	20.7	0.506
	8	25	-4.05	2.11	0.520	80.9	21.0	0.509
Μέση τιμή					0.468			0.465
Τυπική απόκλιση					0.060			0.060
Ελάχιστη τιμή					0.382			0.365
Μέγιστη τιμή					0.521			0.531



Διάγραμμα 4.3. Γραφική απεικόνιση τροχιών σειράς δοκιμών μάζας b2

Πίνακας 4.6. Αποτελέσματα σειράς δοκιμών μάζας c

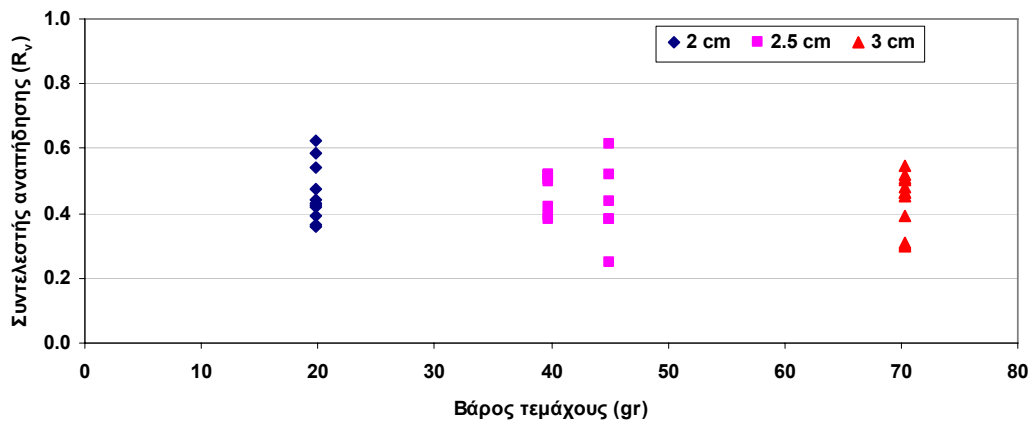
κωδικός	α/α	v _{y,i} m/s	v _{y,r} m/s	R _v	H _D	H _R	R _H	
				-	cm	cm	-	
m_mc_80_0_	1	26	-4.10	2.12	0.518	80.9	20.5	0.504
	2	27	-4.16	1.63	0.392	80.9	9.6	0.344
	3	28	-4.12	1.92	0.466	80.9	17.3	0.463
	4	29	-4.14	1.24	0.300	80.9	7.5	0.305
	5	30	-4.14	1.26	0.303	80.9	7.8	0.311
	6	31	-4.21	1.30	0.308	80.9	9.2	0.337
	7	32	-4.26	2.16	0.508	80.9	22.7	0.530
	8	33	-4.14	1.87	0.450	80.9	14.7	0.426
	9	34	-3.86	1.85	0.479	80.9	22.3	0.525
	10	35	-4.12	2.06	0.501	80.9	21.1	0.511
	11	36	-4.16	1.92	0.462	80.9	17.7	0.467
	12	37	-4.12	2.25	0.546	80.9	20.4	0.502
Μέση τιμή					0.436			0.435
Τυπική απόκλιση					0.089			0.087
Ελάχιστη τιμή					0.300			0.305
Μέγιστη τιμή					0.546			0.530



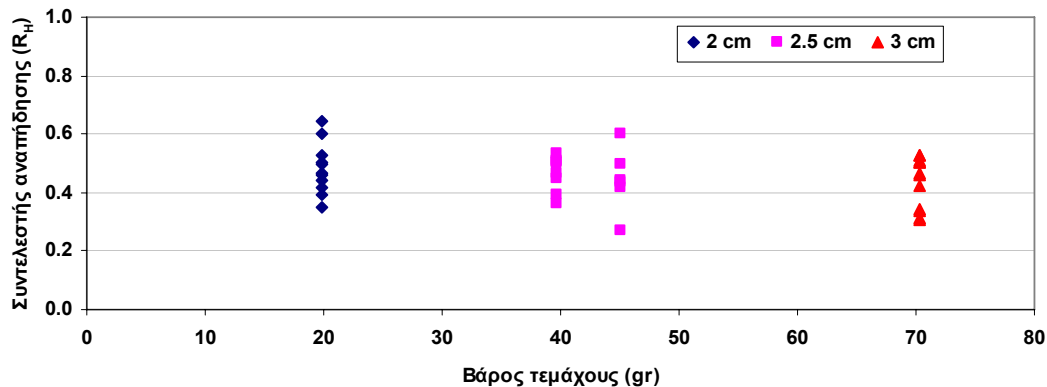
Διάγραμμα 4.4. Γραφική απεικόνιση τροχιών σειράς δοκιμών μάζας c

Παρατηρείται αρχικά, ότι ο συνολικός συντελεστής αναπήδησης, όπως υπολογίζεται από το λόγο των κατακόρυφων ταχυτήτων, R_v (σχέση 2.2) πρακτικά ταυτίζεται με αυτόν που υπολογίζεται από την σχέση των υψών R_H (σχέση 2.3). Έτσι χρησιμοποιώντας διαφορετικά χαρακτηριστικά της τροχιάς επαληθεύεται τόσο η ορθότητα των σχέσεων όσο και η ορθότητα των υπολογισμών.

Οι τιμές των συντελεστών παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στα διαγράμματα 4.5 και 4.6.



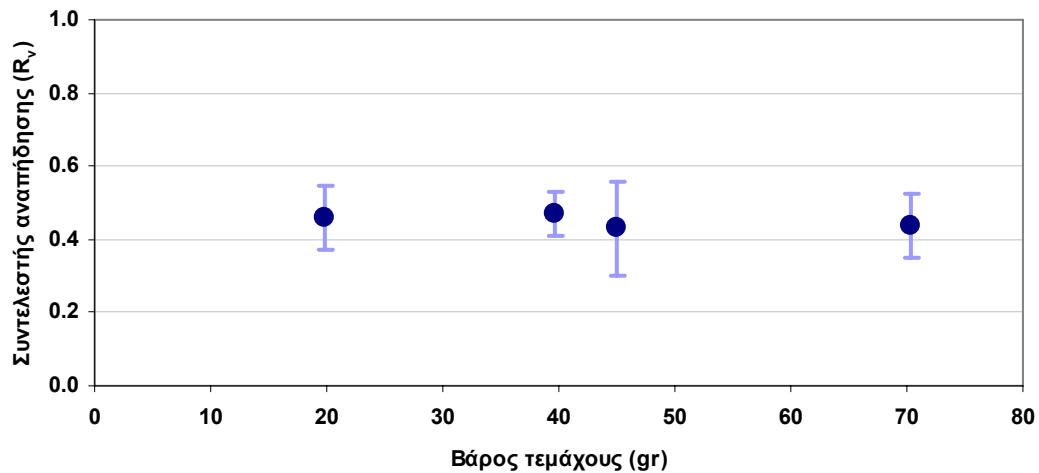
Διάγραμμα 4.5. Συνολικός συντελεστής αναπήδησης (λόγω ταχυτήτων πριν και μετά την κρούση) συναρτήσει του βάρους του τεμάχου



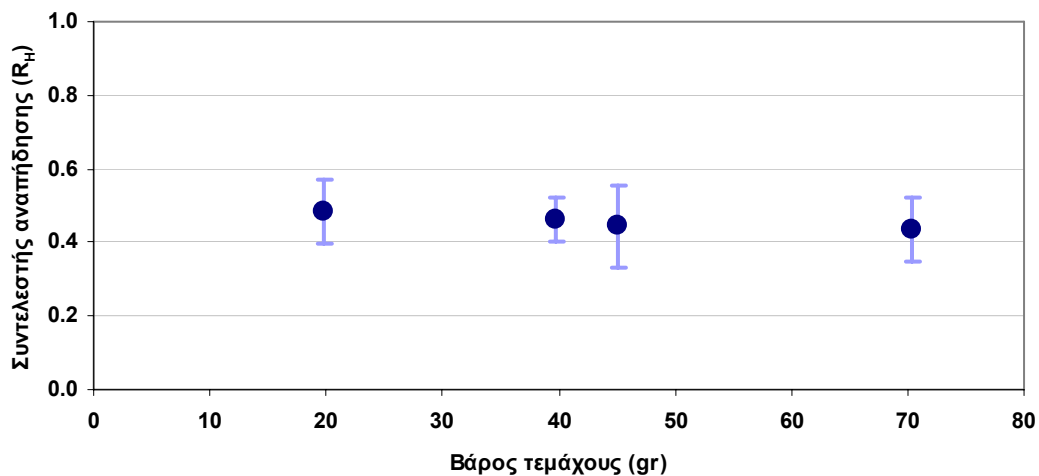
Διάγραμμα 4.6. Συνολικός συντελεστής αναπήδησης (λόγω ύψους πτώσης και ύψους αναπήδησης) συναρτήσει του βάρους του τεμάχου

Η διασπορά των τιμών φαίνεται σημαντική, δεδομένου ότι για κάθε σειρά δοκιμών οι συνθήκες ήταν αμετάβλητες. Όμως, είναι αντίστοιχη με τη διασπορά που συναντάται συνήθως στην βιβλιογραφία.

Στα ακόλουθα διαγράμματα 4.7 και 4.8 παρουσιάζονται η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση του συντελεστή αναπήδησης, όπως προέκυψε από κάθε σειρά δοκιμών (για τις δύο θεωρήσεις υπολογισμού).



Διάγραμμα 4.7. Μέσος όρος και τυπική απόκλιση συντελεστή αναπήδησης (λόγω ταχυτήτων) συναρτήσει του βάρους του τεμάχους



Διάγραμμα 4.8. Μέσος όρος και τυπική απόκλιση συντελεστή αναπήδησης (λόγω υψών) συναρτήσει του βάρους του τεμάχους

Από παρατήρηση των τιμών, φαίνεται ότι δεν προκύπτει κάποια επίδραση της μάζας στον συνολικό συντελεστή αναπήδησης για τα μεγέθη τεμαχίων που εξετάστηκαν.

4.2. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ

Για τη διερεύνηση της επίδρασης της ταχύτητας πρόσκρουσης στο συνολικό συντελεστή αναπήδησης, χρησιμοποιήθηκε το τεμάχος *a* (ακμής 2 cm).

Εκτελέσθηκαν δύο πρόσθετες σειρές δοκιμών με διαφορετικό αρχικό ύψος πτώσης (60 και 120 cm) με συνέπεια την διαφορετική ταχύτητα πρόσκρουσης. Έτσι σε συνδυασμό με την σειρά δοκιμών *m_ma_80_0_* (ύψος πτώσης 80 cm) που παρουσιάζεται στην προηγούμενη ενότητα στον πίνακα 4.3, διατίθενται για αξιολόγηση τρεις σειρές δοκιμών με όμοια λοιπά χαρακτηριστικά.

Λόγω φθοράς του τεμάχους που χρησιμοποιήθηκε στην προαναφερθείσα σειρά δοκιμών, διαμορφώθηκαν δύο νέα τεμάχη με τα χαρακτηριστικά τους να παρουσιάζονται στον πίνακα 4.7.

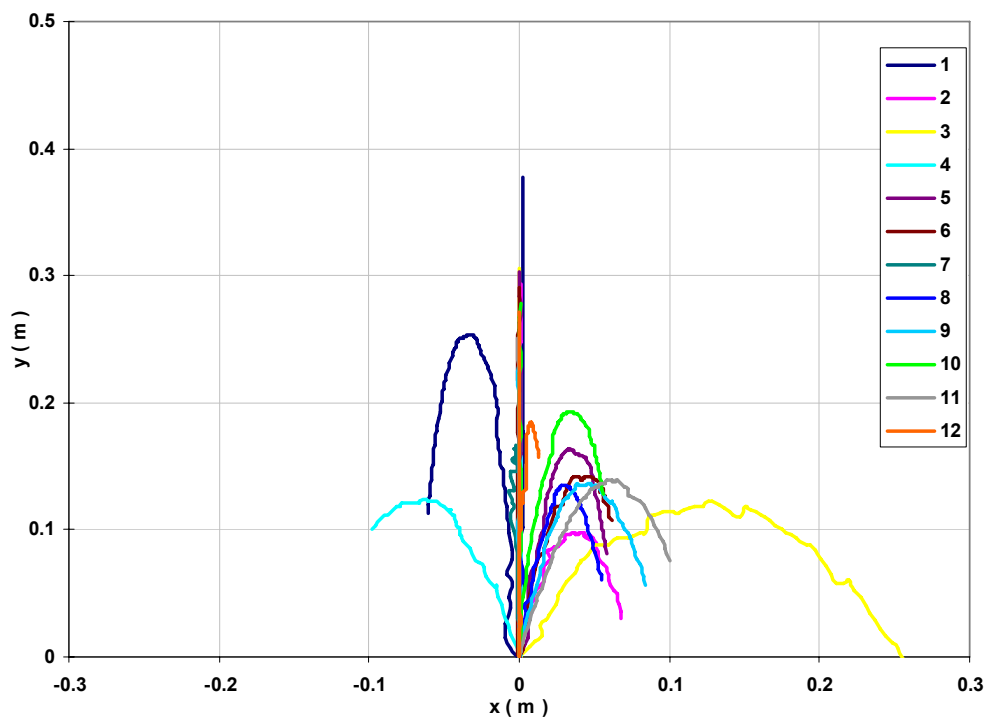
Πίνακας 4.7. Γεωμετρικά στοιχεία τεμαχών τύπου *a*

α/α	a	a2	a3
Ακμή (cm)	2.06	2.13	2.11
Βάρος (gr)	19.87	20.59	20.49

Εκτελέσθηκαν 25 δοκιμές, τα αναλυτικά φύλλα των οποίων βρίσκονται στα παράρτηματα A-5 και A-6 για τα ύψη ρίψης 60 cm και 120 cm αντίστοιχα. Συγκεντρωτικά, τα αποτελέσματα φαίνονται στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 4.8. Αποτελέσματα σειράς δοκιμών από ύψος πτώσης 60 cm

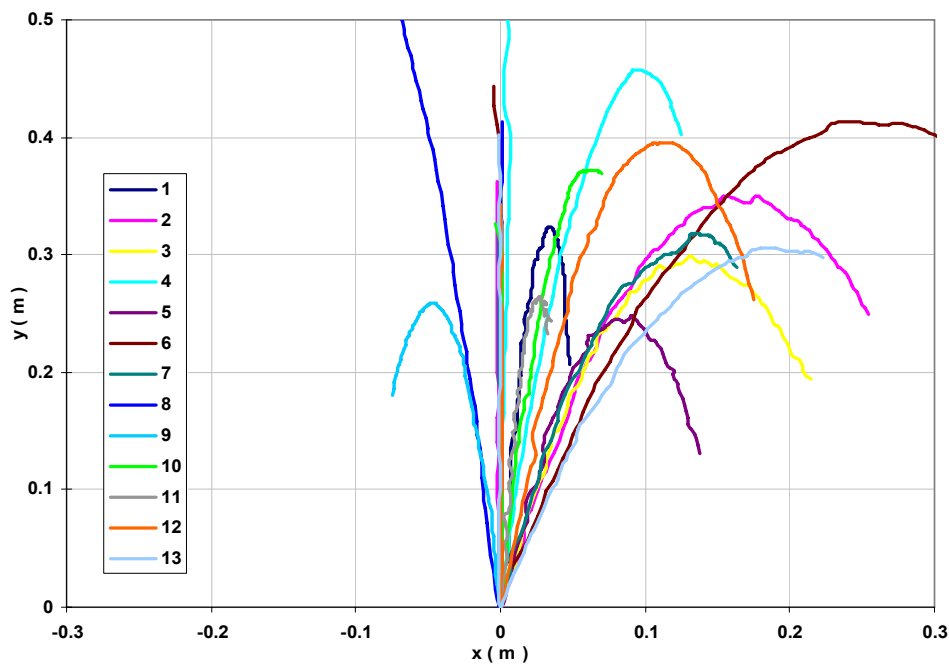
κωδικός	α/α	$v_{y,i}$	$v_{y,r}$	R_v	H_D	H_R	R_H	
		m/s	m/s	-	cm	cm	-	
m_ma2_60_0_	1	38	-3.82	2.45	0.642	61	25.3	0.644
	2	39	-3.24	1.37	0.424	61	9.8	0.401
	3	40	-3.40	1.41	0.414	61	12.2	0.447
	4	41	-3.56	1.54	0.432	61	12.4	0.450
	5	42	-3.48	1.74	0.499	61	16.4	0.518
	6	43	-3.59	1.69	0.469	61	14.2	0.483
	7	44	-3.58	1.79	0.500	61	16.6	0.522
	8	45	-3.45	1.61	0.468	61	13.5	0.470
	9	46	-3.47	1.59	0.458	61	13.6	0.472
	10	47	-3.58	2.17	0.606	61	19.3	0.562
	11	48	-3.57	1.58	0.443	61	13.9	0.478
	12	49	-3.42	1.88	0.550	61	18.5	0.550
Μέση τιμή				0.492			0.500	
Τυπική απόκλιση				0.072			0.064	
Ελάχιστη τιμή				0.414			0.401	
Μέγιστη τιμή				0.642			0.644	



Διάγραμμα 4.9. Γραφική απεικόνιση τροχιών
σειράς δοκιμών από ύψος πτώσης 60 cm

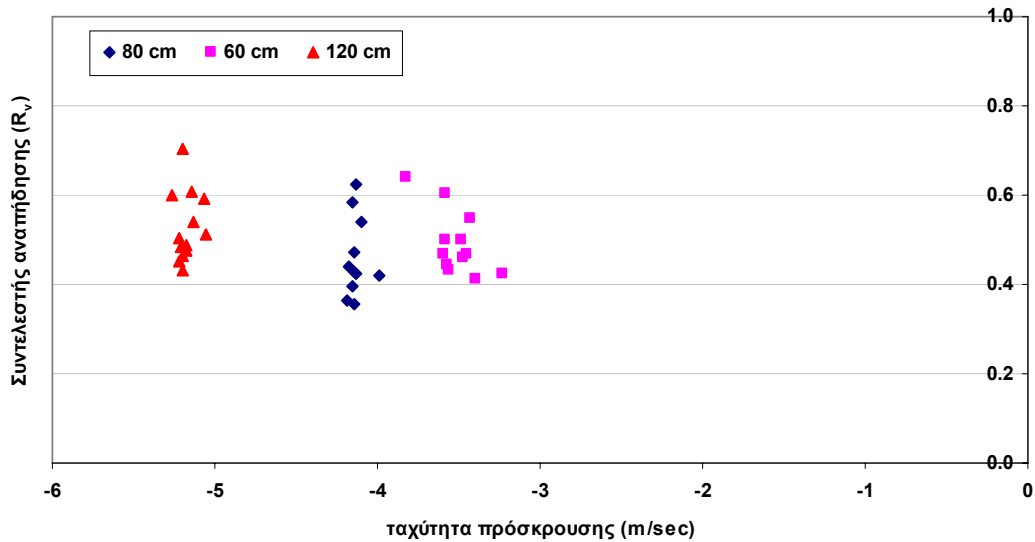
Πίνακας 4.9. Αποτελέσματα σειράς δοκιμών από ύψος πτώσης 120 cm

κωδικός	α/α	$v_{y,i}$	$v_{y,r}$	R_v	H_D	H_R	R_H	
		m/s	m/s	-	cm	cm	-	
m_ma3_120_0_	1	50	-5.05	2.59	0.512	120.1	32.3	0.519
	2	51	-5.22	2.64	0.505	120.1	34.9	0.539
	3	52	-5.20	2.53	0.486	120.1	29.5	0.496
	4	53	-5.26	3.17	0.602	120.1	45.8	0.617
	5	54	-5.22	2.36	0.453	120.1	24.8	0.454
	6	55	-5.15	3.14	0.609	120.1	41.3	0.587
	7	56	-5.18	2.53	0.489	120.1	31.8	0.514
	8	57	-5.19	3.65	0.702	120.1	62.5	0.721
	9	58	-5.20	2.25	0.434	120.1	25.9	0.464
	10	59	-5.06	2.99	0.590	120.1	37.2	0.556
	11	60	-5.19	2.41	0.463	120.1	26.5	0.470
	12	61	-5.13	2.78	0.541	120.1	39.6	0.574
	13	62	-5.18	2.46	0.475	120.1	30.6	0.505
Μέση τιμή				0.528			0.540	
Τυπική απόκλιση				0.077			0.073	
Ελάχιστη τιμή				0.434			0.454	
Μέγιστη τιμή				0.702			0.721	

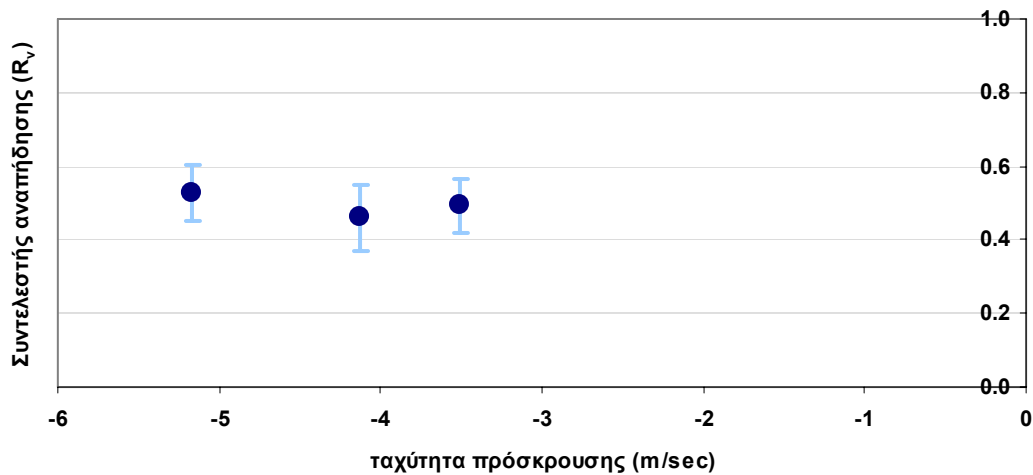


Διάγραμμα 4.10. Γραφική απεικόνιση τροχιών
σειράς δοκιμών από ύψος πτώσης 120 cm

Στο διάγραμμα 4.11 παρουσιάζεται ο συνολικός συντελεστής αναπήδησης R_v , συναρτήσει της ταχύτητας πρόσκρουσης. Επίσης, στο διάγραμμα 4.12 φαίνονται για κάθε σειρά δοκιμών ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση των τιμών.



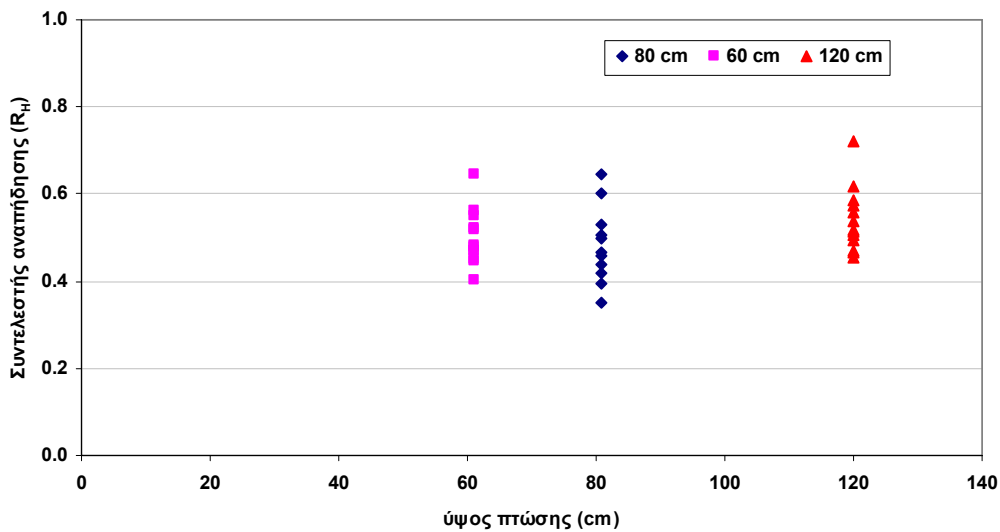
Διάγραμμα 4.11. Συνολικός συντελεστής αναπήδησης R_v συναρτήσει της ταχύτητας πρόσκρουσης



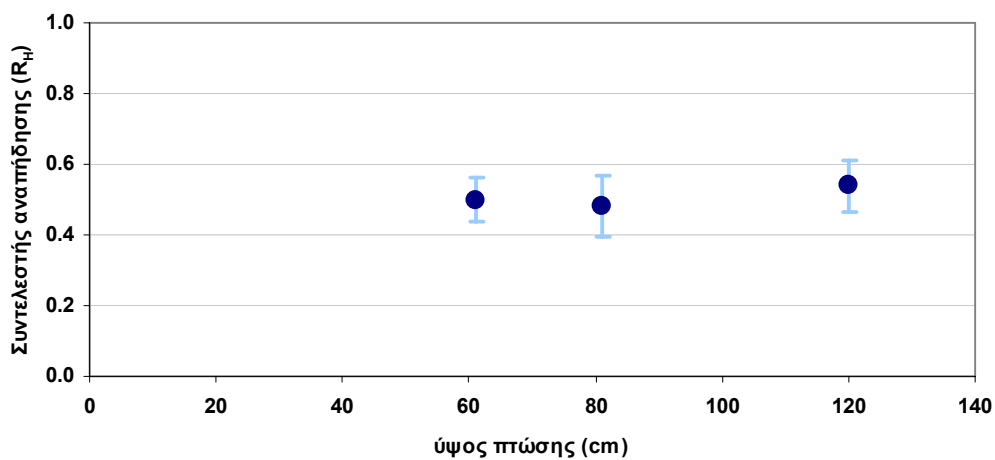
Διάγραμμα 4.12. Μέσος όρος και τυπική απόκλιση συντελεστή αναπήδησης R_v συναρτήσει της ταχύτητας πρόσκρουσης

Η ταχύτητα πρόσκρουσης είναι αρνητική, διότι η κίνηση είναι αντίρροπη του θετικά προσημασμένου άξονα.

Έπεται η παρουσίαση των συντελεστών R_H (διάγραμμα 4.13) καθώς και ο μέσος όρος με την τυπική απόκλιση κάθε σειράς δοκιμών αντίστοιχα (διάγραμμα 4.14).



Διάγραμμα 4.13. Συνολικός συντελεστής αναπήδησης R_H συναρτήσει του ύψους πτώσης



Διάγραμμα 4.14. Μέσος όρος και τυπική απόκλιση συντελεστή αναπήδησης R_H συναρτήσει του ύψους πτώσης

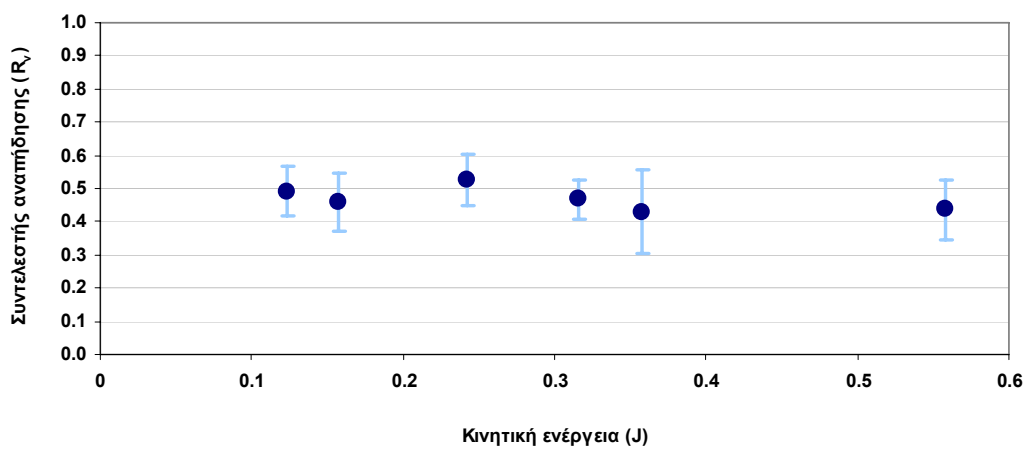
Βάσει των αποτελεσμάτων φαίνεται η ταχύτητα πρόσκρουσης γενικώς να μην επηρεάζει τον συνολικό συντελεστή αναπήδησης, για τα εύρη των ταχυτήτων που εξετάσθηκαν.

4.3. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΙΝΗΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

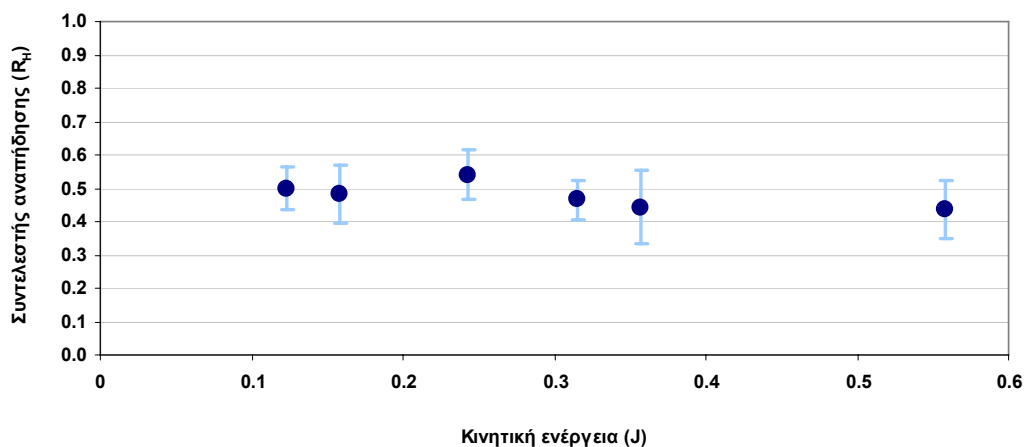
Μία συνδυασμένη ανάλυση των παραπάνω σειρών δοκιμών, μπορεί να γίνει εξετάζοντας την μεταβολή του συνολικού συντελεστή αναπήδησης συναρτήσει της κινητικής ενέργειας πριν την κρούση.

Ως γνωστόν, η κινητική ενέργεια, για μεταφορική κίνηση ισούται με $E = 0.5 m u^2$

Υπολογίζοντας την κινητική ενέργεια πριν την κρούση, για κάθε σειρά δοκιμών προκύπτουν τα ακόλουθα διαγράμματα.



Διάγραμμα 4.15. Μέσος όρος και τυπική απόκλιση συντελεστή αναπήδησης R_v συναρτήσει της κινητικής ενέργειας



Διάγραμμα 4.16. Μέσος όρος και τυπική απόκλιση συντελεστή αναπήδησης R_H συναρτήσει της κινητικής ενέργειας

Σε γενικές γραμμές, ο συντελεστής αναπήδησης εμφανίζεται ανεξάρτητος της κινητικής ενέργειας πριν την πρόσκρουση.

4.4. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΛΙΣΗΣ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι δοκιμές που έγιναν με στόχο την αξιολόγηση της επίδρασης της κλίσης του επιπέδου πρόσκρουσης. Το τέμαχος αφήνεται από σταθερό ύψος, εκτελώντας ελεύθερη πτώση μέχρι την στιγμή της κρούσης στο κεκλιμένο επίπεδο.

Για δοκιμές ελεύθερης πτώσης, όπως έχει ήδη αναφερθεί στο θεωρητικό σκέλος της εργασίας, η γωνία κλίσης του επιπέδου πρόσκρουσης, είναι συμπληρωματική της γωνίας πρόσπτωσης.

Συνολικά εκτελέστηκαν 60 δοκιμές, για κλίσεις επιπέδου πρόσκρουσης 15, 30, 45 και 60 μοιρών, από ύψος πτώσης 80 cm με λειασμένο κυβικό τέμαχος ακμής 2.05 cm και βάρους 20.97 gr (α4). Οι δοκιμές παρουσιάζονται στα παραρτήματα A-7 έως A-10

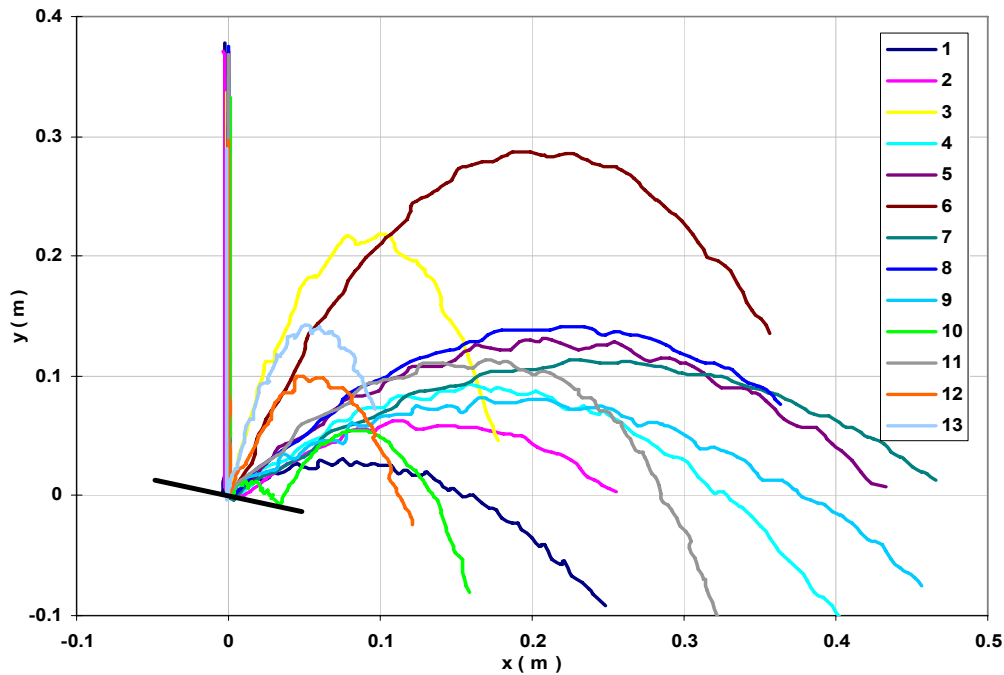
4.4.1. Κλίση επιπέδου πρόσκρουσης 15°

Στον πίνακα 4.10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών που εκτελέστηκαν, με κλίση επιπέδου πρόσκρουσης 15°.

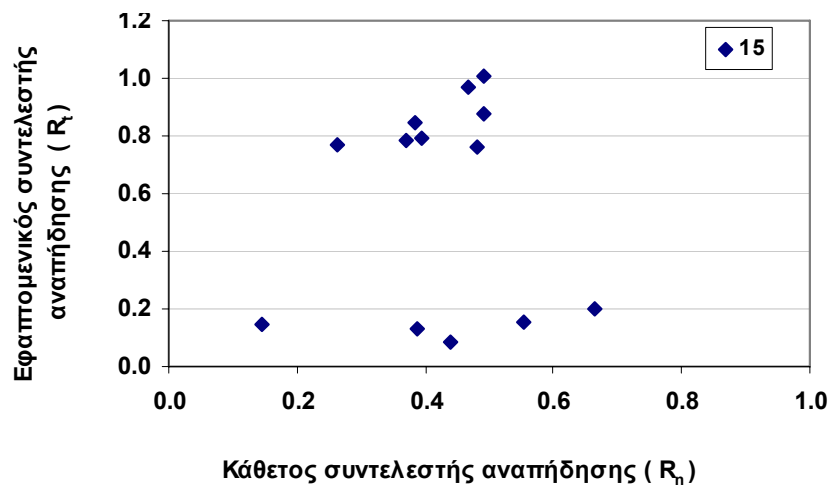
Πίνακας 4.10. Αποτελέσματα σειράς δοκιμών με κλίση επιπέδου 15°

κωδικός	α/α	$v_{n,i}$	$v_{n,r}$	$v_{t,i}$	$v_{t,r}$	R_n	R_t	
		m/s	m/s	m/s	m/s	-	-	
m_ma4_80_15_	1	62	-4.02	1.05	1.05	0.81	0.262	0.770
	2	63	-3.96	1.06	1.46	0.83	0.369	0.781
	3	64	-4.02	1.07	2.22	-0.17	0.553	0.157
	4	65	-3.99	1.06	1.53	0.90	0.383	0.844
	5	66	-3.98	1.03	1.92	0.79	0.482	0.760
	6	67	-3.96	1.05	2.63	0.21	0.664	0.198
	7	68	-3.93	1.07	1.93	1.08	0.492	1.009
	8	69	-3.97	1.06	1.95	0.93	0.491	0.877
	9	70	-3.96	1.10	1.85	1.07	0.467	0.971
	10	71	-4.00	0.99	0.59	0.14	0.147	0.144
	11	72	-3.94	1.07	1.55	0.84	0.395	0.790
	12	73	-4.01	1.07	1.55	0.14	0.388	0.132
	13	74	-3.95	1.03	1.74	-0.08	0.440	0.082
Μέση τιμή						0.418	0.850	
Τυπική απόκλιση						0.081	0.095	
Ελάχιστη τιμή						0.262	0.760	
Μέγιστη τιμή						0.492	1.009	

Όπως φαίνεται και στα διαγράμματα 4.17 και 4.18, οι σκιασμένες τιμές του πίνακα, αντιστοιχούν σε ρίψεις, όπου είτε επικράτησε η κατακόρυφη συνιστώσα της κίνησης (δοκιμές 3, 6, 12, 13), δίνοντας αντίστοιχα πολύ μικρό συντελεστή εφασπτομενικής αναπήδησης, ή στην δοκιμή 7 συνέβη στιγμιαία κύλιση και δεύτερη κρούση (πιθανότατα εξ αιτίας του προσανατολισμού του τέμαχους σε σχέση με επιφάνεια πρόσκρουσης). Οι τιμές των δοκιμών αυτών εξαιρούνται περαιτέρω επεξεργασίας.



Διάγραμμα 4.17. Γραφική απεικόνιση τροχιών σειράς δοκιμών με κλίση επιπέδου 15°



Διάγραμμα 4.18. Κάθετοι και εφασπτομενικοί συντελεστές αναπήδησης για κλίση επιπέδου πρόσκρουσης 15°

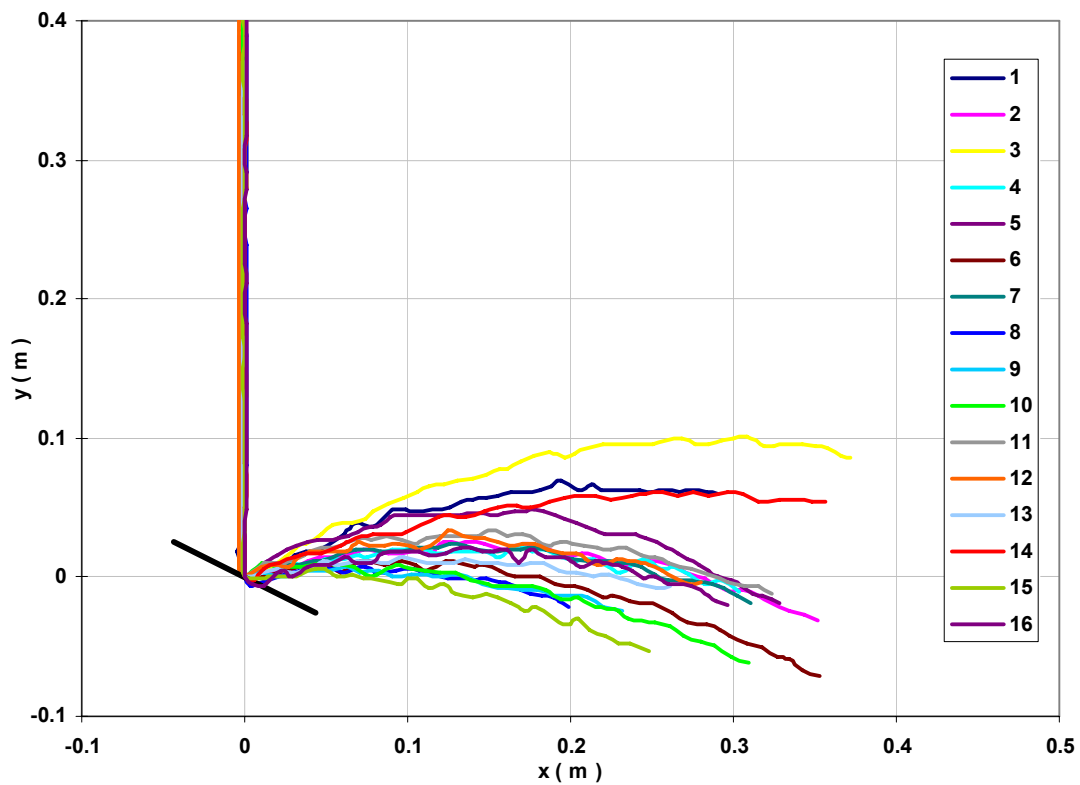
4.4.2. Κλίση επιπέδου πρόσκρουσης 30°

Στον πίνακα 4.11 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών που εκτελέστηκαν, με κλίση επιπέδου πρόσκρουσης 30°.

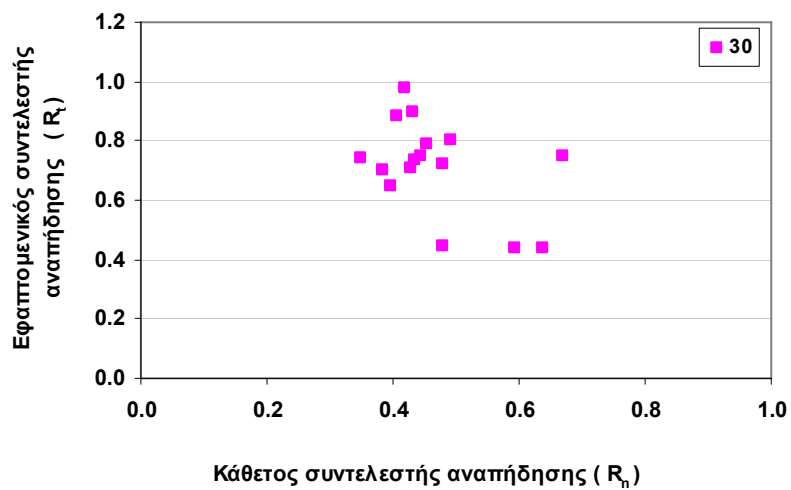
Πίνακας 4.11. Αποτελέσματα σειράς δοκιμών με κλίση επιπέδου 30°

κωδικός	α/α	$v_{n,i}$	$v_{n,r}$	$v_{t,i}$	$v_{t,r}$	R_n	R_t	
		m/s	m/s	m/s	m/s	-	-	
m_ma4_80_30_	1	75	-3.44	2.04	2.04	0.89	0.594	0.437
	2	76	-3.53	2.04	1.35	1.43	0.383	0.703
	3	77	-3.52	2.03	2.25	0.89	0.640	0.440
	4	78	-3.63	2.07	1.47	1.83	0.405	0.884
	5	79	-3.56	2.05	1.71	0.91	0.479	0.444
	6	80	-3.55	2.02	1.61	1.60	0.452	0.792
	7	81	-3.51	2.01	1.56	1.51	0.443	0.749
	8	82	-3.55	2.01	1.41	1.30	0.397	0.649
	9	83	-3.54	2.02	1.48	1.98	0.418	0.979
	10	84	-3.60	2.14	1.77	1.71	0.491	0.799
	11	85	-3.53	2.03	1.53	1.50	0.433	0.738
	12	86	-3.49	1.99	1.67	1.43	0.479	0.719
	13	87	-3.57	2.04	1.55	1.83	0.433	0.896
	14	88	-3.60	2.05	2.41	1.53	0.669	0.747
	15	89	-3.58	2.05	1.25	1.53	0.349	0.744
	16	90	-3.56	2.01	1.53	1.42	0.430	0.707
Μέση τιμή						0.426	0.780	
Τυπική απόκλιση						0.039	0.096	
Ελάχιστη τιμή						0.349	0.649	
Μέγιστη τιμή						0.491	0.979	

Οι σκιασμένες τιμές εξαιρούνται της επεξεργασίας θεωρούμενες ως ακραίες. Οι τιμές του μέσου όρου που παρατίθενται στον πίνακα, είναι χωρίς αυτές.



Διάγραμμα 4.19. Γραφική απεικόνιση τροχιών σειράς δοκιμών με κλίση επιπέδου 30°



Διάγραμμα 4.20. Κάθετοι και εφαπτομενικοί συντελεστές αναπήδησης για κλίση επιπέδου πρόσκρουσης 30° .

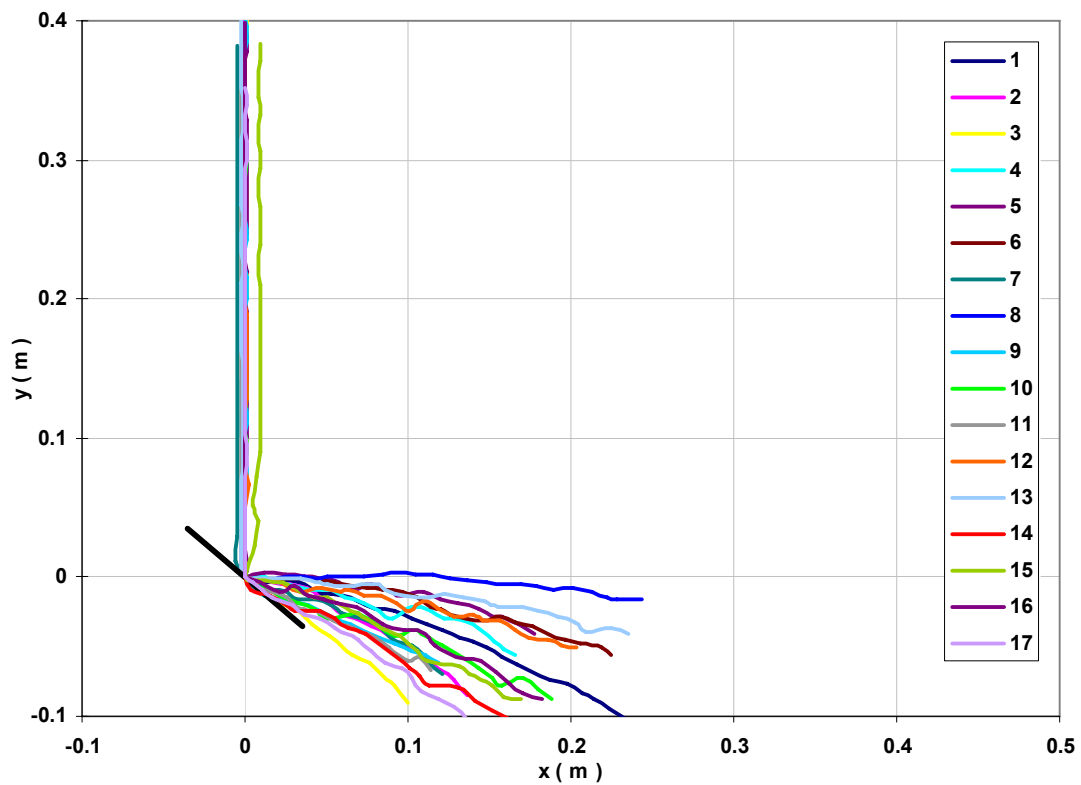
4.4.3. Κλίση επιπέδου πρόσκρουσης 45°

Στον πίνακα 4.12 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών που εκτελέσθηκαν, με κλίση επιπέδου πρόσκρουσης 45°.

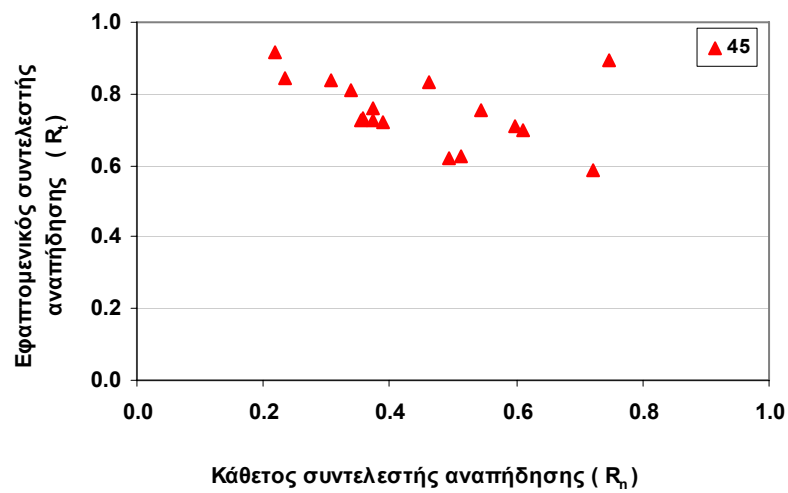
Πίνακας 4.12. Αποτελέσματα σειράς δοκιμών με κλίση επιπέδου 45°

κωδικός	α/α	$v_{n,i}$	$v_{n,r}$	$v_{t,i}$	$v_{t,r}$	R_n	R_t	
		m/s	m/s	m/s	m/s	-	-	
m_ma4_80_45_	1	91	-2.96	2.94	1.46	1.83	0.493	0.620
	2	92	-2.87	2.88	1.07	2.18	0.373	0.758
	3	93	-2.95	2.92	0.65	2.68	0.219	0.918
	4	94	-2.91	2.92	1.58	2.20	0.543	0.753
	5	95	-2.89	2.91	2.16	2.60	0.747	0.893
	6	96	-2.94	2.88	1.76	2.04	0.600	0.709
	7	97	-2.92	2.87	1.09	2.08	0.372	0.726
	8	98	-2.97	2.95	2.14	1.73	0.720	0.586
	9	99	-2.95	2.91	1.04	2.11	0.354	0.725
	10	100	-2.96	2.93	1.15	2.11	0.390	0.721
	11	101	-2.98	2.98	1.01	2.41	0.339	0.808
	12	102	-2.98	2.91	1.53	1.82	0.514	0.624
	13	103	-2.92	2.91	1.79	2.03	0.612	0.696
	14	104	-2.99	2.96	0.92	2.49	0.308	0.839
	15	105	-3.05	2.94	1.46	1.83	0.359	0.730
	16	106	-2.90	2.88	1.07	2.18	0.461	0.832
	17	107	-2.92	2.92	0.65	2.68	0.234	0.843
Μέση τιμή						0.411	0.753	
Τυπική απόκλιση						0.121	0.082	
Ελάχιστη τιμή						0.219	0.620	
Μέγιστη τιμή						0.612	0.918	

Οι σκιασμένες τιμές εξαιρούνται της επεξεργασίας θεωρούμενες ως ακραίες. Οι τιμές του μέσου όρου που παρατίθενται στον πίνακα, είναι χωρίς αυτές.



Διάγραμμα 4.21. Γραφική απεικόνιση τροχιών σειράς δοκιμών με κλίση επιπέδου 45°



Διάγραμμα 4.22. Κάθετοι και εφαπτομενικοί συντελεστές αναπήδησης για κλίση επιπέδου πρόσκρουσης 45°

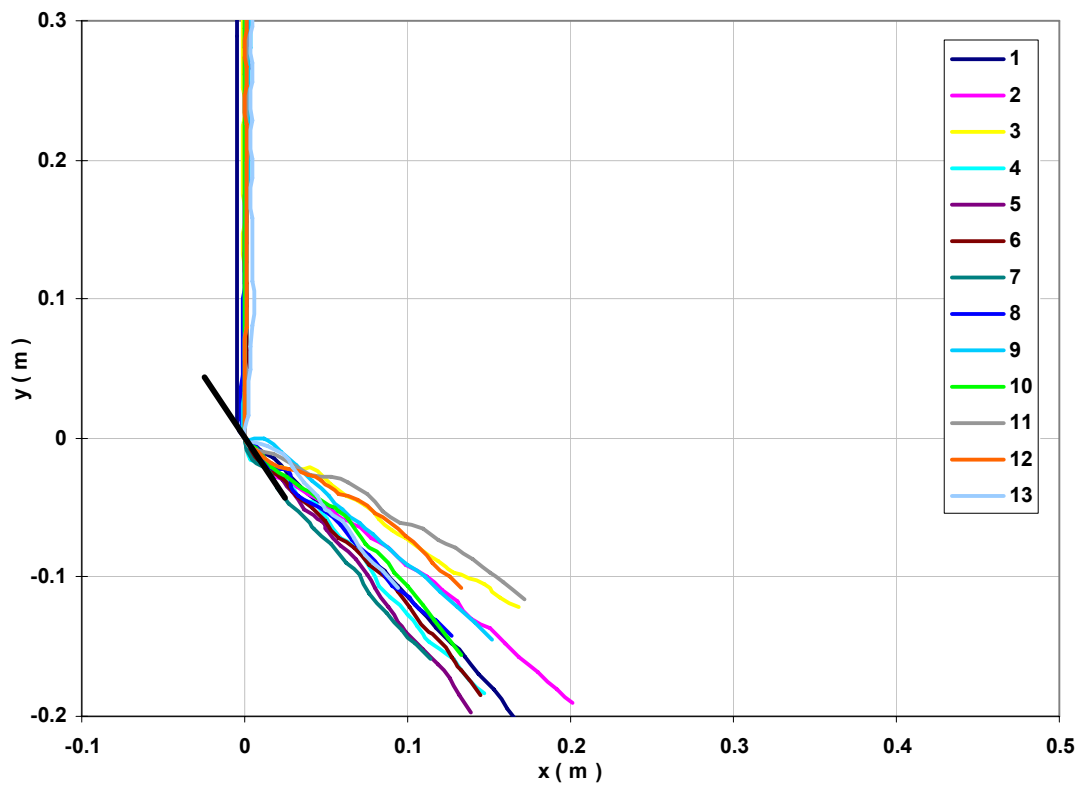
4.4.4. Κλίση επιπέδου πρόσκρουσης 60°

Στον πίνακα 4.13 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών που εκτελέσθηκαν, με κλίση επιπέδου πρόσκρουσης 60°.

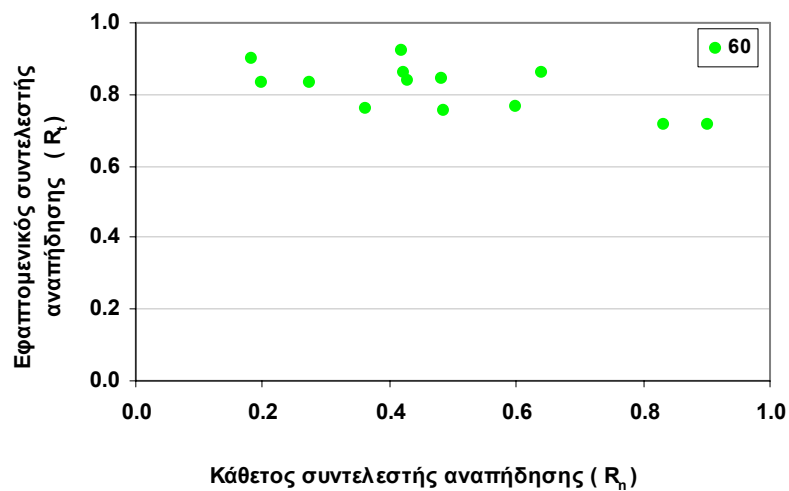
Πίνακας 4.13. Αποτελέσματα σειράς δοκιμών με κλίση επιπέδου 60°

κωδικός	α/α	$v_{n,i}$	$v_{n,r}$	$v_{t,i}$	$v_{t,r}$	R_n	R_t	
		m/s	m/s	m/s	m/s	-	-	
m_ma4_80_60_	1	108	-2.05	3.52	0.75	2.66	0.364	0.758
	2	109	-2.06	3.54	1.32	3.05	0.641	0.862
	3	110	-2.04	3.47	1.22	2.66	0.598	0.766
	4	111	-2.07	3.49	0.87	3.01	0.422	0.861
	5	112	-2.06	3.53	0.41	2.95	0.199	0.834
	6	113	-2.08	3.52	0.89	2.96	0.429	0.840
	7	114	-2.06	3.54	0.38	3.19	0.184	0.901
	8	115	-2.11	3.46	0.58	2.88	0.274	0.833
	9	116	-2.08	3.59	0.87	3.30	0.418	0.921
	10	117	-2.04	3.54	0.99	2.98	0.484	0.842
	11	118	-2.09	3.52	1.88	2.52	0.901	0.717
	12	119	-2.08	3.51	1.73	2.51	0.832	0.714
	13	120	-2.28	3.49	1.11	2.64	0.486	0.755
Μέση τιμή						0.457	0.827	
Τυπική απόκλιση						0.112	0.056	
Ελάχιστη τιμή						0.274	0.755	
Μέγιστη τιμή						0.641	0.921	

Οι σκιασμένες τιμές εξαιρούνται της επεξεργασίας θεωρούμενες ως ακραίες. Οι τιμές του μέσου όρου που παρατίθενται στον πίνακα είναι χωρίς αυτές.



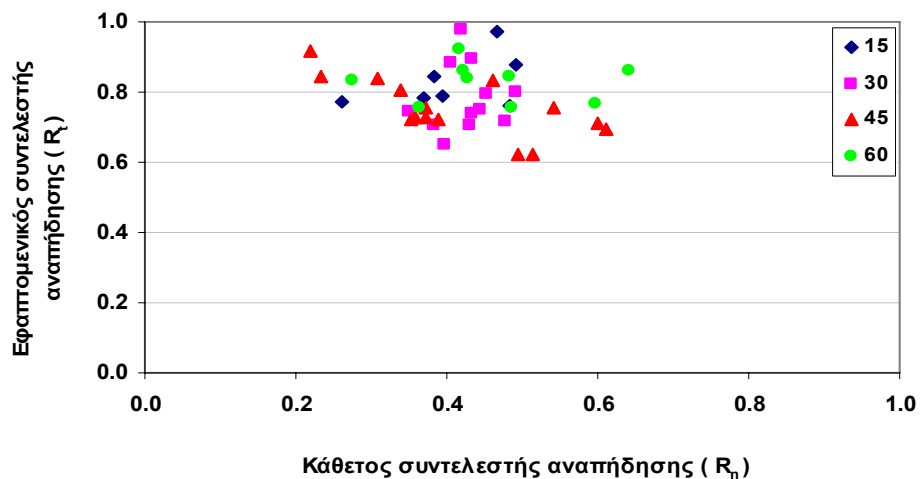
Διάγραμμα 4.23. Γραφική απεικόνιση τροχιών
σειράς δοκιμών με κλίση επιπέδου 60°



Διάγραμμα 4.24. Κάθετοι και εφαπτομενικοί συντελεστές αναπήδησης
για κλίση επιπέδου πρόσκρουσης 60°

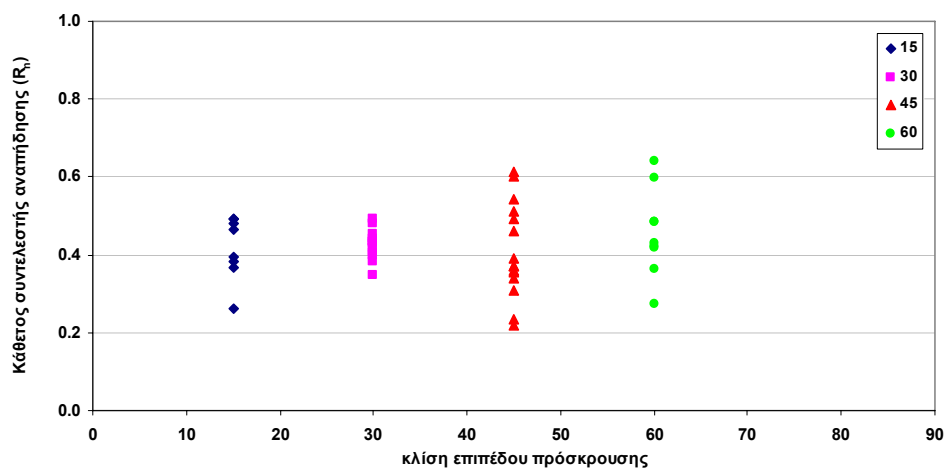
4.4.5. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Στο διάγραμμα 4.25 φαίνονται συγκεντρωτικά οι τιμές των συντελεστών αναπήδησης R_n , R_t που προέκυψαν από τις δοκιμές (εξαιρουμένων των ακραίων τιμών που απορρίφθηκαν). Παρατηρείται ότι για κλίσεις επιπέδου πρόσκρουσης 15° και 30° , η συγκέντρωση των σημείων είναι ικανοποιητική, ενώ για κλίσεις 45° και 60° εμφανίζεται μεγάλη διασπορά.

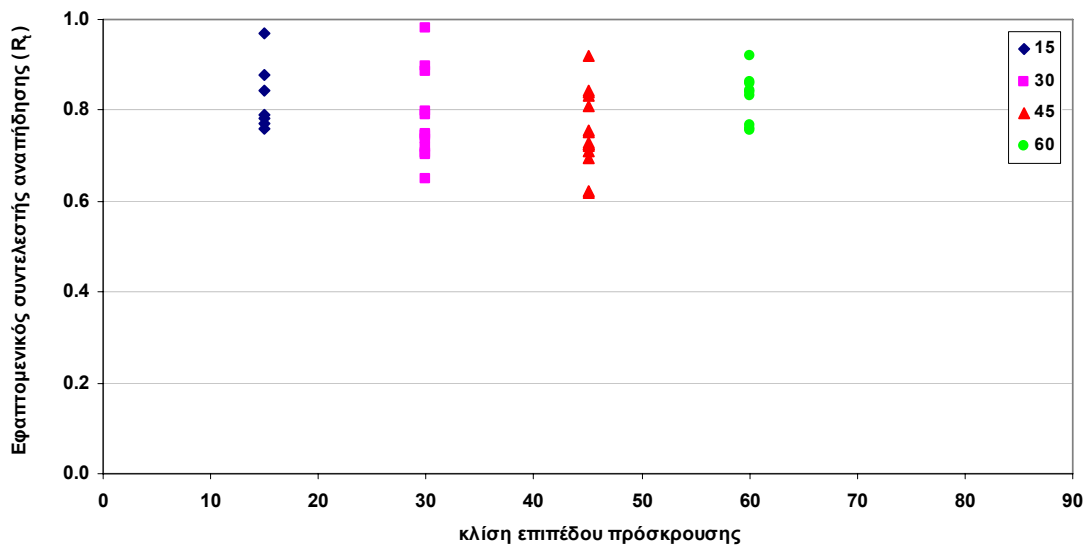


Διάγραμμα 4.25. Κάθετοι και εφαπτομενικοί συντελεστές αναπήδησης (R_n , R_t) για τις διάφορες κλίσεις του επιπέδου πρόσκρουσης

Στα διαγράμματα 4.26 και 4.27 φαίνονται οι συντελεστές αναπήδησης, συναρτήσει της κλίσης επιπέδου πρόσκρουσης.

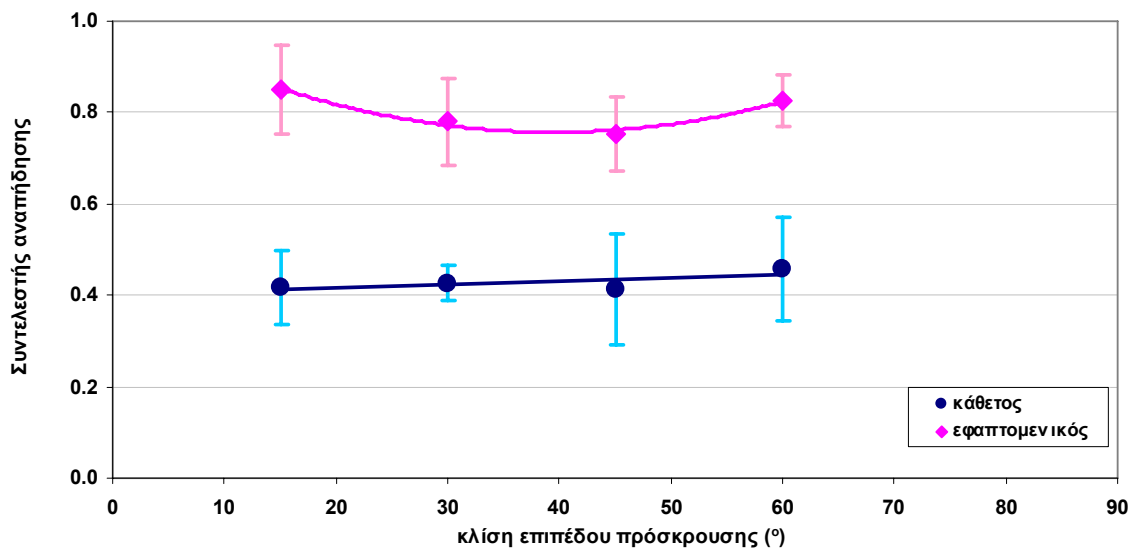


Διάγραμμα 4.26. Κάθετος συντελεστής αναπήδησης (R_n) για τις διάφορες κλίσεις του επιπέδου πρόσκρουσης



Διάγραμμα 4.27. Εφαπτομενικός συντελεστής εφασπόμενικης αναπήδησης (R_t) για τις διάφορες κλίσεις του επιπέδου πρόσκρουσης

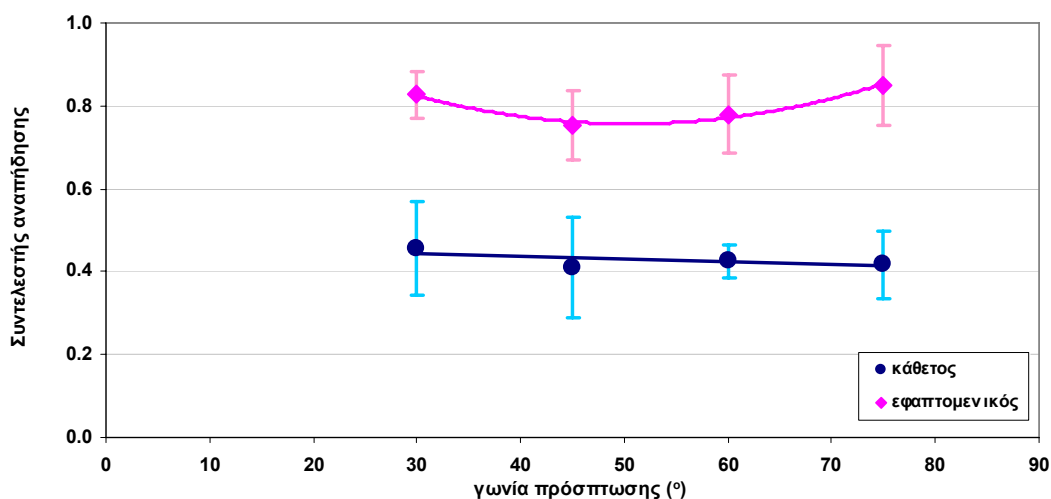
Στο διάγραμμα 4.28 παρουσιάζονται οι συντελεστές αναπήδησης κάθε σειράς δοκιμών, εκφρασμένοι από τον μέσο όρο και την τυπική απόκλιση, συναρτήσει της κλίσης του επιπέδου πρόσκρουσης, ενώ στο διάγραμμα 4.29 παρουσιάζονται συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης.



Διάγραμμα 4.28. Μέσος όρος και τυπική απόκλιση συντελεστών αναπήδησης για τις διάφορες κλίσεις του επιπέδου πρόσκρουσης

Παρατηρείται ότι ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης παρουσιάζει ελάχιστη τιμή για κλίση επίπεδου πρόσκρουσης περί των 40° .

Η τάση του κάθετου συντελεστή αναπήδησης είναι δύσκολο να ερμηνευθεί αφού οι τιμές για κλίση επίπεδου πρόσκρουσης 45° έχουν μεγάλη διασπορά. Πάραυτα, φαίνεται γραμμική αύξηση του συντελεστή αυτού με την μείωση της γωνίας πρόσπτωσης (ή με την αύξηση της κλίσης του επιπέδου πρόσκρουσης).



Διάγραμμα 4.29. Μέσος όρος και τυπική απόκλιση συντελεστών αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης.

4.5. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΓΩΝΙΑΣ ΠΡΟΣΠΤΩΣΗΣ

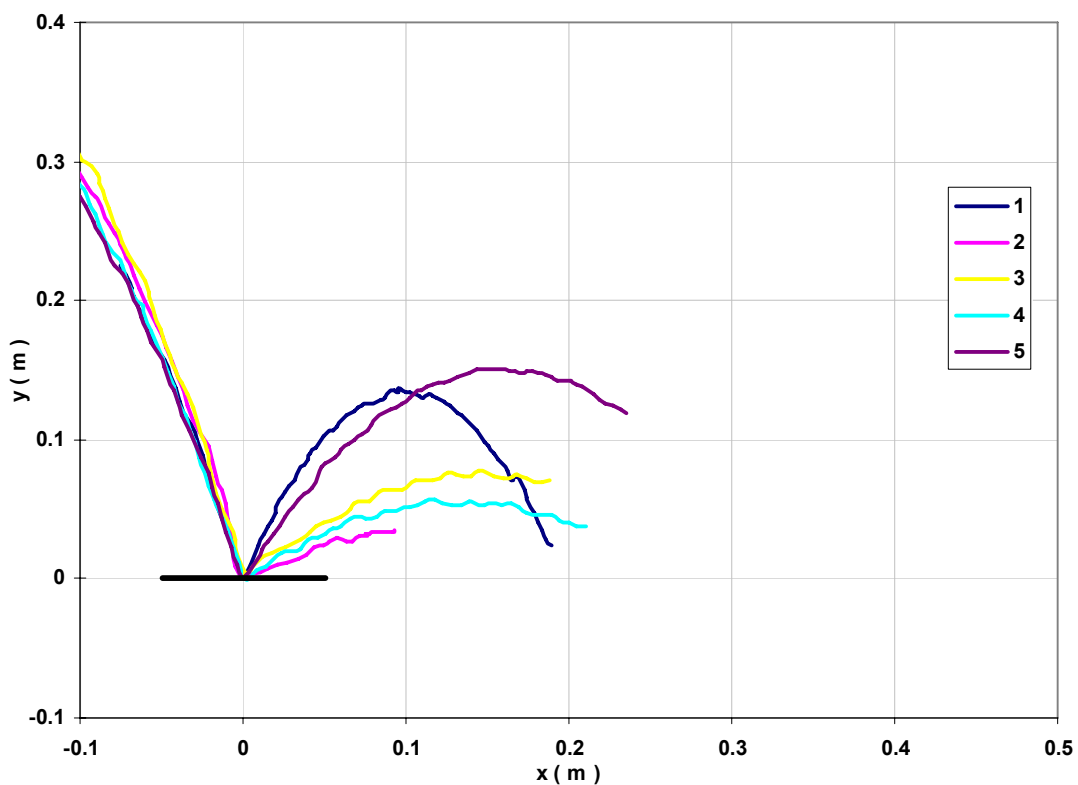
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι δοκιμές που έγιναν για την αξιολόγηση της επίδρασης της γωνίας πρόσπτωσης. Το τέμαχος αφήνεται υπό γωνία, ώστε να εκτελέσει παραβολική τροχιά, και να προσκρούσει στην επιφάνεια με διάφορες κλίσεις.

Συνολικά εκτελέστηκαν 40 δοκιμές, από δυο διαφορετικές αρχικές γωνίες εξόδου, με την επιφάνεια πρόσκρουσης σε κλίσεις 0° , 15° , 30° και 45° , για λειασμένο κυβικό τέμαχος ακμής 2.07 cm και βάρους 19.58 gr (a5).

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες, ενώ τα αναλυτικά φύλλα των δοκιμών βρίσκονται στα παραρτήματα A-11 έως A-18.

Πίνακας 4.14. Αποτελέσματα σειράς δοκιμών για γωνία εξόδου 20° σε οριζόντιο επίπεδο πρόσκρουσης

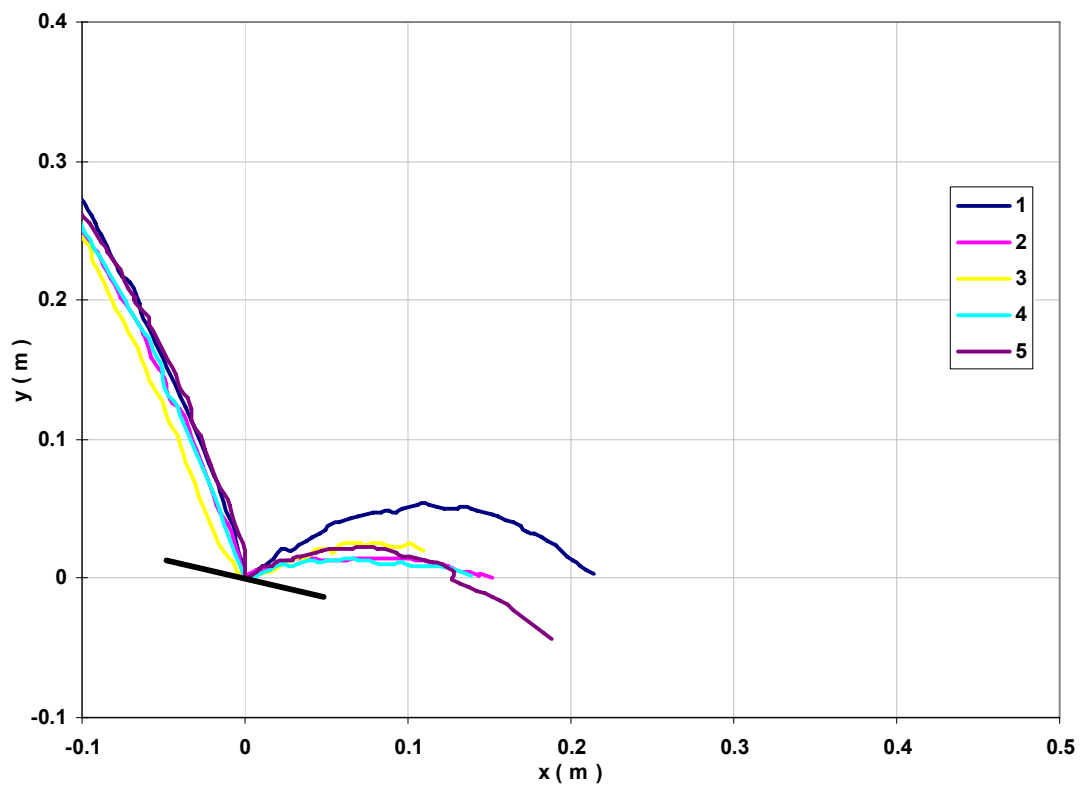
κωδικός	α/α	V _{n,i}	V _{n,r}	V _{t,i}	V _{t,r}	β	R _n	R _t	
									m/s
m_ma5_sl20_0_	1	121	-2.91	0.75	1.67	0.59	73.6	0.574	0.791
	2	122	-2.80	0.46	0.76	1.42	79.0	0.271	3.074
	3	123	-2.94	0.78	1.21	1.26	72.7	0.411	1.615
	4	124	-2.84	0.82	1.21	1.24	71.9	0.426	1.503
	5	125	-2.87	0.82	1.75	0.96	74.7	0.609	1.174
Μέση τιμή							73.2	0.505	1.271
Τυπική απόκλιση							1.2	0.101	0.371
Ελάχιστη τιμή							71.9	0.411	0.791
Μέγιστη τιμή							74.7	0.609	1.615



Διάγραμμα 4.30. Γραφική απεικόνιση τροχιών σειράς δοκιμών για γωνία εξόδου 20° σε οριζόντιο επίπεδο πρόσκρουσης

Πίνακας 4.15. Αποτελέσματα σειράς δοκιμών για γωνία εξόδου 20° σε επίπεδο πρόσκρουσης 15°

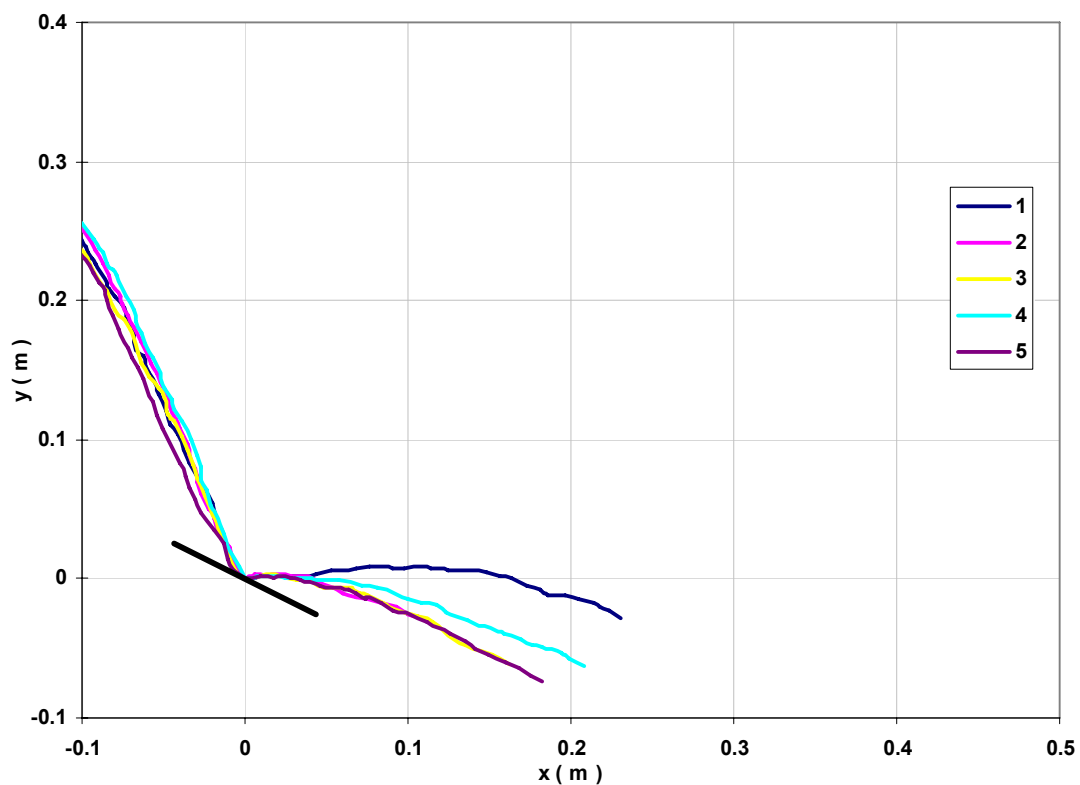
κωδικός	α/α	$v_{n,i}$	$v_{n,r}$	$v_{t,i}$	$v_{t,r}$	β	R_n	R_t	
		m/s	m/s	m/s	m/s	°	-	-	
m_ma5_sl20_15_	1	126	-2.49	1.42	1.40	0.85	58.3	0.562	0.597
	2	127	-2.55	1.54	1.09	1.36	55.7	0.426	0.882
	3	128	-2.14	1.43	0.86	0.96	56.3	0.405	0.676
	4	129	-2.35	1.45	0.88	1.33	57.1	0.375	0.918
	5	130	-2.42	1.51	0.80	0.68	57.0	0.328	0.451
Μέση τιμή						56.9	0.419	0.705	
Τυπική απόκλιση						1.0	0.088	0.196	
Ελάχιστη τιμή						55.7	0.328	0.451	
Μέγιστη τιμή						58.3	0.562	0.918	



Διάγραμμα 4.31. Γραφική απεικόνιση τροχιών σειράς δοκιμών για γωνία εξόδου 20° σε επίπεδο πρόσκρουσης 15°

Πίνακας 4.16. Αποτελέσματα σειράς δοκιμών για γωνία εξόδου 20°
σε επίπεδο πρόσκρουσης 30°

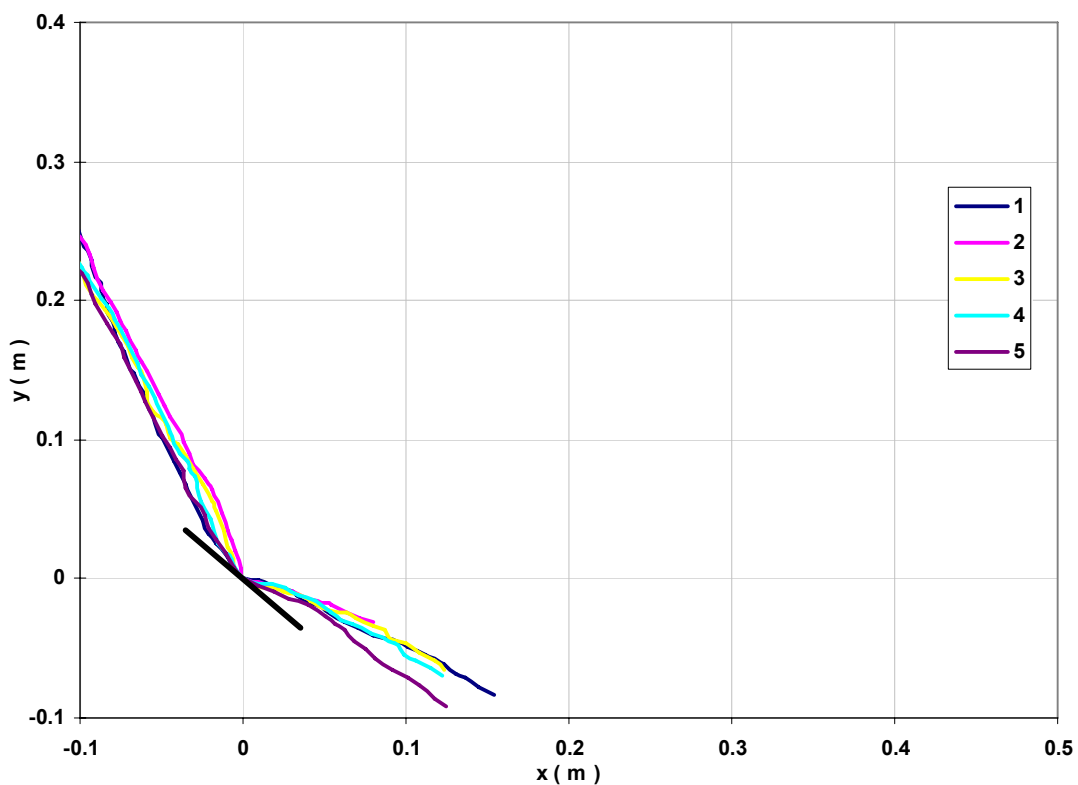
κωδικός	α/α	$v_{n,i}$	$v_{n,r}$	$v_{t,i}$	$v_{t,r}$	β	R_n	R_t	
		m/s	m/s	m/s	m/s	°	-	-	
m_ma5_sl20_30_	1	131	-1.92	2.27	1.28	1.36	41.9	0.664	0.599
	2	132	-1.76	2.19	0.91	1.62	36.7	0.517	0.739
	3	133	-2.03	2.19	1.06	1.64	40.5	0.523	0.749
	4	134	-1.86	2.33	1.02	1.56	39.5	0.546	0.668
	5	135	-1.62	2.36	0.96	1.65	33.2	0.592	0.698
Μέση τιμή						38.4	0.568	0.691	
Τυπική απόκλιση						3.5	0.061	0.061	
Ελάχιστη τιμή						33.2	0.517	0.599	
Μέγιστη τιμή						41.9	0.664	0.749	



Διάγραμμα 4.32. Γραφική απεικόνιση τροχιών σειράς δοκιμών για γωνία εξόδου 20°
σε επίπεδο πρόσκρουσης 30°

Πίνακας 4.17. Αποτελέσματα σειράς δοκιμών για γωνία εξόδου 20°
σε επίπεδο πρόσκρουσης 45°

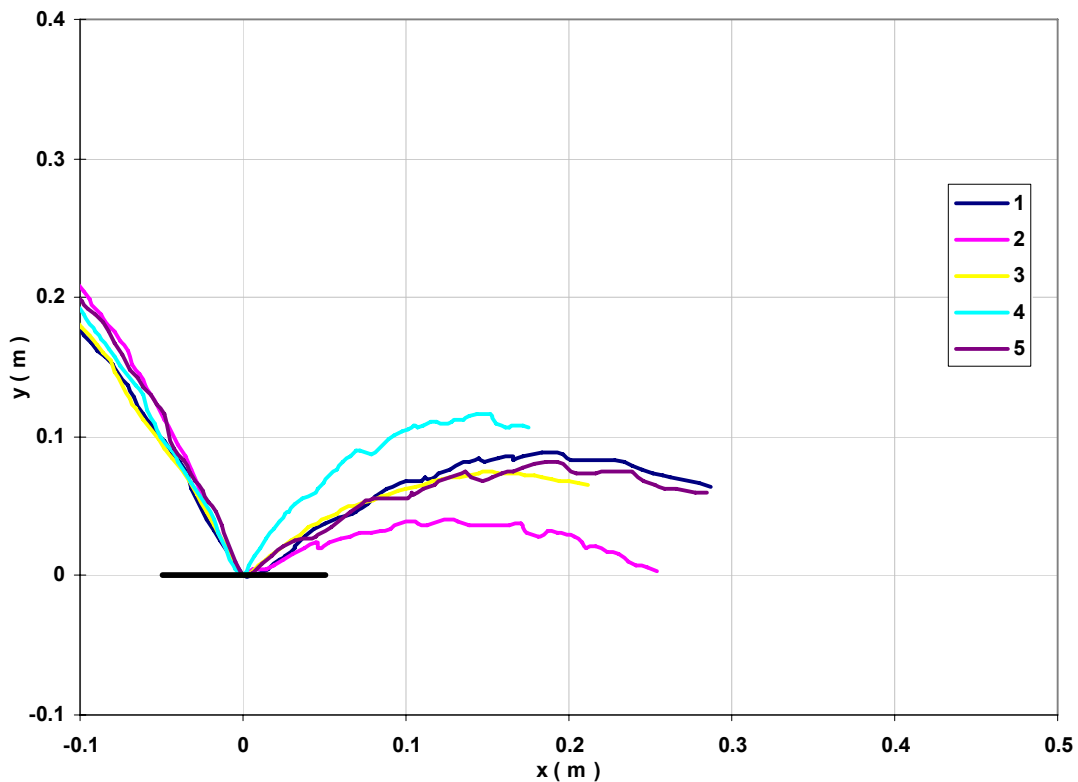
κωδικός	α/α	$v_{n,i}$	$v_{n,r}$	$v_{t,i}$	$v_{t,r}$	β	R_n	R_t	
		m/s	m/s	m/s	m/s	°	-	-	
m_ma5_sl20_45_	1	136	-1.05	2.43	0.85	1.89	16.8	0.811	0.780
	2	137	-1.29	2.62	1.09	2.25	25.2	0.845	0.860
	3	138	-1.19	2.53	1.11	2.08	25.7	0.934	0.820
	4	139	-1.30	3.12	1.08	2.09	26.4	0.833	0.670
	5	140	-0.89	2.59	0.76	2.51	20.1	0.857	0.966
Μέση τιμή						22.8	0.856	0.819	
Τυπική απόκλιση						4.2	0.047	0.109	
Ελάχιστη τιμή						16.8	0.811	0.670	
Μέγιστη τιμή						26.4	0.934	0.966	



Διάγραμμα 4.33. Γραφική απεικόνιση τροχιών σειράς δοκιμών για γωνία εξόδου 20°
σε επίπεδο πρόσκρουσης 45°

Πίνακας 4.18. Αποτελέσματα σειράς δοκιμών για γωνία εξόδου 40°
σε οριζόντιο επίπεδο πρόσκρουσης

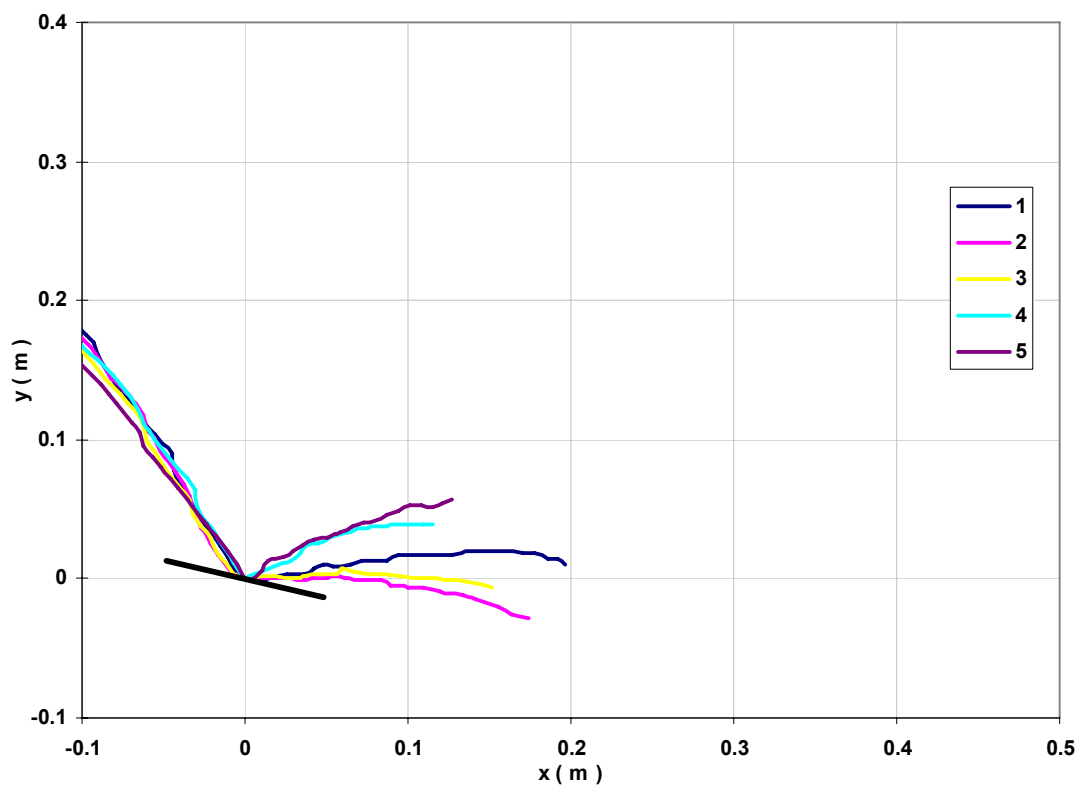
κωδικός	α/α	$v_{n,i}$	$v_{n,r}$	$v_{t,i}$	$v_{t,r}$	β	R_n	R_t	
		m/s	m/s	m/s	m/s	°	-	-	
m_ma5_sl40_0_	1	141	-2.17	1.11	1.14	1.52	62.4	0.523	1.375
	2	142	-2.71	1.01	0.82	1.53	68.9	0.304	1.515
	3	143	-2.45	1.20	1.30	1.27	64.1	0.532	1.061
	4	144	-2.46	1.02	1.65	0.88	64.0	0.671	0.860
	5	145	-2.71	1.02	1.23	1.55	65.1	0.452	1.527
Μέση τιμή							64.9	0.496	1.268
Τυπική απόκλιση							2.4	0.134	0.295
Ελάχιστη τιμή							62.4	0.304	0.860
Μέγιστη τιμή							68.9	0.671	1.527



Διάγραμμα 4.34. Γραφική απεικόνιση τροχιών σειράς δοκιμών για γωνία εξόδου 40°
σε οριζόντιο επίπεδο πρόσκρουσης

Πίνακας 4.19. Αποτελέσματα σειράς δοκιμών για γωνία ρίψης 40°
σε επίπεδο πρόσκρουσης 15°

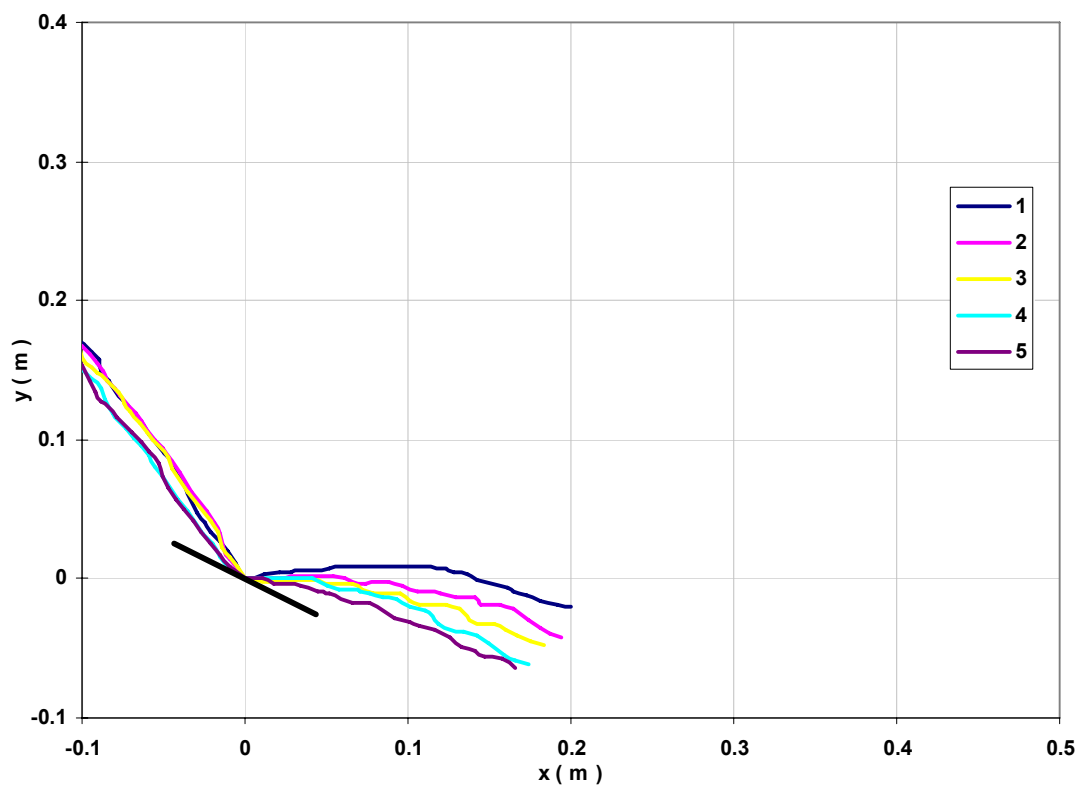
κωδικός	α/α	$v_{n,i}$	$v_{n,r}$	$v_{t,i}$	$v_{t,r}$	β	R_n	R_t	
		m/s	m/s	m/s	m/s	°	-	-	
m_ma5_sl40_15_	1	146	-1.95	1.75	1.14	1.44	45.5	0.582	0.823
	2	147	-1.65	1.58	0.60	1.34	48.1	0.363	0.847
	3	148	-1.78	1.72	0.81	1.74	47.6	0.455	1.011
	4	149	-1.83	1.73	1.30	1.13	45.3	0.712	0.656
	5	150	-2.00	2.09	1.57	1.04	41.1	0.783	0.500
Μέση τιμή						45.5	0.579	0.767	
Τυπική απόκλιση						2.8	0.174	0.195	
Ελάχιστη τιμή						41.1	0.363	0.500	
Μέγιστη τιμή						48.1	0.783	1.011	



Διάγραμμα 4.35. Γραφική απεικόνιση τροχιών σειράς δοκιμών για γωνία εξόδου 40°
σε επίπεδο πρόσκρουσης 15°

Πίνακας 4.20. Αποτελέσματα σειράς δοκιμών για γωνία ρίψης 40°
σε επίπεδο πρόσκρουσης 30°

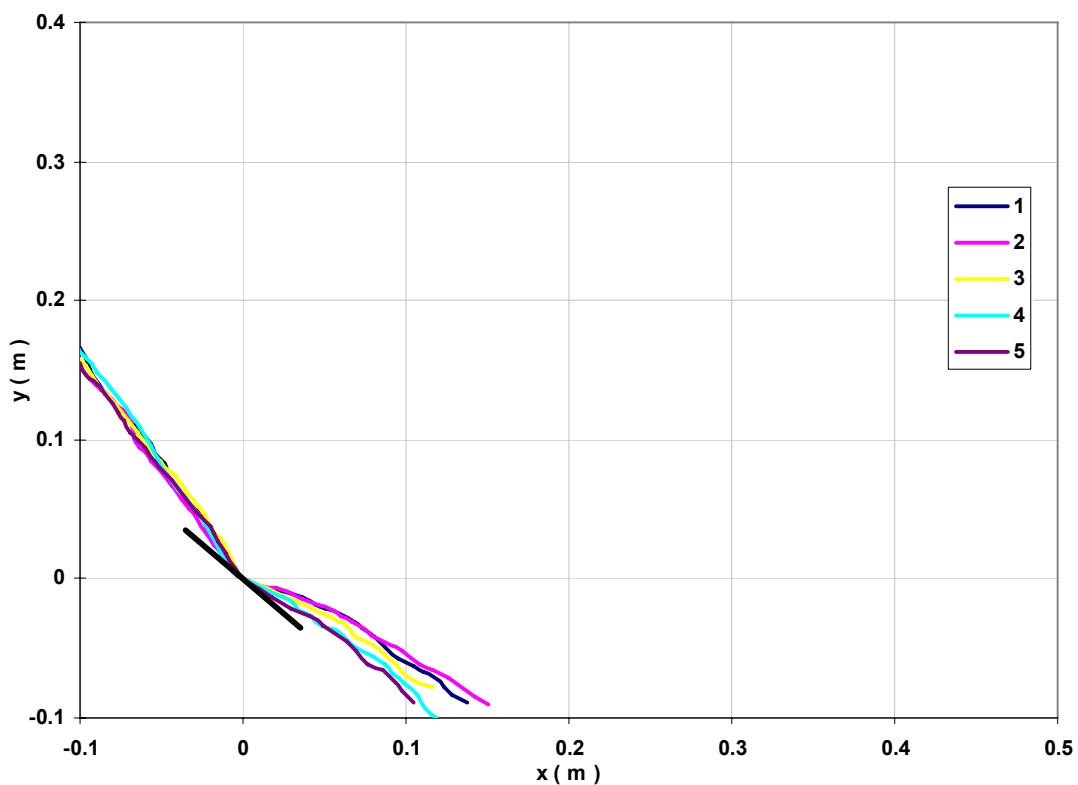
κωδικός	α/α	$v_{n,i}$	$v_{n,r}$	$v_{t,i}$	$v_{t,r}$	β	R_n	R_t	
		m/s	m/s	m/s	m/s	°	-	-	
m_ma5_sl40_30_	1	151	-1.19	2.02	1.13	1.43	27.9	0.954	0.709
	2	152	-1.37	1.90	1.18	1.63	36.0	0.866	0.859
	3	153	-1.28	1.99	0.87	1.58	33.9	0.679	0.795
	4	154	-1.21	2.40	1.18	1.71	27.3	0.980	0.711
	5	155	-1.13	2.50	0.69	1.96	25.8	0.614	0.783
Μέση τιμή						30.2	0.819	0.771	
Τυπική απόκλιση						4.5	0.164	0.063	
Ελάχιστη τιμή						25.8	0.614	0.709	
Μέγιστη τιμή						36.0	0.980	0.859	



Διάγραμμα 4.36. Γραφική απεικόνιση τροχιών σειράς δοκιμών για γωνία εξόδου 40°
σε επίπεδο πρόσκρουσης 30°

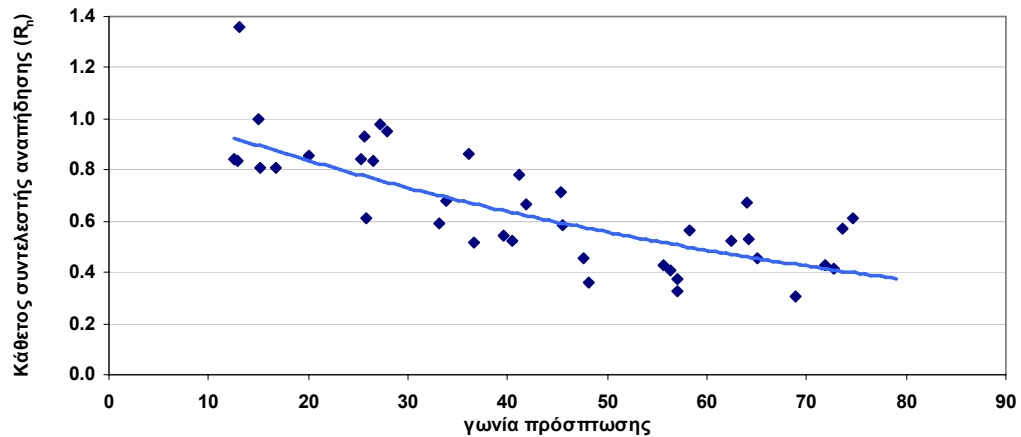
Πίνακας 4.21. Αποτελέσματα σειράς δοκιμών για γωνία ρίψης 40° σε επίπεδο πρόσκρουσης 45°

κωδικός	α/α	$v_{n,i}$	$v_{n,r}$	$v_{t,i}$	$v_{t,r}$	β	R_n	R_t	
		m/s	m/s	m/s	m/s	°	-	-	
m_ma5_sl40_45_	1	156	-0.88	2.72	0.74	2.21	12.9	0.834	0.815
	2	157	-0.64	2.57	0.87	1.93	13.1	1.357	0.752
	3	158	-0.79	2.72	0.78	2.43	14.9	0.998	0.892
	4	159	-0.81	2.81	0.65	1.96	15.1	0.809	0.696
	5	160	-0.62	2.67	0.53	2.45	12.5	0.843	0.916
Μέση τιμή						13.7	0.968	0.814	
Τυπική απόκλιση						1.2	0.230	0.092	
Ελάχιστη τιμή						12.5	0.809	0.696	
Μέγιστη τιμή						15.1	1.357	0.916	



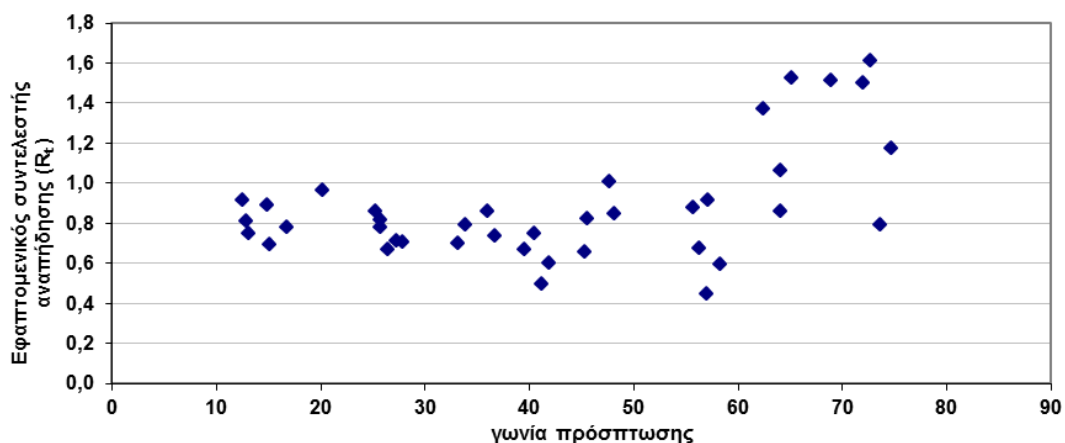
Διάγραμμα 4.37. Γραφική απεικόνιση τροχιών σειράς δοκιμών για γωνία εξόδου 40° σε επίπεδο πρόσκρουσης 45°

Στα διαγράμματα 4.38 και 4.39 παρουσιάζονται οι συντελεστές κάθετης και εφαπτομενικής αναπήδησης αντίστοιχα σαν συνάρτηση της γωνιάς πρόσπτωσης.



Διάγραμμα 4.38. Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνιάς πρόσπτωσης

Παρατηρείται ότι ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης εμφανίζει πτωτική τάση με την αύξηση της γωνιάς πρόσπτωσης. Η παρατήρηση αυτή, συμφωνεί με τις δοκιμές ελεύθερης πτώσης σε κεκλιμένο επίπεδο

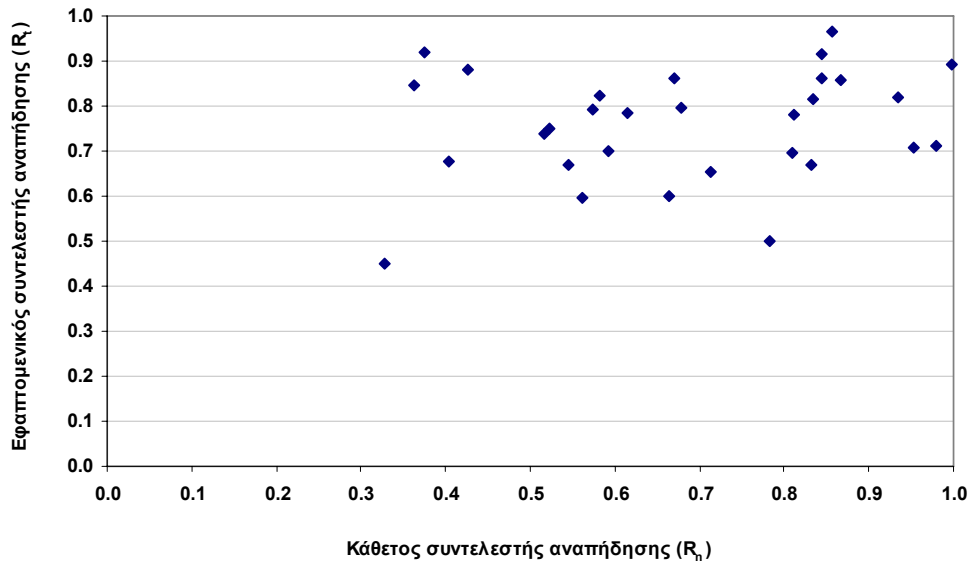


Διάγραμμα 4.39. Εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνιάς πρόσπτωσης

Για γωνίες πρόσπτωσης μεγαλύτερες των 60° , ο συντελεστής εφαπτομενικής αναπήδησης λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες της μονάδας. Σύμφωνα με την θεωρία αυτό δεν είναι εφικτό, έχει όμως παρατηρηθεί και σε άλλες ερευνητικές εργασίες. Μια εξήγηση

μπορεί να είναι ότι η γωνιακή ταχύτητα του τεμάχους, με την συγκεκριμένη μέθοδο ανάλυσης αγνοείται.

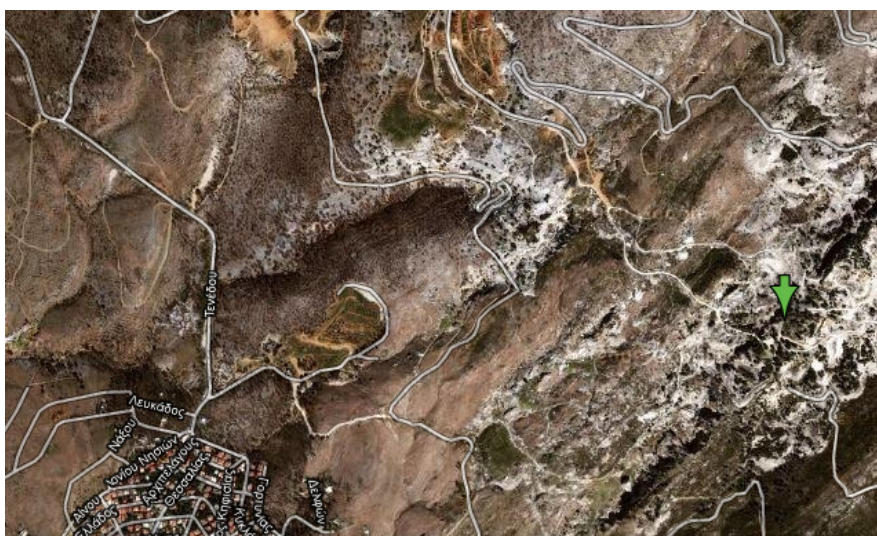
Στο διάγραμμα 4.40. φαίνονται τα ζεύγη τιμών κάθετης – εφαπτομενικής αναπήδησης, εξαιρώντας τις τιμές για γωνίες πρόσπτωσης μεγαλύτερες των 60° .



Διάγραμμα 4.40. Συντελεστές κάθετης και εφαπτομενικής αναπήδησης πραβολικής ρίψης

5. ΔΟΚΙΜΕΣ ΠΕΔΙΟΥ

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται οι δοκιμές πεδίου και παρουσιάζονται τα αποτελέσματά τους. Το πείραμα εκτελέστηκε στην νοτιοδυτική πλευρά του όρους Πεντέλη, στην περιοχή του σημαντικότερου αρχαίου λατομείου της Αττικής, από όπου εξορύχθηκε το μάρμαρο για την κατασκευή του ναού του Παρθενώνα της Ακρόπολης των Αθηνών (4ος αιώνας π.Χ.). Η θέση είναι γνωστή σήμερα με την ονομασία Σπηλιά Νταβέλη.



Εικόνα 5.1. Δορυφορική άποψη της ευρύτερης περιοχής της σπηλιάς Νταβέλη.
Στο κάτω αριστερά άκρο διακρίνεται ο οικισμός της Ν. Πεντέλης

Πρόκειται για δοκιμές μέσης κλίμακας που εκτελέστηκαν σε βραχώδες τέμαχος μάρμαρου όγκου περί των 100 m^3 , τριγωνικής επιφάνειας αποκολλημένο από την φυσική του θέση. Έγινε προσπάθεια για επανάληψη του πειράματος που εκτελέστηκε στο εργαστήριο σε μεγαλύτερη κλίμακα με φυσικές συνθήκες.



Εικόνα 5.2. Πανοραμική άποψη της θέσης εκτέλεσης επί τόπου δοκιμών

5.1. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Το βραχώδες τέμαχος εμφανίζει στην άνω παρειά, σχετικά ομαλή επιφάνεια με σταθερή κλίση περί των 30° . Το μήκος της πλευράς όπου έγιναν οι ρίψεις είναι περίπου 7 m. Μπροστά από το πρανές τοποθετήθηκε τοπογραφική σταδία μήκους 4 m για ένδειξη της κλίμακας.

Κάθετα στο πρανές, και σε απόσταση περίπου 15 m, εγκαταστάθηκε η κάμερα ταχείας λήψης (§ 3.2.3) επί φωτογραφικού τριπόδου, στην οροφή βοηθητικής εγκατάστασης του σύγχρονου λατομείου (βλ. εικ. 5.3)



Εικόνα 5.3. Θέση εγκατάστασης μηχανής ταχείας λήψης

Οι ρίψεις των τεμάχων έγιναν με το χέρι, από παρακείμενο βραχώδη όγκο ή και από το ίδιο το πρανές (εικ. 5.4).



Εικόνα 5.4. Θέση ρίψης τεμαχίων

Τα τεμάχια συλλέχτηκαν από την περιοχή με κριτήρια το βάρος τους να μην υπερβαίνει τα 10 kg (ώστε να μπορούν να μεταφερθούν με ασφάλεια) και το σχήμα τους να πλησιάζει το κυβικό (ώστε να περιορισθούν οι αποκλίσεις από την εργαστηριακή δοκιμή). Διαμορφώθηκαν κατά το δυνατόν με σφυρηλάτηση (εικ. 5.5) ώστε να μην είναι πολύ γωνιώδη. Τα τεμάχια παρουσιάζονται στην εικόνα 5.6, ενώ στον πίνακα 5.1 φαίνονται οι διαστάσεις και τα βάρη τους.

Πίνακας 5.1. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά βραχοτεμαχίων

α/α	βάρος (gr)	Διαστάσεις (cm)
1	4925	16 x 11 x 13
2	4720	14 x 11 x 12
3	4245	12 x 13 x 14
4	7885	14 x 14 x 16
5	5090	16 x 15 x 12
6	8695	15 x 15 x 14



Εικόνα 5.5. Σφυρηλάτηση τεμαχών



Εικόνα 5.6. Διαμορφωμένα τεμάχια

5.2. ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΠΡΑΝΟΥΣ

Χρησιμοποιώντας τεχνικές καταρρίχησης, έγινε αποτύπωση του πρανούς. Ανά τρέχον μέτρο μήκους του, έγινε μέτρηση σκληρότητας με την σφύρα Schmidt, μέτρηση τραχύτητας με χρήση προφίλομέτρου, καθώς και μέτρηση της κλίσης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 5.2.



Εικόνα 5.7. Γεωλογική αποτύπωση πρανούς - μέτρηση σκληρότητας με την σφύρα Schmidt (αριστερά) και προφίλομέτρηση (δεξιά)

Πίνακας 5.2. Στοιχεία αποτύπωσης πρανούς

Θέση * (m)	Κλίση (°)	Τραχύτητα (JRC)	Σκληρότητα (SHV)
~0.5	30.9	6	34
~1.5	29.3	9	32
~2.5	31.7	11	30
~3.5	31.5	10	37
~4.5	29.3	12	31
~5.5	26.8	9	31

(* όπου θέση αναφοράς 0 m, το ανω άκρο του πρανούς)

5.3. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ ΔΟΚΙΜΩΝ

Για την εκτέλεση της δοκιμής η διαδικασία που ακολουθήθηκε έχει ως εξής :

- ενεργοποιείται η κάμερα ταχείας λήψεως,
- γίνονται οι απαραίτητες ρυθμίσεις σε αυτήν,
- πραγματοποιείται η ρίψη,
- αποθηκεύεται το αρχείο και μεταφέρεται σε φορητό ηλεκτρονικό υπολογιστή για τις περαιτέρω ενέργειες επεξεργασίας.

Όπως και στις δοκιμές εργαστηρίου, επιλέχθηκε η καταγραφή της εικόνας με ταχύτητα 250 λήψεων ανά δευτερόλεπτο (fps) και με ανάλυση εικόνας 640 x 480 pixel, καθιστώντας ακριβή τον προσδιορισμό της τροχιάς.

5.4. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ ΔΟΚΙΜΩΝ

5.4.1. Ανάλυση τροχιάς

Η ανάλυση της καταγραφείσας τροχιάς γίνεται μέσω του λογισμικού ανάλυσης εικόνας MaxTraQ (§ 3.5.1). Μετά την ολοκλήρωση της επεξεργασίας λαμβάνεται αρχείο μορφής .xls που εμπεριέχει πινακοποιημένα τα στοιχεία της κίνησης (αριθμός λήψης, χρόνος και συντεταγμένες x, y) για κάθε εικόνα.

5.4.2. Επεξεργασία τροχιάς

Για την επεξεργασία των στοιχείων της κίνησης (x, y, t) και την εξαγωγή των ζητούμενων μεγεθών προγραμματίστηκε η υπολογιστική διαδικασία με χρήση της εφαρμογής Microsoft Office Excel.

Η εφαρμογή διαμορφώθηκε σε ένα αρχικό φύλλο εργασίας όπου εισάγονται τα δεδομένα της συνολικής τροχιάς και στη συνέχεια κατανέμονται σε ίσα φύλλα εργασίας με τις πραγματοποιηθείσες κρούσεις.

5.4.2.1. Φύλλο δεδομένων

Στο φύλλο δεδομένων εισάγονται τα στοιχεία από το αρχείο που προκύπτει από το πρόγραμμα MaxTraQ, και συμπληρώνονται τα χαρακτηριστικά της δοκιμής (αριθμός δοκιμής, βάρος τεμάχους κ.α.).

Στη συνέχεια, καθορίζονται τα σημεία αρχής και τέλους κάθε κρούσης όπως προκύπτουν από προσεκτική παρατήρηση των διαδοχικών λήψεων.

Αυτόματα, δημιουργείται ένα φύλλο παρουσίασης (εικόνα 5.8) των γενικών στοιχείων της τροχιάς στο οποίο εισάγεται η φωτογραφία από την επεξεργασία με το λογισμικό MaxTraQ.

5.4.2.2. Φύλλο επεξεργασίας κρούσης

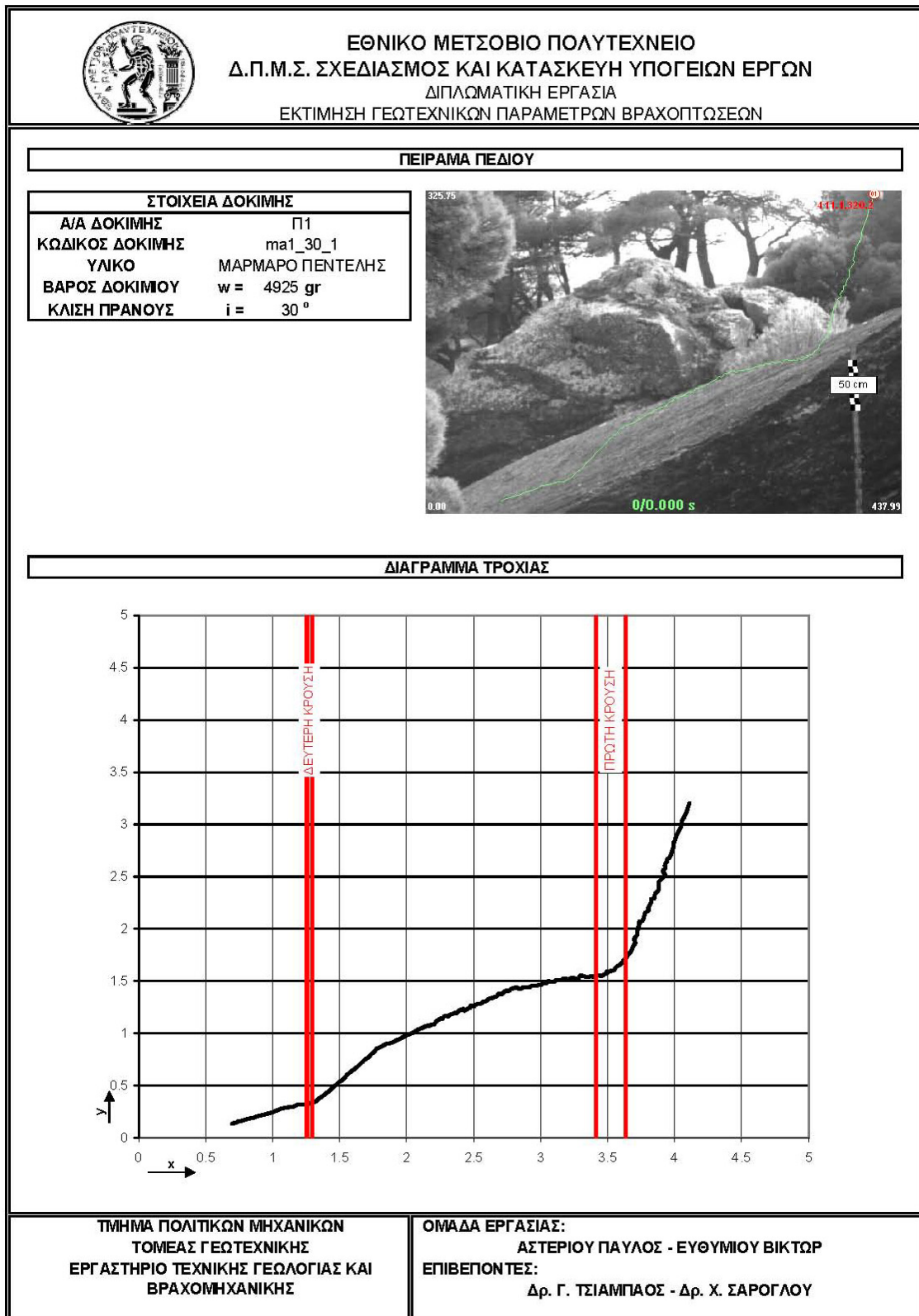
Μετά τον καθορισμό του σημείου αρχής και τέλους κάθε κρούσης στο φύλλο δεδομένων, δημιουργούνται τόσα φύλλα επεξεργασίας όσες και πραγματοποιηθείσες κρούσεις.

Για κάθε κρούση, λαμβάνονται αρκετά σημεία πριν και μετά από αυτή, ώστε να είναι δυνατή η διόρθωση της καταγραφείσας τροχιάς. Η διόρθωση – ομαλοποίηση της τροχιάς είναι απαραίτητη, διότι το τέμαχος εκτελεί μια σχεδόν χασοκή κίνηση, εξ αιτίας της περιστροφής του. Έτσι, το κέντρο βάρους διαγράφει μια πριονοειδή τροχιά, με αποτέλεσμα ο καθορισμός του στο λογισμικό επεξεργασίας MaxTraQ, να μην είναι πάντα ακριβής.

Συνεπώς, οι ταχύτητες που προκύπτουν εμφανίζουν μεγάλα άλματα εξ αιτίας του μικρού χρονικού διαστήματος βάσει του οποίου υπολογίζονται.

Επιλέχτηκε η παλινδρόμηση των συντεταγμένων x , y της τροχιάς να γίνει με δευτεροβάθμια εξίσωση ως προς τον χρόνο t (βλ. προσομοίωση παραβολικής τροχιάς § 3.5.1).

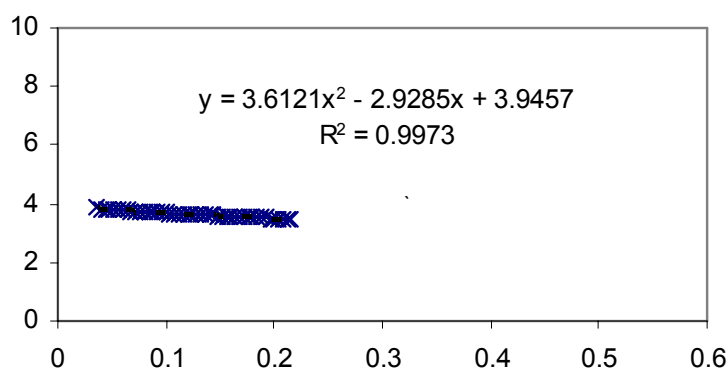
Επίσης, με την χρήση δευτεροβάθμιας εξίσωσης μετά την διόρθωση, προκύπτει γραμμική μεταβολή της ταχύτητας, και σταθερή επιτάχυνση ως προς το χρόνο για κάθε σκέλος της τροχιάς. Αφού η επιτάχυνση αποτελεί την δεύτερη παράγωγο της μετατόπισης, η οποία εκφράζεται μέσω των συντεταγμένων.



Η διόρθωση-ομαλοποίηση γίνεται αυτόματα για κάθε άξονα και κάθε σκέλος της τροχιάς ξεχωριστά. Η διαδικασία της διόρθωσης παρουσιάζεται στα φύλλα αποτελεσμάτων μέσω διαγραμμάτων (διάγραμμα 5.1) όπου φαίνεται η δευτεροβάθμια εξίσωση που χρησιμοποιήθηκε (όπως προέκυψε από την παλινδρόμηση των καταγεγραμμένων σημείων) καθώς και ο συντελεστής συσχέτισης r^2 .

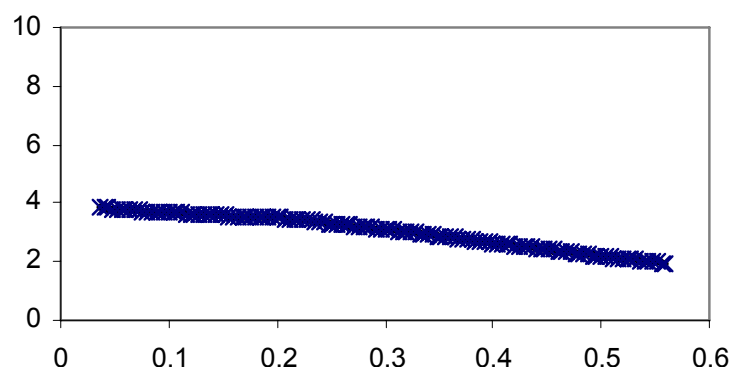
Πρέπει να τονιστεί ότι στα διαγράμματα και τις εξισώσεις αυτές, ο y άξονας αντιστοιχεί στην συντεταγμένη x ή y της κίνησης και ο x άξονας στον χρόνο t.

Επίσης στο ίδιο φύλλο παρουσιάζεται και διάγραμμα που περιέχει την τροχιά πριν και μετά την διόρθωση για κάθε άξονα (διάγραμμα 5.2).



Διάγραμμα 5.1. Διόρθωση τμήματος τροχιάς

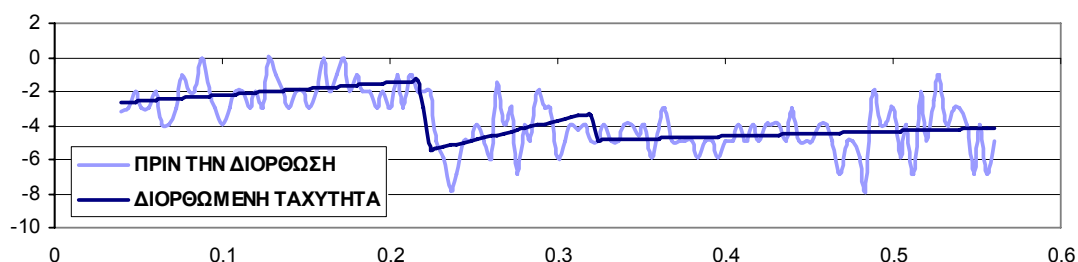
Ο συντελεστής συσχέτισης r^2 στο διάγραμμα 5.1 πλησιάζει την μονάδα, γεγονός που αποδεικνύει την πολύ καλή συσχέτιση μεταξύ της καταγραφείσας και της διορθωμένης τροχιάς.



Διάγραμμα 5.2. Ανασύνθεση τροχιάς

Το διάγραμμα 5.2 συντίθενται από τα τρία διορθωμένα σκέλη της τροχιάς, ενώ είναι σχεδιασμένη και η αρχική καταγραφή της τροχιάς. Οι καμπύλες δεν ξεχωρίζουν, γεγονός που καταδεικνύει και οπτικά την ορθή διόρθωση.

Στο διάγραμμα 5.3 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της ομαλοποίησης των συντεταγμένων ενδεικτικά, στην ταχύτητα κατά x του τεμάχους (σε σχέση με την ταχύτητα πριν την διόρθωση).



Διάγραμμα 5.3. Ταχύτητα v_x πριν και μετά την διόρθωση ως προς τον χρόνο t

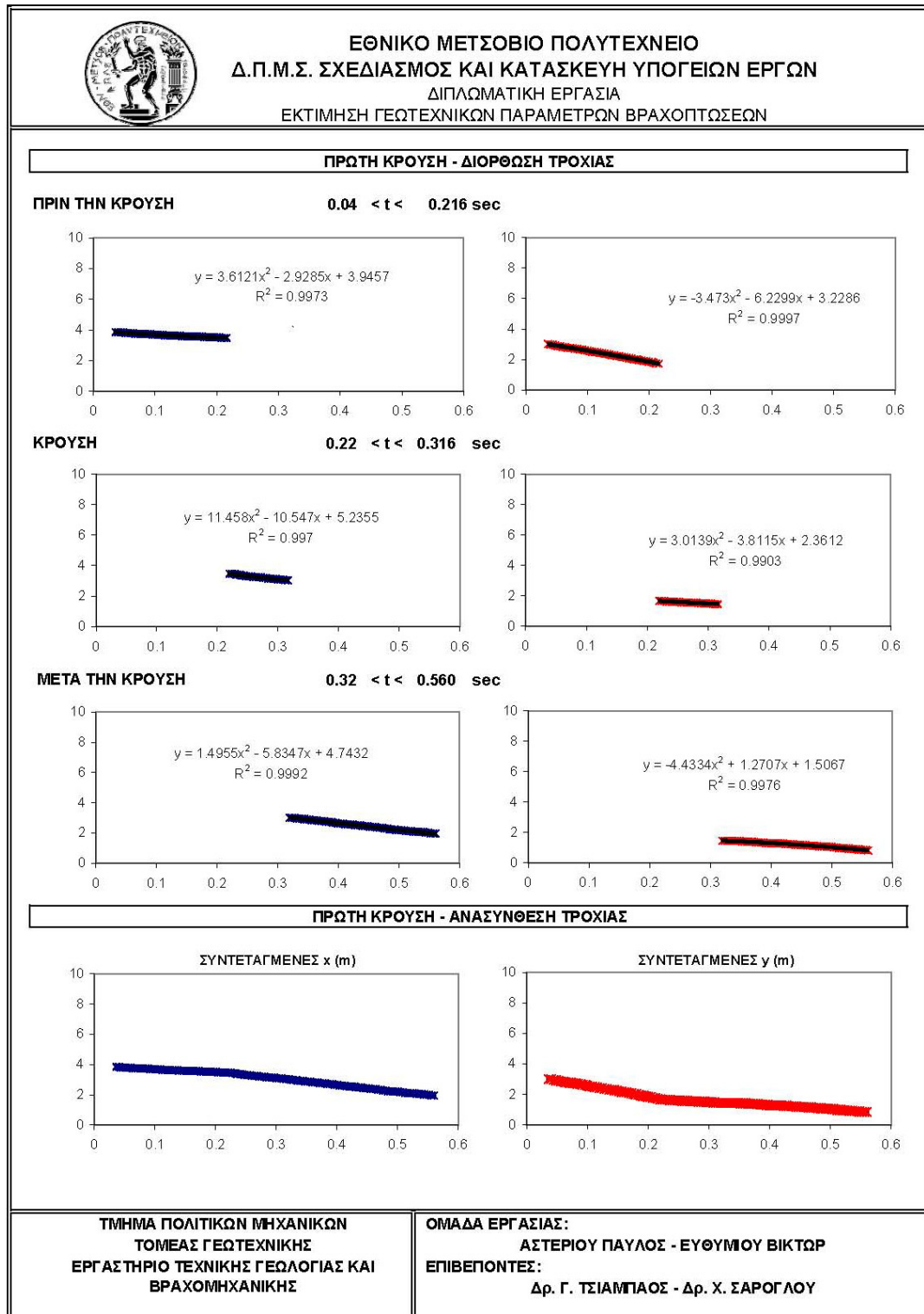
Μετά την διόρθωση των συντεταγμένων της κίνησης, γίνεται ο υπολογισμός των ταχυτήτων στο σύστημα x, y και στη συνέχεια στροφή των ταχυτήτων στο σύστημα συντεταγμένων n, t . Έπεται ο υπολογισμός των επιταχύνσεων.

Τέλος, βάσει των σημείων που έγινε η διόρθωση, υπολογίζονται αυτόματα οι ορθές και εφαπτομενικές ταχύτητες πριν και μετά την πρόσκρουση, υπολογίζεται η γωνία πρόσπτωσης και ο κάθετος και ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης.

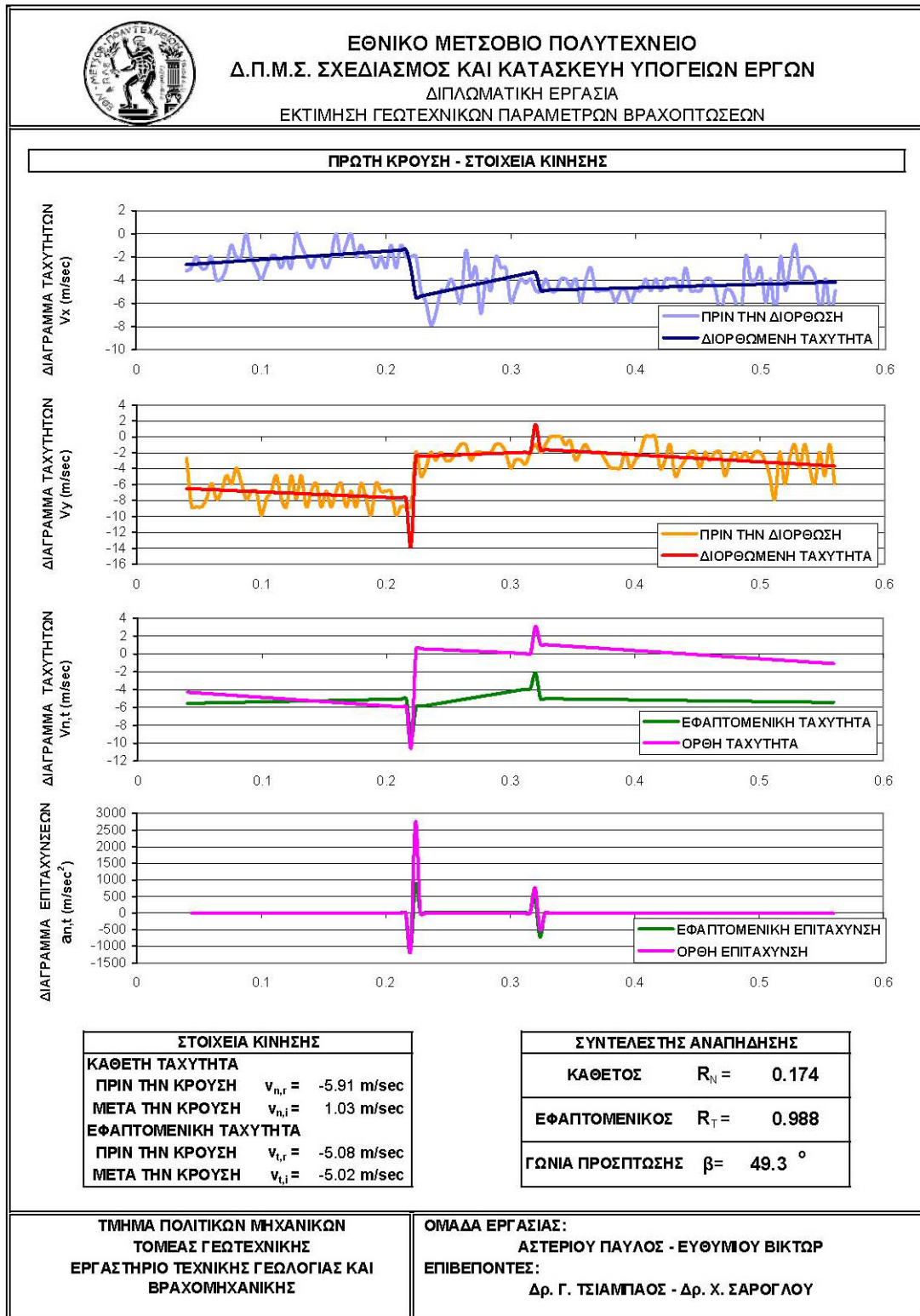
Στο δεύτερο φύλλο παρουσίασης κάθε κρούσης, φαίνονται τα ακόλουθα :

1. διάγραμμα ταχυτήτων (παρουσιάζονται οι ταχύτητες κατά τον x άξονα v_x πριν και μετά την διόρθωση).
2. διάγραμμα ταχυτήτων (παρουσιάζονται οι ταχύτητες κατά τον y άξονα v_y πριν και μετά την διόρθωση).
3. διάγραμμα ταχυτήτων (παρουσιάζονται οι ταχύτητες στο n, t σύστημα συντεταγμένων).
5. διάγραμμα επιταχύνσεων (παρουσιάζονται οι επιταχύνσεις στο n, t σύστημα συντεταγμένων).
6. οι ταχύτητες πριν και μετά την κρούση βάσει των οποίων έγιναν οι υπολογισμοί του εφαπτομενικού και του κάθετου συντελεστή αναπήδησης.
7. η γωνία πρόσπτωσης, β .
8. οι συντελεστές αναπήδησης R_n και R_t .

Στις εικόνες 5.9 και 5.10 παρουσιάζονται τα εν λόγω φύλλα.



Εικόνα 5.9. Φύλλο παρουσίασης διόρθωσης τροχιάς



Εικόνα 5.10. Φύλλο παρουσίασης αποτελεσμάτων επί τόπου δοκιμής

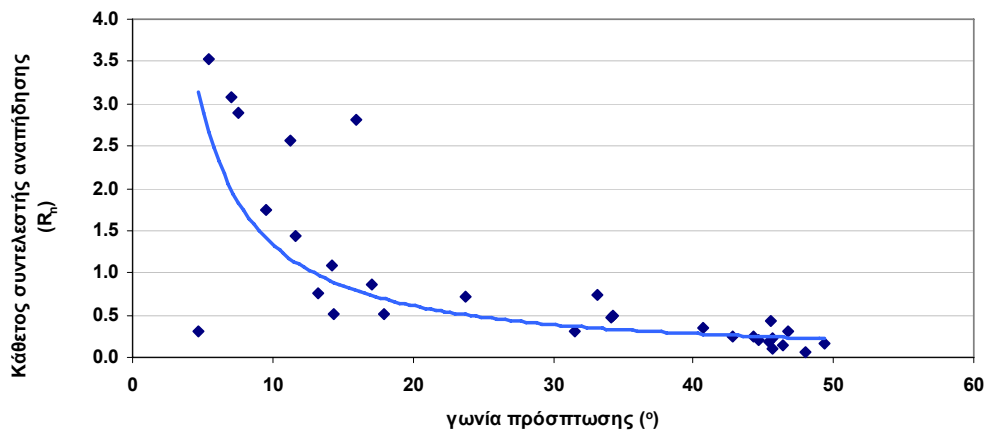
5.5. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ ΔΟΚΙΜΩΝ

Συνολικά εκτελέσθηκαν 16 ρίψεις, και αναλύθηκαν 30 κρούσεις. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα, ενώ τα αναλυτικά φύλλα βρίσκονται στο παράρτημα Β.

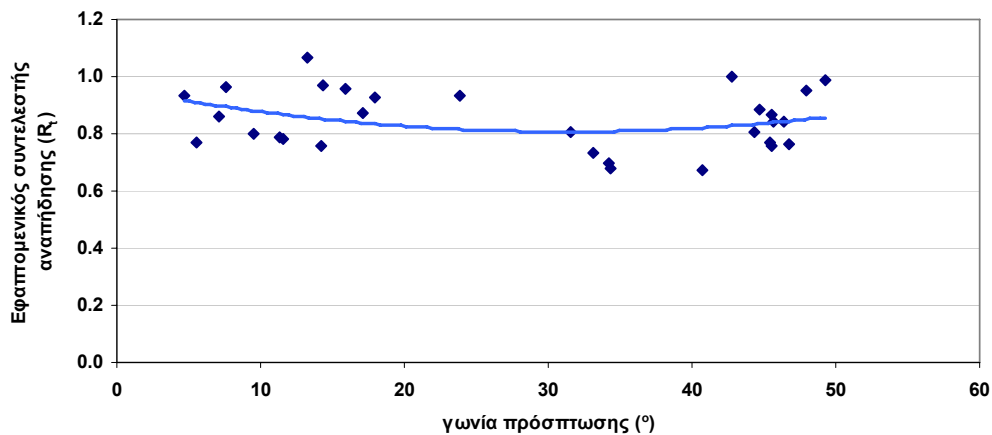
Πίνακας 5.3. Αποτελέσματα επί τόπου δοκιμών

α/α	κωδικός		$v_{n,i}$	$v_{n,r}$	$v_{t,i}$	$v_{t,r}$	β	R_n	R_t
			m/s	m/s	m/s	m/s	($^\circ$)	-	-
1	m1_30_1_	a	-5.60	1.96	-6.51	-4.39	40.7	0.351	0.675
		b	-2.61	1.86	-5.90	-5.50	23.8	0.712	0.932
2	m1_30_2_	a	-5.39	1.18	-5.27	-4.56	45.6	0.219	0.865
		b	-0.76	2.19	-5.66	-5.45	7.6	2.897	0.963
3	m2_30_1_	a	-5.91	1.03	-5.08	-5.02	49.3	0.174	0.988
		b	-1.73	1.49	-5.61	-4.91	17.1	0.860	0.875
		c	-1.82	5.15	-6.42	-6.15	15.9	2.817	0.96
4	m2_30_2_	a	-5.60	1.71	-5.26	-4.00	46.8	0.305	0.761
		b	-0.81	1.40	-4.81	-3.85	9.5	1.736	0.799
5	m3_30_1_	a	-5.45	1.40	-5.58	-4.49	44.3	0.256	0.804
		b	-1.46	1.58	-5.80	-4.39	14.2	1.077	0.757
6	m3_30_2_	a	-5.55	0.99	-5.48	-4.20	45.4	0.178	0.767
		b	-0.54	1.90	-5.62	-4.33	5.5	3.520	0.771
7	m4_30_1_	a	-5.67	0.84	-5.40	-4.55	46.4	0.149	0.842
		b	-1.04	1.49	-5.09	-3.98	11.6	1.429	0.782
8	m4_30_2_	a	-5.85	0.58	-5.70	-4.81	45.7	0.100	0.843
		b	-1.35	1.03	-5.72	-6.09	13.2	0.762	1.064
9	m5_30_1_	a	-5.95	2.56	-5.84	-4.42	45.5	0.431	0.757
10	m5_30_2_	a	-6.21	0.41	-5.59	-5.31	48	0.066	0.949
		b	-0.60	1.85	-4.79	-4.13	7.1	3.086	0.861
		c	-1.78	0.91	-5.50	-5.09	17.9	0.514	0.926
11	m6_30_1_	a	-5.54	1.42	-5.97	-5.96	42.8	0.256	0.998
		b	-1.33	0.68	-5.24	-5.06	14.3	0.509	0.967
		c	-1.27	3.24	-6.33	-5.00	11.3	2.560	0.790
12	m6_30_2_	a	-5.31	1.11	-5.36	-4.75	44.7	0.207	0.887
		b	-0.50	-0.16	-6.10	-5.70	4.7	0.315	0.934
13	m4_30_3_	a	-2.54	0.80	-4.13	-3.33	31.6	0.314	0.807
14	m4_30_4_	a	-3.34	1.61	-4.90	-3.33	34.3	0.483	0.679
15	m4_30_5_	a	-3.33	2.47	-5.10	-3.74	33.1	0.741	0.733
16	m6_30_3_	a	-3.91	1.81	-5.74	-3.99	34.2	0.464	0.695

Στα διαγράμματα 5.4 και 5.5 παρουσιάζονται οι συντελεστές κάθετης και εφαπτομενικής αναπήδησης αντίστοιχα, συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης.



Διάγραμμα 5.4. Συντελεστής κάθετης αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης



Διάγραμμα 5.5. Συντελεστής εφαπτομενικής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης

Παρατηρείται ότι ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης παραμένει σχετικά σταθερός παρουσιάζοντας ελάχιστο για γωνία πρόσπτωσης 30°.

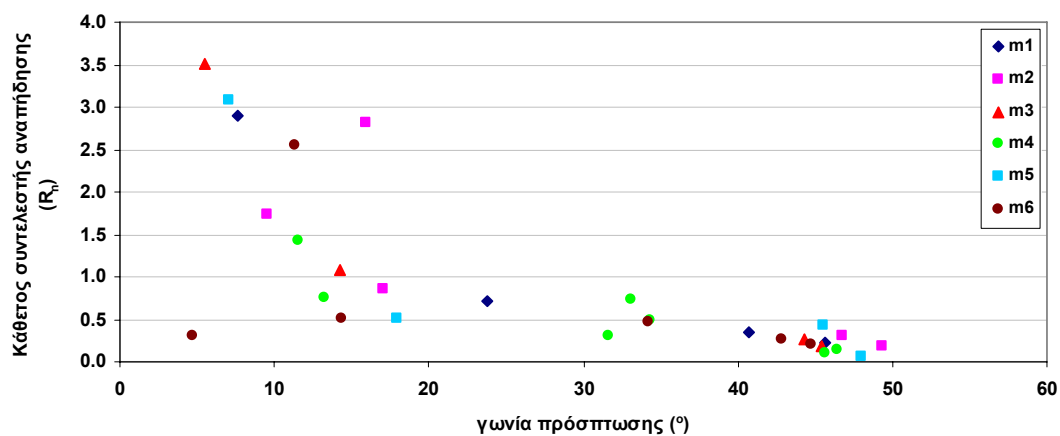
Ο συντελεστής κάθετης αναπήδησης, για τιμές γωνίας πρόσπτωσης μεγαλύτερες των 25°, εμφανίζει γραμμική μείωση με την αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης, ενώ για τιμές μικρότερες εμφανίζει υπερβολική αύξηση με ασυμπτωτική τάση ως προς τον άξονα γ .

Σύμφωνα με την θεωρία, η μέγιστη τιμή των συντελεστών αναπήδησης ισούται με την μονάδα. Στις δοκιμές εμφανίστηκαν κάποιες τιμές αρκετά μεγαλύτερες τις μονάδας, γεγονός που απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση.

Αρχικά, η θεωρία αναφέρεται σε λεία σφαιρικά τεμάχια με συγκεντρωμένη μάζα στο κέντρο βάρους σε στιγμιαία κρούση. Στις δοκιμές που εκτελέστηκαν, τα τεμάχια είχαν περίπου κυβικό σχήμα, ενώ κατά την κρούση τους στο πρανές πραγματοποιούσαν και μια μικρή κύλιση-ολίσθηση. Επίσης, η θεωρία αφορά πρόσκρουση σε λεία επιφάνεια, σε αντίθεση με το πρανές που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα, όπου υφίσταται η φυσική τραχύτητα.

Παρατηρείται ότι οι κρούσεις που εμφανίζουν συντελεστές μεγαλύτερους της μονάδας, είναι όλες δεύτερες ή τρίτες κρούσεις της ίδιας ρίψης, με αποτέλεσμα η περιστροφική ταχύτητα να είναι αυξημένη εξ αιτίας της πρώτης κρούσης. Επακόλουθο αυτού, είναι ότι οι κρούσεις αυτές έχουν μικρή κάθετη και μεγάλη εφαπτομενική ταχύτητα προ της κρούσης και κατά συνέπεια μικρή γωνία πρόσπτωσης.

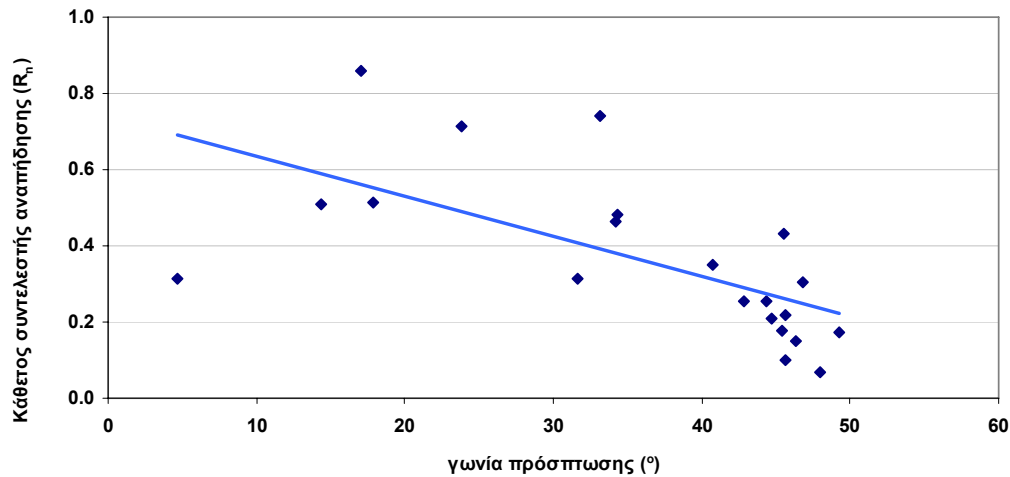
Αν και δεν υπάρχουν μεγάλες διαφορές μεταξύ των χρησιμοποιούμενων τεμαχίων, το σχήμα και το βάρος τους φαίνεται να μην επηρεάζει τον συντελεστή κάθετης αναπήδησης, αφού όπως φαίνεται και από το διάγραμμα 5.6 η ίδια τάση εμφανίζεται σε όλα τα τεμάχια.



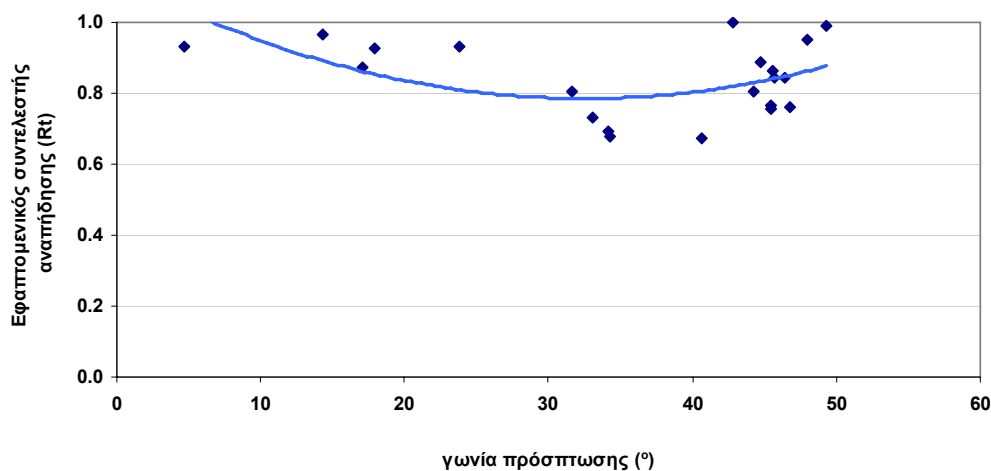
Διάγραμμα 5.6. Συντελεστής κάθετης αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης

Μια πιθανή ερμηνεία είναι ο συνδυασμός της γωνίας πρόσπτωσης με τον προσανατολισμό του τεμαχίου την στιγμή της επαφής με το πρανές, και την επίδραση της τραχύτητας τόσο του πρανούς όσο και του τεμαχίου που δύναται να προκαλέσει αλληλοεμπλοκή και άρα περιορισμό κάποιων δυνατοτήτων κίνησης.

Εξαιρώντας τις δοκιμές που έδωσαν συντελεστή αναπήδησης μεγαλύτερο της μονάδας, προκύπτουν τα ακόλουθα διαγράμματα συντελεστών αναπήδησης – γωνίας πρόσπτωσης.



Διάγραμμα 5.7. Συντελεστής κάθετης αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης



Διάγραμμα 5.8. Συντελεστής εφαπτομενικής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης

Στο επόμενο κεφάλαιο, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων της δοκιμής πεδίου, με τις δοκιμές που εκτελέστηκαν στο εργαστήριο, και διατυπώνονται οι αιτίες της συμπεριφοράς αυτής, καθώς και τα συμπεράσματα.

6. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

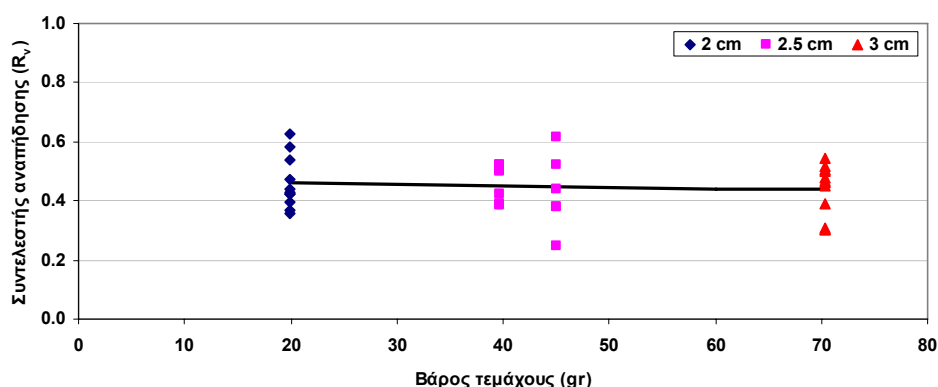
Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια συνολική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των δοκιμών εργαστηρίου και πεδίου, που εκτελέστηκαν στα πλαίσια της έρευνας που έγινε στο εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Βραχομηχανικής του Ε.Μ.Π., με σκοπό την μελέτη του φαινομένου των καταπτώσεων σε βραχώδεις σχηματισμούς. Το σύνολο των αποτελεσμάτων των δοκιμών αναπτύσσεται λεπτομερειακά στα τεύχη των διπλωματικών εργασιών με τίτλους : Διερεύνηση Χαρακτηριστικών Τροχιάς Καταπτώσεων σε Βραχώδη Πρανή – «Επίδραση Κινηματικών Παραμέτρων» και «Επίδραση Γεωτεχνικών Παραμέτρων» με συντάκτες τους Αστερίου Παύλο και Ευθύμιου Βίκτωρ, αντίστοιχα. Όπως αναφέρεται και στην εισαγωγή του παρόντος τεύχους το σύνολο των πειραματικών δοκιμών εκτελέστηκε σε συνεργασία των δύο συντακτών.

Η αξιολόγηση αφορά στα αποτελέσματα 30 σειρών δοκιμών, και συγκεκριμένα 277 πειραμάτων στο εργαστήριο, και 16 πειραμάτων στο πεδίο.

6.1. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΜΑΖΑΣ ΣΤΟΝ ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ

Εξετάσθηκε η επίδραση της μάζας (και κατά συνέπεια του μεγέθους) του τεμάχους στον συνολικό συντελεστή αναπήδησης, εκτελώντας δοκιμές ελεύθερης πτώσης σε οριζόντιο επίπεδο.

Εκτελέστηκαν τρεις σειρές δοκιμών με ίδιες συνθήκες (ύψος πτώσης, κλίση επιπέδου πρόσκρουσης, μορφή τεμάχους) αλλά με διαφορετική μάζα τεμάχους. Στο διάγραμμα 6.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.



Διάγραμμα 6.1. Συνολικός συντελεστής αναπήδησης (από τη σχέση ταχυτήτων) συναρτήσει του βάρους του τεμάχους

Από το διάγραμμα φαίνεται, ότι δεν προκύπτει κάποια επίδραση της μάζας (με μέγιστη αναλογία μαζών 3.5:1) στον συνολικό συντελεστή αναπήδησης. Οπτικά η γραμμή τάσης μπορεί να παρουσιάζει μία ανεπαίσθητη μείωση με την αύξηση της μάζας, όμως η διασπορά των τιμών είναι τέτοια που δεν επιτρέπει την διατύπωση ασφαλούς συμπεράσματος.

Ο Kamijo (2000), μετά από εκτέλεση δοκιμών με δύο τεμάχια βράχου βάρους 220 και 800 kg (αναλογία μαζών ~4:1), διατύπωσε ότι ο συνολικός συντελεστής αναπήδησης μειώνεται με την αύξηση της μάζας.

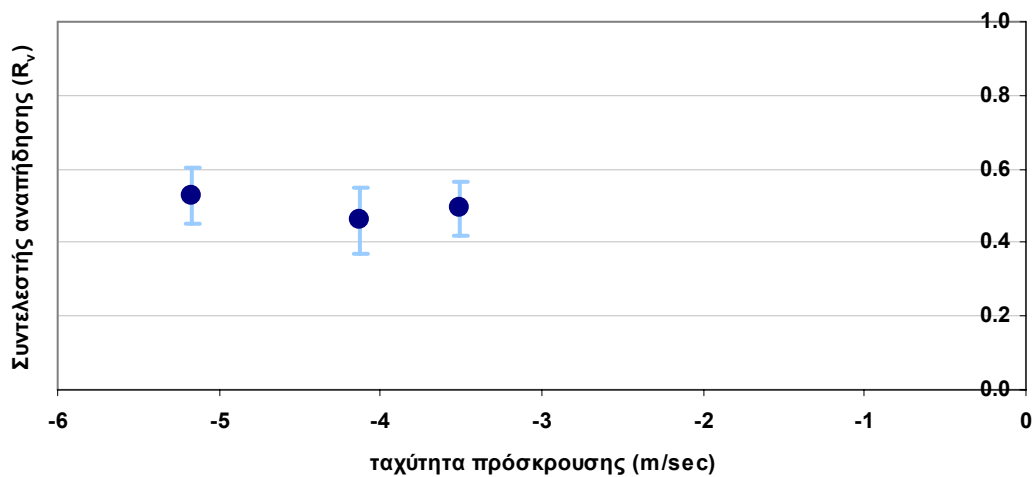
Δοκιμές προσδιορισμού της επίδρασης της μάζας στον κάθετο και εφαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης, δεν έγιναν στα πλαίσια της παρούσης έρευνας, δεδομένου ότι τα πειράματα που εκτελέστηκαν σε κεκλιμένο επίπεδο πρόσκρουσης και με παραβολική ρίψη του τεμάχους έγιναν για σταθερή μάζα.

Αναφορικά με τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης R_n οι Chau et al. (1999-b) εκτελώντας δοκιμές εργαστηρίου με τρεις διαφορετικές μάζες (βλ. σχήμα 2.8), έδειξαν ότι με την αύξηση του βάρους εμφανίζεται μία ελαφρά μείωση του συντελεστή, χωρίς όμως να είναι σαφής για όλες τις τιμές της κλίσης του επιπέδου πρόσκρουσης. Η ασάφεια αυτή παρατηρείται σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό για τον εφαπτομενικό συντελεστή R_t .

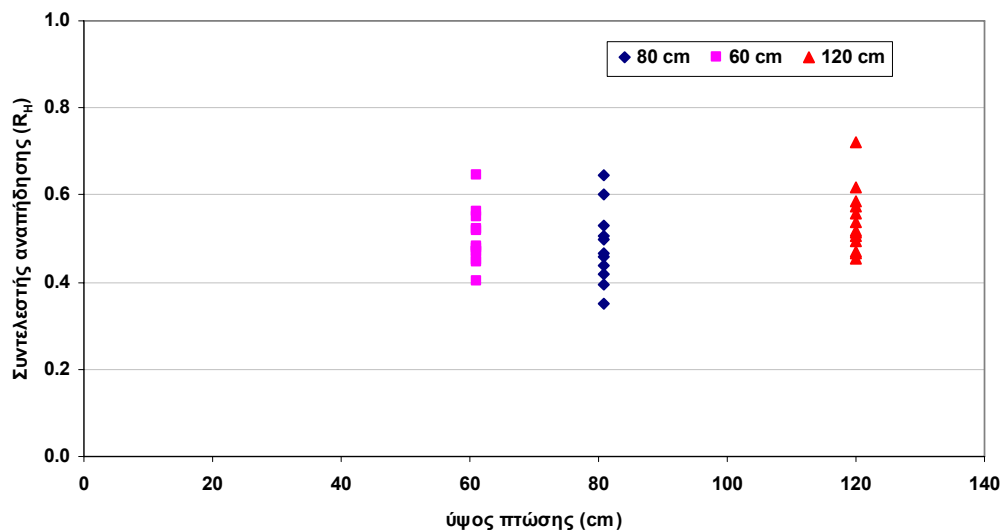
Στο συμπέρασμα ότι ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης R_n μειώνεται με την αύξηση της μάζας, κατέληξαν και οι Ushiro et Al. (2000).

6.2. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ ΣΤΟΝ ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ

Εξετάστηκε η επίδραση της ταχύτητας πρόσκρουσης στον συνολικό συντελεστή αναπήδησης, εκτελώντας τρεις σειρές δοκιμών με διαφορετικό ύψος πτώσης για κάθε δοκιμή (60, 80 και 120 cm). Οι λοιπές συνθήκες, όπως το οριζόντιο επίπεδο πρόσκρουσης, η μάζα και η μορφή του τεμάχους ήταν σταθερές. Τα συνολικά αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται στα διαγράμματα 6.2 και 6.3.



Διάγραμμα 6.2. Μέσος όρος και τυπική απόκλιση συντελεστή αναπήδησης R_v συναρτήσει της ταχύτητας πρόσκρουσης



Διάγραμμα 6.3. Συνολικός συντελεστής αναπήδησης R_H συναρτήσει του ύψους πτώσης

Βάσει των αποτελεσμάτων, φαίνεται ότι ο συνολικός συντελεστής αναπήδησης δεν επηρεάζεται από την ταχύτητα πρόσκρουσης, για τα εύρη των ταχυτήτων που εξετάσθηκαν.

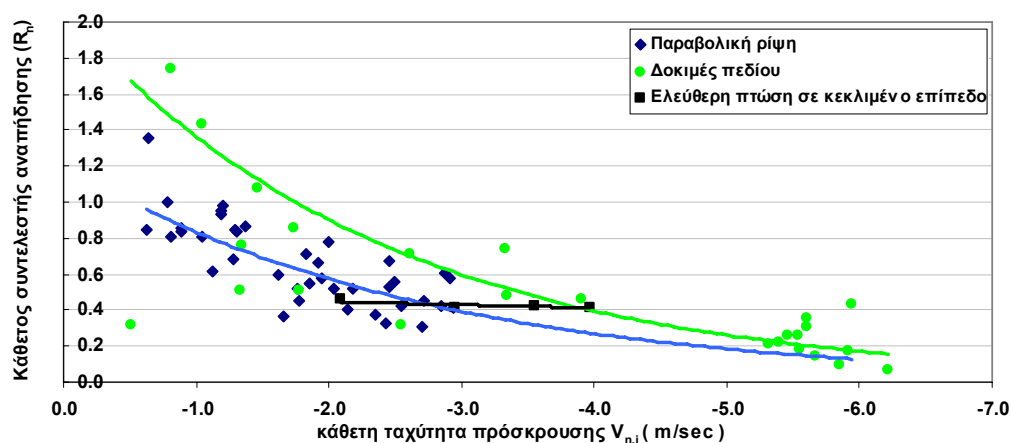
Ο Kamiyo (2000) διατύπωσε ότι ο συνολικός συντελεστής αναπήδησης μειώνεται με την αύξηση της ταχύτητας πρόσκρουσης, χωρίς να δίνει όμως σχέση υπολογισμού.

6.3. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ ΣΤΟΥΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΚΑΘΕΤΗΣ ΚΑΙ ΕΦΑΠΤΟΜΕΝΙΚΗΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ

Δεν εκτελέστηκαν δοκιμές αποκλειστικά για την επίδραση της ταχύτητας πρόσκρουσης στον κάθετο και εφαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης.

Όμως, η ταχύτητα πρόσκρουσης υπολογίσθηκε για κάθε είδους δοκιμής που εκτελέστηκε τόσο στο εργαστήριο, όσο και στο πεδίο. Στο διάγραμμα 6.4 παρουσιάζεται ο συντελεστής κάθετης αναπήδησης συναρτήσει της κάθετης συνιστώσας της ταχύτητας για τις δοκιμές ελεύθερης πτώσης σε κεκλιμένο επίπεδο, τις δοκιμές παραβολικής ρίψης, καθώς και τις δοκιμές πεδίου.

Στις δοκιμές ελεύθερης πτώσης σε κεκλιμένο επίπεδο η κίνηση είναι μόνο μεταφορική (δεν υπάρχει γωνιακή ταχύτητα), σε αντίθεση με τις δοκιμές παραβολικής ρίψης όπου υφίσταται και περιστροφή (αναπτύσσεται και γωνιακή ταχύτητα). Στις δοκιμές πεδίου η ταχύτητα είναι μεταφορική και περιστροφική, ενώ υπεισέρχονται και άλλες παράμετροι όπως η τραχύτητα του πρανούς, η μάζα και το μέγεθος του τεμάχους, κ.α. Συνεπώς, τα αποτελέσματα δεν είναι απόλυτα συγκρίσιμα μεταξύ των διαφόρων τύπων δοκιμών.



Διάγραμμα 6.4. Κάθετος συντελεστής αναπήδησης R_n συναρτήσει της κάθετης ταχύτητας πρόσκρουσης

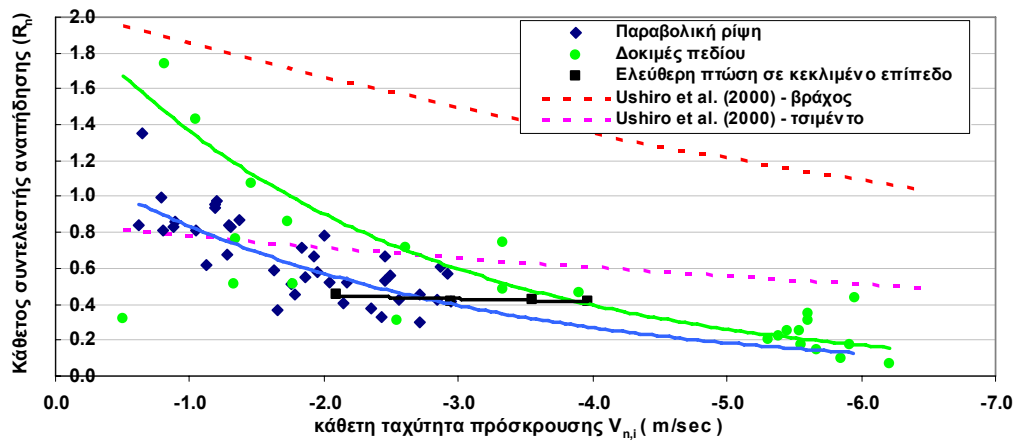
Παρατηρείται μείωση του κάθετου συντελεστή αναπήδησης με την αύξηση της κάθετης συνιστώσας της ταχύτητας πρόσκρουσης για κάθε είδος δοκιμής. Όπου και προκύπτει εκθετική συσχέτιση του συντελεστή αναπήδησης με την ταχύτητα πρόσκρουσης.

Η μείωση του συντελεστή κάθετης αναπήδησης με την αύξηση της ταχύτητας πρόσκρουσης, που προσδιορίστηκε από τις δοκιμές ελεύθερης πτώσης σε κεκλιμένο επίπεδο είναι μικρή ενώ η διασπορά των τιμών είναι τέτοια που δεν επιτρέπει την διατύπωση συμπεράσματος. Σε συνδυασμό με τις δοκιμές προσδιορισμού του συνολικού συντελεστή αναπήδησης (§ 6.2) φαίνεται ότι στις δοκιμές ελεύθερης πτώσης, δηλαδή χωρίς αρχική γωνιακή ταχύτητα, δεν επηρεάζεται ο συντελεστής από την ταχύτητα.

Εξετάζοντας την δοκιμή παραβολικής ρίψης και την δοκιμή πεδίου, παρατηρείται εκθετική μείωση του κάθετου συντελεστή αναπήδησης με την αύξηση της ταχύτητας πρόσκρουσης. Από τις δοκιμές πεδίου προκύπτουν υψηλότερες τιμές σε σχέση με τις δοκιμές παραβολικής ρίψης. Αυτό δεν είναι το αναμενόμενο, σύμφωνα με την βιβλιογραφία, δεδομένου ότι αφενός η σκληρότητα του γεωυλικού στο πεδίο ήταν μικρότερη και αφετέρου η τραχύτητα της επιφάνειας πρόσκρουσης μεγαλύτερη από ότι στο εργαστήριο, αναμένονταν μικρότερες τιμές του κάθετου συντελεστή αναπήδησης για τις δοκιμές πεδίου.

Αυτό μπορεί να αποδοθεί είτε στο φαινόμενο κλίμακας, είτε στην περιστροφή του τεμαχούς προ της κρούσης χωρίς να μπορεί να τεκμηριωθεί απόλυτα, αφού δεν υπήρχε δυνατότητα μέτρησής της, είτε και στα δύο. Στις δοκιμές πεδίου η περιστροφική ταχύτητα των τεμαχών για μικρές ταχύτητες πρόσκρουσης ήταν πολύ μεγαλύτερη από αυτή που παρατηρήθηκε στο εργαστήριο.

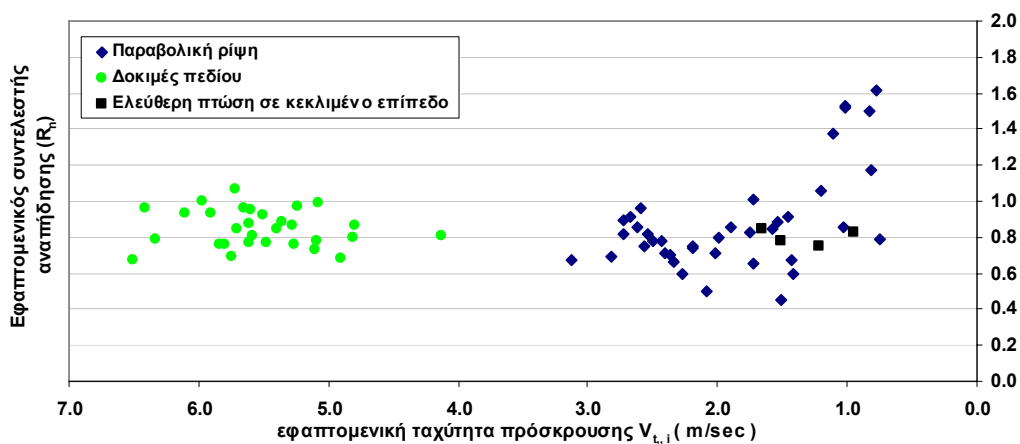
Στο διάγραμμα 6.5 εμφανίζονται οι τιμές κατά Ushiro et al. (2000), που προέκυψαν από δοκιμές που εκτέλεσαν σε βραχώδεις και επιφάνειες πρόσκρουσης και σε επιφάνειες από τσιμέντο. Οι Ushiro et. al. (2000) καταλήγουν ότι ο συντελεστής εφαιπτομενικής αναπήδησης (R_t) είναι ανεξάρτητος της ταχύτητας, ενώ για το κάθετο συντελεστή αναπήδησης (R_n) παρατηρείται εκθετική μείωση με την αύξηση της ταχύτητας πρόσκρουσης (βλ. σχήμα 2.7). Δίδονται δυο σχέσεις ανάλογα με το υλικό, γεγονός που παραπέμπει στην εξάρτηση του συντελεστή αναπήδησης και από την σκληρότητα του υλικού, χωρίς όμως να υπάρχουν λεπτομέρειες για την σκληρότητα των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην εν λόγω έρευνα.



Διάγραμμα 6.5. Κάθετος συντελεστής αναπήδησης R_n συναρτήσει της κάθετης ταχύτητας πρόσκρουσης

Σχετικά με τον κάθετο και τον εφαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης ο Urciuoli (1988) αναφέρει ότι και οι δύο μειώνονται με την αύξηση της ταχύτητας πρόσκρουσης (βλ. σχήμα 2.6), με τον εφαπτομενικό να έχει πιο απότομη μεταβολή σχετικά με τον κάθετο, για μικρές ταχύτητες.

Τα εύρη των εφαπτομενικών ταχυτήτων δεν συμπίπτουν για τις δυο δοκιμές, και άρα δεν δύναται να γίνει μεταξύ τους σύγκριση. Πάντως, από το διάγραμμα 6.6 επαληθεύεται το συμπέρασμα των Urciuoli et al (1988).

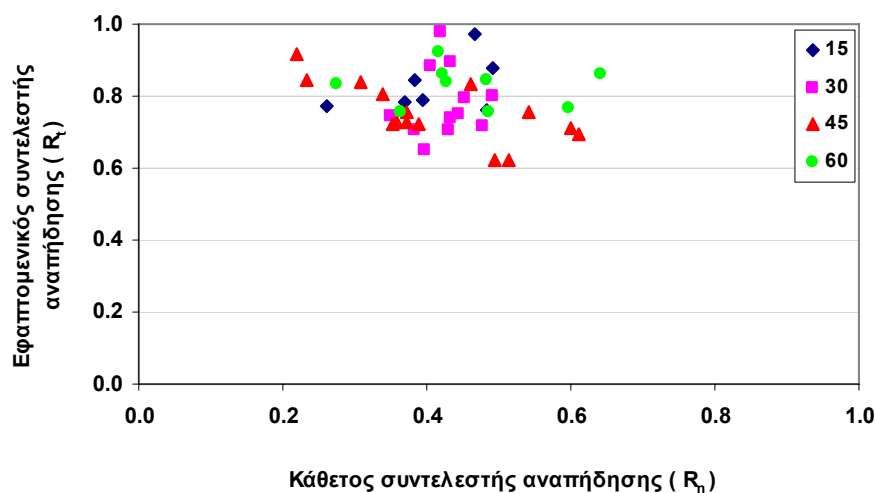


Διάγραμμα 6.6. Εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης R_t συναρτήσει της εφαπτομενικής ταχύτητας πρόσκρουσης

6.4. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΓΩΝΙΑΣ ΚΛΙΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ ΣΤΟΥΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ

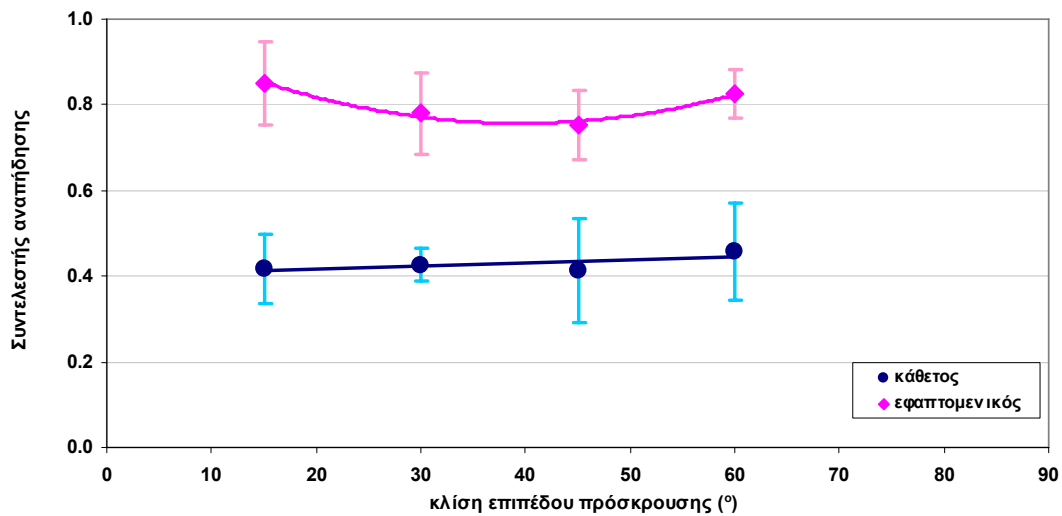
Έγιναν δοκιμές που στόχο είχαν την αξιολόγηση της επίδρασης της κλίσης του επιπέδου πρόσκρουσης. Στη δοκιμή το τέμαχος αφήνεται από σταθερό ύψος, εκτελώντας ελεύθερη πτώση μέχρι την στιγμή της κρούσης στο κεκλιμένο επίπεδο. Για δοκιμές ελεύθερης πτώσης, όπως έχει ήδη προαναφερθεί, η γωνία κλίσης του επιπέδου πρόσκρουσης είναι συμπληρωματική της γωνίας πρόσπτωσης. Έτσι είναι δυνατή μία ταυτόχρονη αξιολόγηση και της επίδραση της γωνίας πρόσπτωσης. Εκτελέστηκαν 60 δοκιμές, για κλίσεις επιπέδου πρόσκρουσης 15° , 30° , 45° και 60° , από ύψος πτώσης 80 cm με λειασμένο κυβικό τέμαχος μαρμάρου, ακμής 2.05 cm και βάρους 20.97 gr (m_{a4}).

Στο διάγραμμα 6.7 φαίνονται συγκεντρωτικά οι τιμές των συντελεστών αναπήδησης (R_n, R_t) που προέκυψαν από τις δοκιμές. Παρατηρείται ότι για κλίσεις επιπέδου πρόσκρουσης 15° και 30° , η συγκέντρωση των σημείων είναι ικανοποιητική, ενώ για κλίσεις 45° και 60° εμφανίζεται μεγάλη διασπορά.



Διάγραμμα 6.7. Συντελεστές κάθετης και εφαπτομενικής (R_n, R_t) αναπήδησης για τις διάφορες κλίσεις του επιπέδου πρόσκρουσης (15° έως 60°)

Στο διάγραμμα 6.8 παρουσιάζονται οι συντελεστές κάθετης και εφαπτομενικής αναπήδησης κάθε σειράς δοκιμών, εκφρασμένοι από τον μέσο όρο και την τυπική απόκλιση, συναρτήσει της κλίσης του επιπέδου πρόσκρουσης.



Διάγραμμα 6.8. Μέσος όρος και τυπική απόκλιση συντελεστών αναπήδησης για τις διάφορες κλίσεις του επιπέδου πρόσκρουσης

Παρατηρείται ότι ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης (R_t) παρουσιάζει ελάχιστη τιμή για κλίση επιπέδου πρόσκρουσης περί των 40° . Η τάση του κάθετου συντελεστή αναπήδησης (R_n) είναι δύσκολο να ερμηνευθεί αφού οι τιμές για κλίσεις επιπέδου πρόσκρουσης 45° και 60° έχουν μεγάλη διασπορά. Όμως, φαίνεται μία μικρή γραμμική αύξηση του συντελεστή αυτού με την αύξηση της κλίσης του επιπέδου πρόσκρουσης.

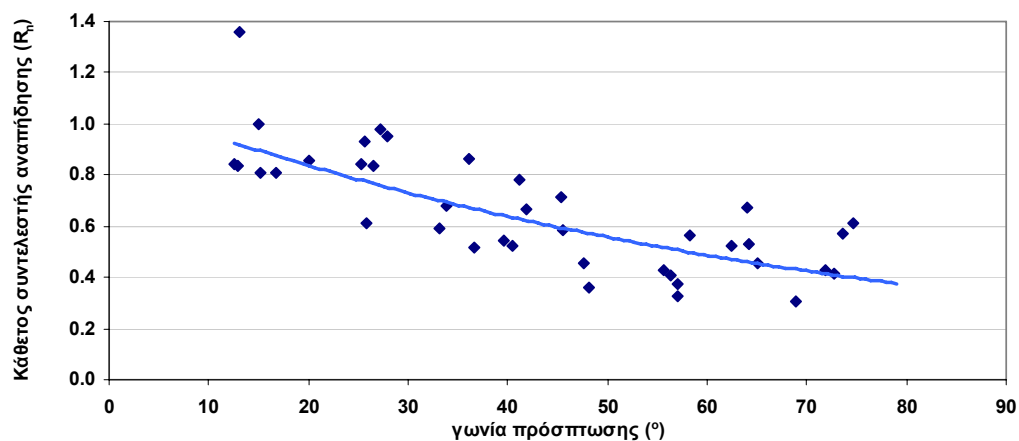
Ο Wong (2000), σε δοκιμές που εκτέλεσε σε αντίστοιχη πειραματική διάταξη, δήλωσε ότι με την αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης (ή αντίστοιχα τη μείωση της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης) ο συντελεστής κάθετης αναπήδησης (R_n) μειώνεται, ενώ για τον εφαπτομενικό (R_t) δήλωσε ότι είτε είναι ανεξάρτητος ή εμφανίζει μια μικρή μείωση.

Οι Chau et. Al. (1999) είπαν ότι για κλίσεις επιπέδου μεταξύ 30° και 50° ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης (R_n) είναι ανεξάρτητος του σχήματος του τεμάχους, αλλά για κλίσεις μεγαλύτερες αυξάνει για κυβικά και εξαγωνικά τεμάχη και παραμένει σταθερός για σφαιρικά ή κυλινδρικά τεμάχη. Ενώ, ο συντελεστής εφαπτομενικής αναπήδησης είναι ανεξάρτητος της κλίσης του επιπέδου πρόσκρουσης, εξαρτάται από το σχήμα του τεμάχους, όπου για σφαιρικό ή κυλινδρικό σχήμα λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές από ότι για κυβικό ή εξαγωνικό.

6.5. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΓΩΝΙΑΣ ΠΡΟΣΠΤΩΣΗΣ

Στις δοκιμές που έγιναν για την αξιολόγηση της επίδρασης της γωνίας πρόσπτωσης, το τέμαχος αφήνεται υπό γωνία, ώστε να εκτελέσει παραβολική τροχιά, και να προσκρούσει στην επιφάνεια με διάφορες γωνίες πρόσπτωσης. Σε αυτή τη σειρά δοκιμών η διαφοροποίηση έγκειται στο γεγονός ότι το τέμαχος εκτελεί παραβολική τροχιά, έχοντας αποκτήσει αρχική ταχύτητα (μεταφορική και περιστροφική). Εκτελέστηκαν 40 δοκιμές, από δυο διαφορετικές αρχικές γωνίες εξόδου, με την επιφάνεια πρόσκρουσης σε κλίσεις 0° , 15° , 30° και 45° , για λειασμένο κυβικό τέμαχος μαρμάρου, ακμής 2.07 cm και βάρους 19.58 gr (m_{a5}).

Στα διαγράμματα 6.9 και 6.10 παρουσιάζονται οι συντελεστές κάθετης και εφαπτομενικής αναπήδησης αντίστοιχα σαν συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης.



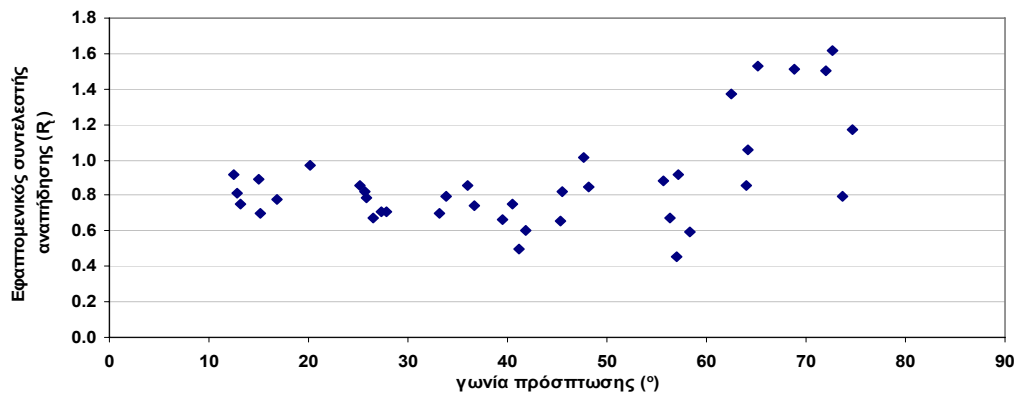
Διάγραμμα 6.9. Συντελεστής κάθετης αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης

Ο συντελεστής κάθετης αναπήδησης εμφανίζει πτωτική τάση με την αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης. Η παρατήρηση αυτή, συμφωνεί με τις δοκιμές ελεύθερης πτώσης σε κεκλιμένο επίπεδο.

Η βέλτιστη συσχέτιση επιτυγχάνεται με την εκθετική σχέση:

$$R_n = 0.29 \times e^{-1.10 \times \cos\beta} \quad (6.1)$$

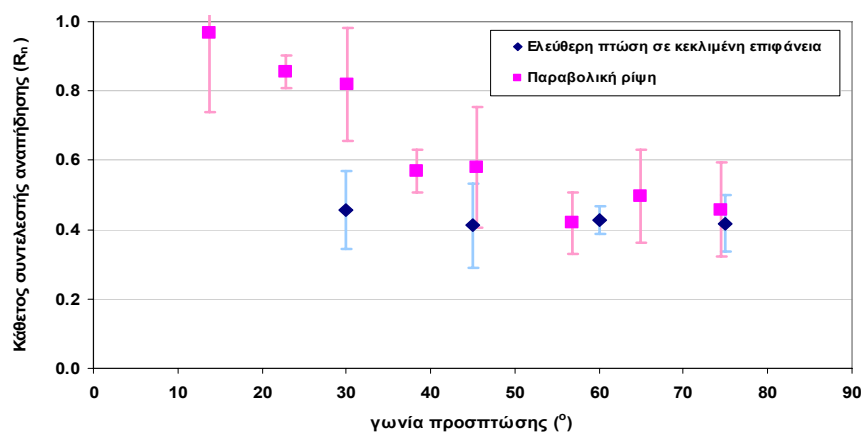
Ο συντελεστής συσχέτισης της παραπάνω σχέσης είναι $r^2 = 0.58$ συνεπώς η συσχέτιση δεν είναι ικανοποιητική και άρα χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.



Διάγραμμα 6.10. Συντελεστής εφαπτομενικής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης

Για γωνίες πρόσπτωσης μικρότερες των 60° , ο συντελεστής εφαπτομενικής αναπήδησης φαίνεται να διατηρεί μία σταθερή τιμή, ενώ για γωνίες μεγαλύτερες των 60° , λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες της μονάδας. Μια πιθανή εξήγηση μπορεί να είναι η γωνιακή ταχύτητα του τεμάχου, η οποία βάσει της χρησιμοποιούμενης μεθόδου ανάλυσης αγνοείται.

Συγκρίνοντας τις δοκιμές παραβολικής ρίψης με τις δοκιμές ελεύθερης πτώσης σε κεκλιμένο επίπεδο αναφορικά με την γωνία πρόσπτωσης, παρατηρείται ότι και στα δύο είδη δοκιμών ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης μειώνεται με την αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης (διάγραμμα 6.11). Οι τιμές ταυτίζονται για γωνίες πρόσπτωσης μεγαλύτερες των 55° , αλλά για γωνίες πρόσπτωσης έως 55° οι τιμές διαφοροποιούνται σημαντικά με την μείωση της γωνίας πρόσπτωσης.



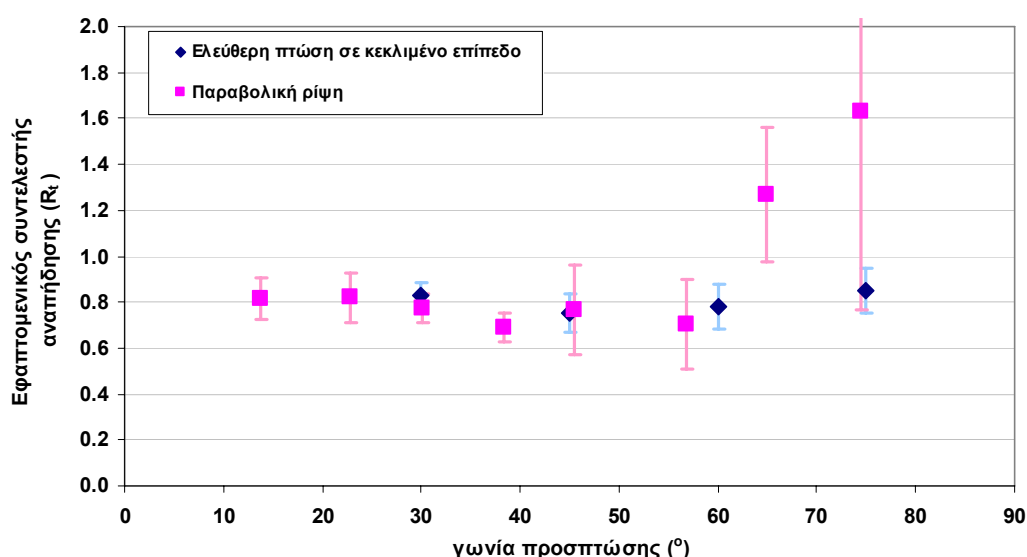
Διάγραμμα 6.11. Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης (δοκιμές ελ. πτώσης σε κεκλιμένο επίπεδο - παραβολικής ρίψης)

Μεταξύ των δυο τύπων δοκιμών η μόνη διαφοροποίηση είναι η γωνιακή ταχύτητα την στιγμή της κρούσης, η οποία είναι πρακτικά μηδενική στις δοκιμές ελεύθερης πτώσης σε κεκλιμένο επίπεδο σε αντίθεση με τις δοκιμές παραβολικής ρίψης.

Συνεπώς, συμπεραίνεται ότι η γωνιακή ταχύτητα την στιγμή της κρούσης είναι μείζονος σημασίας για τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης σε μικρές γωνίες πρόσκρουσης.

Στο διάγραμμα 6.12 παρουσιάζεται ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης για τις δοκιμές παραβολικής ρίψης και τις δοκιμές ελεύθερης πτώσης σε κεκλιμένο επίπεδο σαν συνάρτηση της γωνίας πρόσκρουσης.

Για τιμές γωνίας πρόσκρουσης έως 60° παρατηρείται ότι οι τιμές συμπίπτουν για τις δυο δοκιμές. Για μεγαλύτερες γωνίες, η τιμές διαφοροποιούνται, με την δοκιμή παραβολικής ρίψης να δίνει τιμές μεγαλύτερες της μονάδας με σημαντική διασπορά.



Διάγραμμα 6.12. Εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης (δοκιμές ελεύθερης πτώσης σε κεκλιμένο επίπεδο - παραβολικής ρίψης)

Η διασπορά των τιμών είναι τέτοια που δεν επιτρέπει την διατύπωση ασφαλούς συμπεράσματος για γωνίες πρόσπτωσης μεγαλύτερες των 60° .

Για γωνίες πρόσπτωσης έως 60° συμπεραίνεται ότι ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης είναι ανεξάρτητος αφενός της γωνίας πρόσπτωσης και αφετέρου της γωνιακής ταχύτητας του τεμάχου την στιγμή της κρούσης.

Για την διερεύνηση της επίδρασης της γωνίας πρόσπτωσης η σύγκριση των δοκιμών παραβολικής ρίψης με τις δοκιμές πεδίου είναι δόκιμη, αφού και στα δύο είδη δοκιμών υπάρχει γωνιακή ταχύτητα την στιγμή της κρούσης. Οι δοκιμές διαφοροποιούνται στις παρακάτω συνθήκες.

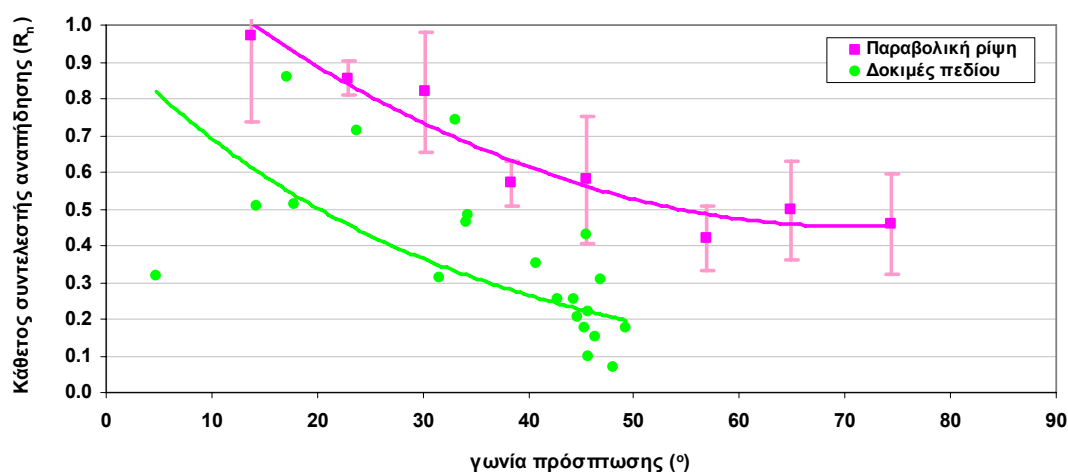
Στις δοκιμές πεδίου υπεισέρχεται η τραχύτητα της επιφάνειας πρόσκρουσης, σε αντίθεση με τις δοκιμές παραβολικής ρίψης, όπου η επιφάνεια πρόσκρουσης είναι λεία.

Η σκληρότητα της επιφάνειας πρόσκρουσης του πεδίου είναι μικρότερη, λόγω αποσάθρωσης, από αυτή της εργαστηριακής δοκιμής.

Αναφορικά με τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης (διάγραμμα 6.13), παρατηρείται ότι η τάση των ευθειών συσχέτισης είναι όμοια, δηλαδή μείωση του κάθετου συντελεστή αναπήδησης με την αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης.

Επίσης, οι ευθείες συσχέτισης είναι σχεδόν παράλληλες μεταξύ τους και απέχουν κατά 0.35 περίπου, με τις τιμές που προέκυψαν από τις δοκιμές παραβολικής ρίψης να είναι μεγαλύτερες.

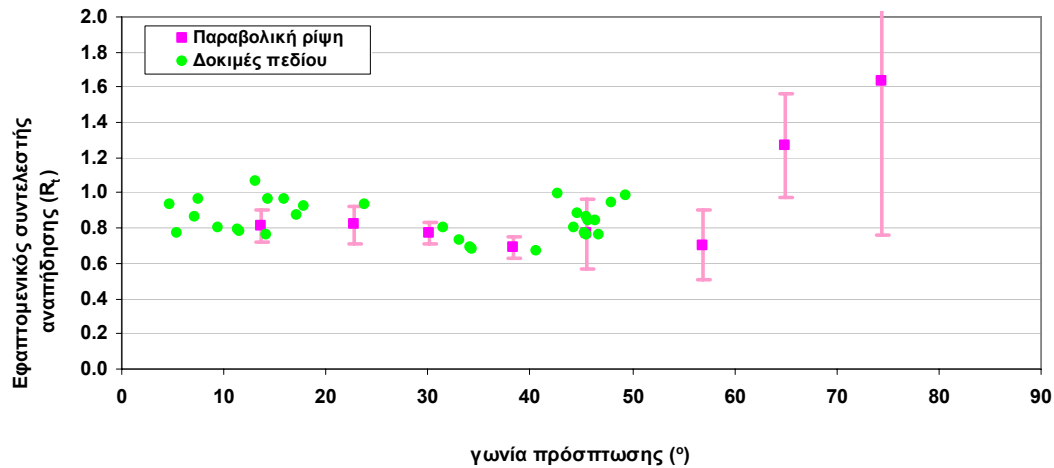
Αυτό συμφωνεί με τα συμπεράσματα παλαιότερων ερευνών, αφού τόσο η αύξηση της τραχύτητας όσο και η μείωση της σκληρότητας, μειώνουν τον συντελεστή αναπήδησης.



Διάγραμμα 6.13. Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης (δοκιμές παραβολικής ρίψης – πεδίου)

Ο επαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης φαίνεται να ταυτίζεται (διάγραμμα 6.14) στο κοινό εύρος τιμών για τους δυο τύπους δοκιμών.

Συμπεραίνεται συνεπώς ότι ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης είναι ανεξάρτητος της γωνίας πρόσπτωσης.



Διάγραμμα 6.14. Εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσεως της γωνίας πρόσπτωσης (δοκιμές παραβολικής ρίψης – πεδίου)

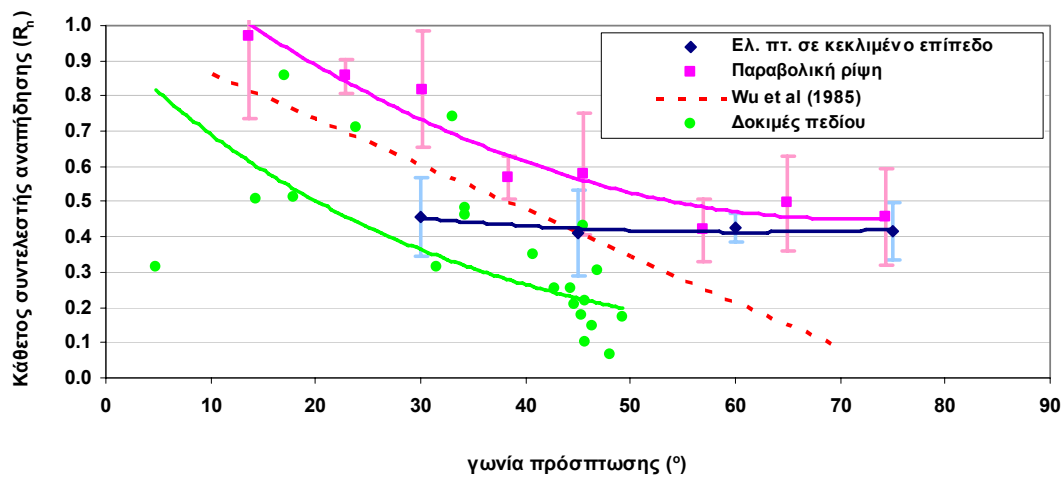
Η διασπορά των τιμών που πρόεκυψαν από τις δοκιμές πεδίου είναι μεγαλύτερη. Κάτι αναμενόμενο αφού οι τοπικές συνθήκες κατά την κρούση (κλίση, τραχύτητα, σκληρότητα, θέση τεμάχους) εμφανίζουν μεγάλες διαφοροποιήσεις από θέση σε θέση.

Ο Ritchie (1963) διατύπωσε ότι η απώλεια ενέργειας αυξάνει με την αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης, δηλαδή με την αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης παρατηρείται μείωση της αναπήδησης, συμπέρασμα στο οποίο καταλήγει και ο Gerber (1995).

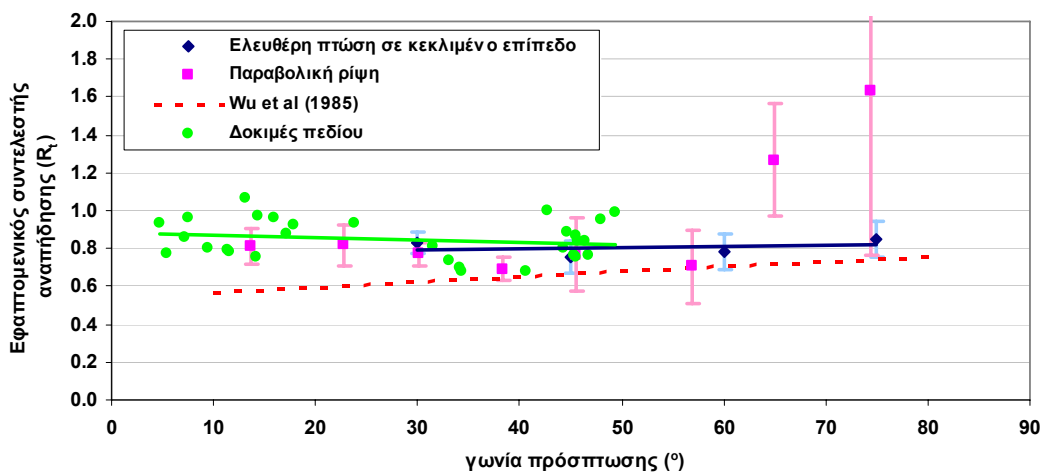
Από την παρούσα ερευνητική εργασία τα παραπάνω συμπεράσματα επαληθεύονται (διαγράμματα 6.11 και 6.13) για τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης.

Ο Wu (1985) συμπέρανε ότι με την αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης παρατηρείται μείωση του κάθετου συντελεστή αναπήδησης και αύξηση του εφαπτομενικού (βλ. σχήμα 2.5).

Εκτελώντας δοκιμές πεδίου καθώς και εργαστηρίου, πρότεινε τις σχέσεις 2.10 και 2.11 οι οποίες αποτυπώνονται στα διαγράμματα 6.15 και 6.16 για τον κάθετο και εφαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης



Διάγραμμα 6.15. Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης (δοκιμές ελεύθερης πτώσης σε κεκλιμένο επίπεδο, παραβολικής ρίψης και πεδίου, συσχέτιση με τη σχέση που πρότεινε ο Wu (1985))



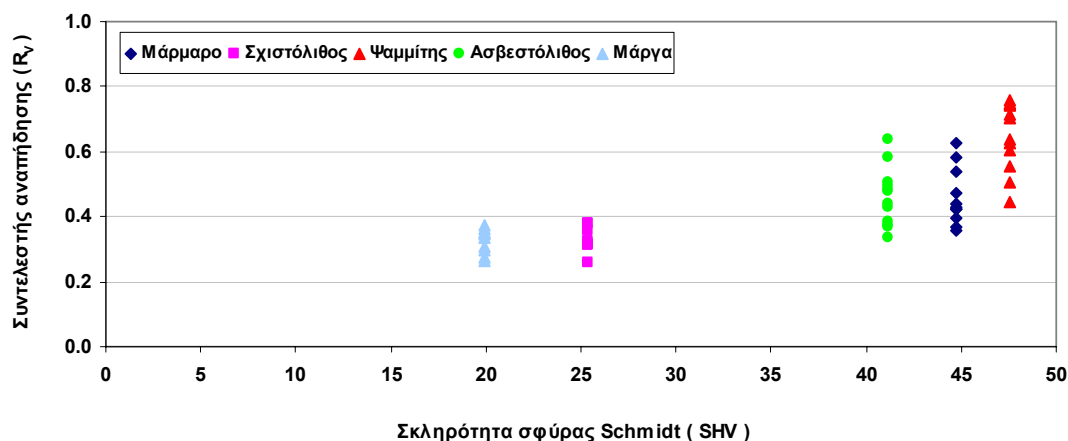
Διάγραμμα 6.16. Εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης (δοκιμές ελεύθερης πτώσης σε κεκλιμένο επίπεδο, παραβολικής ρίψης και πεδίου, συσχέτιση με τη σχέση που πρότεινε ο Wu (1985))

Ο Brioli (1974) είπε ότι για μικρές γωνίες πρόσπτωσης, κοντά στις 15°, αναπτύσσεται μεγάλη περιστροφή κατά την κρούση με αποτέλεσμα την αύξηση της ορθής ταχύτητας, και άρα την αύξηση του συντελεστή κάθετης αναπήδησης. Αυτό είναι ικανό να δικαιολογήσει τις τιμές μεγαλύτερες τις μονάδας, που παρατηρήθηκαν για τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης στις δοκιμές παραβολικής ρίψης και στις δοκιμές πεδίου.

6.6. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

Εκτελέσθηκαν σειρές δοκιμών για την αξιολόγηση της επίδρασης των φυσικών χαρακτηριστικών των βραχοτεμαχίων στους συντελεστές αναπήδησης. Οι δοκιμές εκτελέστηκαν με πέντε γεωυλικά του ελλαδικού χώρου (μάρμαρο, σχιστόλιθος, χαλαζιακός ψαμμίτης, ασβεστόλιθος, μάργα). Προσδιορίστηκε ο συνολικός συντελεστής αναπήδησης, εκτελώντας σειρές δοκιμές ελεύθερης πτώσης σε οριζόντιο επίπεδο. Στη συνέχεια, προσδιορίστηκαν οι συντελεστές κάθετης και εφαπτομενικής αναπήδησης εκτελώντας δύο σειρές δοκιμών ελευθερής πτώσης σε επίπεδα πρόσκρουσης κλίσης 30° και 60° . Το ύψος πτώσης για όλες τις παραπάνω σειρές δοκιμών ήταν 80 cm, ενώ για όλα τα γεωυλικά, χρησιμοποιήθηκαν κυβικά τεμάχια ακμής ~ 2 cm με λειασμένες κορυφές και ακμές.

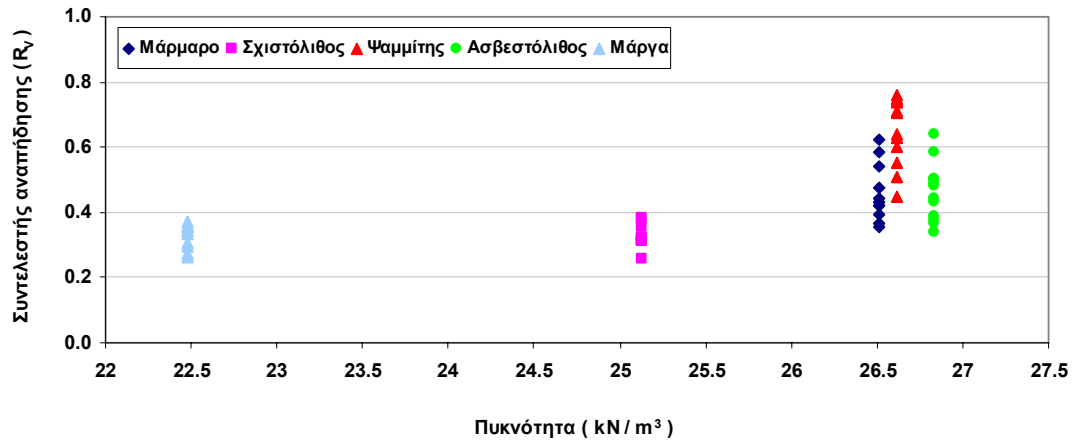
Στο διάγραμμα 6.17 όπου παρουσιάζονται οι τιμές του συνολικού συντελεστή αναπήδησης R_v από τις δοκιμές για τα πέντε υλικά (όπως προέκυψαν από τις σχέσεις ταχυτήτων) συναρτήσει της σκληρότητας σφύρας Schmidt, παρατηρείται αύξηση του συντελεστή αναπήδησης με την αύξηση της σκληρότητας του γεωυλικού.



Διάγραμμα 6.17. Συνολικός συντελεστής αναπήδησης R_v , συναρτήσει της σκληρότητας σφύρας Schmidt

Στο διάγραμμα 6.18 παρουσιάζονται οι τιμές του συνολικού συντελεστή αναπήδησης R_v συναρτήσει της πυκνότητας ρ του υλικού. Αν και οι τιμές εμφανίζουν σημαντική διασπορά, η οποία αυξάνεται με την αύξηση της πυκνότητας. Παρατηρείται ότι με την αύξηση με της πυκνότητας του υλικού αυξάνεται και ο συντελεστής αναπήδησης.

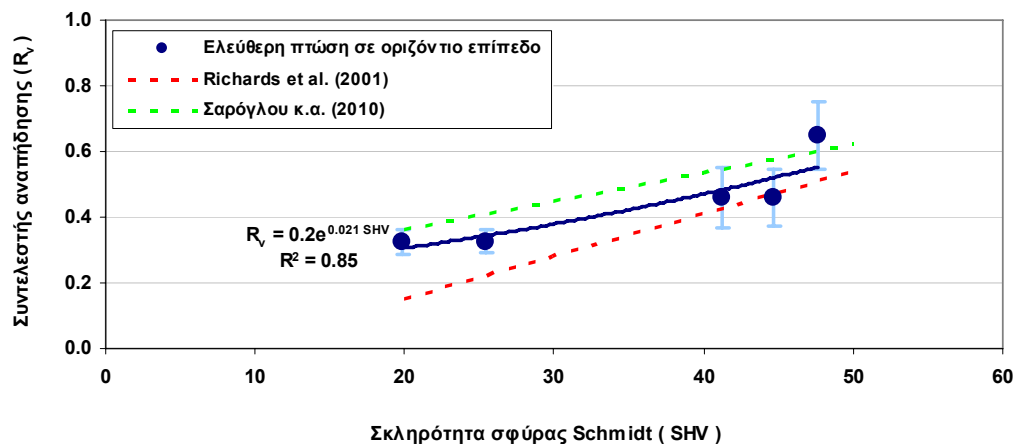
Όμως εξ αίτιας των τιμών που προκύπτουν για τον ψαμμίτη, απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση.



Διάγραμμα 6.18. Συνολικός συντελεστής αναπήδησης R_v , συναρτήσεϊ της πυκνότητας του γεωυλικού

Στην βιβλιογραφία αναφέρονται δυο συσχετίσεις του συντελεστή αναπήδησης με την σκληρότητα αναπήδησης (σχέσεις 2.15 και 2.17) οι οποίες αποτυπώνονται στο διάγραμμα 6.19.

Παρατηρείται ότι οι τιμές που υπολογιστήκαν στην παρούσα έρευνα βρίσκονται σε καλή συσχέτιση με τις προτεινόμενες, από την βιβλιογραφία, σχέσεις.



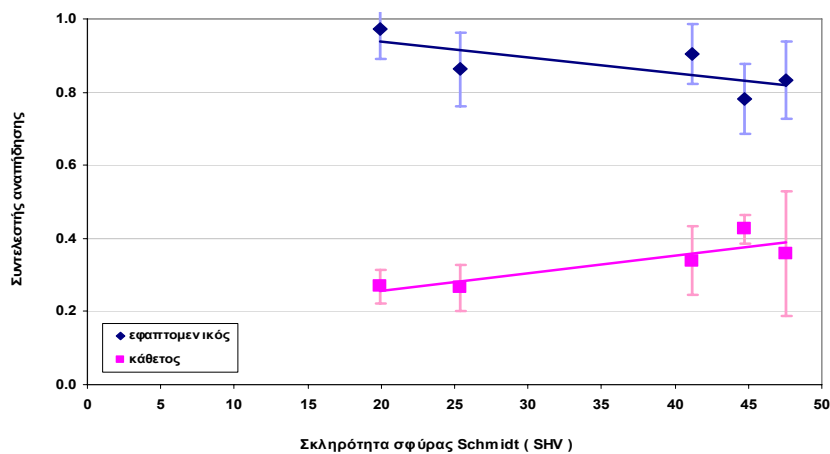
Διάγραμμα 6.19. Συσχετίσεις συντελεστή αναπήδησης συναρτήσεϊ της σκληρότητας σφύρας Schmidt

Η καλύτερη δυνατή συσχέτιση των δύο αυτών παραμέτρων περιγράφεται από την εκθετική σχέση:

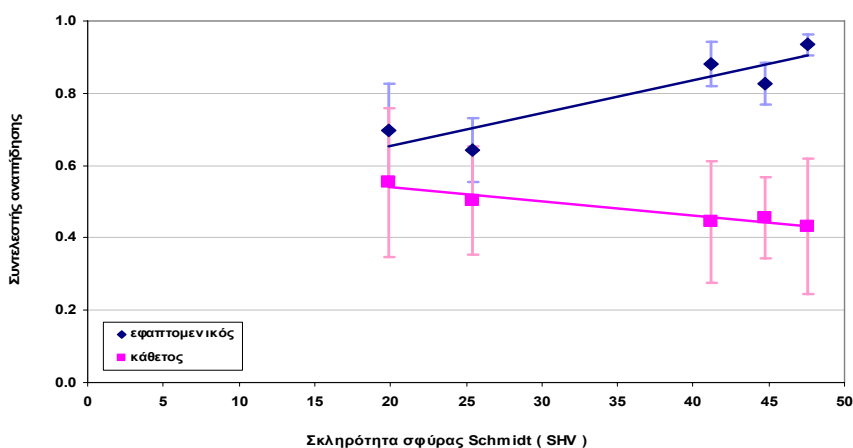
$$R_v = 0.2 \times e^{0.021 \times SHV} \quad (6.2.)$$

Ο συντελεστής συσχέτισης R^2 της παραπάνω σχέσης ισούται με 0.85.

Στα διαγράμματα 6.20 και 6.21 παρουσιάζονται οι μέσοι όροι και οι τυπικές αποκλίσεις των συντελεστών κάθετης και εφαπτομενικής αναπήδησης συναρτήσει της σκληρότητας στην σφύρα Schmidt, για τις δοκιμές με κλίση επίπεδου πρόσκρουσης 30° και 60° αντίστοιχα.



Διάγραμμα 6.20. Μέσος όρος και τυπική απόκλιση συντελεστών αναπήδησης συναρτήσει της πυκνότητας του γεωυλικού, (επίπεδο πρόσκρουσης 30°)



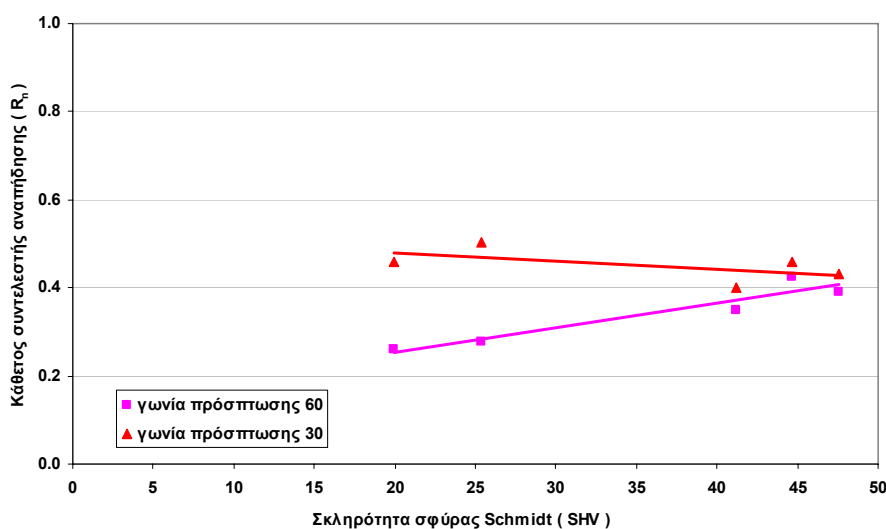
Διάγραμμα 6.21. Μέσος όρος και τυπική απόκλιση συντελεστών αναπήδησης συναρτήσει της πυκνότητας του γεωυλικού (επίπεδο πρόσκρουσης 60°)

Παρατηρείται ότι ο συντελεστής κάθετης αναπήδησης αυξάνει με την αύξηση της σκληρότητας του υλικού για πρόσκρουση σε επίπεδο υπό γωνία 30° , ενώ μειώνεται για πρόσκρουση σε επίπεδο κλίσης 60° . Αντίστοιχα, ο συντελεστής εφαπτομενικής αναπήδησης μειώνεται με την αύξηση της σκληρότητας για πρόσκρουση σε επίπεδο υπό γωνία 30° ενώ αυξάνεται για πρόσκρουση σε επίπεδο κλίσης 60° .

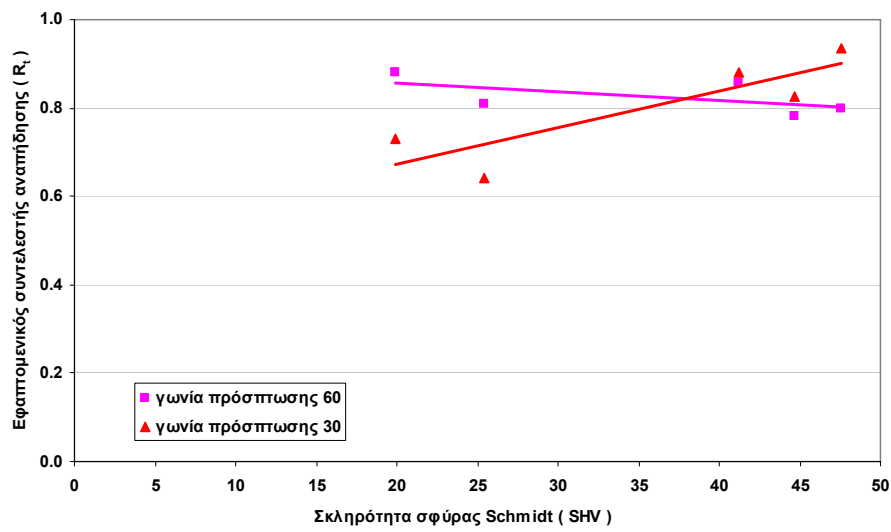
Συμπεραίνεται ότι εκτός της σκληρότητας του υλικού επιδρά σημαντικά η κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης στον κάθετο και εφαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης. Ο τρόπος που αυτά επιδρούν στις τιμές των συντελεστών δεν μπορεί να καθορισθεί στην παρούσα έρευνα, αφενός εξ αιτίας της μεγάλης διασποράς που εμφανίζουν οι τιμές και αφετέρου εξ αιτίας του μεγάλου απαιτούμενου πλήθους δοκίμων που απαιτεί ένα τέτοιο συμπέρασμα.

Οι Wong et Al. (2000) διατύπωσαν ότι ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης μειώνεται με την αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης. Η επίδραση της κλίσης μειώνεται με την αύξηση της σκληρότητας του υλικού. Από το διάγραμμα 6.22, επαληθεύεται η σχέση αυτή.

Αντίστοιχα, διατυπώθηκε ότι ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης δεν εμφανίζει κάποια συστηματική σχέση μεταξύ σκληρότητας και γωνίας πρόσπτωσης, όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας (διάγραμμα 6.23).



Διάγραμμα 6.22. Κάθετος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της σκληρότητας σφύρας Schmidt (γωνίες πρόσπτωσης 30° και 60°)



Διάγραμμα 6.23. Εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της σκληρότητας σφύρας Schmidt (γωνίες πρόσπτωσης 30° και 60°)

7. ΣΥΝΟΨΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται συγκεντρωτικά και εν συντομία τα συμπεράσματα της έρευνας, που έγινε στο εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Βραχομηχανικής του Τομέα Γεωτεχνικής του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π., με σκοπό την μελέτη του φαινομένου των καταπτώσεων σε βραχώδεις σχηματισμούς. Η έρευνα αυτή, που εκτελέστηκε για πρώτη φορά στον ελλαδικό χώρο, εκπονήθηκε από τους μεταπτυχιακούς φοιτητές Αστερίου Παύλο και Ευθυμίου Βίκτωρ στα πλαίσια ολοκλήρωσης του προγράμματος σπουδών του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Εργών».

Με βάση την παρούσα έρευνα προέκυψε το εύρος των τιμών των συντελεστών αναπήδησης βραχοτεμαχίων χαρακτηριστικών πετρωμάτων και γίνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

7.1. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1.1. Συνολικός συντελεστής αναπήδησης

Από τις δοκιμές ελεύθερης πτώσης σε οριζόντιο επίπεδο πρόσκρουσης, όπου προσδιορίστηκε ο συνολικός συντελεστής διαπιστώθηκε ότι η αναπήδηση είναι ανεξάρτητη της μάζας του τεμάχους που αναπηδά και της ταχύτητας που έχει κατά την στιγμή της πρόσκρουσης, και κατά συνέπεια και της κινητικής του ενέργειας.

Υπολογίσθηκε ο συνολικός συντελεστής αναπήδησης για ασβεστόλιθο, μάρμα, ψαμμίτη, μάρμαρο και σχιστόλιθο με τιμές που φαίνονται στον πίνακα 7.1.

7.1.2. Κάθετος συντελεστής αναπήδησης

Ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης προσδιορίστηκε από τις δοκιμές ελεύθερης πτώσης σε κεκλιμένο επίπεδο για όλα τα εξεταζόμενα γεωυλικά (με κλίση επιπέδου 30° και 60°, ενώ για το μάρμαρο έγιναν και για κλίση επιπέδου 15° και 45°), καθώς και από τις δοκιμές παραβολικής ρίψης και τις δοκιμές πεδίου που έγιναν ειδικά για το μάρμαρο.

Από την συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων προέκυψε ότι ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης εξαρτάται από την γωνιακή ταχύτητα, την ταχύτητα πρόσκρουσης, και την κλίση του επιπέδου πρόσκρουσης.

Για μηδενική γωνιακή ταχύτητα την στιγμή της πρόσκρουσης (δοκιμές ελεύθερης πτώσης σε κεκλιμένο επίπεδο), ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης παρουσιάζει πολύ μικρή μείωση με την αύξηση της ταχύτητας πρόσκρουσης και αντίστοιχα με την αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης (ή μείωση της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης).

Για μη μηδενική γωνιακή ταχύτητα (δοκιμές παραβολικής ρίψης, δοκιμές πεδίου) ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης μειώνεται εκθετικά με την αύξηση της ταχύτητας πρόσκρουσης και την αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης.

Ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης που υπολογίστηκε στο πεδίο για το μάρμαρο ήταν μικρότερος κατά 0.35, από αυτόν που υπολογίστηκε στο εργαστήριο για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης. Αυτό συμφωνεί με τα συμπεράσματα παλαιότερων ερευνών, αφού τόσο η αύξηση της τραχύτητας όσο και η μείωση της σκληρότητας, μειώνουν τον συντελεστή αναπήδησης

Βάσει των συνθηκών των δοκιμών, επαληθεύεται ότι ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης αυξάνεται με την αύξηση της σκληρότητας του γεωυλικού. Επίσης, από τις δοκιμές πεδίου προκύπτει ότι αυξάνεται με τη μείωση της τραχύτητας της επιφάνειας πρόσκρουσης.

Εξ αίτιας των μικρών μεταβολών στον κάθετο συντελεστή αναπήδησης για τις δοκιμές χωρίς γωνιακή ταχύτητα, δύναται να χρησιμοποιηθεί η δοκιμή για τον υπολογισμό κάποιας σταθεράς υλικού, η οποία σε συνδυασμό με συσχετίσεις θα οδηγήσει στην απόκτηση τιμών όπου θα υπεισέρχεται και η επίδραση των άλλων παραμέτρων. Με το σκεπτικό αυτό, δίνονται στον πίνακα 7.1 προτεινόμενες τιμές του κάθετου συντελεστή αναπήδησης, για κάθε υλικό, που προέκυψαν από την στατιστική επεξεργασία των δοκιμών ελεύθερης πτώσης σε κεκλιμένη επιφάνεια χωρίς να γίνεται διάκριση της κλίσης του επιπέδου.

7.1.3. Εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης

Ομοίως, ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης προσδιορίστηκε από τις δοκιμές ελεύθερης πτώσης σε κεκλιμένο επίπεδο (με κλίση επιπέδου 30° και 60° , ενώ για το μάρμαρο έγιναν και για κλίση επιπέδου 15° και 45°), καθώς και από τις δοκιμές παραβολικής ρίψης και τις δοκιμές πεδίου για το Μάρμαρο.

Για μηδενική γωνιακή ταχύτητα την στιγμή της πρόσκρουσης (δοκιμές ελεύθερης πτώσης σε κεκλιμένο επίπεδο), ο επαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης εμφανίζει ελάχιστη τιμή για γωνία πρόσπτωσης περίπου 50° .

Από τις δοκιμές με γωνιακή ταχύτητα φαίνεται ότι ο επαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης είναι ανεξάρτητος, τόσο της γωνίας πρόσπτωσης (για γωνίες μέχρι 60° , όπου υπάρχουν δεδομένα και για τις δυο δοκιμές) όσο και της ταχύτητας πρόσκρουσης.

Δεδομένου ότι οι τιμές πρακτικά συμπίπτουν για τις δοκιμές με και χωρίς περιστροφή την στιγμή της κρούσης, συμπεραίνεται ότι ο επαπτομενικός συντελεστής είναι ανεξάρτητος και της γωνιακής ταχύτητας.

Στον πίνακα 7.1 δίνονται προτεινόμενες τιμές για τον επαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης, όπως προκύπτουν σύμφωνα με το σκεπτικό που αναφέρθηκε στην παραπάνω παράγραφο.

7.1.4. Επίδραση σκληρότητας σφύρας Schmidt και ξηρής πυκνότητας γεωυλικών

Από τις δοκιμές ελεύθερης πτώσης σε οριζόντιο επίπεδο, προκύπτει ότι όσο αυξάνει η σκληρότητα του γεωυλικού, αυξάνει και ο συνολικός συντελεστής αναπήδησης. Η καλύτερη δυνατή συσχέτιση των δύο αυτών παραμέτρων περιγράφεται από την εκθετική σχέση :

$$R_v = 0.2 \times e^{0.021 \times SHV}$$

Ο συντελεστής συσχέτισης R^2 της παραπάνω σχέσης ισούται με 0.85.

Η συσχέτιση της πυκνότητας των γεωυλικών με τον συνολικό συντελεστή αναπήδησης οδηγεί στο συμπέρασμα ότι με την αύξηση με της ξηρής πυκνότητας του υλικού αυξάνεται και ο συντελεστής αναπήδησης, χωρίς όμως να επαληθεύεται από όλα τα υλικά, γεγονός που καταδεικνύει την επίδραση και άλλων παραμέτρων που δεν έχουν καθοριστεί (όπως λ.χ. του μεγέθους των κόκκων ή του μέτρου ελαστικότητας).

Αναφορικά με την επίδραση της σκληρότητας του γεωυλικού στον κάθετο και στον επαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης, δεν πρόκυψε κάποια συσχέτιση για τις δυο κλίσεις του επιπέδου πρόσκρουσης που εξετάστηκαν (για 30° και 60°), αφού είχαν

αντίθετα αποτελέσματα. Συνεπώς απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση με την εκτέλεση δοκιμών για ενδιάμεσες κλίσεις.

7.2. ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΕΣ ΤΙΜΕΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ

Στον πίνακα 7.1 δίνονται προτεινόμενες τιμές για τους συντελεστές αναπήδησης, όπως προέκυψαν από τις δοκιμές ελεύθερης πτώσης. Όπως αναφέρεται στις προηγούμενες παραγράφους οι τιμές εξαρτώνται από μια πληθώρα άλλων παραμέτρων, οι οποίες χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης. Συνεπώς, οι τιμές θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν προσαρμοσμένες ποιοτικά ανάλογα με τις συνθήκες της εκάστοτε εφαρμογής και τις απαιτήσεις – περιορισμούς της χρησιμοποιούμενης μεθόδου ανάλυσης.

Πίνακας 7.1. Προτεινόμενες τιμές συντελεστών αναπήδησης

	Συνολικός συντελεστής αναπήδησης R	Κάθετος συντελεστής αναπήδησης R_n	Εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης R_t
Μάρμαρο Πεντέλης	0.40 – 0.56	0.34 – 0.52	0.70 – 0.88
Ασβεστόλιθος	0.37 – 0.55	0.22 – 0.52	0.77 – 0.97
Σχιστόλιθος	0.30 – 0.36	0.24 – 0.56	0.56 – 0.88
Χαλαζιακός Ψαμμίτης	0.55 – 0.75	0.38 - 0.62	0.72 – 0.98
Μάργα	0.29 – 0.37	0.14 – 0.58	0.61 – 0.99

Η σύγκριση των τιμών που υπολογίστηκαν στα πλαίσια της παρούσας έρευνας, με αυτές που απαντώνται στη διεθνή βιβλιογραφία, ενώ κρίνεται ιδιαίτερως σκόπιμη, παρουσιάζει αντικειμενικές δυσκολίες. Αυτό συμβαίνει αφενός επειδή δεν παρουσιάζονται τιμές οι οποίες να αναφέρονται σε συγκεκριμένο γεωυλικό, και αφετέρου επειδή δεν αναφέρονται οι ακριβείς συνθήκες του εκάστοτε πειράματος. Σε ένα γενικό πλαίσιο θα μπορούσε να διατυπωθεί ότι ανάμεσα στα γεωυλικά που μελετήθηκαν και στην γενική περιγραφή των γεωλογικών σχηματισμών και των τιμών που αντιστοιχούν σε αυτούς, σημειώνεται μία σχετική σύγκλιση.

Συγκεκριμένα για τον ασβεστόλιθο και όπως φαίνεται στον πίνακα 2.1, στην τιμή που υπολογίστηκε για τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης παρατηρείται μία ταύτιση με την τιμή που προτείνεται από Σαρόγλου κ.α. (2010), ενώ εμφανίζεται ελαφρά αυξη-

μένος από την τιμή που προτείνεται από τον Gerber. Για τον εφαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης η τιμή που υπολογίστηκε είναι αυξημένη από τις τιμές των δύο άλλων ερευνητών της τάξης του 10-20%.

7.3. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία προσδιορίστηκαν ποσοτικά ή ποιοτικά οι παράμετροι που επιδρούν στις καταπτώσεις βραχωδών τεμαχίων, μετά από ένα πλήθος εργαστηριακών και επί τόπου δοκιμών. Κατά τη διενέργεια αυτών διαπιστώθηκαν αβεβαιότητες και περιορισμοί που αφορούσαν κυρίως σε εξοπλισμό εργαστηρίου.

Συνεπώς, ζητήματα όπως η αναγωγή ενός τριδιάστατου φαινομένου σε δυο διαστάσεις, η επίδραση της κλίμακας, η μετατόπιση του κέντρου βάρους των τεμαχίων, η μη δυνατότητα μέτρησης της περιστροφής των τεμαχίων, αντιμετωπίστηκαν με συγκεκριμένες παραδοχές.

Για μελλοντική έρευνα, προτείνεται η επέκταση και βελτίωση της πειραματικής διαδικασίας, τόσο στο εργαστήριο όσο και στο πεδίο, ώστε να προσδιοριστούν με μεγαλύτερη ακρίβεια οι παράμετροι που επιδρούν στο φαινόμενο.

Αρχικά, η έρευνα μπορεί να συνεχιστεί καλύπτοντας τις ελλείψεις της παρούσας ερευνητικής εργασίας. Δηλαδή, την εκτέλεση εργαστηριακών δοκιμών παραβολικής ρίψης για τα χρησιμοποιούμενα γεωυλικά, πέραν του μαρμάρου καθώς και συσχέτισή τους με δοκιμές πεδίου. Έτσι, θα καταστεί δυνατό να προκύψει ικανοποιητικό πλήθος δεδομένων για την περιγραφή της πραγματικής κατάστασης βάσει εργαστηριακών δοκιμών.

Επίσης, είναι ιδιαίτερως σημαντική η επίδραση της γωνιακής ταχύτητας πριν και μετά την κρούση των βραχοτεμαχίων και θα πρέπει να ληφθεί υπόψη σε μελλοντική έρευνα.

Η έρευνα μπορεί να επεκταθεί εξετάζοντας την επίδραση του σχήματος του τεμάχους σε συνδυασμό με την τραχύτητα της επιφάνειας πρόσκρουσης, εξετάζοντας πληθώρα άλλων γεωλογικών υλικών, αλλάζοντας υλικό της επιφάνειας πρόσκρουσης από καθαρά βραχώδες σε βραχώδες υλικό με κάλυψη εδαφικού μανδύα για να μελετηθεί επίδραση διαφόρων φυσικών χαρακτηριστικών του (π.χ. κοκκομετρία, πυκνότητα, βαθμός συμπίκνωσης εδαφικού μανδύα κ.α.).

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

8.1. ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Δούτσος, Θ. (2000) Γεωλογία: Αρχές και Εφαρμογές, Αθήνα, Εκδόσεις: Leader Books A.E.

Μπεκρή, Ε. (2010) Εκτίμηση Γεωτεχνικών Παραμέτρων για Καταπτώσεις Βραχών, Διπλωματική Εργασία. Ε.Μ.Π.

Οδομηχανική Τεχνικά Μελέται Ε.Ε. (2003) Κανονισμός Μελετών Ερευνών, ΚΜΕ. ΕΥΔΕ/ΟΑΠ

Σαμπατακάκης Ν. (1991) Τεχνικογεωλογική έρευνα του λεκανοπεδίου των Αθηνών. Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών.

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

Σαρόγλου Χ. (2007) Γεωλογικοί παράγοντες που επηρεάζουν τις γεωτεχνικές παραμέτρους του βράχου. Η επίδραση της ανισοτροπίας. ΕΜΠ, σελ. 429

Χαραλάμπους, Σ., Μαντζιάρης, Β., Φερεντίνου, Μ., Σακελλαρίου, Μ. (2010) Προσομοίωση Βραχοπτώσεων σε περιβάλλον GIS για τον Σχεδιασμό Προστατευτικών Μέτρων. 6ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής. Βόλος

8.2. ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Azimi, C.; Desvarreux, P. (1977): Calcul de chutes de blocs et vérification sur modèle réduit. Rapport ADRGT

Azimi, C.; Desvarreux, P.; Giraud, A.; Martin- Cocher, J. (1982): Méthode de calcul de la dynamique des chutes de blocs - Application à l'étude du versant de la montagne de La Pale (Vercors). Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées 122(Nov./Dez.), pp. 93-102, Paris, F

Azzoni, A.; Freitas, M. H. (1995): Experimentally Gained Parameters, Decisive for Rock Fall Analysis. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 28(2), pp. 111-124, Wien, A

Azzoni, A.; Rossi, P. P.; Drigo, E.; Giani, G. P.; Zaninetti, A. (1992): In situ observation of rockfall analysis parameters. *Proceedings of the sixth International Symposium of Landslides; 10 - 14 Feb. 1992, Christchurch (Vol. I)*, pp. 307-314, Rotterdam, NL

Azzoni, A.; La Barbera, G.; Zaninetti, A. (1995): Analysis and Prediction of Rockfalls Using a Mathematical Model. *Rock Mechanics and Mining Sciences* 32(7), pp. 709-724, London, GB

Barbieri, G.; Giani, G. P.; Uras, G.; Vernier, A. (1988): Modellizzazione della frana di crollo di Monte Oili in agro di Baunei (Nuoro). Presentato alla Riunione Plenaria delle Unità Operative del CNR a Roma il 19 e 20/12/1988.

Bozzolo, D.; Pamini, R. (1986): Simulation of Rock Falls down a Valley Side. *Acta Mechanica* 63, pp. 113-130, Wien, A

Bozzolo, D.; Pamini, R.; Hutter, K. (1988): Rockfall analysis - A mathematical model and its test with field data. *Landslides - Proceedings of the fifth international symposium on landslides, 10-15 July 1988 Vol. 1*, pp. 555-560, Lausanne, CH

Broili, L. (1974): Ein Felssturz im Grossversuch. *Rock Mechanics (Suppl. 3)*, pp. 69-78

Broili, L. (1977): Relations between scree slope morphometry and dynamics of accumulation processes. *Proceedings Meeting on Rockfall dynamics and protective works effectiveness*, pp. 11-23, Bergamo, I

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

Camponuovo, G. (1977): ISMES experience on the model of St. Martino. *Proceedings Meeting on Rockfall dynamics and protective works effectiveness, 20-21 May 1976*, pp. 25-38, Bergamo, I

Chau, K. T.; Wong, R. H. C.; Lee, C. F. (1998 a): Rockfall Problems in Hong Kong and some new Experimental Results for Coefficients of Restitution. *International*

Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences: 3rd north American Rock Mechanics Symposium (NARMS '98) 35(4-5), pp. 662-663

Chau, K. T.; Chan, L. C. P.; Wu, J. J.; Liu, J.; Wong, R. H. C.; Lee, C. F. (1998 b): Experimental studies on rockfall and debris flow. Proceedings of the One Day Seminar on Planning, Design and Implementation of Debris Flow and Rockfall Hazards Mitigation Measures, 27 October 1998, pp. 115-128, Hong Kong

Chau, K. T.; Wong, R. H. C.; Liu, J.; Wu, J. J.; Lee, C. F. (1999 b): Shape effects on the coefficient of restitution during rockfall impacts. Proceedings of the 9th International Congress on Rock Mechanics, International Society for Rock Mechanics (ISRM), Paris 1999. Vol. 1, pp. 541-544

Chau, K. T.; Wu, J. J.; Wong, R. H.; Lee, C. F. (1999 a): The coefficient of restitution for boulders falling onto soil slopes with various values of dry density and water content. Proceedings of the Int. Symp. on Slope Stability Engineering: Geotechnical and Geoenvironmental Aspects, November 8-11, 1999, Matsuyama, Shikoku, Japan (Vol. 2), pp. 1355-1360

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, pp. 69- 77

Cundall, P. (1971): A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock systems. Symposium on Rock Fracture of the International Society of Rock Mechanics, pp. paper II-8-, Nancy, F

Descoedres, F. (1997): Aspects géomécaniques des instabilités de falaises rocheuses et des chutes de blocs. Publications de la Société Suisse de Mécanique des Sols et des Roches, 7.11.1997, Montreux, N° 135, pp. 3-11

Descoedres, F.; Zimmermann, Th. (1987): Three-dimensional dynamic calculation of rockfalls. International Society for Rock Mechanics: Proceedings of the Sixth International Congress on Rock Mechanics, Montreal / Canada (1987) Vol. 1, pp. 337-342

Dudt, J. P.; Heidenreich, B. (2001): Treatment of the uncertainty in a three-dimensional numerical simulation model for rock falls. Proceedings of the International Conference on Landslides - Causes, Impacts and Countermeasures, 17-21 June 2001, Davos, Switzerland, pp. 507-514

Evans, S. G.; Hungr, O. (1993): The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes. Canadian Geotechnical Journal 30, pp. 620-636, Canada

Falchetta, J. L. (1985 a): Etude cinématique et dynamique de chutes de blocs rocheux. Thèse d'ingénieur docteur.

Falchetta, J. L. (1985 b): Un nouveau modèle de calcul de trajectoires de blocs rocheux. Revue Française de Géotechnique 30 (1er Trimestre 1985), pp. 11-17, Paris, F

Fornaro, M.; Peila, D.; Nebbia, M. (1990): Block falls on rock slopes - application of a numerical simulation program to some real cases. Proceedings of the 6th International Congress IAEG, pp. 2173-2180, Rotterdam, NL

Gerber, W. (1995): Auswertung von Feldversuchen. Unterlagen zum FAN-Kurs der Forstlichen Gruppe Naturgefahren zum Thema "Steinschlag", Vitznau, Oktober 1995 Kap. 9, Vitznau, CH

Giani, G. P. (1992): Rock Slope Stability Analysis. Balkema, Rotterdam

Guzzetti, F.; Crosta, G.; Detti, R.; Agliardi, F. (2002): STONE: a computer program for the threedimensional simulation of rock-falls. Computers & Geosciences 28, pp. 1079-1093

Habib, P. (1977): Note sur le rebondissement des blocs rocheux. Proceedings Meeting on Rockfall dynamics and protective works effectiveness, 20-21 mai 1976, pp. 123-125, Bergamo, I

Heidenreich, B. (2004). Small and half scale experimental studies of rockfall impacts on sandy slopes, PhD Thesis EPFL, Lausanne, CH

Heim, A. (1882): Über Bergstürze. Neujahresblatt 84, pp. 1-31, Zürich, CH

Hoek, E. (1987): Rockfall: a computer program for prediction rockfall trajectories. Vancouver, CA

Hoek, E. (2006): Analysis of Rockfall Hazards. Practical Rock Engineering. www.rocscience.com

Hungr, O.; Evans, S. G. (1988): Engineering evaluation of fragmental rockfall hazards. Landslides - Proceedings of the fifth international symposium on landslides, 10-15 July 1988, Vol. 1, pp. 685-690, Lausanne, CH

Japan Road Association (JRA) (1983): Rockfall Handbook. Tokyo, Japan

Kamijo, A.; Onda, S.; Masuya, H.; Tanaka, Y. (2000): Fundamental test on restitution coefficient and frictional coefficient of rock fall. Proceedings of the 5th Symposium on Impact Problems in Civil Engineering, Japan Society of Civil Engineers, June 8-9, 2000, pp. 83-86

Kawahara, S.; Muro, T. (1999): Effect of soil slope gradient on motion of rockfall. Proceedings of the International Symposium on Slope Stability Engineering, November 8-11, 1999, Matsuyama, Shikoku, Japan. Vol. 2, pp. 1343-1348

Kobayashi, Y.; Harp, E. L.; Kagawa, T. (1990): Simulation of Rockfalls triggered by earthquakes. Rock Mechanics and Rock Engineering 23, pp. 1-20, Wien, A

Labiouse, V.; Descoedres, F. (1999): Possibilities and Difficulties in predicting Rockfall Trajectories. Proceedings of the Joint Japan-Swiss Scientific Seminar on Impact Load by Rock Falls and Design of Protection Structures; Kanazawa, Japan, 4-7 October 1999, pp. 29-36

Labiouse, V.; Heidenreich, B.; Desvarreux, P.; Viktorovitch, M.; Guillemin, P. (2001): Chapitre IV: Etudes trajectographiques. Programme Interreg II C - "Falaises", pp. 155-211, Aosta, I

Lied, K. (1977): Rockfall problems in Norway. 90, pp. 51-53, Bergamo, I

Marinos P., Tsiambaos G., Saroglou H., Marinos V., (2008): Rockfall hazard and risk for a high promontory: Monemvasia historical site, Greece., Proc of 1st World landslide forum, p. 59-62, Tokyo, Japan.

Murata, S.; Shibuya, H. (1997): Measurement of impact loads on the rockfall prevention walls and speed of falling rocks using a middle size slope model. 2nd Asia-Pacific Conference on Shock & Impact Loads on Structures, Melbourne, Australia, November 25-27, 1997, pp. 383-393

Paronuzzi, P. (1989): Probabilistic approach for design optimization of rockfall protective barriers. Q. J. Eng. Geol. 22, pp. 175-183, London, GB

Pfeiffer, T.; Bowen, T. (1989): Computer Simulation of Rockfalls. Bulletin of the Association of Engineering Geologists 26(1), pp. 135-146



Pierson, A. L., Davis, S.A., Van Vickle, R. (1990). Rockfall Hazard Rating System Implementation Manual. Federal Highway Administration (FHWA) U.S. Department of Transportation.

Pierson, A. L., Gullixson, C. F., Chassie, R. G. (2001) Rockfall Catchment Area Design Guide, ODOT <http://www.odot.state.or.us/tddresearch>

Piteau, D. R. (1977): Computer Rockfall Model. 90, pp. 127-127, Bergamo, I

Piteau, D. R.; Clayton, R. (1977): Discussion of paper Computerized design of rock slopes using interactive graphics for the input and output of geometrical data. By P. Cundall. 16th Symposium on Rock Mechanics, Minneapolis, pp. 62-63, Minneapolis, USA

Richards, L. R., Peng, B., Bell, D. H. (2001): Laboratory and field evaluation of the normal coefficient of restitution for rocks. Proceedings of the International symposium on Rock Mechanics, pp. 149 – 156 Sarkka & Eloranta (eds.)

Ritchie, A. M. (1963): Evaluation of rockfall and its control. Highway research record 17, pp. 13 - 28, Washington, USA

Spang, R. M.; Rautenstrauch, R. W. (1988): Empirical and mathematical approaches to rockfall protection and their practical applications. Landslides - Proceedings of the fifth international symposium on Landslides, Lausanne, 10 - 15 July 1988 (2), pp. 1237-1243

Spang, R. M.; Sönsler, Th. (1995): Optimized Rockfall Protection by "Rockfall". Proceedings of the 8th International Congress in Rock Mechanics, Tokyo, Japan

Statham, I. (1979): A simple dynamic model of rockfall: some theoretical principles and model and field experiments. ISMES: Int. Colloquium on Physical and Geomechanical Models, pp. 237-258, Bergamo, I

Stevens, W. D. (1998): Rocfall: A tool for probabilistic analysis, design of remedial measures and prediction of rockfalls. Internet, Toronto, CA

Stronge, W. J. (1990): Rigid body collision with friction. Proceedings: Mathematical and Physical Sciences (Royal Soc. London) A431(1881), pp. 169-181

Szabo, I. (1966): Einführung in die Technische Mechanik, Berlin, D

Teraoka, M.; Iguchi, H.; Ichikawa, T.; Nishigaki, Y.; Sakurai, S. (2000): Analysis of motion for rock falling on a natural slope by using digital video image. Proceedings of



the 5th Symposium on Impact Problems in Civil Engineering, Japan Society of Civil Engineers, June 8-9, 2000, pp. 87-90, Japan

Ujihira, M.; Takagai, N.; Iwasa, T. (1993): An experimental study on the characteristics of the impact load of falling rock. Int. J. of Surface Mining and Reclamation 7, pp. 81-89, Rotterdam, NL

Urciuoli, G. (1988): Sperimentazione sulla caduta di blocchi lungo un pendio nella formazione calcareo-dolomitica della Penisola Sorrentina. Convegno sul tema: Cartografia e monitoraggio dei movimenti franosi, Bologna, 10-11 novembre 1998 pubbl. n° 164, pp. 35-54

Urciuoli, G. (1996): Analisi cinematica di crolli per la progettazione di barriere paramassi. Giornata di Studio su " La protezione contro la caduta massi dai versanti rocciosi 24 ottobre 1996, pp. 29-36, Torino, I

Ushiro, T.; Shinohara, S.; Tanida, K.; Yagi, N. (2000): A study on the motion of rock-falls on slopes. Proceedings of the 5th Symposium on Impact Problems in Civil Engineering, Japan Society of Civil Engineers, June 8-9, 2000, pp. 91-96, Japan

Wong, R. H.; Ho, K. W.; Chau, K. T. (1999): Experimental study for rockfall simulation. Proceedings of Construction challenges into the next century, Hong Kong, pp. 92-97, Hong Kong

Wong, R. H.; Ho, K. W.; Chau, K. T. (2000): Shape and mechanical properties of slope material effects on the coefficient of restitution on rockfall study. Proceedings of the 4th North American Rock Mechanics Symposium NARMS 2000, Seattle, Washington, USA, 31 July - 3 August 2000: Pacific Rocks 2000 - "Rock around the Rim", pp. 507-514

Wu, S. S. (1985): Rockfall evaluation by computer simulation. Transportation Research Record 1031, pp. 1-5, Washington, USA

Yoshida, H. (1998): Movement of boulders on slope and its simulation. Japan

Yoshida, H. (1998): Recent studies on rockfall control in Japan. Japan