



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



*Διερεύνηση της επίδρασης του εδαφικού καλύμματος
βραχωδών πρανών στις καταπτώσεις βράχων*

Βατίστας Παναγιώτης
Επιβλέπων Καθηγητής:
Γεώργιος Τσιαμπάος

Αθήνα, Ιούλιος 2014

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το φαινόμενο των καταπτώσεων βράχων είναι ιδιαίτερα καταστροφικό για τα έργα υποδομής και εξαιρετικά επικίνδυνο για τις ανθρώπινες ζωές. Καθώς είναι ένα σχετικά τυχαίο στην εκδήλωσή του φαινόμενο, με πολλές παραμέτρους που το επηρεάζουν, δεν υπάρχει πλήρης κατανόηση των μηχανισμών που το ελέγχουν, παρά την εκτεταμένη έρευνα που έχει γίνει και συνεχίζεται. Για τους απαιτούμενους υπολογισμούς, με σκοπό τον σχεδιασμό των καταλλήλων μέτρων προστασίας, χρησιμοποιούνται ένας ή και περισσότεροι συντελεστές αναπήδησης των βραχωδών τεμαχίων που καταπίπτουν, οι οποίοι λαμβάνουν υπ' όψιν το γεωυλικό του πρανούς πάνω στο οποίο πραγματοποιείται η κατάπτωση. Αρκετές έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί για διάφορα βραχώδη υλικά και την επιρροή τους στους συντελεστές αναπήδησης, αλλά ελάχιστες από αυτές λαμβάνουν υπ' όψιν την περίπτωση πρανών που είναι καλυμμένα με κάποια στρώση εδαφικού υλικού, κατάσταση η οποία είναι και αρκετά συνήθης στη φύση. Για τον λόγο αυτό στην παρούσα διπλωματική εργασία διεξήχθησαν περίπου 500 δοκιμές, με σκοπό την διερεύνηση του βαθμού επιρροής της επικάλυψης με αργιλικό ή αμμώδες υλικό στον συντελεστή αναπήδησης και έγινε προσπάθεια να δοθεί μια ποιοτική και ποσοτική ερμηνεία για την περιγραφή των πειραματικών αποτελεσμάτων. Οι επιφάνειες πρόσπτωσης διαμορφώθηκαν από δύο τύπου αργιλικά υλικά, ένα χαμηλής και ένα μέσης πλαστικότητας είτε καθαρά, δηλαδή χωρίς προσμίξεις, είτε με την προσθήκη σε συγκεκριμένα ποσοστά δυο τύπων άμμου, της M31 και της M34 (Longstone). Η καταγραφή των δοκιμών έγινε από ειδική κάμερα υψηλής ταχύτητας, στο εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Βραχομηχανικής του Ε.Μ.Π. και η επεξεργασία των καταγραφών έγινε με την χρήση ειδικού κώδικα που έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο της σχετικής έρευνας που βρίσκεται υπό εξέλιξη στο Εργαστήριο. Κατά την επεξεργασία των δεδομένων προέκυψε ότι, η αύξηση της ενέργειας πρόσκρουσης, δηλαδή η αύξηση της ταχύτητας πρόσκρουσης και της μάζας, κατ' επέκταση και της ορμής πρόσκρουσης, προκαλεί μείωση του συντελεστή αναπήδησης. Επίσης, η αύξηση του πάχους στρώσης του εδαφικού υλικού και της περιεχόμενης υγρασίας είτε σε καθαρό είτε σε μείγμα αργιλικού υλικού προκαλεί μείωση του συντελεστή αναπήδησης. Επίσης, η αύξηση του ποσοστού της αργίλου σε εδαφικό μείγμα άμμου - αργίλου προκαλεί αύξηση του αντίστοιχου συντελεστή αναπήδησης εάν πρόκειται για ξηρό υλικό, ενώ αντίθετα προκαλεί μείωση του συντελεστή με προσθήκη νερού και αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας. Τέλος, δεν κατορθώθηκε να δοθεί μια στατιστικά σημαντική σχέση που να συνδέει την επιρροή του συντελεστή αναπήδησης για στρώση αργιλικού υλικού συναρτήσει της πλαστικότητας της αργίλου, του πάχους της στρώσης, της ενέργειας πρόσκρουσης και της περιεχόμενης υγρασίας, αλλά προέκυψαν αρκετά χρήσιμα ποιοτικά συμπεράσματα.

ABSTRACT

Rockfalls poses a significant threat on infrastructure and human lives. Since it is a very random phenomenon which depends on various parameters, there is no advanced understanding through the academic circles; therefore its thorough study is required in order for the engineer to design the mitigation measures. For the necessary calculations the coefficients of restitution are used, whose values are qualitatively expressed based on the slope material composition. Many researches have been performed in order to study the coefficient of restitution values for impacts into various rock materials, however very few have been held for slopes covered with soil materials such as clay or sand, which are very common in nature. Therefore, in the context of the present thesis, approximately 500 tests were carried out in order to study the effect of the soil cover layer on the coefficients of restitution. The impact surfaces were covered with two different clay types, one of low and one of medium plasticity mixed with two types of quartzitic sand, M31 and M34 (Longstone) on various combinations. The study was carried out at the Engineering Geology and Rock Mechanics laboratory in the National Technical University of Athens. The tests were recorded by a high speed camera and the data acquisition was made using a machine vision code created in the context of the relative ongoing studies performed in the lab. The obtained data resulted in some satisfactory observations. To begin with, the increase of the block's impact energy, which is originated from either the increase of the block's mass or its impact velocity; leads to a decrease in the values of the coefficient of restitution. Furthermore, the increase of the soil's layer thickness and moisture causes a significant reduction to the corresponding coefficients' of restitution values. In addition, in a dry soil mix composed of clay and sand, while the clay proportion increases the respective coefficient of restitution increases as well. However, if the soil contains water then an increase of the clay proportion to the mix yields the exact opposite effect. Last but not least, although there was an effort to establish a formula that would link the coefficient of restitution with the plasticity, the water contamination and the thickness of the clay layer as well as with the impact energy, the outcome was not statistically significant but some useful qualitative interpretations were made.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.	Εισαγωγή.....	1
1.1.	Γενικά στοιχεία	1
1.2.	Σκοπός της εργασίας.....	2
1.3.	Διάρθρωση της εργασίας.....	3
1.4.	Ευχαριστίες	4
2.	Θεωρητικά στοιχεία.....	5
2.1.	Γενικά για τις καταπτώσεις.....	5
2.2.	Αίτια καταπτώσεων	7
2.2.1.	Γεωλογικές –υδρογεωλογικές διαδικασίες	7
2.2.2.	Σεισμική δραστηριότητα	8
2.2.3.	Ανθρώπινη δραστηριότητα	8
2.3.	Επικινδυνότητα καταπτώσεων	9
2.3.1.	Συστήματα ταξινόμησης επικινδυνότητας καταπτώσεων	10
2.4.	Τροχιά πίπτοντος τεμάχους	11
2.5.	Μαθηματική προσέγγιση συντελεστών αναπήδησης.....	15
2.5.1.	Σχέσεις ταχυτήτων	16
2.5.2.	Σχέσεις ενεργειών.....	18
2.6.	Συγκεντρωτικός πίνακας συντελεστών αναπήδησης.....	19
3.	Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	22
3.1.	Βιβλιογραφική ανασκόπηση συντελεστών αναπήδησης.....	23
3.1.1.	Αναδρομή αποτελεσμάτων από δοκιμές πεδίου	25
3.1.2.	Παρουσίαση αποτελεσμάτων από ανάδρομες αναλύσεις	30
3.1.3.	Αναδρομή αποτελεσμάτων από εργαστηριακές δοκιμές	31
3.2.	Συντελεστές κλίμακας.....	40
3.3.	Συσχέτιση μάζας, ταχύτητας και συντελεστών αναπήδησης.....	43

4.	Εργαστηριακή δοκιμή	46
4.1.	Διάταξη του εργαστηρίου	46
4.2.	Όργανα και συσκευές	47
4.2.1.	Βάσεις ρίψης.....	47
4.2.2.	Σφαιρικά δοκίμια.....	48
4.2.3.	Φωτογραφική μηχανή ταχείας λήψεως.....	49
4.2.4.	Μηχανισμός ρίψης της σφαίρας	49
4.2.5.	Φωτισμός.....	50
4.2.6.	Δευτερεύοντα όργανα και συσκευές	51
4.3.	Διαδικασία εκτέλεσης δοκιμών	52
4.3.1.	Διαμόρφωση βάσεων.....	52
4.3.2.	Δοκιμές ελεύθερης πτώσης – Συλλογή αποτελεσμάτων	54
4.3.3.	Συλλογή των δεδομένων κάθε δοκιμής	55
4.4.	Επεξεργασία αποτελεσμάτων.....	57
5.	Ιδιότητες εδαφικών υλικών	59
5.1.	Άργιλοι	59
5.2.	Άμμοι.....	61
5.2.1.	Άμμος Μ31.....	61
5.2.2.	Άμμος Longstone (Μ34)	61
5.2.3.	Συγκεντρωτικός πίνακας ιδιοτήτων άμμων.....	62
6.	Παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	64
6.1.	Αξιοπιστία μετρήσεων	65
6.2.	Ενέργεια πρόσκρουσης.....	71
6.3.	Επιρροή υλικού επικάλυψης	74
6.4.	Επιρροή σύστασης υλικού επικάλυψης	76
6.5.	Αργιλικό υλικό στο όριο υδαρότητας	80
6.6.	Επίστρωση υλικού με ξήρανση.....	82
6.7.	Επιρροή υλικού με περιεχομένη υγρασία.....	86
6.8.	Επιρροή αργιλικού υλικού με υγρασία	90
6.9.	Παρατηρήσεις.....	92

7.	Σύνοψη.....	94
7.1.	Συμπεράσματα.....	94
7.1.1.	Ενέργεια πρόσκρουσης	94
7.1.2.	Πάχος στρώσης επικάλυψης	94
7.1.3.	Σύσταση υλικού επικάλυψης	95
7.1.4.	Ποσοστό περιεχομένης υγρασίας εδάφους.....	95
7.2.	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	96
8.	Βιβλιογραφία	97

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 - Συγκράτηση βράχου από δίχτυ αναχαίτισης (www.geobrugg.com).....	1
Εικόνα 2 - Κατάπτωση βραχοτεμαχών σε πρανές στο χωριό Μόλυβος Μυτιλήνης (Μάρτιος 2014), (www.emprosnet.gr)	6
Εικόνα 3 - Καταπτώσεις στη κοιλάδα των Τεμπών, (Δεκέμβριος 2009), (www.autoblog.gr).....	6
Εικόνα 4 - Βασικές κινήσεις του φαινομένου της κατάπτωσης	11
Εικόνα 5 - Είδη κίνησης συναρτήσει της κλίσης του πρανού (Ritchie, 1963).....	12
Εικόνα 6 - Βράχος που αναπηδά στο ηφαίστειο Paluweh στην Ινδονησία, (www.photonovolcanica.com).	13
Εικόνα 7 - Συνιστώσες ταχυτήτων πριν και μετά την αναπήδηση (Heidenreich, 2004)	16
Εικόνα 8 - Συσχετισμός ύψους πτώσεως και διανυόμενης αποστάσεως.....	26
Εικόνα 9 - Συσχέτιση κάθετου συντελεστή αναπήδησης(R_n) και γωνίας πρόσπτωσης (θ), Wu (1985)....	31
Εικόνα 10 Επίδραση ταχύτητας πρόσκρουσης στους συντελεστές αναπήδησης,	32
Εικόνα 11 Συντελεστές κάθετης και εφαπτομενικής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης (Chau et al., 1999).....	33
Εικόνα 12 - Πειραματική διάταξη Heidenreich για δοκιμές μικρής κλίμακας	35
Εικόνα 13 - Πειραματική διάταξη των Labiouse & Heidenreich, 2009.....	36
Εικόνα 14 - Σχήματα τεμαχών και εκκεντρότητες για πρόσκρουση σε κεκλιμένο έδαφος.....	37
Εικόνα 15 - Διαμόρφωση του εδάφους την στιγμή της πρόσπτωσης.....	38
Εικόνα 16 - Διάγραμμα ταχύτητας v_i –συντελεστή κλίμακας (Asteriou et al., 2013a),	41
Εικόνα 17 - Τιμές συντελεστών αναπήδησης (COR) συναρτήσει της προσπίπτουσας ταχύτητας για δοκίμια από εποξική ρητίνη	44
Εικόνα 18 - Τιμές συντελεστών αναπήδησης (COR) συναρτήσει της προσπίπτουσας ταχύτητας για δοκίμια από εποξική ρητίνη	44
Εικόνα 19 - Τιμές των συντελεστών αναπήδησης από τις δοκιμές συναρτήσει της προσπίπτουσας ορμής	45
Εικόνα 20 - Εργαστηριακή διάταξη.....	46
Εικόνα 21 - Βάση ρίψης με εσοχή ενδεικτικού βάθους 2mm χωρίς το εδαφικό υλικό.....	47
Εικόνα 22 - Μεταλλικό καλούπι για την διαμόρφωση των βάσεων.....	48
Εικόνα 23 - Σφαιρικά δοκίμια διαμέτρου 3 και 4cm.	49
Εικόνα 24 - Φωτογραφική μηχανή ταχείας λήψεως επί της βάσης της	49
Εικόνα 25 - Αντλία κενού	50
Εικόνα 26 - Βάση ρίψης με διαμορφωμένη επιφάνεια πρόσπτωσης.....	52
Εικόνα 27 - Στρώση με πινέλο υδαρούς αργιλικού υλικού και μετατροπή του σε ξηρό με πιστόλι αέρα	53
Εικόνα 28 - Πιστόλι πεπιεσμένου αέρα.....	54
Εικόνα 29 - Κάψες με εδαφικό υλικό μετά τη δοκιμή, πάνω στον εργαστηριακό φούρνο	56
Εικόνα 30 - Στάδια εντοπισμού περιγράμματος σφαίρας, (Asteriou et al., 2013a).....	58
Εικόνα 31 - Η άργιλος 1, σχηματισμένη για την δοκιμή του ορίου πλαστικότητας.....	60
Εικόνα 32 - Η άργιλος 2, σχηματισμένη για την δοκιμή του ορίου πλαστικότητας.....	60
Εικόνα 33 - Η άμμος M31 στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο	63
Εικόνα 34 – Η άμμος Longstone (M34) στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο	63
Εικόνα 35 - Καμπύλη κανονικής κατανομής (http://scalesstudy.wordpress.com).....	66

Εικόνα 36 - σχηματική απεικόνιση της απομείωσης του ύψους ρίψης με την συμπερίληψη της διαμέτρου της σφαίρας	68
Εικόνα 37 - Σχηματική παρουσίαση της διαδικασίας του τεταρτομερισμού	86

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 - Συγκεντρωτικά αποτελέσματα βιβλιογραφίας	19
Πίνακας 2 - Παράμετροι που επηρεάζουν τους συντελεστές αναπήδησης (Heidenreich, 2004).	23
Πίνακας 3 - Παράμετροι που επηρεάζουν το φαινόμενο της αναπήδησης	24
Πίνακας 4 – Ιδιότητες Υλικών, (Asteriou et al, 2013b)	43
Πίνακας 5 – Ιδιότητες ενέματος τσιμεντοειδούς βάσης	48
Πίνακας 6 – Ιδιότητες αργίλων	59
Πίνακας 7 – Φυσικές ιδιότητες άμμων.....	62
Πίνακας 8 – Σειρές δοκιμών	64
Πίνακας 9 – Επιρροή του ύψους πρόσπτωσης στην ταχύτητα πρόσκρουσης.....	67
Πίνακας 10 - Στατιστικά στοιχεία δοκιμών.....	68
Πίνακας 11 – Τιμές συντελεστή αναπήδησης για τα αργιλικά υλικά	91

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1 - Κοκκομετρική διαβάθμιση M31	61
Διάγραμμα 2 - Κοκκομετρική διαβάθμιση άμμου Longstone (M34), (Γκαζέτας, 2007)	62
Διάγραμμα 3 - Εξάρτηση ταχύτητας πρόσκρουσης με το αρχικό ύψος ρίψης.....	65
Διάγραμμα 4 - Σύγκριση κατανομής των τιμών των ταχυτήτων πρόσκρουσης πριν και μετά την στατιστική επεξεργασία τους κατά την 1η σειρά δοκιμών	69
Διάγραμμα 5 - Σύγκριση κατανομής των τιμών των ταχυτήτων πρόσκρουσης πριν και μετά την στατιστική επεξεργασία τους κατά την 2η σειρά δοκιμών	69
Διάγραμμα 6 - Σύγκριση κατανομής των τιμών των ταχυτήτων πρόσκρουσης πριν και μετά την στατιστική επεξεργασία τους κατά την 3η σειρά δοκιμών	70
Διάγραμμα 7 - Σύγκριση της συσχέτισης της ορμής πρόσκρουσης με τους συντελεστές αναπήδησης Asteriou et al. (2013a) με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας	72
Διάγραμμα 8 - Σύγκριση της συσχέτισης ταχύτητας πρόσκρουσης με τους συντελεστές αναπήδησης (Asteriou et al., 2013a) με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας	72
Διάγραμμα 9 - Επιρροή για επικάλυψη αργίλου με πάχος στρώσης 0, 1 και 2 mm	74
Διάγραμμα 10 - Επιρροή για επικάλυψη άμμου M31 με πάχος στρώσης 0, 1 και 2 mm	74
Διάγραμμα 11 - Επίδραση του ποσοστού άμμου σε μείγμα με άργιλο σε ξηρά κατάσταση για πάχη επικάλυψης 1 και 2 mm	76
Διάγραμμα 12 - Επίδραση του ποσοστού αργίλου σε μείγμα με άμμο, σε ξηρά κατάσταση, για πάχη επικάλυψης 1 και 2 mm	76
Διάγραμμα 13 - συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει του αριθμού των επαλείψεων	80
Διάγραμμα 14 - μέσες τιμές συντελεστών αναπήδησης συναρτήσει του πάχους στρώσης της επιφάνειας, για δύο αρχικά ύψη ρίψεως	83

Διάγραμμα 15 - όλες οι τιμές των συντελεστών αναπήδησης συναρτήσει του πάχους στρώσης της επιφάνειας, για δύο αρχικά ύψη ρίψεως	83
Διάγραμμα 16 - Συντελεστές αναπήδησης για διάφορα ποσοστά άμμου τύπου M34 στο μείγμα.....	87
Διάγραμμα 17 - Συντελεστές αναπήδησης για διάφορα ποσοστά άμμου M31 στο μείγμα.....	87

1. Εισαγωγή

1.1. Γενικά στοιχεία

Ως βραχόπτωση ή κατάπτωση βράχων χαρακτηρίζεται η αποκόλληση βράχου ή τμήματός του από το μητρικό πέτρωμα και κατά συνέπεια η κίνησή του προς τα κάτω λόγω της επίδρασης της βαρύτητας. Το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερα σύνηθες και επίφοβο σε απότομα βραχώδη πρανή.

Το φαινόμενο αυτό αποτελεί μια από τις πιο συνήθεις μορφές αστοχιών των βραχωδών πρανών και συναντάται κυρίως σε περιοχές με έντονο ορεινό ανάγλυφο. Στην Ελλάδα, αποτελεί μια από τις κυριότερες αιτίες αστοχίας στα οδικά δίκτυα, λόγω του πυκνού και έντονου ορεινού ανάγλυφου, σε συνδυασμό με την υψηλή σεισμικότητα. Είναι πολυάριθμες οι περιπτώσεις που έχουν προκληθεί υλικές ζημιές σε οδικά δίκτυα ή ακόμα και σε περιουσίες ιδιωτών (κατοικημένες περιοχές κοντά στην περιοχή αστοχίας, διερχόμενα οχήματα κ.α.) ενώ έχουν υπάρξει και ανθρώπινες απώλειες.

Για τον αυτόν τον λόγο κρίνεται σκόπιμη η συστηματική μελέτη του φαινομένου, έτσι ώστε να μπορούν να σχεδιαστούν τα κατάλληλα έργα ανάσχεσης ή πρόληψης του φαινομένου.



Εικόνα 1 - Συγκράτηση βράχου από δίχτυ αναχαίτισης (www.geobrugg.com)

Μέχρι τώρα η διαστασιολόγηση αυτή επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης ειδικών λογισμικών. Παρ' όλη την έρευνα όμως που έχει διεξαχθεί, η συμπεριφορά των βραχοτεμαχών έπειτα από την στιγμή της αποκόλλησής τους παραμένει σε μεγάλο βαθμό αδιευκρίνιστη, καθώς οι μεταβλητές που επηρεάζουν το φαινόμενο είναι πολυάριθμες καθιστώντας την τροχιά των τεμαχών απρόβλεπτη.

1.2. Σκοπός της εργασίας

Στην βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές αναφορές για την συμπεριφορά των τεμαχών, όταν προσπίπτουν σε πρανή αποτελούμενα από βραχώδη υλικά. Πολλές φορές όμως τα αποκολλημένα τεμάχια προσπίπτουν σε επιφάνειες που είναι καλυμμένες από εδαφικό υλικό, όπως π.χ. η ζώνη αποσάθρωσης του μητρικού βραχώδους σχηματισμού καθώς και τα πλευρικά κορήματα που συχνά καλύπτουν τα φυσικά πρανή, με αυξανόμενο πάχος στον πόδα αυτών. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα την σημαντική μεταβολή των χαρακτηριστικών της αναπήδησης των τεμαχών και κατ' επέκταση της τροχιάς τους.

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας διεξήχθησαν περίπου 500 εργαστηριακές δοκιμές με σκοπό την εξέταση της επίδρασης του εδαφικού υλικού στην αναπήδηση του τεμαχούς. Η επιφάνεια πρόσπτωσης του πρανούς προσομοιώθηκε από ειδικά διαμορφωμένες βάσεις φτιαγμένες από υψηλής αντοχής ένεμα τσιμεντοειδούς βάσης με εσοχές πάχους 1 mm και 2 mm, στις οποίες έγινε προσθήκη εδαφικού υλικού, αποτελούμενου είτε από άργιλο ή άμμο είτε από μείγμα αργίλου - άμμου. Τα βραχοτεμάχια προσομοιώθηκαν από σφαιρικά δοκίμια διαμέτρου 3cm και 4 cm κατασκευασμένα από το ίδιο τεχνητό υλικό με την βάση.

Μέσα από τις δοκιμές αυτές έγινε μια προσπάθεια συσχέτισης του συντελεστή αναπήδησης με τα διάφορα χαρακτηριστικά των εδαφικών υλικών όπως η υγρασία, το ποσοστό αργίλου ή άμμου στο εδαφικό μείγμα, το πάχος της στρώσης του εδαφικού υλικού πάνω από την επιφάνεια του βράχου, την πλαστικότητα της αργίλου και την κοκκομετρία της άμμου που συμμετέχει στο μείγμα, ή ακόμα και με τα κινηματικά χαρακτηριστικά, όπως την ταχύτητα και την μάζα του τεμαχούς, κατά την πρόσκρουση.

1.3. Διάρθρωση της εργασίας

Σε συνέχεια της εισαγωγής, στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας περιγράφεται το θεωρητικό υπόβαθρο του γενικού φαινομένου των καταπτώσεων βράχων, αναλύονται τα αίτια που το προκαλούν και παρουσιάζονται οι ζώνες επικινδυνότητας καταπτώσεων, όπως έχουν μελετηθεί για τον Ελλαδικό χώρο. Στην συνέχεια παρατίθενται επιγραμματικά τα συστήματα ταξινόμησης και επικινδυνότητας για το φαινόμενο αυτό και αναλύεται η κίνηση που εκτελεί το τέμαχος στις βασικές συνιστώσες της. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι τρόποι με τους οποίους μπορούν να προσδιοριστούν οι συντελεστές αναπήδησης και αναλύεται μαθηματικά το φαινόμενο με την παρουσίαση των σχέσεων που συναντώνται στην σχετική βιβλιογραφία. Τέλος, παρατίθεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας των τιμών των συντελεστών αναπήδησης που δίνονται από την βιβλιογραφία.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται μια εκτενής αναφορά στην έρευνα που έχει διεξαχθεί κατά το παρελθόν πάνω στο αντικείμενο των συντελεστών αναπήδησης και μια ποιοτική και ποσοτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων τους. Στην συνέχεια γίνεται αναφορά στους συντελεστές που έχουν προταθεί για να εξομαλύνουν τα φαινόμενα κλίμακας που προκύπτουν από τις εργαστηριακές δοκιμές και τέλος, στις σχέσεις που συσχετίζουν τον συντελεστή αναπήδησης με την ταχύτητα και την μάζα, του πύπτοντος τεμάχους κατά την πρόσκρουση.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η εργαστηριακή διάταξη και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή των δοκιμών. Επιπλέον γίνεται μια λεπτομερής περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας και μια συνοπτική περιγραφή της μεθόδου επεξεργασίας των αποτελεσμάτων, ώστε να προκύψουν τα τελικά δεδομένα.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναφέρονται οι ιδιότητες των εδαφικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν και στο έκτο κεφάλαιο γίνεται μια λεπτομερής παρουσίαση και ο σχολιασμός των εξαγόμενων αποτελεσμάτων, καθώς και η παράθεση κάποιων παρατηρήσεων που έγιναν στην πορεία της πειραματικής διαδικασίας.

Τέλος, στο έβδομο κεφάλαιο γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση των ποιοτικών και ποσοτικών συμπερασμάτων που προέκυψαν και παραθέτονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

1.4. Ευχαριστίες

Ένα θερμό ευχαριστώ στον επιβλέποντα καθηγητή Δρ. Γεώργιο Τσιαμπάο, της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με την εκπόνηση της παρούσας ερευνητικής εργασίας και για την βοήθεια και τις συμβουλές που μου παρείχε κατά την εκπόνησή της.

Επιπλέον, ευχαριστώ τα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς επιτροπής, τον Δρ Γεώργιο Μπουκοβάλα, καθηγητή της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. του τομέα Γεωτεχνικής και τον Δρ Μιχάλη Καββαδά αναπληρωτή καθηγητή της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π του τομέα Γεωτεχνικής για τον χρόνο που αφιέρωσαν στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Οφείλω ένα ιδιαίτερο ευχαριστώ στον κ. Παύλο Αστερίου, Υποψήφιο Διδάκτορα της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. του τομέα γεωτεχνικής για την συνεχή ενασχόληση και πολύτιμη βοήθειά του πάνω στο θέμα και την εξαιρετική συνεργασία μας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Χαράλαμπο και Κυριακή, την αδερφή μου Παρασκευή και όλους τους φίλους μου για την υποστήριξη που μου παρείχαν σε όλη μου την πορεία στο Ε.Μ.Π.

2. Θεωρητικά στοιχεία

2.1. Γενικά για τις καταπτώσεις

Κατάπτωση βράχου η βραχόπτωση (rockfall) είναι το φαινόμενο κατά το οποίο υπό την επίδραση της βαρύτητας, τμήμαχος βράχου αποκολλάται από τη φυσική του θέση στο πρανές, προσκρούει και αναπηδά στην επιφάνεια του πρανούς έως ότου να φτάσει σε μια νέα κατάσταση ηρεμίας.

Στην Ελλάδα, οι καταπτώσεις βραχωδών τεμαχών από πρανή είναι σύνηθες φαινόμενο λόγω του έντονα ορεινού γεωμορφολογικού ανάγλυφου που επικρατεί. Αν και υπάρχουν μέτρα για την αντιμετώπιση του φαινομένου που έχουν εφαρμοστεί σε αρκετές περιοχές επιτυχώς, εξακολουθούν να υπάρχουν αρκετές επισφαλείς θέσεις που δεν έχουν ακόμη διευθετηθεί. Έτσι, υπάρχουν πολλά περιστατικά που πέρα από υλικές ζημιές, με δυσμενείς συνέπειες όπως την καταστροφή ακίνητης περιουσίας και την απώλεια ανθρώπινων ζωών, ειδικά όταν το φαινόμενο αυτό λαμβάνει χώρα κοντά σε συγκοινωνιακά δίκτυα ή οικισμούς.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο άνθρωπος προσπαθεί να προστατευτεί από το φαινόμενο αυτό ή τουλάχιστον να μειώσει τον επερχόμενο κίνδυνο με διάφορες μεθόδους. Διακρίνονται δυο βασικές τακτικές στην αντιμετώπιση του φαινομένου, η διαφοροποίηση αυτών έγκειται στο γεγονός ότι είτε στοχεύουν στην πρόληψη των περιστατικών είτε στον περιορισμό των αρνητικών συνεπειών κατά την διενέργεια του συμβάντος. Η πρώτη μέθοδος δηλαδή προσπαθεί να βελτιώσει ή και να ενισχύσει την βραχομάζα ώστε να αποτρέψει την αποκόλληση του τεμάχους ενώ η δεύτερη έχει ως στόχο τον περιορισμό της ανεξέλεγκτης κίνησης του τεμάχους μετά την αποκόλληση έτσι ώστε να μην προκληθούν υλικές ζημιές ή απώλειες ανθρώπινων ζωών.



Εικόνα 2 - Κατάπτωση βραχοτεμαχών σε πρανές στο χωριό Μόλυβος Μυτιλήνης (Μάρτιος 2014), (www.emprosnet.gr)



Εικόνα 3 - Καταπτώσεις στη κοιλάδα των Τεμπών, (Δεκέμβριος 2009), (www.autoblog.gr)

2.2. Αίτια καταπτώσεων

Τα αίτια των καταπτώσεων βραχωδών τεμαχών μπορούν να χωριστούν σε τρεις βασικές κατηγορίες, αυτές που προέρχονται από γεωλογικές ή υδρογεωλογικές διεργασίες, αυτές που προκαλούνται λόγω της σεισμικής φόρτισης και αυτές που προκαλούνται ως αποτέλεσμα της ανθρώπινης δραστηριότητας.

2.2.1. Γεωλογικές –υδρογεωλογικές διαδικασίες

Οι ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά που έχει το πέτρωμα εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τον τρόπο γέννησης του και το ιστορικό των τεκτονικών καταπονήσεων και κλιματολογικών συνθηκών στις οποίες έχει εκτεθεί στο πέρασμα των χρόνων.

Επιπλέον, η αντοχή και η ανθεκτικότητα της βραχομάζας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη σύσταση των ορυκτών που τη συνθέτουν, δεδομένου ότι εκτός των ιδιοτήτων του άρρηκτου πετρώματος, μεγάλο ρόλο παίζουν και οι ασυνέχειες της μάζας του. Έτσι, υπάρχει ένα μεγάλο φάσμα γεωλογικών συμπεριφορών στο φαινόμενο της αποσάθρωσης το οποίο και χαρακτηρίζει σε σημαντικό βαθμό τη ποιότητα της βραχομάζας στο σύνολό της.

Η αποσάθρωση ανάλογα με το γενεσιουργό αίτιο διακρίνεται σε μηχανική και χημική. Οι κύριοι συντελεστές της μηχανικής αποσάθρωσης είναι:

- Η παγετώδης αποσφήνωση, δηλαδή η μετατροπή του νερού που περιέχεται στους πόρους και τις ασυνέχειες της βραχομάζας σε πάγο, και κατά συνέπεια η διόγκωσή του μέσα σε αυτές, που έχει ως αποτέλεσμα την επιβολή μεγάλων δυνάμεων σε αυτή.
- Η θερμική συστολή και διαστολή των διαφόρων πετρωμάτων που αποτελούν τη βραχομάζα. Κάθε υλικό αντιδρά διαφορετικά στην εναλλαγή της θερμοκρασίας (ανομοιόμορφη συστολή και διαστολή) και επομένως αναπτύσσονται επιπλέον δυνάμεις στη βραχομάζα.
- Η βιογενής ενέργεια, δηλαδή διάφορες ρίζες φυτών διευρύνουν το άνοιγμα των ασυνεχειών της βραχομάζας, με αποτέλεσμα τη μείωση της ποιότητας της.
- Η κρυσταλλοποίηση των αλάτων που βρίσκονται διαλυμένα μέσα στο υλικό πλήρωσης των ασυνεχειών της βραχομάζας και αυξάνει τον όγκο τους.

Η χημική αποσάθρωση έχει ως αποτέλεσμα την αλλοίωση της ορυκτολογικής σύστασης του πετρώματος. Κύριο ρόλο σε αυτήν παίζει το νερό με διάφορες χημικές διεργασίες. Αυτές είναι η οξειδωση, η υδρόλυση και η διάλυση.

Τέλος, σημαντικό ρόλο στην μείωση της ποιότητας της βραχομάζας έχουν οι βροχοπτώσεις, καθώς το νερό εισχωρεί στις ασυνέχειες και παρέχει τις προϋποθέσεις για να συμβούν όλα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, σε συνδυασμό και με την αύξηση της υδροστατικής πίεσης.

2.2.2. Σεισμική δραστηριότητα

Όπως είναι γνωστό και από τη σεισμική μηχανική, κατά την διάρκεια μιας σεισμικής διέγερσης σε ένα πρηνές, αυτό ταλαντώνεται, αναπτύσσοντας επιταχύνσεις σε διάφορες διευθύνσεις. Αυτή η επιτάχυνση δίνει μια επιπλέον δύναμη που μπορεί να εκφραστεί από τον θεμελιώδη δεύτερο νόμο του Νεύτωνα ως:

$$F = m \cdot a \quad (2.1)$$

όπου F η σεισμική δύναμη, m η μάζα του πρηνούς που διεγείρεται από το σεισμό και a , η σχετική επιτάχυνση στο κέντρο μάζας του σχηματισμού. Επομένως, όταν αυτή η επιτάχυνση ξεπεράσει μια κρίσιμη τιμή στην οποία και αποκολλούνται τα τεμάχια του βράχου, έχουμε το φαινόμενο των καταπτώσεων.

2.2.3. Ανθρώπινη δραστηριότητα

Πολλές φορές η αποκόλληση τεμαχίων βράχου προκαλείται από ανθρώπινη παρέμβαση. Συγκεκριμένα, εργασίες ανατίναξης για την εκσκαφή τεχνητών πρηνών ή την διάνοιξη σηράγγων μπορούν να προκαλέσουν δονήσεις παρόμοιες με αυτές της σεισμικής διέγερσης αλλά με μικρότερη διάρκεια. Επίσης, ακόμα και στις προγραμματισμένες εργασίες καθαίρεσης ενός μικρού τμήματος βράχου, μπορεί να προκληθεί αποκόλληση ενός μεγαλύτερου τμήματος.

2.3. Επικινδυνότητα καταπτώσεων

Δεδομένου ότι το φαινόμενο της κατάπτωσης βράχων είναι σχετικά δύσκολο να προβλεφθεί, έχει επικρατήσει ο διαχωρισμός περιοχών σε ζώνες επικινδυνότητας με σκοπό την ομαδοποίησή τους και την λήψη των κατάλληλων μέτρων προστασίας.

Οι ζώνες επικινδυνότητας διαμορφώνονται με βάση κάποια χαρακτηριστικά τα οποία αποτελούν βασικά αίτια των καταπτώσεων παγκοσμίως. Αυτά είναι (Ανδριανόπουλος, 2011):

- Ο προσανατολισμός της κλίσης των πρανών, όσο πιο απότομο είναι το πρανές τόσο μεγαλύτερη είναι η επίδραση της βαρύτητας στα βραχώδη τεμάχη και επομένως μεγαλύτερη η πιθανότητα εκδήλωσης καταπτώσεων. Επιπλέον, ο προσανατολισμός της κλίσεως του πρανού μπορεί να επηρεάσει έμμεσα την κίνηση των καταπτώσεων καθώς ελέγχει την έκθεση σε διάφορες κλιματολογικές συνθήκες
- Η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου των περιοχών που εξετάζονται, καθώς τα ποτάμια και η διάβρωση των πρανών τους είναι ένας από τους πιο κοινούς παράγοντες πρόκλησης καταπτώσεων, ιδιαίτερα σε περιοχές με έντονο μορφολογικό ανάγλυφο και πυκνό υδρογραφικό δίκτυο.
- Η πυκνότητα του οδικού δικτύου των περιοχών που εξετάζονται. Οι εκτεταμένες εκσκαφές για την διαμόρφωση των οδικών πρανών, η εφαρμογή των εξωτερικών φορτίων καθώς και η απομάκρυνση βλάστησης είναι από τις πιο κοινές δραστηριότητες που λαμβάνουν χώρα κατά μήκος του οδικού δικτύου και είναι υπεύθυνες για την ενεργοποίηση των καταπτώσεων.
- Η γεωγραφική κατανομή του ύψους βροχόπτωσης. Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο με τα αίτια των καταπτώσεων, με τις βροχοπτώσεις το νερό εισχωρεί στις ασυνέχειες της βραχομάζας και προκαλεί με διάφορους τρόπους την αποσάθρωσή της (φυσική ή χημική)
- Η κλιματική ζώνη που ανήκει κάθε περιοχή. Για παράδειγμα σε μια περιοχή με έντονες εναλλαγές θερμοκρασιών στην διάρκεια της ημέρας ή ακόμα και του χρόνου, τα πετρώματα λόγω της διαρκούς συστολής και διαστολής τους καθίστανται πιο ευάλωτα στο φαινόμενο αυτό.
- Η σεισμική δραστηριότητα των περιοχών και οι γεωτεκτονικές ζώνες, καθώς όπως αναφέρθηκε και παραπάνω ο σεισμός αποτελεί γενεσιουργό αίτιο των καταπτώσεων.
- Η λιθολογική σύσταση των πρανών της κάθε περιοχής. Κάθε πέτρωμα έχει διαφορετικές ιδιότητες, διαφορετικές αντοχές σε φορτίσεις και ανθεκτικότητα στην αποσάθρωσή του. Για παράδειγμα, πιο ευπαθές σε απόσχιση τμήματός του είναι ένα πρανές που αποτελείται από ψαμμίτη ή μάργες παρά ένα που αποτελείται από υγιή ασβεστολιθικά πετρώματα.
- Η χρήση της γης, επίσης σχετίζεται έντονα με την ενεργοποίηση των κατολισθήσεων, καθώς πρανή με ιδιαίτερα ανεπτυγμένο ριζικό σύστημα παρέχουν μηχανικές και υδρολογικές επιδράσεις.

- Τέλος, η πυκνότητα του πληθυσμού, καθώς αυξάνει την πιθανότητα επιδράσεων του ανθρώπινου παράγοντα που διαταράσσουν την ισορροπία και συνεπώς αυξάνει τον κίνδυνο εμφάνισης καταπτώσεων. Επιπλέον, σε περιοχές με μεγάλη συγκέντρωση πληθυσμού υπάρχει μεγαλύτερος κίνδυνος πρόκλησης σωματικών και υλικών βλαβών.

2.3.1. Συστήματα ταξινόμησης επικινδυνότητας καταπτώσεων

Η εκτίμηση του κινδύνου έναντι καταπτώσεων σε ορεινές περιοχές (οδικά σιδηροδρομικά δίκτυα, κατοικημένες περιοχές) παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην λήψη αποφάσεων για τη κατασκευή ή όχι των κατάλληλων μέτρων προστασίας στην περιοχή αλλά και τη θέση εγκατάστασης τους. Επομένως, για τη ποσοτικοποίηση του κινδύνου έχουν υιοθετηθεί τα ανάλογα συστήματα ταξινόμησης.

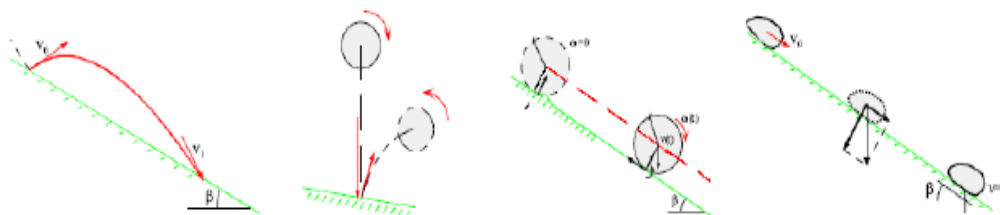
Το σύστημα ταξινόμησης κινδύνου έναντι βραχοπτώσεων το οποίο είναι ευρέως διαδεδομένο και χρησιμοποιείται σε πολλές πολιτείες των Η.Π.Α. είναι το RHRS (από το Rockfall Hazard Rating System) που αναπτύχθηκε από τους Pierson et al. (1990) για το τμήμα αυτοκινητοδρόμων της πολιτείας του Oregon. Σε αυτό το σύστημα γίνεται η αξιολόγηση και η βαθμονόμηση των παρακάτω παραμέτρων:

- Το ύψος του πρανούς
- Η αποτελεσματικότητα της τάφρου της οδού
- Η πιθανότητα ύπαρξης οχήματος στην περιοχή της κατάπτωσης
- Η επάρκεια του χρόνου αντίδρασης του οδηγού
- Το πλάτος του οδοστρώματος αναφορικά με την δυνατότητα του οδηγού να προβεί σε ελιγμούς για να αποφύγει πιθανή πτώση βράχου
- Ο βαθμός και ο ρυθμός αποσάθρωσης και διάβρωσης των πετρωμάτων
- Η κατάσταση των ασυνεχειών, δηλαδή η τραχύτητα και ο προσανατολισμός τους
- Το κλίμα και η παρουσία νερού στο πρανές
- Το μέγεθος και η ποσότητα των τεμαχίων
- Το ιστορικό των καταπτώσεων στην περιοχή που μελετάται.

2.4. Τροχιά πίπτοντος τεμάχου

Η τροχιά ενός πίπτοντος τεμάχου βράχου, μπορεί να αναλυθεί σε τέσσερις βασικές κινήσεις (Descoedres and Zimmermann, 1987). Αυτές είναι:

- Ελεύθερη πορεία (Free flight),
- Αναπήδηση (Bouncing).
- Κύλιση (Rolling),
- Ολίσθηση (Sliding).

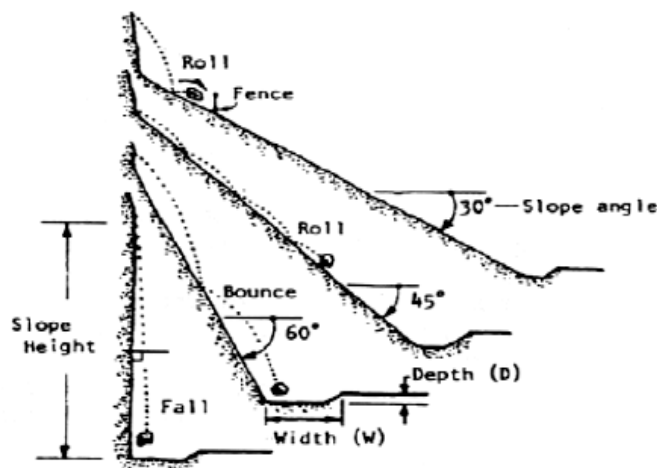


Εικόνα 4 - Βασικές κινήσεις του φαινομένου της κατάπτωσης

Ο βασικός τύπος κίνησης που μελετάται στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι η αναπήδηση. Η κίνηση αυτή πραγματοποιείται με τη πρόσκρουση του τεμάχου βράχου στην επιφάνεια της πλαγιάς σε δέντρα και άλλα εμπόδια. Δεδομένης της πολυπλοκότητάς της, καθώς και των πάρα πολλών παραμέτρων που την επηρεάζουν, έχει κατανοηθεί λιγότερο από τους υπόλοιπους τύπους κίνησης και επομένως είναι δύσκολο να προβλεφθεί.

Αγνοώντας την επίδραση της αντίστασης του αέρα στην κίνηση του τεμάχου και θεωρώντας ως σημείο αναφοράς το κέντρο μάζας του, η τροχιά που εκτελεί το τέμαχος είναι παραβολική. Ο Ritchie (1963) με την εκτέλεση επιτόπου δοκιμών, παρατήρησε ότι το κυρίαρχο είδος κίνησης ανά κατηγορία είναι:

- Σε πρανή με κλίση έως 45° (όπου ως γωνία κλίσης ορίζεται η γωνία μεταξύ οριζοντίου επιπέδου και του επιπέδου του πρανούς) η κίνηση του τεμάχου θα είναι τύπου κύλισης,
- Σε πρανή με κλίση από 46° έως 63° η κίνηση είναι τύπου αναπήδησης και
- Σε πρανή με κλίση μεγαλύτερες των 64° η κίνηση είναι τύπου ελεύθερης πτώσης.



Εικόνα 5 - Είδη κίνησης συναρτήσει της κλίσης του πρανούς (Ritchie, 1963).

Κάνοντας την παραδοχή ότι ένα τεμάχιο ολισθαίνει πάνω στην επιφάνεια ενός πρανού, η δύναμη αντίστασης που επηρεάζει το μήκος ολίσθησής του μέχρι τη θέση ηρεμίας, δηλαδή το που και πότε θα σταματήσει η κατάπτωση, είναι αυτή της τριβής. Η δύναμη αυτή περιγράφεται από τον νόμο του Coulomb, έχει φορά αντίθετη από αυτήν της κίνησης και εφαρμόζεται στο σημείο επαφής του τεμάχους με την επιφάνεια του πρανού. Εκφράζεται με τη σχέση:

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

όπου μ είναι ο συντελεστής τριβής που παίρνει τιμές μεταξύ 0,6 και 1 (αδιάστατο μέγεθος), m είναι η συνολική μάζα του πίπτοντος τεμάχους, g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας ($9,81\text{m/s}^2$) και β είναι η γωνία κλίσης του πρανού, όπως ορίστηκε και παραπάνω.

Στην περίπτωση της κύλισης, γίνεται η παραδοχή ότι στην κίνηση του πρανού που έρχεται σε επιφάνεια με το έδαφος αναπτύσσεται αποκλειστικά περιστροφική κίνηση.

Γενικά η απόκριση του τεμάχους όταν είναι σε επαφή με το πρανές είναι πολυπλοκότερη από αυτήν την απλή παραδοχή και πολλές φορές συνδυάζεται με κίνηση τύπου ολίσθησης. Σε αυτήν την περίπτωση, η σύνθετη κίνηση μπορεί να περιγραφεί πιο αναλυτικά με την χρησιμοποίηση και πάλι του νόμου Coulomb, με τη τροποποίηση του συντελεστή ολίσθησης μ , έτσι ώστε να εξαρτάται από της ιδιότητες του πρανού σύμφωνα με τη παρακάτω σχέση:

$$\mu = \mu_0 + \kappa \cdot \frac{d'}{d} \quad (2.3)$$

όπου οι συντελεστές μ_0 και κ παίρνουν τιμές από 0,37 έως 0,67 και 0,17 έως 0,26 αντίστοιχα και d' και d το μήκος επαφής του εδάφους με το τέμαχος και η διάμετρός του αντίστοιχα.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως από τους παραπάνω τύπους κίνησης, ο πιο πολύπλοκος και απρόβλεπτος είναι αυτός της αναπήδησης και συνεπώς είναι δυσκολότερος να μελετηθεί.

Το φαινόμενο της αναπήδησης εξαρτάται από πάρα πολλές παραμέτρους, που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά του πρανούς, του τεμάχους και των κινηματικών χαρακτηριστικών της τροχιάς του. Πιο συγκεκριμένα, επηρεάζεται από την αντοχή, την σκληρότητα, την τραχύτητα και την κλίση του πρανούς, την αντοχή, την σκληρότητα, το βάρος, το μέγεθος και το σχήμα του τεμάχους και την μεταφορική και περιστροφική ταχύτητα και την γωνία πρόσπτωσης στο πρανές (Labiouse and Heidenreich, 2009).

Οι περισσότερες μέθοδοι που είναι σε χρήση σήμερα αναπαριστούν το φαινόμενο της αναπήδησης με έναν απλοποιημένο τρόπο, δηλαδή χρησιμοποιώντας τους συντελεστές αναπήδησης για να περιγράψουν την απώλεια ταχύτητας ή ενέργειας που χάνεται εξ αιτίας της κρούσης στην επιφάνεια του πρανούς.

Δείγμα της φτωχής κατανόησης του φαινομένου αποτελεί το γεγονός ότι η μαθηματική έκφραση των συντελεστών αναπήδησης δεν είναι καθολικά ορισμένη από την επιστημονική κοινότητα. Ωστόσο αποτελούν την πιο κρίσιμη παράμετρο για τη προσομοίωση της τροχιάς και τον προσδιορισμό της απώλειας ταχύτητας και της κινητικής ενέργειας κατά τη κρούση, με την χρήση των υφιστάμενων μεθόδων ανάλυσης της τροχιάς.



Εικόνα 6 - Βράχος που αναπηδά στο ηφαίστειο Paluweh στην Ινδονησία, (www.photovolcanica.com)

Οι τιμές των συντελεστών αναπήδησης μπορούν να ληφθούν με τους εξής τρόπους:

- Με ανάδρομες αναλύσεις καταγεγραμμένων καταπτώσεων, όπου μετά από την ολοκλήρωση φυσικών φαινομένων βραχοπτώσεων γίνεται ανάλυση των τροχιών στο πρηνές και της τελικής θέσης ηρεμίας (π.χ. μέγεθος τεμαχών, οριζόντια και πλευρική απόσταση που διανύθηκε, ύψος ή και μήκος αναπήδησης).
- Με ειδικές δοκιμές πεδίου (In situ tests) που παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για την μελέτη του φαινομένου, την αξιολόγηση των σχετικών φυσικών παραμέτρων καθώς και την ορθή βαθμονόμηση αριθμητικών μοντέλων.
- Με δοκιμές υπό κλίμακα στο εργαστήριο, που περιλαμβάνουν την εκτέλεση δοκιμών σε ομοιώματα μικρής κλίμακας, είτε με την προσομοίωση ολόκληρης της εκτελούμενης τροχιάς είτε με επικέντρωση αποκλειστικά στην κρούση

Αξίζει να σημειωθεί ότι στις εργαστηριακές δοκιμές μικρής κλίμακας τα αποτελέσματα είναι πολύ χρήσιμα για την κατανόηση του φαινομένου της αναπήδησης και τον προσδιορισμό της επίδρασης διαφόρων κρίσιμων παραμέτρων σε αυτό, αλλά δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν αυτούσια στην ποσοτική ερμηνεία λόγω φαινομένων κλίμακας.

2.5. Μαθηματική προσέγγιση συντελεστών αναπήδησης

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

Πιο συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια της πρόσκρουσης απελευθερώνεται ένα ποσό ενέργειας, το οποίο οφείλεται στην ελαστο-πλαστική συμπεριφορά του υλικού της επιφάνειας πρόσκρουσης, στην δημιουργία ελαστικού κύματος, και ανάλογα με τις συνθήκες αναπήδησης στην αντίσταση κύλισης και ολίσθησης ή ακόμα και σε ενδεχόμενη καταστροφή του (Giani, 1992).

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

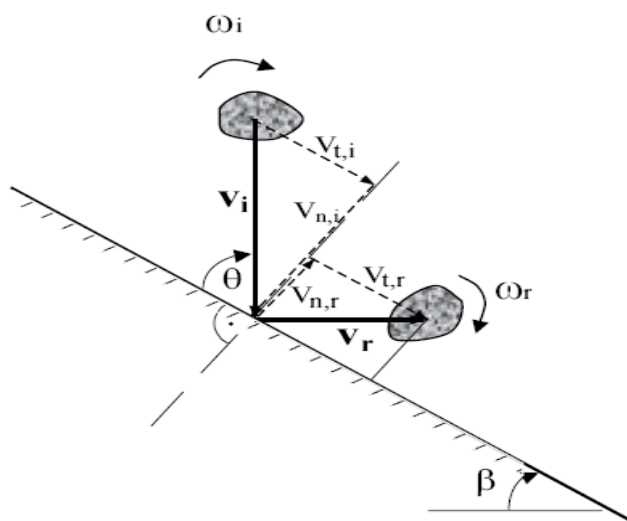
Αυτή η διαφοροποίηση των μηχανισμών στην αντίσταση της κίνησης έχει ως συνέπεια τη χρησιμοποίηση επί μέρους ορισμών για τη μέτρηση της αντίστασης. Έτσι το μέτρο της αντίστασης κάθετα στο επίπεδο του πρανούς ονομάζεται κάθετος συντελεστής αναπήδησης (normal coefficient of restitution) ενώ αυτό παράλληλα στο επίπεδο του πρανούς ονομάζεται εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης (tangential coefficient of restitution).

Εκτός των συνθηκών που επικρατούν πριν την πρόσκρουση, το φαινόμενο της αναπήδησης διαφοροποιείται περαιτέρω την στιγμή της επαφής του τεμάχους με την επιφάνεια του πρανούς. Στην περίπτωση μη μηδενικής εφαπτομενικής συνιστώσας της ταχύτητας στο σημείο επαφής, η πρόσκρουση λέγεται πρόσκρουση κύλισης ή ολίσθησης (sliding ή slipping impact) και η κίνηση του εδάφους είναι ένας συνδυασμός ανάμεσα στις δύο κινήσεις. Αντίθετα, αν η εφαπτομενική συνιστώσα της ταχύτητας του τμήματος του τεμάχους που έρχεται σε επαφή με το πρανές είναι μηδέν, η πρόσκρουση λέγεται πρόσκρουση προσκόλλησης (sticking impact).

Δεδομένης της φτωχής κατανόησης του φαινομένου, αν και έχουν προταθεί διάφορες σχέσεις για να περιγράψουν τους μηχανισμούς του από μαθηματική σκοπιά, δεν έχει υπάρξει συμφωνία στους κύκλους της επιστημονικής κοινότητας έτσι ώστε να καταλήξουν στην καταλληλότερη.

Οι σχέσεις οι οποίες χρησιμοποιούνται περισσότερο είναι εκφρασμένες σε όρους ταχύτητας και ενέργειας. Παρ' όλα αυτά ανατρέχοντας στην σχετική βιβλιογραφία συναντούνται και

σχέσεις που χρησιμοποιούν τον λόγο της ώθησης προ και μετά της κρούσης (Bozzolo and Ramini, 1986, Descoeudres and Zimmermann, 1987). Οι συντελεστές αυτοί ονομάζονται συντελεστές αναπήδησης, εκφράζουν το ποσοστό της ταχύτητας ή της ενέργειας που χάνεται κατά τη κρούση και συμβολίζονται με το γράμμα R. Μπορούν να πάρουν τιμές μεταξύ 0 και 1, με την πρώτη τιμή να περιγράφει την απολύτως ανελαστική σύγκρουση, δηλαδή με ολική απώλεια ενέργειας (απολύτως πλαστική συμπεριφορά), ενώ την δεύτερη να περιγράφει την απολύτως ελαστική σύγκρουση με μηδενική απώλεια ενέργειας (Goldsmith, 1960).



Εικόνα 7 - Συνιστώσες ταχυτήτων πριν και μετά την αναπήδηση (Heidenreich, 2004)

2.5.1. Σχέσεις ταχυτήτων

Οι σχέσεις ταχυτήτων βασίζονται στη θεωρία του Νεύτωνα για την κεντρική ανελαστική κρούση δύο σωματιδίων όπου ο συντελεστής αναπήδησης είναι:

$$R = \frac{V_{r,2} - V_{r,1}}{V_{i,2} - V_{i,1}} \quad (2.4)$$

όπου οι δείκτες i, r (incident και rebound) αντιπροσωπεύουν τα στιγμιότυπα πριν και μετά την κρούση των σωματιδίων μεταξύ τους και οι 1,2 χρησιμεύουν για την ταυτοποίησή τους.

Από τις πολλές σχέσεις που συναντώνται στην βιβλιογραφία για τους συντελεστές αναπήδησης, οι πλέον διαδεδομένες είναι αυτές που λαμβάνουν υπ' όψιν την κάθετη (normal) και την εφαπτομενική (tangential) συνιστώσα της ταχύτητας του τεμάχους πριν και μετά τη κρούση. Επομένως, για πρόσκρουση μάζας επί σταθερής επιφάνειας οι συντελεστές αναπήδησης ορίζονται ως:

$$R_n = -\frac{V_{r,n}}{V_{i,n}} \quad (2.5)$$

$$R_t = \frac{V_{r,t}}{V_{i,t}} \quad (2.6)$$

Όπου: R ο συντελεστής αναπήδησης
 n η ταχύτητα του τεμάχους με δείκτη r και i για τον συμβολισμό του χρόνου μετά ή πριν την κρούση αντίστοιχα
 n συντελεστής κάθετος στην επιφάνεια (normal)
 t συντελεστής παράλληλος στην επιφάνεια (tangential).

Στον τύπο του κάθετου συντελεστή αναπήδησης παρατηρείται το αρνητικό πρόσημο. Αυτό συμβαίνει γιατί κατά την κρούση η κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας αλλάζει πρόσημο. Επομένως για να έχει η έκφραση θετικές τιμές μεταξύ 0 και 1 πολλαπλασιάζεται με τον συντελεστή -1.

Πρέπει να σημειωθεί ότι όλες τις παραπάνω σχέσεις που ορίζονται από την ορθή και εφαπτομενική συνιστώσα της ταχύτητας του κέντρου μάζας του τεμάχους, αναφέρονται στο ποσοστό της ενέργειας που χάνεται κατά την κρούση με βάση την μεταφορική (translational velocity) ταχύτητα. Ανάλογα με την μορφολογία της επιφάνειας πρόσκρουσης μπορεί η αρχική ενέργεια λόγω μεταφορικής ταχύτητας να αναλωθεί και σε περιστροφική ταχύτητα (rotational velocity) μετά την πρόσκρουση.

Άλλη μια έκφραση του συντελεστή αναπήδησης που είναι αρκετά διαδεδομένη, τον εκφράζει ως λόγο μεταξύ των μέτρων των διανυσμάτων ταχύτητας του τεμάχους τα στιγμιότυπα ακριβώς πριν και μετά την κρούση:

$$R_v = \frac{V_r}{V_i} \quad (2.7)$$

όπου V_i και V_r είναι τα μέτρα των ταχυτήτων πριν και μετά την κρούση αντίστοιχα.

Σε περίπτωση που οι δοκιμές γίνονται με ελεύθερη πτώση η σχέση μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$R_H = \sqrt{\frac{H_r}{H_i}} \quad (2.8)$$

Όπου H_i είναι το ύψος από το οποίο αφήνεται το τέμαχος για να εκτελέσει ελεύθερη πτώση και H_r το ύψος αναπήδησης μέχρι το σημείο που μηδενίζεται η ταχύτητα.

2.5.2. Σχέσεις ενεργειών

Ο ορισμός του συντελεστή αναπήδησης μέσω ενεργειακών σχέσεων βασίζεται στην διατύπωση του λόγου ενεργειών του τεμάχους πριν και μετά την πρόσκρουση, ενώ η έκφραση των ενεργειών στην πλειονότητα των ορισμών γίνεται σε όρους μεταφορικής ενέργειας.

$$R_E = \frac{E_{trans,r}}{E_{trans,i}} = \frac{\frac{1}{2}mV_r^2}{\frac{1}{2}mV_i^2} = \frac{V_r^2}{V_i^2} \quad (2.9)$$

όπου m η μάζα του τεμάχους, με την προϋπόθεση ότι παραμένει σταθερή πριν και μετά την κρούση και V_t, V_r το μέτρο της μεταφορικής ταχύτητας πριν και μετά την κρούση αντίστοιχα.

Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, εάν γίνει η διάκριση του συντελεστή αναπήδησης σε κάθετο και εφαπτομενικό, προκύπτουν οι παρακάτω δύο σχέσεις:

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

$$R_{E,t} = \frac{V_{t,r}^2}{V_{n,i}^2 + V_{t,i}^2} = \frac{V_{t,r}^2}{V_i^2} \quad (2.11)$$

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω στην ενότητα της έκφρασης των συντελεστών αναπήδησης με σχέσεις ταχυτήτων, σε πολλές περιπτώσεις πριν ή μετά την κρούση το τέμαχος εκτός από μεταφορική κίνηση εκτελεί και περιστροφική. Επομένως για να καλυφθεί και αυτό το ενδεχόμενο, έχει προταθεί και ο παρακάτω μαθηματικός ορισμός:

$$R_{TE} = \frac{E_{tot,r}}{E_{tot,i}} = \frac{\frac{1}{2} \left[m(V_{n,r}^2 + V_{t,r}^2) + I\omega_r^2 \right]}{\frac{1}{2} \left[m(V_{n,i}^2 + V_{t,i}^2) + I\omega_i^2 \right]} \quad (2.12)$$

όπου V οι όροι της μεταφορικής και ω αυτοί της περιστροφικής ταχύτητας του τεμάχους και I η ροπή αδράνειας του, ως προς το κέντρο μάζας του.

2.6. Συγκεντρωτικός πίνακας συντελεστών αναπήδησης.

Πίνακας 1 - Συγκεντρωτικά αποτελέσματα βιβλιογραφίας
(Heidenreich, 2004; Αστερίου, 2011; Μώρου, 2014)

Αναφορές	Rn	Rt	Υλικό - Παρατηρήσεις
Habib (1977)	0,75-0,80	-	Βασισμένο σε εμπειρία στην Ιταλία
	0,50-0,60	-	Βασισμένο σε εμπειρία στη Νορβηγία
Piteau & Clayton (1977)	0,80-0,90	0,65-0,75	Συμπαγής βράχος
	0,50-0,80	0,45-0,65	Κορήματα μαζί με μεγάλα τεμάχια βράχου
	0,40-0,50	0,35-0,45	Συμπαγή κορήματα μαζί με μικρά τεμάχια βράχου
	0,20-0,40	0,20-0,30	Πλαγιές με φυτοκάλυψη
Wu (1985)	0,20-0,80	0,50-0,75	Βράχος πάνω σε βράχο ή ξύλινη επιφάνεια
Heierli (1985)	0,95	-	Βράχος
	0,55	-	Χαλίκια στρώσης 35 cm
	0,45	-	Χαλίκια στρώσης 70 cm
	0,45	-	Κορήματα
Hoek (1987)	0,53	0,99	Συμπαγής βράχος
	0,40	0,90	Ασφαλτοστρωμένος δρόμος
	0,35	0,85	Σάρρες, ογκόλιθοι
	0,32	0,82	Κορήματα
	0,32	0,80	Κορήματα με φυτοκάλυψη
	0,30	0,80	Εδαφικό υλικό με λίγη βλάστηση
Urciuoli (1988)	0,05-0,35	0,50-1,00	Βραχώδη τεμάχια ασβεστόλιθου
	-	0,24	Κορήματα
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 λίγη βλάστηση
	0,30-0,33	0,80-0,83	Κορήματα με βλάστηση
	0,28-0,32	0,80-0,83	Εδαφικό υλικό με λίγη βλάστηση
	0,28-0,32	0,78-0,82	Εδαφικό υλικό με βλάστηση
Gianni (1992), Barbierei et al. (1988)	0,50	0,95	Βράχος
	0,35	0,85	Βράχος με ογκολίθους
	0,30	0,70	Κορήματα με ομοιόμορφη κατανομή στοιχείων
	0,25	0,55	Έδαφος με βλάστηση
Azzoni et al. (1992)	0,45	0,45	Χαλαζίτης
	0,66	0,30	Χαλαζίτης
	0,66	0,62	Ασβεστόλιθος
	0,8	1,22	-

Πίνακας 1 (συνέχεια) – Συγκεντρωτικά αποτελέσματα βιβλιογραφίας

Αναφορές	Rn	Rt	Υλικό - Παρατηρήσεις
Evans & Hungr (1993)	0,90	0,90	Μικρά τεμάχια πάνω σε βράχο
	0,70	0,80	Μεγάλα τεμάχια σε κορήματα
Budetta & Santo (1994)	0,20	0,53	Βράχος (από βαθμονόμηση προγράμματος)
Gerber (1995)	0,17-0,43	0,45-0,88	Ασβεστόλιθος
Kamijo (2000)	0,10-0,35	-	Κατακόρυφη πτώση τεμάχους 220 kg σε σκληρή επιφάνεια
	0,10	-	Κατακόρυφη πτώση τεμάχους 800 kg σε σκληρή επιφάνεια
Ushiro et al. (2000)	0,10-0,40	0,71	-
Jones et al. (2000)	0,60-1,00	0,90-1,00	Λεία και στρωσιγενής επιφάνεια
	0,15-0,30	0,75-0,95	Βράχος και ογκόλιθοι
	0,12-0,20	0,65-0,95	Κορήματα και πλαγιές με έδαφος
	0,10-0,20	0,50-0,80	Πλαγιές με χαλαρό έδαφος
Giani et al. (2004)	0,48	0,79	Οφθιολιθικός βράχος μέσης κλίσης 27,5°
	0,25	0,47	Αποσαθρωμένος γρανιτικός βράχος μέσης κλίσης 36°
Cagnoli & Manga (2004)	0,15	-	Ελαφρόπετρες με γωνία πρόσπτωσης 80°
	0,55	-	Ελαφρόπετρες με γωνία πρόσπτωσης 25°
Dorren et al. (2005)	0,77	0,36	Δασική περιοχή με μέση κλίση πρανών 38°
	0,70	0,26	Μη δασική περιοχή με μέση κλίση πρανών 38°
Topal et al. (2006)	0,46	0,71	Ανάδρομες αναλύσεις, περιοχή με γεωλογικό υπόβαθρο από ανδεσίτες
Labiouse & Heidenreich (2009)	0,003-0,257	0,07-1,00	Πειράματα μικρής και μέσης κλίμακας πάνω σε στρώση άμμου-Δοκίμια σκυροδέματος
Spadari et al. (2011)	1,06	0,74	Αλκαλικός Βασάλτης
	1,15	0,73	Χαλαζιακός Ψαμμίτης
	1,18	0,78	Lithic Sandstones

Πίνακας 1 (συνέχεια) – Συγκεντρωτικά αποτελέσματα βιβλιογραφίας

Αναφορές	Rn	Rt	Υλικό - Παρατηρήσεις
Asteriou & Euthimiou (2011)	0,34-0,52	0,70-0,88	Μάρμαρο Πεντέλης
	0,22-0,52	0,77-0,97	Ασβεστόλιθος
	0,24-0,56	0,56-0,88	Σχιστόλιθος
	0,38-0,62	0,72-0,98	Χαλαζιακός Ψαμμίτης
	0,14-0,58	0,61-0,99	Μάργα
Saroglou et al. (2012)	0,48	0,77	Εργαστηριακές δοκιμές με σφαιρικά δοκίμια από ασβεστόλιθο
	0,46	0,83	Ανάδρομες αναλύσεις με σφαιρικά δοκίμια από ασβεστόλιθο
Giacomini et al. (2012)	0,61-1,14	0,40-0,83	Ψαμμίτης
	0,59-0,93	0,52-0,83	Ιλυόλιθος
	0,11-0,22	0,40-0,80	Αποσαθρωμένα κορήματα
	0,41	0,64	Γαϊάνθρακας
Ansari et al. (2013)	0,35	0,85	Ανάδρομες αναλύσεις- Βασάλτης
Asteriou et al. (2013)	0,52	0,49	Μάρμαρο (Τύπος I)
	0,64	0,62	Μάρμαρο (Τύπος II)
	0,66	0,66	Ψαμμίτης
	0,52	0,51	Κρυσταλλικός ασβεστόλιθος
	0,50	0,47	Ασβεστόλιθος
	0,38	0,34	Σχιστόλιθος
	0,51	0,47	Πράσινος σχιστόλιθος
	0,36	0,33	Μάργα
	0,56	0,54	Ένεμα SikaDur
	0,49	0,47	Ένεμα SikaGrout
0,59	0,56	Πολυεστέρας	

*Οι τιμές του πίνακα που είναι μεγαλύτερες της μονάδας προέκυψαν από ανάδρομες αναλύσεις με αρχική ταχύτητα μηδενική ή πολύ μικρή. Ουσιαστικά εκφράζεται η αλλαγή διεύθυνσης της τροχιάς του τεμάχους στον συντελεστή αναπήδησης.

3. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια εκτενής αναφορά στην έρευνα που έχει διεξαχθεί στο αντικείμενο των βραχοπτώσεων, με έμφαση στους συντελεστές αναπήδησης.

Αρχικά, γίνεται μια αναφορά στις παραμέτρους που έχουν διαπιστωθεί πως επηρεάζουν το φαινόμενο και σε μια ποιοτική συσχέτισή τους με τις τιμές των συντελεστών αναπήδησης. Στην συνέχεια, γίνεται μια περιγραφή των αποτελεσμάτων, ποιοτική ή ποσοτική, των προηγούμενων ερευνών τα οποία και κατηγοριοποιούνται με βάση την μέθοδο διεξαγωγής, δηλαδή: δοκιμές πεδίου, ανάδρομες αναλύσεις και τέλος εργαστηριακές δοκιμές ύπο κλίμακα.

Μετάπειτα, γίνεται μια αναφορά στους συντελεστές κλίμακας που εφαρμόζονται στα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών, έτσι ώστε να μπορούν να αναχθούν σε πραγματική κλίμακα. Με αυτόν τον τρόπο, επιπλέον, επιτυγχάνεται η εξάλειψη οποιονδήποτε φαινομένων κλίμακας αναφορικά με την μάζα και την ταχύτητα του τεμάχους ως προς την επιφάνεια πρόσπτωσης.

Τέλος, γίνεται αναφορά σε γραμμικές σχέσεις της σύγχρονης βιβλιογραφίας, που συσχετίζουν τον συντελεστή αναπήδησης με την ταχύτητα και την μάζα του τεμάχους, οι οποίες έχουν προκύψει μέσω πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης, όπως δηλαδή και οι σχέσεις που θα παρουσιαστούν στην ενότητα της παρουσίασης των αποτελεσμάτων της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

3.1. Βιβλιογραφική ανασκόπηση συντελεστών αναπήδησης

Όπως φαίνεται στον 0, πολλοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί με το φαινόμενο των βραχοπτώσεων και κατ' επέκταση με τους συντελεστές αναπήδησης και την επιρροή διαφόρων παραμέτρων σε αυτούς. Ο Szabo (1966) βασιζόμενος στη Νευτώνεια φυσική και τη θεωρία των κρούσεων διαπίστωσε ότι η αναπήδηση δεν βασίζεται στις ιδιότητες του υλικού του τεμάχου αλλά εξαρτάται από την αρχική ταχύτητα, τη σύσταση και την γεωμετρία του.

Πίνακας 2 - Παράμετροι που επηρεάζουν τους συντελεστές αναπήδησης (Heidenreich, 2004).

Παράμετροι		R_v	R_n	R_t	R_E	Εδαφικό υλικό	Αναφορά
Τέμαχος	μάζα τεμάχου ↗		↘			σκυρόδεμα, βράχος	Ushiro et al., 2000
		↘				σκυρόδεμα	Kamijo, 2000
	γωνιότητα ↗ (από σφαιρικό σε γωνιώδες)		↘	↗ (ελαφρώς)	↘	γρανίτης	Wong et al., 2000
			$30^\circ < \beta < 60^\circ$ - $60^\circ < \beta < 75^\circ$ ↗	↘ (ελαφρώς)	↘ (ελαφρώς)	γύψος	Chau et al., 1999b
Εδαφικό υλικό	Μέτρο Ελαστικότητας ↗		↗	↗		φυσικά πρηνή	Pfeiffer & Bowen, 1989
			↗	↗		φυσικά πρηνή	Formaro & al., 1990
			↗	↗		έδαφος, γύψος, βράχος	Chau et al., 2002, Wu, 1985
	Ξηρή πυκνότητα ↗		$w < w_{opt}$: ↗ $w > w_{opt}$: -	$w < w_{opt}$: ↗ $w > w_{opt}$: -	$w < w_{opt}$: ↗ $w > w_{opt}$: -	έδαφος, γύψος	Chau et al., 1999a
			$w < w_{opt}$: - $w > w_{opt}$: ↗	$w < w_{opt}$: - $w > w_{opt}$: ↘	$w < w_{opt}$: - $w > w_{opt}$: ↘	έδαφος, γύψος	Chau et al., 1999a

Πίνακας 2 (Συνέχεια) - Παράμετροι που επηρεάζουν τους συντελεστές αναπήδησης.

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

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

Πίνακας 3 - Παράμετροι που επηρεάζουν το φαινόμενο της αναπήδησης (Labiose & Descoedres, 1999)

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

Στην συνέχεια, γίνεται μια αναδρομή σε αποτελέσματα και παρατηρήσεις από παλαιότερες έρευνες, χωρισμένες ανά το είδος τους, σε αυτές από δοκιμές πεδίου, εργαστηρίου και ανάδρομων αναλύσεων (Heidenreich, 2004).

3.1.1. Αναδρομή αποτελεσμάτων από δοκιμές πεδίου

Ritchie (1963)

Πραγματοποιώντας πειράματα πεδίου, παρατήρησε ότι η κλίση του πρανούς και οι τοπικές ανωμαλίες της επιφάνειάς του έχουν σημαντική επίδραση στην τροχιά του πίπτοντος τεμάχους.

Κάνοντας ποιοτική ανάλυση και χωρίς να προσδώσει αριθμητικές τιμές στους συντελεστές αναπήδησης παρατήρησε ότι:

- Η αύξηση της τραχύτητας του πρανούς οδηγεί σε μεγαλύτερη απώλεια ενέργειας σε σχέση με την διάμετρο του τεμάχους,
- Η αύξηση της πλαστικής συμπεριφοράς του υλικού οδηγεί σε μεγαλύτερη απώλεια ενέργειας,
- Η αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης οδηγεί σε μεγαλύτερη απώλεια ενέργειας. Μεγαλύτερη οριζόντια αναπήδηση παρατηρείται όταν το διάνυσμα των ταχυτήτων του τεμάχους σχηματίζει γωνία ίση με 45° με την επιφάνεια του πρανούς.

Broili (1977)

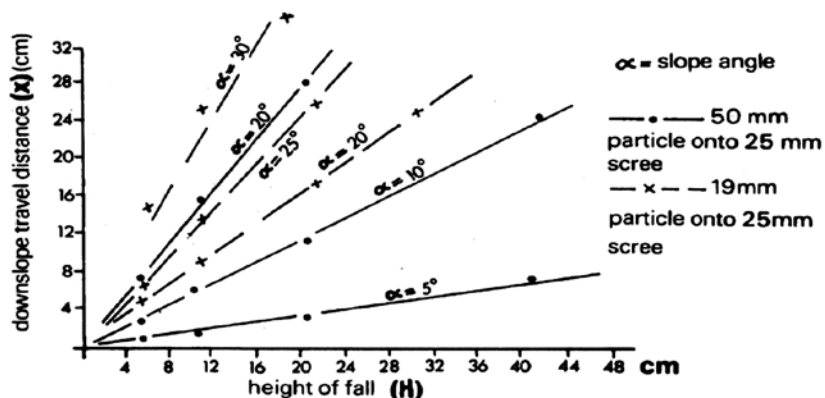
Από επί τόπου δοκιμές, μελέτησε την επίδραση της σχέσης μεταξύ ορθής και εφαπτομενικής ταχύτητας, παρατήρησε δηλαδή ότι για γωνία πρόσπτωσης περί των 15° , η περιστροφή που προκαλείται από την πρόσκρουση, δημιουργεί μια αύξηση της ορθής ταχύτητας μετά την κρούση με αντίστοιχη μείωση της εφαπτομενικής.

Habib (1977)

Διατύπωσε ότι ο συντελεστής αναπήδησης μεταβάλλεται ανάλογα την ταχύτητα, την περιστροφή, την μάζα, το σχήμα και την γωνία πρόσπτωσης και δεν είναι εξαρτώμενος από το γεωυλικό του τεμάχους.

Statham (1976)

Προσομοίωσε μέσω πειραμάτων μικρής κλίμακας στο πεδίο και στο εργαστήριο την τροχιά ενός τεμάχους. Παρατήρησε ότι μεταξύ του αρχικού ύψους πτώσης και της διανυόμενης απόστασης κατά μήκος του πρανούς υπάρχει μια γραμμική συσχέτιση. Η συσχέτιση αυτή επηρεάζεται από την κλίση του πρανούς και το μέγεθος του τεμάχους σε σχέση με το πρανός.



Εικόνα 8 - Συσχετισμός ύψους πτώσεως και διανυόμενης αποστάσεως

Azzoni et al. (1992) και (Azzoni and de Freitas, 1995)

Στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος ISMES, πραγματοποιήθηκε πλήθος δοκιμών πεδίου σε πληθώρα πρανών διαφορετικών ιδιοτήτων και χαρακτηριστικών με ρίψεις τεμαχών διαφορετικού σχήματος και μεγέθους. Τα στιγμιότυπα των ρίψεων κατεγράφησαν από κάμερες υψηλών ταχυτήτων και οι συντελεστές αναπήδησης που ορίστηκαν αποδόθηκαν σε όρους κάθετης και εφαπτομενικής αναπήδησης και ολικής ενέργειας. Διατύπωσαν τα εξής συμπεράσματα:

- Η συνολική κινητική ενέργεια που αναπτύσσεται είναι μικρότερη (δηλαδή αναπτύσσονται μικρότερες ταχύτητες) κατά τις ρίψεις σε μαλακά γεωλικά, από ότι σε βραχώδη πρανή.
- Αύξηση της τραχύτητας της επιφάνειας του πρανούς έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας και συνεπώς μικρότερες περιστροφικές και μεταφορικές ταχύτητες μετά την αναπήδηση.
- Η απώλεια μάζας του τεμάχου (δηλαδή η θραύση του) επιδρά με μη συστηματικό τρόπο στην αναπτυσσόμενη κινητική ενέργεια.

Pfeiffer and Bowen (1989)

Εκτέλεσαν μια σειρά επί τόπου δοκιμών με σκοπό την βαθμονόμηση του λογισμικού CRSP και παρατήρησαν ότι ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης (R_n) είναι πιο ευαίσθητος από τον εφαπτομενικό (R_t) σε αλλαγές των συνθηκών πρόσπτωσης. Επιπλέον, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η επίδραση της ταχύτητας πρόσκρουσης είναι μεγαλύτερη για μαλακά πρανή και όχι τόσο για σκληρά βραχώδη. Επίσης, αύξηση της διαμέτρου του τεμάχου μειώνει την επίδραση του μεγέθους στην αναπτυσσόμενη ταχύτητα κίνησης. Αυτό σημαίνει ότι κρίσιμη παράμετρος είναι η εισχώρηση του τεμάχου στην επιφάνεια πρόσκρουσης, η οποία αυξάνεται όπως είναι φυσικό για μαλακά εδαφικά υλικά και είναι πρακτικά μηδενική για σκληρό βράχο. Επομένως, το συμπέρασμα που προέκυψε είναι ότι σε μαλακά πρανή οι ταχύτητες που αναπτύσσονται κατά την αναπήδηση του τεμάχου πάνω σε αυτό είναι μικρότερες, και έτσι προκύπτουν περισσότερες κρούσεις και μικρότερο μήκος τροχιάς σε σχέση με την αναπήδηση σε πρανές με σκληρότερη επιφάνεια.

Gerber (2001)

Μέσα από πειράματα πεδίου εκτίμησε τόσο τον κάθετο όσο και τον εφαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης. Παρατήρησε την σημαντική επιρροή της γωνίας πρόσπτωσης στην ταχύτητα αναπήδησης του τεμάχους. Συγκεκριμένα, παρατήρησε ότι όσο περισσότερο εφαπτομενική είναι η πρόσπτωση πάνω στην επιφάνεια τόσο υψηλότερες είναι οι ταχύτητες αναπήδησης που παρατηρούνται. Επομένως, όσο αυξάνεται η γωνία πρόσπτωσης θ , τόσο μειώνεται ο συντελεστής αναπήδησης του τεμάχους.

Montani Stoffel et al. (1999)

Εκτελέστηκε μια σειρά δοκιμών πεδίου για την μελέτη κρούσεων σε στέγαστρα εκτροπής βράχων, με την μορφή κατακόρυφης κρούσης τεμάχους σε οριζόντια πλάκα σκυροδέματος καλυμμένη από κοκκώδες υλικό. Το υλικό απόσβεσης χρησιμεύει για την απόσβεση της ενέργειας που θα φτάσει στην πλάκα σκυροδέματος του στεγάστρου από την κρούση σε αυτό.

Οι παράμετροι που διερευνήθηκαν ως προς την επιρροή τους στο φαινόμενο από αυτήν την σειρά δοκιμών ήταν:

- Το βάρος του τεμάχους,
- Τα χαρακτηριστικά του υλικού απόσβεσης στην οροφή του στεγάστρου,
- Τα δομικά χαρακτηριστικά του στεγάστρου και τέλος,
- Το ύψος ρίψης.

Για την διερεύνηση των χαρακτηριστικών της πλάκας, έγιναν πολλές κρούσεις πάνω στο υλικό απόσβεσης και στον άξονα της θεμελίωσης και το κύριο αποτέλεσμα ήταν η ποσοτικοποίηση των μεγίστων δυνάμεων λόγω επιτάχυνσης, της πίεσης που ασκείται στην πλάκα και της αντίδρασης γενικά της υποστήριξης.

Από την έρευνα αυτή προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Παρατηρήθηκε γραμμική συσχέτιση μεταξύ της ενέργειας κρούσης (αντιστοιχισμένη στην δυναμική ενέργεια E_{pot}) με το παράγωγο της μέγιστης δύναμης επιταχύνσεως F_{acc} και του βάθους διείδυσης d στο υλικό απόσβεσης. Η συσχέτιση αυτή εκδηλώνεται μέσω των παρακάτω σχέσεων:

$$F_{acc} \cdot d = 1,6 \cdot E_{pot} \quad (\text{για κρούση στην πλάκα σκυροδέματος}) \quad (3.1)$$

$$F_{acc} \cdot d = 1,5 \cdot \exp\left(\frac{r}{1,2 \cdot e}\right) \cdot E_{pot} \quad (\text{για κρούση στον άξονα θεμελίωσης}) \quad (3.2)$$

- Η δύναμη λόγω επιτάχυνσης F_{acc} που αναπτύσσεται μεταξύ υλικού απόσβεσης και τεμάχους μπορεί να εκφραστεί ως προς το μέγιστο βάθος διείσδυσης d :

$$F_{acc} = 1,05 \cdot r^{0,5} \cdot \exp\left(\frac{r}{1,2 \cdot e}\right) \cdot M_E \cdot (\tan \varphi)^{0,5} \cdot d^{1,5} \quad (\text{κρούση στη πλάκα}) \quad (3.3)$$

$$F_{acc} = 1,05 \cdot \exp\left(\frac{r}{1,5 \cdot e}\right) \cdot M_E \cdot (\tan \varphi)^{0,6} \cdot d^2 \quad (\text{κρούση στη θεμελίωση}) \quad (3.4)$$

- Επίσης, μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση της ενέργειας κρούσης η οποία θεωρείται ίση με την δυναμική ενέργεια E_{pot}

$$F_{acc} = 1,35 \cdot r^{0,2} \cdot \exp\left(\frac{r}{3 \cdot e}\right) \cdot M_E^{0,4} \cdot (\tan \varphi)^{0,2} \cdot E_{pot}^{0,6} \quad (\text{κρούση στη πλάκα}) \quad (3.5)$$

$$F_{acc} = 1,33 \cdot \exp\left(\frac{r}{1,5 \cdot e}\right) \cdot M_E^{\frac{1}{3}} \cdot (\tan \varphi)^{0,2} \cdot E_{pot}^{\frac{2}{3}} \quad (\text{κρούση στη θεμελίωση}) \quad (3.6)$$

όπου για τις παραπάνω σχέσεις r είναι η ακτίνα του τεμάχους στο σημείο επαφής, e η πυκνότητα της στρώσης απόσβεσης, M_E η φέρουσα ικανότητα της πλάκας και φ η γωνία εσωτερικής τριβής του υλικού απόσβεσης,

Από τις προαναφερθείς εκφράσεις μπορούν να προκύψουν οι παρακάτω παρατηρήσεις:

- Όσο μεγαλύτερο είναι το βάθος διείσδυσης, τόσο μεγαλύτερη είναι και η εφαρμοζόμενη δύναμη F_{acc} και συνεπώς η ταχύτητα του τεμάχους πριν την πρόσκρουση.
- Επιπλέον, όσο μεγαλύτερη είναι η δυναμική ενέργεια τόσο αυξάνεται και η εφαρμοζόμενη δύναμη από το τέμαχος στην κατασκευή. Δεδομένου του ότι η δυναμική ενέργεια E_{pot} είναι ίση με την κινητική πριν την κρούση μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι μεγαλύτερη ταχύτητα πριν την κρούση συνεπάγεται και μεγαλύτερη εφαρμοζόμενη δύναμη στην κατασκευή.
- Τέλος, αύξηση της γωνίας εσωτερικής τριβής του υλικού απόσβεσης συνεπάγεται και μικρή αύξηση της δύναμης F_{acc} .

Giani et al. (2004)

Μέσα από πειράματα πεδίου σε δυο πλαγιές, η μια αποτελούμενη από αποσαθρωμένο γρανιτικό πέτρωμα και η άλλη από αποσαθρωμένο εδαφικό υλικό, παρατήρησαν ότι τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των τεμαχών, με την τραχύτητα και την σκληρότητα της πλαγιάς παίζουν σημαντικό ρόλο στην τελική διαδρομή του τεμάχου. Οι τιμές για τους συντελεστές αναπήδησης σφαιρικών δοκιμίων βρέθηκαν μεγαλύτερες από αυτές δοκιμίων με ακανόνιστη μορφή.

Dorren et al. (2006)

Προχώρησαν σε πειράματα πεδίου σε δυο διαφορετικές πλαγιές, με και χωρίς δασική κάλυψη. Κάνοντας συγκριτική μελέτη και στις δυο περιπτώσεις εκτίμησε την επίδραση των δέντρων στην απώλεια ενέργειας κατά την βραχόπτωση.

Spadari et al. (2012)

Πραγματοποίησαν πλήθος πειραμάτων στο πεδίο, σε τέσσερα διαφορετικά πρανή, των οποίων οι επιφάνειες καλύπτονταν από αποσαθρωμένα πετρώματα, με ύπαρξη χαμηλής βλάστησης. Εδώ, η τιμή του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης βρέθηκε υψηλότερη από ότι παρατηρήθηκε στην βιβλιογραφία. Αυτό αποδόθηκε από τους ερευνητές στο ακανόνιστο σχήμα των τεμαχών και στην τραχύτητα της επιφάνειας της πλαγιάς.

Giacomini et al. (2012)

Πραγματοποίησαν πειράματα πεδίου σε πλαγιές αποτελούμενους από γνεύσιους και ερεύνησαν τον θρυμματισμό τους. Απέδειξαν ότι η γωνία πρόσπτωσης παίζει σημαντικό ρόλο στον θρυμματισμό φυλλοειδών βράχων.

3.1.2. Παρουσίαση αποτελεσμάτων από ανάδρομες αναλύσεις

Bozzolo and Pamini (1986)

Μέσω ανάδρομων αναλύσεων καταγεγραμμένων πειραμάτων πεδίου παρατήρησαν ότι η διαδικασία της πρόσκρουσης μπορεί να περιγραφεί σαν μια στιγμιαία κύλιση. Επίσης, έκαναν την παρατήρηση ότι ο συντελεστής αναπήδησης R_{TE} εξαρτάται από την γωνία πρόσπτωσης θ (μεταξύ του διανύσματος της αρχικής ταχύτητας του τεμάχους και της κλίσης του επιπέδου της επιφάνειας πρόσπτωσης). Παρατήρησαν επιπλέον, ότι όσο πιο κάθετη είναι η πρόσπτωση στην πλαγιά τόσο μεγαλύτερη είναι η απώλεια ενέργειας, η οποία γίνεται φανερή από μικρότερη τιμή του συντελεστή αναπήδησης, και την σημαντική επιρροή των χαρακτηριστικών του βραχοτεμάχους στον συντελεστή αναπήδησης ενός ελλειψοειδούς τεμάχους.

Topal et al. (2007)

Μέσω ανάδρομων αναλύσεων, θεωρώντας σταθερές τιμές για τον κάθετο και τον εφαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης ($R_n=0,46$ και $R_t=0,71$ αντίστοιχα) και για ποικίλες μάζες τεμαχίων (από 10 έως 10.000 kg) έδωσαν εκτιμήσεις για τις εξής παραμέτρους:

- Την οριζόντια απόσταση που διανύεται από τον βράχο μέχρι το τέλος της τροχιάς του,
- Το μέγιστο ύψος αναπήδησης,
- Την συνολική μέγιστη κινητική ενέργεια και
- Την μέγιστη μεταφορική ταχύτητα.

Ansari et al. (2013)

Πραγματοποίησαν ανάστροφες αναλύσεις ώστε να κάνουν αποτίμηση επικινδυνότητας βραχοπτώσεων στις σπηλιές Ajanta στην Ινδία. Σύμφωνα με τους ερευνητές, το έδαφος αποτελείται από βράχο και συγκεκριμένα από βασάλτη και θεωρούν ότι πολύ σημαντική παράμετρος για την αποτίμηση της επικινδυνότητας λόγω βραχοπτώσεων είναι η εύρεση του σημείου εκκίνησης του συμβάντος. Επομένως, μέσω του κώδικα “Universal Distinct Element Code, Itasca” (UDEC), οι ερευνητές προσδιόρισαν την θέση εκκίνησης. Στην συνέχεια, έγιναν δισδιάστατες αναλύσεις του φαινομένου με την χρήση του λογισμικού της RocScience, RocFall V.4 και έγινε ο προσδιορισμός των τιμών των συντελεστών αναπήδησης, χρησιμοποιώντας ως δεδομένα μάζες από 500 μέχρι 2000 kg και 100 ρίψεις.

3.1.3. Αναδρομή αποτελεσμάτων από εργαστηριακές δοκιμές

Παρακάτω, παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποιες από τις εργαστηριακές δοκιμές που έχουν επιτελεστεί πάνω στο αντικείμενο των συντελεστών αναπήδησης στο παρελθόν και έχουν εξαχθεί κάποια σημαντικά συμπεράσματα από αυτές. Αξίζει να σημειωθεί ότι στις εργαστηριακές δοκιμές σπάνια χρησιμοποιούνται ως δοκίμια φυσικά τεμάχια πετρώματος, καθώς είναι δύσκολο να διαμορφωθούν στην απαραίτητη μορφή και επομένως τις περισσότερες φορές χρησιμοποιούνται τεχνητά δοκίμια.

Wu (1985)

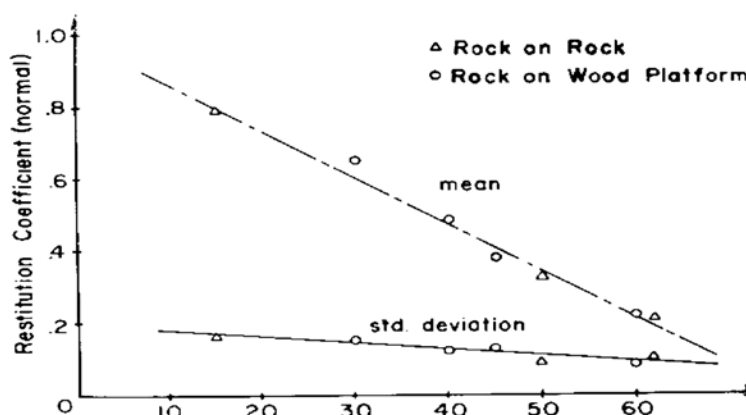
Μέσα από εργαστηριακές δοκιμές με την χρησιμοποίηση τεχνητών τεμαχίων από ξύλο και βράχο ως δοκίμια, κατήρτισε συσχετίσεις μεταξύ του κάθετου και του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης (R_n και R_t αντίστοιχα). Επίσης, προσδιόρισε την επιρροή στους συντελεστές αυτούς, κινηματικών παραμέτρων, όπως η κλίση του πρανού και η γωνία πρόσπτωσης. Πιο συγκεκριμένα, ανέφερε ότι αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης επιφέρει και αύξηση του κάθετου συντελεστή αναπήδησης και ελάχιστη μείωση του εφαπτομενικού συντελεστή.

Ακόμα δημιούργησε γραμμικές σχέσεις που συνδέουν τους παραπάνω συντελεστές με την γωνία πρόσπτωσης. Αυτές είναι οι εξής:

$$R_n = 0,995 - 0,013 \cdot \theta \quad (3.7)$$

$$R_t = 0.535 + 0.028 \cdot \theta \quad (3.8)$$

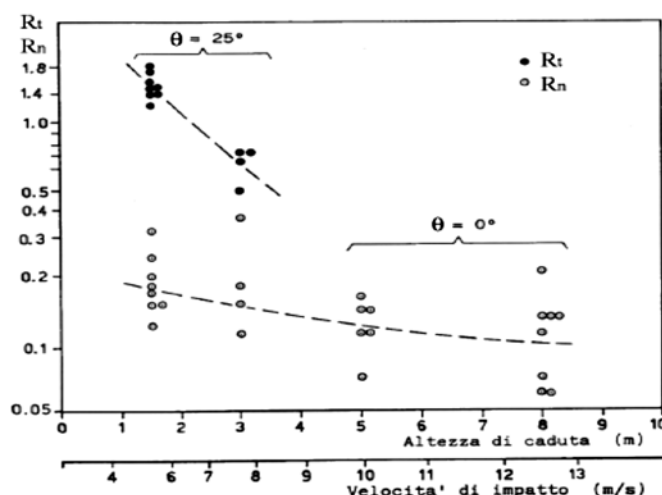
όπου θ η γωνία πρόσπτωσης σε μοίρες.



Εικόνα 9 - Συσχέτιση κάθετου συντελεστή αναπήδησης(R_n) και γωνίας πρόσπτωσης (θ), Wu (1985)

Urciuoli (1988)

Μέσα από ανάδρομες αναλύσεις και εργαστηριακές δοκιμές προσδιόρισε τους συντελεστές αναπήδησης R_n και R_t και τους κάθετους και εφαπτομενικούς συντελεστές R_e μέσα από πειράματα πεδίου. Τόνισε ότι οι τιμές όλων των συντελεστών αναπήδησης εξαρτώνται άμεσα από παράγοντες όπως η γωνία κλίσης του πρανούς, η ταχύτητα πρόσπτωσης του τεμάχου, το ύψος ελεύθερης πτώσης, το σχήμα του τεμάχου η ακριβής του θέση το στιγμιότυπο πριν την πρόσκρουση. Πιο συγκεκριμένα, ανέφερε ότι αύξηση της ταχύτητας πρόσκρουσης συνεπάγεται μείωση των τιμών των συντελεστών αναπήδησης και ότι ο εφαπτομενικός συντελεστής είναι πιο ευαίσθητος όσον αναφορά αυτήν την παράμετρο παρά ο κάθετος.

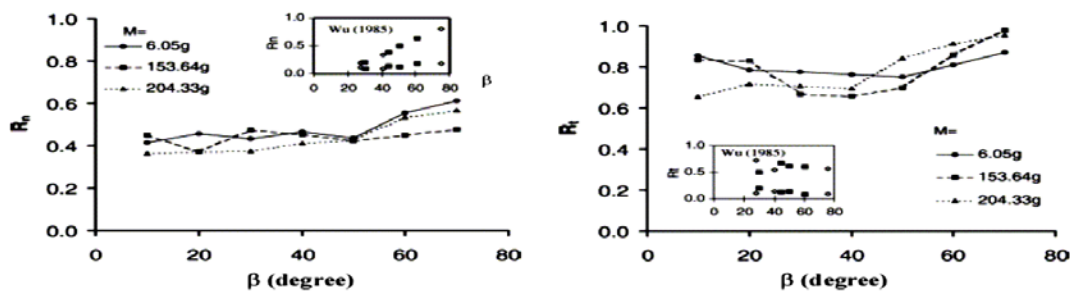


Εικόνα 10 Επίδραση ταχύτητας πρόσκρουσης στους συντελεστές αναπήδησης, (Urciuoli, 1988)

Chau et al. (1999)

Πραγματοποίησαν πειράματα εργαστηρίου, με την χρήση γύψου, τόσο για την παρασκευή των δοκιμών, όσο και για την επιφάνεια πρόσπτωσης. Μέσα από τις δοκιμές αυτές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης R_n αυξάνεται αναλογικά με την γωνία πρόσπτωσης, αλλά δεν κατάφεραν να βρουν συσχέτιση του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης με την κλίση του επιπέδου του πρανούς. Επιπλέον, παρατήρησαν ότι:

- Υπήρξαν μεγαλύτερες διακυμάνσεις μεταξύ των τιμών των συντελεστών αναπήδησης για μαλακότερους από ότι για σκληρότερους βράχους,
- Ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης R_n για κλίσεις της πλαγιάς από 30° έως 50° είναι ανεξάρτητος του σχήματος του τεμάχου και τέλος ότι,
- Για μεγαλύτερες κλίσεις της πλαγιάς ο συντελεστής αναπήδησης μεταβάλλεται ανάλογα με το σχήμα του τεμάχου. Συγκεκριμένα, για κυβικά και εξαγωνικά τεμάχη ο συντελεστής αυξάνει, ενώ για σφαιρικά και κυλινδρικά παραμένει σταθερός.



Εικόνα 11 Συντελεστές κάθετης και εφαπτομενικής αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης (Chau et al., 1999)

Kamijo et al. (2000)

Χρησιμοποιώντας δυο τεμάχια βράχου βάρους 220 και 800kg, μελέτησε την αναπήδηση σε ελεύθερη πτώση από διάφορα ύψη, συγκεκριμένα έως 3m σε επιφάνεια πρόσπτωσης από τσιμέντο. Οδηγήθηκε στο συμπέρασμα ότι ο συνολικός συντελεστής αναπήδησης R , μειώνεται όσο αυξάνεται η ταχύτητα και η μάζα του τεμαχίου.

Ushiro et al. (2000)

Μέσω πειραμάτων μικρής κλίμακας σε επιφάνειες αποτελούμενες από βράχο και σκυρόδεμα, μελέτησαν την επιρροή της ταχύτητας πρόσκρουσης στους συντελεστές αναπήδησης. Πιο συγκεκριμένα, τόνισαν ότι ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης μειώνεται με την αύξηση της κάθετης συνιστώσας της ταχύτητας πρόσκρουσης ενώ η επιρροή της ταχύτητας στον εφαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης είναι αμελητέα. Επιπλέον, παρατήρησαν ότι ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης μειώνεται με την αύξηση της μάζας του τεμαχίου, ανεξαρτήτως της ταχύτητας πρόσπτωσης. Τέλος, έδωσαν τις παρακάτω συσχετίσεις του κάθετου συντελεστή αναπήδησης (R_n) με την κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας πρόσπτωσης (v_n) όπου η πρώτη αντιστοιχεί σε επιφάνειες από σκυρόδεμα και η δεύτερη σε βραχώδεις επιφάνειες.

$$R_n = 0,8478 \cdot e^{-0,0842} \cdot (-v_n) \quad (3.9)$$

$$R_n = 2,506 \cdot e^{-0,1053} \cdot (-v_n) \quad (3.10)$$

Wong et al. (2000)

Ασχολήθηκαν με την επίδραση του σχήματος του τεμαχίου στους συντελεστές αναπήδησης, με ρίψεις σε βάση από γρανίτη και οδηγήθηκαν στο συμπέρασμα ότι σε αντίθεση με το πόρισμα των Chau et al. (1999), ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης μειώνεται με την χρησιμοποίηση γωνιώδους τεμαχίου, αντί του στρογγυλεμένου. Επίσης, εκτελώντας δοκιμές ελεύθερης πτώσης σε κεκλιμένη βάση μελέτησαν την επιρροή της γωνίας πρόσπτωσης στις τιμές των συντελεστών. Πιο συγκεκριμένα, παρατήρησαν την μείωση του κάθετου συντελεστή με την αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης ή την μείωση της γωνίας κλίσης της επιφάνειας πρόσπτωσης. Παρ' όλα αυτά, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η επίδραση της κλίσης του

πρανούς φθίνει με την αύξηση της σκληρότητας του υλικού που συνθέτει το γεωλογικό της υπόβαθρο. Αντίθετα, για τον εφαπτομενικό συντελεστή τα συμπεράσματα δεν είναι τόσο ξεκάθαρα καθώς ναι μεν μειώνεται ελάχιστα η τιμή του με την αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης, αλλά οι τιμές εμφανίζουν μεγάλη διασπορά.

Richards et al. (2001)

Από εργαστηριακές δοκιμές σε εννέα διαφορετικά γεωυλικά και με τεμάχια ποικίλων διαστάσεων και τραχύτητας, διατύπωσαν την παρακάτω σχέση για τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης (R_n), συναρτήσει της σκληρότητας Schmidt:

$$R_n = \frac{-110 + 9 \cdot S_{slab} + 4 \cdot S_{ball} + 4 \cdot a}{1000} \quad (3.11)$$

Όπου S_{slab} και S_{ball} η τιμή της σκληρότητας Schmidt για την επιφάνεια πρόσπτωσης και το τεμάχιο αντίστοιχα, ενώ a είναι η γωνία της επιφάνειας πρόσπτωσης με αυτή του οριζοντίου επιπέδου και μετράται σε μοίρες. Από την σχέση αυτή παρατηρείται ότι η σκληρότητα του πρανούς επηρεάζει 2,25 φορές περισσότερο τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης από αυτή του τεμάχους.

Σε αυτήν την σειρά δοκιμών παρατηρήθηκε ότι οι τιμές του κάθετου συντελεστή για ομαλά τεμάχια με λεία επιφάνεια προέκυψαν έως και τριπλάσιες από αυτές για τεμάχια με ακαθόριστη μορφή. Ως αποτέλεσμα αυτής της παρατήρησης διεξήγαγαν μια πρόσθετη σειρά δοκιμών μέσω της οποίας διατύπωσαν την παρακάτω σχέση που εισάγει ως μεταβλητή την τραχύτητα του τεμάχους:

$$R_{\text{πόακαν νιστο}} = \frac{-9 + 49 \cdot R_{n-\lambda\epsilon\iota\omicron}}{100} \quad (3.12)$$

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

Labiose and Heidenreich (2009)

Διεξήχθησαν δοκιμές μικρής και μεσαίας κλίμακας στο εργαστήριο. Πριν την περιγραφή των δοκιμών μέσης κλίμακας θα γίνει αναφορά σε αυτές της μικρής κλίμακας.

Παρατηρήθηκε ότι είναι ιδιαίτερα δύσκολο να επιτευχθεί αναγωγή σε κλίμακα πεδίου όλων των μεταβλητών που συμμετέχουν στο φαινόμενο της αναπήδησης από τις δοκιμές μικρής κλίμακας, ειδικά για παραμέτρους όπως το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους που συμμετέχει σημαντικά στον καθορισμό της τιμής των συντελεστών. Επομένως, οι δοκιμές αυτές έγιναν

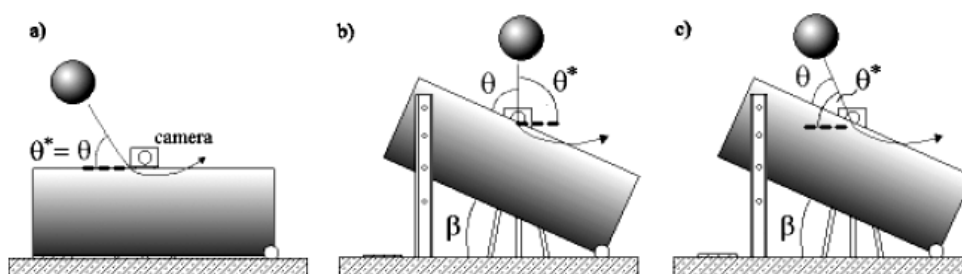
απλά ως μια πρώτη προσπάθεια για κατανόηση του μηχανισμού αυτού, ώστε να διερευνηθούν οι παράμετροι που τον επηρεάζουν.

Οι δοκιμές περιλάμβαναν ρίψη σφαιρικών δοκιμίων όμοιου όγκου (διαμέτρου 7,5cm) αλλά διαφορετικών μαζών (130, 380 και 750g), είτε με κλίση (78° , 68° , 58°) με σκοπό το τέμαχος να έχει την ταχύτητα 4,4 m/s πριν την πρόσκρουση, είτε ως ελεύθερη πτώση από ύψος 1m. Το επίπεδο πρόσπτωσης εναλλασσόταν από οριζόντιο σε κεκλιμένο ποικίλων κλίσεων (0° , 12° , 22° , 32°) αποτελούμενο από ένα δοχείο με διαφορετικά εδάφη, δηλαδή διαφορετικούς τύπους άμμου (με γωνίες εσωτερικής τριβής 32° , 35° και 43°).

Μέσω λογισμικού ανάλυσης εικόνων, η κίνηση των τεμαχών αναλύθηκε σε ταχύτητες (μεταφορικές και περιστροφικές) πριν και μετά την κρούση και έγινε ο υπολογισμός του κανονικού (R_n), εφαπτομενικού (R_t) και ενέργειας (R_{TE}) συντελεστή αναπήδησης για το κέντρο μάζας της σφαίρας.

Η ανάλυση και η σύγκριση των αποτελεσμάτων από τις διάφορες σειρές δοκιμών επέτρεψε τον καθορισμό των πιο σημαντικών παραμέτρων του φαινομένου. Τα κύρια συμπεράσματα που εξήχθησαν από την έρευνα παρουσιάζονται παρακάτω:

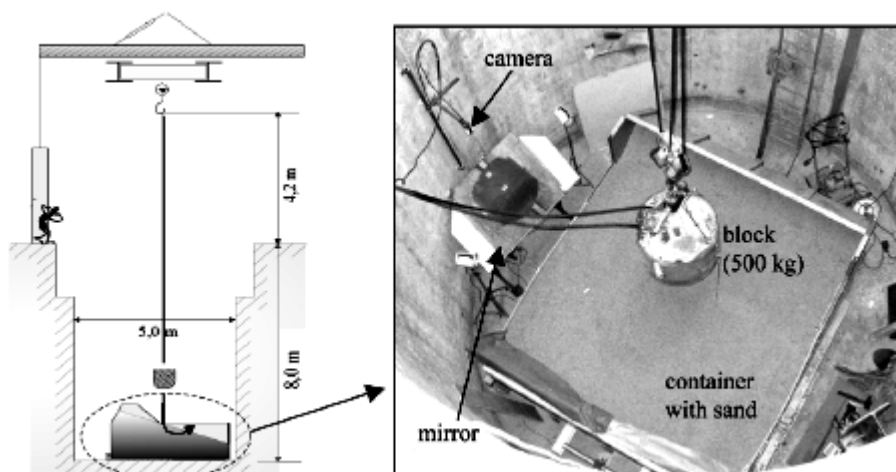
- Αναφορικά με τα χαρακτηριστικά του υλικού της πλαγιάς, παρατηρήθηκε ότι η κίνηση του τεμάχους μετά και κατά τη διάρκεια της πρόσκρουσης εξαρτάται λιγότερο από τη γωνία εσωτερικής τριβής και σημαντικά από το βαθμό συμπύκνωσης του εδάφους (μέτρο παραμόρφωσης).
- Αναφορικά με τα χαρακτηριστικά του τεμάχους, παρατηρήθηκε πως στις δοκιμές που διεξήχθησαν με σφαίρες πανομοιότυπης διαμέτρου αλλά διαφορετικού βάρους (δηλαδή διαφορετικού υλικού), με την αύξηση του βάρους υπήρχε σημαντική μείωση της αναπήδησης και επομένως και του αντίστοιχου συντελεστή.
- Τέλος, μέσω των δοκιμών αυτών τόνισε μια σημαντική εξάρτηση των συντελεστών αναπήδησης, από κινηματικές παραμέτρους όπως η γωνία του επιπέδου και η αντίστοιχη γωνία πρόσπτωσης. Συγκεκριμένα, παρατήρησε πως όσο πιο εφαπτομενική είναι η πρόσκρουση σε σχέση με την επιφάνεια πρόσπτωσης, τόσο πιο ευδιάκριτη είναι η περιστροφική κίνηση του τεμάχους, και πως όσο πιο κάθετα προσκρούει τόσο μικρότερη είναι η αναπήδηση.



Εικόνα 12 - Πειραματική διάταξη Heidenreich για δοκιμές μικρής κλίμακας

Στην συνέχεια, με σκοπό την ποσοτικοποίηση του φαινομένου διεξήχθησαν δοκιμές μέσης κλίμακας, δηλαδή με τεμάχια με μέγιστο βάρος 10kN και ενέργεια πρόσπτωσης μέχρι 100kJ, που μπορούν να συγκριθούν με χαμηλής ενέργειας γεγονότα αλλά δεν φτάνουν μεγαλύτερες φυσικές βραχοπτώσεις.

Στο πλαίσιο των δοκιμών αυτών διεξήχθησαν ελεύθερες πτώσεις με κυλινδρικά τεμάχια και σφαίρες διαφόρων μαζών, σε διαμορφωμένη επιφάνεια πρόσπτωσης από ελαφρώς συμπυκνωμένη άμμο, είτε με κλίση είτε οριζόντια, έτσι ώστε να διερευνηθεί η επιρροή των παραμέτρων που εξετάστηκαν και στις δοκιμές μικρής κλίμακας.



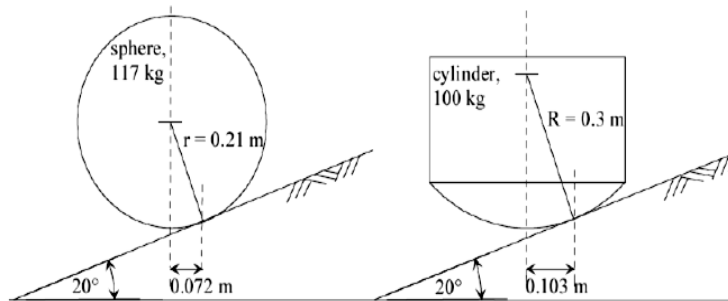
Εικόνα 13 - Πειραματική διάταξη των Labiouse & Heidenreich, 2009

Έπειτα από ανάλυση της τροχιάς του κέντρου μάζας των τεμαχίων οι ερευνητές κατέληξαν στα εξής συμπεράσματα:

- Αναφορικά με την κλίση της επιφάνειας πρόσπτωσης, για αύξηση της γωνίας κλίσης β , προέκυψαν διαφορετικά αποτελέσματα ανάλογα το σχήμα του πίπτοντος τεμαχίου. Συγκεκριμένα, για *κυλινδρικά τεμάχια* προέκυψε ότι για γωνίες μεγαλύτερες των 20° ο συντελεστής R_n αυξάνει απότομα, ενώ ο R_t αυξάνει σημαντικά για γωνίες από 10° έως 20° και στην συνέχεια λαμβάνει μια σταθερή τιμή. Συγκριτικά με τα κυλινδρικά τεμάχια, για τα *σφαιρικά* παρατήρησαν ότι έχουν διαφορετική συμπεριφορά. Για παράδειγμα, ο R_n αυξάνει σχεδόν γραμμικά με την αύξηση της γωνίας β , ενώ ο R_t είναι σχεδόν σταθερός. Όσο για τον συντελεστή R_{TE} ανεξαρτήτως του είδους του τεμαχίου αυξάνει ξεκάθαρα με την αύξηση της γωνίας β .
- Η δεύτερη παράμετρος που διερεύνησαν είναι το βάρος του τεμαχίου και το μέγεθος. Παρατήρησαν ότι όσο πιο βαρύ ή μεγάλο είναι το προσπίπτον τέμαχος, τόσο πιο μεγάλο είναι το βάθος διείσδυσης στο εδαφικό υλικό, που σημαίνει μεγαλύτερη πλαστική παραμόρφωση και συνεπώς μεγαλύτερη απώλεια ενέργειας. Επομένως, οδηγήθηκαν στο συμπέρασμα πως για σφαίρες μεγαλύτερου σχήματος και οι τρεις

συντελεστές αναπήδησης μειώνονται ενώ για μεγαλύτερο βάρος μειώνονται οι R_n και R_t αλλά ο R_{TE} παραμένει περίπου ίδιος.

- Όσον αναφορά την επιρροή του σχήματος του δοκιμίου, πέραν από τα συμπεράσματα που διατυπώθηκαν στην παράγραφο για την επιρροή της κλίσης της επιφάνειας πρόσπτωσης, οι ερευνητές οδηγήθηκαν επιπλέον και σε κάποιες άλλες διαπιστώσεις. Συγκεκριμένα, για ίδιες συνθήκες πρόσπτωσης (ίδια ταχύτητα πρόσκρουσης, ίδιο αρχικό ύψος και ίδιο βάρος) οι συντελεστές αναπήδησης προέκυψαν μεγαλύτεροι για τα κυλινδρικά δοκίμια παρά για τις σφαίρες. Επιπλέον, παρατήρησαν ότι στις σφαίρες μετά την αναπήδηση υπήρξε περιστροφή σε μικρότερο βαθμό από ότι στους κυλίνδρους.
- Τέλος, για το ύψος πρόσπτωσης παρατήρησαν ότι με την αύξησή του αυξάνεται οριακά ο συντελεστής R_n και μειώνεται σημαντικά ο R_t . Φυσικά με την αύξηση του αρχικού ύψους προκύπτει και αυξημένη απώλεια ενέργειας από την πλαστικοποίηση του εδάφους με την πρόσκρουση.



Εικόνα 14 - Σχήματα τεμαχών και εκκεντρότητες για πρόσκρουση σε κεκλιμένο έδαφος

Οι τιμές των συντελεστών που καταγράφηκαν αναφέρονται επιγραμματικά στον συγκεντρωτικό πίνακα του κεφαλαίου 2.

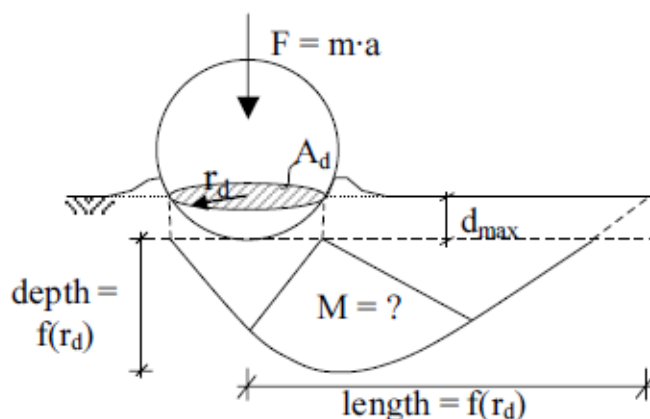
Πέρα από τα παραπάνω ποιοτικά συμπεράσματα που αναφέρθηκαν, οι ερευνητές παρουσίασαν και ποσοτικές συσχετίσεις για τον προσδιορισμό των τριών συντελεστών αναπήδησης, R_n , R_t και R_{TE} , οι οποίες και αναφέρονται συγκεντρωτικά:

$$R_n = \frac{m}{m + C_1 \cdot \rho_{ground} \cdot (d_{max} \cdot A_d)} \quad (3.13)$$

$$R_t = \frac{m}{m + 43 \cdot \rho_{ground} \cdot (d_{max}^2 \cdot r_d)} \quad (3.14)$$

$$R_{TE} = \frac{m \cdot \left[(R_t \cdot v_{t,i})^2 + (R_n \cdot v_{n,i})^2 \right] + I \cdot \omega_r^2}{m \cdot v_i^2 + I \cdot \omega_i^2} \quad (3.15)$$

Όπου C_1 είναι μια γραμμική συσχέτιση της μορφής $C_1 = a \cdot e^{b \cdot \beta / \phi}$ που μεταβάλλεται ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της πλαγιάς, δηλαδή τη γωνία κλίσης της β , τη γωνία τριβής του υλικού από το οποίο αποτελείται ϕ και το είδος του υλικού του πίπτοντος τεμάχους, κατά το οποίο αλλάζουν και οι συντελεστές a , και b . Επίσης, d_{\max} είναι το μέγιστο βάθος του αποτυπώματος που αφήνει το τεμάχος μετά την πρόσπτωσή του στην επιφάνεια, r_d είναι η ακτίνα βάσης του πίπτοντος τεμάχους ίση με $\sqrt{2 \cdot r \cdot d_{\max} - d_{\max}^2}$ όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα και A_d η επιφάνεια βάσης. Επιπλέον ρ_{ground} είναι η σχετική πυκνότητα του εδάφους στο οποίο προσπίπτει το τεμάχος, m η μάζα του τεμάχους, ω_r η περιστροφική του ταχύτητα μετά την αναπήδηση και I η ροπή αδράνειας της μάζας ως προς το κέντρο βάρους της.



Εικόνα 15 - Διαμόρφωση του εδάφους την στιγμή της πρόσπτωσης

Σαρόγλου, Τσιαμπάος, Μπεκρή (2010)

Μέσω εργαστηριακών δοκιμών στο εργαστήριο Βραχομηχανικής του Ε.Μ.Π. για ασβεστολιθικούς σχηματισμούς έγινε ο προσδιορισμός των συντελεστών αναπήδησης και στη συνέχεια έγινε σύγκριση με αποτελέσματα ανάδρομων αναλύσεων γνωστών καταπτώσεων.

Με βάση τις τιμές αυτές διαπιστώθηκε ότι η κλίση του επιπέδου πρόσπτωσης επηρεάζει τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης και ότι αυτός αυξάνεται γραμμικά με την σκληρότητα Schmidt της επιφάνειας του πρανούς με βάση τη σχέση:

$$R_n = 0,0086 \cdot SHV + 0,19 \quad (3.16)$$

Όπου SHV η σκληρότητα της επιφάνειας του πρανούς μετρημένη με την σφύρα Schmidt.

Buzzi et al. (2012)

Προσπάθησαν να ερμηνεύσουν το φαινόμενο των τιμών του κάθετου συντελεστή αναπήδησης μεγαλύτερων της μονάδας. Υποστήριξαν ότι τέτοιες τιμές μπορούν να προκύψουν ως αποτέλεσμα της μικρής γωνίας πρόσπτωσης ($\theta < 20^\circ$), της περιστροφικής κίνησης του τεμάχους και του σχήματος του.

3.2. Συντελεστές κλίμακας

Οι συντελεστές αναπήδησης προσδιορίζονται όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο με τρεις τρόπους. Με ανάδρομες αναλύσεις καταγεγραμμένων καταπτώσεων, με ειδικές δοκιμές πεδίου και με δοκιμές υπό κλίμακα στο εργαστήριο. Όμως, οι τιμές που λαμβάνονται αυτούσιες από τις δοκιμές υπό κλίμακα δεν είναι αντιπροσωπευτικές αυτών που θα καταγράφονταν σε ένα πραγματικό περιστατικό, αλλά μπορούν να δώσουν μια πρώτη εντύπωση για το πώς οι συντελεστές επηρεάζονται ποιοτικά από την κάθε παράμετρο που εξετάζεται. Για αυτόν τον λόγο, εισήχθησαν οι συντελεστές κλίμακας, έτσι ώστε να δοθεί μια ακριβής συσχέτιση μεταξύ των εργαστηριακών δοκιμών και του φαινομένου των βραχοπτώσεων.

Οι Pfeiffer and Bowen (1989) παρουσίασαν το προσομοίωμα βραχοπτώσεων CRSP στο οποίο οι συντελεστές αναπήδησης (κάθετοι και εφαπτομενικοί) προσαρμόζονται ανάλογα με την ταχύτητα του τεμάχους πριν την πρόσπτωση. Συγκεκριμένα, έδωσαν ως συντελεστή κλίμακας για τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης την σχέση:

$$B_v = \frac{1}{1 + (v_{i,n} / v_{ref})^2} \quad (3.17)$$

όπου v_{ref} η ταχύτητα αναφοράς (reference velocity) που είναι ίση με 9,14 m/s και $v_{i,n}$ η κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας του τεμάχους ακριβώς πριν την πρόσκρουση.

Ο συντελεστής αυτός παίρνει την τιμή 0,5 όταν $v_{i,n}$ γίνεται ίση με την v_{ref} , δηλαδή με 9,14m/s. Οι Richards et al. (2001) πρότειναν $v_{ref}=5\text{m/s}$ από πειράματα σε εργαστηριακή κλίμακα. Η σχέση αυτή, έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλούς κώδικες προσομοίωσης αλλά δεν υπάρχει πολύ πληροφορία για την ρύθμισή της σε πειράματα διαφορετικών με τεμάχη διαφορετικών μεγεθών. (Bourrier and Hungr, 2011).

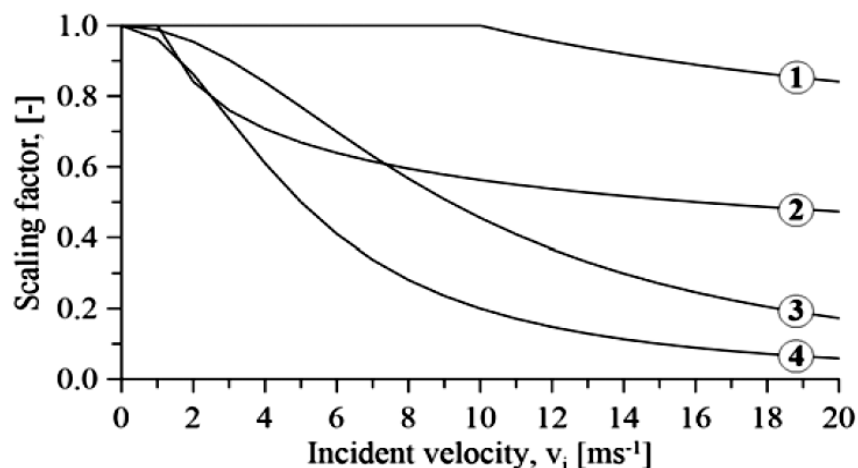
Ένας εναλλακτικός συντελεστής κλίμακας χρησιμοποιήθηκε από τους Rammer et al. (2010) για ταχύτητες πριν την κρούση v_i μεγαλύτερες των 10m/s. Δίνεται από την σχέση:

$$k = \begin{cases} 1, & v_i \leq 10\text{ms}^{-1} \\ 10^{0.25} v_i^{-0.25}, & v_i > 10\text{ms}^{-1} \end{cases} \quad (3.18)$$

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

κλίμακας. Αυτός ο συντελεστής προέρχεται από έναν τύπο του Johnson (1985), σύμφωνα με τον οποίο ο συντελεστής αναπήδησης είναι ανάλογος του $v_i^{-0,25}$.

Αν και οι παραπάνω συντελεστές κλίμακας εξαρτώνται όλοι από την ταχύτητα του τεμάχου πριν την στιγμή της πρόσκρουσης (v_i), οι τιμές τους ποικίλουν αρκετά για τις ίδιες ταχύτητες, όπως φαίνεται στην 0.



Εικόνα 16 - Διάγραμμα ταχύτητας v_i -συντελεστή κλίμακας (Asteriou et al., 2013a),
Με τις σχέσεις των 1) Rammer et al. (2010), 2) Johnson (1985),
3) Pfeiffer & Bowen (1989), 4) Richards et al. (2001).

Οι Bourrier & Hungr (2011) πρότειναν με τη σειρά τους έναν συντελεστή που βασίζεται στην ορμή του τεμάχου. Οι συντελεστές αναπήδησης στην προκειμένη περίπτωση σχηματίζουν μια παραβολική συνάρτηση που αποδίδει την τιμή μονάδα (1) για “μαλακές” κρούσεις και την τιμή μηδέν (0) για “σφοδρές”, όπου όλη η ενέργεια διαχέεται μέσω της πλαστικής παραμόρφωσης. Ο συντελεστής αυτός δίνεται από τον τύπο:

$$k' = \frac{M_{0,5}}{M_n + M_{0,5}} \quad (3.19)$$

όπου M_n η κατακόρυφη ορμή πριν την κρούση, $M_{0,5}$ η ορμή αναφοράς και k' ο υπό κλίμακα συντελεστής αναπήδησης.

Τέλος, υπάρχει και ένας συντελεστής κλίμακας βασιζόμενος στη μάζα, που έχει μορφή πανομοιότυπη με αυτή της B_v που παρουσιάστηκε παραπάνω και είναι διαθέσιμος στο λογισμικό Rocfall της εταιρείας RocScience (2003).

Σχετικά με αυτόν τον συντελεστή δεν υπάρχει περαιτέρω πληροφορία και σύμφωνα με τους δημιουργούς του λογισμικού δεν συνίσταται η χρησιμοποίησή του σε προσομοίωση μαζί με

τους αντίστοιχους συντελεστές κλίμακας ταχυτήτων, καθώς δίνουν μη ρεαλιστικές τροχιές ως αποτέλεσμα. Ο συντελεστής αυτός δίνεται από τον τύπο:

$$B_m = \frac{1}{1 + (m / m_{ref})^2} \quad (3.20)$$

Όπου m_{ref} είναι η μάζα αναφοράς, B_m ο συντελεστής κλίμακας βασιζόμενος στην μάζα και m η μάζα του τεμάχους.

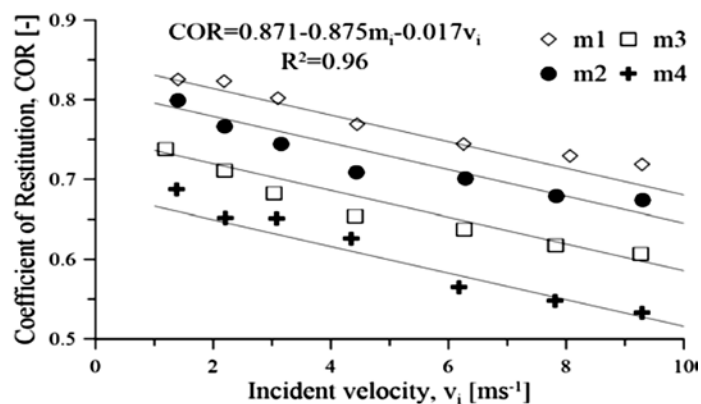
3.3. Συσχέτιση μάζας, ταχύτητας και συντελεστών αναπήδησης

Από την έρευνα των (Asteriou et al., 2013a) προέκυψαν συσχετίσεις των συντελεστών αναπήδησης, με τη μάζα, την ταχύτητα και κατ' επέκταση την ορμή του τεμάχους, οι οποίες είναι αρκετά σημαντικές για την ρύθμιση και την αξιολόγηση μοντέλων για συσχετίσεις κλίμακας. Συγκεκριμένα, έκαναν δοκιμές ελεύθερης πτώσης επτά διαφορετικών μαζών σε λεία οριζόντια βάση από υλικό ίδιο με αυτό των μαζών. Οι δοκιμές αυτές, έγιναν με τέσσερις μάζες από τσιμεντένεμα SikaGrout και τρεις από εποξική ρητίνη, οι ιδιότητες των οποίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.

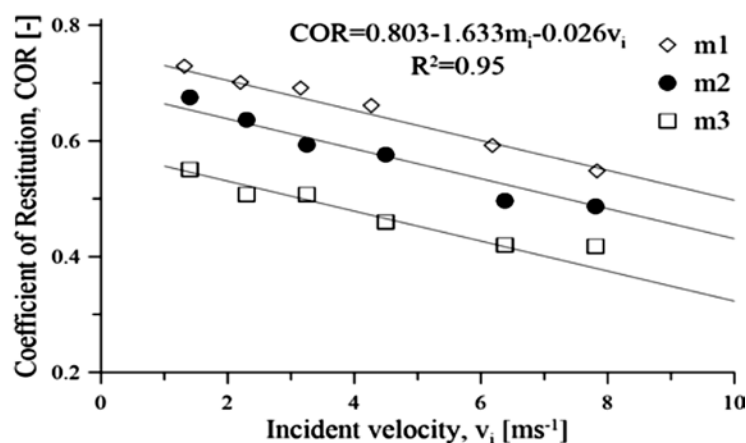
Πίνακας 4 – Ιδιότητες Υλικών, (Asteriou et al, 2013b)

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

Οι τιμές των συντελεστών αναπήδησης παρουσιάζονται συναρτήσει της ταχύτητας πρόσπτωσης στην Εικόνα 170 για τα δοκίμια από εποξική ρητίνη και στην Εικόνα 18 για τα δοκίμια από ένεμα τσιμεντοειδούς βάσης. Προκύπτει ότι οι συντελεστές αναπήδησης εξαρτώνται από την ταχύτητα πρόσπτωσης αλλά κυριότερα από τη μάζα. Πιο συγκεκριμένα, αύξηση της ταχύτητας πρόσπτωσης και της μάζας οδηγεί σε μείωση των συντελεστών αναπήδησης.



Εικόνα 17 - Τιμές συντελεστών αναπήδησης (COR) συναρτήσει της προσπίπτουσας ταχύτητας για δοκίμια από εποξική ρητίνη



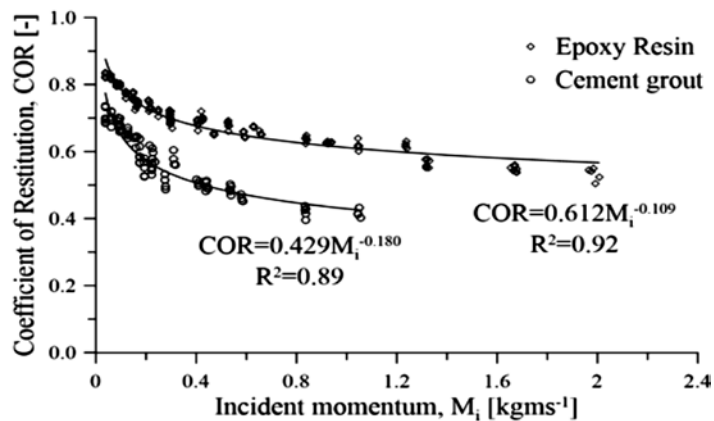
Εικόνα 18 - Τιμές συντελεστών αναπήδησης (COR) συναρτήσει της προσπίπτουσας ταχύτητας για δοκίμια από εποξική ρητίνη

Οι γραμμές προσαρμογής που εμφανίζονται στα παραπάνω διαγράμματα έχουν προκύψει από πολυμεταβλητές γραμμικές παλινδρομήσεις. Αν και οι συσχετίσεις αυτές είναι πολύ καλές για μικρές τιμές μάζας και ταχυτήτων, οι ερευνητές ανέφεραν ότι δεν λειτουργούν σωστά για μεγαλύτερες τιμές των παραμέτρων αυτών, καθώς παράγουν αρνητικά αποτελέσματα. Επιπλέον, τόνισαν ότι δεν προβλέπουν τις τιμές των συντελεστών για κρούσεις στην ελαστική περιοχή, όπου θεωρητικά θα έπρεπε να είναι ίσες με την μονάδα ανεξαρτήτως μάζας.

Τέλος, παρουσίασαν μια μη γραμμική σχέση που περιγράφει τον συντελεστή αναπήδησης συναρτήσει της ορμής του πίπτοντος τεμάχους ακριβώς πριν την κρούση:

$$COR = a \cdot (m \cdot v_i)^{-b} \quad (3.21)$$

όπου a και b είναι παράμετροι που επηρεάζονται από τις ιδιότητες του υλικού του πίπτοντος τεμάχους όπως η αντοχή, η ελαστικότητα. Παρακάτω, παρουσιάζεται η συσχέτιση του συντελεστή αναπήδησης και της ορμής του τεμάχους πριν την κρούση.



Εικόνα 19 - Τιμές των συντελεστών αναπήδησης από τις δοκιμές συναρτήσεως της προσπίπτουσας ορμής

4. Εργαστηριακή δοκιμή

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η διαδικασία των δοκιμών μικρής κλίμακας που διενεργήθηκαν στο εργαστήριο στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Αρχικά, θα γίνει αναφορά στην εργαστηριακή διάταξη, μετέπειτα, θα γίνει περιγραφή των ενεργειών για την προετοιμασία και εκτέλεση των εργαστηριακών δοκιμών και τη διαδικασία συλλογής δεδομένων των διαφόρων μεταβλητών που επηρεάζουν το φαινόμενο που μελετήθηκε. Τέλος, θα περιγραφεί η διαδικασία επεξεργασίας και ανάλυσης των δεδομένων και τα ειδικά λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν.

4.1. Διάταξη του εργαστηρίου

Η πειραματική διάταξη που απεικονίζεται παρακάτω, διαμορφώθηκε με τη βοήθεια του υποψήφιου διδάκτορα Παύλου Αστερίου και έχει χρησιμοποιηθεί σε διάφορες πειραματικές διερευνήσεις (Αστερίου, 2011; Ευθυμίου, 2011; Asteriou et al., 2012, Γίοκαρη, 2013; Asteriou et al., 2013b, Asteriou et al., 2013a; Μώρου, 2014), στο εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Βραχομηχανικής του Τομέα Γεωτεχνικής της σχολής.

Αποτελείται από μια φωτογραφική μηχανή ταχείας λήψεως στηριζόμενη σε αυτοσχέδια βάση, έναν μηχανισμό σχεδιασμένο για ρήψη σφαίρας σε ελεύθερη πτώση, μεταβλητού ύψους, προβολείς για τον φωτισμό της περιοχής που βιντεοσκοπείται, και έναν υπολογιστή για την λειτουργία της μηχανής ταχείας λήψεως και της αποθήκευσης των βίντεο των δοκιμών.



Εικόνα 20 - Εργαστηριακή διάταξη

4.2. Όργανα και συσκευές

4.2.1. Βάσεις ρίψης

Οι βάσεις, που δημιουργήθηκαν για τη παρούσα διπλωματική εργασία, κατασκευάστηκαν από ένεμα τσιμεντοειδούς βάσης υψηλής αντοχής με την εμπορική ονομασία Sikagrout 212. Οι ιδιότητες του παρουσιάζονται στον πίνακα παρακάτω.

Οι βάσεις έχουν διαστάσεις 15x15cm, ύψος 5 cm. Διαμορφώθηκε εσοχή διαστάσεως 10x10cm στο μέσον τους, έτσι ώστε να μπορεί να τοποθετηθεί σε αυτές το εκάστοτε εδαφικό υλικό που επιλέχθηκε. Οι εσοχές αυτές διαμορφώθηκαν με βάθη 1mm και 2mm, ώστε γίνεται η διάστρωση του εδαφικού υλικού με το επιθυμητό πάχος, με ευκολία για την διεξαγωγή των δοκιμών.



Εικόνα 21 - Βάση ρίψης με εσοχή ενδεικτικού βάθους 2mm χωρίς το εδαφικό υλικό

Όσον αφορά στην διαδικασία κατασκευής των βάσεων, έγινε έκχυση του ενέματος σε μεταλλικό καλούπι κυβικού σχήματος και διαστάσεων 15x15cm (πρότυπη μήτρα σκυροδέματος). Στο κέντρο της βάσης τοποθετήθηκε ειδικό ξύλο για μακέτα (ή αλλιώς μπάλα) διαστάσεων 10x10cm και το επιθυμητού κάθε φορά πάχους. Μετά την πήξη του ενέματος, αφαιρέθηκε το ξύλο δημιουργώντας έτσι την εσοχή με το επιθυμητό πάχος, όσο δηλαδή το πάχος της μπάλας.



Εικόνα 22 - Μεταλλικό καλούπι για την διαμόρφωση των βάσεων

4.2.2. Σφαιρικά δοκίμια

Λόγω της συμμετρίας της, η σφαίρα αποτελεί το βέλτιστο σχήμα για τη μελέτη των βραχοπτώσεων στο εργαστήριο σε δοκιμές μικρής κλίμακας. Επομένως, τα τεμάχια που χρησιμοποιήθηκαν για την παρούσα διπλωματική εργασία είχαν σφαιρικό σχήμα.

Για τις δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν δυο σφαιρικά δοκίμια διαμέτρου 3cm και 4cm με σκοπό να εξεταστεί η επιρροή της μάζας στο φαινόμενο. Οι μάζες τους μετρήθηκαν με ειδική ζυγαριά υψηλής ακριβείας ίσες με 28,5 gr και 67,2 gr αντίστοιχα. Τα δοκίμια αυτά κατασκευάστηκαν στο εργαστήριο, με τη χρήση ειδικών καλουπιών, μέσα στα οποία εγχύθηκε το τσιμεντένεμα που χρησιμοποιήθηκε και για τη δημιουργία των βάσεων. Στον Πίνακα 5 παρουσιάζονται οι ιδιότητες του ενέματος.

Πίνακας 5 – Ιδιότητες ενέματος τσιμεντοειδούς βάσης

Ιδιότητες Υλικού	Ένεμα Τσιμεντοειδούς βάσης
Πυκνότητα, ρ (KN/m ³)	21,9
Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (MPa)	37,4
Μέτρο του Young (Gpa)	15,7
Λόγος Poisson ν	0,11
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	7,5
Ταχύτητα κυμάτων P (m/s)	4335
Ταχύτητα κυμάτων S (m/s)	2575
Σκληρότητα Schmidt, R	33



Εικόνα 23 - Σφαιρικά δοκίμια διαμέτρου 3 και 4cm.

4.2.3. Φωτογραφική μηχανή ταχείας λήψεως

Η φωτογραφική μηχανή που χρησιμοποιήθηκε για την καταγραφή των στιγμιότυπων είναι η Trouble Shooting LE από την εταιρεία Fastec Imaging. Έχει φωτογραφικό φακό 16mm, τύπου C-mount και έχει κατασκευαστεί αποκλειστικά για ερευνητικές εφαρμογές. Ρυθμίστηκε ώστε να καταγράφει 500 εικόνες ανά δευτερόλεπτο με ανάλυση 440x330 pixels (ενδεικτικά η μέγιστη της συσκευής είναι 640x480 pixels) και τοποθετήθηκε επί σταθερής αυτοσχέδιας βάσης όπως φαίνεται στην εικόνα, σε απόσταση περίπου 1m από τον μηχανισμό ρίψης της σφαίρας. Επιπλέον, πίσω από την επιφάνεια πρόσκρουσης τοποθετήθηκε άσπρο φόντο για να δημιουργηθεί υψηλή αντίθεση μεταξύ αντικειμένου και φόντου, έτσι ώστε η σφαίρα να γίνεται εύκολα διακριτή κατά την ανάλυση.



Εικόνα 24 - Φωτογραφική μηχανή ταχείας λήψεως επί της βάσης της

4.2.4. Μηχανισμός ρίψης της σφαίρας

Ο μηχανισμός αυτός, που απεικονίζεται στην εικόνα της εργαστηριακής διάταξης, έχει κατασκευαστεί έτσι ώστε η ελεύθερη πτώση της σφαίρας να γίνεται χωρίς περιστροφή. Η ελεύθερη πτώση θα μπορούσε να γίνει και με το χέρι, δεδομένου όμως του ότι δεν μπορεί να εξασφαλιστεί πως οι συνθήκες ρίψης θα είναι ίδιες σε κάθε δοκιμή, δεν θα επιτυγχάνονταν

ακρίβεια και επαναληψιμότητα στα αποτελέσματα, όπως διαπιστώθηκε και σε προηγούμενη έρευνα (Μπεκρή 2010).

Αποτελείται από μια αντλία κενού που απεικονίζεται στην εικόνα παρακάτω, έναν ορθοστάτη, δηλαδή μια μεταλλική δοκό με μεταβλητό ύψος ρίψης κάθε φορά ανάλογα με τις απαιτήσεις της έρευνας, και από ένα σωλήνα ο οποίος κρατά την σφαίρα μέχρι η υποπίεση να μηδενιστεί σταδιακά και την απελευθερώσει.



Εικόνα 25 - Αντλία κενού

Στην παρούσα έρευνα, ο ορθοστάτης ρυθμίστηκε σε ύψος ρίψης αρχικά 100cm και στην συνέχεια 150cm από το επίπεδο της επιφάνειας του εδαφικού υλικού, με σκοπό τη διερεύνηση της επίδρασης του αρχικού ύψους και κατ' επέκταση της κινητικής ενέργειας της σφαίρας πριν την κρούση της στο εδαφικό υλικό.

4.2.5. Φωτισμός

Για την σωστή καταγραφή της τροχιάς από τη κάμερα και στη συνέχεια τη σωστή επεξεργασία της χρησιμοποιήθηκε έντονος φωτισμός αποτελούμενος από τρεις μικρούς προβολείς αλογόνου. Οι προβολείς αυτοί τοποθετήθηκαν σε κατάλληλη θέση, έτσι ώστε να μην δημιουργηθούν σκιές που θα προκαλούσαν πρόβλημα κατά την ανάλυση της τροχιάς.

4.2.6. Δευτερεύοντα όργανα και συσκευές

- 1) Ηλεκτρονικός ζυγός ακριβείας $\pm 0,01\text{gr}$,
- 2) Γυάλινες κάψες διαφόρων μεγεθών για τον προσδιορισμό της υγρασίας,
- 3) Βιομηχανικός φούρνος της εταιρείας elvem για την ξήρανση του εδαφικού υλικού,
- 4) Ηλεκτρονικό αποστασιόμετρο – κλισίμετρο Leica τύπου Disto D3 για τον προσδιορισμό της κλίσης των βάσεων και κατά συνέπεια της επιφάνειας πρόσπτωσης (απόκλιση $\pm 0,1^\circ$),
- 5) Ηλεκτρονικό παχύμετρο ακριβείας $\pm 0,01\text{mm}$ για τη μέτρηση του πάχους της στρώσης του εδαφικού υλικού,
- 6) Νήμα της στάθμης,
- 7) Πιστόλι πεπιεσμένου αέρα.

4.3. Διαδικασία εκτέλεσης δοκιμών

4.3.1. Διαμόρφωση βάσεων

Οι βάσεις διαμορφώθηκαν με σκοπό την διερεύνηση της επιρροής διαφόρων παραμέτρων στους συντελεστές αναπήδησης, όπως το πάχος της επικάλυψης στρώσης καθαρής αργίλου, άμμου ή μείγμα αυτών, το ποσοστό της υγρασίας του εκάστοτε εδαφικού υλικού, το ύψος από το οποίο πραγματοποιήθηκε η ελεύθερη πτώση της σφαίρας, τη μάζα της σφαίρας κ.α..

Για τη διερεύνηση σε πάχη από 1mm με 1,50mm και 2mm με 2,50mm (ανάλογα την διάστρωση του υλικού κάθε φορά στις βάσεις με ενδεικτικό πάχος 1mm και 2mm αντίστοιχα) η διάστρωση έγινε με τον εξής τρόπο: αρχικά έγινε η προσπάθεια να επιλέγεται άμεσα το ποσοστό υγρασίας που ήταν υπό εξέταση, δηλαδή γινόταν εξ' αρχής το πλάσιμο του αργιλικού υλικού με προσθήκη ανάλογου ποσοστού νερού- εδαφικού υλικού και στη συνέχεια να διαστρώνεται με το χέρι στη βάση, έχοντας αποκτήσει πρώτα μια αρκετά ομοιόμορφη και πλάσιμη δομή. Με αυτή τη μέθοδο όμως, παρουσιάστηκαν αρκετά προβλήματα όπως: η μη αναπήδηση της σφαίρας στην επιφάνεια αμέσως μετά την τοποθέτηση του υλικού στη βάση, η κακής ποιότητας διάστρωση του υλικού λόγω της μη εργασιμότητας του και δευτερευόντως η απώλεια του ποσοστού υγρασίας πλάθοντάς το.



Εικόνα 26 - Βάση ρίψης με διαμορφωμένη επιφάνεια πρόσπτωσης

Επομένως για να μπορούν να εξαχθούν κάποια χρήσιμα αποτελέσματα και να καταγραφούν μη μηδενικοί συντελεστές αναπήδησης έπρεπε να διαφοροποιηθεί η μεθοδολογία διαμόρφωσης. Έτσι επιλέχθηκε στο υλικό να προστεθεί κατά την πλάση του αρκετό νερό έτσι ώστε να γίνει εργάσιμο και να μπορεί να γίνει η διάστρωση με το σωστό τρόπο. Για την επίτευξη της απαιτούμενης υγρασίας πριν την δοκιμή, το υλικό διαστρωμένο πλέον στη βάση αφηνόταν για κάποιο χρονικό διάστημα να ξηρανθεί, προτού εκτελεστούν οι δοκιμές ελεύθερης πτώσης. Η μέτρηση του ακριβούς πάχους της στρώσης επικάλυψης έγινε με τη χρησιμοποίηση του ηλεκτρονικού παχυμέτρου που αναφέρθηκε παραπάνω μετά από το πέρας των δοκιμών σε τρία με τέσσερα τυχαία σημεία της βάσης. Συγκεκριμένα, το υλικό με λιγότερη

υγρασία πλέον και έχοντας αποκτήσει μια σχετική αντοχή μπορούσε να αφαιρεθεί από την βάση ακέραιο και έτσι να μετρηθεί το πάχος του.

Με αυτή τη μέθοδο έγινε διάστρωση δύο διαφορετικών αργιλικών υλικών, χαμηλής και μέσης πλαστικότητας, ενώ με το χαμηλής πλαστικότητας που ήταν και πιο συνεργάσιμο ως προς την φύση των δοκιμών δημιουργήθηκαν και προσμίξεις, σε ποσοστά κατά βάρος, με δύο πρότυπες χαλαζιακές άμμους, την λεπτόκοκκη άμμο Longstone (M34) και την λεπτόκοκκη M31, λεπτομέρειες για τις οποίες θα παρουσιαστούν αναλυτικότερα στην ενότητα των ιδιοτήτων των εδαφικών υλικών. Σκοπός αυτής της δοκιμής ήταν να καθοριστεί πόσο επηρεάζει την τιμή του συντελεστή αναπήδησης η εναλλαγή του κατά βάρος ποσοστού της άμμου στο εδαφικό μείγμα. Συγκεκριμένα, δοκιμάστηκαν τρεις συνδυασμοί. Στον πρώτο τοποθετήθηκε μείγμα εδαφικών υλικών με ποσοστά 75% άργιλο και 25% την εκάστοτε άμμο που χρησιμοποιήθηκε, κατά βάρος. Στο δεύτερο ίσα βάρη άμμου και αργίλου (αναλογία 50% κ. β. άμμος και 50% κ. β. άργιλος) και στον τρίτο το υλικό ήταν αρκετά αμμώδες (75% κ. β. άμμος και 25% κ. β. άργιλος).

Για τη διερεύνηση σε πάχη στρώσης μικρότερα του 1,50mm, ακολουθήθηκε μια αρκετά διαφορετική μεθοδολογία. Δημιουργήθηκε σε ένα δοχείο ένα αρκετά υδαρές μείγμα από άργιλο και διαστρώθηκε διαδοχικές φορές με πινέλο για την επίτευξη πρακτικά πολύ μικρών παχών στρώσης. Έπειτα από κάθε στρώση, το υλικό στεγνωνόταν με πιστόλι αέρα που απεικονίζεται σε εικόνα παρακάτω, έτσι ώστε αφενός να μπορεί να διαστρωθεί η επόμενη στρώση και αφετέρου να έρθει σε ξηρή κατάσταση για τη δοκιμή (η ενέργεια αυτή δεν ακολουθήθηκε για τον έλεγχο της αναπήδησης σε υλικό στο όριο υδαρότητας). Μετά από κάθε στρώση αρχικά, ή από προγραμματισμένο αριθμό στρώσεων στην συνέχεια, γινόταν η εκτέλεση της ρίψης και η διαδικασία συνεχιζόταν έως ότου το πάχος φτάσει σταδιακά στο επιθυμητό. Σκοπός της παραπάνω μεθόδου ήταν να διερευνηθεί η μεταβολή των τιμών του συντελεστή αναπήδησης αυξανόμενου του πάχους επικάλυψης.



Εικόνα 27 - Στρώση με πινέλο υδαρούς αργιλικού υλικού και μετατροπή του σε ξηρό με πιστόλι αέρα



Εικόνα 28 - Πιστόλι πεπιεσμένου αέρα

Η επιλογή του αριθμού των επαναλήψεων έγινε σύμφωνα με τη μέτρηση του συνολικού πάχους των στρώσεων. Λεπτομέρειες για τη συλλογή των μετρήσεων του ακριβούς πάχους δίνονται στην παρακάτω υποενότητα. Για τις δοκιμές αυτές, χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά το αργλικό υλικό χαμηλής πλαστικότητας.

Τέλος, έγιναν κάποιες δοκιμές στις οποίες η επιφάνεια πρόσπτωσης διαμορφώθηκε με απλή απόθεση του υλικού, δηλαδή ξηρό και χωρίς συσσωματώματα, σε πάχος όμοιο με το ονομαστικό πάχος της κάθε βάσης, δηλαδή 1mm και 2mm.

Κατά την διαδικασία εκτέλεσης των δοκιμών η επιφάνεια διαταρασσόταν έπειτα από κάθε ρίψη και για αυτόν τον λόγο γινόταν προσθήκη υλικού και διαμόρφωση εκ νέου της επιφάνειας πρόσπτωσης. Στην μέθοδο αυτή χρησιμοποιήθηκε η άργιλος χαμηλής πλαστικότητας είτε μόνη της είτε με την πρόσμιξη κατά βάρος ποσοστού της χαλαζιακής άμμου M31 για την διερεύνηση της επιρροής του ποσοστού της άμμου σε ξηρό εδαφικό μείγμα.

4.3.2. Δοκιμές ελεύθερης πτώσης – Συλλογή αποτελεσμάτων

Έπειτα από τη προετοιμασία της επιφάνειας πρόσπτωσης σειρά είχε η εκτέλεση των δοκιμών. Σε κάποιες από τις δοκιμές αυτές, όπως θα δούμε και παρακάτω, χρησιμοποιήθηκαν δυο διαφορετικές σφαίρες διαμέτρου 3mm και 4mm για να εξεταστεί η επιρροή της μάζας του πίπτοντος τεμάχους στο συντελεστή αναπήδησης, καθώς και από δυο διαφορετικά ύψη για να εξεταστεί η επιρροή των διαφορετικών μεγεθών κινητικής ενέργειας τη στιγμή ακριβώς πριν την πρόσκρουση, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω.

Συγκεκριμένα, διενεργήθηκαν 483 δοκιμές με την χρησιμοποίηση δυο διαφορετικών αργιλικών υλικών, τριών διαφορετικών αναλογιών αργίλου - άμμου και η διάστρωση τους έγινε με τρεις διαφορετικές μεθόδους, λεπτομέρειες για τις οποίες αναφέρθηκαν στην υποενότητα της διαμόρφωσης των βάσεων, με διαφορετικά ποσοστά υγρασίας, όπου χρειάστηκε.

Το στιγμιότυπο της αναπήδησης καταγράφεται σε βίντεο με το πρόγραμμα maxTRAQ της εταιρίας Innovision Systems, από την κάμερα που είχε στηθεί στη διάταξη, όπως φαίνεται στην εικόνα παραπάνω.

4.3.3. Συλλογή των δεδομένων κάθε δοκιμής

Όπως αναφέρεται και στον τίτλο σε αυτό το στάδιο περιγράφεται η διαδικασία της συλλογής των δεδομένων της κάθε δοκιμής, για τις οποίες δεν μπορούμε να γνωρίζουμε την ακριβή τιμή τους πριν την εκτέλεσή της, δηλαδή του ακριβούς πάχους στην εκάστοτε στρώση εδαφικού υλικού και της υγρασίας της.

Ο προσδιορισμός του πάχους αλλάζει ανάλογα με τη κατηγορία των δοκιμών, όπως αυτές παρουσιάστηκαν στην παραπάνω υποενότητα. Όσον αφορά στη κατηγορία δοκιμών επικάλυψης πάχους μεγαλύτερου του 1mm, δεδομένου ότι το πάχος της εκάστοτε εσοχής που έχει διαμορφωθεί ως υποδοχή για το εδαφικό υλικό είναι ενδεικτικό, απαιτείται η ακριβής μέτρησή του μετά τις δοκιμές. Η μέτρηση αυτή έγινε με την αφαίρεση του εδαφικού υλικού, που είχε πλέον διαμορφωθεί σε σχήμα πλακιδίου, από τη βάση και την άμεση μέτρησή του με ηλεκτρονικό παχύμετρο σε τρία με τέσσερα σημεία ανάλογα με τις αποκλίσεις που διαπιστώνονταν κάθε φορά.

Όσον αναφορά στην κατηγορία δοκιμών για πάχη μικρότερα του 1,50mm η μέτρηση αυτή έγινε με το ίδιο ηλεκτρονικό παχύμετρο που αναφέρθηκε και παραπάνω, δεδομένης όμως της αδυναμίας συλλογής ακέραιου πλακιδίου εδαφικού υλικού, έγινε στο περιθώριο μιας δεύτερης βάσης από το ίδιο υλικό, όπου γινόταν ανάλογη αλληλουχία επαλείψεων, με την βάση στην οποία γίνονταν οι δοκιμές. Όπως είναι φυσικό, λόγω του τρόπου διάστρωσης του υλικού υπήρξαν κάποιες αποκλίσεις στα πάχη από τη μία βάση στην άλλη ή ακόμα και πάνω στην ίδια.

Για τον προσδιορισμό του ποσοστού υγρασίας (όπου χρειάστηκε), έγινε συλλογή σε ειδικά αριθμημένες γυάλινες κάψες, τμήματος της επικάλυψης του εδαφικού υλικού αμέσως μετά την εκτέλεση των δοκιμών οι οποίες και ζυγίστηκαν σε ζυγό ακριβείας για να μετρηθεί το υγρό βάρος. Στην συνέχεια, τοποθετήθηκαν σε βιομηχανικό φούρνο για την ολική ξήρανσή τους και στη συνέχεια μετρήθηκε το ξηρό βάρος. Το ποσοστό της υγρασίας του εδάφους υπολογίστηκε με τον παρακάτω τύπο:

$$\text{ΥΓΡΑΣΙΑ}(\%) = \frac{W_{\text{υγρό}} - W_{\text{ξηρό}}}{W_{\text{ξηρό}}} \cdot 100\% \quad (4.1)$$



Εικόνα 29 - Κάψες με εδαφικό υλικό μετά τη δοκιμή, πάνω στον εργαστηριακό φούρνο

4.4. Επεξεργασία αποτελεσμάτων

Καθώς η φωτογραφική μηχανή καταγράφει 500 frames το δευτερόλεπτο και η ανάλυση που έχει επιλεγεί είναι σχετικά υψηλή (440x330 εικονοστοιχεία) τα βίντεο που συλλέγονται έπειτα από κάθε δοκιμή είναι αρκετά μεγάλου μεγέθους. Το πρόγραμμα maxTRAQ βοηθά στη συλλογή, την περικοπή και την αποθήκευσή τους κατά τη διάρκεια και ακριβώς μετά την εκτέλεση της δοκιμής, με σκοπό την μετέπειτα ευκολότερη επεξεργασία τους.

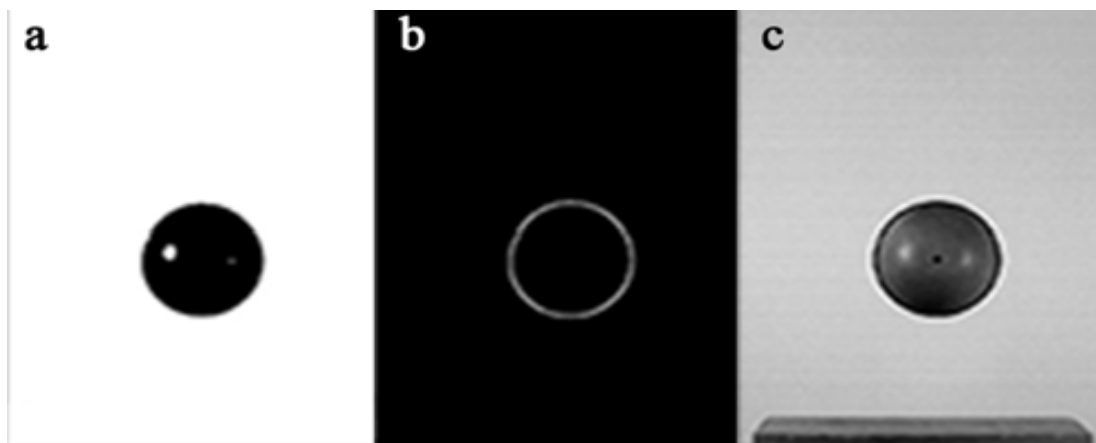
Η επεξεργασία κάθε βίντεο γίνεται στο προγραμματιστικό περιβάλλον της MATLAB από την εταιρεία Mathworks, από ανάλογα διαμορφωμένο κώδικα. Πιο συγκεκριμένα, ένα αρχείο βίντεο αποτελείται από μια σειρά από εικόνες παρουσιασμένες με συγκεκριμένο ρυθμό, δηλαδή με καρτέ ανά δευτερόλεπτο (fps). Οι ψηφιακές εικόνες σχηματίζονται από μια διάταξη εικονοστοιχείων σε δυο διαστάσεις, με τη μορφή ενός πίνακα, με γραμμές και στήλες όσες και η ανάλυση της εικόνας. Κάθε στοιχείο της εικόνας βρίσκεται στην κλίμακα του γκρι και παίρνει τιμές από 0 (μαύρο) έως 255 (λευκό). Ο αλγόριθμος εντοπισμού της θέσης της σφαίρας κατ' επέκταση της τροχιάς της ώστε να είναι δυνατός ο υπολογισμός του συντελεστή αναπήδησης αποτελείται από τα ακόλουθα τρία βασικά στάδια

- Αρχικά το κάθε καρτέ μετατρέπεται σε μια δυαδική εικόνα, δηλαδή μια εικόνα με δυο αποκλειστικά χρώματα, μαύρο (0) και απολύτως λευκό (255) με σκοπό να διακριτοποιηθεί η σφαίρα από το φόντο. Το αποτέλεσμα φαίνεται στην εικόνα στο τμήμα α.
- Έπειτα από τη μετατροπή της εικόνας σε δυαδική, είναι φανερό ότι από το περιθώριο του κυκλικού δίσκου που αποτελεί την προβολή της σφαίρας, σχηματίζεται το κυκλικό περίγραμμά της. Μέσω ενός αλγορίθμου αναγνώρισης του περιθωρίου (Canny, 1986) σχηματίζεται ο προαναφερθείς κύκλος.
- Οι συντεταγμένες του κύκλου αυτού χρησιμοποιούνται έτσι ώστε μέσω της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων (Pratt, 1987) να προσδιοριστούν οι συντεταγμένες του κέντρου του. Η εξίσωση που περιγράφει τη μέθοδο είναι η:

$$SS(X, Y, R) = \sum_{i=1}^n (R - \sqrt{(x_i - X)^2 + (y_i - Y)^2})^2 \quad (4.2)$$

όπου x_i , y_i οι συντεταγμένες των σημείων του κύκλου, X , Y οι συντεταγμένες του κέντρου του κύκλου και R η ακτίνα του.

Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε καρτέ του βίντεο έτσι ώστε να εντοπιστεί η ακριβής θέση της σφαίρας ανά πάσα χρονική στιγμή.



Εικόνα 30 - Στάδια εντοπισμού περιγράμματος σφαίρας, (Asteriou et al., 2013a)

Στην συνέχεια, καθορίζοντας την χρονική στιγμή της κρούσης, τα καρέ χωρίζονται από το πρόγραμμα σε δύο κατηγορίες. Αυτά πριν και αυτά μετά την κρούση της σφαίρας. Ο καθορισμός αυτός γίνεται θεωρώντας ως στιγμή της κρούσης το καρέ όπου το σφαιρικό δοκίμιο βρίσκεται στην χαμηλότερη καταγεγραμμένη θέση, δεδομένης όμως της πιθανότητας σφάλματος το σημείο αυτό μπορεί να καθορισθεί και από τον χρήστη του προγράμματος.

Μετά τον προσδιορισμό του σημείου κρούσης, γίνεται επαναπροσδιορισμός της τροχιάς του δοκιμίου και έτσι υπολογίζονται οι ταχύτητες πριν και μετά την κρούση. Με αυτόν τον τρόπο τελικά προσδιορίζονται οι συντελεστές αναπήδησης για κάθε δοκιμή.

5. Ιδιότητες εδαφικών υλικών

Για τη διαμόρφωση της επιφάνειας πρόσπτωσης χρησιμοποιήθηκαν δυο διαφορετικού τύπου άργιλοι και δυο πρότυπες εργαστηριακά άμμοι (πρότυπη χαλαζιακή M31 και πρότυπη χαλαζιακή Longstone ή αλλιώς M34). Στην ενότητα αυτή αναφέρονται οι χαρακτηριστικές ιδιότητες των εδαφικών υλικών αυτών, προκειμένου να υπάρχει μια σχετική αντίληψη του ποια είναι η χαρακτηριστική ιδιότητα που επηρεάζει τα αποτελέσματα της έρευνας και προκαλεί την διαφοροποίησή τους από υλικό σε υλικό.

Οι χαρακτηριστικές ιδιότητες των εδαφικών υλικών για τις οποίες θα γίνει αναφορά, είναι για τις αργίλους τα όρια υδαρότητας και πλαστικότητας (LL και PL αντίστοιχα) και η κατάταξη κατά USCS (Unified Soil Classification System), ενώ για τις άμμους οι φυσικές τους ιδιότητες όπως το ειδικό βάρος στερεών κόκκων G_s και το μέγιστο και ελάχιστο πορώδες, αλλά και η κοκκομετρική διαβάθμισή τους.

5.1. Άργιλοι

Για τις δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν δύο τύπου άργιλοι, η μια χρώματος καφέ με απόχρωση κόκκινου και η δεύτερη χρώματος σκούρου καφέ. Για τις αργίλους αυτές, εκτελέστηκαν οι δοκιμές των ορίων Atterberg έτσι ώστε να προσδιοριστούν οι βασικές ιδιότητες τους. Συγκεκριμένα προσδιορίστηκαν το όριο υδαρότητας μέσω της συσκευής Casagrande και το όριο πλαστικότητας.

Στην παρούσα διπλωματική ως άργιλος 1 θα αναφέρεται η κόκκινη άργιλος και ως άργιλος 2, η σκούρα καφέ. Τα χαρακτηριστικά τους αναγράφονται στον **Error! Reference source not found.**

Πίνακας 6 – Ιδιότητες αργίλων

Ιδιότητα	άργιλος 1	άργιλος 2
Όριο υδαρότητας (LL)	25	32
Όριο πλαστικότητας (PL)	15	18
Δείκτης πλαστικότητας (PI)	10	14
Κατάταξη USCS	Χαμηλής πλαστικότητας (PL)	Μέσης πλαστικότητας (PL)

Ο δείκτης πλαστικότητας (PI) προέκυψε ως η διαφορά του ορίου πλαστικότητας από το όριο υδαρότητας, δηλαδή:

$$PI = LL - PL$$

(5.1)



Εικόνα 31 - Η άργιλος 1, σχηματισμένη για την δοκιμή του ορίου πλαστικότητας



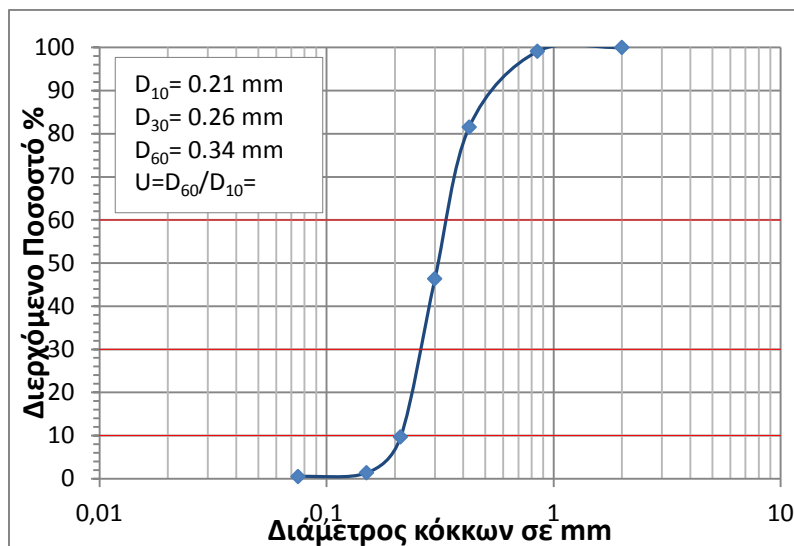
Εικόνα 32 - Η άργιλος 2, σχηματισμένη για την δοκιμή του ορίου πλαστικότητας

5.2. Άμμοι

Για τις άμμους χρησιμοποιήθηκαν όπως προαναφέρθηκε πρότυπα υλικά, οπότε και υπάρχουν περισσότερες πληροφορίες από ότι σε σχέση με τις αργίλους. Στις παρακάτω υποενότητες αναφέρονται κάποια από τα χαρακτηριστικά τους καθώς επίσης παρατίθενται οι κοκκομετρικές διαβαθμίσεις τους.

5.2.1. Άμμος M31

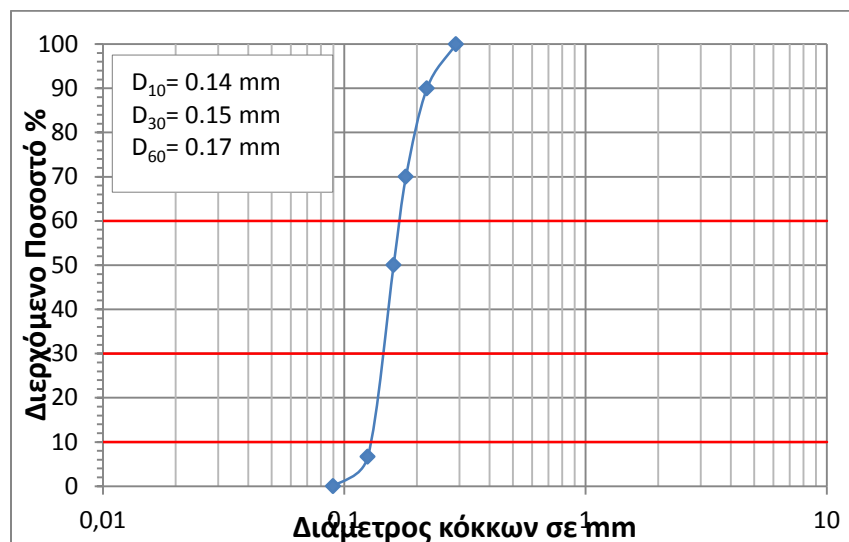
Η άμμος M31 είναι μια υπόλευκη φυσική χαλαζιακή άμμος από την έρημο της Αιγύπτου. Οι χαλαζιακοί της κόκκοι εμφανίζουν αρκετά καλή στρογγυλότητα και είναι διαυγείς και άχρωμοι. Έχει τιμές μεγίστου και ελαχίστου δείκτη πόρων $e_{max}=0,800$ και $e_{min}=0,500$ αντίστοιχα, μέση διάμετρο κόκκων $d_{50}=0,3mm$ και ειδικό βάρος στερεών κόκκων $G_s=2,65g/cm^3$. Παρακάτω, παρατίθεται η καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης.



Διάγραμμα 1 - Κοκκομετρική διαβάθμιση M31

5.2.2. Άμμος Longstone (M34)

Πρόκειται για μια από τις πλέον λεπτόκοκκες χαλαζιακές άμμους, με γωνιώδεις κόκκους. Η άμμος αυτής σε αντίθεση με την M31 που συλλέγεται από την έρημο της Αιγύπτου, είναι βιομηχανικής παραγωγής. Έχει τιμές μεγίστου και ελαχίστου δείκτη πόρων $e_{max}=0,994$ και $e_{min}=0,513$ αντίστοιχα και μέση διάμετρο $d_{50}=0,16mm$ και ειδικό βάρος στερεών κόκκων $G_s=2,63g/cm^3$. Παρακάτω παρατίθεται η καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης.



Διάγραμμα 2 - Κοκκομετρική διαβάθμιση άμμου Longstone (M34), (Γκαζέτας, 2007)

5.2.3. Συγκεντρωτικός πίνακας ιδιοτήτων άμμων

Στον παρακάτω πίνακα, εμφανίζονται συγκεντρωτικά οι τιμές των ιδιοτήτων των πρότυπων άμμων M31 και Longstone (Κωνσταντίνου, 2013).

Πίνακας 7 – Φυσικές ιδιότητες άμμων

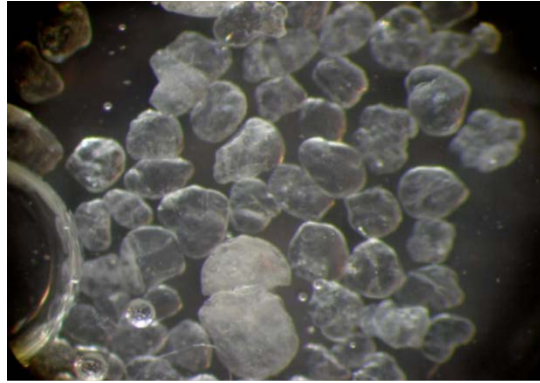
Ιδιότητα	M31	M34 Longstone
G_s (g/cm ³)	2,65	2,63
e_{min}	0,528	0,513
e_{max}	0,870	0,994
d_{50} (mm)	0,30	0,16
d_{60} (mm)	0,34	0,17
d_{30} (mm)	0,26	0,15
d_{10} (mm)	0,21	0,14
C_u	1,58	1,21
C_c	0,95	0,94

Όπου G_s είναι το ειδικό βάρος των στερεών κόκκων, e_{min} και e_{max} είναι το ελάχιστο και μέγιστο πορώδες που αντιστοιχεί στην ελάχιστη και μέγιστη πυκνότητα αντίστοιχα, d_{50} είναι η μέση διάμετρος των κόκκων (η διάμετρος από την οποία διέρχεται το 50% του εδαφικού δείγματος), d_{60} , d_{30} και d_{10} , η διάμετρος από την οποία διέρχεται το 60%, 30% και 10% του εδαφικού δείγματος αντίστοιχα, C_u ο συντελεστής ομοιομορφίας που υπολογίζεται από τον τύπο:

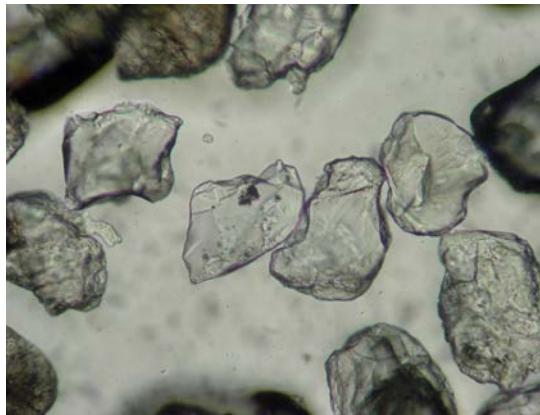
$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (5.2)$$

και C_c ο συντελεστής καμπυλότητας που δίνεται από τον τύπο:

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{60} \cdot d_{10}} \quad (5.30)$$



**Εικόνα 33 - Η άμμος M31 στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο
(Κωνσταντίνου, 2013)**



**Εικόνα 34 – Η άμμος Longstone (M34) στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο
(Κωνσταντίνου, 2013)**

6. Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Στην ενότητα αυτή γίνεται η παρουσίαση και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων των εργαστηριακών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Αρχικά αναλύεται η αξιοπιστία και η επαναληψιμότητα των μετρήσεων, όπως προέκυψαν με την χρησιμοποιούμενη πειραματική διάταξη και διαδικασία που είναι απαραίτητα για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων. Στην συνέχεια, παρουσιάζεται ο τρόπος διεξαγωγής της κάθε σειράς δοκιμών και ταυτόχρονα τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση τους. Επιπλέον, γίνεται μια προσπάθεια κατάρτισης της κατάλληλης σχέσης πρόβλεψης του συντελεστή αναπήδησης, εκφρασμένου ως συνάρτηση των παραμέτρων που μελετήθηκαν στην εκάστοτε πειραματική διερεύνηση. Τέλος, γίνεται αναφορά σε κάποιες χρήσιμες παρατηρήσεις και σχόλια που προέκυψαν μέσω των δοκιμών μικρής κλίμακας, καθώς επίσης και η ερμηνεία του μηχανισμού που διέπει την παρατηρούμενη συμπεριφορά. Συγκεντρωτικά, οι σειρές δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 8 – Σειρές δοκιμών

Τύπος Υλικού	Αριθμός δοκιμών	Ύψος ρίψης (cm)	Διάμετροι τεμαχών (cm)
Χωρίς επικάλυψη	10	100	3cm και 4cm
Χωρίς επικάλυψη	10	150	3cm και 4cm
Αναζυμωμένη Άργιλος Μέσης Πλαστικότητας	67	100	3cm και 4cm
Αναζυμωμένη Άργιλος Χαμηλής Πλαστικότητας	79	100	3cm και 4cm
Αναζυμωμένη Άργιλος Χαμηλής Πλαστικότητας	46	150	3cm και 4cm
Άργιλος Χαμηλής Πλαστικότητας σε ξηρή κατάσταση	20	100	3cm και 4cm
Επάλειψη με άργιλο Χαμηλής Πλαστικότητας σε υγρή μορφή	55	150	3cm
Επάλειψη με άργιλο Χαμηλής Πλαστικότητας με ξήρανση	40	150	3cm
Επάλειψη με άργιλο Χαμηλής Πλαστικότητας με ξήρανση	30	100	3cm
Αναζυμωμένο μείγμα Αργίλου Χαμηλής Πλαστικότητας με άμμο M34	36	100	3cm
Αναζυμωμένο μείγμα Αργίλου Χαμηλής Πλαστικότητας με άμμο M31	36	100	3cm
Άμμος M34 σε ξηρή κατάσταση	20	100	3cm και 4cm
Μείγμα Αργίλου Χαμηλής Πλαστικότητας με άμμο M31	30	100	3cm και 4cm

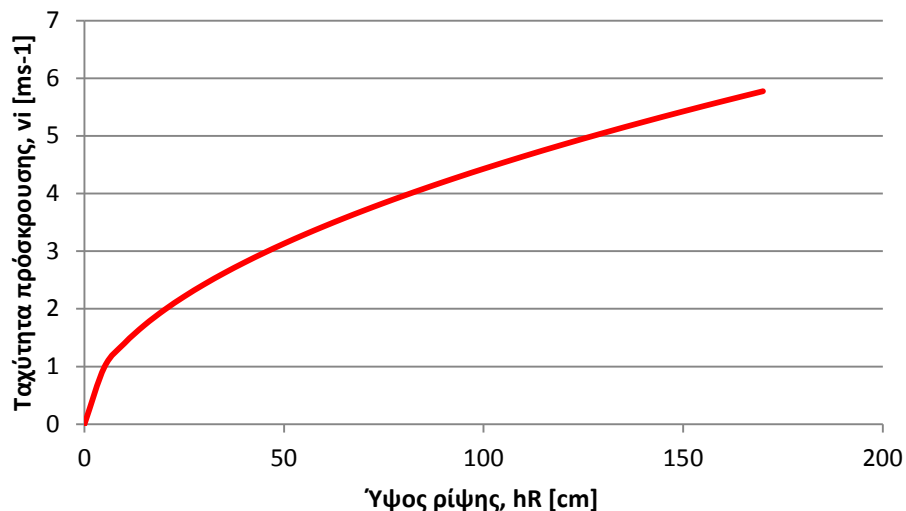
6.1. Αξιοπιστία μετρήσεων

Σε αυτήν την ενότητα, αναλύεται το κατά πόσο οι μετρήσεις της πειραματικής διαδικασίας και κατά συνέπεια τα αποτελέσματα που λήφθηκαν από αυτές, είναι στατιστικά αξιόπιστες.

Κατά την πειραματική διαδικασία, η ρίψη των δοκιμών στην ειδικά διαμορφωμένη κάθε φορά επιφάνεια πρόσπτωσης, πραγματοποιούνταν μέσω ελεύθερης πτώσης από καθορισμένο ύψος. Η ταχύτητα που αναπτύσσει το σφαιρικό τεμάχος ακριβώς πριν την πρόσκρουση είναι άμεση συνάρτηση του αρχικού ύψους ρίψης H . Πιο συγκεκριμένα, η εξάρτηση αυτή φαίνεται και από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\left. \begin{array}{l} v = g \cdot t \\ s = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 \end{array} \right\} \Rightarrow v = g \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot s}{g}} \quad (6.1)$$

όπου v είναι η ταχύτητα του κέντρου μάζας του τεμάχους πριν την πρόσκρουση, g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας ίση με $9,81 \text{ ms}^{-1}$ και s είναι η απόσταση που διανύει το κέντρο μάζας του τεμάχους.



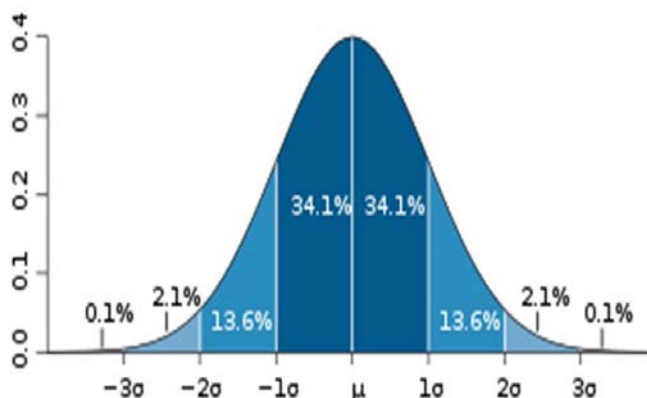
Διάγραμμα 3 - Εξάρτηση ταχύτητας πρόσκρουσης με το αρχικό ύψος ρίψης

Στατιστικά, θεωρώντας κανονική κατανομή, γίνεται η υπόθεση ότι συλλέχθηκαν N τον αριθμό μετρήσεις ($X_1, X_2, X_3, \dots, X_{N-1}, X_N$) για την ίδια ποσότητα x , όλες μέσω της ίδιας μεθόδου. Έχοντας θεωρηθεί ότι τα οποιαδήποτε σφάλματα που έχουν προκύψει είναι τυχαία και μικρά μπορεί να θεωρηθεί ότι:

$$\text{Η μέση τιμή τους είναι: } \bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i, \quad (6.2)$$

$$\text{και η τυπική απόκλιση του δείγματος } \sigma_x^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \quad (6.3)$$

Πιο συγκεκριμένα, η τυπική απόκλιση εκφράζει το εύρος της κατανομής των σφαλμάτων με κέντρο την μέση τιμή του δείγματος και όριο εμπιστοσύνης 68,2% πιθανότητα για κάθε μέτρηση X να βρίσκεται μέσα σε αυτό το διάστημα.



Εικόνα 35 - Καμπύλη κανονικής κατανομής (<http://scalesstudy.wordpress.com>)

Η επεξεργασία των δοκιμών, μέσω της διαδικασίας επεξεργασίας της εικόνας, είναι αρκετά περίπλοκη ώστε να μπορεί προσδιοριστεί το σφάλμα στη μέτρηση της ταχύτητας. Έτσι για κάθε αρχικό ύψος απελευθέρωσης των σφαιρικών δοκιμών μπορεί να υπολογισθεί η μέση τιμή \bar{X} και η τυπική απόκλιση σ_x των μετρήσεων.

Αυτό γίνεται καθώς η καλύτερη εκτίμηση της πραγματικής τιμής του μετρούμενου μεγέθους X (όπου εδώ είναι η ταχύτητα του κέντρου μάζας του τεμάχους), είναι η μέση τιμή \bar{X} και η καλύτερη εκτίμηση του σφάλματος είναι το εύρος της κατανομής, δηλαδή η τυπική απόκλιση σ_x .

Από τα χαρακτηριστικά των κατανομών που προκύπτουν (\bar{X} , σ_x) για κάθε διαφορετικό αρχικό ύψος απελευθέρωσης, γίνεται η επιλογή των δοκιμών που θα χρησιμοποιηθούν αργότερα για την περαιτέρω επεξεργασία, έτσι ώστε να απαλείφουν τα δεδομένα εκείνα που εμφανίζουν αυξημένες πιθανότητες να έχουν προκύψει από εσφαλμένη εκτέλεση είτε της πειραματικής διαδικασίας, είτε της επεξεργασίας τους.

Θεωρώντας επίπεδο εμπιστοσύνης 95%, η τιμή της ταχύτητας θα πρέπει να βρίσκεται σε ένα εύρος $\pm 1,8 \sigma_x$ από τη μέση τιμή του δείγματος. Επομένως, το εύρος των τιμών θα πρέπει να ικανοποιεί την παρακάτω συνθήκη

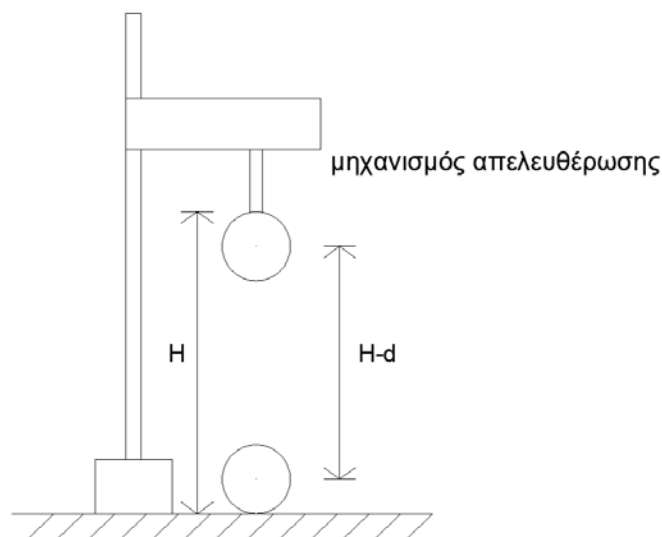
$$|\bar{v}_I - v_I| \leq 1.8 \cdot \sigma_{\bar{v}_I} \quad (6.4)$$

Συνολικά το αρχικό ύψος πρόσπτωσης μεταβλήθηκε τρεις φορές στην διάταξη για διάφορους λόγους που εξυπηρετούσαν το αντικείμενο της έρευνας. Συγκεκριμένα, οι ρίψεις με ελεύθερη πτώση, του τεμάχους διεξήχθησαν από αρχικά ύψη περίπου 100cm και 150cm. Βάσει των αναλυτικών εξισώσεων της κίνησης (σχέσεις 6.1), η ταχύτητα πρόσκρουσης είναι $4,42\text{ms}^{-1}$ και 5.42ms^{-1} για τα δυο ύψη αντίστοιχα.

Λόγω όμως της μεθόδου τοποθέτησης της θέσης του μηχανισμού ρίψης και για διάφορους τεχνικούς λόγους, όπως το μεταβλητό ύψος βάσης ή και η έλλειψη ακρίβειας μέτρησης του ύψους και στήριξης του ακροφύσιου πάνω στον ορθοστάτη, δεν κατέστη δυνατή η μέτρηση του αρχικού ύψους ρίψης με ακρίβεια μεγαλύτερη των $\pm 5\text{cm}$. Επιπλέον, στις κατανομές δεν έχει ληφθεί υπ' όψιν η επίδραση του μεγέθους της σφαίρας, η οποία μειώνει το καθαρό ύψος ρίψης από H σε H-d. Πιο συγκεκριμένα, με βάση το διάγραμμα της ταχύτητας πρόσκρουσης συναρτήσει του καθαρού ύψους ρίψης (Διάγραμμα 3), και για την περίπτωση όπου H=100cm και d=4cm υπάρχει διαφορά στην ταχύτητα πρόσπτωσης από $4,34\text{ms}^{-1}$ σε $4,42\text{ms}^{-1}$, που δεν είναι αμελητέα.

Πίνακας 9 – Επιρροή του ύψους πρόσπτωσης στην ταχύτητα πρόσκρουσης

h_R (cm)	v (ms^{-1})
85	4,08
90	4,20
95	4,31
100	4,42
110	4,64
120	4,85



Εικόνα 36 - σχηματική απεικόνιση της απομείωσης του ύψους ρίψης με την συμπίεση της διαμέτρου της σφαίρας

Στην παρούσα έρευνα εκτελέστηκαν δοκιμές από τρία διαφορετικά αρχικά ύψη προς, τα αποτελέσματα των οποίων ομαδοποιήθηκαν για την διερεύνηση της αξιοπιστίας των μετρήσεων. Τα στατιστικά στοιχεία κάθε ομάδας παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον πίνακα που ακολουθεί όπως προέκυψαν για το σύνολο των δοκιμών της ομάδας (πάνω σειρά) καθώς και μετά την απόρριψη των ακραίων τιμών, σύμφωνα με το κριτήριο (6.4) (κάτω σειρά).

Πίνακας 10 - Στατιστικά στοιχεία δοκιμών

	N	\bar{X}	σ_x	X_{\min}	X_{\max}	Απορριφθείσες δοκιμές
1 ^ο ύψος	176	4,38	0,08	4,02	4,68	11
	165	4,38	0,06	4,24	4,52*	-
2 ^ο ύψος	151	5,57	0,15	5,00	6,03	14
	137	5,57	0,10	5,31	5,83*	-
3 ^ο ύψος	152	4,54	0,15	4,24	5,05	10
	142	4,52	0,12	4,27	4,80*	-

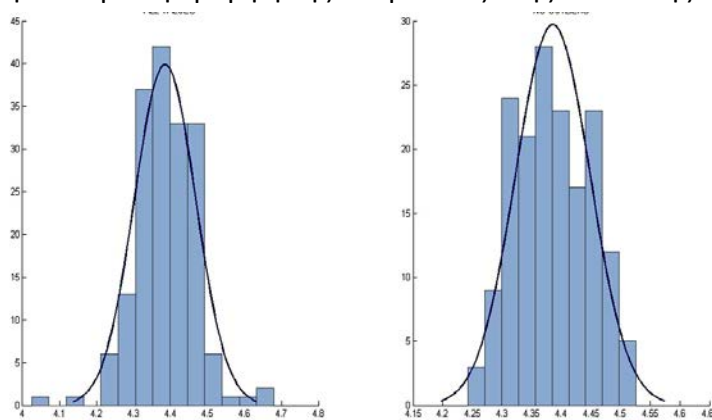
*Μετά την απόρριψη των δοκιμών εκτός του εύρους επιτρεπόμενων τιμών το σχετικό σφάλμα είναι για κάθε σειρά $e_x = \sigma_x / \bar{X}$, που παίρνει τις τιμές 0,013, 0,017 και 0,025 αντίστοιχα.

Θεωρώντας μεταξύ τους ανεξάρτητα τα σφάλματα, τότε το σφάλμα του συντελεστή αναπήδησης (6.5), που ορίζεται ως ο λόγος της ταχύτητας μετά την πρόσκρουση προς αυτήν πριν, προκύπτει από τον νόμο μετάδοσης σφαλμάτων ως:

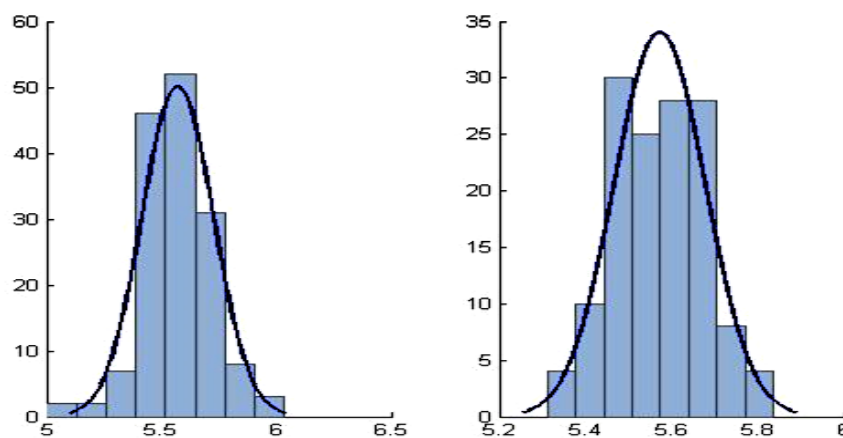
$$e_{COR} \leq \frac{e_{v_l}}{|v_l|} + \frac{e_{v_r}}{|v_r|} \quad (6.5)$$

όπου e_{COR} είναι το σφάλμα του συντελεστή αναπήδησης. Επομένως, από τα παραπάνω δεδομένα προκύπτει ότι η 3^η ομάδα δοκιμών είναι η δυσμενέστερη από άποψη σφάλματος. Έτσι για την περίπτωση αυτή, και θεωρώντας το σχετικό σφάλμα της ταχύτητας αναπήδησης αντίστοιχο, αφού δεν μπορεί να προσδιοριστεί αναλυτικά, τότε για $v_r = 0,5 \cdot v_l$ προκύπτει το σφάλμα του συντελεστή αναπήδησης ίσο με $e_{COR} \leq 0,04$ που είναι αρκετά ικανοποιητικό σε σχέση με την διακύμανση των συντελεστών αναπήδησης που προτείνονται στην βιβλιογραφία (**Error! Reference source not found.**).

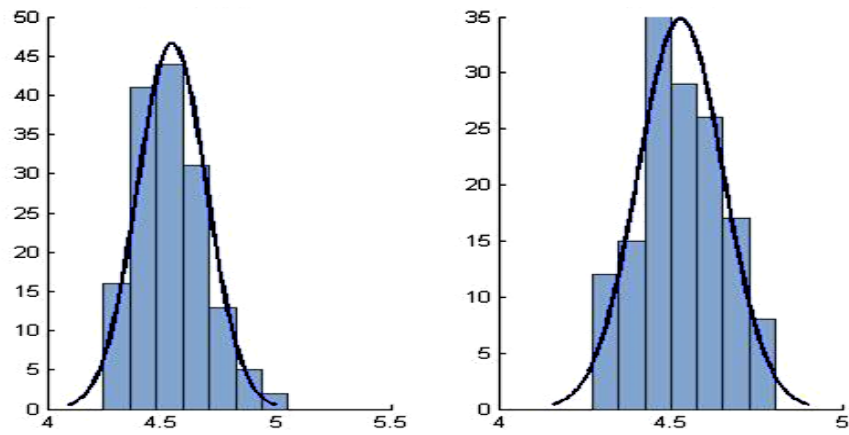
Παρακάτω, παρουσιάζονται μέσω κανονικής κατανομής οι τιμές πριν και έπειτα από την προαναφερθείσα στατιστική επεξεργασία των ταχυτήτων πρόσκρουσης. Αξίζει να αναφερθεί ότι στις αντίστοιχες τιμές μετά την επεξεργασία παρατηρείται ομαλότερη καμπύλη που προσεγγίζει ικανοποιητικότερα την μορφή της «καμπάνας» της κανονικής κατανομής.



Διάγραμμα 4 - Σύγκριση κατανομής των τιμών των ταχυτήτων πρόσκρουσης πριν και μετά την στατιστική επεξεργασία τους κατά την 1η σειρά δοκιμών



Διάγραμμα 5 - Σύγκριση κατανομής των τιμών των ταχυτήτων πρόσκρουσης πριν και μετά την στατιστική επεξεργασία τους κατά την 2η σειρά δοκιμών



Διάγραμμα 6 - Σύγκριση κατανομής των τιμών των ταχυτήτων πρόσκρουσης πριν και μετά την στατιστική επεξεργασία τους κατά την 3η σειρά δοκιμών

6.2. Ενέργεια πρόσκρουσης

Η ενέργεια πρόσκρουσης επηρεάζει σημαντικά τις τιμές του συντελεστή αναπήδησης. Συγκεκριμένα, στην έρευνα των Asteriou et al. (2013a) αναφέρθηκε ότι με την αύξηση της ταχύτητας πρόσκρουσης και της μάζας μειώνεται ο συντελεστής αναπήδησης COR.

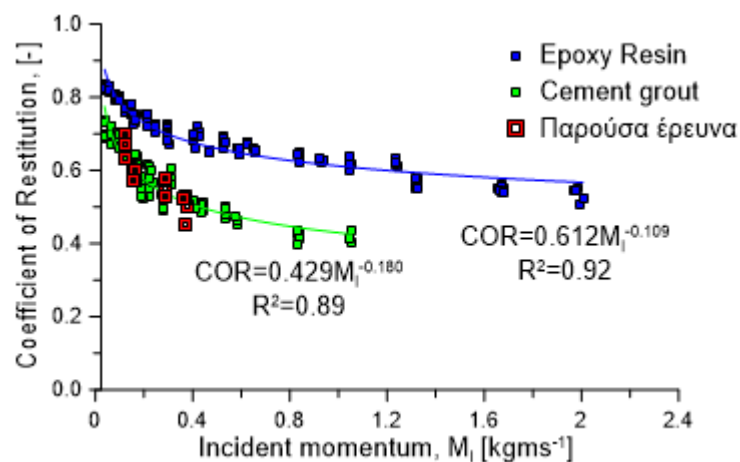
Ως γνωστόν, η ενέργεια πρόσκρουσης εξαρτάται από την μάζα και την ταχύτητα και ισούται με:

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_i^2 \quad (6.6)$$

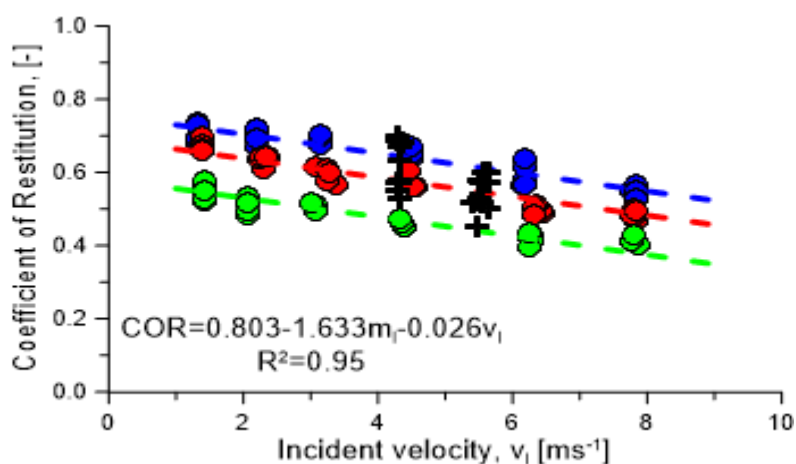
όπου m είναι η μάζα του τεμάχους και v_i η ταχύτητα τη στιγμή της πρόσκρουσης. Λαμβάνοντας υπ' όψιν την παραπάνω σχέση, μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτό ότι ο συντελεστής αναπήδησης μειώνεται με την αύξηση της ενέργειας πρόσπτωσης.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής, χρησιμοποιήθηκε το ίδιο υλικό με αυτό που χρησιμοποιήθηκε στην παραπάνω δημοσίευση (Asteriou et al., 2013a), οπότε και κρίθηκε σκόπιμο να γίνει μια επανάληψη μερικών δοκιμών της, έτσι ώστε να γίνει ο έλεγχος της πειραματικής διάταξης και των ιδιοτήτων του υλικού.

Συγκεκριμένα, διεξήχθησαν 20 δοκιμές σε βάση ίδιου υλικού με αυτό των τεμαχών και χωρίς επικάλυψη εδαφικού υλικού. Για την διενέργεια των δοκιμών αυτών χρησιμοποιήθηκαν ως τεμάχη τα δυο σφαιρικά δοκίμια από ένεμα τσιμεντοειδούς βάσης. Τα δοκίμια αυτά έχουν διάμετρο 3cm και 4 cm και μάζα 28,5gr και 67,2gr αντίστοιχα. Από δυο διαφορετικά αρχικά ύψη δοκιμών, 100 και 150cm, για τις δυο αυτές μάζες, έγιναν 20 δοκιμές (5 για κάθε μάζα, σε κάθε αρχικό ύψος) ώστε να μετρηθούν οι συντελεστές αναπήδησης για ένα εύρος ταχυτήτων και κατά συνέπεια ορμών που όπως απεικονίζεται στο Διάγραμμα 7 και στο Διάγραμμα 8.



Διάγραμμα 7 - Σύγκριση της συσχέτισης της ορμής πρόσκρουσης με τους συντελεστές αναπήδησης Asteriou et al. (2013a) με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας



Διάγραμμα 8 - Σύγκριση της συσχέτισης ταχύτητας πρόσκρουσης με τους συντελεστές αναπήδησης (Asteriou et al., 2013a) με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας

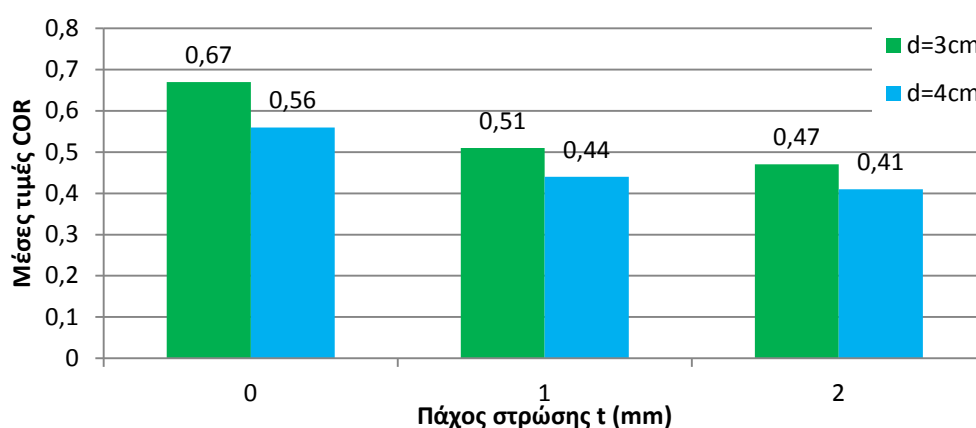
Στα δυο διαγράμματα αυτά διακρίνουμε το αποτέλεσμα της συγκριτικής παρουσίασης των δυο ερευνών. Στο Διάγραμμα 7 με μπλε χρώμα είναι τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε σφαιρικά δοκίμια κατασκευασμένα από ειδική εποξική ρητίνη, με πράσινο αυτά για δοκίμια κατασκευασμένα από τσιμεντένεμα, όπως και της παρούσας διπλωματικής εργασίας που με την σειρά του τα αποτελέσματά της απεικονίζονται με κόκκινο χρώμα. Προκύπτει ότι τα αποτελέσματα μεταξύ των δυο διερευνήσεων ταυτίζονται, γεγονός που προσδίδει αξιοπιστία και επαναληψιμότητα στην πειραματική μέθοδο και την διαδικασία επεξεργασίας.

Στο Διάγραμμα 8 με μπλε χρώμα απεικονίζονται οι μετρήσεις για σφαιρικά δοκίμια διαμέτρου 3cm ενώ με κόκκινο χρώμα τα αποτελέσματα για σφαιρικά δοκίμια διαμέτρου 4cm. Με μαύρο χρώμα είναι οι μετρήσεις και για τις δυο μάζες της παρούσας διπλωματικής. Από το διάγραμμα αυτό φαίνεται, πέραν μιας μέτρησης που μπορεί να θεωρηθεί ως ένα αποδεκτό σφάλμα, ότι και σε αυτήν την περίπτωση τα αποτελέσματα συμπίπτουν απόλυτα.

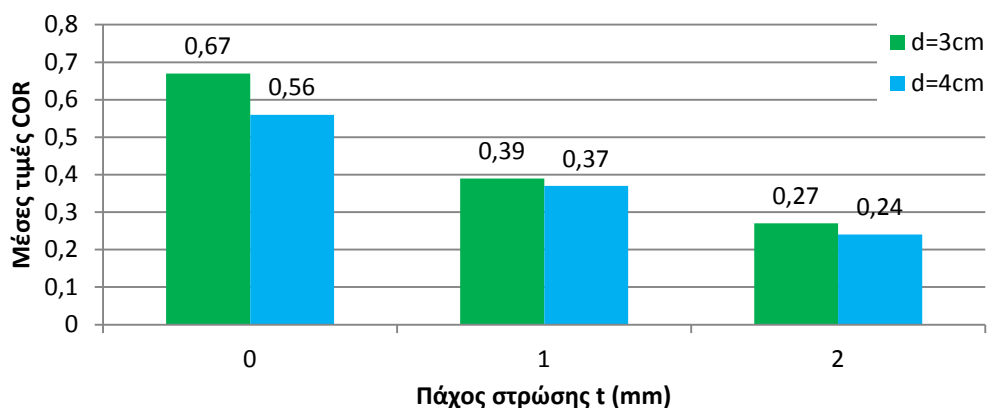
Η απόλυτη ταύτιση των αποτελεσμάτων των δυο πειραματικών διαδικασιών, επαληθεύεται από την υπέρθεση των διαγραμμάτων. Συνεπώς επαληθεύεται το συμπέρασμα της προαναφερθείσας δημοσίευσης, δηλαδή ότι η αύξηση της μάζας και της ταχύτητας και κατά συνέπεια της ορμής και της ενέργειας πρόσπτωσης οδηγεί σε μείωση των τιμών του συντελεστή αναπήδησης. Έτσι, κατά την μελέτη της επίδρασης του υλικού επικάλυψης της βάσης πρέπει να συνεκτιμηθεί και η συνεισφορά της ορμής (ή ενέργειας) πρόσκρουσης. Αυτό επιτυγχάνεται μεταβάλλοντας κατά την εκτέλεση των δοκιμών είτε το ύψος ρίψης είτε την διάμετρο του τεμάχους.

6.3. Επιρροή υλικού επικάλυψης

Για να διερευνηθεί η επιρροή του εδαφικού υλικού που επικαλύπτει την επιφάνεια πρόσπτωσης, διεξήχθησαν αρχικά δοκιμές με αργιλικό και αμμώδες υλικό σε ξηρά κατάσταση, με πάχη της στρώσης 1mm και 2mm από ύψος ρίψης 100cm, χρησιμοποιώντας σφαιρικά δοκίμια διαμέτρου 3 και 4 cm. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε η άργιλος χαμηλής πλαστικότητας (άργιλος 1), που διαστρώθηκε όντας ξηρή και μετά από λειοτρίβηση, δηλαδή χωρίς συσσωματώματα, και η πρότυπη άμμος M31, τα χαρακτηριστικά των οποίων αναφέρονται στο κεφάλαιο 5. Τα αποτελέσματά τους εμφανίζονται ποσοτικά στα παρακάτω διαγράμματα, όπου παρατίθενται και οι τιμές του συντελεστή αναπήδησης απουσία υλικού επικάλυψης.



Διάγραμμα 9 - Επιρροή για επικάλυψη αργίλου με πάχος στρώσης 0, 1 και 2 mm



Διάγραμμα 10 - Επιρροή για επικάλυψη άμμου M31 με πάχος στρώσης 0, 1 και 2 mm

Από τις παραπάνω δοκιμές προέκυψε ότι:

- Με την προσθήκη αργιλικής στρώσης 1mm και 2mm παρατηρήθηκε μείωση του συντελεστή αναπήδησης COR, σε σχέση με την τιμή αναφοράς (δηλαδή αυτήν χωρίς

υλικό), κατά 24% και 30% αντίστοιχα για την σφαίρα των 3cm, ενώ για την μεγαλύτερη σφαίρα (διαμέτρου 4cm) η μείωση προέκυψε 22% και 27% αντίστοιχα.

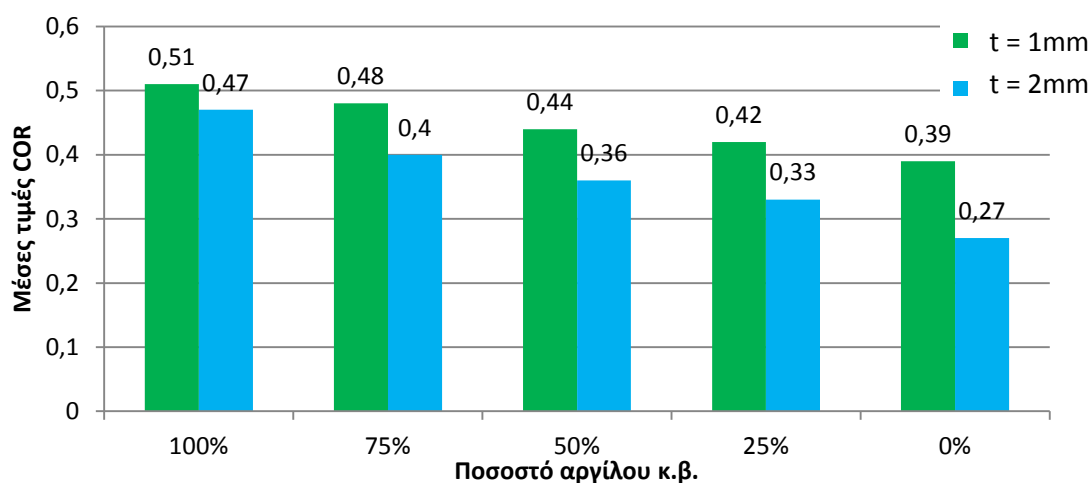
- Με την αύξηση της ορμής η μείωση του συντελεστή αναπήδησης για κάθε πάχος υλικού επικάλυψης είναι μικρότερη σε σχέση με αυτήν των τιμών αναφοράς. Αυτό μπορεί να αιτιολογηθεί σύμφωνα με την συσχέτιση του συντελεστή αναπήδησης με την ορμή πρόσκρουσης (Asteriou et al., 2013a), αφού ο ρυθμός μεταβολής μειώνεται με την υποβάθμιση των ιδιοτήτων του υλικού. Είναι προφανές ότι με την προσθήκη υλικού στην βάση και μετέπειτα με την αύξηση του πάχους του, προκύπτει υποβάθμιση των ιδιοτήτων του υλικού της βάσης.
- Αντίστοιχα, και με την προσθήκη της άμμου M31 προκύπτει ότι αύξηση του πάχους στρώσης προκαλεί μείωση των τιμών του συντελεστή αναπήδησης (COR).
- Επίσης, η αύξηση της ορμής πριν την πρόσκρουση του τεμάχους στην επιφάνεια προκαλεί και εκείνη με την σειρά της μείωση του συντελεστή αναπήδησης (COR).
- Τέλος, η μείωση του συντελεστή αναπήδησης για την πρόσκρουση σε επιφάνεια καλυμμένη με άμμο είναι σαφώς μεγαλύτερη από αυτήν για επιφάνεια καλυμμένη με άργιλο ίδιου πάχους επικάλυψης. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να ερμηνευτεί ως αποτέλεσμα της δομής του εκάστοτε υλικού. Για παράδειγμα, η άμμος αποτελείται από αρκετά πιο χονδρούς κόκκους σε σχέση με την άργιλο. Έτσι η διάταξη του εδαφικού σκελετού είναι αραιότερη αφού τα κενά μεταξύ των κόκκων είναι μεγαλύτερα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο εδαφικός σκελετός να είναι ασθενέστερος αφού οι αναπτυσσόμενες τριβές μεταξύ των κόκκων που ανθίστανται στην διείδυση είναι λιγότερες, και κατ' επέκταση η παραμόρφωση της στρώσης επικάλυψης να είναι μεγαλύτερη. Συνεπώς η απόσβεση ενέργειας είναι περισσότερη και άρα η τιμή του συντελεστή αναπήδησης μικρότερη. Στο συμπέρασμα αυτό συνηγορεί και η μακροσκοπική παρατήρηση του αποτυπώματος του σημείου πρόσκρουσης κατά την εκτέλεση των δοκιμών, το οποίο ήταν μεγαλύτερο για την περίπτωση της άμμου από ότι για την στρώση αργίλου.

Η τελευταία παρατήρηση διατυπώθηκε, σε διδακτορική διατριβή (Heidenreich, 2004) με θέμα την επιρροή στρώματος άμμου στις τιμές των συντελεστών αναπήδησης. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι όσο αυξάνει η συμπίκνωση (compaction) του εδάφους, τόσο μειώνεται το βάθος διείδυσης στο υλικό, και κατά συνέπεια υπάρχει μείωση της πλαστικής παραμόρφωσης της στρώσης επικάλυψης και της απώλειας ενέργειας, που συνεπάγεται αύξηση του συντελεστή αναπήδησης. Επομένως, μπορεί εύκολα να διαπιστωθεί ότι οι δυο έρευνες συγκλίνουν στο ίδιο συμπέρασμα, καθώς συγκριτικά η άμμος είναι λιγότερο συμπακνωμένη κατά την απόθεσή της από την άργιλο, λόγω των μεγάλων κενών μεταξύ των κόκκων της πρώτης σε σχέση με την δεύτερη και κατά συνέπεια, πρόσκρουση τεμάχους σε άμμο μπορεί να δώσει μικρότερο συντελεστή αναπήδησης από ότι σε ομοίου πάχους στρώσης επιφάνεια, καλυμμένη με άργιλο.

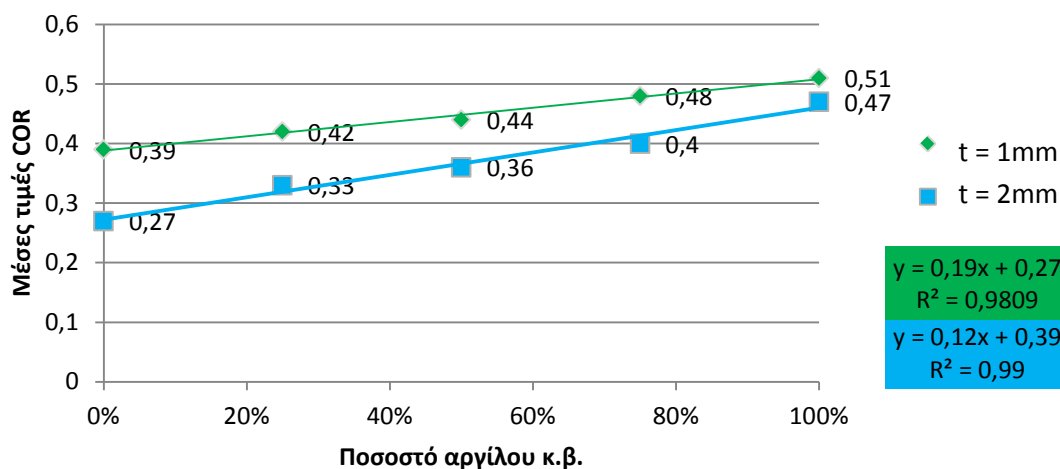
6.4. Επίρροή σύστασης υλικού επικάλυψης

Πρόσθετα των ανωτέρω, και αφού διαπιστώθηκε διαφορετική συμπεριφορά μεταξύ των δύο υλικών, κρίθηκε σκόπιμο να διερευνηθεί η συμπεριφορά εδαφικής στρώσης με μεικτή σύσταση. Η περίπτωση αυτή θεωρείται πιο αντιπροσωπευτική για την περιγραφή των κορημάτων, τα οποία απαντώνται συχνά σε περιπτώσεις καταπτώσεων.

Έτσι, διενεργήθηκε μια σειρά δοκιμών με ξηρό μείγμα αποτελούμενο από άμμο Μ31 και άργιλο χαμηλής πλαστικότητας, μεταβάλλοντας την κατά βάρος περιεκτικότητα των δυο συστατικών. Οι δοκιμές έγιναν για πάχη στρώσεων 1mm και 2mm με σφαιρικά δοκίμια διαμέτρου 3 cm. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν 30 δοκιμές σε βάσεις πρόσπτωσης με πάχος στρώσης επικάλυψης 1 και 2mm, 15 ρίψεις σε κάθε μια και για ποσοστά κατά βάρος 75% αργίλου- 25% άμμου, 50% αργίλου- 50% άμμου και 25% αργίλου- 75% άμμου, με 10 ρίψεις για κάθε συνδυασμό, από 5 σε κάθε βάση.



Διάγραμμα 11 - Επίδραση του ποσοστού άμμου σε μείγμα με άργιλο σε ξηρά κατάσταση για πάχη επικάλυψης 1 και 2 mm



Διάγραμμα 12 - Επίδραση του ποσοστού αργίλου σε μείγμα με άμμο, σε ξηρά κατάσταση, για πάχη επικάλυψης 1 και 2 mm

Στα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται ότι η αύξηση του ποσοστού της άμμου μειώνει τις αντίστοιχες τιμές του συντελεστή αναπήδησης (COR) και η μείωση αυτή περιγράφεται μέσα από τις γραμμικές σχέσεις που δίνονται στο 0, $\gamma=0,188x+0,272$ και $\gamma=0,12x+0,388$, όπου γ ο συντελεστής αναπήδησης (COR) και x το ποσοστό της αργίλου επί τις 100. Πολύ σημαντικό είναι ότι σε αυτές τις σχέσεις παρατηρείται εξαιρετική γραμμική συσχέτιση μεταξύ των μεγεθών ποσοστού αργίλου- άμμου και του συντελεστή αναπήδησης (COR), δηλαδή $R^2=0,98$ για $t=2\text{mm}$ και $R^2=0,99$ για $t=1\text{mm}$.

Σύμφωνα με τις μέσες τιμές των δοκιμών αυτής της σειράς ρίψεων, προέκυψε μια γραμμική σχέση που δίνει την τιμή του συντελεστή αναπήδησης (COR) συναρτήσεως του ποσοστού αργίλου και του πάχους της στρώσης του υλικού επίστρωσης, η οποία είναι η:

$$COR = 0,453 + 0,154 \cdot \frac{\text{clay \%}}{100} - 0,082 \cdot t \quad (6.7)$$

Η σχέση αυτή, προέκυψε με τη μέθοδο της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης (multiple linear regression), βάσει της οποίας περιγράφεται η επιρροή στην τιμή μιας εξαρτημένης μεταβλητής (στην περίπτωση αυτή του συντελεστή αναπήδησης), από δύο ή περισσότερες ανεξάρτητες μεταβλητές μέσω μιας γραμμικής σχέσης. Στην προκειμένη περίπτωση οι ανεξάρτητες μεταβλητές είναι το ποσοστό της αργίλου και το πάχος της στρώσης. Μέσω αυτής της σχέσης επαληθεύεται αυτό που φαίνεται και ποσοτικά από τα διαγράμματα δηλαδή ότι όσο αυξάνει το ποσοστό της αργίλου αυξάνει και η τιμή του συντελεστή αναπήδησης λόγω του θετικού πρόσημου στον πολλαπλασιαστή, και αντίστοιχα ότι η αύξηση του πάχους της στρώσης επικάλυψης με εδαφικό υλικό μειώνει το συντελεστή αναπήδησης, που γίνεται ομοίως αντιληπτό από το αρνητικό πρόσημο στον πολλαπλασιαστή της μεταβλητής του πάχους.

Όσον αφορά στην σχέση (6.7), η συσχέτιση μεταξύ των μεγεθών της είναι στατιστικά σημαντική, αφού ο συντελεστής συσχέτισης R^2 ισούται με 0,96 και το αντίστοιχο τυπικό σφάλμα $e_{COR}=0,0167$ που είναι αρκετά ικανοποιητικό σε σχέση με την ακρίβεια που συνήθως επιτυγχάνεται σε αντίστοιχες δημοσιευμένες σχέσεις. Επιπλέον, οι τιμές που προκύπτουν για τον p -value είναι αρκετά ικανοποιητικές, δηλαδή $1,76 \times 10^{-5}$ για την μεταβλητή που χαρακτηρίζει το ποσοστό αργίλου και $1,1 \times 10^{-4}$ για την μεταβλητή που περιγράφει το πάχος της στρώσης. Οι τιμές αυτές είναι πολύ μικρότερες της τιμής 0,05 που αποτελεί το άνω όριο για την θεώρηση επίτευξης στατιστικής σημαντικότητας της κάθε μεταβλητής. Επομένως, οι ανεξάρτητες μεταβλητές αυτές έχουν μεγάλη στατιστική σημαντικότητα (statistical significance) στη γραμμική αυτή συσχέτιση ως προς την επιρροή τους στην εξαρτημένη

μεταβλητή του συντελεστή αναπήδησης, που σημαίνει ότι η σχέση αυτή είναι αρκετά ακριβής στην περιγραφή του φαινομένου.

Ο συντελεστής p σχετίζεται με τη στατιστική σημαντικότητα μιας ανεξάρτητης μεταβλητής σε μια γραμμική σχέση, δείχνει δηλαδή το κατά πόσο επηρεάζει ή όχι το αποτέλεσμα μιας εξαρτημένης από αυτή μεταβλητής, σε μια σχέση με δυο ή παραπάνω ανεξάρτητες μεταβλητές. Πιο συγκεκριμένα, για μια ανεξάρτητη μεταβλητή, εάν η τιμή p που της αντιστοιχεί είναι μικρότερη του 0,05 σημαίνει ότι επηρεάζει σημαντικά την εξαρτημένη, ενώ εάν είναι μεγαλύτερη του 0,01 δεν έχει καμία επιρροή πάνω της. Τα όρια στατιστικής σημαντικότητας για τον συντελεστή p δίνονται παρακάτω:

$p \leq 0,01$	πολύ ισχυρή στατιστική σημαντικότητα
$0,01 < p \leq 0,05$	ισχυρή στατιστική σημαντικότητα
$0,05 < p \leq 0,1$	χαμηλή στατιστική σημαντικότητα
$p > 0,1$	καθόλου στατιστική σημαντικότητα

Σε περίπτωση που αντί για τις μέσες τιμές των μετρήσεων, για κάθε διαφορετική σειρά δοκιμών, χρησιμοποιηθούν αυτούσιες οι τιμές κάθε δοκιμής, η προηγούμενη σχέση αλλάζει ως εξής:

$$COR = 0,473 + 0,140 \cdot \frac{clay \%}{100} - 0,091 \cdot t \quad (6.8)$$

Στη σχέση αυτή παρατηρείται ότι έχει αυξηθεί η αρχική τιμή του συντελεστή αναπήδησης που θα προέκυπτε για μηδενική υγρασία και μηδενικό πάχος στρώσης από 0,453 σε 0,473 και ταυτόχρονα έχει μειωθεί ο αυξητικός συντελεστής για την επιρροή του ποσοστού της αργίλου από 0,154 σε 0,140 και ο μειωτικός συντελεστής του πάχους από -0,082 σε -0,091. Παρ' όλα αυτά, οι αλλαγές αυτές είναι πολύ μικρές και δεν μπορούν να θεωρηθούν σημαντικές, ενώ αντίθετα, πολύ σημαντικό μπορεί να θεωρηθεί το ότι δεν αλλάζει το πρόσημο των συντελεστών και επομένως μια μεταβλητή δεν έχει ποιοτική αναντιστοιχία σε σχέση με πριν.

Μεγάλη διαφορά όμως παρατηρείται στα στατιστικά χαρακτηριστικά της γραμμικής αυτής παλινδρόμησης, καθώς η συσχέτιση μεταξύ των μεγεθών της μειώνεται σημαντικά, δηλαδή $R^2=0,750$ και το τυπικό σφάλμα αυξάνεται σε $e_{COR}=0,040$. Έτσι, παρατηρείται ότι χρησιμοποιώντας τα δεδομένα χωρίς κάποια ιδιαίτερη στατιστική επεξεργασία, αυτομάτως μειώνεται και η αξιοπιστία της συσχέτισης των μεγεθών που εξετάζονται όπως και είναι φυσικό επακόλουθο.

Όσον αναφορά τους p-values, για κάθε ανεξάρτητη μεταβλητή βρέθηκε ότι είναι $4,76 \times 10^{-11}$ και $1,1 \times 10^{-9}$ για το ποσοστό της αργίλου (%) και για το πάχος της στρώσης επικάλυψης αντίστοιχα, που συγκριτικά με τα δεδομένα που έχουν παρουσιαστεί παραπάνω γίνεται φανερό ότι έχουν ιδιαίτερα σημαντική επιρροή στην διαμόρφωση της τιμής του συντελεστή αναπήδησης.

6.5. Αργιλικό υλικό στο όριο υδαρότητας

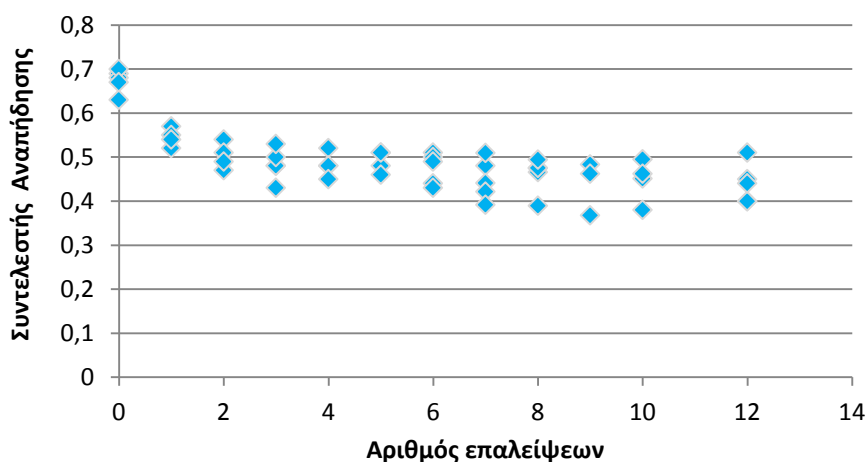
Για την παρούσα διπλωματική εργασία, διενεργήθηκε επιπλέον μια σειρά δοκιμών με το αργιλικό υλικό χαμηλής πλαστικότητας (άργιλος 1) στο όριο υδαρότητας και μεταβλητού πάχους στρώσεων. Σκοπός αυτής της σειράς δοκιμών ήταν να διερευνηθεί η επιρροή της σταδιακής αύξησης του πάχους στρώσης υδαρούς αργιλικού υλικού.

Στη σειρά αυτή των δοκιμών εκτελέστηκαν 55 ρίψεις με το σφαιρικό δοκίμιο διαμέτρου 3cm από αρχικό ύψος 150cm. Η διαδικασία διαμόρφωσης της βάσης πρόσκρουσης είχε ως εξής:

- Αρχικά, δημιουργήθηκε ένα μείγμα αργίλου και νερού αρκετά υδαρό, ώστε να μπορεί στην συνέχεια να επαλειφθεί με πινέλο πάνω στην επιφάνεια πρόσπτωσης. Στη συνέχεια, το μείγμα επαλειφόταν με πινέλο πάνω στην επιφάνεια ρίψης, και ταυτόχρονα, σε δεύτερη βάση ίδιου υλικού, με τον ίδιο τρόπο που γινόταν και στην πρώτη, με σκοπό να μετρηθεί λεπτομερώς το πάχος της στρώσης. Η μέτρηση του πάχους έγινε με ηλεκτρονικό παχύμετρο ακριβείας $\pm 0,01\text{mm}$.
- Στη συνέχεια, η βάση έπαιρνε την θέση της στην πειραματική διάταξη και πραγματοποιούνταν οι ρίψεις, με την γνωστή διαδικασία.
- Τέλος, η διαδικασία επαναλαμβανόταν ώστε να αυξηθεί το συνολικό πάχος της στρώσης.

Αυτή η μέθοδος εφαρμογής της αργίλου είχε ως σκοπό το πάχος της στρώσης να αυξάνεται σταδιακά κατά μικρό ποσοστό, έτσι ώστε να μελετηθεί η επιρροή του πάχους της αργίλου στον συντελεστή αναπήδησης για μικρή μεταβολή του πάχους επικάλυψης.

Παρακάτω παρατίθεται το διάγραμμα του συντελεστή αναπήδησης σε συνάρτηση με τον αριθμό των επαλείψεων.



Διάγραμμα 13 - συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει του αριθμού των επαλείψεων

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι με την αύξηση του πάχους στρώσης μειώνεται και ο συντελεστής αναπήδησης. Μετά όμως από τη τρίτη ουσιαστικά επάλειψη, ο κλάδος του γίνεται πρακτικά οριζόντιος, που σημαίνει ότι δεν υπάρχει επίδραση των επιπλέον στρώσεων στο συντελεστή αναπήδησης. Οι τιμές που εμφανίζονται για μηδενική στρώση είναι αυτές που έγιναν σε κενή από εδαφικό υλικό βάση για ύψος 150cm.

Η εξήγηση για το φαινόμενο αυτό δίνεται από μια παρατήρηση που έγινε κατά την εκτέλεση της πειραματικής διαδικασίας. Κατά τη μέτρηση του πάχους στρώσης, αν και στις τρεις πρώτες επαλείψεις υπήρχε μια σταθερή αύξηση του πάχους κατά περίπου 0,07mm, έπειτα από την τέταρτη επάλειψη οι τιμές που λαμβάνονταν δεν προέκυπταν μεγαλύτερες από τις προηγούμενες ενώ είχαν και πολύ μεγάλη απόκλιση μεταξύ τους και έτσι το πάχος δεν μπορούσε να μετρηθεί με αξιοπιστία. Παρ' όλα αυτά, η πειραματική διαδικασία συνεχίστηκε και ολοκληρώθηκε.

Αυτό το γεγονός δεν θεωρείται ότι επηρεάζεται από την συμπεριφορά του υλικού, αλλά από τον τρόπο με τον οποίο έγινε η πειραματική διαδικασία. Συγκεκριμένα, η επάλειψη με υγρό αργιλικό υλικό δεν ήταν επιτυχής με την έννοια ότι η επάλειψη με το αργιλικό υλικό από ένα σημείο και μετά δεν είχε προσθετική επίδραση στην στρώση, αφού το υλικό παρασυρόταν από τη διαδικασία.

6.6. Επίστρωση υλικού με ξήρανση

Σε παρόμοια βάση με τη δοκιμή της προηγούμενης ενότητας, διενεργήθηκαν δυο ακόμα σειρές δοκιμών με το αργιλικό υλικό χαμηλής πλαστικότητας (άργιλος 1), το οποίο αρχικά διαστρωνόταν μέσω της αντίστοιχης διαδικασίας επάλειψης που παρουσιάστηκε παραπάνω, όμως στη συνέχεια ξεραινόταν η κάθε στρώση. Μέτα την ξήρανση της στρώσης, η κάθε νέα εφαρμογή στρώσης ήταν επιτυχής, αυξάνοντας το συνολικό πάχος με το επιθυμητό βήμα.

Σκοπός αυτών των δυο σειρών δοκιμών ήταν να διερευνηθεί, αντίστοιχα με πριν, η επιρροή της σταδιακής αύξησης του πάχους στρώσης στις τιμές του συντελεστή αναπήδησης, αλλά για ξηρό υλικό.

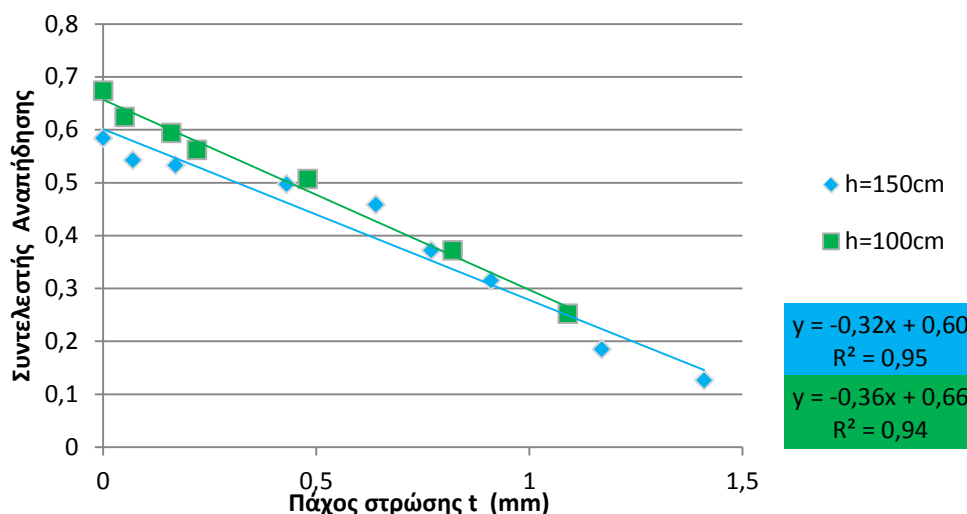
Κατά τη διαδικασία αυτή διενεργήθηκαν δυο σειρές δοκιμών, μια από αρχικό ύψος 100cm κατά την οποία έγιναν 30 ρίψεις και μια από αρχικό ύψος 150cm κατά την οποία έγιναν 40 τον αριθμό ρίψεις, ενώ χρησιμοποιήθηκε ως δοκίμιο το σφαιρικό τεμάχιο διαμέτρου 3cm.

Το εύρος του πάχους στρώσης διαμορφώθηκε μέσω της διαδικασίας που ακολουθήθηκε από 0,05mm έως 1,40mm.

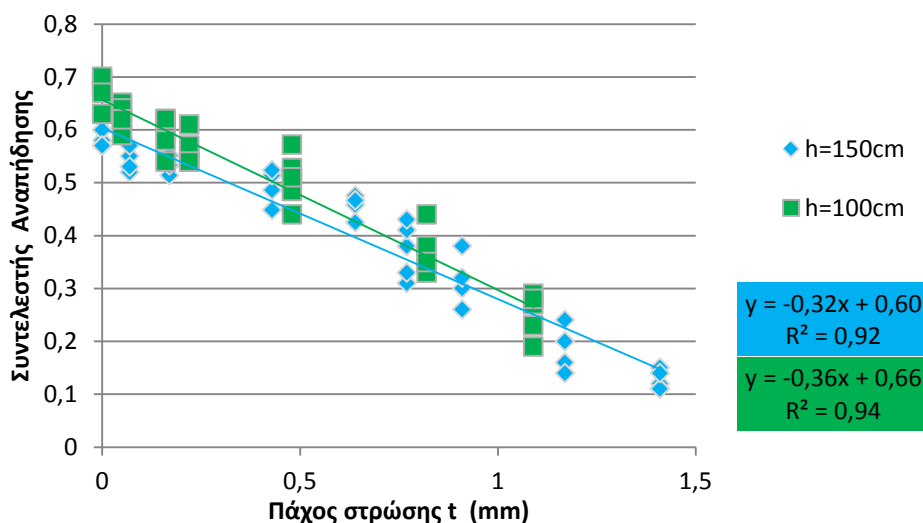
Η πειραματική ακολουθία για αυτές τις δύο σειρές δοκιμών είχε ως εξής:

- Αρχικά, γινόταν ρύθμιση του αρχικού ύψους πτώσης του σφαιρικού τεμάχους μέσω του ειδικά διαμορφωμένου ορθοστάτη.
- Στην συνέχεια, δημιουργήθηκε ένα μείγμα αργίλου με προσθήκη νερού, το οποίο ήταν υδαρό έτσι ώστε να είναι αρκετά εργάσιμο για την επάλειψη. Έπειτα από κάθε επάλειψη, το υλικό ξεραινόταν με τη χρήση αέρα, λεπτομέρειες για το οποίο δίνονται στο κεφάλαιο της εργαστηριακής δοκιμής.
- Στη συνέχεια, γινόταν η μέτρηση του πάχους με την διάστρωση και την ξήρανση του υλικού σε άλλη βάση, με όμοια διαδικασία όπως και στην αρχική, και με τη χρήση ηλεκτρονικού παχύμετρου.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα που προέκυψαν κατά την εκτέλεση των δοκιμών.



Διάγραμμα 14 - μέσες τιμές συντελεστών αναπήδησης συναρτήσει του πάχους στρώσης της επιφάνειας, για δύο αρχικά ύψη ρίψεως



Διάγραμμα 15 - όλες οι τιμές των συντελεστών αναπήδησης συναρτήσει του πάχους στρώσης της επιφάνειας, για δύο αρχικά ύψη ρίψεως

Είναι εμφανές από αυτά τα δυο διαγράμματα, ότι η αύξηση του πάχους στρώσης της επιφάνειας πρόσπτωσης οδηγεί σε μείωση του συντελεστή αναπήδησης.

Η επόμενη παρατήρηση, έγκειται στην αλλαγή του αρχικού ύψους ρίψης και στην επιρροή του στο συντελεστή αναπήδησης. Παρατηρείται και στα δυο παραπάνω διαγράμματα ότι τα μπλε σημεία που αντιστοιχούν σε ύψος 150cm βρίσκονται χαμηλότερα από τα αντίστοιχα κόκκινα που αντιστοιχούν σε ύψος 100cm για τα ίδια πάχη επικάλυψης. Επομένως, το ασφαλές συμπέρασμα που μπορεί να ληφθεί από αυτές τις παρατηρήσεις είναι ότι η αύξηση του αρχικού ύψους ρίψης και κατ' επέκταση η αύξηση της ορμής ακριβώς πριν την πρόσκρουση

(σύμφωνα με αυτά που αναφέρθηκαν και στην ενότητα που ασχολείται με την αξιοπιστία των μετρήσεων), επιφέρει μείωση του συντελεστή αναπήδησης (COR).

Σε μια δεύτερη ανάγνωση των δεδομένων των παραπάνω διαγραμμάτων, και καταρτίζοντας τις συσχετίσεις παρατηρείται μια γραμμική σχέση του συντελεστή αναπήδησης με το πάχος της στρώσης. Παρατηρείται ότι οι συσχετίσεις μεταξύ των δύο μεταβλητών του διαγράμματος είναι πολύ καλές. Συγκεκριμένα για τις μέσες τιμές των συντελεστών είναι $R^2=0,937$ για το ύψος των 100cm και $R^2=0,956$ για το ύψος των 150cm και για όλες τις τιμές που λήφθηκαν από τις μετρήσεις χωρίς στατιστική επεξεργασία είναι $R^2=0,937$ για το ύψος των 100cm και $R^2=0,924$ για το ύψος των 150cm. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τιμές για μηδενικό πάχος στρώσης είναι αυτές που διεξήχθησαν σε κενή βάση και αναφέρθηκαν στην αρχή του κεφαλαίου.

Με βάση αυτά τα παραπάνω δεδομένα και με την χρήση της μεθόδου της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης προκύπτει μια σχέση που περιγράφει την εξάρτηση του συντελεστή αναπήδησης από τον συνδυασμό και των δυο ανεξάρτητων μεταβλητών που φαίνονται στα διαγράμματα, δηλαδή του πάχους στρώσης και της αναπτυσσόμενης ορμής πριν την κρούση ($m \cdot v$). Η σχέση αυτή προκύπτει ως εξής:

$$COR = 0,800 - 0,336 \cdot t - 1,186(m \cdot v) \quad (6.9)$$

Η σχέση αυτή δίνει μια γραμμική μεταβολή του συντελεστή αναπήδησης σε σχέση με το πάχος της στρώσης της επιφάνειας πρόσπτωσης και την ορμή πριν την πρόσκρουση. Από την σχέση αυτή επιβεβαιώνονται όλα αυτά που συμπεραίνονταν οπτικά και από τα διαγράμματα, δηλαδή ότι ο συντελεστής αναπήδησης μειώνεται με την αύξηση της ορμής και του πάχους της στρώσης.

Για την σχέση αυτή προέκυψε συντελεστής συσχέτισης $R^2=0,936$, που είναι αρκετά καλός, τυπικό σφάλμα $e_{COR}=0,041$ που είναι ανεκτό, ενώ οι αντίστοιχες τιμές του συντελεστή ρ , που δείχνουν την σημαντικότητα των ανεξάρτητων μεταβλητών στην διαμόρφωση της τιμής του συντελεστή μέσω αυτής της σχέσης, είναι $3,55 \times 10^{-43}$ και $3,4 \times 10^{-4}$ για το πάχος της στρώσης και την ορμή πρόσκρουσης αντίστοιχα που είναι πολύ μικρότερες του ορίου σημαντικότητας και επομένως τον επηρεάζουν αρκετά.

Εξετάζοντας όμως την χρησιμότητα αυτής της σχέσης παρατηρείται το εξής παράδοξο. Θέτοντας όπου $t=0\text{mm}$, παρατηρείται ότι για ταχύτητα $4,4\text{ms}^{-1}$, που αντιστοιχεί στην ελεύθερη πτώση από ύψος 100cm, για μάζες μεγαλύτερες των 100gr ο συντελεστής αναπήδησης προκύπτει αρνητικός. Επομένως, η σχέση είναι αρκετά καλή για τις δεδομένες συνθήκες της παρούσας εργαστηριακής διερεύνησης, αλλά δεν μπορεί να εφαρμοστεί για διαφορετικές συνθήκες, όπως μεγαλύτερες μάζες τεμαχίων.

Η σχέση αυτή θα πρέπει να και γίνει συμβατή με βάση την κλίμακα. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί ορίζοντας μια αδιάστατη παράμετρο μεταξύ του πάχους της στρώσης να και της διαμέτρου της σφαίρας, της μορφής:

$$\frac{t}{d_{\text{σφαίρας}}}$$

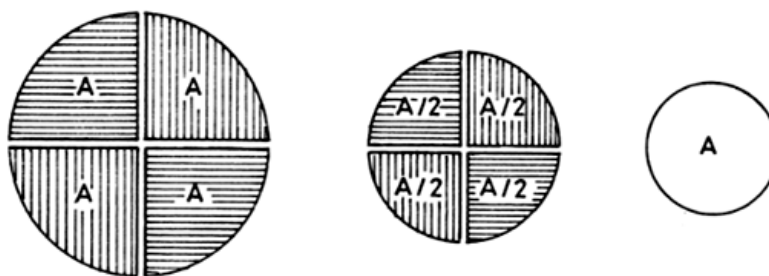
Επιπλέον, θεωρώντας $t=0\text{mm}$ προκύπτει μια γραμμική συσχέτιση μεταξύ του συντελεστή αναπήδησης και της ορμής πριν την πρόσκρουση και κατ' επέκταση του ύψους ρίψης. Όμως, με βάση την συσχέτιση ορμής πρόσκρουσης και συντελεστών αναπήδησης των (Asteriou et al., 2013a), αυτή η σχέση θα έπρεπε να προκύπτει ασυμπτωτική και όχι γραμμική. Στην παρούσα εργασία έγιναν ρίψεις από δυο διαφορετικά ύψη. Επομένως, λόγω της έλλειψης περισσότερων σημείων, εμφανίζεται μια αδυναμία σχηματισμού ασυμπτωτικής σχέσης, καθώς δυο σημεία δεν περιέχουν αρκετά δεδομένα παρά μόνον για να σχηματίσουν μια ευθεία γραμμή.

6.7. Επιρροή υλικού με περιεχομένη υγρασία

Κατά την σειρά αυτή των δοκιμών διενεργήθηκαν 72 συνολικά ρίψεις με τη χρησιμοποίηση του σφαιρικού τεμαχίου διαμέτρου 3cm. Η σειρά δοκιμών αυτή περιλάμβανε ρίψεις με ελεύθερη πτώση, όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, από ύψος 100cm, αλλά σε ειδικά διαμορφωμένη επιφάνεια, με εδαφικό υλικό αποτελούμενο από μίγμα της αργίλου χαμηλής πλαστικότητας και δυο πρότυπων ειδών άμμου, της M34 (ή Longstone) και της M31. Οι ιδιότητες των υλικών αυτών αναφέρονται στο κεφάλαιο με τις πληροφορίες για τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν (κεφάλαιο 5). Η διαφορά της σειράς αυτής των δοκιμών συγκριτικά με αυτήν που περιγράφηκε στην ενότητα 6.4. έγκειται στο γεγονός ότι το υλικό σε αυτήν την περίπτωση έχει διαστρωθεί περιέχοντας νερό. Έτσι υπεισέρχεται και η επίδραση της υγρασίας και της συνοχής της αργίλου.

Η διαδικασία διάστρωσης του ήταν σχετικά απλή.

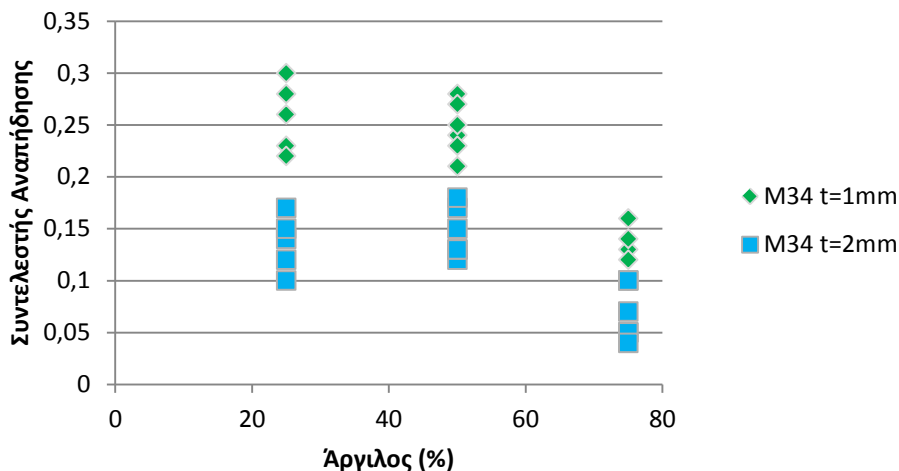
- Αρχικά σε ένα δοχείο αναμιγνύονται τα επιθυμητά ποσοστά κατά βάρος από άργιλο και άμμο. Συγκεκριμένα τα ποσοστά που εξετάστηκαν ήταν 75% άμμος -25% άργιλος, 50% άμμος -50% άργιλος και 25% άμμος -75% άργιλος.
- Στην συνέχεια, κάθε δείγμα ανακατεύτηκε καλά έτσι ώστε να δημιουργηθεί ομοιόμορφο υλικό και επιλέχθηκαν τα τμήματα που διαστρώθηκαν στις βάσεις από κάθε μίξη των υλικών με την μέθοδο του τετραμερισμού, έτσι ώστε να είναι αντιπροσωπευτικά της μέσης κατάστασης του μείγματος.



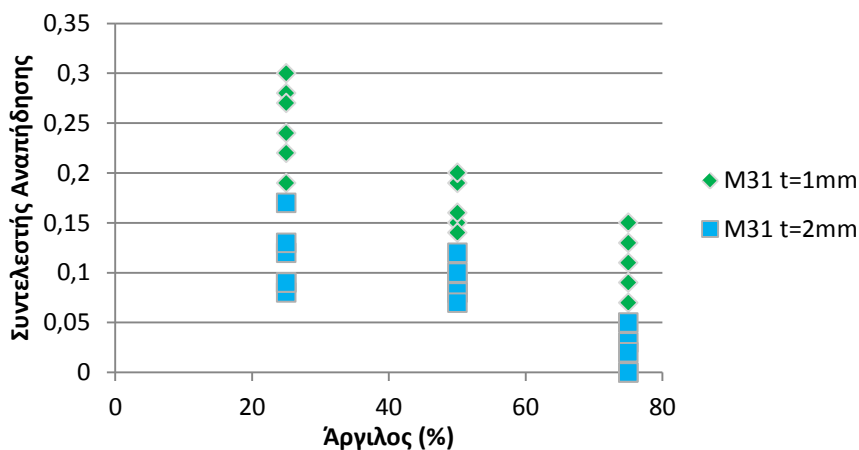
Εικόνα 37 - Σχηματική παρουσίαση της διαδικασίας του τεταρτομερισμού

- Στην συνέχεια, το μείγμα ανακατεύτηκε με μικρή ποσότητα νερού έτσι ώστε να γίνει πλάστιμο και εργάσιμο και να μπορεί να διαστρωθεί με το χέρι.
- Τέλος, διαστρώθηκε στις ειδικές βάσεις με εσοχές 1mm και 2mm αντίστοιχα και στην συνέχεια οι βάσεις αφέθηκαν για μια με δύο ώρες στον χώρο του εργαστηρίου έτσι ώστε να μειωθεί η περιεχόμενη υγρασία του υλικού και να μπορέσουν να εκτελεστούν οι δοκιμές.

Παρακάτω, ακολουθούν τα διαγράμματα συντελεστή αναπήδησης και ποσοστού άμμου στο εδαφικό μείγμα που απεικονίζουν τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών. Συγκεκριμένα διεξήχθησαν 36 δοκιμές με τις αναλογίες που αναφέρθηκαν στην διαδικασία διάστρωσης για μείγματα αργλικού υλικού και άμμου Longstone (M34) και 36 δοκιμές για μείγματα αργλικού υλικού και άμμου M31.



Διάγραμμα 16 - Συντελεστές αναπήδησης για διάφορα ποσοστά άμμου τύπου M34 στο μείγμα



Διάγραμμα 17 - Συντελεστές αναπήδησης για διάφορα ποσοστά άμμου M31 στο μείγμα

Με μια πρώτη ανάγνωση των διαγραμμάτων, φαίνεται ότι η αύξηση του ποσοστού της αργίλου οδηγεί σε μείωση του συντελεστή αναπήδησης. Η διαπίστωση αυτή θα έπρεπε να επαληθεύει το αντίστοιχο συμπέρασμα που προέκυψε στην ενότητα των αργλικών υλικών με προσμίξεις άμμου χωρίς υγρασία, αλλά παρ' όλα αυτά δείχνει το αντίθετο. Επιπλέον, όπως ισχύει και σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν παραπάνω, η αύξηση του πάχους της στρώσης επικάλυψης οδηγεί σε μείωση των τιμών του συντελεστή αναπήδησης.

Αυτό που επίσης φαίνεται αμέσως από τα δυο διαγράμματα, είναι ότι η προσθήκη άμμου M31, σε ίδια ποσοστά, επιδρά πιο σημαντικά στην απομείωση των συντελεστών αναπήδησης σε σχέση με την προσθήκη της Longstone (M34). Αυτό μπορεί να εξηγηθεί ως εξής: η Longstone (M34) είναι μια πιο λεπτόκοκκη άμμος σε σχέση με την M31. Αυτό συνεπάγεται ότι σε συνδυασμό με την άργιλο σχηματίζουν ένα μείγμα εδαφικού υλικού με πολύ πιο συμπαγές και στιβαρό εδαφικό σκελετό, από ότι με την μίξη της άμμου M31 με άργιλο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα κατά την στρώση του υλικού στην βάση να σχηματίζεται μια επιφάνεια που έχει καλύτερη διάταξη κόκκων (π.χ. όσον αναφορά στην πλήρωση των κενών) και συνεπώς καλύτερη συμπύκνωση, που προκαλεί την αύξηση των συντελεστών αναπήδησης.

Επιπλέον, ενώ παρατηρείται μια σχεδόν γραμμική μείωση των τιμών του συντελεστή αναπήδησης με την αύξηση του ποσοστού της αργίλου για το διάγραμμα της M31, για το αντίστοιχο διάγραμμα της Longstone (M34) η μείωση είναι δι-γραμμική, που σημαίνει ότι εάν περνούσε μια υποθετική γραμμή τάσης από τις τιμές του διαγράμματος, η κλίση της θα ήταν πολύ μικρή για την μετάβαση από 25% σε 50% άργιλο ενώ πολύ μεγαλύτερη για την μετάβαση από 50% σε 75% άργιλο. Αυτή η συμπεριφορά δεν μπορεί να έχει κάποια φυσική εξήγηση, αλλά μπορεί να εξηγηθεί εν μέρει λόγω του τρόπου διεξαγωγής της πειραματικής διαδικασίας. Συγκεκριμένα, τα μεγέθη που εξετάζονται στα διαγράμματα, δηλαδή το ποσοστό αργίλου και ο συντελεστής αναπήδησης δεν είναι άμεσα συγκρίσιμα, καθώς εμπλέκονται και άλλοι παράμετροι στην διαδικασία. Λόγω της αδυναμίας κάθε φορά να διαστρωθεί το υλικό με ακρίβεια και όμοιες αρχικές συνθήκες, η στρώση μπορεί να περιλάμβανε σχετικά μεγαλύτερο ή μικρότερο πάχος ή και διαφορετική (έστω και ελάχιστα) περιεκτικότητα σε υγρασία.

Επομένως, η περιεκτικότητα σε υγρασία του εδαφικού υλικού δεν θα μπορούσε να είναι η καταλυτική παράμετρος που επηρεάζει την τιμή του συντελεστή αναπήδησης, λόγω του διαφορετικού ποσοστού αργίλου στο μείγμα. Έτσι, θεωρήθηκε σκόπιμο να χρησιμοποιηθεί ως κριτήριο υγρασίας ο λόγος του ποσοστού υγρασίας προς το ποσοστό της αργίλου στο εδαφικό μείγμα καθώς εκφράζει την εξάρτηση του επί τις εκατό ποσοστού υγρασίας από το κατά βάρος ποσοστό της αργίλου και κατά συνέπεια εισάγει την συσχέτιση της αργίλου με το περιεχόμενο νερό σε αυτήν.

Το μαθηματικό μοντέλο που διαμορφώθηκε από την εκτέλεση αυτής της σειράς δοκιμών, μέσω πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης είναι το εξής:

$$COR = 0,547 - 0,0035 \cdot CLAY(\%) - 0,655 \cdot \frac{\text{νερό}}{\text{άργιλος}} + 0,027 \cdot sand - 0,072 \cdot t \quad (6.10)$$

όπου CLAY (%) είναι το ποσοστό αργίλου του εδαφικού μείγματος επί τις εκατό, ο λόγος νερό προς άργιλο συμβολίζει τον λόγο του ποσοστού υγρασίας προς το ποσοστό κατά βάρος

περιεκτικότητας της αργίλου στο μείγμα, t το πάχος της στρώσης της επιφάνειας πρόσπτωσης και η μεταβλητή $sand$ που είναι ουσιαστικά μια ψευδομεταβλητή που παίρνει τις τιμές 0 και 1 για την ύπαρξη M31 και Longstone αντίστοιχα. Η συσχέτισή που προκύπτει είναι $R^2=0,846$ που είναι σχετικά καλή, το τυπικό σφάλμα $e_{COR}=0,031$ που είναι ανεκτό και οι συντελεστές p για κάθε μεταβλητή με την σειρά που εμφανίζονται στο μοντέλο είναι $8,11 \times 10^{-23}$, $3,62 \times 10^{-7}$, $1,6 \times 10^{-3}$ και $3,98 \times 10^{-7}$ που δείχνουν πόσο ισχυρή είναι η επιβολή τους στην διαμόρφωση της τιμής του συντελεστή αναπήδησης σε σχέση με το όριο σημαντικότητας που έχει την τιμή 0,05.

Τα ποιοτικά συμπεράσματα που προκύπτουν από την συσχέτιση είναι τα εξής:

- Όπως είναι φυσικό, αύξηση του πάχους της εδαφικής στρώσης οδηγεί σε μείωση του συντελεστή αναπήδησης. Αυτό μπορεί να φανεί και πιο εύκολα από τον αρνητικό πολλαπλασιαστή μπροστά από την μεταβλητή t του πάχους στην αντίστοιχη σχέση.
- Προσθήκη άμμου Longstone (M34) στο εδαφικό μείγμα προσδίδει αύξηση του συντελεστή αναπήδησης, καθώς όπως αναφέρθηκε και παραπάνω δημιουργεί ένα μείγμα με πιο συμπαγές εδαφικό σκελετό σε σχέση με την προσθήκη της άμμου M31. Στην σχέση εκφράζεται με την ψευδομεταβλητή $sand$, που παίρνοντας την τιμή 1 για την ύπαρξη της Longstone δίνει στον συντελεστή αναπήδησης μια τιμή κατά 0,027 μεγαλύτερη από ότι η M31. Για παράδειγμα για εδαφικό μείγμα με ποσοστό αργίλου 25%, λόγο νερού προς άργιλο 0,10 και πάχος στρώσης 2mm δίνει τιμή $COR_{M31}=0,25$ και $COR_{M34}=0,28$ και συνεπώς υπάρχει 10% αύξηση του συντελεστή αναπήδησης στην λεπτότερη άμμο.
- Επιπλέον, αύξηση του λόγου νερού προς άργιλο σημαίνει ότι μειώνεται η συνοχή του εδαφικού μείγματος, δηλαδή η φέρουσα ικανότητα της επιφάνειας πρόσπτωσης και κατ' επέκταση μειώνεται και η τιμή του συντελεστή αναπήδησης.
- Τέλος, η ύπαρξη του αρνητικού πολλαπλασιαστή -0,0035 δείχνει ότι η αύξηση του ποσοστού αργίλου επί τις 100 (%) μειώνει τον COR, το οποίο είναι παράδοξο σε σχέση με τα συμπεράσματα για ξηρό μείγμα. Παρ' όλα αυτά, η συμπεριφορά αυτή μπορεί να εξηγηθεί χρησιμοποιώντας το παραπάνω συμπέρασμα. Η ύπαρξη νερού μειώνει την συνοχή c της αργίλου και κατ' επέκταση την φέρουσα ικανότητα του εδαφικού μείγματος και της επιφάνειας πρόσπτωσης. Έτσι, η αύξηση του ποσοστού συμμετοχής της αργίλου δεν προσδίδει πλέον αύξηση αλλά μείωση της ποιότητας του εδαφικού σκελετού καθώς γεμίζει πλέον με ένα πιο ασθενές υλικό, που έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του συντελεστή αναπήδησης.

6.8. Επιρροή αργιλικού υλικού με υγρασία

Στο ξεκίνημα της πειραματικής διαδικασίας, πραγματοποιήθηκαν 116 δοκιμές ελεύθερης πτώσης με τα σφαιρικά δοκίμια διαμέτρου 3cm και 4cm, σε 6 βάσεις ονομαστικού πάχους 1mm και 2mm, με την επιφάνεια πρόσπτωσης να έχει διαστρωθεί με την άργιλο 1 και 62 δοκιμές με τις ίδιες συνθήκες και με την επιφάνεια πρόσπτωσης διαστρωμένη με την άργιλο 2.

Η διαδικασία διάστρωσης που πραγματοποιήθηκε για αυτές τις δοκιμές ήταν παρόμοια με αυτή της ενότητας των μειγμάτων αργίλου- άμμου με περιεχόμενη υγρασία. Συγκεκριμένα, στο αργιλικό υλικό προστέθηκε ικανή ποσότητα νερού, ώστε η άργιλος να πλάθεται και να διαστρωθεί ομοιόμορφα στο στην βάση. Στην συνέχεια, η επιφάνεια διαμορφώθηκε λεία, έτσι ώστε να μην επηρεάζονται τα πειραματικά δεδομένα από τυχόν ανωμαλίες της.

Η δυσκολία που προέκυψε σε αυτήν την μέθοδο ήταν η εξής: αμέσως μετά την διάστρωση του υλικού στην βάση, δεν ήταν δυνατό να πραγματοποιηθεί δοκιμή, καθώς το σφαιρικό δοκίμιο δεν αναπηδούσε και κατά συνέπεια δεν υπήρχε εμφάνιση του φαινομένου που μελετάται. Για αυτόν τον λόγο, οι βάσεις αφήνονταν για κάποια ώρα (μια με τρεις ώρες, ανάλογα το υλικό και το πάχος στρώσης) στο εργαστήριο έτσι ώστε να φτάσουν στην κατάλληλη υγρασία που θα επέτρεπε την πραγματοποίηση της δοκιμής.

Ο παραπάνω τρόπος διάστρωσης των βάσεων είχε τα εξής μειονεκτήματα:

- Δεδομένης της δυσκολίας της μεθόδου διάστρωσης του υλικού, το πάχος της στρώσης δεν ήταν σταθερό.
- Δεν υπήρχε η δυνατότητα επίτευξης συγκεκριμένης υγρασίας, καθώς δεν μπορούσε να μετρηθεί, παρά μόνο μετά την εκτέλεση των δοκιμών.
- Η περιεχόμενη υγρασία που απαιτούνταν για την διάστρωση του αργιλικού υλικού 2, έφτανε το όριο συρρίκνωσης κατά το στέγνωμα της βάσης, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει καλή επαφή βάσης και υλικού. Όταν δε, το υλικό δεν είχε συρρικνωθεί ακόμα, η σφαίρα ανεξαρτήτως μάζας δεν αναπηδούσε.
- Η ξήρανση της αργίλου, κάτω του ορίου συρρίκνωσης, ρωγμάτωνε την επιφάνεια πρόσπτωσης και ως συνέπεια το υλικό δεν ήταν συνεχές, ώστε να καλύπτει σωστά την βάση.

Παρ' όλες τις αντιξοότητες που περιγράφηκαν, όταν τελικά επεξεργάστηκαν τα στιγμιότυπα των δοκιμών κατορθώθηκε να προκύψουν κάποιοι συντελεστές αναπήδησης, το εύρος των οποίων περιγράφεται στον Πίνακα 11 που ακολουθεί:

Πίνακας 11 – Τιμές συντελεστή αναπήδησης για τα αργιλικά υλικά

	Άργιλος 1	Άργιλος 2
COR_{max}	0,17	0,12
COR_{min}	0,01	0,02

Πέραν από τις μετρούμενες τιμές του συντελεστή αναπήδησης, δυστυχώς δεν κατορθώθηκε να διατυπωθεί μια σχέση με ικανοποιητική στατιστική σημαντικότητα που να δίνει μια σαφή εικόνα για την συσχέτιση του συντελεστή αναπήδησης με τον βαθμό πλαστικότητας του εκάστοτε αργιλικού υλικού και την περιεχόμενη υγρασία του, οπότε δεν είναι και σκόπιμο να παρουσιαστούν τα διαγράμματα που προέκυψαν. Παρ' όλα αυτά κάποια ποιοτικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την εν λόγω πειραματική διερεύνηση είναι τα κάτωθι:

- Αύξηση της μάζας του πίπτοντος τεμάχους οδηγεί σε μείωση του συντελεστή αναπήδησης,
- Αύξηση του πάχους στρώσης της αργίλου οδηγεί και αυτή με την σειρά της σε μείωση του συντελεστή αναπήδησης,
- Αύξηση του περιεχόμενου ποσοστού υγρασίας προκαλεί μείωση του συντελεστή αναπήδησης.

6.9. Παρατηρήσεις

Κατά την πρόσκρουση του σφαιρικού δοκιμίου στην διαμορφωμένη επιφάνεια του εδαφικού υλικού, παρατηρήθηκε η δημιουργία ενός αποτυπώματος πάνω σε αυτό, του οποίου το μέγεθος ποίκιλε ακόμα και για ίδιες αρχικές συνθήκες.

Με βάση το φαινόμενο αυτό λοιπόν, έγινε προσπάθεια, κατά την εξέλιξη των πειραμάτων, να δοθεί μια ερμηνεία που να συσχετίζει τις διάφορες μεταβλητές που εξετάστηκαν, με το μέγεθος του αποτυπώματος μετά τη κρούση.

Πριν από αυτό όμως, είναι καλό να αναφερθούν κάποιες έννοιες σε σχέση με το φαινόμενο αυτό. Όπως είναι γνωστό, κατά την κρούση γίνεται ανταλλαγή ενέργειας από τη σφαίρα στο έδαφος. Πιο αναλυτικά, πριν την ελεύθερη πτώση η σφαίρα έχει αποκτήσει δυναμική ενέργεια αναφορικά με το επίπεδο της πρόσκρουσης η οποία στην συνέχεια μετατρέπεται σταδιακά σε κινητική και φτάνει στη μέγιστη τιμή της την στιγμή ακριβώς πριν την επαφή της με το εδαφικό υλικό.

Με την επαφή της σφαίρας στο εδαφικό υλικό, γίνεται μεταφορά ενέργειας από εκείνη στον εδαφικό σκελετό, μέσω κρουστικών κυμάτων, τα οποία δεδομένης της φύσης της δοκιμής που διενεργείται, δηλαδή λόγω του μικρού πάχους στρώσης της αργίλου, φτάνουν στη βάση που είναι κατασκευασμένη από πιο ανθεκτικό υλικό. Η βάση, όπως προαναφέρθηκε έχει κατασκευαστεί από τσιμέντο μεγάλων αντοχών (Sikagrout 212) το οποίο δεν παραμορφώνεται μόνιμα εξαιτίας της κρούσης με τέτοιας μάζας σφαίρες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανάκλαση του ωστικού ελαστικού κύματος ξανά στο εδαφικό υλικό, σε περίπτωση που η ενέργεια δεν έχει αποσβεσθεί εξ ολοκλήρου σε αυτό, και την αναπήδηση της σφαίρας με μικρότερη κινητική ενέργεια πλέον.

Επομένως, γίνεται αντιληπτό ότι ή όλη ή μέρος της κινητικής ενέργειας της σφαίρας, καταναλώνεται είτε σε μόνιμη παραμόρφωση στο εδαφικό υλικό, είτε σε στιγμιαία στο εδαφικό υλικό και στην απαραμόρφωτη βάση.

Έτσι μπορεί να ληφθεί το συμπέρασμα, ότι το μέγεθος του αποτυπώματος που προκαλείται στο εδαφικό υλικό της βάσης είναι άμεση συνάρτηση του μεγέθους της κινητικής ενέργειας που αποσβένεται κατά την κρούση και πλαστική παραμόρφωση του εδαφικού υλικού σε αυτό.

Έχοντας γίνει πλέον μια αναφορά στην σχέση της ενέργειας που αποσβένεται και του αποτυπώματος μετά τη κρούση είναι απαραίτητο να αναφερθούν οι παρακάτω παρατηρήσεις:

- Όπως είναι λογικό, σφαίρα μεγαλύτερης διαμέτρου και συνεπώς μεγαλύτερης μάζας, αφήνει μεγαλύτερο αποτύπωμα σε εδαφικό υλικό ίδιου πάχους στρώσης. Το γεγονός αυτό

μπορεί να εξηγηθεί με βάση τα παραπάνω, καθώς μεγαλύτερη μάζα συνεπάγεται μεγαλύτερη δυναμική και συνεπώς κινητική ενέργεια πριν την κρούση η οποία και αποσβένεται στην εδαφική στρώση.

- Μεγαλύτερο πάχος στρώσης αργίλου συνεπάγεται και μεγαλύτερη διάμετρο κρατήρα (κρατώντας σταθερή την διάμετρο της σφαίρας και επομένως και τη μάζα της)
- Σε σύνδεση με τη προηγούμενη παρατήρηση, μεγαλύτερη διείσδυση της σφαίρας μέσα στο εδαφικό υλικό συνεπάγεται και μεγαλύτερο αποτύπωμα στο εδαφικό υλικό καθώς και μεγαλύτερη απόσβεση ενέργειας.
- Κατά τις δοκιμές σε υλικά με μεγαλύτερο ποσοστό υγρασίας, παρουσιάστηκε μεγαλύτερο αποτύπωμα με ίδιες τις υπόλοιπες παραμέτρους σε σχέση με αυτά με μικρότερο υγρασίας.
- Μεγαλύτερο ύψος εκκίνησης της ελεύθερης πτώσης της σφαίρας έχει ως αποτέλεσμα και τη δημιουργία αισθητά μεγαλύτερων αποτυπωμάτων.
- Τέλος η σημαντικότερη παρατήρηση που έγινε κατά τη διάρκεια των δοκιμών και σε άμεση συνάρτηση με όλες τις παραπάνω παρατηρήσεις- συμπεράσματα, είναι ότι σε δοκιμές στις οποίες δεν επιτεύχθηκε αναπήδηση της σφαίρας το αποτύπωμα ήταν αισθητά μεγαλύτερο σε σχέση με αυτές που επιτεύχθηκε. Επιπλέον όσο μεγαλύτερη αναπήδηση υπήρχε τόσο μικρότερο ήταν και το αποτύπωμα.

Επομένως, με βάση τις παραπάνω παρατηρήσεις, γίνεται και επί του πρακτέου κατανοητό ότι το μέγεθος (διάμετρος και βάθος) του αποτυπώματος στο εδαφικό υλικό, είναι άμεση συνάρτηση της ενέργειας που αποσβένεται λόγω της πλαστικής συμπεριφορά του, κατά την επιβολή των παραμορφώσεων τη στιγμή της κρούσης.

Πρέπει να σημειωθεί, ότι τα παραπάνω αποτελέσματα προέκυψαν από ποιοτικές παρατηρήσεις επί των εργαστηριακών δοκιμών και επομένως δεν υπάρχουν μετρήσεις που να δείχνουν μια ποσοτική εικόνα του φαινομένου.

7. Σύνοψη

7.1. Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, εκτελέστηκαν πέντε διαφορετικές σειρές δοκιμών ελεύθερης πτώσης σφαιρικών δοκιμίων, με σκοπό να μελετηθεί η επιρροή είτε κινηματικών παραμέτρων όπως η μάζα του πίπτοντος τεμάχους, το αρχικό ύψος απελευθέρωσης του τεμάχους και συνεπώς η ταχύτητα πρόσπτωσης, είτε στοιχείων του υλικού επικάλυψης της επιφάνειας πρόσπτωσης, όπως το είδος του υλικού, η περιεχόμενη υγρασία και η περιεκτικότητά του σε άμμο ή άργιλο, στον συντελεστή αναπήδησης.

Στη συνέχεια, παρατίθενται για κάθε παράμετρο που εξετάστηκε περιληπτικά και ποιοτικά τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την διεξαγωγή των προαναφερθέντων δοκιμών.

7.1.1. Ενέργεια πρόσκρουσης

Η ενέργεια που αναπτύσσει το τέμαχος, την στιγμή ακριβώς πριν την πρόσκρουση, αποτελεί μια πολύ σημαντική παράμετρο που καθορίζει ουσιαστικά τον συντελεστή αναπήδησης.

Το μέγεθος αυτό εξαρτάται άμεσα από το αρχικό ύψος απελευθέρωσης του τεμάχους, που με την σειρά του επηρεάζει σημαντικά την τιμή της ταχύτητας πρόσκρουσης, και από την μάζα του.

Συγκεκριμένα, στην παρούσα διπλωματική εργασία, μέσα από την διεξαγωγή 20 δοκιμών σε βάση χωρίς επικάλυψη εδαφικού υλικού, με την χρησιμοποίηση δύο τεμαχών διαφορετικών μαζών και με την απελευθέρωσή τους από δύο διαφορετικά αρχικά υψόμετρα βρέθηκε ότι αύξηση της ταχύτητας πρόσπτωσης και της μάζας και κατά συνέπεια της ορμής και της ενέργειας πρόσκρουσης οδηγεί σε μείωση των τιμών του συντελεστή αναπήδησης.

7.1.2. Πάχος στρώσης επικάλυψης

Από το σύνολο των δοκιμών που διεξήχθησαν, έγινε εύκολα αντιληπτό σε όλες ότι αύξηση του πάχους της στρώσης επικάλυψης οδηγεί σε μείωση των τιμών του συντελεστή αναπήδησης. Παρ' όλα αυτά, η επιρροή είναι διαφορετική κάθε φορά ως προς την τιμή του συντελεστή αναπήδησης ανάλογα το υλικό που χρησιμοποιήθηκε ως στρώση επικάλυψης.

7.1.3. Σύσταση υλικού επικάλυψης

Από τις πειραματικές δοκιμές που διεξήχθησαν, έγινε φανερό ότι ανάλογα το είδος του υλικού επικάλυψης υπήρξε μια διαφορετική απομειωτική συμπεριφορά στις τιμές του συντελεστή αναπήδησης.

Για παράδειγμα, από τις δοκιμές με άργιλο και άμμο, σε ξηρή μορφή και χωρίς συσσωματώματα, προέκυψε ότι η άμμος λόγω των μεγάλων σε σχέση με την άργιλο κενών, δημιουργεί έναν ασθενέστερο και λιγότερο συμπαγές εδαφικό σκελετό σε σχέση με την άργιλο. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την αυξημένη απομείωση των τιμών του συντελεστή αναπήδησης της άμμου σε σχέση με τις τιμές της αργίλου.

Φυσικό επακόλουθο της παραπάνω παρατήρησης, ήταν ότι σε ξηρό μείγμα η αύξηση του κατά βάρος ποσοστού της αργίλου προκαλεί γραμμική αύξηση του συντελεστή αναπήδησης, το οποίο και επιβεβαιώθηκε από τις δοκιμές που διενεργήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Επιπλέον, για τον ίδιο λόγο, με την προσθήκη μιας πιο λεπτόκοκκης άμμου (Longstone – M34) ο συντελεστής αναπήδησης προέκυψε μεγαλύτερος σε σχέση με την περίπτωση προσθήκης μιας πιο χονδρόκοκκης (M31) από αυτήν.

Παρ' όλα αυτά, κατά την εκτέλεση αντίστοιχων δοκιμών σε βάσεις ιδίου υλικού επικάλυψης, αλλά με ειδοποιό διαφορά την προσθήκη ενός μικρού ποσοστού υγρασίας προέκυψε το αντίθετο αποτέλεσμα. Κατά την αύξηση του ποσοστού της αργίλου στο μείγμα προκλήθηκε μείωση του συντελεστή αναπήδησης. Αυτό εξηγήθηκε μέσω του μηχανισμού απομείωσης των παραμέτρων αντοχής της αργίλου με την προσθήκη νερού. Έτσι, αύξηση του ποσοστού της αργίλου με υγρασία συνεπάγεται με αύξηση του ποσοστού του ασθενούς υλικού στο εδαφικό μείγμα και κατ' επέκταση μείωση της φέρουσας ικανότητας του εδάφους της επιφάνειας πρόσκρουσης και μείωση των τιμών του συντελεστή αναπήδησης.

7.1.4. Ποσοστό περιεχομένης υγρασίας εδάφους

Όπως γίνεται αντιληπτό και από την παραπάνω ενότητα, από την διενέργεια της πειραματικής διαδικασίας και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων, προέκυψε ότι η αύξηση του ποσοστού της περιεχόμενης υγρασίας του αργιλικού υλικού ή μείγματος, προκαλεί μείωση των τιμών του συντελεστή αναπήδησης για το συγκεκριμένο υλικό, γεγονός το οποίο οφείλεται στην εκφυλιστική συμπεριφορά της αντοχής των αργιλικών υλικών και της φέρουσας ικανότητας του αντίστοιχου εδάφους με την προσθήκη υγρασίας.

7.2. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Πέραν από τα χρήσιμα συμπεράσματα που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία που διενεργήθηκε, μέσα στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αναδείχθηκαν και κάποια πεδία τα οποία χρίζουν περαιτέρω έρευνας.

Για παράδειγμα, από την παρούσα έρευνα, προέκυψε μια γραμμική σχέση που δίνει τον συντελεστή αναπήδησης συναρτήσει της ορμής πρόσκρουσης και του πάχους της εδαφικής επικάλυψης, που λειτουργεί άριστα για τιμές μάζας κοντά σε αυτές που χρησιμοποιήθηκαν. Έτσι μέσω αυτής της εργασίας προτείνεται για περαιτέρω διερεύνηση η δημιουργία ενός συντελεστή που θα αντιμετωπίζει τα προβλήματα που δημιουργούν τα φαινόμενα κλίμακας σε αυτήν την περίπτωση.

Επιπλέον, κατά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των πρωταρχικών μετρήσεων δεν κατορθώθηκε λόγω της χαστικής μορφής τους να δοθεί μια αξιόπιστη σχέση ανάμεσα στο είδος της αργίλου, το πάχος στρώσης και την περιεχόμενη υγρασία της. Προτείνεται λοιπόν, ο σχεδιασμός και η υλοποίηση μιας διαφορετικής μεθόδου προσέγγισης του φαινομένου που θα οδηγήσει το τμήμα αυτό της έρευνας σε πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.

8. Βιβλιογραφία

- ANSARI, M. K., AHMAD, M., SINGH, R. & SINGH, T. N. 2013. Rockfall hazard assessment at Ajanta Cave, Aurangabad, Maharashtra, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 1-8.
- ASTERIOU, P., SAROGLU, H. & TSIAMBAOS, G. 2012. Geotechnical and kinematic parameters affecting the coefficients of restitution for rock fall analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 54, 103-113.
- ASTERIOU, P., SAROGLU, H. & TSIAMBAOS, G. 2013a. Rockfall: Scaling Factors for the Coefficient of Restitution. *Proceedings of EUROCK2013 - The 2013 ISRM International Symposium*, 195-200.
- ASTERIOU, P., SAROGLU, H. & TSIAMBAOS, G. 2013b. Rockfalls: Influence of Rock Hardness on the Trajectory of Falling rock Blocks. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, XLVII.
- AZZONI, A. & DE FREITAS, M. H. 1995. Experimentally gained parameters, decisive for rock fall analysis. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 28, 111-124.
- AZZONI, A., ROSSI, P. P., DRIGO, E., GIANI, G. P. & ZANINETTI, A. 1992. In situ observation of rockfall analysis parameters. *Landslides, Proceedings of the 6th International Symposium on Landslides in Christchurch*, 1, 307-314.
- BOURRIER, F. & HUNGR, O. 2011. Rockfall Dynamics: a Critical Review of Collision and Rebound Models. In: LAMBERT, S. & NICOT, F. (eds.) *Rockfall Engineering*. Hoboken, NJ - London: Wiley - ISTE.
- BOZZOLO, D. & PAMINI, R. 1986. Simulation of rock falls down a valley side. *Acta Mechanica*, 63, 113-130.
- BROILI, L. 1977. Relations between scree slope morphometry and dynamics of accumulation processes. *Rock Fall Dynamics and Protective Work Effectiveness*, 90, 11-23.
- BUZZI, O., GIACOMINI, A. & SPADARI, M. 2012. Laboratory investigation on high values of restitution coefficients. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45, 35-43.
- CHAU, K. T., WONG, R. H. C., LIU, J., WU, J. J. & LEE, C. F. Shape effects on the coefficient of restitution during rockfall impacts. 1999. 541-544.
- DESCOEUDRES, F. & ZIMMERMANN, T. 1987. Three-dimensional dynamic calculation of rockfalls. *Proc. 6th Congress International Society for Rock Mechanics, Montreal, 1987. Vol. 1*, 337-342.
- DORREN, L. K. A., BERGER, F. & PUTTERS, U. S. 2006. Real-size experiments and 3-D simulation of rockfall on forested and non-forested slopes. *Natural Hazards and Earth System Science*, 6, 145-153.
- GERBER, W. 2001. Guideline for the approval of rockfall protection kits. *Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL) and the Swiss Federal Research Institute*.
- GIACOMINI, A., THOENI, K., LAMBERT, C., BOOTH, S. & SLOAN, S. W. 2012. Experimental study on rockfall drapery systems for open pit highwalls. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 56, 171-181.
- GIANI, G. P. 1992. *Rock Slope Stability Analysis*.
- GIANI, G. P., GIACOMINI, A., MIGLIAZZA, M. & SEGALINI, A. 2004. Experimental and theoretical studies to improve rock fall analysis and protection work design. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 37, 369-389.
- GOLDSMITH, W. 1960. Impact: The theory and physical behavior of colliding solids. *Edward Alrnold, London*.
- HABIB, P. 1977. Note sur le rebondissement des blocs rocheux. *Proceedings of the Meeting on Rockfall Dynamics and Protective Works Effectiveness*, 25-38.

- HEIDENREICH, B. 2004. *Small- and half-scale experimental studies of rockfall impacts on sandy slopes*. Ph.D Thesis, EPFL.
- JOHNSON, K. L. 1985. *Contact Mechanics*, UK, Cambridge University Press.
- KAMIJO, A., ONDA, S., MASUYA, H. & TANAKA, Y. 2000. Fundamental test on restitution coefficient and frictional coefficient of rock fall. *5th Symposium on Impact Problems in Civil Engineering*, 83-86.
- LABIOUSE, V. & HEIDENREICH, B. 2009. Half-scale experimental study of rockfall impacts on sandy slopes. *Natural Hazards and Earth System Science*, 9, 1981-1993.
- MONTANI STOFFEL, S., LABIOUSE, V. & DESCOEUDRES, F. Vertical and inclined impacts of rock blocks on a rock shed model. *20th Century Lessons, 21st Century Challenges*, 1999. 549-553.
- PFEIFFER, T. J. & BOWEN, T. D. 1989. Computer simulation of rockfalls. *Bulletin - Association of Engineering Geologists*, 26, 135-146.
- PIERSON, L. A., DAVIS, S. A. & VAN VICKLE, R. 1990. Rockfall hazard rating system implementation manual. *Rockfall Hazard Rating System Implementation Manual*.
- RAMMER, W., BRAUNER, M., DORREN, L. K. A., BERGER, F. & LEXER, M. J. 2010. Evaluation of a 3-D rockfall module within a forest patch model. *Natural Hazards and Earth System Science*, 10, 699-711.
- RICHARDS, L. R., PENG, B. & BELL, D. H. 2001. Laboratory and field evaluation of the normal Coefficient of Restitution for rocks. *Proceedings of Proc. ISRM Regional Symposium EUROCK2001*, 149-155.
- RITCHIE, A. M. 1963. Evaluation of rockfall and its control. *Highway Research Record*, 17, 13-28.
- ROCSCIENCE. 2003. Advanced Tutorial: Determining Input Parameters for A RocFall Analysis. www.rocscience.com [Online]. [Accessed //].
- SPADARI, M., GIACOMINI, A., BUZZI, O., FITYUS, S. & GIANI, G. P. 2012. In situ rockfall testing in New South Wales, Australia. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 49, 84-93.
- STATHAM, I. 1976. A scree slope rockfall model. *Earth Surface Processes*, 1, 43-62.
- TOPAL, T., AKIN, M. & OZDEN, U. A. 2007. Assessment of rockfall hazard around Afyon Castle, Turkey. *Environmental Geology*, 53, 191-200.
- USHIRO, T., SHINOHARA, S., TANIDA, K. & YAGI, N. 2000. A study on the motion of rockfalls on slopes. *Proceedings of the 5th Symposium on Impact Problems in Civil Engineering*, 91-96.
- WONG, R. H. C., HO, K. W. & CHAU, K. T. 2000. Shape and mechanical properties of slope material effects on the coefficient of restitution of rockfall study. *Proc. Fourth North Am. Rock Mech. Symp.*, 507-514.
- WU, S.-S. 1985. Rockfall evaluation by computer simulation. *Transportation Research Record*, 1-5.
- ΑΝΔΡΙΑΝΟΠΟΥΛΟΣ, Α. 2011. Εκτίμηση επικινδυνότητας και διακινδύνευσης καταπτώσεων βράχων σε πρανή οδοποιίας - η περίπτωση της κοιλάδας των Τεμπών. Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία. Ε.Μ.Π.
- ΑΣΤΕΡΙΟΥ, Π., ΕΥΘΥΜΙΟΥ, Β. 2011. Διερεύνηση χαρακτηριστικών τροχιάς καταπτώσεων σε βραχώδη πρανή-Επίδραση κινηματικών παραμέτρων. Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία. Ε.Μ.Π.
- ΒΟΥΔΡΗΣ Α., ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ Η. 2013. Τριδιάστατη ανάλυση βραχοπτώσεων - Εφαρμογές στο πεδίο και στο εργαστήριο. Διπλωματική Εργασία. Ε.Μ.Π.
- ΓΙΟΚΑΡΗ, Σ., 2013. Καταπτώσεις βράχων-Πειραματική διερεύνηση επίδρασης χαρακτηριστικών της επιφάνειας πρόσπτωσης”, Διπλωματική Εργασία. Ε.Μ.Π.

- ΓΚΑΖΕΤΑΣ Γ., ΑΝΑΣΤΑΣΟΠΟΥΛΟΣ Ι., ΔΡΟΣΟΣ Β., ΓΕΩΡΓΑΡΑΚΟΣ Τ., ΚΟΥΡΚΟΥΛΗΣ Ρ. 2007. Σεισμική Συμπεριφορά Τοίχων Ωπλισμένης Γής στην Νέα Δομητική Τράπεζα του Ε.Μ.Π. Γεωτεχνικές εφαρμογές γεωσυνθετικών υλικών, ΤΕΕ.
- ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ Μ. 2013. Πειραματική Διερεύνηση της Ανισότροπης Συμπεριφοράς μη Συνεκτικών Εδαφών σε Στρεπτική Διάτμηση.
- ΜΠΕΚΡΗ, Ε. 2010. Εκτίμηση Γεωτεχνικών Παραμέτρων για Καταπτώσεις Βράχων. Διπλωματική Εργασία. Ε.Μ.Π.
- ΜΩΡΟΥ Π. 2014. Τριδιάστατη Ανάλυση Τροχιάς Βραχοπτώσεων με Δεδομένα Εργαστηριακής Διερεύνησης, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία. Ε.Μ.Π.
- ΣΑΡΟΓΛΟΥ, Ι.Χ., ΜΠΕΚΡΗ, Ε., ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ, Γ. 2010. Προσδιορισμός Κρίσιμων Παραμέτρων Γεωλογικών Σχηματισμών για την Προσομοίωση της Πτώσης Βραχωδών Τεμαχών σε Πρανή. 6ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής. Βόλος

α/α	ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	ΥΛΙΚΟ ΒΑΣΗΣ	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΣΦΑΙΡΑΣ d, (cm)	ΥΨΟΣ ΡΙΨΗΣ H, (cm)	ΥΓΡΑΣΙΑ w, (%)	ΠΑΧΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ t, (mm)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ v _p , (m/s)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ v _r , (m/s)	ΓΩΝΙΑ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ a _r , (ο)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ v _{CORr} , (-)
	-	-								
1	25	ΧΩΡΙΣ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ	3	100	-	-	4,30	2,97	89,1	0,69
2	26		3				4,35	2,96	87,7	0,68
3	27		3				4,29	3,00	88,2	0,70
4	28		3				4,31	2,72	88,3	0,63
5	29		3				4,33	2,90	88,1	0,67
6	30		4				4,30	2,37	87,9	0,55
7	31		4				4,29	2,45	89,9	0,57
8	32		4				4,31	2,46	84,3	0,57
9	33		4				4,33	2,29	86,4	0,53
10	34		4				4,32	2,51	87,1	0,58
11	201	ΧΩΡΙΣ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ	3	150	-	-	5,51	3,20	89,7	0,58
12	202		3				5,56	3,34	86,6	0,60
13	203		3				5,63	3,38	87,9	0,60
14	204		3				5,66	3,23	89,9	0,57
15	205		3				5,55	3,16	89,9	0,57
16	206		4				5,65	2,83	87,8	0,50
17	207		4				5,49	2,91	88,0	0,53
18	208		4				5,47	2,46	89,0	0,45
19	209		4				5,56	2,89	89,7	0,52
20	210		4				5,41	2,81	88,5	0,52

α/α	ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	ΥΛΙΚΟ ΒΑΣΗΣ	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΣΦΑΙΡΑΣ d, (cm)	ΥΨΟΣ ΡΙΨΗΣ H, (cm)	ΥΓΡΑΣΙΑ w, (%)	ΠΑΧΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ t, (mm)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ v _p , (m/s)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ v _r , (m/s)	ΓΩΝΙΑ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ α _r , (ο)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ v _{CORr} , (-)
	-	-								
21	35	ΑΝΑΖΥΜΩΜΕΝΗ ΑΡΓΙΛΟΣ ΜΕΣΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	3	100	15,9	2,2	4,51	0,48	66,0	0,11
22	36		3		15,9	2,2	4,32	0,37	67,4	0,08
23	37		3		21,8	2,2	4,30	-	-	-
24	38		3		21,8	2,2	4,52	-	-	-
25	39		4		21,8	2,2	4,36	0,37	56,6	0,08
26	40		4		21,8	2,2	4,33	0,19	73,2	0,04
27	41		3		37,3	1,4	4,35	-	-	-
28	42		4		37,3	1,4	4,26	-	-	-
29	43		3		20,1	1,4	4,45	0,16	76,7	0,04
30	44		3		20,1	1,4	4,34	0,16	63,2	0,04
31	47		3		26,9	1,4	4,31	-	-	-
32	48		3		26,9	1,4	4,48	-	-	-
33	49		4		26,9	1,4	4,36	0,30	52,8	0,07
34	50		4		26,9	1,4	4,34	-	-	-
35	51		3		29,1	2,2	4,38	-	-	-
36	52		3		29,1	2,2	4,48	-	-	-
37	53		4		29,1	2,2	4,38	-	-	-
38	54		4		29,1	2,2	4,38	-	-	-
39	55		3		21,5	1,4	4,48	-	-	-
40	56		3		21,5	1,4	4,36	-	-	-
41	57		4		21,5	1,4	4,28	-	-	-
42	86		3		19,5	1,4	4,40	-	-	-

α/α	ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	ΥΛΙΚΟ ΒΑΣΗΣ	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΣΦΑΙΡΑΣ d, (cm)	ΥΨΟΣ ΡΙΨΗΣ H, (cm)	ΥΓΡΑΣΙΑ w, (%)	ΠΑΧΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ t, (mm)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ v _p , (m/s)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ v _r , (m/s)	ΓΩΝΙΑ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ α _r , (ο)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ v _{CORr} , (-)
	-	-								
43	87	ΑΝΑΖΥΜΩΜΕΝΗ ΑΡΓΙΛΟΣ ΜΕΣΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	3	100	19,5	1,4	4,38	-	-	-
44	88		4		19,5	1,4	4,31	-	-	-
45	89		4		19,5	1,4	4,40	-	-	-
46	90		3		20,6	2,4	4,46	-	-	-
47	91		3		20,6	2,4	4,39	-	-	-
48	92		3		20,6	2,4	4,45	-	-	-
49	93		4		20,6	2,4	4,43	-	-	-
50	95		3		20,9	1,7	4,44	-	-	-
51	96		4		20,9	1,7	4,39	-	-	-
52	97		4		20,9	1,7	4,43	-	-	-
53	106		3		20,5	2,9	4,45	-	-	-
54	107		3		20,5	2,9	4,51	-	-	-
55	108		4		20,5	2,9	4,45	-	-	-
56	109		4		20,5	2,9	4,39	-	-	-
57	138		3		19,4	1,7	4,53	-	-	-
58	139		3		19,4	1,7	4,45	-	-	-
59	140		4		19,4	1,7	4,42	-	-	-
60	141		4		19,4	1,7	4,40	-	-	-
61	142		3		19,6	2,4	4,44	0,07	76,5	0,02
62	143		3		19,6	2,4	4,43	-	-	-
63	144	4	19,6	2,4	4,34	-	-	-		
64	145	4	19,6	2,4	4,35	-	-	-		

α/α	ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	ΥΛΙΚΟ ΒΑΣΗΣ	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΣΦΑΙΡΑΣ d, (cm)	ΥΨΟΣ ΡΙΨΗΣ H, (cm)	ΥΓΡΑΣΙΑ w, (%)	ΠΑΧΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ t, (mm)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ v _p , (m/s)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ v _r , (m/s)	ΓΩΝΙΑ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ α _r , (ο)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ v _{COR} , (-)
	-	-								
65	171	ΑΝΑΖΥΜΩΜΕΝΗ ΑΡΓΙΛΟΣ ΜΕΣΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	3	100	16,3	1,3	4,49	-	-	-
66	172		3		16,3	1,3	4,47	-	-	-
67	173		3		16,3	1,3	4,45	0,55	85,0	0,12
68	174		3		16,3	1,3	4,42	-	-	-
69	175		4		16,3	1,3	4,37	-	-	-
70	176		4		16,3	1,3	4,38	-	-	-
71	177		4		16,3	1,3	4,33	-	-	-
72	178		3		18,6	2,7	4,42	-	-	-
73	179		3		18,6	2,7	4,44	-	-	-
74	180		4		18,6	2,7	4,32	-	-	-
75	181		3		18,6	1,7	4,46	-	-	-
76	182		3		17,8	1,7	4,45	-	-	-
77	183		4		17,8	1,7	4,40	-	-	-
78	185		3		17,8	2,5	4,32	-	-	-
79	186		3		17,8	2,5	4,42	-	-	-
80	187		3		17,8	2,5	4,31	-	-	-
81	188		4		17,8	2,5	4,32	-	-	-
82	189		4		17,8	2,5	4,35	-	-	-

α/α	ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	ΥΛΙΚΟ ΒΑΣΗΣ	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΣΦΑΙΡΑΣ d, (cm)	ΥΨΟΣ ΡΙΨΗΣ H, (cm)	ΥΓΡΑΣΙΑ w, (%)	ΠΑΧΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ t, (mm)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ v _p , (m/s)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ v _r , (m/s)	ΓΩΝΙΑ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ α _r , (ο)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ v _{CORr} , (-)
	-	-								
83	59	ΑΝΑΖΥΜΩΜΕΝΗ ΑΡΓΙΛΟΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	3	100	16,4	2,2	4,37	0,13	83,9	0,03
84	60		3		16,4	2,2	4,50	0,11	46,0	0,03
85	61		4		16,4	2,2	4,39	0,13	86,7	0,03
86	62		4		16,4	2,2	4,40	-	-	-
87	64		3		13	1,4	4,46	0,08	60,6	0,02
88	67		3		24,9	2,2	4,40	-	-	-
89	69		3		13,6	1,6	4,41	-	-	-
90	70		3		13,6	1,6	4,45	0,10	61,1	0,02
91	71		4		13,6	1,6	4,43	0,34	61,1	0,08
92	72		4		13,6	1,6	4,41	0,19	80,7	0,04
93	73		3		13,6	1,6	4,37	0,76	82,0	0,17
94	74		3		15,2	2,5	4,40	-	-	-
95	75		3		15,2	2,5	4,35	-	-	-
96	76		4		15,2	2,5	4,29	-	-	-
97	77		4		15,2	2,5	4,28	-	-	-
98	78		3		11,8	1,7	4,47	0,20	81,0	0,04
99	79		3		11,8	1,7	4,42	0,34	62,8	0,08
100	80		4		11,8	1,7	4,36	0,25	77,8	0,06
101	81		4		11,8	1,7	4,48	0,44	84,6	0,10
102	82		3		12,7	2,3	4,40	0,35	77,7	0,08
103	83	3	12,7	2,3	4,46	0,12	77,4	0,03		
104	84	4	12,7	2,3	4,33	-	-	-		

α/α	ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	ΥΛΙΚΟ ΒΑΣΗΣ	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΣΦΑΙΡΑΣ d, (cm)	ΥΨΟΣ ΡΙΨΗΣ H, (cm)	ΥΓΡΑΣΙΑ w, (%)	ΠΑΧΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ t, (mm)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ v _p , (m/s)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ v _r , (m/s)	ΓΩΝΙΑ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ α _r , (ο)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ v _{CORr} , (-)
	-	-								
105	85	ΑΝΑΖΥΜΩΜΕΝΗ ΑΡΓΙΛΟΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	4	100	12,7	2,3	4,38	-	-	-
106	98		3		10,4	1,8	4,46	0,36	78,6	0,08
107	99		3		10,4	1,8	4,36	0,30	87,0	0,07
108	100		4		10,4	1,8	4,41	0,22	81,5	0,05
109	101		4		10,4	1,8	4,43	0,24	55,0	0,05
110	102		3		13,9	2,9	4,40	0,35	88,9	0,08
111	103		3		13,9	2,9	4,31	0,24	86,2	0,06
112	104		4		13,9	2,9	4,34	-	-	-
113	105		4		13,9	2,9	4,35	-	-	-
114	110		3		10,4	2,1	4,31	0,32	58,3	0,07
115	111		3		10,4	2,1	4,47	0,30	79,0	0,07
116	112		4		10,4	2,1	4,37	0,05	89,6	0,01
117	113		4		10,4	2,1	4,31	0,04	71,5	0,01
118	114		3		14	3	4,41	0,35	83,7	0,08
119	115		3		14	3	4,37	-	-	-
120	116		4		14	3	4,37	-	-	-
121	117		4		14	3	4,35	0,17	56,6	0,04
122	146		3		13,3	1,8	4,37	-	-	-
123	147		3		13,3	1,8	4,37	0,38	79,8	0,09
124	148		3		13,3	1,8	4,47	-	-	-
125	149	4	13,3	1,8	4,24	0,34	61,1	0,08		
126	150	4	13,3	1,8	4,31	0,33	65,5	0,08		

α/α	ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	ΥΛΙΚΟ ΒΑΣΗΣ	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΣΦΑΙΡΑΣ d, (cm)	ΥΨΟΣ ΡΙΨΗΣ H, (cm)	ΥΓΡΑΣΙΑ w, (%)	ΠΑΧΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ t, (mm)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ v _p , (m/s)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ v _r , (m/s)	ΓΩΝΙΑ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ a _r , (ο)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ v _{CORr} , (-)
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
127	151	ΑΝΑΖΥΜΩΜΕΝΗ ΑΡΓΙΛΟΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	4	100	13,3	1,8	4,36	-	-	-
128	153		3		13,3	2,3	4,42	0,24	76,4	0,05
129	154		3		13,3	2,3	4,35	-	-	-
130	155		4		13,3	2,3	4,37	-	-	-
131	156		4		13,3	2,3	4,32	0,27	20,7	0,06
132	157		4		13,3	2,3	4,45	-	-	-
133	158		3		12,6	1,6	4,48	0,42	61,4	0,09
134	159		3		12,6	1,6	4,37	0,40	80,1	0,09
135	160		3		12,6	1,6	4,47	0,13	45,8	0,03
136	161		4		12,6	1,6	4,31	0,31	50,4	0,07
137	162		4		12,6	1,6	4,31	0,40	88,0	0,09
138	164		3		14,1	2,4	4,32	-	-	-
139	165		3		14,1	2,4	4,36	-	-	-
140	166		3		14,1	2,4	4,42	0,04	8,9	0,01
141	167		3		14,1	2,4	4,29	0,21	85,0	0,05
142	168		4		14,1	2,4	4,28	-	-	-
143	169		4		14,1	2,4	4,34	-	-	-
144	170		4		14,1	2,4	4,36	-	-	-
145	190		3		10,6	1,9	4,30	0,41	89,8	0,09
146	191		3		10,6	1,9	4,39	0,23	65,7	0,05
147	192	3	10,6	1,9	4,32	0,35	85,7	0,08		
148	193	3	10,6	1,9	4,39	0,29	83,5	0,07		

α/α	ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	ΥΛΙΚΟ ΒΑΣΗΣ	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΣΦΑΙΡΑΣ d, (cm)	ΥΨΟΣ ΡΙΨΗΣ H, (cm)	ΥΓΡΑΣΙΑ w, (%)	ΠΑΧΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ t, (mm)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ v _p , (m/s)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ v _r , (m/s)	ΓΩΝΙΑ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ a _r , (ο)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ v _{COR} , (-)
	-	-								
149	194	ΑΝΑΖΥΜΩΜΕΝΗ ΑΡΓΙΛΟΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	4	100	10,6	1,9	4,41	-	-	-
150	195		4		10,6	1,9	4,36	-	-	-
151	196		3		12,8	2,2	4,49	0,15	12,8	0,03
152	197		3		12,8	2,2	4,47	0,16	37,8	0,04
153	198		3		12,8	2,2	4,35	0,16	20,3	0,04
154	199		4		12,8	2,2	4,48	-	-	-
155	200		4		12,8	2,2	4,38	-	-	-

α/α	ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	ΥΛΙΚΟ ΒΑΣΗΣ	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΣΦΑΙΡΑΣ d, (cm)	ΥΨΟΣ ΡΙΨΗΣ H, (cm)	ΥΓΡΑΣΙΑ w, (%)	ΠΑΧΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ t, (mm)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ v _p , (m/s)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ v _r , (m/s)	ΓΩΝΙΑ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ α _r , (ο)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ v _{COR} , (-)
156	211	ΑΝΑΖΥΜΩΜΕΝΗ ΑΡΓΙΛΟΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	3	150	13,1	1,6	5,59	0,78	80,1	0,14
157	212		3		13,1	1,6	5,51	0,28	51,1	0,05
158	213		3		13,1	1,6	5,73	0,57	89,5	0,10
159	214		3		13,1	1,6	5,81	0,60	69,1	0,10
160	215		4		13,1	1,6	5,58	0,90	70,9	0,16
161	216		4		13,1	1,6	5,50	0,61	62,6	0,11
162	217		4		13,1	1,6	5,52	0,55	85,7	0,10
163	218		4		13,1	1,6	5,62	0,29	82,2	0,05
164	219		3		14,6	2,3	5,55	0,32	80,1	0,06
165	220		3		14,6	2,3	5,48	0,59	57,0	0,11
166	221		3		14,6	2,3	5,54	0,28	27,7	0,05
167	222		3		14,6	2,3	5,76	-	-	-
168	223		4		14,6	2,3	5,54	-	-	-
169	224		4		14,6	2,3	5,32	-	-	-
170	225		4		14,6	2,3	5,45	0,31	79,9	0,06
171	226		4		14,6	2,3	5,50	-	-	-
172	227		3		11,9	1,5	5,49	0,25	86,8	0,05
173	228		3		11,9	1,5	5,59	0,21	67,8	0,04
174	229		3		11,9	1,5	5,64	0,42	34,8	0,08
175	230		3		11,9	1,5	5,64	0,09	48,2	0,02
176	231	4	11,9	1,5	5,56	0,53	84,9	0,10		
177	232	4	11,9	1,5	5,59	0,82	88,3	0,15		

α/α	ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	ΥΛΙΚΟ ΒΑΣΗΣ	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΣΦΑΙΡΑΣ d, (cm)	ΥΨΟΣ ΡΙΨΗΣ H, (cm)	ΥΓΡΑΣΙΑ w, (%)	ΠΑΧΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ t, (mm)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ v _p , (m/s)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ v _r , (m/s)	ΓΩΝΙΑ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ a _r , (ο)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ v _{CORr} , (-)
	-	-								
178	233	ΑΝΑΖΥΜΩΜΕΝΗ ΑΡΓΙΛΟΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	4	150	11,9	1,5	5,48	0,48	85,7	0,09
179	234		4		11,9	1,5	5,40	0,37	29,3	0,07
180	235		3		11,9	1,5	5,69	0,47	81,8	0,08
181	236		3		14,1	2,2	5,55	-	-	-
182	237		3		14,1	2,2	5,63	0,16	20,8	0,03
183	239		4		14,1	2,2	5,46	-	-	-
184	240		3		10,3	1,5	5,74	0,28	89,4	0,05
185	241		3		10,3	1,5	5,56	0,53	89,0	0,09
186	242		3		10,3	1,5	5,51	0,29	40,1	0,05
187	243		3		10,3	1,5	5,40	0,69	88,4	0,13
188	244		3		10,3	1,5	5,69	0,47	81,5	0,08
189	245		4		10,3	1,5	5,48	0,11	32,0	0,02
190	246		4		10,3	1,5	5,49	0,32	72,9	0,06
191	247		4		10,3	1,5	5,67	0,75	86,4	0,13
192	249		3		13,5	2,7	5,63	0,39	86,0	0,07
193	251		3		13,5	2,7	5,64	0,32	60,7	0,06
194	252		3		13,5	2,7	5,72	0,44	54,0	0,08
195	253		4		13,5	2,7	5,52	-	-	-
196	254		4		13,5	2,7	5,52	0,32	79,9	0,06
197	255		4		13,5	2,7	5,49	-	-	-
198	256	4	13,5	2,7	5,47	0,28	60,8	0,05		

α/α	ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	ΥΛΙΚΟ ΒΑΣΗΣ	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΣΦΑΙΡΑΣ d, (cm)	ΥΨΟΣ ΡΙΨΗΣ H, (cm)	ΥΓΡΑΣΙΑ w, (%)	ΠΑΧΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ t, (mm)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ v _p , (m/s)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ v _r , (m/s)	ΓΩΝΙΑ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ α _r , (ο)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ v _{COR} , (-)
	-	-								
199	118	ΑΡΓΙΛΟΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΞΗΡΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	3	100	-	1	4,41	2,29	88,0	0,52
200	119		3			1	4,44	2,40	88,1	0,54
201	120		3			1	4,47	2,28	88,9	0,51
202	121		3			1	4,45	2,18	86,6	0,49
203	122		3			1	4,46	2,14	87,1	0,48
204	123		4			1	4,42	1,90	87,7	0,43
205	124		4			1	4,42	2,21	84,7	0,50
206	125		4			1	4,31	1,90	89,8	0,44
207	126		4			1	4,41	2,21	83,1	0,50
208	127		4			1	4,36	2,14	89,7	0,49
209	128		3			2	4,41	1,90	83,9	0,43
210	129		3			2	4,40	1,98	85,1	0,45
211	130		3			2	4,46	2,05	77,2	0,46
212	131		3			2	4,45	1,91	83,2	0,43
213	132		3			2	4,38	1,88	87,0	0,43
214	133		4			2	4,37	1,92	84,4	0,44
215	134		4			2	4,28	1,63	85,4	0,38
216	135		4			2	4,35	1,78	82,6	0,41
217	136		4			2	4,34	1,78	85,9	0,41
218	137		4			2	4,25	1,74	89,5	0,41

α/α	ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	ΥΛΙΚΟ ΒΑΣΗΣ	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΣΦΑΙΡΑΣ d, (cm)	ΥΨΟΣ ΡΙΨΗΣ H, (cm)	ΥΓΡΑΣΙΑ w, (%)	ΠΑΧΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ t, (mm)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ v _p , (m/s)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ v _r , (m/s)	ΓΩΝΙΑ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ α _r , (ο)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ v _{CORr} , (-)
	-	-								
219	257	ΕΠΑΛΕΙΨΗ ΜΕ ΑΡΓΙΛΟ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΥΓΡΗ ΜΟΡΦΗ	3	150	>LL	1	5,70	2,70	85,5	0,52
220	259		3			1	5,64	3,23	85,1	0,57
221	260		3			1	5,41	2,97	89,6	0,55
222	261		3			1	5,36	2,91	83,4	0,54
223	262		3			2	5,44	2,95	88,1	0,54
224	263		3			2	5,51	2,41	86,1	0,47
225	265		3			2	5,46	2,78	87,2	0,51
226	266		3			2	5,68	2,79	85,3	0,49
227	267		3			3	5,52	2,63	88,1	0,48
228	268		3			3	5,84	2,82	89,2	0,48
229	269		3			3	5,68	2,86	87,7	0,50
230	270		3			3	5,61	2,99	83,6	0,53
231	271		3			3	5,70	2,32	86,6	0,43
232	272		3			4	5,66	2,94	88,1	0,52
233	273		3			4	5,61	2,69	85,8	0,48
234	274		3			4	5,43	2,62	84,9	0,48
235	275		3			4	5,63	2,54	88,2	0,45
236	278		3			5	5,51	2,83	87,9	0,51
237	279		3			5	5,67	2,73	89,8	0,48
238	280		3			5	5,76	2,67	86,4	0,46
239	281		3			5	5,51	2,79	75,6	0,51
240	282		3			6	5,48	2,80	88,5	0,51

α/α	ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	ΥΛΙΚΟ ΒΑΣΗΣ	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΣΦΑΙΡΑΣ d, (cm)	ΥΨΟΣ ΡΙΨΗΣ H, (cm)	ΥΓΡΑΣΙΑ w, (%)	ΠΑΧΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ t, (mm)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ v _p , (m/s)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ v _r , (m/s)	ΓΩΝΙΑ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ α _r , (ο)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ v _{COR} , (-)
	-	-								
241	283	ΕΠΑΛΕΙΨΗ ΜΕ ΑΡΓΙΛΟ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΥΓΡΗ ΜΟΡΦΗ	3	150	>LL	6	5,47	2,38	85,0	0,44
242	284		3			6	5,66	2,84	89,8	0,50
243	285		3			6	5,70	2,77	85,8	0,49
244	286		3			6	5,52	2,35	80,7	0,43
245	287		3			7	5,53	2,70	89,6	0,48
246	288		3			7	5,64	2,55	89,0	0,44
247	289		3			7	5,56	2,89	87,1	0,51
248	290		3			7	5,67	2,44	83,6	0,42
249	291		3			7	5,82	2,32	85,1	0,39
250	292		3			8	5,49	2,73	89,1	0,48
251	293		3			8	5,51	2,68	89,9	0,47
252	294		3			8	5,66	2,83	85,6	0,48
253	295		3			8	5,51	2,25	89,0	0,39
254	296		3			8	5,71	2,99	85,6	0,49
255	298		3			9	5,57	2,56	85,9	0,48
256	300		3			9	5,60	2,44	85,8	0,46
257	301		3			9	5,59	1,95	89,8	0,37
258	302		3			10	5,53	2,50	87,1	0,50
259	304		3			10	5,46	2,27	84,7	0,45
260	305		3			10	5,60	1,71	88,5	0,38
261	306		3			10	5,43	2,28	85,4	0,46
262	307		3			12	5,44	2,79	89,8	0,51

α/α	ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	ΥΛΙΚΟ ΒΑΣΗΣ	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΣΦΑΙΡΑΣ d, (cm)	ΥΨΟΣ ΡΙΨΗΣ H, (cm)	ΥΓΡΑΣΙΑ w, (%)	ΠΑΧΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ t, (mm)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ v _p , (m/s)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ v _r , (m/s)	ΓΩΝΙΑ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ α _r , (ο)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ v _{CORr} , (-)
263	308	ΕΠΑΛΕΙΨΗ ΜΕ ΑΡΓΙΛΟ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΥΓΡΗ ΜΟΡΦΗ	3	150	>LL	12	5,53	2,48	89,4	0,45
264	309		3			12	5,51	2,21	82,6	0,40
265	310		3			12	5,51	2,22	87,3	0,40
266	311		3			12	5,46	2,40	88,6	0,44
267	312	ΕΠΑΛΕΙΨΗ ΜΕ ΑΡΓΙΛΟ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΞΗΡΑΝΣΗ	3	150	-	0,1	5,65	2,94	88,6	0,52
268	313		3			0,1	5,49	3,02	89,4	0,55
269	315		3			0,1	5,31	2,81	84,6	0,53
270	316		3			0,1	5,67	3,23	87,2	0,57
271	318		3			0,2	5,40	3,03	87,7	0,56
272	319		3			0,2	5,69	3,09	88,5	0,54
273	320		3			0,2	5,66	2,96	84,2	0,52
274	321		3			0,2	5,62	3,05	89,3	0,54
275	322		3			0,4	5,51	2,83	83,2	0,51
276	323		3			0,4	5,61	2,73	85,1	0,49
277	324		3			0,4	5,71	2,94	86,6	0,51
278	325		3			0,4	5,57	2,50	86,2	0,45
279	326		3			0,4	5,39	2,82	86,7	0,52
280	327		3			0,6	5,77	2,45	89,6	0,43
281	328		3			0,6	5,65	2,68	83,1	0,48
282	329		3			0,6	5,66	2,59	88,9	0,46
283	330		3			0,6	5,65	2,64	87,1	0,47
284	331	3	0,6	5,57	2,60	89,7	0,47			

α/α	ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	ΥΛΙΚΟ ΒΑΣΗΣ	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΣΦΑΙΡΑΣ d, (cm)	ΥΨΟΣ ΡΙΨΗΣ H, (cm)	ΥΓΡΑΣΙΑ w, (%)	ΠΑΧΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ t, (mm)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ v _p , (m/s)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ v _r , (m/s)	ΓΩΝΙΑ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ α _r , (ο)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ v _{COR} , (-)
	-	-								
285	332	ΕΠΑΛΕΙΨΗ ΜΕ ΑΡΓΙΛΟ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΞΗΡΑΝΣΗ	3	150	-	0,8	5,60	1,74	78,1	0,31
286	333		3			0,8	5,48	1,81	81,8	0,33
287	334		3			0,8	5,49	2,09	88,5	0,38
288	335		3			0,8	5,63	2,31	83,9	0,41
289	336		3			0,8	5,59	2,40	89,6	0,43
290	338		3			0,9	5,68	1,48	66,4	0,26
291	339		3			0,9	5,64	1,69	85,3	0,30
292	340		3			0,9	5,49	1,76	83,3	0,32
293	341		3			0,9	5,64	2,14	76,0	0,38
294	342		3			1,2	5,64	0,90	87,1	0,16
295	344		3			1,2	5,36	1,29	88,7	0,24
296	345		3			1,2	5,58	1,12	81,8	0,20
297	346		3			1,2	5,63	0,79	69,9	0,14
298	347		3			1,4	5,57	0,67	82,3	0,12
299	348		3			1,4	5,69	0,63	77,5	0,11
300	349		3			1,4	5,61	0,84	85,0	0,15
301	350		3			1,4	5,78	0,64	82,1	0,11
302	351	3	1,4	5,59	0,78	83,4	0,14			

α/α	ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	ΥΛΙΚΟ ΒΑΣΗΣ	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΣΦΑΙΡΑΣ d, (cm)	ΥΨΟΣ ΡΙΨΗΣ H, (cm)	ΥΓΡΑΣΙΑ w, (%)	ΠΑΧΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ t, (mm)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ v _p , (m/s)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ v _r , (m/s)	ΓΩΝΙΑ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ α _r , (ο)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ v _{CORr} , (-)
303	352	ΕΠΑΛΕΙΨΗ ΜΕ ΑΡΓΙΛΟ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΞΗΡΑΝΣΗ	3	100	-	0,1	4,65	2,88	87,7	0,62
304	353		3			0,1	4,39	2,86	82,2	0,65
305	354		3			0,1	4,54	2,68	84,8	0,59
306	355		3			0,1	4,57	2,93	87,7	0,64
307	356		3			0,1	4,59	2,84	87,9	0,62
308	357		3			0,2	4,60	2,85	85,2	0,62
309	358		3			0,2	4,48	2,73	87,9	0,61
310	359		3			0,2	4,45	2,58	84,6	0,58
311	360		3			0,2	4,45	2,76	87,2	0,62
312	361		3			0,2	4,63	2,50	87,6	0,54
313	362		3			0,2	4,70	2,87	88,8	0,61
314	363		3			0,2	4,48	2,42	84,6	0,54
315	364		3			0,2	4,51	2,48	80,2	0,55
316	365		3			0,2	4,70	2,68	81,3	0,57
317	366		3			0,2	4,50	2,43	86,3	0,54
318	367		3			0,4	4,44	2,15	85,8	0,48
319	368		3			0,4	4,60	2,43	81,2	0,53
320	369		3			0,4	4,40	2,52	88,6	0,57
321	370		3			0,4	4,54	2,32	86,7	0,51
322	371		3			0,4	4,74	2,09	89,4	0,44
323	372		3			0,9	4,47	1,61	85,9	0,36
324	373		3			0,9	4,37	1,66	88,1	0,38

α/α	ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	ΥΛΙΚΟ ΒΑΣΗΣ	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΣΦΑΙΡΑΣ d, (cm)	ΥΨΟΣ ΡΙΨΗΣ H, (cm)	ΥΓΡΑΣΙΑ w, (%)	ΠΑΧΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ t, (mm)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ v _p , (m/s)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ v _r , (m/s)	ΓΩΝΙΑ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ a _r , (ο)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ v _{COR} , (-)
325	374	ΕΠΑΛΕΙΨΗ ΜΕ ΑΡΓΙΛΟ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΞΗΡΑΝΣΗ	3	100	-	0,9	4,42	1,46	84,1	0,33
326	375		3			0,9	4,47	1,97	87,7	0,44
327	376		3			0,9	4,66	1,63	86,6	0,35
328	377		3			1	4,49	1,21	85,1	0,27
329	378		3			1	4,47	1,30	83,3	0,29
330	379		3			1	4,51	1,26	89,2	0,28
331	380		3			1	4,56	0,87	81,2	0,19
332	381		3			1	4,50	1,04	90,0	0,23
333	406		ΑΝΑΖΥΜΩΜΕΝΟ ΜΕΙΓΜΑ ΑΡΓΙΛΟΥ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΑΜΜΟ Μ34 (75% - 25%)			3	100	8,6	1,3	4,63
334	407	3		8,6	1,3	4,36		0,44	78,4	0,10
335	408	3		8,6	1,3	4,49		0,72	81,2	0,16
336	409	3		8,6	1,3	4,59		0,60	83,1	0,13
337	410	3		8,6	1,3	4,39		0,53	69,5	0,12
338	411	3		8,6	1,3	4,56		0,64	89,1	0,14
339	412	3		10	2,3	4,73		0,24	66,5	0,05
340	413	3		10	2,3	4,48		0,45	68,0	0,10
341	414	3		10	2,3	4,55		0,23	29,8	0,05
342	415	3		10	2,3	4,56		0,46	76,1	0,10
343	416	3		10	2,3	4,70		0,33	67,5	0,07
344	417	3		10	2,3	4,62		0,18	74,1	0,04

α/α	ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	ΥΛΙΚΟ ΒΑΣΗΣ	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΣΦΑΙΡΑΣ d, (cm)	ΥΨΟΣ ΡΙΨΗΣ H, (cm)	ΥΓΡΑΣΙΑ w, (%)	ΠΑΧΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ t, (mm)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ v _p , (m/s)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ v _r , (m/s)	ΓΩΝΙΑ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ a _r , (ο)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ v _{CORr} , (-)
345	382	ΑΝΑΖΥΜΩΜΕΝΟ ΜΕΙΓΜΑ ΑΡΓΙΛΟΥ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΑΜΜΟ Μ34 (50% - 50%)	3	100	5,3	1,4	4,51	1,08	88,1	0,24
346	383		3		5,3	1,4	4,47	1,25	86,0	0,28
347	384		3		5,3	1,4	4,71	1,08	88,8	0,23
348	385		3		5,3	1,4	4,51	1,13	82,0	0,25
349	386		3		5,3	1,4	4,60	1,24	84,7	0,27
350	387		3		5,3	1,4	4,63	0,97	81,7	0,21
351	388		3		7,1	2,3	4,64	0,70	77,7	0,15
352	389		3		7,1	2,3	4,42	0,75	76,1	0,17
353	390		3		7,1	2,3	4,40	0,53	70,8	0,12
354	391		3		7,1	2,3	4,45	0,58	85,3	0,13
355	392		3		7,1	2,3	4,55	0,82	86,3	0,18
356	393		3		7,1	2,3	4,67	0,61	85,1	0,13
357	394	ΑΝΑΖΥΜΩΜΕΝΟ ΜΕΙΓΜΑ ΑΡΓΙΛΟΥ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΑΜΜΟ Μ34 (25% - 75%)	3	100	3,1	1,9	4,47	1,25	84,6	0,28
358	395		3		3,1	1,9	4,47	1,03	87,2	0,23
359	396		3		3,1	1,9	4,69	1,22	84,5	0,26
360	397		3		3,1	1,9	4,73	1,04	87,3	0,22
361	398		3		3,1	1,9	4,44	1,33	87,5	0,30
362	400		3		6,5	2,6	4,46	0,76	81,6	0,17
363	401		3		6,5	2,6	4,69	0,56	75,0	0,12
364	402		3		6,5	2,6	4,58	0,64	76,3	0,14
365	403		3		6,5	2,6	4,44	0,44	85,9	0,10
366	404		3		6,5	2,6	4,59	0,69	67,3	0,15

α/α	ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	ΥΛΙΚΟ ΒΑΣΗΣ	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΣΦΑΙΡΑΣ d, (cm)	ΥΨΟΣ ΡΙΨΗΣ H, (cm)	ΥΓΡΑΣΙΑ w, (%)	ΠΑΧΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ t, (mm)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ v _p , (m/s)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ v _r , (m/s)	ΓΩΝΙΑ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ a _r , (ο)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ v _{COR} , (-)
367	430	ΑΝΑΖΥΜΩΜΕΝΟ ΜΕΙΓΜΑ ΑΡΓΙΛΟΥ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΑΜΜΟ Μ31 (75% - 25%)	3	100	10,4	1,6	4,62	0,42	83,7	0,09
368	432		3		10,4	1,6	4,56	0,68	81,3	0,15
369	433		3		10,4	1,6	4,42	0,57	72,2	0,13
370	434		3		10,4	1,6	4,55	0,50	70,0	0,11
371	435		3		10,4	1,6	4,45	0,31	53,0	0,07
372	436		3		11,2	2,1	4,56	0,00	0,0	0,00
373	437		3		11,2	2,1	4,42	0,00	0,0	0,00
374	439		3		11,2	2,1	4,46	0,13	71,5	0,03
375	440		3		11,2	2,1	4,41	0,22	52,7	0,05
376	441		3		11,2	2,1	4,58	0,09	63,9	0,02
377	418	ΑΝΑΖΥΜΩΜΕΝΟ ΜΕΙΓΜΑ ΑΡΓΙΛΟΥ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΑΜΜΟ Μ31 (50% - 50%)	3	100	6,7	1,7	4,46	0,67	89,3	0,15
378	419		3		6,7	1,7	4,46	0,85	74,2	0,19
379	420		3		6,7	1,7	4,45	0,62	63,8	0,14
380	421		3		6,7	1,7	4,63	0,46	84,2	0,10
381	422		3		6,7	1,7	4,65	0,74	80,8	0,16
382	423		3		6,7	1,7	4,64	0,93	76,6	0,20
383	424		3		8,9	2,3	4,52	0,41	71,3	0,09
384	425		3		8,9	2,3	4,55	0,36	84,6	0,08
385	426		3		8,9	2,3	4,45	0,36	87,7	0,08
386	427		3		8,9	2,3	4,51	0,54	81,3	0,12
387	428		3		8,9	2,3	4,64	0,46	67,0	0,10
388	429		3		8,9	2,3	4,35	0,30	81,7	0,07

α/α	ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	ΥΛΙΚΟ ΒΑΣΗΣ	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΣΦΑΙΡΑΣ d, (cm)	ΥΨΟΣ ΡΙΨΗΣ H, (cm)	ΥΓΡΑΣΙΑ w, (%)	ΠΑΧΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ t, (mm)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ v _p , (m/s)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ v _r , (m/s)	ΓΩΝΙΑ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ a _r , (ο)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ v _{cor} , (-)
389	442	ΑΝΑΖΥΜΩΜΕΝΟ ΜΕΙΓΜΑ ΑΡΓΙΛΟΥ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΑΜΜΟ Μ31 (25% - 75%)	3	100	3,8	1,6	4,58	1,10	87,8	0,24
390	443		3		3,8	1,6	4,63	1,30	79,0	0,28
391	444		3		3,8	1,6	4,72	1,27	87,0	0,27
392	445		3		3,8	1,6	4,66	1,03	63,2	0,22
393	446		3		3,8	1,6	4,55	0,86	85,9	0,19
394	447		3		3,8	1,6	4,44	1,33	78,6	0,30
395	448		3		7,1	2,2	4,53	0,36	84,5	0,08
396	449		3		7,1	2,2	4,46	0,76	82,6	0,17
397	450		3		7,1	2,2	4,43	0,53	45,1	0,12
398	451		3		7,1	2,2	4,35	0,57	58,7	0,13
399	452		3		7,1	2,2	4,71	0,42	86,1	0,09
400	453		3		7,1	2,2	4,53	0,41	57,8	0,09
401	454	ΑΜΜΟΣ Μ34 ΣΕ ΞΗΡΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	3	100	0	1	4,50	1,67	87,6	0,37
402	455		3			1	4,46	1,84	88,4	0,41
403	456		3			1	4,56	2,11	73,9	0,46
404	457		3			1	4,31	1,56	89,7	0,36
405	458		3			1	4,59	1,61	71,9	0,35
406	459		4			1	4,32	1,51	79,7	0,35
407	460		4			1	4,27	1,71	86,8	0,40
408	461		4			1	4,29	1,54	89,4	0,36
409	462		4			1	4,26	1,49	85,7	0,35
410	463		4			1	4,30	1,68	86,4	0,39

α/α	ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	ΥΛΙΚΟ ΒΑΣΗΣ	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΣΦΑΙΡΑΣ d, (cm)	ΥΨΟΣ ΡΙΨΗΣ H, (cm)	ΥΓΡΑΣΙΑ w, (%)	ΠΑΧΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ t, (mm)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ v _p , (m/s)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ v _r , (m/s)	ΓΩΝΙΑ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ α _r , (ο)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ v _{CORr} , (-)
411	464	ΑΜΜΟΣ Μ34 ΣΕ ΞΗΡΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	3	100	0	2	4,30	1,40	80,9	0,33
412	465		3			2	4,64	1,16	79,6	0,25
413	466		3			2	4,47	1,23	84,3	0,28
414	467		3			2	4,56	1,14	81,5	0,25
415	468		3			2	4,52	1,24	60,9	0,28
416	469		4			2	4,42	1,19	85,8	0,27
417	470		4			2	4,25	0,84	89,7	0,20
418	471		4			2	4,38	1,06	66,1	0,24
419	472		4			2	4,33	0,86	86,2	0,20
420	473		4			2	4,28	1,04	89,7	0,24
421	474		ΜΕΙΓΜΑ ΑΡΓΙΛΟΥ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΑΜΜΟ Μ34 ΣΕ ΞΗΡΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ (75% - 25%)			3	100	0	2	4,32
422	475	3		2	4,69	1,92			88,5	0,41
423	476	3		2	4,53	2,04			85,6	0,45
424	477	3		2	4,78	1,82			80,5	0,38
425	478	3		2	4,64	1,95			81,5	0,42
426	479	3		1	4,79	2,30			89,4	0,48
427	480	3		1	4,44	2,31			80,0	0,52
428	481	3		1	4,67	2,10			82,1	0,45
429	482	3		1	4,69	2,25			82,4	0,48
430	483	3		1	4,44	2,31			88,1	0,52

α/α	ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	ΥΛΙΚΟ ΒΑΣΗΣ	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΣΦΑΙΡΑΣ d, (cm)	ΥΨΟΣ ΡΙΨΗΣ H, (cm)	ΥΓΡΑΣΙΑ w, (%)	ΠΑΧΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ t, (mm)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ v _p , (m/s)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ v _r , (m/s)	ΓΩΝΙΑ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ α _r , (ο)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ v _{CORr} , (-)
431	484	ΜΕΙΓΜΑ ΑΡΓΙΛΟΥ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΑΜΜΟ Μ34 ΣΕ ΞΗΡΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ (50% - 50%)	3	100	0	2	4,51	1,34	87,3	0,30
432	485		3			2	4,67	1,49	88,3	0,32
433	486		3			2	4,85	1,65	84,4	0,34
434	487		3			2	4,60	1,52	88,5	0,33
435	488		3			2	4,52	2,29	86,0	0,51
436	489		3			1	4,52	2,10	88,1	0,46
437	492		3			1	4,74	1,94	88,5	0,41
438	493		3			1	4,91	2,28	89,5	0,46
439	495	ΜΕΙΓΜΑ ΑΡΓΙΛΟΥ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΑΜΜΟ Μ34 ΣΕ ΞΗΡΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ (25% - 75%)	3	100	0	2	4,32	1,56	86,0	0,36
440	496		3			2	4,72	1,56	83,3	0,33
441	497		3			2	4,72	1,65	85,6	0,35
442	498		3			2	4,89	1,42	83,9	0,29
443	499		3			1	4,48	1,75	84,7	0,39
444	500		3			1	4,54	2,32	88,9	0,51
445	501		3			1	4,31	1,81	85,6	0,42
446	502		3			1	4,38	1,84	87,3	0,42
447	503		3			1	4,90	1,86	79,7	0,38