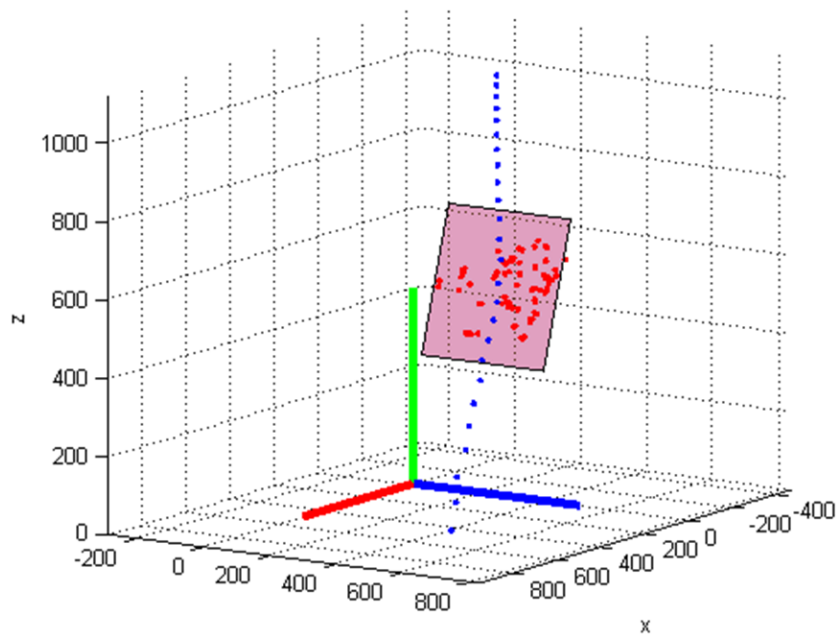




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ



**Τριδιάστατη ανάλυση βραχοπτώσεων
Εφαρμογές στο πεδίο και στο εργαστήριο**

**Αθανάσιος Κ. Βούδρης
Ηλίας Γ. Κωστόγιαννης**

Επιβλέπων καθηγητής:
Γεώργιος Τσιαμπάος

Αθήνα, Ιούλιος 2013

Στον Αντώνη

Ευχαριστίες

Στον επιβλέποντα καθηγητή Δρ. Γεώργιο Τσιαμπάο, καθηγητή της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. για την ευκαιρία που μας έδωσε να ασχοληθούμε και να εμβαθύνουμε σε ένα επιστημονικό αντικείμενο, ιδιαίτερου για εμάς ενδιαφέροντος.

Στα μέλη της τριμελούς επιτροπής, τον Δρ. Μιχάλη Καββαδά, Αναπληρωτή Καθηγητή της σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. του Τομέα Γεωτεχνικής, και τον Δρ. Βασίλη Παπαδόπουλο, Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. του Τομέα Γεωτεχνικής για το χρόνο που αφιέρωσαν στην παρούσα εργασία.

Θερμές ευχαριστίες οφείλουμε στον υποψήφιο διδάκτορα κ. Παύλο Αστερίου, για τη διαρκή επαφή, τις χρήσιμες συμβουλές και την αρμονική σχέση που είχαμε καθ'όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας.

Ευχαριστούμε επίσης τις οικογένειες μας, τους φίλους μας και όλους όσους μας βοήθησαν.

Περίληψη

Το φαινόμενο της κατάπτωσης των βραχοτεμαχών αποτελεί μία από τις σημαντικότερες κατηγορίες αστοχιών πρηνών με επιπτώσεις τόσο στα τεχνικά έργα όσο και στις ανθρώπινες ζωές. Προκειμένου να αποφευχθούν οι καταστροφικές συνέπειες του φαινομένου κρίνεται απαραίτητη η συστηματική μελέτη του καθώς επίσης και η κατασκευή αποτελεσματικών μέτρων ανάσχεσης, η οποία επιτυγχάνεται με τη χρήση κατάλληλων λογισμικών. Παρ' όλη την έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί από πολλούς ερευνητές, η συμπεριφορά των βραχοτεμαχών τη στιγμή της πρόσκρουσης παραμένει σε μεγάλο βαθμό αδιευκρίνιστη λόγω της πολυπλοκότητας του φαινομένου. Για τους απαιτούμενους υπολογισμούς χρησιμοποιούνται εκτός των άλλων ένας ή περισσότεροι συντελεστές αναπήδησης. Στη βιβλιογραφία, παρατίθενται διάφορες τιμές των συντελεστών αναπήδησης συναρτήσεως του γεωλικού. Η θεώρηση αυτή είναι ιδιαίτερα απλουστευτική καθώς οι συντελεστές εξαρτώνται και από άλλους παράγοντες όπως είναι τα χαρακτηριστικά του τεμάχους (βάρος, μέγεθος, σχήμα, αντοχή κ.α.), την κινηματική του (μεταφορική ή γωνιακή ταχύτητα πρόσκρουσης, γωνία πρόσκρουσης, προσανατολισμός του τεμάχους), ή τα χαρακτηριστικά της βραχώδους επιφάνειας της πλαγιάς (κλίση, τραχύτητα, αντοχή κ.α.). Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκαν δοκιμές εργαστηρίου και πεδίου με στόχο τον προσδιορισμό της επίδρασης του σχήματος, να γίνει συγκριτική αξιολόγηση μεταξύ των αποτελεσμάτων πεδίου και εργαστηρίου καθώς και να μελετηθεί η αποτελεσματικότητα της τρισδιάστατης ανάλυσης της τροχιάς των τεμαχών πάνω στο φαινόμενο. Χρησιμοποιήθηκαν τόσο στο εργαστήριο όσο και στο πεδίο σφαιρικά, κυβικά και πολυγωνικά τεμάχια για τη πραγματοποίηση των δοκιμών. Η τρισδιάστατη ανάλυση επιτεύχθηκε μέσω εφαρμογής της μεθόδου της στερεοφωτογραμμετρίας, η οποία αναπτύσσεται στα πλαίσια παράλληλης διδακτορικής διατριβής που γίνεται στο εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Βραχομηχανικής. Το σφάλμα της ανάλυσης κατά την επεξεργασία των δοκιμών ήταν αμελητέο. Η τροχιά των τεμαχών καταγραφόταν από ειδικές φωτομηχανές και αναλυόταν ώστε να προσδιοριστούν οι συντεταγμένες και κατ'επέκταση η ταχύτητα του τεμάχους πριν και μετά την κρούση και έτσι να υπολογιστούν οι αντίστοιχοι συντελεστές αναπήδησης. Κρίνοντας από τα αποτελέσματα των δοκιμών όσο πιο σφαιρική είναι η μορφή του τεμάχους, τόσο μεγαλύτερη είναι η γωνία αναπήδησης. Παράλληλα, με την αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης παρατηρείται εκθετική μείωση τόσο του κάθετου όσο και του ολικού συντελεστή αναπήδησης. Στις εργαστηριακές δοκιμές, για κλίσεις των επιφανειών πρόσπτωσης μεταξύ των 30° και 50° παρατηρούνται ελάχιστες τιμές του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης. Παρατηρήθηκε πολύ καλή γραμμική συσχέτιση μεταξύ γωνίας αναπήδησης και του κάθετου συντελεστή αναπήδησης. Στο πεδίο σε σύγκριση με το εργαστήριο ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης εμφανίζει τιμές μεγαλύτερες της μονάδας για μικρές γωνίες πρόσπτωσης. Παρ'όλο που οι κλίσεις των επιφανειών πρόσπτωσης μεταξύ του πεδίου και του εργαστηρίου έχουν διαφορά από 5° έως και 10°, οι τιμές του ολικού συντελεστή αναπήδησης έχουν το ίδιο εύρος και συγκλίνουν στις ίδιες τιμές, παρά την μεγάλη διαφοροποίηση της κινητικής ενέργειας κατά την κρούση.

Abstract

Rock falls are one of the most important natural hazards with consequences affecting both infrastructure and human beings. In order to avoid their disastrous effects, it is considered essential to study the principles of this phenomenon and construct appropriate mitigation measures, mostly using computational software. Despite previous studies conducted on rock falls by researchers, the motion of a rock mass along a slope remains relatively unexplained because of the complexity of the bounce phenomenon. One or more coefficients of restitution are used in order to study its behavior. In literature, different values for the coefficients of restitution are provided regarding the rock type material. However, this approach is extremely simplistic and misleading since the coefficients of restitution depend, amongst others, on the geometrical properties of the falling block (weight, size, shape, strength, stiffness), its kinematics (translational and rotational impact velocity, impact angle, block's orientation), the characteristics of the impact surface (inclination, roughness, strength, stiffness). In order to address the rock fall phenomenon, experiments in both the lab and the field were executed. The objectives of this dissertation were to determine the effect of the shape of the falling block upon on the coefficients of restitution, to compare the results of the lab and these of the field in order to address the scale effects and finally to review the effectiveness of the 3D measurement and visualization methodology of the rock fall trajectories, which is under development in the laboratory of Engineering Geology and Rock Mechanics of the National Technical University of Athens. Spherical, cubical and angular blocks were used for the experiments. The 3D measurement was achieved using the principles of stereo photogrammetry. The trajectories of the falling blocks were recorded by two digital cameras using a high recording rate (60 frames per second), and were analyzed using a customized Matlab code, in order to determine their coordinates and subsequently their velocity before and after the impact resulting to the determination of the coefficients of restitution. Results evaluation of current experimental study shows that, the more spherical becomes the shape of a block, the more increases the rebound angle. Furthermore, increasing the impact angle resulted to an exponential reduction of both the normal and the velocity coefficient of restitution. In the lab tests, the lowest values of the tangential coefficient of restitution were observed for impact angles between 30° to 50° . Furthermore, a relationship between the rebound angle and the normal restitution of coefficient was determined, exhibiting a linear trend. Comparing the results of the lab and the field tests, values of the normal restitution of coefficient exceeding unity, were mostly observed in the field, especially for low values of impact angle. Although the inclinations of the surfaces of the lab and the field differed by 10° , the values of the total restitution of coefficient have the same range and converge on the same values, beside the significantly large difference on the imposed kinetic energy levels between laboratory and field tests.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή.....	1
1.1	Γενικά στοιχεία.....	1
1.2	Διάρθρωση της εργασίας.....	2
1.3	Στόχοι της παρούσας διπλωματικής εργασίας.....	3
2	Θεωρητικά στοιχεία	4
2.1	Ορισμός φαινομένου	4
2.2	Ταξινόμηση των βραχοπτώσεων	5
2.3	Συστήματα εκτίμησης επικινδυνότητας	6
2.4	Αίτια βραχοπτώσεων	7
2.4.1	Γεωλογικές - υδρογεωλογικές διεργασίες.....	8
2.4.2	Σεισμική φόρτιση	9
2.4.3	Ανθρώπινη δραστηριότητα.....	9
2.5	Είδη κίνησης βραχοτεμαχών.....	10
2.5.1	Ελεύθερη πορεία.....	10
2.5.2	Ολίσθηση.....	11
2.5.3	Κύλιση	11
2.5.4	Αναπήδηση.....	12
2.6	Συντελεστές αναπήδησης	13
2.7	Μαθηματικές προσεγγίσεις	15
2.7.1	Έκφραση ταχυτήτων.....	16
2.7.2	Έκφραση ενεργειών	16
2.7.3	Συντελεστής περιστροφής	17
3	Μέθοδοι μελέτης βραχοπτώσεων	19
3.1	Ανάδρομες αναλύσεις καταπτώσεων	19
3.2	Εργαστηριακές δοκιμές.....	20
3.3	Δοκιμές πεδίου.....	21
3.4	Αναλύσεις με την χρήση προγραμμάτων Η/Υ.....	22
3.4.1	Δισδιάστατα (2-D) μοντέλα προσομοίωσης των τροχιών	22
3.4.2	Οιονεί-τρισδιάστατα μοντέλα προσομοίωσης των τροχιών (2.5-D μοντέλα).....	23
3.4.3	Τρισδιάστατα (3-D) μοντέλα προσομοίωσης των τροχιών.....	23



3.5	Παραδοχές προγραμμάτων	23
3.6	Βιβλιογραφική ανασκόπηση	25
3.6.1	Γενικές θέσεις από πειράματα πεδίου	25
3.6.2	Γενικές θέσεις από πειράματα εργαστηρίου	27
3.6.3	Γενικές θέσεις από ανάδρομες αναλύσεις	31
4	Βιβλιογραφική ανασκόπηση πειραμάτων πεδίου	32
4.1	Συγκεντρωτικά στοιχεία βιβλιογραφικής ανασκόπησης	46
5	Μέτρα αντιμετώπισης καταπτώσεων	50
5.1	Μεταλλικά πλέγματα	50
5.1.1	Συστήματα κουρτίνας – Draped Mesh/Nets (Drapery systems).....	50
5.1.2	Αγκυρωμένα δίχτυα – Anchored Mesh/Nets.....	52
5.2	Φράχτες ανάσχεσης	52
5.2.1	Εύκαμπτοι φράχτες	54
5.3	Οπλισμένα επιχώματα (MSE walls).....	56
5.3.1	Φράχτες-Τοίχοι αντιστήριξης σκυροδέματος	57
5.4	Υβριδικά συστήματα	58
5.5	Τάφροι περισυλλογής	59
5.6	Κανονιστικές διατάξεις.....	60
6	Πειραματική διερεύνηση	62
6.1	Στόχοι πειραματικής διερεύνησης.....	62
6.2	Πειραματική μέθοδος	62
6.2.1	Γενικές αρχές φωτογραμμετρίας	62
6.2.2	Στερεοσκοπική Φωτογραμμετρία	64
6.2.3	Βαθμονόμηση συστήματος μετρήσεων.....	65
6.3	Κατασκευή δοκιμών.....	69
6.3.1	Κατασκευή δοκιμών πεδίου.....	69
6.3.2	Κατασκευή δοκιμών πειραμάτων εργαστηρίου	71
6.4	Ιδιότητες υλικών.....	75
6.5	Περιγραφή δοκιμών Πεδίου	83
6.5.1	Γεωλογικό υπόβαθρο του Υμηττού.....	83
6.5.2	Θέση δοκιμών - Θέατρο Βράχων Βύρωνα	85



6.6	Δοκιμές Εργαστηρίου	89
6.6.1	Διαδικασία εκτέλεσης εργαστηριακών πειραμάτων	90
6.7	Όργανα και συσκευές.....	91
6.8	Επεξεργασία δοκιμών	92
6.8.1	Τρισδιάστατη αποτύπωση πρανούς	92
6.9	Σύστημα αξόνων Αναλύσεων.....	94
6.9.1	Εύρεση θέσεως τεμαχών.....	95
6.9.2	Υπολογισμός κινηματικών χαρακτηριστικών.....	97
7	Παρουσίαση-Αξιολόγηση αποτελεσμάτων	99
7.1	Παρουσίαση αποτελεσμάτων	99
7.2	Αξιολόγηση αποτελεσμάτων.....	102
7.2.1	Κάθετος συντελεστής αναπήδησης – Γωνία πρόσπτωσης	102
7.2.2	Κάθετος συντελεστής αναπήδησης – Γωνία αναπήδησης	105
7.3	Ολικός συντελεστής αναπήδησης – Γωνία πρόσπτωσης	107
7.4	Εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης – Γωνία πρόσπτωσης.....	109
7.5	Γωνία πρόσπτωσης – Γωνία εκτροπής	111
7.6	Γωνία αναπήδησης – Γωνία πρόσπτωσης	113
8	Σύνοψη.....	115
8.1	Συμπεράσματα.....	115
8.2	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	119
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	120
	Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία	120
	Ελληνική Βιβλιογραφία.....	124



Εικόνες

Εικόνα 1: Αποτέλεσμα κατάπτωσης βράχου, εξ αιτίας του σεισμού 6.6 R των Αλκυονίδων (1981)	2
Εικόνα 2: Κατάπτωση βραχοτεμαχών κατά μήκος της πλαγιάς	5
Εικόνα 3: Κατάπτωση μεγάλης μάζας βράχου στο οδικό δίκτυο των Ιωαννίνων	6
Εικόνα 4: Τα 4 είδη κίνησης των βραχοτεμαχών	10
Εικόνα 5: Είδη κίνησης ανάλογα με την κλίση του πρανούς	10
Εικόνα 6: Αποτελέσματα από διαδοχικές θέσεις βραχοτεμάχους	11
Εικόνα 7: Απεικόνιση της κύλισης του βραχοτεμάχους	12
Εικόνα 8: Αναπήδηση σφαιρικών δοκιμίων	13
Εικόνα 9: Παραμόρφωση του εδάφους κατά την πρόσπτωση σφαίρας	14
Εικόνα 10: Αναπτυσσόμενες ταχύτητες κατά την πρόσπτωση του τεμάχους	15
Εικόνα 11: Ανάστροφη ανάλυση του φαινομένου των βραχοπτώσεων για τον προσδιορισμό των τροχιών των βραχοτεμαχών	20
Εικόνα 12: Εργαστηριακή δοκιμή-προσομοίωση κατάπτωσης βραχοτεμάχους	21
Εικόνα 13: Δοκιμή πεδίου για τον προσδιορισμό των μέτρων προστασίας	22
Εικόνα 14: Συσχετισμός του ύψους πτώσης με την διανυόμενη απόσταση	26
Εικόνα 15: Τιμές του κάθετου συντελεστή αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης	27
Εικόνα 16: Τιμές του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης	28
Εικόνα 17: Πειραματική διάταξη και καταγραφή των θέσεων ενός τεμάχους κατά την εκτέλεση της τροχιάς του Πηγή: Chau <i>et al.</i> (1999)	28
Εικόνα 18: Εφαπτομενικός και κάθετος συντελεστής αναπήδησης	29
Εικόνα 19: Σύστημα κουρτίνας	51
Εικόνα 20: . Αστοχία λόγω αγκύρωσης σε αποσαθρωμένη ζώνη	51
Εικόνα 21: Αγκυρωμένα δίχτυα	52
Εικόνα 22: Φράχτης αναχαίτισης	53
Εικόνα 23: Ανάσχεση βράχου	53
Εικόνα 24: Αποσβεστήρας ενέργειας	54
Εικόνα 25: Λεπτομέρειες συστήματος φράχτη αναχαίτισης	56
Εικόνα 26: Μηχανικά σταθεροποιημένος τοίχος	56
Εικόνα 27: Οπλισμένα επιχώματα	57
Εικόνα 28: Καταστροφή από την πτώση βράχων	57
Εικόνα 29: Τοίχος αντιστήριξης	58
Εικόνα 30: Υβριδικά συστήματα	58
Εικόνα 31: Παράδειγμα σχεδιασμού τάφρου	60
Εικόνα 32: Δοκιμές συστημάτων πριν την εφαρμογή τους	61



Εικόνα 33: Φωτογραμμετρικά συστήματα μέτρησης συντεταγμένων	63
Εικόνα 34: Εικόνα βαθμονόμησης από αριστερή φωτομηχανή.....	66
Εικόνα 35: Εικόνα βαθμονόμησης από δεξιά φωτομηχανή.....	66
Εικόνα 36: Εντοπισμός των σημείων βαθμονόμησης	67
Εικόνα 37: Ανακατασκευή των εικόνων βαθμονόμησης στον τρισδιάστατο χώρο UVW (σε mm).....	67
Εικόνα 38: Προσδιορισμός των εξωτερικών παραμέτρων προσανατολισμού του στερεοζεύγους (σε mm)	68
Εικόνα 39: Παρασκευή ενέματος.....	69
Εικόνα 40: Καλούπι πολυγωνικού δοκιμίου	70
Εικόνα 41: Καλούπι πολυγωνικού δοκιμίου	70
Εικόνα 42: Καλούπι σφαιρικού δοκιμίου	70
Εικόνα 43: Καλούπι κυβικού δοκιμίου	71
Εικόνα 44: Δοκίμια πειράματος.....	71
Εικόνα 45: Δοκίμια.....	74
Εικόνα 46: Πίπτοντα τεμάχια εργαστηρίου	75
Εικόνα 47: Διαμόρφωση βραχωδών δοκιμίων.....	75
Εικόνα 48: Διάτρηση δοκιμίων βράχου	76
Εικόνα 49: Κοπή και λείανση άκρων κυλινδρικών βραχωδών δοκιμίων	76
Εικόνα 50: Δοκίμιο με τα μηκυνσιόμετρα κατά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.....	77
Εικόνα 51: Αστοχία ενέματος σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.....	77
Εικόνα 52: Δοκιμή εφελκυστικής αντοχής (Brazilian Test)	79
Εικόνα 53: Δοκίμιο ενέματος μετά την αστοχία του σε εφελκυσμό	80
Εικόνα 54: Εργαστηριακός εξοπλισμός για τη μέτρηση διάδοσης των υπερήχων	81
Εικόνα 55: Σφύρα Schmidt.....	82
Εικόνα 56: : Πρανές στον Υμηττό	84
Εικόνα 57: Πρανές στον Υμηττό.....	84
Εικόνα 58: Δορυφορική απεικόνιση χώρου διεξαγωγής πειράματος (Θέατρο Βράχων).....	85
Εικόνα 59: Θέση 1 – Υμηττός	86
Εικόνα 60: Θέση 2 – Υμηττός	87
Εικόνα 61: Θέση 2 - Υμηττός.....	88
Εικόνα 62: Διασπορά δοκιμίων.....	88
Εικόνα 63: Καταγραφή ρίψεων.....	89
Εικόνα 64: Φωτογραφικές μηχανές.....	92
Εικόνα 65: Εικόνες από τις δυο φωτομηχανές για την ανακατασκευή της επιφάνειας πρόσκρουσης	93
Εικόνα 66: Ομόλογα σημεία μεταξύ των δυο εικόνων.....	93
Εικόνα 67: Ομόλογα σημεία μεταξύ των δυο εικόνων που ανήκουν στην επιφάνεια πρόσκρουσης.....	93



Εικόνα 68: Τρισδιάστατη απεικόνιση του πρανούς στο σύστημα συντεταγμένων της φωτομηχανής (σε mm)	94
Εικόνα 69: Σύστημα αξόνων αναλύσεων (μονάδες διαγράμματος σε mm)	95
Εικόνα 70. Ανάλυση στα επίπεδα κίνησης.	97
Εικόνα 71: Χαρακτηριστικά μεγέθη	98
Εικόνα 72 : Αναπήδηση με γωνία αναπήδησης μεγαλύτερη της γωνίας πρόσπτωσης	105



Πίνακες

Πίνακας 1: Αίτια βραχοπτώσεων κατά Wyllie και Norrish (1996)	8
Πίνακας 2: Κύρια χαρακτηριστικά επιλεγμένων μοντέλων	24
Πίνακας 3: Τιμές συντελεστών αναπήδησης	33
Πίνακας 4: Τιμές συντελεστών αναπήδησης	34
Πίνακας 5: Φυσικές ιδιότητες υλικών πειράματος	35
Πίνακας 6: Μέση τιμή και τυπική απόκλιση κινηματικού συντελεστή αναπήδησης.....	35
Πίνακας 7: Μέση τιμή και τυπική απόκλιση κινηματικού συντελεστή αναπήδησης.....	36
Πίνακας 8: Τιμές του κάθετου και του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης για την 1η σειρά πειραμάτων στα Απέννινα	38
Πίνακας 9: Τιμές του κάθετου και του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης για την 2η σειρά πειραμάτων στα Απέννινα	38
Πίνακας 10: : Τιμές του κάθετου, του εφαπτομενικού και του ενεργειακού συντελεστή αναπήδησης	40
Πίνακας 11: Τιμές του κάθετου και του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης για δασική και μη περιοχή.....	41
Πίνακας 12: Τιμές του κάθετου, του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης και του συντελεστή ολίσθησης για τα πέντε πειράματα πεδίου στην Ιταλία	42
Πίνακας 13: Συντελεστές αναπήδησης και κύλισης για γεωυλικά.....	43
Πίνακας 14: Συντελεστές αναπήδησης.....	45
Πίνακας 15: Τιμές συντελεστών από τη βιβλιογραφία	46
Πίνακας 16: Επίδραση παραμέτρων στους συντελεστές	49
Πίνακας 17: Μεγέθη σχετικά με τους συντελεστές.....	73
Πίνακας 18: Υπολογισμός θλιπτικής αντοχής, E και ν	77
Πίνακας 19: Υπολογισμός εφελκυστικής αντοχής	79
Πίνακας 20 : Υπολογισμός E,ν μέσω υπερήχων	81
Πίνακας 21: Τιμές σφύρας Schmidt	82
Πίνακας 22: Στοιχεία θέσεων δοκιμών.....	85
Πίνακας 23: Θέση 1-Υμηττός	86
Πίνακας 24: Θέση 2-Υμηττός	87
Πίνακας 25: Αριθμός ρίψεων εργαστηρίου.....	90
Πίνακας 26: Ποσοστό δοκιμών που αναπήδησαν.....	91
Πίνακας 27: Αποτελέσματα πειραμάτων για κυβικά δοκίμια	99
Πίνακας 28: Αποτελέσματα πειραμάτων για πολυγωνικά δοκίμια	100
Πίνακας 29: Αποτελέσματα πειραμάτων για σφαιρικά δοκίμια	101
Πίνακας 30: Αποτελέσματα πειραμάτων για τεμάχια τυχαίου σχήματος	102
Πίνακας 31 : Συντελεστές αναπήδησης για κυβικά δοκίμια	116



Πίνακας 32 : Συντελεστές αναπήδησης για πολυγωνικά δοκίμια.....	117
Πίνακας 33 : Συντελεστές αναπήδησης για σφαιρικά δοκίμια	117
Πίνακας 34 : Συντελεστές αναπήδησης για τυχαία δοκίμια.....	118
Πίνακας 35 : Συντελεστές αναπήδησης για όλα τα σχήματα	118



Διαγράμματα

Διάγραμμα 1 : Διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων υλικών πειράματος	78
Διάγραμμα 2 : Γωνία πρόσπτωσης συναρτήσει του κάθετου συντελεστή αναπήδησης για κυβικά δοκίμια	102
Διάγραμμα 3 : Γωνία πρόσπτωσης συναρτήσει του κάθετου συντελεστή αναπήδησης για σφαιρικά δοκίμια	103
Διάγραμμα 4 : Γωνία πρόσπτωσης συναρτήσει του κάθετου συντελεστή αναπήδησης για πολυγωνικά δοκίμια	103
Διάγραμμα 5 : Γωνία πρόσπτωσης συναρτήσει των μέσων όρων των κάθετων συντελεστών αναπήδησης για όλα τα δοκίμια	104
Διάγραμμα 6 : Γωνία αναπήδησης συναρτήσει του κάθετου συντελεστή αναπήδησης για κυβικά δοκίμια	105
Διάγραμμα 7 : Γωνία αναπήδησης συναρτήσει του κάθετου συντελεστή αναπήδησης για σφαιρικά δοκίμια	106
Διάγραμμα 8 : Γωνία αναπήδησης συναρτήσει του κάθετου συντελεστή αναπήδησης για πολυγωνικά δοκίμια.	106
Διάγραμμα 9 : Γωνία πρόσπτωσης συναρτήσει του ολικού συντελεστή αναπήδησης για κυβικά δοκίμια	107
Διάγραμμα 10 : Γωνία πρόσπτωσης συναρτήσει του ολικού συντελεστή αναπήδησης για σφαιρικά δοκίμια	107
Διάγραμμα 11 : Γωνία πρόσπτωσης συναρτήσει του ολικού συντελεστή αναπήδησης για πολυγωνικά δοκίμια	108
Διάγραμμα 12 : Γωνία πρόσπτωσης συναρτήσει των μέσων όρων των ολικών συντελεστών αναπήδησης για όλα τα δοκίμια	108
Διάγραμμα 13 : Γωνία πρόσπτωσης συναρτήσει του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης για κυβικά δοκίμια	109
Διάγραμμα 14 : Γωνία πρόσπτωσης συναρτήσει του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης για σφαιρικά δοκίμια.....	109
Διάγραμμα 15 : Γωνία πρόσπτωσης συναρτήσει του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης για πολυγωνικά δοκίμια.....	110
Διάγραμμα 16 : Γωνία πρόσπτωσης συναρτήσει των μέσων όρων των εφαπτομενικών συντελεστών αναπήδησης για όλα τα δοκίμια	110
Διάγραμμα 17 : Γωνία εκτροπής συναρτήσει γωνίας πρόσπτωσης για κυβικά δοκίμια	111
Διάγραμμα 18 : Γωνία εκτροπής συναρτήσει γωνίας πρόσπτωσης για σφαιρικά δοκίμια	112
Διάγραμμα 19 : Γωνία εκτροπής συναρτήσει γωνίας πρόσπτωσης για πολυγωνικά δοκίμια.....	112
Διάγραμμα 20 : Γωνία αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης για τις δοκιμές εργαστηρίου.....	113
Διάγραμμα 21 : Γωνία αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης για τις δοκιμές πεδίου	114



1 Εισαγωγή

1.1 Γενικά στοιχεία

Με τον όρο κατάπτωση βραχώμαζας ή βραχόπτωση, χαρακτηρίζεται η αποκόλληση τμήματος βράχου από απότομο πρανές (με κλίση μεγαλύτερη των 30 μοιρών και συνήθως της τάξης των 70 με 90 μοιρών) κατά μήκος μιας επιφάνειας με μικρή ή σχεδόν μηδενική διατμητική αντοχή. Το φαινόμενο της κατάπτωσης των βραχοτεμαχών (rock fall), αποτελεί μία από τις σημαντικότερες κατηγορίες αστοχιών πρανών με επιπτώσεις τόσο στα τεχνικά έργα όσο και στις ανθρώπινες ζωές. Αν και οι καταπτώσεις βράχων δεν έχουν το ίδιο επίπεδο οικονομικού κινδύνου σε σχέση με άλλες μεγάλες καταστροφές τεχνικών έργων, παρ' όλα αυτά ο αριθμός των νεκρών από καταπτώσεις βράχων είναι ο ίδιος με τον αριθμό των ανθρώπων που σκοτώνονται από όλες τις άλλες μορφές αστοχίας που σχετίζονται με την αστάθεια των πρανών. Κρίνεται λοιπόν απαραίτητη η εκτενής μελέτη του φαινομένου, έτσι ώστε να είναι δυνατή η κατασκευή αποτελεσματικών μέτρων προστασίας.

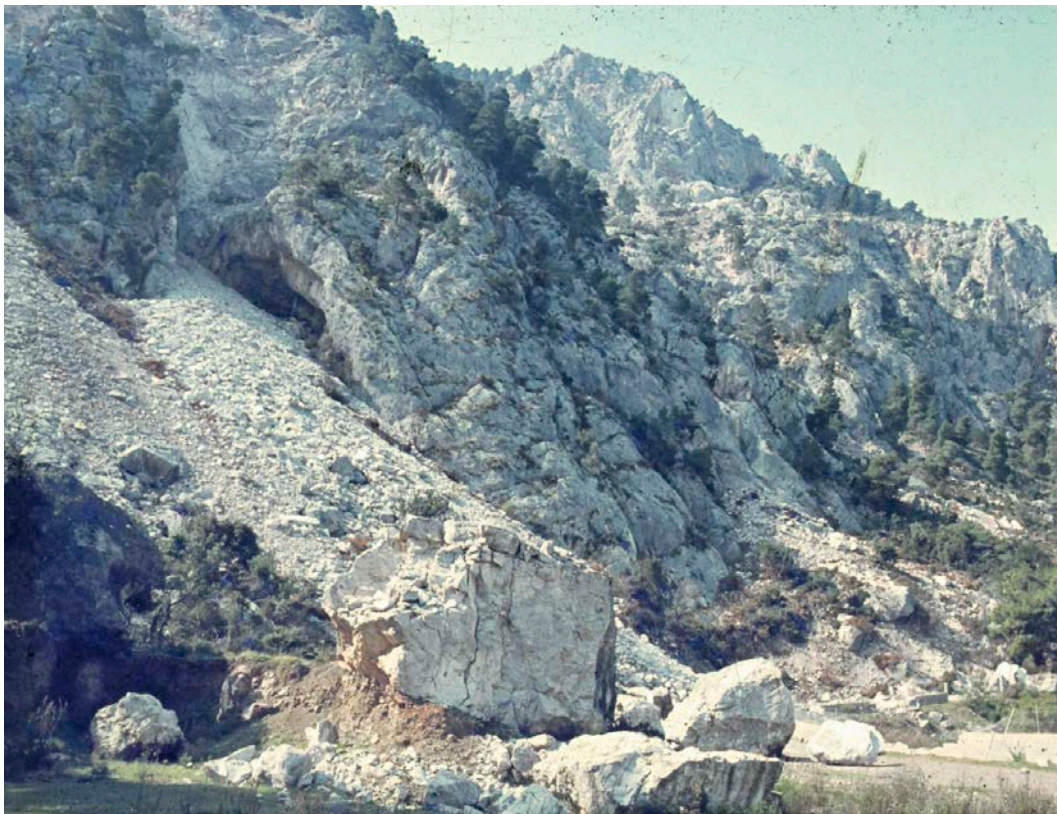
Στην πράξη η διαστασιολόγηση των μέτρων ανάσχεσης γίνεται με την βοήθεια υπολογιστικών προγραμμάτων. Λογισμικά όπως το RocFall ή το CRSP έχουν αναπτυχθεί και εφαρμοσθεί για την αξιολόγηση των τροχιών τις τελευταίες δύο δεκαετίες. Αυτά τα προγράμματα χρησιμοποιούν παραμέτρους για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του βραχοτεμάχου, υπολογίζουν τις πιθανές τροχιές και παρέχουν χρήσιμα στατιστικά στοιχεία για τον σχεδιασμό των μέτρων προστασίας. Για τους απαιτούμενους υπολογισμούς της διαδικασίας αυτής χρησιμοποιούνται ως δεδομένα στοιχεία όπως το γεωυλικό, η γεωμετρία του πρανού, το ανάγλυφο της ευρύτερης περιοχής μελέτης καθώς και οι συντελεστές αναπήδησης.

Οι συντελεστές αναπήδησης προσδιορίζονται τόσο από εργαστηριακές δοκιμές όσο και από δοκιμές πεδίου με τις τελευταίες να είναι ιδιαίτερα ακριβές και ριψοκίνδυνες. Οι συντελεστές αναπήδησης που χρησιμοποιούνται μέχρι και σήμερα στα διάφορα λογισμικά προσδιορίζονται λαμβάνοντας υπόψη το γεωυλικό αποκλείοντας έτσι άλλες παραμέτρους που τους επηρεάζουν. Πιο συγκεκριμένα, οι παράμετροι που επηρεάζουν τους συντελεστές αναπήδησης είναι: τα χαρακτηριστικά του βραχοτεμάχου (σχήμα, αντοχή, υλικό, σκληρότητα), τα χαρακτηριστικά του πρανού από το οποίο αποκολλάται το βραχοτέμαχος (κλίση, τραχύτητα, γεωυλικό πρανού) καθώς και οι αρχικές κινηματικές συνθήκες (αρχική ταχύτητα, γωνία πρόσκρουσης κ.α.).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκαν δοκιμές πεδίου και εργαστηρίου με στόχο την εξέταση της επίδρασης ορισμένων από τους παραπάνω παράγοντες πάνω στους συντελεστές αναπήδησης. Για τον σκοπό αυτό, κατασκευάστηκαν δοκίμια στο εργαστήριο σε διαφορετικά σχήματα από ένεμα υψηλής αντοχής και πραγματοποιήθηκαν ρίψεις-πειράματα μεσαίας κλίμακας στον Υμηττό. Παράλληλα, χρησιμοποιήθηκαν και φυσικά δοκίμια για την πραγματοποίηση των πειραμάτων τα οποία συλλέχθηκαν επί τόπου από την περιοχή μελέτης. Μέσα από τις δοκιμές αυτές έγινε προσπάθεια συσχέτισης χαρακτηριστικών, όπως το σχήμα του βραχοτεμάχου καθώς και τα χαρακτηριστικά της πλαγιάς με τους συντελεστές αναπήδησης. Η καταγραφή των τροχιών έγινε με την βοήθεια δύο φωτογραφικών μηχανών υψηλής ταχύτητας, ενώ η ανάλυση της κίνησης έγινε στις τρεις διαστάσεις με την χρήση πρωτότυπου κώδικα ηλεκτρονικού υπολογιστή που αναπτύσσεται στα πλαίσια της έρευνας του φαινομένου στο εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Βραχομηχανικής του Ε.Μ.Π. Για κάθε δοκιμή προσδιορίζονται: η ταχύτητα του βραχοτεμάχου πριν και μετά την κρούση, οι γωνίες πρόσκρουσης και αναπήδησης και η αλλαγή διεύθυνσης που προκαλείται εξ αιτίας της κρούσης τα οποία εν συνεχεία



χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των συντελεστών αναπήδησης και την συσχέτιση τους με τις διάφορες παραμέτρους που εξετάστηκαν.



Εικόνα 1: Αποτέλεσμα κατάπτωσης βράχου, εξ αιτίας του σεισμού 6.6 R των Αλκυονίδων (1981)

1.2 Διάρθρωση της εργασίας

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια γενική εισαγωγή στο φαινόμενο της κατάπτωσης των βραχοτεμαχών, ενώ το δεύτερο κεφάλαιο αποτελείται από θεωρητικά στοιχεία τα οποία σχετίζονται με τις βραχοπτώσεις. Πιο συγκεκριμένα, ορίζεται το φαινόμενο των βραχοπτώσεων, δίνονται ορισμοί που σχετίζονται με το εν λόγω φαινόμενο και αναπτύσσονται τα αίτια των καταπτώσεων. Στην συνέχεια, παρουσιάζεται ο τρόπος που μελετάται η εκτελούμενη τροχιά (είδη κίνησης βραχοτεμαχών), οι μαθηματικές σχέσεις που διέπουν το φαινόμενο των βραχοπτώσεων και τέλος, οι ορισμοί των συντελεστών αναπήδησης.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά οι μέθοδοι μελέτης που έχουν αναπτυχθεί, από τις απλές ανάδρομες αναλύσεις μέχρι τις εργαστηριακές δοκιμές, τις δοκιμές πεδίου έως τις πιο σύγχρονες αναλύσεις με χρήση τρισδιάστατης ανάλυσης μέσω ηλεκτρονικών υπολογιστών. Γίνεται επίσης βιβλιογραφική ανασκόπηση του φαινομένου, παρουσιάζοντας τις γενικές θέσεις και συμπεράσματα που έχουν προκύψει από αντίστοιχες μελέτες.

Στο τέταρτο κεφάλαιο πραγματοποιείται μια ενδελεχής έρευνα σε παλαιότερα πειράματα με σκοπό την εύρεση του ενδεδειγμένου τρόπου σχεδιασμού και εφαρμογής ανάλογων πειραμάτων ώστε να χρησιμοποιηθούν οι βέλτιστες τεχνικές στα δικά μας πειράματα. Δίνονται επίσης συγκεντρωτικά οι συντελεστές αναπήδησης που έχουν δημοσιευτεί μέχρι σήμερα.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα μέτρα ανάλυσης βραχοπτώσεων, αναλύονται οι αρχές λειτουργίας τους και δίδονται ενδεικτικές κατασκευαστικές λεπτομέρειες

Στο έκτο κεφάλαιο αναλύεται αρχικά η μεθοδολογία τρισδιάστατης μέτρησης και ανάλυσης των τροχιών των βραχοτεμαχών. Έπειτα, παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία, από την κατασκευή των δοκιμών, την περιγραφή των δοκιμών στο εργαστήριο και στο πεδίο, την επεξεργασία των δεδομένων έως τελικά τον υπολογισμό των συντελεστών αναπήδησης.

Στο έβδομο κεφάλαιο, παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα και γίνεται αξιολόγηση και σχολιασμός τους. Λεπτομερέστερα, τα αποτελέσματα κάθε μιας δοκιμής εργαστηρίου και πεδίου παρουσιάζεται στο παράρτημα.

Τέλος, στο όγδοο παρατίθενται τα συμπεράσματα που προέκυψαν, γίνεται σύγκριση με αυτά άλλων ερευνητών και προτείνονται βελτιώσεις για μελλοντική έρευνα.

1.3 Στόχοι της παρούσας διπλωματικής εργασίας

- 1) Να προσδιοριστεί η επίδραση του σχήματος πάνω στους συντελεστές αναπήδησης (κάθετος, εφαπτομενικός και συνολικός), χρησιμοποιώντας τρία διαφορετικά σχήματα (σφαίρα, πολύγωνο και κύβος) καθώς επίσης και τεμάχια τυχαίας μορφής.
- 2) Να μελετηθεί η επίδραση του φαινομένου της κλίμακας. Να πραγματοποιηθεί, δηλαδή, συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του εργαστηρίου με εκείνα του πεδίου και να εκτιμηθεί εν τέλει πόσο επιδρά η κλίμακα πάνω στον προσδιορισμό των συντελεστών αναπήδησης.
- 3) Να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα της τρισδιάστατης ανάλυσης της τροχιάς των τεμαχών πάνω στο φαινόμενο, σε αντίθεση με παλαιότερες μελέτες οι οποίες βασίζονται σε δισδιάστατες αναλύσεις για την εκτίμηση των συντελεστών αναπήδησης.



2 Θεωρητικά στοιχεία

2.1 Ορισμός φαινομένου

Με τον όρο κατάπτωση βραχώμαζας ή βραχόπτωση χαρακτηρίζεται η αποκόλληση τμήματος βράχου από απότομο πρηνές (με κλίση μεγαλύτερη των 30 μοιρών και συνήθως της τάξεως των 70 με 90 μοιρών) κατά μήκος μιας επιφάνειας με μικρή ή σχεδόν μηδενική διατμητική αντοχή. Το μέγεθος των βραχοτεμαχών ποικίλει, από μικρές κροκάλες μέχρι και μεγάλους ογκολίθους με όγκο εκατοντάδων κυβικών μέτρων, και ταχύτητα κίνησης κυμαινόμενη από λίγα έως και δεκάδες μέτρα το δευτερόλεπτο. Ο Varnes (1978) όρισε την κατάπτωση ως την κίνηση ενός βραχώδους όγκου οποιουδήποτε μεγέθους, λόγω βαρύτητας με τη μορφή ελεύθερης πτώσης, κύλισης ή αναπήδησης του τεμάχους, η οποία προκαλείται από την απότομη αποκόλλησή του από πρηνή με μεγάλη κλίση, κατά μήκος μιας επιφάνειας στην οποία δεν εκδηλώνεται σημαντική κίνηση. Η κίνηση είναι γρήγορη και συνήθως αυξάνει προς τα κάτω λόγω της επιτάχυνσης της βαρύτητας. Πρόκειται για συνήθη φαινόμενα σε απότομα βραχώδη πρηνή και ακτές, λόγω της δράσεως των κυμάτων ή λόγω σεισμικών κινήσεων. Οι Chen et al. (1994) όρισαν τις βραχοπτώσεις ως απότομες κινήσεις ανεξάρτητων τεμαχών από απότομα πρηνή. Οι Lee και Elliot (1998) τις ορίζουν ως προς τα κάτω κίνηση βράχων σε φυσικές πλαγιές ή βραχοτεμαχών αποκοπτόμενων από ελεύθερα μέτωπα πρηνών, που αν δεν περιορίζονται ενέχουν τον κίνδυνο να καταστρέψουν ή να βλάψουν κατά την πορεία τους, κατασκευές ή να εμποδίσουν την ομαλή κυκλοφορία μιας οδού. Ο Sprang (1987) πρότεινε τον περιορισμό χρησιμοποίησης του όρου «βραχόπτωση» στις καταπτώσεις που εκδηλώνουν μέγιστη ενέργεια 500 KNm, που αντιστοιχεί στην πτώση ενός όγκου μάζας 5 τόνων από ύψος 5 μέτρων. Θεωρεί, επίσης, ότι πιθανές καταπτώσεις μεγαλύτερης κινητικής ενέργειας απαιτούν ενεργητικά μέτρα αντιμετώπισής τους καθώς μόνο με παθητικά θα ήταν αδύνατον. Αντίστοιχα, οι Chang et al. (1986) σχεδίασαν φράχτες αναχαίτισης ικανούς να ανταπεξέλθουν σε σύγκρουση ενέργειας 100 KNm, ενώ για μεγαλύτερες ενέργειες απαιτείται επί τόπου σταθεροποίηση των επικίνδυνων τεμαχών. Ο Richards (1988) προσπάθησε να συνοψίσει τα αποδεκτά χαρακτηριστικά μιας κατάπτωσης και τον ορισμό της ως βραχόπτωση ως εξής : Το γεγονός περιλαμβάνει ένα ή μια ομάδα τεμαχών που αποκολλούνται από ένα μέτωπο πρηνούς. Κάθε κομμάτι συμπεριφέρεται λιγότερο ή περισσότερο ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα. Υπάρχει αποκόλληση από το υποκείμενο επίπεδο, μεγάλη επιτάχυνση κατά την πτώση και ανάπτυξη σημαντικής κινητικής ενέργειας.

Οι καταπτώσεις βραχοτεμαχών αποτελούν μια πολύ συνηθισμένη γεωμορφολογική διαδικασία με μεγάλο, όμως, βαθμό επικινδυνότητας κυρίως στις ορεινές περιοχές και κατά μήκος τεχνητών πρηνών, όπου μπορεί ενδεχομένως να απειλήσει ανθρώπινες ζωές, συγκοινωνιακά δίκτυα, οικισμούς, εξοπλισμούς και εγκαταστάσεις. Στις θέσεις όπου το φαινόμενο των κατακρημνίσεων είναι συχνό, δημιουργούνται απότομα μέτωπα πάνω στο βραχώδες πρηνές, ενώ στον πόδα του συγκεντρώνονται τεμάχη αποσαθρωμένων υλικών (Σακκελαρίου κ.α., 1995) .

Οι καταπτώσεις βράχων συμβαίνουν όταν μια μάζα βράχων αποκοπεί από το μητρικό πέτρωμα και είναι δυνατή η προς τα κάτω κίνησή της.





Εικόνα 2: Κατάπτωση βραχοτεμαχών κατά μήκος της πλαγιάς

Πηγή: geology.com

2.2 Ταξινόμηση των βραχοπτώσεων

Δεν είναι εύκολο να ταξινομηθούν με απλό τρόπο, καθώς εξαρτώνται άμεσα από την κατάσταση του πρανούς. Βάσει της δυνατότητας αλληλεπίδρασης των βραχοτεμαχών, ο Rochet (1987) ταξινόμησε τις καταπτώσεις σε τέσσερις κατηγορίες:

- ❖ Την κατάπτωση ενός μόνο βραχοτεμάχους
- ❖ Την κατάπτωση μάζας βράχου
- ❖ Την κατάπτωση πολύ μεγάλης μάζας βράχου
- ❖ Την μετατόπιση μάζας (κατολίσθηση)

Οι δύο πρώτες κατηγορίες, οι οποίες ορίζονται επίσης και ως «καταπτώσεις βραχοτεμαχών», χαρακτηρίζονται από μηδενική ή αμελητέα αλληλεπίδραση μεταξύ των τεμαχών που πέφτουν. Ακόμα και όταν περιλαμβάνουν περιορισμένα σε όγκο βραχοτεμάχη, οι καταπτώσεις είναι εξαιρετικά επικίνδυνες λόγω της υψηλής χωρικής και χρονικής τους επανάληψης.



Εικόνα 3: Κατάπτωση μεγάλης μάζας βράχου στο οδικό δίκτυο των Ιωαννίνων

Πηγή: epirusgate.blogspot.com

Παράλληλα, ανάλογα με το μέγεθος της έκτασης του φαινομένου, μπορούν να διακριθούν σε τρεις κατηγορίες:

- ❖ Καταπτώσεις μεγάλης κλίμακας με διαστάσεις φυσικής καταστροφής
- ❖ Καταπτώσεις μικρότερης κλίμακας που επηρεάζουν ορεινά συγκοινωνιακά δίκτυα και δίκτυα τα οποία διέρχονται μέσα από ορύγματα
- ❖ Καταπτώσεις μικρότερης έκτασης που είναι όμως επικίνδυνες

Επιπλέον των περιπτώσεων που έχουν χαρακτήρα μαζικό, συμβαίνουν και μεμονωμένες καταπτώσεις βραχοτεμαχών για τον περιορισμό των οποίων πρέπει να πραγματοποιούνται τακτικές επιθεωρήσεις στις επισφαλείς θέσεις.

2.3 Συστήματα εκτίμησης επικινδυνότητας

Η εκτίμηση του κινδύνου έναντι καταπτώσεων σε ορεινές περιοχές (κατοικημένες περιοχές, οδικά-σιδηροδρομικά δίκτυα) έχει ιδιαίτερη σημασία, αφού η απόφαση για το αν θα κατασκευαστούν μέτρα προστασίας σε μια περιοχή και σε ποιες θέσεις θα εγκατασταθούν γίνεται έχοντας ως βάση την εκτίμηση.

Στην βιβλιογραφία συναντώνται διάφορα συστήματα εκτίμησης του κινδύνου, όπου σε κάθε ένα λαμβάνονται υποψιών ένα πλήθος παραμέτρων, οι οποίες είναι συχνά διαφορετικές μεταξύ των συστημάτων. Ενδεικτικά, παρατίθενται τα κάτωθι 9 συστήματα εκτίμησης της επικινδυνότητας των βραχωδών πρηνών (Κουλούρη, 2011):

- 1) Oregon's Rocfall Hazard Risk Assessment
- 2) Rockfall Hazard Rating System, από εμπειρία καταπτώσεων που έχουν εκδηλωθεί στον Ελλαδικό χώρο
- 3) National Highway Institute's Hazard Risk Assessment
- 4) Tennessee's Rockfall Hazard Risk Assessment

- 5) Three Gorges' Rockfall Risk Assessment System
- 6) The Modified Colorado Hazard Risk Assessment
- 7) WSDOT's Unstable Slope Management Program
- 8) Canadian (CN) Rockfall Hazard Risk Management System
- 9) Quantitative assessment of the residual risk in a rockfall protected area

Το πιο αξιόπιστο και ευρέως διαδεδομένο από τα παραπάνω συστήματα είναι το Rockfall Hazard Rating System (RHRS), το οποίο χρησιμοποιείται σε πολλές πολιτείες της Αμερικής αλλά και της Ευρώπης. Το σύστημα αυτό αναπτύχθηκε από τους Pierson et al. (1990) για λογαριασμό της υπηρεσίας αυτοκινητοδρόμων του Oregon (ODOT-Oregon Department of Transportation). Οι παράμετροι που χρησιμοποιεί το εν λόγω σύστημα είναι οι εξής:

- ❖ Το ύψος του πρηνούς
- ❖ Η αποτελεσματικότητα της τάφρου της οδού
- ❖ Η πιθανότητα παρουσίας οχήματος στην περιοχή της κατάπτωσης
- ❖ Η επάρκεια του χρόνου αντίδρασης του οδηγού
- ❖ Το πλάτος του οδοστρώματος (για την δυνατότητα του οδηγού να προβεί σε απότομους ελιγμούς)
- ❖ Η κατάσταση των συνεχειών (τραχύτητα) καθώς και ο προσανατολισμός τους
- ❖ Ο βαθμός και ο ρυθμός αποσάθρωσης - διάβρωσης των πετρωμάτων
- ❖ Το μέγεθος και η ποσότητα των τεμαχίων
- ❖ Το κλίμα και η παρουσία νερού στο πρηνές
- ❖ Το ιστορικό καταπτώσεων στην υπό μελέτη περιοχή

2.4 Αίτια βραχοπτώσεων

Οι καταπτώσεις βράχων κατά τον Hoek (2000) σχετίζονται με ορισμένα κλιματικά ή φυσικά γεγονότα τα οποία μπορούν να επιφέρουν αλλαγή στις δυνάμεις που ενεργούν στο βράχο. Συνήθως, η χαλάρωση των βράχων συνδέεται με την ύπαρξη ασυνεχειών. Αναλυτικότερα, οι καταπτώσεις βράχων σχετίζονται με την αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων λόγω διείσδυσης του βρόχινου νερού, τη διάβρωση, την αποσάθρωση, τον παγετό, την υποσκαφή λόγω εναλλαγής συνεκτικών και χαλαρών σχηματισμών, τη διαταραχή από υπερκείμενους βράχους, τη δράση του ριζικού συστήματος, τη θερμική διαστολή-συστολή και τους σεισμούς. Επίσης οι κατασκευαστικές δραστηριότητες είναι πιθανόν να αυξήσουν την επιδεκτικότητα του βράχου στο φαινόμενο της κατάπτωσης βραχοτεμαχίων σε σχέση με τα κλιματικά ή φυσικά γεγονότα.

Σύμφωνα με τους Wyllie και Norrish (1996), από τα συμπεράσματα που έβγαλαν από αναλύσεις βραχοπτώσεων σε πρηνή οδοποιία στην περιοχή της Καλιφόρνια, οι αιτίες ποσοτικοποιούνται όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα :

Πίνακας 1: Αίτια βραχοπτώσεων κατά Wyllie και Norrish (1996)

Αιτία	Ποσοστό (%)
Βροχή	30
Θραύση λόγω πάγου	21
Αστοχία σφήνας	12
Άνεμος	12
Τήξη χιονιού	8
Απορροή επί του πρηνούς	7
Ανάστροφες ασυνέχειες	5
Φωλιές ζώων	2
Αποσάθρωση	1
Ρίζες δέντρων	0,6
Υδάτινες πηγές	0,6
Κυκλοφορία ζώων	0,3
Δονήσεις μηχανών	0,3
Διάβρωση εδάφους	0,3

Αναλυτικότερα, οι αιτίες καταπτώσεων παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους.

2.4.1 Γεωλογικές - υδρογεωλογικές διεργασίες

Ο τρόπος γένεσης και η επακόλουθη τεκτονική καταπόνηση κάθε πετρώματος, με την ρωγμάτωσή του, έχουν σαν αποτέλεσμα να προσδίδονται σε αυτό διαφορετικές ιδιότητες και χαρακτηριστικά. Ακόμα περισσότερο, η διαφορετική ορυκτολογική σύσταση και η αντοχή κάθε επιμέρους ορυκτού, που συνιστά το πέτρωμα, έχουν ιδιαίτερη βαρύτητα στη τιμή της αντοχής και στην ευκολία αποσάθρωσης του σχηματισμού, και έτσι στο μεγάλο εύρος διαφορετικών γεωλογικών συμπεριφορών. Το φαινόμενο της αποσάθρωσης καθορίζει κυρίως την ποιότητα της βραχώμαζας. Διακρίνεται στη μηχανική αποσάθρωση (θρυμματισμός του πετρώματος χωρίς αλλαγή της χημικής σύστασής του) και τη χημική αποσάθρωση. Κύριοι συντελεστές της μηχανικής αποσάθρωσης είναι:

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



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

- ❖ η διάλυση (η παρουσία ακόμα και μικρής ποσότητας οξέος στο νερό αυξάνει τη διαλυτική του ικανότητα)
- ❖ η υδρόλυση (θετικά ιόντα του πλέγματος των ορυκτών αντικαθίστανται από ελεύθερα ιόντα υδρογόνου του νερού, με αποτέλεσμα τα ορυκτά να αποσυντίθενται)
- ❖ η οξειδωση (χημικές ενώσεις με το οξυγόνο)

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

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

2.4.2 Σεισμική φόρτιση

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

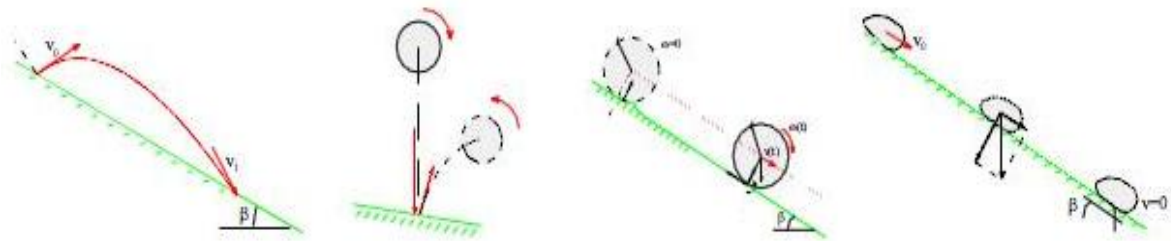
2.4.3 Ανθρώπινη δραστηριότητα

Ένας ακόμα παράγοντας που μπορεί να προκαλέσει βραχοπτώσεις είναι η ανθρώπινη δραστηριότητα. Για παράδειγμα, σε προγραμματισμένες εργασίες καθαίρεσης, η ελεγχόμενη απομάκρυνση ενός μικρού τεμάχους μπορεί να προκαλέσει την αποσφήνωση ενός μεγαλύτερου βράχου. Ακόμα, οι εργασίες ανατίναξης βραχωδών όγκων προκαλούν δυναμική διέγερση (τεχνητές δονήσεις) παρόμοια με αυτή των σεισμικών φαινομένων, με διαφορά την πολύ μικρότερη έντασή της. Έτσι, με τον μηχανισμό που προαναφέρθηκε δύνανται να αποκολληθούν επισφαλή τεμάχια.

2.5 Είδη κίνησης βραχοτεμαχών

Η τροχιά βραχόπτωσης μπορεί να προσομοιωθεί σαν ένας συνδυασμός τεσσάρων κινήσεων:

- 1) ελεύθερη πορεία στον αέρα (free flight),
- 2) ολίσθηση (sliding),
- 3) κύλιση (rolling) και
- 4) αναπήδηση (bouncing)



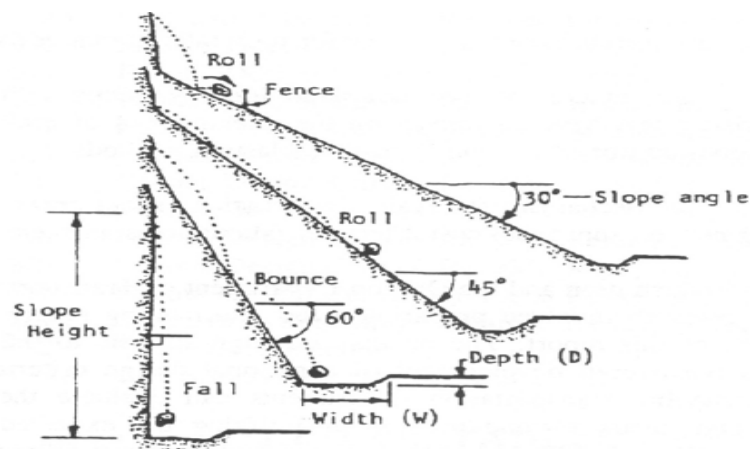
Εικόνα 4: Τα 4 είδη κίνησης των βραχοτεμαχών

Πηγή: Descoeudres, 1987

2.5.1 Ελεύθερη πορεία

Θεωρώντας ότι η αντίσταση του αέρα δεν έχει επίδραση στην κίνηση του βραχοτεμάχου και αμελώντας τις κρούσεις που παρεμβάλλονται, η τροχιά του βραχοτεμάχου, η οποία περιγράφεται από το κέντρο μάζας του, μπορεί να θεωρηθεί παραβολική (Ritchie, 1963). Εκτελώντας επί τόπου (in situ) δοκιμές, παρατήρησε ότι το κύριο είδος της κίνησης (Εικόνα 5) ανά κατηγορία είναι:

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



Εικόνα 5: Είδη κίνησης ανάλογα με την κλίση του πρανούς

Πηγή: Ritchie, 1963

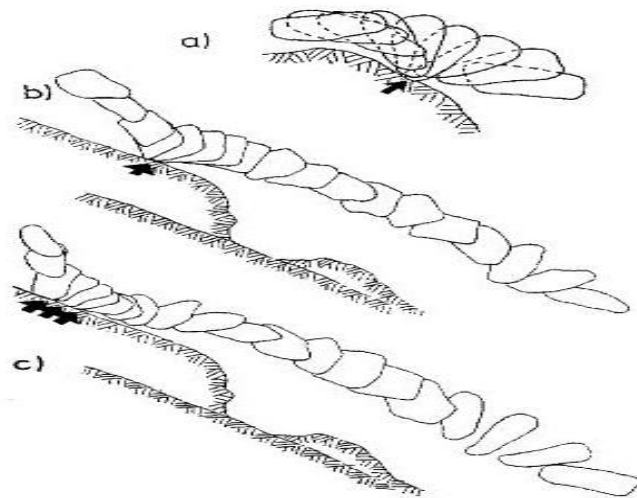
2.5.2 Ολίσθηση

Θεωρώντας ότι ένα βραχοτέμαχος έρχεται σε επαφή με το πρηνές χωρίς να περιστρέφεται παρά μόνο ολισθαίνοντας, η δύναμη αντίστασης, η οποία επηρεάζει το μήκος που θα διανυθεί από το βραχοτέμαχος μέχρι την θέση ηρεμίας του περιγράφεται από τον νόμο του Coulomb μέσω της σχέσης:

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

όπου μ είναι ο συντελεστής τριβής, m είναι η μάζα του βραχοτεμάχου, g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας και β είναι η κλίση του πρηνούς. Η φορά της δύναμης F είναι αντίθετη της ταχύτητας του βραχοτεμάχου και εφαρμόζεται στο σημείο επαφής. Τυπικές τιμές του συντελεστή τριβής μ κυμαίνονται από 0,6 έως 1.

Ένα τέμαχος μπορεί να ολισθήσει μέχρι το τέλος της κίνησής του σε μία νέα θέση ισορροπίας ή η ολίσθηση να μετατραπεί σε περιστροφή. Ο νόμος του Coulomb παρέχει χρήσιμες πληροφορίες για μια ποιοτική προσέγγιση του φαινομένου της ολίσθησης.



Εικόνα 6: Αποτελέσματα από διαδοχικές θέσεις βραχοτεμάχου

Πηγή: D. Bozzolo and R. Pamini, 1986

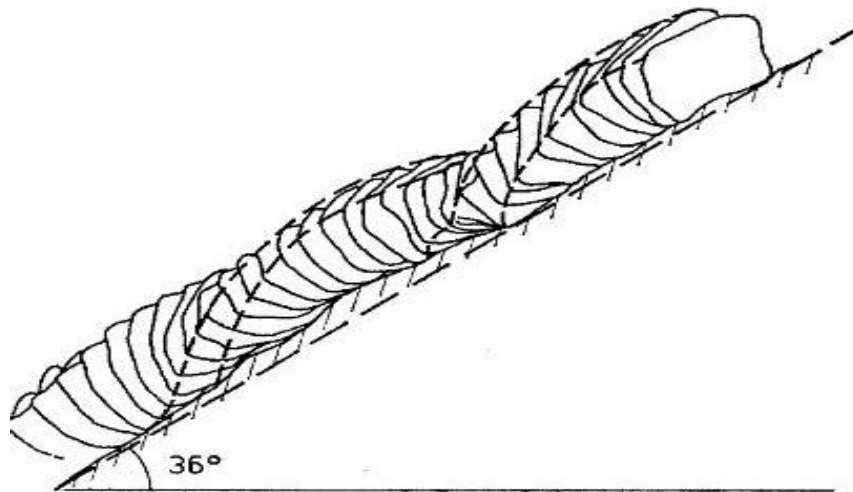
2.5.3 Κύλιση

Στην περίπτωση αυτή θεωρείται ένα βραχοτέμαχος το οποίο έρχεται σε επαφή με το έδαφος και εμφανίζεται μόνο το φαινόμενο της περιστροφικής κίνησης. Πολλές φορές η κύλιση συνδυάζεται με την ολίσθηση με αποτέλεσμα να προκύπτει ένα πιο πολύπλοκο φαινόμενο το οποίο κάθε φορά θα πρέπει να αναλύεται σε δύο συνιστώσες. Σύμφωνα με τον Statham (1979), ο οποίος διεξήγαγε μια σειρά εργαστηριακών και επί τόπου πειραμάτων, μια πιο ακριβής περιγραφή αυτού του σύνθετου φαινομένου μπορεί να περιγραφεί χρησιμοποιώντας και πάλι τον νόμο του Coulomb με τον συντελεστή ολίσθησης να εξαρτάται κυρίως από τις ιδιότητες του πρηνούς, από την παρακάτω σχέση.

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

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

Όπου μ είναι ο συντελεστής ολίσθησης και μ_0 και κ είναι δύο σταθερές με τιμές από 0,37 έως 0,67 και 0,17 έως 0,26 αντίστοιχα. Τα d' και d είναι το μήκος επαφής του εδάφους με το τέμαχος και η διάμετρός του αντίστοιχα.



Εικόνα 7: Απεικόνιση της κύλισης του βραχοτεμάχους

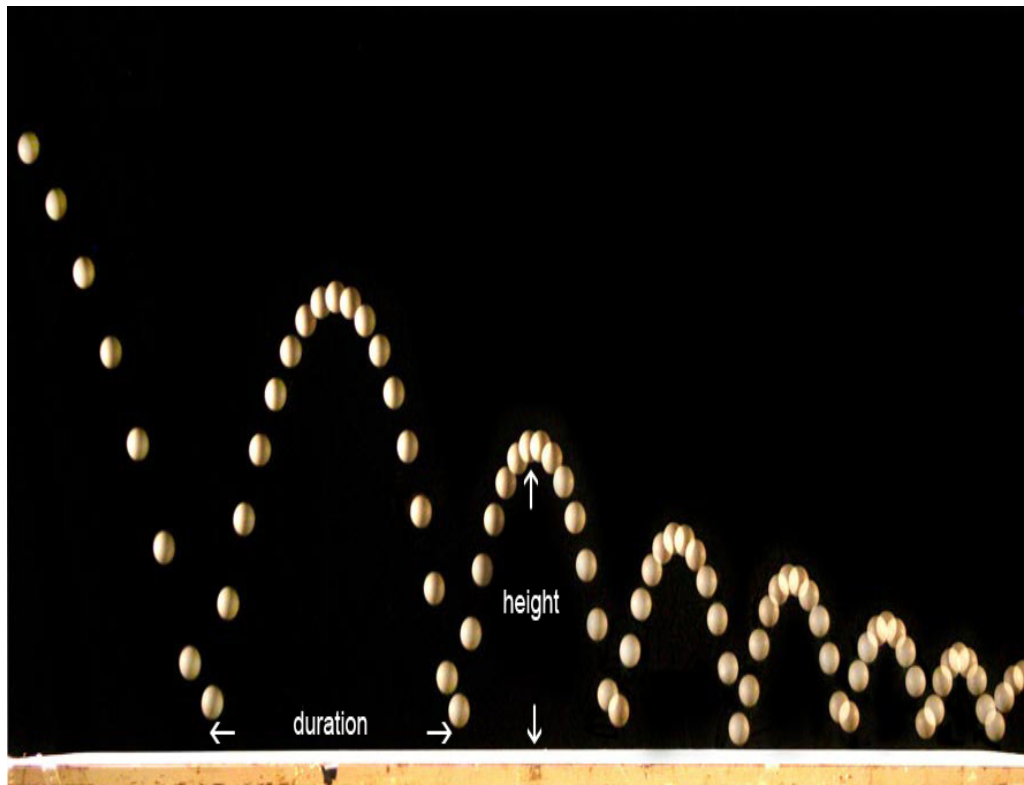
Πηγή: D. Bozzolo and R. Pamini, 1986

2.5.4 Αναπήδηση

Από τους πιθανούς τύπους κίνησης που αναφέρθηκαν προηγουμένως, η αναπήδηση είναι ένα φαινόμενο ιδιαίτερα πολύπλοκο και απρόβλεπτο, πράγμα που αυξάνει τη δυσκολία μελέτης και κατανόησής του.

Οι περισσότερες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται σήμερα αναπαριστούν την αναπήδηση με έναν απλοποιημένο τρόπο, χρησιμοποιώντας συντελεστές για να περιγράψουν την απώλεια ταχύτητας που συμβαίνει κατά την διάρκεια της πρόσκρουσης. Οι συντελεστές αυτοί καλούνται συντελεστές αναπήδησης και εκφράζουν το ποσό της ταχύτητας ή ενέργειας που χάνεται κατά την κρούση. Η μαθηματική έκφραση των συντελεστών αναπήδησης δεν είναι καθολικά καθορισμένη, αποδεικνύοντας με αυτό τον τρόπο την φτωχή κατανόηση του φαινομένου. Ωστόσο, οι συντελεστές αναπήδησης αποτελούν την πιο κρίσιμη παράμετρο για την προσομοίωση της τροχιάς και τον έλεγχο της απώλειας ταχύτητας και κινητικής ενέργειας κατά την κρούση. Συνεπώς, η αξιοπιστία οποιασδήποτε ανάλυσης τροχιάς εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την σωστή επιλογή παραμέτρων υπολογισμού, γεγονός που συμπεριλαμβάνει και την ορθολογική απόδοση των συντελεστών. Έτσι, για την εκτέλεση μιας πιο αξιόπιστης ανάλυσης και για την επίτευξη πιο λογικών προβλέψεων είναι επιβεβλημένη η καλύτερη δυνατή γνώση του φαινομένου της αναπήδησης και της απώλειας ενέργειας κατά την κρούση. Συνεπώς, κρίνεται απαραίτητη η ακριβής παρατήρηση και ανάλυση του φαινομένου για την εξακρίβωση των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στις μεθόδους ανάλυσης καταπτώσεων. Για την συλλογή αυτών των πληροφοριών χρησιμοποιούνται οι παρακάτω μέθοδοι:

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

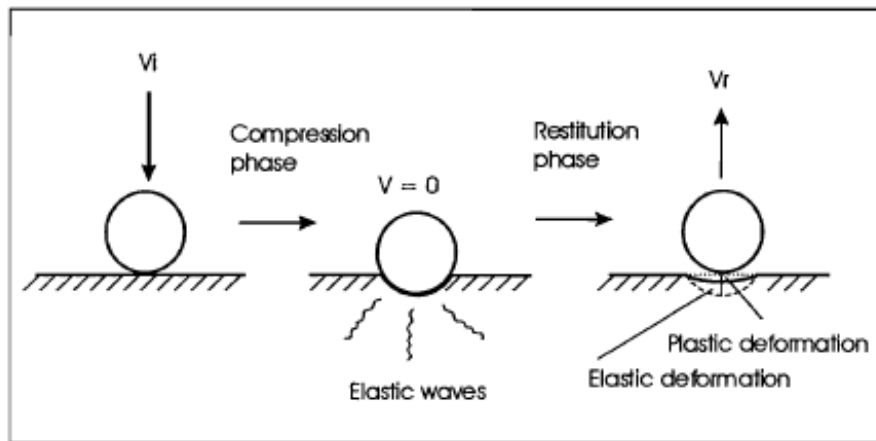


Εικόνα 8: Αναπήδηση σφαιρικών δοκιμίων

Πηγή: atec.utdallas.edu

2.6 Συντελεστές αναπήδησης

Για τον αποτελεσματικό σχεδιασμό μέτρων αναχαίτισης των βραχοπτώσεων είναι αναγκαίο να εκτιμηθεί η τροχιά και η ενέργεια των τεμαχών κατά την πτώση τους. Γεωλογικά και μορφολογικά στοιχεία, όπως το υλικό, η τραχύτητα, η κλίση του πρανούς, το μέγεθος, το σχήμα, το βάρος του τεμάχου καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την πορεία που θα ακολουθήσει. Η προσομοίωση γίνεται μέσω ειδικών λογισμικών όπως το Rocfall ή το CRSP (Colorado Rockfall Simulation Program) με στόχο το σχεδιασμό μέτρων προστασίας. Ο υπολογισμός της διαχεόμενης ενέργειας κατά την αναπήδηση είναι απαραίτητος για την εκτίμηση της τροχιάς που θα ακολουθήσει το τέμαχος. Για το σκοπό αυτό, οι Bozzolo και Ramini (1986) καθώς και οι Azzoni και De Freitas (1995) χρησιμοποίησαν στις μελέτες τους ένα μόνο συντελεστή αναπήδησης, βασιζόμενοι στη μηχανική ανάλυση της αλληλεπίδρασης μεταξύ της επιφάνειας του πρανούς και ενός ελλειψοειδούς δοκιμίου. Ωστόσο, κατά πλειοψηφία χρησιμοποιούνται δύο συντελεστές αναπήδησης, γιατί διακρίνονται οι δύο κύριες λειτουργίες διάχυσης της ενέργειας (Wu, 1985; Hungr and Evans, 1988; Pfeiffer and Bowen, 1989; Gianì, 1992; Stevens, 1998).



Εικόνα 9: Παραμόρφωση του εδάφους κατά την πρόσπτωση σφαίρας

Πηγή: Baishan Peng, 2000

Η κινητική ενέργεια κάθετα στην επιφάνεια του πρανούς καθορίζεται από την πλαστικότητα του εδαφικού υλικού και η αντίσταση παράλληλα με το επίπεδο πρόσκρουσης εξαρτάται από την τριβή ολίσθησης και κύλισης. Συνεπώς, λόγω των διαφορετικών μηχανισμών που εμπλέκονται στην αντίσταση της κίνησης κατά την κάθετη και την εφαπτομενική συνιστώσα (ως προς το πρανές), χρησιμοποιούνται επί μέρους ορισμοί για τη μέτρηση της αντίστασης. Το μέτρο της αντίστασης κάθετα στο επίπεδο του πρανούς ονομάζεται κάθετος συντελεστής αναπήδησης (normal coefficient of restitution), ενώ το μέτρο της αντίστασης παράλληλα στο επίπεδο του πρανούς ονομάζεται εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης (tangential coefficient of restitution). Ορίζονται ως οι λόγοι των ταχυτήτων ή των ενεργειών πριν και μετά την κρούση μιας μάζας σε μια άκαμπτη επιφάνεια. Θεωρητικά, μια τιμή ίση με τη μονάδα αντιστοιχεί σε μια πλήρως ελαστική κρούση, μια τιμή μικρότερη της μονάδας σε ανελαστική κρούση και ένας συντελεστής ίσος με μηδέν αντιστοιχεί στην περίπτωση που η μάζα ακινητοποιείται αμέσως κατά την κρούση χωρίς να αναπηδήσει, δηλαδή πλήρως πλαστική συμπεριφορά.

Στην περίπτωση των βραχοπτώσεων ο συντελεστής αναπήδησης θεωρείται ότι λαμβάνει υπόψη όλα τα χαρακτηριστικά της κίνησης, της κρούσης, της ολίσθησης κατά την επαφή, τις παραμορφώσεις που υφίσταται το τμήμα, την εναλλαγή της μεταθετικής ενέργειας σε περιστροφική και αντίστροφα. Οι παραπάνω θεωρήσεις της νευτώνειας φυσικής του στερεού σώματος έχουν επαρκώς αιτιολογούμενη χρήση στις περιπτώσεις βραχοπτώσεων σε πρανή υψηλής αντοχής και σκληρότητας, όμως για πτώσεις σε περιοχές όπου συγκεντρώνονται αδρανή μικρότερων διαστάσεων, αυτή η θεώρηση δύσκολα ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα λόγω των πλαστικών παραμορφώσεων που συμβαίνουν κατά τη διείδυση του τεμάχου στον εδαφικό σχηματισμό.

Συνήθως οι συντελεστές αναπήδησης που χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό της πορείας ενός τεμάχου εκτιμώνται βάσει κυρίως του γεωυλικού του πρανούς, του βαθμού συμπύκνωσης, της φυτοκάλυψης, της παρουσίας δέντρων. Παρόλα αυτά, όπως αναφέρουν αρκετοί συγγραφείς (Bozzolo and Pamini, 1986; Hungr and Evans, 1988; Giani, 1992; Azzoni and De Freitas, 1995; Gerber, 1995; Dorren *et al.*, 2006) από πειράματα πεδίου και ανάστροφες αναλύσεις βραχοπτώσεων η κίνηση ενός βραχοτεμάχου επηρεάζεται από το ίδιο το τμήμα και από την κινηματική που ακολουθεί κατά την κρούση.

Συγκεντρωτικά οι παράγοντες που επιδρούν στην αναπήδηση είναι (Labiouse and Descoedres, 1999):

Χαρακτηριστικά πλαγιάς

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

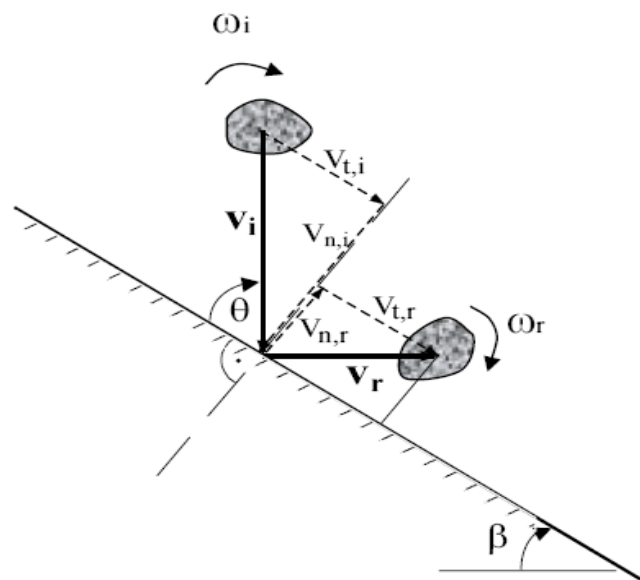
Χαρακτηριστικά βραχοτεμάχους

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

Κινηματικές συνθήκες

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

2.7 Μαθηματικές προσεγγίσεις



Εικόνα 10: Αναπτυσσόμενες ταχύτητες κατά την πρόσπτωση του τεμάχους

Πηγή: Heidenreich B, 2004

2.7.1 Έκφραση ταχυτήτων

Ο πλέον διαδεδομένος ορισμός των συντελεστών αναπήδησης λαμβάνεται από διαχωρισμό σε κάθετη και εφαπτομενική συνιστώσα της ταχύτητας πριν και μετά την κρούση. Οι συντελεστές αναπήδησης R_n και R_t , ορίζονται ως εξής:

$$R_n = -V_n^+ / V_n^- \quad (2.4)$$

$$R_t = V_t^+ / V_t^- \quad (2.5)$$

Όπου :

V^+ : ταχύτητα σώματος μετά την κρούση

n: κάθετη συνιστώσα

t: οριζόντια συνιστώσα

V^- : ταχύτητα σώματος πριν την κρούση

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

Ο ορισμός αυτός χρησιμοποιείται από πολλούς συγγραφείς (Wu, 1985; Pfeiffer and Bowen, 1989; Fornaro *et al.*, 1990; Hoek, 1987; Kobayashi *et al.*, 1990; Giani, 1992; Budetta and Santo, 1994; Ushiro *et al.*, 2000; Richards *et al.*, 2001; Heidenreich, 2004; Μπεκρή, 2010).

Χαρακτηριστικό των παραπάνω εκφράσεων είναι ότι αφορούν τη μεταθετική κίνηση του κέντρου μάζας του τεμάχους. Ακόμη, οι διάφορες τιμές του R_n συχνά λαμβάνονται υπόψη ως σταθερές του υλικού χωρίς να θεωρείται ότι εξαρτώνται και από άλλους παράγοντες, όπως τα γεωλογικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά ή την κινητική κατάσταση του τεμάχους και τα χαρακτηριστικά του πρανούς. Επίσης, μία έλλειψη των προηγούμενων εκφράσεων είναι ότι δε λαμβάνουν υπόψη την περιστροφή του τεμάχους.

2.7.2 Έκφραση ενεργειών

Μια άλλη θεώρηση αναφέρεται στην απώλεια κινητικής ενέργειας κατά την κρούση. Οι Bozzolo και Ramini, (1986), Azzoni *et al.*, (1995) και οι Chau *et al.*, (1999) εκφράζουν το συντελεστή αναπήδησης μέσω της μεταθετικής ενέργειας του βραχοτεμάχους πριν και μετά την κρούση, ως εξής :

$$R_E = \frac{E_{trans,r}}{E_{trans,i}} = \frac{0,5 \cdot m \cdot V_r^2}{0,5 \cdot m \cdot V_i^2} = \frac{V_r^2}{V_i^2} \quad (2.6)$$

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

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

$$R_{E,n} = \frac{V_{n,r}^2}{V_{n,i}^2 + V_{r,i}^2} = \frac{V_{n,r}^2}{V_i^2} \quad (2.7)$$

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

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

$$R_{TE} = \frac{E_{tot,r}}{E_{tot,i}} = \frac{0,5 \cdot [m(V_{n,r}^2 + V_{t,r}^2) + I \cdot \omega_r^2]}{0,5 \cdot [m(V_{n,i}^2 + V_{t,i}^2) + I \cdot \omega_i^2]} \quad (2.9)$$

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

Μέχρι σήμερα, μόνο λίγοι μελετητές (Azzoni and De Freitas, 1995; Yoshida, 1998; Και Chau *et al.*, 2002) έχουν ερευνήσει και λάβει υπόψη τους την περιστροφική ενέργεια που προκαλείται κατά τη διάρκεια της πρόσκρουσης. Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω σχέσεις, η διεύθυνση αναπήδησης δεν μπορεί να καθοριστεί. Ενώ, ακόμα και αν η περιστροφή του τεμάχους ληφθεί υπόψη, οι συντελεστές αναπήδησης R_E και R_{TE} εξακολουθούν να είναι τιμές καθορισμένες για ένα συγκεκριμένο γεωυλικό και ανεξάρτητες από άλλους παράγοντες, όπως την ταχύτητα ή την γωνία πρόσκρουσης.

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

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

2.7.3 Συντελεστής περιστροφής

Ένας ακόμα συντελεστής που ορισμένοι ερευνητές χρησιμοποιούν στις αναλύσεις τους είναι ο συντελεστής περιστροφής. Ειδικά για πρανή με κλίση μικρότερη των 45° στα οποία η κύρια κίνηση που αναπτύσσεται είναι η κύλιση, αυτή προκαλεί επίσης απώλεια ενέργειας (αν το τεμάχος επιβραδύνεται) ή αύξηση ενέργειας εξ αιτίας της βαρύτητας. Η φάση της κύλισης μπορεί να περιγραφεί ως μια ταχύτατη διαδοχή ελαφρών αναπηδήσεων και εναέριων περιστροφών ή αν θεωρήσουμε το πύπτον τεμάχος ως ένα τέλειο κύλινδρο σε μια λεία επιφάνεια η αλληλεπίδραση στην κίνησή του μπορεί να

περιγραφεί από τον συντελεστή αυτό, εκφράζοντας την αντίστασή του στην περιστροφή. Ο μαθηματικός τύπος έχει εκφραστεί από τους Gianì et al. (2004) ως εξής:

$$v = \sqrt{v_0 - 2 \cdot g \cdot (l - l_0) \cdot (\sin a - \mu \cdot \cos a)} \quad (2.10)$$

Όπου:

g : η επιτάχυνση της βαρύτητας

a : η κλίση του πρανούς

$l - l_0$: η διανυόμενη απόσταση

v_0, v : οι ταχύτητες του τεμάχους στην αρχή και στο τέλος της απόστασης $l - l_0$

μ : συντελεστής περιστροφής



3 Μέθοδοι μελέτης βραχοπτώσεων

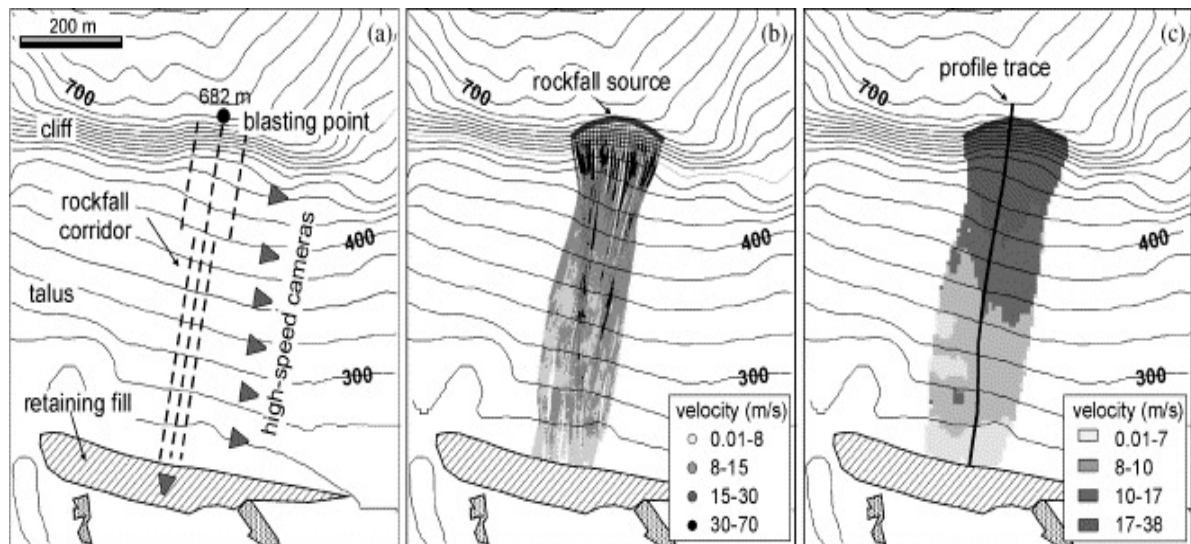
3.1 Ανάδρομες αναλύσεις καταπτώσεων

Μετά την εκδήλωση ενός φαινομένου καταπτώσεων μπορούν να πραγματοποιηθούν ανάδρομες αναλύσεις, οι οποίες βοηθούν στην καλύτερη κατανόηση του μηχανισμού. Πιο συγκεκριμένα, μπορούν να προσδιοριστούν παράμετροι όπως η ταχύτητα πρόσκρουσης, η ενέργεια που αναπτύσσεται πριν και μετά την κρούση των βραχοτεμαχών και κατ' επέκταση να προσδιοριστούν οι συντελεστές αναπήδησης, οι οποίοι βοηθούν στην καλύτερη διαστασιολόγηση των μέτρων αναχαίτισης σε περιοχές όπου απαιτούνται να παρθούν τα εν λόγω μέτρα. Επίσης, μπορεί να συλλεχθούν σημαντικές πληροφορίες, οι οποίες σχετίζονται με την εκτελεσθείσα τροχιά, όπως είναι για παράδειγμα το μέγεθος των βραχοτεμαχών, η οριζόντια και πλευρική απόσταση που διανύθηκε καθώς επίσης το ύψος ή και το μήκος αναπήδησης. Οι πληροφορίες αυτές στην συνέχεια χρησιμοποιούνται για την βαθμονόμηση των προγραμμάτων ηλεκτρονικών υπολογιστών για αναλύσεις τροχιάς στον χώρο ενδιαφέροντος ή σε άλλους χώρους με παρόμοια χαρακτηριστικά (Labiouse και Heidenreich, 2009). Να τονίσουμε ότι λόγω της φυσικής ανομοιογένειας που παρατηρείται στο υλικό που μελετάται κάθε φορά, η μέθοδος αυτή έχει αποδειχθεί ότι δεν αποτελεί την πλέον κατάλληλη μέθοδο για την μελέτη του συγκεκριμένου φαινομένου, ενώ τόσο οι εργαστηριακές αναλύσεις όσο και οι επί τόπου δοκιμές θεωρούνται πιο αξιόπιστες.

Στο άρθρο «Rockfall hazard and risk assessment: an example from a high promontory at the historical site of Monemvasia, Greece» των Saroglou *et al.* (2012) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των ανάδρομων αναλύσεων, που πραγματοποιήθηκαν στον ιστορικό χώρο της Μονεμβασιάς, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό τόσο του κάθετου όσο και του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης. Άλλο ένα παράδειγμα ανάδρομης ανάλυσης αποτελεί το άρθρο «Analysis and evaluation of rockfall hazard around Afyon Castle, Turkey» των Topal *et al* (2006). Στην συγκεκριμένη μελέτη δεν έλαβαν χώρα ούτε πειράματα πεδίου, ούτε όμως και εργαστηρίου. Παρ όλα αυτά, εξήχθησαν κάποια συμπεράσματα σχετικά με τις παραμέτρους (όπως για παράδειγμα την μάζα των βραχοτεμαχών ή την τραχύτητα του υλικού) που επηρεάζουν το φαινόμενο της κατάπτωσης των βράχων σύμφωνα με ανάδρομες αναλύσεις.

Τέλος, να επισημάνουμε ότι και πολλοί άλλοι ερευνητές έχουν πραγματοποιήσει ανάδρομες αναλύσεις για τον προσδιορισμό των παραμέτρων του φαινομένου των βραχοπτώσεων, χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα αυτών περισσότερο επικουρικά προκειμένου να ταυτοποιήσουν τα αποτελέσματα τα οποία προκύπτουν είτε από εργαστηριακές μετρήσεις είτε από πειράματα πεδίου.





Εικόνα 11: Ανάστροφη ανάλυση του φαινομένου των βραχοπτώσεων για τον προσδιορισμό των τροχιών των βραχοτεμαχών

Πηγή: Agliardi & Crosta, 2003

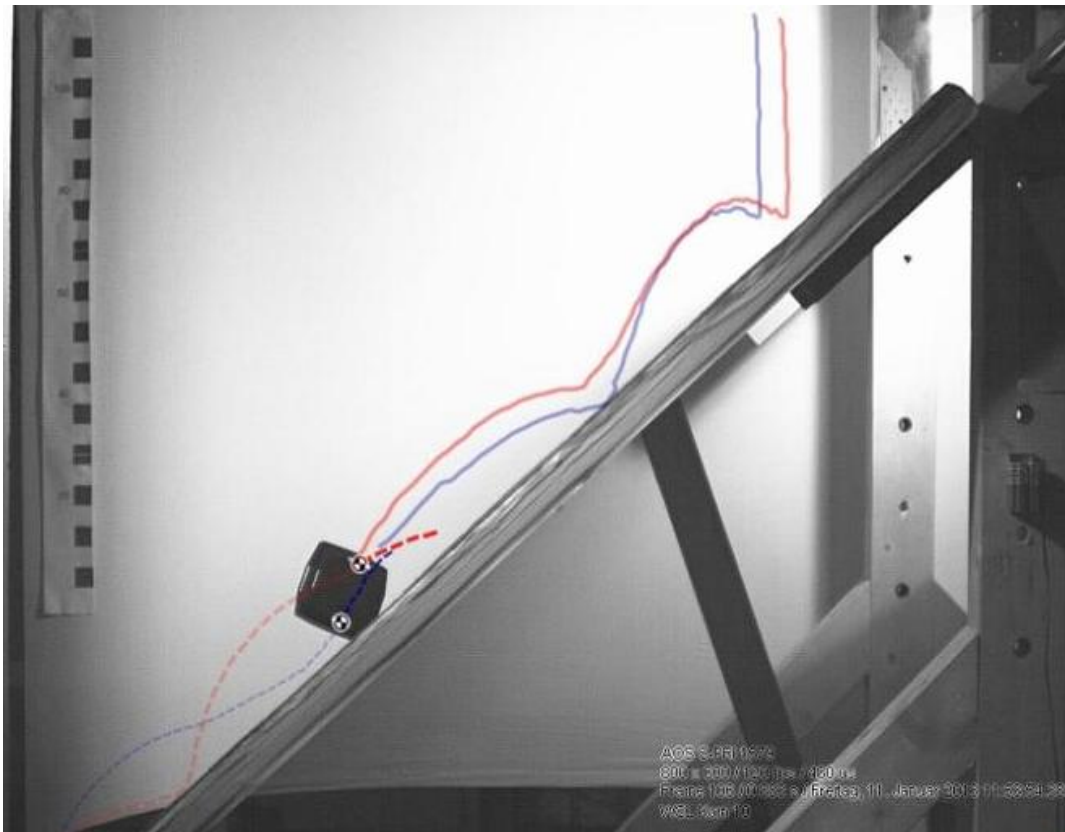
3.2 Εργαστηριακές δοκιμές

Τα πειράματα εργαστηρίου είναι εκείνα τα οποία πραγματοποιούνται συχνότερα από τους ερευνητές καθώς θεωρούνται πιο αξιόπιστα για τα αποτελέσματά τους σε σχέση με τις ανάδρομες αναλύσεις καθώς και πιο εύκολα στην πραγματοποίησή τους για την συλλογή αξιόπιστων στοιχείων σε σχέση με τα πειράματα πεδίου. Οι πειραματικές μελέτες περιλαμβάνουν εκτέλεση δοκιμών σε μικρής και μεσαίας κλίμακας δοκίμια. Κατά τις δοκιμές αυτές, μπορεί να εξετάζεται είτε το σύνολο της τροχιάς είτε μόνο η στιγμή της πρόσκρουσης του τεμάχους πάνω στην ειδικά διαμορφωμένη επιφάνεια πρόσκρουσης.

Τα πειράματα εργαστηρίου είναι πολύ χρήσιμα για την κατανόηση των διάφορων μηχανισμών, οι οποίοι υπεισέρχονται στο φαινόμενο των βραχοπτώσεων καθώς επίσης και για τον προσδιορισμό των κυριότερων παραμέτρων, οι οποίες επηρεάζουν το εν λόγω φαινόμενο. Παρόλα αυτά, η ποσοτική ερμηνεία των αποτελεσμάτων πολλές φορές δεν είναι εύκολη, λόγω της πληθώρας των παραγόντων που επηρεάζουν το φαινόμενο, όπως είναι η μάζα των βραχοτεμαχών, το σχήμα τους, η τραχύτητα του πρανού κλπ. Επίσης, η αναγωγή των αποτελεσμάτων μικρής κλίμακας στις πραγματικές συνθήκες δεν είναι πάντα εφικτή. Βασισμένος σε μικρής κλίμακας πειράματα, ο Camroueno (1977) τονίζει ότι, ενώ είναι εφικτό να συσχετισθούν τα στατικά χαρακτηριστικά των υλικών (παραμορφωσιμότητα, δύναμη, πυκνότητα, στατική γωνία τριβής), με το ομοίωμα ανεξάρτητα από το μέγεθός του, ο συσχετισμός με τα δυναμικά χαρακτηριστικά που συμμετέχουν στο φαινόμενο της πρόσκρουσης (συντελεστής αναπήδησης, αντοχή στην κρούση, δυναμική γωνία τριβής) δεν είναι προφανής. Για παράδειγμα, αναφέρει ότι σε δοκιμή υπό κλίμακα, που επαληθεύει τις απαιτήσεις ομοιότητας, η αναπήδηση δίνει αρκετά χαμηλότερη ενέργεια από εκείνη που παρατηρήθηκε στις πλήρους κλίμακας δοκιμές.

Στα εργαστηριακά πειράματα μπορεί να γίνει προσδιορισμός των ιδιοτήτων των υλικών όπως είναι η πυκνότητα, η μονοαξονική θλιπτική αντοχή και παραμορφωσιμότητα του δοκιμίου, η εφελκυστική αντοχή, η ταχύτητα διάδοσης υπερήχων, η σημειακή φόρτιση καθώς και η σκληρότητα της επιφάνειας πρόσκρουσης και του ίδιου του υλικού (Γιόκαρη, 2013). Στα πειράματα εργαστηρίου χρησιμοποιούνται

συσκευές για παραβολικές ρίψεις καθώς και για ελεύθερη πτώση. Επίσης, χρησιμοποιούνται κάμερες ταχείας λήψεως για την καταγραφή των τροχιών (Αστερίου και Ευθυμίου, 2011).



Εικόνα 12: Εργαστηριακή δοκιμή-προσομοίωση κατάπτωσης βραχοτεμάχους

Πηγή: www.slf.ch

3.3 Δοκιμές πεδίου

Πολλές φορές τα αποτελέσματα τα οποία προέρχονται τόσο από τις ανάδρομες αναλύσεις όσο και από τα πειράματα εργαστηρίου δεν συνάδουν με εκείνα τα οποία εξάγονται από τα πειράματα πεδίου. Για τον σκοπό αυτό, τα αποτελέσματα τα οποία προέρχονται από πειράματα πλήρους κλίμακας θεωρούνται και τα πλέον αξιόπιστα. Έτσι, όπου οι συνθήκες το επιτρέπουν, με την προϋπόθεση ότι υπάρχει κατάλληλα εξειδικευμένο προσωπικό και όργανα μέτρησης των τροχιών, θα πρέπει να συλλέγονται δεδομένα με βάση επί τόπου δοκιμές.

Στα πειράματα πεδίου, δοκίμια με γνωστά χαρακτηριστικά ρίπτονται με δεδομένες αρχικές συνθήκες (θέση, ταχύτητα, ύψος απελευθέρωσης) σε πρανή με συγκεκριμένα γεωλογικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά. Με την χρήση κατάλληλων καμερών γίνεται καταγραφή των τροχιών και στο τέλος αναλύοντας αυτές τις τροχιές προκύπτουν η μεταθετική και περιστροφική ταχύτητα του δοκιμίου πριν και μετά από κάθε κρούση, οι οποίες χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των συντελεστών αναπήδησης.

Πολλά πειράματα έχουν ήδη πραγματοποιηθεί και αναλυθεί σε παγκόσμιο επίπεδο (Ritchie, 1963; Broili, 1977; Statham, 1979; Wu, 1985; Bozzolo και Pamini, 1988; Pfeiffer και Bowen, 1989; Fornaro et al, 1990; Kobayashi *et al.*, 1990, Azzoni *et al.*, 1992; Giani, 1992; Azzoni και De Freitas, 1995; Urciuoli, 1988; Yoshida, 1998; Heidenreich, 2004; Αστερίου και Ευθυμίου, 2011).

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

Εν κατακλείδι, τα πειράματα πεδίου είναι τα μόνα τα οποία μας επιτρέπουν σε μεγάλο ποσοστό την οπτικοποίηση πολλών και διαφορετικών πτυχών αυτού του ιδιαίτερα πολύπλοκου φαινομένου σε αντίθεση με τα πειράματα εργαστηρίου στα οποία η μελέτη του φαινομένου λόγω κλίμακας δεν είναι εύκολο να πραγματοποιηθεί και να ποσοτικοποιηθεί σε ικανοποιητικό βαθμό.

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



Εικόνα 13: Δοκιμή πεδίου για τον προσδιορισμό των μέτρων προστασίας

Πηγή: Transportation Research Circular (2009)-Colorado's Full-Scale Field Testing of Rockfall Attenuator Systems

3.4 Αναλύσεις με την χρήση προγραμμάτων Η/Υ

3.4.1 Δισδιάστατα (2-D) μοντέλα προσομοίωσης των τροχιών

Ένα δισδιάστατο μοντέλο προσομοιώνει την τροχιά των βραχοτεμαχών στο επίπεδο κίνησης. Εισάγοντας τις συντεταγμένες ενός πρηνούς και τις αρχικές συνθήκες, εκτιμάται η τροχιά βάσει των εξισώσεων κίνησης για κάθε χρονική στιγμή. Μπορούν να γίνουν δυο βασικές θεωρήσεις: της σημειακής μάζας, όπου το τέμαχος θεωρείται ως σημείο και της «αυστηρής μεθόδου», όπου το τέμαχος προσομοιώνεται με τις διαστάσεις του μέσω της μεθόδου των διακριτών στοιχείων. Ο Πίνακας 2, ο οποίος επισυνάπτεται παρακάτω, δείχνει ότι η πλειονότητα των μοντέλων ανήκει στην πρώτη

κατηγορία. Τέτοια μοντέλα συνήθως υπολογίζουν την τροχιά των βραχοτεμαχών χρησιμοποιώντας τοπογραφικές και υδρολογικές προσεγγίσεις, ενώ επίσης δεν παρέχουν τις απαραίτητες πληροφορίες όσον αφορά το ύψος αναπήδησης του βραχοτεμάχους.

3.4.2 Οιονεί-τρισδιάστατα μοντέλα προσομοίωσης των τροχιών (2.5-D μοντέλα)

Η δεύτερη κατηγορία μοντέλων προσομοίωσης των τροχιών των τεμαχών ορίζεται ως 2.5-D μοντέλα, τα οποία αποκαλούνται επίσης οιονεί-τρισδιάστατα πρότυπα προσομοίωσης των τροχιών των βραχοπτώσεων. Πιο συγκεκριμένα, πρόκειται για δισδιάστατα μοντέλα τα οποία χρησιμοποιούν το σύστημα GIS (σύστημα συντεταγμένων). Το κύριο χαρακτηριστικό αυτών των μοντέλων είναι ότι ο προσδιορισμός των τροχιών των τεμαχών στους άξονες x και y είναι ανεξάρτητος από τα κινηματικά χαρακτηριστικά. Στην ουσία, σε αυτά τα μοντέλα ο υπολογισμός της οριζόντιας διανυόμενης απόστασης μπορεί να διαχωριστεί εντελώς από τον υπολογισμό των κινηματικών χαρακτηριστικών, των σημείων αναπήδησης των τεμαχών καθώς και των υψών αναπήδησής τους. Αυτό σημαίνει, ότι τα εν λόγω μοντέλα πραγματοποιούν δύο ξεχωριστούς δισδιάστατους υπολογισμούς. Ο πρώτος καθορίζει το προφίλ της πλαγιάς σε ένα σύστημα αξόνων x και y , ενώ ο δεύτερος είναι μια δισδιάστατη προσομοίωση κατά μήκος του ορισμένου προφίλ της πλαγιάς. Παράδειγμα ενός τέτοιου μοντέλου αποτελεί το λογισμικό Rocky (Dorren και Seijmonsbergen, 2003).

3.4.3 Τρισδιάστατα (3-D) μοντέλα προσομοίωσης των τροχιών

Τα τρισδιάστατα μοντέλα είναι εκείνα τα οποία υπολογίζουν την τροχιά των βραχοτεμαχών σε τρεις διαστάσεις σε κάθε δεδομένη χρονική στιγμή (άξονες x , y και z). Σε αυτά τα μοντέλα υπολογισμού των τροχιών υπάρχει μια αλληλεπίδραση μεταξύ των κινηματικών χαρακτηριστικών των τεμαχών, των σημείων αναπήδησής τους καθώς επίσης και της επιρροής των δασών εφόσον τα τελευταία υφίστανται. Παραδείγματα τέτοιων μοντέλων είναι το EBOUL-LMR (Descoeudres και Zimmerman, 1987), το STONE (Guzzetti *et al.*, 2002), το Rotomap (Scioldo, 2006), το DDA (Yang *et al.*, 2004), το STAR3-D (Dorren *et al.*, 2004), το RAMMS: Rockfall (Christen *et al.*, 2007), το Rockfall-Analyst (Lan *et al.*, 2007), καθώς και το PICUS-ROCKnROLL (Rammer *et al.*, 2007; Woltjer *et al.*, 2008). Το κύριο πλεονέκτημα αυτών των μοντέλων είναι ότι όλες οι αποκλίνουσες και συγκλίνουσες επιδράσεις της τοπογραφίας καθώς και οι τροχιές, οι οποίες δεν αναμένονται να προκύψουν με την πρώτη ματιά στο πεδίο, απεικονίζονται ευκρινώς κατά τις αναλύσεις. Από την άλλη πλευρά, βασικό μειονέκτημα των μοντέλων αυτών είναι ότι χρειάζονται πολλές παραμέτρους, πράγμα το οποίο τα καθιστά ιδιαίτερα χρονοβόρα.

3.5 Παραδοχές προγραμμάτων

Ένα δεύτερο κύριο χαρακτηριστικό, το οποίο χρησιμοποιείται προκειμένου να γίνει διαχωρισμός μεταξύ των μοντέλων που αναπτύχθηκαν παραπάνω, είναι η αναπαράσταση του τεμάχους. Όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα, σαν πρώτη προσέγγιση το τέμαχος μπορεί να αναπαρασταθεί σαν μία σημειακή μάζα, η οποία δεν έχει διαστάσεις. Η δεύτερη προσέγγιση είναι η θεώρηση άκαμπτου σώματος, όπως για παράδειγμα ένα τεμάχιο το οποίο απαρτίζεται από πραγματικές διαστάσεις και το οποίο μπορεί να είναι σφαίρα, κύβος, κύλινδρος ή να έχει ελλειψοειδή μορφή. Η τρίτη και τελευταία προσέγγιση είναι η υβριδική προσέγγιση, στην οποία για την προσομοίωση ελεύθερης πτώσης ενός τεμάχους, αυτό αντιμετωπίζεται σαν μια σημειακή μάζα, ενώ για την κύλιση, την πρόσκρουση και την αναπήδηση του τεμάχους, αντιμετωπίζεται σαν ένα άκαμπτο σώμα με πραγματικές διαστάσεις.

Η πλειονότητα των μοντέλων αυτών χρησιμοποιεί έναν κάθετο και έναν εφαπτομενικό συντελεστή για τον υπολογισμό της αναπήδησης του τεμάχους και ένα συντελεστή ολίσθησης για την κύλισή του. Τα μοντέλα τα οποία χρησιμοποιούν αυτούς τους συντελεστές γενικώς εισάγουν μια πιθανοτική προσέγγιση για την επιλογή των τιμών των παραμέτρων που θα χρησιμοποιηθούν. Οι Bourrier *et al.* (2009) παρουσίασαν ένα νέο μοντέλο για τον υπολογισμό των συντελεστών αναπήδησης, το οποίο συνδέεται με την γωνία πρόσπτωσης, την μεταφορική και περιστροφική ταχύτητα πριν και μετά την κρούση του τεμάχους και εισήγαγαν στοχαστικές συναρτήσεις, οι οποίες έδωσαν υποσχόμενα αποτελέσματα για βραχώδεις πλαγιές. Υπάρχουν, επίσης, μοντέλα, τα οποία χρησιμοποιούν ντετερμινιστικές προσεγγίσεις για τον υπολογισμό της αναπήδησης. Αυτά τα μοντέλα χρησιμοποιούν συνήθως διακριτά στοιχεία, όπως είναι το μοντέλο DDA-Discontinuous Deformation Analysis, (Yang *et al.*, 2004).

Πίνακας 2: Κύρια χαρακτηριστικά επιλεγμένων μοντέλων

Πηγή: Volkwein *et al.*, 2011

Model/programme name	Reference/Year	Spatial Dimensions	Approach	Probabilistic	Forest*
N.N.	(Ritchie, 1963)	2-D (slope profile)	Lumped-mass	No	No
Discrete Element Method	(Cundall, 1971)	2-D (slope profile)	Rigid body	No	No
Computer Rockfall Model	(Piteau and Clayton, 1976)	2-D (slope profile)	Lumped-mass	Partly	No
N.N.	(Azimi <i>et al.</i> , 1982)	2-D (slope profile)	Lumped-mass	Yes	No
N.N.	(Falcetta, 1985)	2-D (slope profile)	Rigid body	No	No
ROCKSIM	(Wu, 1985)	2-D (slope profile)	Lumped-mass	Yes	No
SASS	(Bozzolo and Pamini, 1986)	2-D (slope profile)	Hybrid	Yes	No
EBOUL-LMR	(Descoedres and Zimmermann, 1987) (Labiouse <i>et al.</i> , 2001)	3-D (x,y,z)	Rigid body	No	No
PROPAG/CETE Lyon	(Rochet, 1987a)	2-D (slope profile)	Lumped-mass	No	No
N.N.	(Hung and Evans, 1988)	2-D (slope profile)	Lumped-mass	No	No
CRSP (4.0)	(Pfeiffer and Bowen, 1989) (Jones <i>et al.</i> , 2000)	2-D (slope profile)	Hybrid	Yes	No
N.N.	(Van Dijke and van Westen, 1990)	2-D (x,y)	Lumped-mass	No	No
N.N.	(Kobayashi <i>et al.</i> , 1990)	2-D (slope profile)	Rigid body	No	No
Rotomap	(Scioldo, 1991)	3-D (x,y,z)	Lumped-mass	Yes	No
CADMA	(Azzoni <i>et al.</i> , 1995)	2-D (slope profile)	Hybrid	Yes	No
Rockfall (Dr. Spang)	(Spang and Sönsner, 1995)	2-D (slope profile)	Rigid body	Yes	Yes
ROFMOD 4.1	(Zinggler <i>et al.</i> , 1990) (Krummenacher and Keusen, 1996)	2-D (slope profile)	Hybrid	Yes	Yes
3-D-GEOTEST-Zinggler	(Krummenacher <i>et al.</i> , 2008)	3-D (x,y,z)	Hybrid	Yes	Yes
RocFall	(Stevens, 1998)	2-D (slope profile)	Lumped-mass	Yes	No
Sturzeschwindigkeit	(Meissl, 1998)	2-D (x,y)	Lumped-mass	No	No
STONE	(Guzzetti <i>et al.</i> , 2002)	3-D (x,y,z)	Lumped-mass	Yes	No
STAR3-D	(Dimnet, 2002) (Le Hir <i>et al.</i> , 2006)	3-D (x,y,z)	Rigid body	No	Yes
Rocky3	(Dorren and Seijmonsbergen, 2003)	2.5-D (x,y coupled with slope profile)	Hybrid	Yes	Yes
HY-STONE	(Crosta <i>et al.</i> , 2004) (Frattini <i>et al.</i> , 2008) (Agliardi <i>et al.</i> , 2009)	3-D (x,y,z)	Hybrid	Yes	Yes
RockyFor	(Dorren <i>et al.</i> , 2004) (Dorren <i>et al.</i> , 2006) (Bourrier <i>et al.</i> , 2009a)	3-D (x,y,z)	Hybrid	Yes	Yes
DDA	(Yang <i>et al.</i> , 2004)				
RAMMS::Rockfall	(Christen <i>et al.</i> , 2007)	3-D (x,y,z)	Rigid body	Yes	Yes
RockFall Analyst	(Lan <i>et al.</i> , 2007)	3-D (x,y,z)	Lumped-mass	Partly	No
PICUS-ROCKnROLL	(Woltjer <i>et al.</i> , 2008) (Rammer <i>et al.</i> , 2007)	3-D (x,y,z)	Lumped-mass	Yes	Yes

3.6 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

3.6.1 Γενικές θέσεις από πειράματα πεδίου

Ο **Ritchie** (1963) πραγματοποίησε επί τόπου πειράματα αναφέροντας ότι η κλίση της πλαγιάς καθώς και η ακανόνιστη μορφή της αποτελούν τους κύριους παράγοντες που καθορίζουν τα κινηματικά χαρακτηριστικά των βραχοτεμαχών. Χωρίς να δίνει συγκεκριμένες τιμές για τους συντελεστές αναπήδησης, αναφέρει ότι η απώλεια ενέργειας γίνεται μεγαλύτερη με:

- ❖ την αύξηση της τραχύτητας της πλαγιάς με παράλληλη μείωση της διαμέτρου του τεμάχους
- ❖ την αύξηση της πλαστικής απόκρισης του εδάφους
- ❖ την αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης (μεταξύ της πλαγιάς και του βραχοτεμάχους).

Σύμφωνα με τον **Ritchie**, το σχήμα και το μέγεθος των βραχοτεμαχών δεν έχουν μεγάλη επίδραση στην τροχιά τους, αν αυτά τα μεγέθη δεν συνδέονται με την σκληρότητα της πλαγιάς.

Ο **Broili** (1974) πραγματοποίησε πειράματα πεδίου και παρατήρησε ότι σε μικρές γωνίες πρόσπτωσης (μικρότερες από 15 μοίρες) η περιστροφική κίνηση που πραγματοποιείται λόγω της πρόσκρουσης έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της κάθετης ταχύτητας με παράλληλη μείωση της εφαπτομενικής. Αυτό σημαίνει ότι η γωνία μετά την πρόσκρουση θα είναι μεγαλύτερη από την γωνία πριν από αυτή, με αποτέλεσμα πολλές φορές ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης να είναι μεγαλύτερος της μονάδας.

Ο **Habib** (1977) παρατήρησε ότι ο συνολικός συντελεστής αναπήδησης δεν εξαρτάται μόνο από το εδαφικό υλικό, αλλά και από την ταχύτητα και την περιστροφή του τεμάχους, την μάζα, το σχήμα καθώς και την γωνία πρόσπτωσης.

Οι **Robotham et al.** (1995) πραγματοποίησαν πειράματα πεδίου σε πλαγιές αποτελούμενες από ασβεστόλιθους και καθόρισαν τις ακόλουθες τιμές για το ασβεστολιθικό πέτρωμα: $R_n=0,315$ και $R_t=0,712$.

Οι **Giacomini et al.** (2009) πραγματοποίησαν πειράματα πεδίου σε πλαγιές αποτελούμενες από γνεύσιους και ερεύνησαν το θρυμματισμό τους. Απέδειξαν ότι η γωνία πρόσπτωσης παίζει σημαντικό ρόλο στον θρυμματισμό των φυλλοειδών βράχων.

Οι **Giani et al.** (2004) πραγματοποίησαν πειράματα πεδίου σε δύο διαφορετικές πλαγιές, η μία αποτελούμενη από αποσαθρωμένο γρανιτικό πέτρωμα και η άλλη από αποσαθρωμένο εδαφικό υλικό. Βρέθηκε ότι τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των βραχοτεμαχών μαζί με την τραχύτητα και την σκληρότητα της πλαγιάς, παίζουν σημαντικό ρόλο στο ποια διαδρομή θα ακολουθήσει εν τέλει το πέταλο. Οι τιμές για τους συντελεστές αναπήδησης βρέθηκαν υψηλότερες για σφαιρικά δοκίμια με λείες επιφάνειες σε σχέση με τα δοκίμια εκείνα τα οποία είχαν μια πιο ακανόνιστη μορφή.

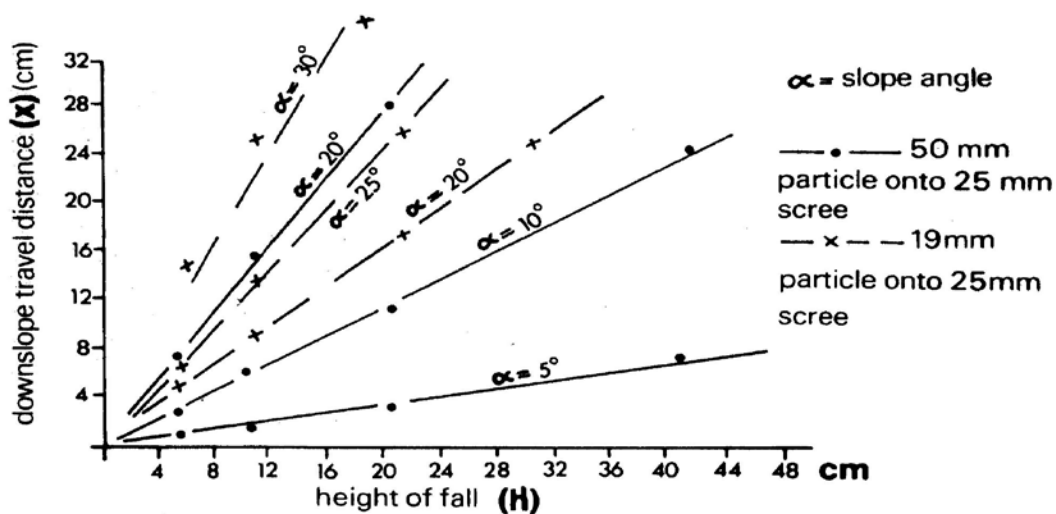
Οι **Dorren et al.** (2006) πραγματοποίησαν πειράματα πεδίου σε δύο διαφορετικές περιοχές, όπου η μία ήταν καλυμμένη με δέντρα ενώ στην δεύτερη δεν υπήρχε δασική κάλυψη. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα από τις δύο περιοχές εκτίμησαν την επίδραση των δέντρων στην απώλεια ενέργειας κατά την πρόσκρουση του τεμάχους πάνω σε αυτά. Στην μη δασική περιοχή, η μέση τιμή για τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης ήταν 0,36, ενώ για τον εφαπτομενικό 0,77 με τυπική απόκλιση 0,13 και 0,10 αντιστοίχως.

Οι **Spadari et al.** (2011) πραγματοποίησαν ένα πλήθος πειραμάτων σε τέσσερις διαφορετικές πλαγιές των οποίων οι επιφάνειες καλύπτονταν από αποσαθρωμένα πετρώματα με παράλληλη ύπαρξη χαμηλής βλάστησης. Η τιμή του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης βρέθηκε ελαφρώς



υψηλότερη από ότι παρατηρείται σε βιβλιογραφικές αναφορές. Όμως, ο κάθετος συντελεστής βρέθηκε να είναι σημαντικά μεγαλύτερος από εκείνες τις τιμές που είχαν παρατηρηθεί στην βιβλιογραφία. Αναφορικά, οι τιμές για τον εφαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης κυμαίνονται από 0,37 έως 0,94 και για τον κάθετο από 0,38 μέχρι 1,98. Αυτές οι μεγάλες τιμές του κάθετου συντελεστή αναπήδησης αποδόθηκαν από τους ερευνητές στο ακανόνιστο σχήμα τόσο των τεμαχών όσο και στα χαρακτηριστικά (τραχύτητα και σκληρότητα) της πλαγιάς.

Ο **Statham** (1979) προσομοίωσε την τροχιά ενός τεμαχίου στο εργαστήριο και σε δοκιμές πεδίου μικρής κλίμακας. Παρατήρησε μια γραμμική συσχέτιση ανάμεσα στο αρχικό ύψος πτώσης και την διανυόμενη απόσταση κατά μήκος του πρανούς. Η σχέση επηρεάζεται από την κλίση της πλαγιάς και το μέγεθος του τεμαχίου σε σχέση με τα αυτά που αποτελούν το πρανές (Εικόνα 14).



Εικόνα 14: Συσχετισμός του ύψους πτώσης με την διανυόμενη απόσταση

Πηγή: Statham (1979)

Οι **Bozzolo** και **Pamini** (1986) παρατήρησαν από ανάδρομες αναλύσεις καταγεγραμμένων πειραμάτων πεδίου ότι η διαδικασία της πρόσκρουσης μπορεί να περιγραφεί σαν μία στιγμιαία κύλιση. Επίσης, παρατήρησαν ότι ο συντελεστής αναπήδησης R_{te} εξαρτάται από την γωνία πρόσπτωσης θ (γωνία μεταξύ του διανύσματος της αρχικής ταχύτητας του τεμαχίου και της επιφάνειας πρόσπτωσης). Επίσης, όσο πιο κάθετη είναι η πρόσπτωση στην πλαγιά τόσο μεγαλύτερη απώλεια ενέργειας παρατηρείται, η οποία εκφράζεται από μικρότερη τιμή του συντελεστή αναπήδησης, ενώ παράλληλα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του βραχοτεμαχίου έχουν σημαντική επιρροή στον συντελεστή αναπήδησης για ένα ελλειψοειδές τεμάχιο.

Ο **Gerber** (1995) επίσης πραγματοποίησε πειράματα πεδίου και εκτίμησε τόσο τον κάθετο όσο και τον εφαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης. Παρατήρησε ότι η γωνία πρόσπτωσης έχει σημαντική επιρροή πάνω στην ταχύτητα αναπήδησης του τεμαχίου. Όσο πιο εφαπτομενική είναι η πρόσπτωση πάνω στην επιφάνεια, τόσο υψηλότερες ταχύτητες αναπήδησης παρατηρούνται. Με άλλα λόγια, για αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης θ , η ταχύτητα αναπήδησης του τεμαχίου μειώνεται.

Οι **Azzoni et al.** (1992) στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος από την ISMES εκτέλεσαν πλήθος επί τόπου δοκιμών σε πληθώρα πρανών, διαφορετικής γεωλογικής σύστασης με ρίψεις τεμαχών διαφορετικού σχήματος και μεγέθους. Οι ρίψεις κατεγράφησαν με κάμερες υψηλών ταχυτήτων και

υπολογίστηκαν οι συντελεστές αναπήδησης σε όρους κάθετης και εφαπτομενικής αναπήδησης καθώς και ολικής ενέργειας. Διατυπώθηκαν τα συμπεράσματα:

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

3.6.2 Γενικές θέσεις από πειράματα εργαστηρίου

Στην βιβλιογραφία λίγα στοιχεία υπάρχουν από πειράματα εργαστηρίου στα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί φυσικά βραχοτεμάχια. Οι περισσότερες εργαστηριακές δοκιμές έχουν γίνει χρησιμοποιώντας τεχνητά δοκίμια. Επιπροσθέτως, δεν υπάρχουν πολλές πληροφορίες οι οποίες σχετίζονται με τις αλλαγές των συνθηκών στο εργαστήριο, όπως για παράδειγμα η γωνία ή η τραχύτητα της επιφάνειας πρόσπτωσης.

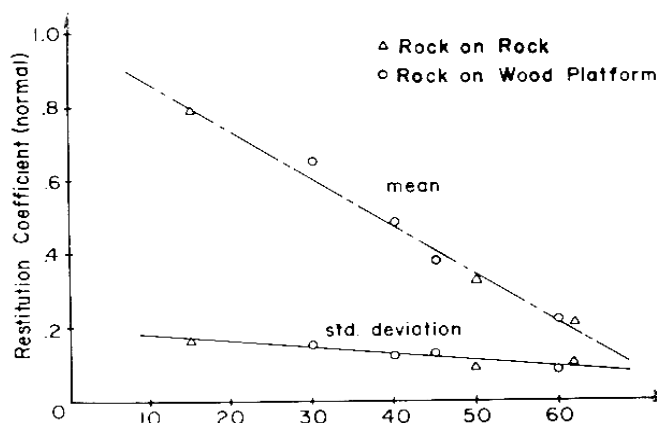
Ο Wu (1985) πραγματοποίησε εργαστηριακά πειράματα με τεμάχια τα οποία ήταν φτιαγμένα από βράχο και ξύλο. Καθόρισε γραμμικές συσχετίσεις μεταξύ του κάθετου και του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης καθώς επίσης και την επιρροή που έχει η κλίση του πρηνούς και η γωνία πρόσπτωσης στους εν λόγω συντελεστές. Για να είμαστε πιο ακριβείς, ανέφερε ότι αυξάνοντας την γωνία πρόσπτωσης προκαλείται αύξηση του κάθετου συντελεστή αναπήδησης ανεξαρτήτως της μάζας του δοκιμίου ενώ παράλληλα παρατηρείται ελαφριά μείωση του εφαπτομενικού συντελεστή. Ο Wu υπολόγισε ότι ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης κυμαίνεται από 0,20 έως 0,80 ενώ ο εφαπτομενικός από 0,60 έως 0,90 (Εικόνα 15).

Η τάση των συντελεστών αναπήδησης περιγράφεται από τις σχέσεις:

$$R_n = 0,995 - 0,013 \cdot \theta \quad (3.1)$$

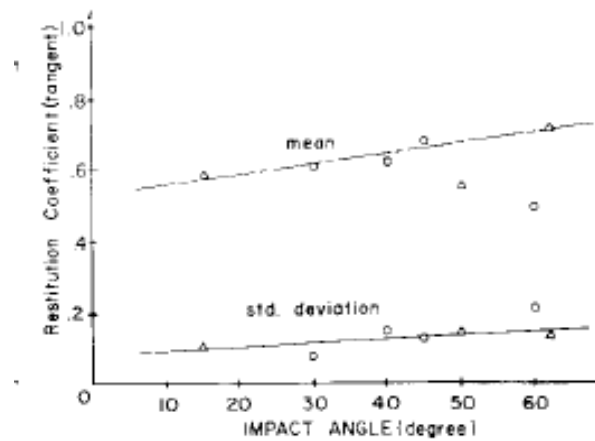
$$R_t = 0,535 + 0,028 \cdot \theta \quad (3.2)$$

Όπου θ η γωνία πρόσπτωσης σε μοίρες.



Εικόνα 15: Τιμές του κάθετου συντελεστή αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης

Πηγή: Wu (1985)

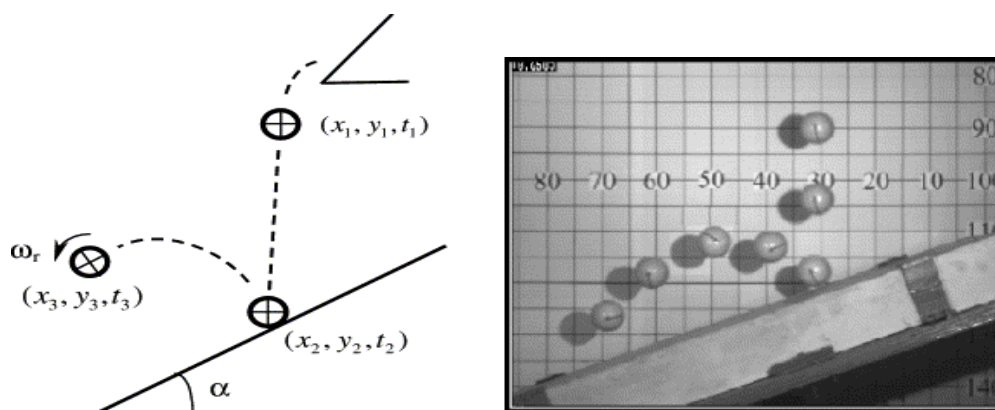


Εικόνα 16: Τιμές του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης

Πηγή: Wu (1985)

Ο **Urciuoli** (1988) εκτελώντας ανάδρομες αναλύσεις και εργαστηριακά πειράματα εκτίμησε τους συντελεστές αναπήδησης R_n , R_t καθώς επίσης τον κάθετο και εφαπτομενικό συντελεστή R_e για πειράματα πεδίου πάνω σε ασβεστολιθικά πετρώματα. Συμπέρανε ότι όλοι οι συντελεστές είναι άμεση συνάρτηση της κλίσης του πρανού, του ύψους ελεύθερης πτώσης του τεμάχους καθώς και της ταχύτητας πρόσκρουσης, του σχήματος του τεμάχους και της θέσης του προ της κρούσης. Οι συντελεστές αναπήδησης μειώνονται με την αύξηση της ταχύτητας πρόσκρουσης, ενώ ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης επηρεάζεται περισσότερο σε σχέση με τον κάθετο από την ταχύτητα πρόσκρουσης.

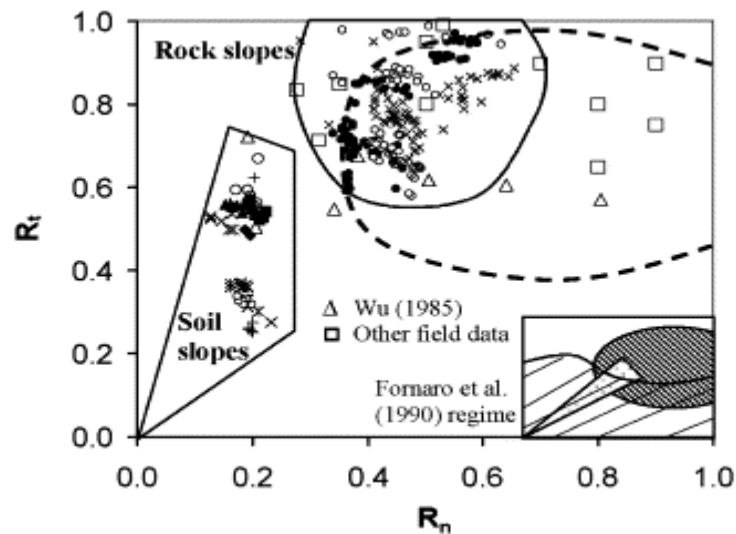
Οι **Chau et al.** (1999) πραγματοποίησαν πειράματα εργαστηρίου χρησιμοποιώντας ως υλικό γύψο τόσο για τα δοκίμια όσο και για την επιφάνεια πρόσπτωσης. Παρατήρησαν ότι ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης αυξάνεται με την αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης, αλλά δεν βρήκαν σαφή συσχέτιση όσον αφορά τον εφαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης και την κλίση της πλαγιάς. Οι υπολογισθείσες τιμές για τον κάθετο συντελεστή κυμαίνονται από 0,35 μέχρι 0,60 ενώ αντίστοιχα για τον εφαπτομενικό από 0,60 μέχρι και 0,90. Παρατήρησαν ότι μεγαλύτερες διακυμάνσεις στους συντελεστές αναπήδησης είχαμε για μαλακότερους βράχους από ότι για σκληρότερους. Παρατηρήθηκε ότι ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης για κλίσεις πρανού μεταξύ 30° και 50° είναι ανεξάρτητος του σχήματος του τεμάχους, ενώ για μεγαλύτερες κλίσεις ο συντελεστής αυξάνει με την κλίση για κυβικά και εξαγωνικά τεμάχια ενώ παραμένει σταθερός για σφαιρικά και κυλινδρικά.



Εικόνα 17: Πειραματική διάταξη και καταγραφή των θέσεων ενός τεμάχους κατά την εκτέλεση της τροχιάς του

Πηγή: Chau et al. (1999)

Οι **Fornaro et al.** (1990) παρουσίασαν μια συσχέτιση για τον κάθετο και εφαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης για βραχώδεις και εδαφικές πλαγιές με βάση πειράματα πεδίου που πραγματοποιήθηκαν. Οι **Chau et al.** προσέθεσαν στοιχεία σε αυτό το σχήμα με βάση τα εργαστηριακά τους αποτελέσματα.



Εικόνα 18: Εφαπτομενικός και κάθετος συντελεστής αναπήδησης

Πηγή: **Fornaro et al.**

Ο **Kamijo** (2000) μελέτησε την αναπήδηση δυο τεμαχών βάρους 220 kg και 800 kg αντίστοιχα, υπό ελεύθερη πτώση από διάφορα ύψη (έως 3 m), σε βάση από τσιμέντο. Παρατήρησε ότι ο συνολικός συντελεστής αναπήδησης R μειώνεται με την αύξηση της ταχύτητας και την αύξηση της μάζας του τεμάχου.

Οι **Ushiro et al.** (2000) εκτελώντας πειράματα μικρής κλίμακας πάνω σε βραχώδεις επιφάνειες αλλά και σε επιφάνειες αποτελούμενες από σκυρόδεμα μελέτησαν την επιρροή που έχει η ταχύτητα πρόσκρουσης πάνω στους συντελεστές αναπήδησης. Ανέφεραν ότι ενώ δεν επηρεάζεται σημαντικά ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης, από την άλλη πλευρά παρατηρείται μικρή μείωση του κάθετου συντελεστή με αύξηση της κάθετης ταχύτητας. Μία πιθανή σχέση μεταξύ του κάθετου συντελεστή αναπήδησης και της κάθετης ταχύτητας πρόσκρουσης που προκύπτει αναλύοντας την ταχύτητα σε δύο συνιστώσες δίνεται από τις κάτωθι σχέσεις:

$$R_n = 0,8478 \cdot e^{-0,0842} \cdot (-v_n) \quad (3.3)$$

$$R_n = 2,506 \cdot e^{-0,1053} \cdot (-v_n) \quad (3.4)$$

Όπου η πρώτη σχέση αντιστοιχεί σε επιφάνειες από σκυρόδεμα και η δεύτερη σε βραχώδεις επιφάνειες. Επιπλέον, ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης φάνηκε να μειώνεται με παράλληλη αύξηση της μάζας του τεμάχου, ανεξαρτήτως από την ταχύτητα πρόσπτωσής του.

Οι **Pfeiffer και Bowen** (1989) εκτελώντας μια σειρά επί τόπου δοκιμών, για την βαθμονόμηση του λογισμικού CRSP παρατήρησαν ότι ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης επηρεάζεται περισσότερο συγκριτικά με τον εφαπτομενικό από τις συνθήκες πρόσκρουσης. Παρατήρησαν ότι η επίδραση της ταχύτητας πρόσκρουσης είναι ελάχιστη για λεία βραχώδη πρηνή, ενώ έχει μεγαλύτερη βαρύτητα σε μαλακά. Επίσης, με την αύξηση της διαμέτρου του τεμάχου, μειώνεται η επίδραση του μεγέθους στην αναπτυσσόμενη ταχύτητα κίνησης. Αυτό υποδηλώνει ότι κρίσιμη παράμετρος είναι η έμπηξη του

τεμάχους κατά την κρούση, η οποία είναι πρακτικά μηδενική σε σκληρά βραχώδη πρηνή. Συνεπώς, σε μαλακά πρηνή, οι αναπτυσσόμενες ταχύτητες και οι αναπήδησεις είναι μικρότερες και άρα κατά την διάρκεια μιας κίνησης παρατηρούνται περισσότερες κρούσεις με αποτέλεσμα το μικρότερο μήκος τροχιάς σε σχέση με αντίστοιχη κίνηση σε σκληρότερο υλικό.

Οι **Wong et al.** (2000) μελέτησαν την επίδραση του σχήματος του βραχοτεμάχους στους συντελεστές αναπήδησης για κρούσεις σε βάση γρανίτη. Βρέθηκε ότι ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης μειώνεται με την μετάβαση από στρογγυλεμένο σε γωνιώδες σχήμα του τεμάχους, σε αντίθεση με το συμπέρασμα της προαναφερθείσας έρευνας (**Chau et al.**, 1999). Μελετήθηκε επίσης, η επίδραση της γωνίας πρόσπτωσης στους συντελεστές αναπήδησης εκτελώντας δοκιμές ελεύθερης πτώσης σε κεκλιμένη βάση. Παρατηρήθηκε ότι ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης μειώνεται με την αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης (ή με την μείωση της κλίσης της επιφάνειας πρόσκρουσης). Η επίδραση της κλίσης μειώνεται με την αύξηση της σκληρότητας του υλικού. Για τον εφαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης η τάση είναι λιγότερο προφανής. Για αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης παρατηρείται μικρή αύξηση του συντελεστή, με τις τιμές να εμφανίζουν μεγάλη διασπορά.

Οι **Richards et al.** (2001) πραγματοποίησαν εργαστηριακά πειράματα ελεύθερης πτώσης βασιζόμενοι σε διαφορετικούς τύπους βράχων (βασάλτης, διορίτης, γνεύσιος, γρανίτης, ασβεστόλιθος, μάρμαρο, αμμόλιθος, σχιστόλιθος και ρυόλιθος) καθώς επίσης πάνω σε αποσαθρωμένα και μη εδαφικά υλικά. Διατυπώθηκε η ακόλουθη σχέση μεταξύ του κάθετου συντελεστή αναπήδησης και της σκληρότητας Schmidt.

$$R_n = \frac{(-110+9 \cdot R_{slab} + 4 \cdot R_{ball} + 4 \cdot \theta)}{1000} \quad (3.5)$$

Όπου R_{slab} και R_{ball} είναι η σκληρότητα της σφύρας Schmidt της επιφάνειας πρόσκρουσης και του τεμάχους αντίστοιχα και θ η κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης σε μοίρες. Η παραπάνω σχέση αναφέρεται σε σφαιρικά, μαλακά τεμάχια, ενώ για σκληρότερα δοκίμια ο εν λόγω κάθετος συντελεστής αναπήδησης παίρνει τιμές περίπου τρεις φορές μικρότερη. Η προαναφερθείσα σχέση δείχνει ότι η σκληρότητα του τεμάχους επηρεάζει την τιμή του κάθετου συντελεστή αναπήδησης λιγότερο από ότι η σκληρότητα της επιφάνειας πρόσπτωσης. Επιπλέον, από την παραπάνω σχέση, παρατηρήθηκε ότι ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης αυξάνεται με την αύξηση της κλίσης της επιφάνειας πρόσπτωσης. Ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης βρέθηκε να έχει μικρότερη συσχέτιση με την σκληρότητα Schmidt και δεν αναλύθηκε περαιτέρω από τους ερευνητές.

Οι **Cagnoli και Manga** (2004) πραγματοποίησαν εργαστηριακά πειράματα πάνω σε κεκλιμένες επιφάνειες πρόσπτωσης και δοκίμια από ελαφρόπετρες. Διαπίστωσαν ότι ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης μειώνεται καθώς η γωνία πρόσπτωσης προσεγγίζει τις 90 μοίρες. Για γωνία ίση με 80 μοίρες η τιμή του ήταν ίση με 0,15, ενώ για γωνία ίση με 25 μοίρες η τιμή του συντελεστή ήταν ίση με 0,55.

Η μονάδα συνήθως θεωρείται σαν ένα άνω όριο για τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης στις αριθμητικές μεθόδους. Παρ' όλα αυτά, μέχρι πρόσφατα, τιμές πάνω από την μονάδα σπανίως παρατηρούνταν και εξηγούνταν ακόμα και σε περιπτώσεις όπου τέτοια αποτελέσματα υπήρχαν σε αρκετές δημοσιεύσεις. Οι **Buzzi et al.** (2012) πραγματοποίησαν πειράματα εργαστηρίου προκειμένου να ερμηνεύσουν τον μηχανισμό και τις παραμέτρους εκείνες οι οποίες δίνουν τιμές για τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης πάνω από την μονάδα. Σύμφωνα με την έρευνα αυτή, τιμές πάνω από την μονάδα μπορεί να ερμηνευθούν σαν έναν συνδυασμό της μικρής γωνίας πρόσπτωσης (μικρότερη από 20 μοίρες), της περιστροφικής κίνησης του τεμάχους καθώς επίσης και του σχήματός του.



3.6.3 Γενικές θέσεις από ανάδρομες αναλύσεις

Οι **Topal et al.** (2006) πραγματοποίησαν ανάδρομες αναλύσεις θεωρώντας σταθερές τιμές τόσο για τον κάθετο ($R_n=0,46$) όσο και για τον εφαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης ($R_t=0,71$) και εκτίμησαν για διαφορετικές μάζες τεμαχών (από 10 μέχρι 10.000 kg) τις εξής 4 παραμέτρους: την οριζόντια απόσταση που διανύεται από τον βράχο μέχρι το τέλος της τροχιάς του, το μέγιστο ύψος αναπήδησης, την μέγιστη συνολική κινητική ενέργεια και την μέγιστη μεταφορική ταχύτητα.

Οι **Ansari et al.** (2013) πραγματοποίησαν αναλύσεις προκειμένου να κάνουν αποτίμηση της επικινδυνότητας βραχοπτώσεων στις σπηλιές Ajanta, στην Ινδία. Το γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής αποτελείται από βασάλτες, ενώ σύμφωνα με τους ερευνητές το πιο σημαντικό βήμα για την αποτίμηση της επικινδυνότητας σχετικά με τις βραχοπτώσεις αποτελεί η εύρεση του αρχικού σημείου εκκίνησης της βραχύπτωσης. Για τον λόγο αυτό, οι ερευνητές χρησιμοποίησαν τον κώδικα 'Universal Distinct Element Code, Itasca (UDEC) για τον προσδιορισμό της αρχικής θέσης από όπου μπορεί να ξεκινήσει μια πιθανή κατάπτωση βράχου κατά μήκος μιας πλαγιάς. Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκαν δισδιάστατες αναλύσεις χρησιμοποιώντας το λογισμικό RocFall V.4 της Rocscience. Έτσι, εκτελέστηκαν ανάδρομες αναλύσεις προκειμένου να προσδιορισθούν οι τιμές των συντελεστών αναπήδησης. Για τον προσδιορισμό τόσο του κάθετου όσο και του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα μάζες από 500 μέχρι 2000 κιλά και έγιναν 100 ρίψεις. Οι τιμές των συντελεστών προέκυψαν ως εξής: κάθετος συντελεστής αναπήδησης $0,35\pm 0,05$ και εφαπτομενικός $0,85\pm 0,05$.



4 Βιβλιογραφική ανασκόπηση πειραμάτων πεδίου

Παρακάτω παρουσιάζεται μια λεπτομερέστερη περιγραφή πειραμάτων η οποία έγινε με σκοπό να μελετηθεί ο ενδεδειγμένος τρόπος διεξαγωγής πειραμάτων πεδίου ώστε να εφαρμοσθούν αντίστοιχες τεχνικές στα πειράματά μας.

Πειράματα πεδίου στη Νέα Νότια Ουαλία της Αυστραλίας, Spadari *et al.* (2011)

Τα πειράματα πεδίου έλαβαν χώρα σε τρεις διαφορετικές περιοχές της Νέας Νότιας Ουαλίας (Αυστραλία) και διεξήχθησαν τέσσερις σειρές πειραμάτων από τις οποίες οι δύο έγιναν στο Murrurundi, Hunter Valley, ενώ από ένα πείραμα έγινε στο βουνό Sugarloaf στο Newcastle και ένα στο Dusodie, στο Dungog. Γενικώς, η Νέα Νότια Ουαλία χαρακτηρίζεται από ένα σύνολο γεωλογικών σχηματισμών, όπως για παράδειγμα βασάλτες και γρανίτες, ενώ η επιλογή των παραπάνω περιοχών έγινε προκειμένου να υπάρχει όσο το δυνατόν καλύτερη αντιπροσώπευση των γεωλογικών σχηματισμών στις μελέτες που ακολούθησαν.

Πίνακας 2: Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά των περιοχών

	Murrurundi, Hunter Valley	Sugarloaf ,Newcastle	Dusodie, Dungog
Γεωλογικός σχηματισμός	Βασάλτης	Χαλαζιακός ψαμμίτης και κροκαλοπαγή	Ψαμμίτης
Κλίση πρανούς	20° - 22,5°	24° - 30°	17° - 25°
Αριθμός δοκιμών	40	13	40

Τα πειράματα διενεργήθηκαν χρησιμοποιώντας βιντεοκάμερες υψηλής ανάλυσης με μέγιστη ταχύτητα περί τις 50 λήψεις ανά δευτερόλεπτο και στην συνέχεια επεξεργαστήκαν μέσω του λογισμικού TEMA 3.3, μέσω του οποίου μπορεί να καθοριστεί η θέση, η ταχύτητα καθώς και η επιτάχυνση των επιθυμητών σημείων της ανάλυσης. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν προκειμένου να καθοριστούν οι εξής 3 παράμετροι του φαινομένου των βραχοπτώσεων: Οι συντελεστές αναπήδησης, ο συντελεστής ολίσθησης και η μεταφορική και περιστροφική ενέργεια.

Συνολικά έγιναν 93 δοκιμές με την μάζα των βραχοτεμαχών να κυμαίνεται από 5 έως 375 kg και αντίστοιχα ο όγκος να παίρνει τιμές από 0,002 μέχρι 0,145 m³. Όσον αφορά τον συντελεστή αναπήδησης αυτός αναλύθηκε σε δύο συνιστώσες, στον κάθετο και τον εφαπτομενικό. Οι τιμές του εφαπτομενικού και ιδίως του καθέτου συντελεστή αναπήδησης βρέθηκαν αρκετά μεγαλύτερες από

εκείνες που συναντώνται στην βιβλιογραφία. Παρακάτω παρατίθεται ο πίνακας με τις τιμές των συντελεστών με βάση τα πειράματα που διεξήχθησαν.

Πίνακας 3: Τιμές συντελεστών αναπήδησης

Τύπος βράχου /Τοποθεσία	Βασάλτης Murrurundi		Χαλαζιακός ψαμμίτης και κροκαλοπαγή Sugarloaf		Ψαμμίτης Dungog	
	Rn	Rt	Rn	Rt	Rn	Rt
Ελάχιστη τιμή	0,38	0,37	0,68	0,54	0,43	0,54
Μέγιστη τιμή	1,98	0,94	1,79	0,93	1,85	0,96
Μέση τιμή	1,06	0,74	1,15	0,73	1,18	0,78
Τυπική απόκλιση	0,41	0,14	0,28	0,13	0,32	0,09

Αντίστοιχα, στην βιβλιογραφία για αποσαθρωμένους σχηματισμούς οι τιμές του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης κυμαίνονται από 0,37 έως 0,96 και αντίστοιχα του καθέτου από 0,38 έως και 1,98. Σύμφωνα με τους ερευνητές, τιμές πάνω από την μονάδα δεν είναι φυσιολογικές καθώς με τον τρόπο αυτό δεν θεωρείται ελαστοπλαστική συμπεριφορά του εδάφους αλλά απολύτως ελαστική. Για τον λόγο αυτό, οι ερευνητές απέδωσαν τις υψηλές τιμές κυρίως του κάθετου συντελεστή αναπήδησης στον συνδυασμό της περιστροφικής ενέργειας, της μικρής γωνίας πρόσπτωσης που παρατηρήθηκε καθώς και στο σχήμα του τεμάχους.

Οι τιμές του συντελεστή ολίσθησης βρέθηκαν να ταυτίζονται με εκείνες της βιβλιογραφίας ενώ παράλληλα τα αποτελέσματα έδειξαν ότι σε μερικές περιπτώσεις είναι αναγκαίο να θεωρούμε διαφορετικές τιμές του συντελεστή ολίσθησης κατά μήκος της πλαγιάς προκειμένου να αποτυπωθεί όσο το δυνατόν καλύτερα η συνολική συμπεριφορά του τεμάχους όσον αφορά την ολίσθησή του.

Τέλος, εκτιμήθηκε τόσο η μεταφορική όσο και η περιστροφική ενέργεια πριν και μετά από την κάθε αναπήδηση. Αν και έχει αποδειχθεί ότι η μεταφορική ενέργεια μειώνεται μετά από κάθε αναπήδηση, δεν είναι ακόμα βέβαιο ότι συμβαίνει το ίδιο και στην περιστροφική ενέργεια σύμφωνα με την έρευνα που πραγματοποιήθηκε.

Εκτίμηση της επικινδυνότητας των καταπτώσεων: ένα παράδειγμα από την ιστορική περιοχή της Μονεμβασιάς, Saroglou *et al.* (2012)

Οι μελέτες διεξήχθησαν στον ιστορικό χώρο της Μονεμβασιάς, όπου οι γεωλογικοί σχηματισμοί, οι οποίοι συνθέτουν την περιοχή, αποτελούνται από απαρχαιωμένους δολομιτικούς ασβεστόλιθους και γυψοειδείς μαζικούς ασβεστόλιθους. Στην βραχώμαζα ανιχνεύθηκαν με την βοήθεια του δικτύου Schmidt 3 έως 5 εκτενείς ασυνέχειες, οι οποίες είναι παράλληλες προς το μέτωπο του βραχώδους πρηνούς. Ο συντελεστής τραχύτητας JRC παίρνει τιμές από 4 μέχρι και 12, με μέση τιμή 6, ενώ παράλληλα εκτιμήθηκε η γωνία εσωτερικής τριβής της πλαγιάς ($\phi=38$ μοίρες). Η πλαγιά χωρίστηκε σε 5 ευδιάκριτες περιοχές, προκειμένου να απλοποιηθεί η ανάλυση, με βάση τα εξής 5 κριτήρια:

- 1) την γεωμετρία του πρηνούς
- 2) την επίδραση που θα έχει η βραχώπτωση στις ανθρώπινες δραστηριότητες
- 3) τα γεωμετρικά και γεωλογικά χαρακτηριστικά των βραχοτεμαχών
- 4) τις αποστάσεις και την επιμονή των ασυνεχειών και
- 5) το πιθανό ύψος από το οποίο μπορεί να έχουμε την έναρξη της βραχώπτωσης

Το μέγεθος των βραχοτεμαχών που παρατηρούνται ως επί τω πλείστον στην ευρύτερη περιοχή, σύμφωνα με στατιστικές αναλύσεις, κυμαίνεται από 0,5 έως 1 m³, ενώ ιστορικά δεδομένα έδειξαν ότι ο όγκος των τεμαχών μπορεί να ξεπεράσει και τα 2 m³. Η καταγραφή του πρηνούς, όσον αφορά τις συντεταγμένες του κάθε σημείου της πλαγιάς, βασίστηκε σε μία νέα γεωδαιτική μέθοδο. Έτσι, με βάση πειράματα, τα οποία έγιναν στο εργαστήριο και με βάση αντίστροφες αναλύσεις, εκτιμήθηκε τόσο ο εφαπτομενικός όσο και ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης. Παρακάτω, παρατίθεται ο πίνακας με τις τιμές των συντελεστών με βάση τα πειράματα που διεξήχθησαν.

Πίνακας 4: Τιμές συντελεστών αναπήδησης

Μέθοδος	Μέση τιμή Rn	Μέση τιμή Rt
Ανάδρομη ανάλυση	0,46	0,83
Δοκιμή εργαστηρίου	0,48	0,77
Συνολική μέση τιμή	0,47	0,80

Τα παραπάνω αποτελέσματα εκτιμήθηκαν από εργαστηριακές μετρήσεις θεωρώντας σφαιρικά δοκίμια από ασβεστόλιθο και τέσσερις διαφορετικές κλίσεις της πλαγιάς (15°, 30°, 45°, 60°).

Τέλος, προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί η πιθανότητα μιας βραχώπτωσης, προτάθηκε από τους ερευνητές ένα σύστημα ταξινόμησης της επικινδυνότητας για φυσικές πλαγιές. Αυτό το σύστημα περιλαμβάνει 20 παραμέτρους, οι οποίες κατηγοριοποιούνται με βάση την γεωμετρία της πλαγιάς, τις γεωλογικές συνθήκες, την πιθανότητα ενεργοποίησης των μηχανισμών για την κατάπτωση τεμαχών καθώς και τις συνέπειες μιας τέτοιας βραχώπτωσης. Εφαρμογή του εν λόγω συστήματος έγινε και στη συγκεκριμένη μελέτη.

Επίδραση γεωτεχνικών και κινηματικών παραμέτρων στους συντελεστές αναπήδησης, Asteriou *et al.* (2012)

Πειράματα εργαστηρίου και πεδίου διεξήχθησαν από τους Asteriou *et al.* (2012) προκειμένου να καθοριστούν οι παράμετροι εκείνες οι οποίες επηρεάζουν την τροχιά των τεμαχών. Για τα εν λόγω πειράματα, χρησιμοποιήθηκε κάμερα υψηλής ευκρίνειας με ταχύτητα 250 λήψεις ανά δευτερόλεπτο και ανάλυσης 640x480 pixels.

Στο εργαστήριο πραγματοποιήθηκαν συνολικά 3 σειρές πειραμάτων από τις οποίες οι 2 ήταν πειράματα ελεύθερης πτώσης και η τρίτη πείραμα παραβολικής πτώσεως. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί από τους οποίους μορφώθηκαν δοκίμια ήταν το μάρμαρο, ο σχιστόλιθος, ο ασβεστόλιθος, ο ψαμμίτης και η μάργα. Για κάθε υλικό ξεχωριστά υπολογίστηκε με την σφύρα Schmidt η σκληρότητα καθώς επίσης και η ξηρή πυκνότητα όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5: Φυσικές ιδιότητες υλικών πειράματος

Είδος βράχου	Σκληρότητα (Schmidt)	Ξηρή πυκνότητα (gr/cm ³)
Ψαμμίτης	44,7	2,66
Μάρμαρο	38,2	2,65
Ασβεστόλιθος	36,1	2,68
Σχιστόλιθος	22,3	2,51
Μάργα	18,2	2,25

Η πρώτη σειρά πειραμάτων πραγματοποιήθηκε προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδραση που έχει η ταχύτητα πρόσκρουσης και η μάζα του βραχοτεμάχους πάνω στον κινηματικό συντελεστή αναπήδησης. Για τον λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια μαρμάρου ίδιου σχήματος αλλά διαφορετικής μάζας και ύψους απελευθέρωσης και πραγματοποιήθηκαν συνολικά 56 δοκιμές ελεύθερης πτώσης πάνω σε οριζόντιο επίπεδο. Παρακάτω, παρατίθεται ο πίνακας με τα αποτελέσματα από την πρώτη σειρά δοκιμών στο εργαστήριο.

Πίνακας 6: Μέση τιμή και τυπική απόκλιση κινηματικού συντελεστή αναπήδησης

1η σειρά δοκιμών	Αριθμός δοκιμών	Ακμή (cm)	Μάζα (gr)	Ύψος απελευθέρωσης (m)	Κινηματικός συντελεστής αναπήδησης	
					Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση
Μάρμαρο 1	10	2,06	19,9	0,85	0,50	0,07
Μάρμαρο 2	13	2,66	42,5	0,85	0,49	0,07
Μάρμαρο 3	8	3,13	70,3	0,85	0,51	0,03
Μάρμαρο 4	12	2,08	20,6	0,63	0,50	0,07
Μάρμαρο 5	13	2,08	20,6	1,35	0,54	0,08

Η δεύτερη σειρά πειραμάτων πραγματοποιήθηκε προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδραση που θα έχει η σκληρότητα του γεωλογικού σχηματισμού πάνω στον κινηματικό συντελεστή αναπήδησης. Για τον λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια και από τα 5 υλικά παρόμοιου σχήματος αλλά διαφορετικής μάζας και πραγματοποιήθηκαν συνολικά 44 δοκιμές ελεύθερης πτώσης πάνω σε οριζόντιο επίπεδο. Παρακάτω, παρατίθεται ο πίνακας με τα αποτελέσματα από την δεύτερη σειρά δοκιμών.

Πίνακας 7: Μέση τιμή και τυπική απόκλιση κινηματικού συντελεστή αναπήδησης

2η σειρά δοκιμών	Αριθμός δοκιμών	Ακμή (cm)	Μάζα (gr)	Ύψος απελευθέρωσης (m)	Κινηματικός συντελεστής αναπήδησης	
					Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση
Μάρμαρο	10	2,06	19,9	0,85	0,50	0,07
Σχιστόλιθος	8	2,01	17,5	0,85	0,38	0,04
Ψαμμίτης	10	2,07	20,3	0,89	0,66	0,09
Ασβεστόλιθος	8	2,11	21,4	0,89	0,50	0,05
Μάργα	8	2,05	16,5	0,89	0,36	0,03

Τέλος, όσον αφορά τα πειράματα εργαστηρίου, η τρίτη σειρά πειραμάτων πραγματοποιήθηκε προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδραση της γωνίας πρόσπτωσης πάνω στον κινηματικό συντελεστή αναπήδησης αλλά και την επίδραση που έχει τόσο στον κάθετο όσο και τον εφαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης. Για τον σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκαν συνολικά 94 παραβολικές ρίψεις, χρησιμοποιώντας δοκίμια μαρμάρου, ψαμμίτη και μάργας με μάζες 19,9, 20,3 και 16,5 gr αντίστοιχα. Η γωνία κλίσης της επιφάνειας πρόσπτωσης θεωρήθηκε ίση με 0, 15, 30 και 45 μοίρες. Αντίστοιχα, με τις 2 πρώτες σειρές πειραμάτων εκτιμήθηκαν οι συντελεστές αναπήδησης.

Τα πειράματα πεδίου, στην εν λόγω έρευνα, πραγματοποιήθηκαν στο Πεντελικό Όρος χρησιμοποιώντας ως δοκίμια βραχοτεμάχια μαρμάρου τα οποία συλλέχθηκαν επί τόπου από την ευρύτερη περιοχή. Σαν επιφάνεια πρόσπτωσης χρησιμοποιήθηκε ένας ογκόλιθος μαρμάρου με διαστάσεις 7m x 3m και συνολικού όγκου 100 m³. Η πλαγιά έχει μια σχετικώς σταθερή κλίση ίση με 30 μοίρες, ενώ η σκληρότητα του βράχου, σύμφωνα πάντα με πρότυπες διαδικασίες, εκτιμήθηκε ίση με 32 βαθμούς(Schmidt) . Συνολικά, πραγματοποιήθηκαν 16 δοκιμές και αναλύθηκαν 29 αναπηδήσεις προκειμένου να καθοριστεί τόσο ο κινηματικός όσο και ο κάθετος και ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης.

Κάποια σημαντικά συμπεράσματα, τα οποία εκτιμήθηκαν τόσο από τα πειράματα πεδίου όσο και του εργαστηρίου από την συγκεκριμένη έρευνα είναι τα κάτωθι:

- ❖ Με την αύξηση της ταχύτητας πρόσκρουσης παρατηρείται μείωση της τυπικής απόκλισης του κινηματικού συντελεστή αναπήδησης
- ❖ Για γωνίες πρόσπτωσης μικρότερες από 30 μοίρες παρατηρείται κάθετος συντελεστής αναπήδησης μεγαλύτερος από την μονάδα
- ❖ Αυξάνοντας την γωνία πρόσπτωσης παρατηρείται εκθετική μείωση τόσο του κινηματικού συντελεστή όσο και του κάθετου συντελεστή αναπήδησης



- ❖ Για γωνίες πρόσπτωσης μεταξύ 30 και 50 μοιρών ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης παρουσιάζει ελάχιστες τιμές
- ❖ Ο κινηματικός συντελεστής αναπήδησης δεν βρέθηκε ποτέ πάνω από την μονάδα, γεγονός το οποίο υποστηρίζει την απώλεια ενέργειας κατά την πρόσκρουση, σε αντίθεση με τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης και
- ❖ Αυξάνοντας την σκληρότητα του γεωυλικού παρατηρείται αύξηση του κινηματικού συντελεστή αναπήδησης.

Πειραματική και θεωρητική μελέτη βελτίωσης των αναλύσεων και του σχεδιασμού των μέτρων αναχαίτισης, Giani *et al.* (2004)

Πειράματα πεδίου διεξήχθησαν από τους G.P. Giani *et al.* το 2004 σε δύο διαφορετικές περιοχές της Ιταλίας, προκειμένου να αξιολογηθούν οι εξής 4 παράμετροι, οι οποίες επηρεάζουν το φαινόμενο της κατάπτωσης των βράχων:

- 1) οι μηχανισμοί εκείνοι οι οποίοι προκαλούν την έναρξη των βραχοπτώσεων
- 2) η εναέρια τροχιά των βραχοτεμαχών
- 3) η επιρροή των αναπηδήσεων και η πιθανή θραύση του τεμάχους κατά την διάρκεια της κίνησής του καθώς και
- 4) η ταχύτητα και η κινητική ενέργεια που αναπτύσσονται

Η πρώτη σειρά πειραμάτων έλαβε χώρα στα Απέννινα, μία περιοχή η οποία απέχει 40 χιλιόμετρα από την Πάρμα της Ιταλίας, όπου η πλαγιά χαρακτηρίζεται από μία αποσαθρωμένη επιφάνεια κάτω από την οποία εκτείνεται ένας φυσικός οφιολιθικός βράχος. Τα πειράματα διεξήχθησαν σε μία πλαγιά μήκους 180 μέτρων, ύψους 75 μέτρων και μέσης κλίσης 25 με 30 μοίρες. Συνολικά, ερίφθησαν, με την βοήθεια ενός εκσκαφέα, 43 οφιολιθικά βραχοτεμάχια με όγκους από 0,01 έως 0,6 m³.

Αντίστοιχα, η δεύτερη σειρά πειραμάτων έλαβε χώρα στις Άλπεις της Βόρειας Ιταλίας, όπου η πλαγιά αποτελείται από αποσαθρωμένο γρανιτικό βράχο, ο οποίος προέρχεται από εκτενή εκμετάλλευση λόγω της ύπαρξης λατομείου στην ευρύτερη περιοχή. Τα πειράματα και σε αυτή την περίπτωση έγιναν σε μία πλαγιά μήκους 180 μέτρων, ύψους 131 μέτρων και μέσης κλίσης 36 μοιρών. Συνολικά, ερίφθησαν 40 βραχοτεμάχια με αντίστοιχους όγκους από 0,1 έως 4,5 m³.

Και στα δύο πειράματα, χρησιμοποιήθηκε ψηφιακή βιντεοκάμερα, η οποία τοποθετήθηκε κάθετα προς τα πρηνή, με ταχύτητα περί τις 10 λήψεις ανά δευτερόλεπτο. Έτσι, μέσω αναλύσεων, προσδιόρισαν τις συντεταγμένες σε κάθε σημείο της τροχιάς των βραχοτεμαχών και γνωρίζοντας τον χρόνο μεταξύ δύο διαδοχικών λήψεων υπολόγισαν την μετακίνηση, την μεταφορική ταχύτητα, την γραμμή ενέργειας και κατ' επέκταση τον κάθετο και εφαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης καθώς και τον συντελεστή ολίσθησης. Για τον προσδιορισμό του συντελεστή ολίσθησης έκαναν σύγκριση των καμπυλών της εφαπτομενικής ταχύτητας που προκύπτει τόσο από τα πειράματα όσο και από θεωρητικές προσεγγίσεις. Από την άλλη πλευρά, παρακάτω παραθέτονται πίνακες για τις τιμές του κάθετου και εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης έτσι όπως υπολογίστηκαν από τις αναλύσεις των πειραμάτων πεδίου στην Ιταλία.



Πίνακας 8: Τιμές του κάθετου και του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης για την 1η σειρά πειραμάτων στα Απέννινα

Αριθμός τεμάχους	Κάθετος συντελεστής αναπήδησης R_n	Εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης R_t
16	0,52	0,77
17	0,62	0,75
19	0,47	0,80
20	0,34	0,81
43	0,47	0,84
Μέση τιμή	0,48	0,79
Τυπική απόκλιση	0,10	0,03

Πίνακας 9: Τιμές του κάθετου και του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης για την 2η σειρά πειραμάτων στα Απέννινα

Αριθμός τεμάχους	Κάθετος συντελεστής αναπήδησης R_n	Εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης R_t
2	0,19	0,43
4	0,08	0,67
12	0,05	0,35
15	0,14	0,50
16	0,07	0,42
22	0,69	0,52
25	0,60	0,49
29	0,25	0,48
Μέση τιμή	0,25	0,47
Τυπική απόκλιση	0,26	0,10

Τέλος, να επισημάνουμε ότι η ανάλυση των πιθανών τροχιών των καταπτώσεων των βράχων διεξήχθη αρχικώς χρησιμοποιώντας ένα τρισδιάστατο αριθμητικό μοντέλο, το ROTOMAP (Scioldo,1991) και εν συνεχεία για να βρεθούν οι πιο κρίσιμες διαδρομές κατά μήκος της πλαγιάς χρησιμοποιήθηκε ένα δισδιάστατο μοντέλο, το CRSP (Pfeiffer και Bowen, 1989).

Μεσαίας κλίμακας πειραματική μελέτη βραχοπτώσεων σε εδαφικά πρανή, Labiouse & Heidenreich (2009)

Πειράματα μικρής κλίμακας (εργαστηρίου) αλλά και πειράματα μέσης κλίμακας έλαβαν χώρα το 2009 στο εργαστήριο βραχομηχανικής του ελβετικού ομοσπονδιακού ινστιτούτου τεχνολογίας της Λωζάνης, στην Ελβετία, προκειμένου να γίνει διερεύνηση των παραγόντων που επηρεάζουν το φαινόμενο των καταπτώσεων και να γίνει καλύτερα αντιληπτό το φαινόμενο της αναπήδησης. Η έρευνα επικεντρώθηκε κυρίως στα αποτελέσματα των πειραμάτων μεσαίας κλίμακας πάνω σε μη συνεκτικά εδάφη, όπου ο όρος μεσαία κλίμακα επιλέχθηκε προκειμένου να τονιστεί το γεγονός ότι το μέγεθος και το βάρος των τεμαχίων δεν ξεπερνά τα 10 kN, ενώ παράλληλα η ενέργεια πρόσπτωσης φτάνει μέχρι τα 100 kJ.

Τα πειράματα διενεργήθηκαν σε έναν ειδικά διαμορφωμένο χώρο διαμέτρου 5 μέτρων και βάθους 8 μέτρων. Τεμάχια με διαφορετικά βάρη (από 100 έως 1000 κιλά) και σχήματα (σφαιρικό και κυλινδρικό) ερίφθησαν κατακορύφως από διαφορετικά ύψη (μέχρι 10 μέτρα) πάνω σε μία οριζόντια αλλά και κεκλιμένη (μέχρι 30 μοίρες) στρώση άμμου. Το πάχος του στρώματος της άμμου ήταν σταθερό και ίσο με 1 μέτρο, ενώ η γωνία εσωτερικής τριβής της άμμου θεωρήθηκε ίση με 33 μοίρες. Τα δοκίμια κατασκευάστηκαν από σκυρόδεμα ενώ συνολικά πραγματοποιήθηκαν 175 ρίψεις προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση των παραμέτρων, που σχετίζονται με την κλίση της πλαγιάς, τα χαρακτηριστικά του τεμάχους και το ύψος απελευθέρωσής του, πάνω στο φαινόμενο της αναπήδησης. Χρησιμοποιήθηκε κάμερα υψηλής ανάλυσης με ταχύτητα περί τις 250 λήψεις ανά δευτερόλεπτο και τα αποτελέσματα αναλύθηκαν μέσω του λογισμικού WINalyze.

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων απέδειξε ότι η αναπήδηση του τεμάχους εξαρτάται όχι μόνο από τα χαρακτηριστικά του εδάφους αλλά και από τις παραμέτρους που βασίζονται στο τεμάχιο και τα κινηματικά χαρακτηριστικά του. Πιο συγκεκριμένα, το μέγεθος (όγκος) και το σχήμα των βραχοτεμαχίων βρέθηκε να έχει καθαρή επίπτωση πάνω στην κίνηση του τεμάχους και κατ'επέκταση στους συντελεστές αναπήδησης. Επίσης, σημαντική επιρροή φάνηκε να έχει η κλίση της πλαγιάς καθώς επίσης και η ταχύτητα πρόσκρουσης. Έτσι, ανεξαρτήτως του ύψους απελευθέρωσης του τεμάχους, φάνηκε ότι με την αύξηση της κλίσης της πλαγιάς να παρατηρείται αύξηση του κάθετου και του ενεργειακού συντελεστή αναπήδησης, ενώ για τον εφαπτομενικό συντελεστή δεν εξήχθησαν σημαντικά συμπεράσματα. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι όσο αυξανόταν το ύψος απελευθέρωσης του τεμάχους τόσο μικρότερες τιμές έπαιρναν και οι τρεις συντελεστές αναπήδησης.

Μία πιο ενδελεχής παρατήρηση του φαινομένου έδειξε ότι η κίνηση του τεμάχους χαρακτηρίζεται από τους εξής τρεις μηχανισμούς πάνω σε αμμώδεις επιφάνειες:

- 1) τον μηχανισμό της διείσδυσης
- 2) τον μηχανισμό της ολίσθησης και
- 3) τον μηχανισμό της περιστροφής

Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά τους παραπάνω μηχανισμούς παρατηρήθηκαν τα εξής:

- ❖ Για κατακόρυφες πτώσεις πάνω σε οριζόντιο επίπεδο, δεν εμφανίστηκε το φαινόμενο της ολίσθησης και της περιστροφής παρά μόνο το φαινόμενο της διείσδυσης
- ❖ Για ρίψεις με μικρή αρχική ταχύτητα οι μηχανισμοί της ολίσθησης και περιστροφής ήταν εκείνοι που επικράτησαν κυρίως με το φαινόμενο της διείσδυσης να περνά σε δεύτερη μοίρα και τέλος
- ❖ Για ρίψεις με μεγαλύτερη ταχύτητα ο μηχανισμός της διείσδυσης και η δημιουργία πλαστικών παραμορφώσεων στο έδαφος είναι εκείνοι που κυριαρχούν



Πίνακας 10: : Τιμές του κάθετου, του εφαπτομενικού και του ενεργειακού συντελεστή αναπήδησης

Κάθετος συντελεστής αναπήδησης	Μέση τιμή	Εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης	Μέση τιμή	Ενεργειακός συντελεστής αναπήδησης	Μέση τιμή
0,003-0,257	0,04	0,07-1	0,48	0,0003-0,336	0,03

Πειράματα πεδίου και τρισδιάστατη προσομοίωση βραχοπτώσεων σε δασικά και μη δασικά πρανή, Dorren *et al.* (2005)

Πειράματα πεδίου διεξήχθησαν το 2005 από τους L.K.A Dorren *et al.* στις Γαλλικές Άλπεις προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση που έχουν τα δέντρα πάνω στην κίνηση των βραχοτεμαχών και γενικώς πάνω στο φαινόμενο των καταπτώσεων των βράχων. Σύμφωνα με τους ερευνητές, θα πρέπει πρώτον να ποσοτικοποιηθεί η επίδραση που έχουν τα δάση πάνω στην κατάπτωση των βράχων και δεύτερον να αναπτυχθεί μία σαφής μέθοδος για την ποσοτικοποίηση και την προσομοίωση των εδαφικών χαρακτηριστικών της κάθε πλαγιάς. Για τον λόγο αυτό, πραγματοποιήθηκαν συνολικά 218 πειράματα πεδίου, εκ των οποίων τα 100 έλαβαν χώρα σε μη δασική περιοχή, ενώ τα υπόλοιπα 118 πραγματοποιήθηκαν σε δασική περιοχή, σε μία ορεινή πλαγιά των Γαλλικών Άλπεων. Και στις δύο περιοχές η μέση κλίση των πρανών θεωρήθηκε ίση με 38 μοίρες, ενώ επίσης και στις δύο πλαγιές ερίφθησαν τεμάχια σφαιρικού σχήματος με μέση διάμετρο περί τα 0,95 μέτρα, μέσο όγκο 0,49 m³ και πυκνότητας 2800 kg/m³. Σε όλες τις δοκιμές, χρησιμοποιήθηκε κάμερα υψηλής ανάλυσης για την καταγραφή των τροχιών και στην συνέχεια πραγματοποιήθηκαν τόσο δισδιάστατες όσο και τρισδιάστατες αναλύσεις. Οι δισδιάστατες αναλύσεις έγιναν με την βοήθεια του προγράμματος AniStep. Σύμφωνα με το πρόγραμμα αυτό, επιτρέπεται ο καθορισμός των συντεταγμένων και των ταχυτήτων των τεμαχών σε κάθε σημείο της τροχιάς τους. Έτσι, μπόρεσαν με ακρίβεια να καθορίσουν την μεταθετική ταχύτητα καθώς και την γωνιακή ταχύτητα του τεμάχους σε κάθε σημείο της τροχιάς του. Αντίστοιχα, πραγματοποιήθηκαν και τρισδιάστατες αναλύσεις, με την βοήθεια του προγράμματος RockyFor, το οποίο χρησιμοποιείται για περιοχές με δασική κάλυψη έτσι, ώστε να υπολογιστούν τα εξής 3 μεγέθη:

- 1) η απόσταση που διανύεται από τα τεμάχια τόσο σε δασικές περιοχές όσο και σε περιοχές χωρίς δασική κάλυψη
- 2) οι τροχιές, οι ταχύτητες, η μεταφορική και περιστροφική ενέργεια καθώς και
- 3) η επίδραση των δασών πάνω στην απώλεια ενέργειας κατά την πρόσκρουση του βραχοτεμάχους πάνω στα δέντρα

Έτσι, με βάση τα πειράματα και τις αναλύσεις που ακολούθησαν κατάφεραν να εκτιμήσουν τόσο τον κάθετο όσο και τον εφαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης και για τις δύο εξεταζόμενες περιοχές. Παρακάτω, παρατίθεται συγκεντρωτικός πίνακας με το σύνολο των αποτελεσμάτων έτσι όπως υπολογίστηκε από τους ερευνητές.

Πίνακας 11: Τιμές του κάθετου και του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης για δασική και μη περιοχή

Περιοχή πειραμάτων	Μη δασική περιοχή	Δασική περιοχή	Μη δασική περιοχή	Δασική περιοχή
	Κάθετος συντελεστής αναπήδησης	Κάθετος συντελεστής αναπήδησης	Εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης	Εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης
Μέση τιμή	0,70	0,77	0,26	0,36
Τυπική απόκλιση	0,12	0,10	0,09	0,13
Ελάχιστη τιμή	0,50	0,57	0,11	0,21
Μέγιστη τιμή	0,95	0,96	0,41	0,68

Πειράματα πεδίου και ανάλυση βραχοπτώσεων, Azzoni et al. (1992)

Πειράματα πεδίου πραγματοποιήθηκαν ρίπτοντας τεμάχια και καταγράφοντας τις τροχιές τους μέσω καμερών. Τα δεδομένα αναλύθηκαν με την βοήθεια ενός αναλυτικού μοντέλου προσομοίωσης της τροχιάς των τεμαχίων. Τα πειράματα έλαβαν χώρα σε διαφορετικές περιοχές προκειμένου να αναλυθεί η επίδραση που έχει το μέγεθος του τεμαχίου, το σχήμα του, τα μηχανικά χαρακτηριστικά του καθώς και τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της κάθε περιοχής πάνω στην τροχιά τους.

Τα πειράματα διεξήχθησαν στις ακόλουθες πέντε περιοχές:

- 1) στο λατομείο κοντά στην πόλη της Περγάμου, το οποίο αποτελείται από χαλαζίτες
- 2) στο λατομείο της περιοχής του Τορίνο, το οποίο αποτελείται από γνεύσιους
- 3) στο λατομείο της περιοχής Iselle, το οποίο αποτελείται από ορθογνεύσιους
- 4) στο εγκαταλελειμμένο λατομείο στο Κάλιαρι, το οποίο αποτελείται από ασβεστόλιθους
- 5) σε μία φυσική πλαγιά στο Val Malenco

Στην περιοχή της Περγάμου τα πειράματα πεδίου έλαβαν χώρα σε δύο διαφορετικές πλαγιές. Η πρώτη έχει 25 μέτρα ύψος και μέση κλίση 30 μοίρες, ενώ η δεύτερη έχει 70 μέτρα ύψος και μέση κλίση περί τις 40 μοίρες. Τα τεμάχια από χαλαζίτη, τα οποία ερίφθησαν στις συγκεκριμένες περιοχές είχαν πρισματικό σχήμα, ενώ οι όγκοι τους κυμαίνονταν από 0,5 m³ μέχρι και 3 m³.

Το λατομείο της περιοχής του Τορίνο, το βραχώδες υπόστρωμα του οποίου αποτελείται από γνεύσιους, έχει 70 μέτρα κατακόρυφο ύψος και μέση κλίση γύρω στις 30 μοίρες. Αντίστοιχα, τα τεμάχια είχαν όγκους από 0,5 m³ μέχρι 2 m³, ενώ το σχήμα τους είχε κυβική μορφή.

Η πλαγιά του λατομείου της περιοχής Iselle έχει μήκος γύρω στα 200 μέτρα, με μέση κλίση 35 με 40 μοίρες και την ύπαρξη αναβαθμών με πλάτος 5 με 6 μέτρα. Τα επιλεγθέντα τεμάχια είχαν πρισματική μορφή, ενώ οι αντίστοιχοι όγκοι κυμαίνονταν από 0,5 m³ μέχρι και 3 m³.

Η πλαγιά του λατομείου του Κάλιαρι έχει ύψος 60 μέτρα με μέση κλίση 25 με 30 μοίρες και αντίστοιχα η φυσική πλαγιά στο Val Malenco έχει μήκος 1700 μέτρα, πλάτος 20 μέτρα και μέση κλίση 40 μοίρες.

Σε όλα τα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν κάμερες με ταχύτητα περί τις 25 λήψεις ανά δευτερόλεπτο και οι καταγραφείσες τροχιές αναλύθηκαν με την βοήθεια ενός δισδιάστατου μοντέλου προσομοίωσης της τροχιάς των τεμαχίων.



Τέλος, στον παρακάτω πίνακα αναφέρονται τα κύρια χαρακτηριστικά των πειραμάτων καθώς επίσης και οι υπολογισθείσες τιμές των συντελεστών αναπήδησης και ολίσθησης.

Πίνακας 12: Τιμές του κάθετου, του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης και του συντελεστή ολίσθησης για τα πέντε πειράματα πεδίου στην Ιταλία

Τοποθεσία	Ύψος (m)	Μήκος (m)	Κλίση (°)	Γεωλογία του πρανούς	Κάθετος συντελεστής αναπήδησης	Εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης	Συντελεστής ολίσθησης
Πέργαμος 1	25	75	30	Βράχος ελαφρώς αποσαθρωμένος	0,45 για αναπήδηση 0,75 για κύλιση και αναπήδηση	0,45 για αναπήδηση 0,85 για κύλιση και αναπήδηση	0,97±0,184
Πέργαμος 2	70	70	40	Κορήματα	0,66	0,30	0,75±0,159
Κάλιαρι	60	60	25	Κορήματα και εδαφικός μανδύας	0,66	0,62	0,39±0,117
Val Malenco	400	60	40	Χονδρόκοκκα κορήματα	0,80	1,22	0,88±0,240
Τορίνο	70	70	80	Βράχος	-	-	1,31±0,163
Iselle	10	60	40	Χονδρόκοκκα κορήματα	-	-	0,84±0,301

Πειράματα πεδίου, Azzoni & De Freitas (1995)

Αυτά τα πειράματα πεδίου έγιναν από το ISMES (Istituto Sperimentale Modelli e Strutture). Παρουσιάζεται η μεθοδολογία που ακολούθησαν με σκοπό τον προσδιορισμό των παραμέτρων σχετικών με τις καταπτώσεις σε πλαγίες ποικίλης γεωμετρίας. Συγκεκριμένα, μελετήθηκαν οι συντελεστές αναπήδησης, ο συντελεστής κύλισης, η απόκλιση από την κάθετη στο πρανές πορεία των τεμαχών, η επίδραση του σχήματος, η αποτελεσματικότητα των τάφρων περισυλλογής στη βάση του πρανούς για την ανάσχεση των βράχων μέσω της παρατήρησης με ψηφιακά μέσα των τροχιών που αυτοί ακολούθησαν κατά την πτώση τους.

Οι ερευνητές τονίζουν σε αυτό το πείραμα την έλλειψη επαρκών δεδομένων από πειράματα πεδίου που κάνει μέχρι και σήμερα τον ακριβή προσδιορισμό των συντελεστών αναπήδησης δυσχερή. Τα λογισμικά που υπάρχουν για το σχεδιασμό των μέτρων αναχαίτισης βασίζονται επομένως σε μη ακριβή στοιχεία.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε βασίζεται στο έργο παλιότερων αναλύσεων (Bozzolo and Pamini, 1982) μετά και τις βελτιώσεις των Azzoni *et al.*, 1992 ; Giani, 1992). Συνοπτικά αποτελείται από τα παρακάτω :

- ❖ Αξιολόγηση των τοπογραφικών, γεωλογικών και μηχανικών χαρακτηριστικών των πρανών και των τεμαχών χρησιμοποιώντας την τοπογραφική φωτογραμμετρία.



- ❖ Τα τεμάχια εκκινήθηκαν με χρήση εκσκαφέα από την κορυφή των πρανών στο λατομείο στην περιοχή της Strozza κοντά στο Bergamo της Ιταλίας. Το μέγεθος του κυμάνθηκε από 0,1 m³ ως 2 m³ με μέση τιμή 1 m³.
- ❖ Για την καταγραφή της πορείας τους χρησιμοποιήθηκαν μια μετακινούμενη και μερικές σταθερά τοποθετημένες βιντεοκάμερες σε θέσεις τέτοιες ώστε να κοιτάζουν από πλάγια και σε όψη την πλάγια.
- ❖ Η επεξεργασία και ανάλυση των καταγραφών έγιναν μέσω ψηφιοποίησης των αναλογικών ταινιών μέσω ειδικού λογισμικού, προσδιορίζοντας τη θέση των τεμαχών ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Από τη στιγμή που υπάρχει ως δεδομένο η θέση τους στον τρισδιάστατο χώρο μπορεί να υπολογισθεί η μεταφορική και περιστροφική τους ταχύτητα και το ύψος αναπήδησης σε κάθε φάση της πορείας τους.

Οι δοκιμές έγιναν σε 2 θέσεις, τα χαρακτηριστικά των οποίων συνοψίζονται παρακάτω.

Θέση 1

- ❖ Ύψος : 45 m
- ❖ Μήκος : 60 m
- ❖ Μέση κλίση πρανούς : 50° , τμήματα που κυμαίνονται από 30° ως 65°
- ❖ Γεωλογικές συνθήκες: α) βράχος- ασβεστόλιθος , β) λεπτά γωνιώδη κορήματα: άμμος και ιλύς με γωνιώδη χαλίκια και κροκάλες, υγρά, συμπυκνωμένα με τοπικά χαλαρά σημεία και μερική φυτοκάλυψη γ) λεπτά-μεσαία κορήματα: γωνιώδη χαλίκια και κροκάλες, μερικοί βράχοι , ξηροί , σε χαλαρούς μετασχηματισμούς.

Θέση 2

- ❖ Ύψος : 40 m
- ❖ Μήκος : 60 m
- ❖ Μέση κλίση πρανούς : 40°
- ❖ Γεωλογικές συνθήκες : α) λεπτά γωνιώδη κορήματα: άμμος και κροκάλες, ξηρές, συμπυκνωμένες β) μεσαία γωνιώδη κορήματα : κροκάλες με μερικούς βράχους, ξηροί, σε χαλαρούς σχηματισμούς.

Πίνακας 13: Συντελεστές αναπήδησης και κύλισης για γεωυλικά

Υλικό πρόσκρουσης τεμάχους	Συντελεστής αναπήδησης	Συντελεστής κύλισης
Βράχος – ασβεστόλιθος	0,85	0,40
Σκληρά κορήματα	0,60	0,55
Μαλακά κορήματα	0,40	0,75
Μεσαία κορήματα	0,55	0,60
Μαλακά κορήματα(έδαφος με κομμάτια πετρωμάτων)	0,45	0,60
Λάσπη- τάφρος	<0,20	0,85
Τεχνητά συμπυκνωμένο έδαφος	0,50 – 0,65	0,60

Παρατηρήθηκε ότι όσον αφορά την επίδραση του σχήματος, τα σφαιρικά δοκίμια κινούνται με μεγαλύτερη ταχύτητα από τα δισκοειδή ή τα ορθογωνικά. Η ταχύτητα που αποκτούν τα τεμάχια αυξάνεται επίσης με την αύξηση του μεγέθους τους. Παρατηρήθηκε επίσης, ότι ακόμα και αν κάποιες συνθήκες παραμένουν σταθερές (όπως η θέση του βραχοτεμάχους πριν την εκκίνηση της πτώσης, η αρχική του ταχύτητα, το σχήμα και η μάζα) η πορεία που αυτό ακολουθεί μπορεί να διαφέρει από δοκιμή σε δοκιμή λόγω της πλευρικής απόκλισης. Βασικός παράγοντας αυτής αποτελεί η κλίση των επιφανειών στις οποίες προσκρούει το τέμαχος και επηρεάζει την αναπήδηση του. Μέχρι τώρα εφαρμόζονται εμπειρικές σχέσεις για την πρόβλεψη του εύρους διασποράς.

Αναφορικά με την αποτελεσματικότητα της τάφρου περισυλλογής (διαστάσεων 0,9 x 1,85 m) παρατηρήθηκε ότι το 85% των τεμαχίων συγκρατήθηκαν από αυτή, ενώ το υπόλοιπο 15% έφτασε σε μέση απόσταση 10 m από την τάφρο. Στο τμήμα της πλαγιάς που δεν κατασκευάστηκε τάφρος σχεδόν το 80% των τεμαχίων διένυσαν απόσταση 10 – 25 m.

Πειραματική διερεύνηση αποδοτικότητας υβριδικών συστημάτων, *Giacomini et al.* (2012)

Τα πειράματα έγιναν στο επιφανειακό λατομείο Beltana (ιδιοκτησία της Xstrata Coal) στην περιοχή New South Wales-Australia. Έγιναν σε δύο σημεία. Στο πρώτο πρανές (ύψους 39 μέτρων) όπου υπήρχε ένα σύστημα κουρτίνας(double twist type-Maccafferri) τοποθετημένο πριν 6 χρόνια και βρισκόταν σε καλή κατάσταση και στο δεύτερο πρανές χωρίς κανένα μέτρο ανάσχεσης βραχοπτώσεων. Ήταν το πρώτο πείραμα έως τότε που δοκιμάστηκε η αποδοτικότητα του συγκεκριμένου τύπου ανάσχεσης.

Κατασκευάστηκαν 30 δοκίμια σκυροδέματος στο εργαστήριο του πανεπιστημίου New South Wales, σύμφωνα με τις προδιαγραφές τις ΕΟΤΑ, μέγιστης διάστασης 30 cm και βάρους 44,5 kg. Η ρίψη των δοκιμών έγινε με τη χρήση γερανού 60 τόνων από την κορυφή του πρανούς. Ο σκοπός του πειράματος ήταν η αποτύπωση της κίνησης των τεμαχίων με χρήση της στερεοφωτογραμμετρίας με 2 μηχανές (Canon EOS 7D, 60 fps, 720x1280 pixels, 35 mm focal length και Optronics CR600, 500 fps, 1024x1080 pixels, 35 mm focal length) καλύπτοντας την πορεία από την κορυφή έως τη βάση, με επικάλυψη 10 m. Δύο πρόσθετες μηχανές υψηλής ταχύτητας χρησιμοποιήθηκαν για να αποτυπώσουν λεπτομέρειες κατά την πρόσκρουση. Όλες οι μηχανές τοποθετήθηκαν σε απόσταση από το πρανές περίπου 40 ως 50 m. Η επεξεργασία των λήψεων έγινε με τα εξειδικευμένα λογισμικά της Sirovision και VMS-Vision Measurement System, για γεωτεχνικές εφαρμογές, αναπαριστώντας σε τρισδιάστατη εικόνα το πείραμα. Σε κάθε δοκίμιο εντοπίστηκαν 5 σημεία σε κάθε στιγμιότυπο (frame) για τον προσδιορισμό της θέσης και της ταχύτητάς του. Υπολογίστηκαν όπως και στα άλλα πειράματα οι συντελεστές αναπήδησης με βάση της ταχύτητες κάθετα και παράλληλα στο πρανές, τις κινητικές ενέργειες πριν και μετά την πρόσκρουση. Εκτός από τα δοκίμια, έγιναν ρίψεις με υλικό από την περιοχή. Συνολικά έγιναν 53 ρίψεις, κάποιες από τις οποίες αποκλείστηκαν από την επεξεργασία λόγω καταστροφής των δοκιμών. Για κάθε δοκιμή εντοπίστηκε το υλικό του πρανούς στο οποίο έγινε η αναπήδηση καθώς δεν ήταν ομοιόμορφο γεωλογικά. Λόγω της ύπαρξης του πλέγματος αναχαίτισης στο πρώτο πεδίο οι αναλύσεις παρουσιάζονται ξεχωριστά. Οι τιμές των συντελεστών αναπήδησης γενικά είναι σύμφωνες με αυτές της βιβλιογραφίας. Το πλέγμα αναχαίτισης φαίνεται πως επηρεάζει καθοριστικά την πορεία των τεμαχίων καθώς το 85 % των προσκρούσεων γίνονται υπό γωνία μικρότερη των 30°, ενώ στα ελεύθερα πρανή το ποσοστό αυτό μειώνεται σε 60 %. Το πλέγμα αναγκάζει τα τεμάχια να χάνουν πιο γρήγορα ενέργεια από τις συγκρούσεις με το πρανές, μειώνοντας την απόσταση που μπορούν να φτάσουν έως και 60 %.



Πίνακας 14: Συντελεστές αναπήδησης

Υλικό	Πεδίο	Rn	Απόκλιση	Rt	Απόκλιση
Ψαμμίτης	1	1,14	0,2	0,4	0,15
Ιλυόλιθος	1	0,61	0,16	0,78	0,11
	2	0,59	0,09	0,52	0,08
Αποσαθρωμένος ιλυόλιθος	1	0,11	-	0,8	-
Γαϊάνθρακας	2	0,41	-	0,64	-
Ψαμμίτης/ Ιλυόλιθος	1	0,71	0,33	0,83	0,11
	2	0,61	0,29	0,75	0,17
Ψαμμίτης/ Ιλυόλιθος (2)	1	0,93	0,42	0,63	0,10
Αποσαθρωμένα	1	0,22	0,08	0,4	0,13
	2	0,13	0,05	0,15	0,13

4.1 Συγκεντρωτικά στοιχεία βιβλιογραφικής ανασκόπησης

Βάσει των πειραματικών διερευνήσεων που έχουν γίνει από διάφορους ερευνητές, συντάχθηκε ο παρακάτω πίνακας όπου συνοψίζονται οι τιμές που προσδιορίστηκαν για τον κάθετο και τον εφαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης.

Πίνακας 15: Τιμές συντελεστών από τη βιβλιογραφία

Αναφορές	R_n	R_t	Σχόλια
Habib (1977)	0,75 - 0,80		Βασισμένο σε εμπειρία στην Ιταλία
	0,5 - 0,6		Βασισμένο σε εμπειρία στη Νορβηγία
Piteau & Clayton (1977)	0,8 - 0,9	0,65 - 0,75	Συμπαγής βράχος
	0,5 - 0,8	0,45 - 0,65	Κορήματα μαζί με μεγάλα τεμάχη βράχου
	0,4 - 0,5	0,35 - 0,45	Συμπαγή κορήματα μαζί με μικρά τεμάχη
	0,2 - 0,4	0,2 - 0,3	Πλαγιές με φυτοκάλυψη
Wu (1985)	0,2 - 0,8	0,5 - 0,75	Βράχος πάνω σε βράχο ή σε ξύλινη επιφάνεια
Heierli (1985)	0,95		Βράχος
	0,55		Χαλίκια (στρώση 35 cm)
	0,45		Χαλίκια (στρώση 70 cm)
	0,45		Κορήματα
Hoek (1987)	0,53	0,99	Συμπαγής βράχος
	0,4	0,9	Ασφαλτοστρωμένος δρόμος
	0,35	0,85	Σάρρες, ογκόλιθοι
	0,32	0,82	Κορήματα
	0,32	0,8	Κορήματα με φυτοκάλυψη
	0,3	0,8	Εδαφικό υλικό, λίγη βλάστηση
Urciuoli (1988)	0,05 - 0,35	0,5 - 1	Βραχώδη τεμάχη ασβεστολίθου
		0,24	Κορήματα
Pfeiffer & Bowen (1989)	0,37 - 0,42	0,87 - 0,92	Λεία, σκληρή επιφάνεια σαν στρώσεις βράχου
	0,33 - 0,37	0,83 - 0,87	Βράχοι ή ογκόλιθοι με λίγη βλάστηση ή έδαφος
	0,30 - 0,33	0,83 - 0,87	Κορήματα με λιγοστή βλάστηση
	0,30 - 0,33	0,80 - 0,83	Κορήματα με βλάστηση

	0,28 - 0,32	0,80 - 0,83	Εδαφικό υλικό με λιγοστή βλάστηση
	0,28 - 0,32	0,78 - 0,82	Εδαφικό υλικό με βλάστηση
Gianni (1992),	0,5	0,95	Βράχος
	0,35	0,85	Βράχος με ογκόλιθους
Barbierei et al, (1988)	0,3	0,7	Κορήματα με ομοιόμορφη κατανομή στοιχείων
	0,25	0,55	Έδαφος με βλάστηση
Evans & Hungr (1993)	0,9	0,9	Μικρά τεμάχη σε καθαρό βράχο
	0,7	20,8	Μεγάλα τεμάχη σε κορρήματα
Gerber (1995)	0,17 - 0,43	0,45 - 0,88	Βράχος (ασβεστόλιθος)
Kamijo (2000)	0,1 - 0,35		Κατακόρυφη πτώση τεμάχους 220 kg σε σκληρή επιφάνεια
	0,1		Κατακόρυφη πτώση τεμάχους 800 kg σε σκληρή επιφάνεια
Ushiro et al, (2000)	0,1 - 0,4	0,71	-
Jones et al, (2000)	0,6 - 1,0	0,9 - 1,0	Λεία και στρωσιγενής επιφάνεια
	0,15 - 0,30	0,75 - 0,95	Βράχος και ογκόλιθοι
	0,12 - 0,20	0,65 - 0,95	Κορήματα και πλαγιές με έδαφος
	0,1 - 0,20	0,5 - 0,8	Πλαγιές με χαλαρό έδαφος
Budetta & Santo (1994)	0,2	0,53	Βράχος (από βαθμονόμηση προγράμματος)
Spadari et al. (2011)	1,06	0,74	Αλακαλικός Βασάλτης
	1,15	0,73	Χαλαζιακός Ψαμμίτης
	1,18	0,78	Lithic Sandstones
Saroglou et al. (2012)	0,48	0,77	Εργαστήριο-σφαιρικά δοκίμια από ασβεστόλιθο
	0,46	0,83	Ανάδρομες αναλύσεις-σφαιρικά δοκίμια από ασβεστόλιθο
Topal et al. (2006)	0,46	0,71	Ανάδρομες αναλύσεις-γεωλογικό υπόβαθρο περιοχής αποτελούμενο από ανδεσίτες
Giani et al. (2004)	0,48	0,79	Οφιολιθικός Βράχος, μέσης κλίσης 27,5°
	0,25	0,47	Αποσαθρωμένος Γρανιτικός Βράχος, μέσης κλίσης 36°



Labieuse & Heidenreich (2009)	0,003-0,257	0,07-1	Πειράματα εργαστηρίου και μέσης κλίμακας πάνω σε στρώση άμμου- Δοκίμια σκυροδέματος
Dorren et al. (2005)	0,77	0,36	Δασική περιοχή-Μέση κλίση πρανών 38°
	0,70	0,26	Μη δασική περιοχή-Μέση κλίση πρανών 38°
Ansari et al. (2013)	0,35	0,85	Ανάδρομες αναλύσεις-Βασάλτης
Azzoni et al. (1992)	0,45	0,45	Χαλαζίτης
	0,66	0,30	Χαλαζίτης
	0,66	0,62	Ασβεστόλιθος
	0,80	1,22	-
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
Αστερίου και Ευθυμίου (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
Cagnoli & Manga (2004)	0,15		Ελαφρόπετρες-γωνία πρόσπτωσης ίση με 80°
	0,55		Ελαφρόπετρες-γωνία πρόσπτωσης ίση με 25°



Επίσης, στον Πίνακα 16 συνοψίζεται η επίδραση διαφόρων παραμέτρων στους συντελεστές αναπήδησης, όπως έχουν προσδιοριστεί σε διάφορες εργασίες (Heidenreich, 2004)

Πίνακας 16: Επίδραση παραμέτρων στους συντελεστές

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

5 Μέτρα αντιμετώπισης καταπτώσεων

Για τον αποτελεσματικό σχεδιασμό μέτρων αντιμετώπισης μιας κατάπτωσης απαιτείται αρχικά μία επί τόπου διερεύνηση της περιοχής. Οι παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη είναι: το ύψος και η κλίση της πλαγιάς, το ανάγλυφο και η τραχύτητά του, οι ιδιότητες του γεωολογικού, η ύπαρξη και ο προσανατολισμός των ασυνεχειών, η φυτοκάλυψη και η προϊστορία γεγονότων στην περιοχή.

Χρειάζεται να αποτυπωθεί σε τομή η πλαγιά όπου θα είναι εμφανή τα γεωλογικά χαρακτηριστικά. Με αυτό τον τρόπο εκτιμούνται οι πιθανές περιοχές έναρξης της κατάπτωσης ενός ή περισσότερων βραχοτεμαχίων, ώστε να προσδιοριστεί η πορεία τους και να υπολογισθεί η αναπτυσσόμενη ενέργειά τους με σκοπό τον σχεδιασμό των μέτρων αντιμετώπισης. Αυτά μπορεί να είναι είτε παθητικά όπως μεταλλικά πλέγματα κάλυψης του πρανούς, φράχτες αναχαίτισης, τάφροι στον πόδα του πρανού κ.α. που καλούνται να ανασχέσουν την πτώση ενός τεμάχους υπό ελεγχόμενες συνθήκες χωρίς να θέτουν σε κίνδυνο ανθρώπινες ζωές ή τα τεχνικά έργα. Στην κατηγορία των ενεργητικών μέτρων ανήκουν τα μέτρα πρόληψης μιας βραχόπτωσης όπως τα αγκύρια, η επένδυση με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ή μεταλλικά πλέγματα καθώς και η αλλαγή της γεωμετρίας του πρανούς, η φυτοκάλυψη, η αποστράγγιση, η κατασκευή cut and cover. Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα μέτρα.

5.1 Μεταλλικά πλέγματα

Ελέγχουν την βραχόπτωση με δύο τρόπους: Συγκρατούν τους βράχους στη φυσική τους θέση ή τους οδηγούν σε μια προκαθορισμένη θέση στη βάση του πρανούς. Μπορούν να είναι αγκυρωμένα μόνο στην κορυφή ή και στη βάση, καθώς επίσης και σε όλη την επιφάνεια του πρανούς.

5.1.1 Συστήματα κουρτίνας – Draped Mesh/Nets (Drapery systems)

Τα συστήματα αυτά αποτελούνται από ένα μεταλλικό κάναβο από γαλβανισμένο συρματόπλεγμα (δίχτυ) που συγκρατείται από αγκύρια και τοποθετούνται σε πλαγιές με κλίση 60° ως 90°. Συνήθως εφαρμόζονται σε πρανή ύψους 15 έως 45 μέτρων αν και έχουν εφαρμοσθεί με επιτυχία και σε πρανή 120 μέτρων. Συγκρατούν μια αποκοπτόμενη από το πρανές βραχόμαζα πίσω από το δίχτυ καθώς αυτή κατευθύνεται στον πόδα. Σχεδιάζονται για μικρού μεγέθους τεμάχια (ως 7,6 m³ ή ως 1,5 m) ανάλογα την αντοχή του πλέγματος (Muhunthan *et al.*, 2005) αλλά πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η συντήρηση του συστήματος. Μπορούν να είναι αγκυρωμένα μόνο στην κορυφή ή και στη βάση. Τα πρώτα (unsured drapery systems) δρουν αποσβεστικά στην κίνηση της βραχόμαζας. Έχουν το πλεονέκτημα ότι δεν συγκρατούν μάζες σε κάποιο ύψος και επομένως δεν απαιτούν εργασίες καθαρισμού παρά μόνο στον πόδα τους πρανούς. Αντιθέτως μέσω αγκυρίων καθ' ύψος του πρανούς μπορούν να εφάπτονται στην πλαγιά (sured drapery systems).

Με σωστό σχεδιασμό τα συστήματα κουρτίνας απαιτούν μικρής έκτασης συντήρηση και έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής. Ο έλεγχος τους γίνεται οπτικά ενώ εντάσσονται ομαλά στο φυσικό ανάγλυφο.



Εικόνα 19: Σύστημα κουρτίνας

Πηγή: Central Federal Lands Highway, www.cflhd.gov

Σχεδιασμός

Αρχικά γίνεται εκτίμηση του αναμενομένου φορτίου που θα κληθεί να παραλάβει το σύστημα. Σε περιοχές πολύ χαμηλών θερμοκρασιών πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και το φορτίο της χιονόπτωσης. Το πλέγμα πρέπει να καλύπτει όλη την επιφάνεια του πρανούς που αναμένεται να γίνει η βραχόπτωση, από τα σημεία έναρξης της πτώσης έως τον πόδα του πρανούς. Η αγκύρωση στην κορυφή γίνεται τουλάχιστον 3-4 μέτρα πάνω από τη ζώνη αποκόλλησης και σε υγιές πέτρωμα καθώς μια αποσαθρωμένη ζώνη μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία του συστήματος (Εικόνα 20). Στη βάση πρανών οδοποιίας κατασκευάζονται συνήθως τάφροι συλλογής των βράχων για να μη φτάσουν στο οδόστρωμα, οι οποίες θα πρέπει να καθαρίζονται περιοδικά.



Εικόνα 20: . Αστοχία λόγω αγκύρωσης σε αποσαθρωμένη ζώνη

Πηγή: Central Federal Lands Highway, www.cflhd.gov

Το υλικό και η αντοχή του πλέγματος ποικίλλει όπως και οι διαστάσεις του βρόγχου ανάλογα το αναμενόμενο μέγεθος του τεμάχους και την κλίση του πρανού (Muhunthan et al., 2005). Οι διάφορες εταιρείες έχουν αναπτύξει διαφορετικές τεχνικές που συμμορφώνονται με τις προδιαγραφές των κανονισμών.

Το βάρος του πλέγματος, καθώς και η φόρτισή του από τις βραχοπτώσεις υπολογίζονται για το σχεδιασμό της αγκύρωσης. Τονίζεται επίσης η ανάγκη για την όσο το δυνατό μικρότερη παρέμβαση στο περιβάλλον τοπίο.

5.1.2 Αγκυρωμένα δίχτυα – Anchored Mesh/Nets

Πρόκειται για παραλλαγή των ανωτέρω, δεδομένου ότι αγκυρώνονται όχι μόνο στην κορυφή και στη βάση αλλά και στο εσωτερικό τους, σε διάταξη κανάβου ή ευθείας. Λειτουργούν επίσης έναντι της διάβρωσης του πρανού. Σε αντίθεση με τα συστήματα κουρτίνας που οδηγούν τα τεμάχη στην περιοχή συλλογής, τα αγκυρωμένα δίχτυα ενισχύουν την επιφάνεια του πρανού και αποτρέπουν την αποκόλληση και πτώση του. Το δίχτυ και οι αγκυρώσεις είναι μεγαλύτερης αντοχής, σε πυκνότερη διάταξη ενισχύοντας την αντοχή του πρανού.



Εικόνα 21: Αγκυρωμένα δίχτυα

Πηγή: Central Federal Lands Highway, www.cflhd.gov

5.2 Φράχτες ανάσχεσης

Οι φράχτες ανάσχεσης σταματούν την πορεία ενός τεμάχους που αποκολλάται από το πρανές απορροφώντας την κινητική της ενέργεια. Μπορούν να κατασκευαστούν από γεωλυλικό, σκυρόδεμα ή από εύκαμπτα μεταλλικά στοιχεία. Τοποθετούνται σε προσβάσιμα σημεία καθώς πρέπει να καθαρίζονται από τα βραχοτεμάχη που συσσωρεύονται.



Εικόνα 22: Φράχτης αναχαίτισης

Πηγή: Central Federal Lands Highway, www.cflhd.gov



Εικόνα 23: Ανάσχεση βράχου

Πηγή: Central Federal Lands Highway, www.cflhd.gov



Εικόνα 24: Αποσβεστήρας ενέργειας

Πηγή: Central Federal Lands Highway, www.cflhd.gov

Σχεδιασμός

Το πρώτο βήμα για το σχεδιασμό ενός φράχτη αναχαίτισης κάθε τύπου είναι η εκτίμηση της συμπεριφοράς μιας κατάπτωσης βράχων. Οι φράχτες πρέπει να τοποθετούνται στη θέση όπου εκτιμάται ότι η κινητική ενέργεια των τεμαχών θα είναι ελάχιστη και τα ύψη αναπήδησης χαμηλά ώστε να είναι αποδοτική και οικονομική η λειτουργία τους.

Όπως έχει αναφερθεί, υπολογιστικά προγράμματα όπως το Rocfall, έχουν αποδειχτεί αρκετά χρήσιμα στην πρόβλεψη της τροχιάς μια βραχόπτωσης. Με τη χρήση τους ο μελετητής μπορεί να εντοπίσει τη βέλτιστη θέση εγκατάστασης ενός φράχτη αναχαίτισης. Ωστόσο, σε ένα τόσο αβέβαιο φυσικό φαινόμενο είναι κατανοητό πως οποιοδήποτε μέτρο είναι αδύνατο να αντιμετωπίσει με επιτυχία κάθε βραχόπτωση. Η πιθανολογική αντιμετώπιση μιας αστοχίας υπάρχει και εδώ όπως σε όλα τα έργα των πολιτικών μηχανικών. Στη σημερινή εποχή οι φράχτες αναχαίτισης και τα μεταλλικά πλέγματα σχεδιάζονται για την επιτυχή αντιμετώπιση βραχοπτώσεων σε ποσοστό τουλάχιστον 85% σε ένα πρυνές καθώς οι προτεινόμενες λύσεις είναι πρέπει να λαμβάνουν υπόψη και το κόστος, δηλαδή να είναι οικονομοτεχνικές.

Η σωστή τοποθέτησή τους στο πρυνές είναι μεγάλης σημασίας καθώς από αυτό καθορίζεται το ύψος που θα έχουν και το υλικό από το οποίο θα κατασκευαστούν. Τελευταία στο σχεδιασμό τους εκτιμάται και η επίδραση τους στο περιβάλλον. Προβλέπονται επίσης τρόποι προσέγγισης τους με σκοπό τον έλεγχο της καλής λειτουργίας τους, της εκκαθάρισης τους και της αντικατάστασης έπειτα από κάποια μεγάλη βραχόπτωση. Η χρησιμοποίηση εξειδικευμένων τεχνιτών σε μεγάλα ύψη είναι απαραίτητη.

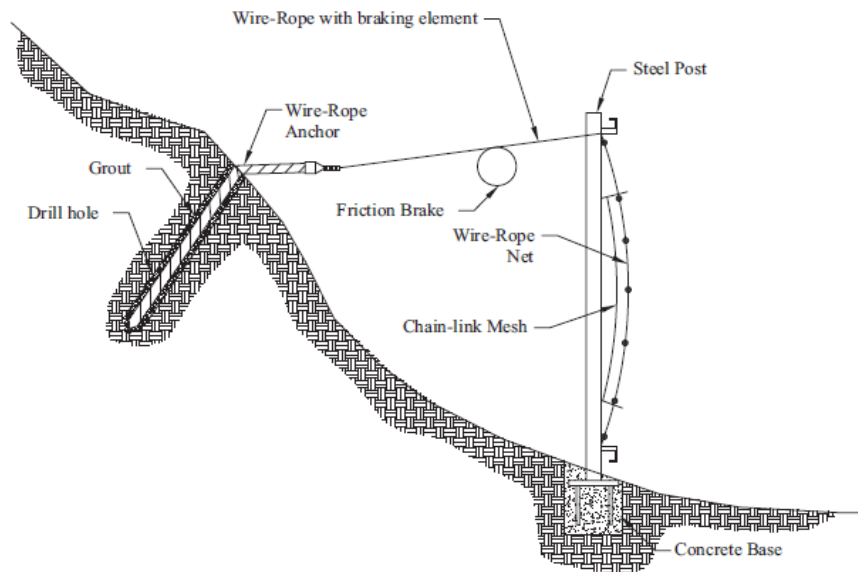
5.2.1 Εύκαμπτοι φράχτες

Οι φράχτες αυτής της κατηγορίας απορροφούν την ενέργεια ενός τεμαχούς που κυλάει και αναπηδάει σε μια πλαγιά μέσω της παραμόρφωσης τους. Έχουν την ικανότητα να απορροφούν ενέργεια της τάξης των 100 KNm, που αντιστοιχεί σε μάζα βραχοτεμαχούς 250 kg με ταχύτητα περίπου 20 m/s. Σε πιο ακραίες περιπτώσεις όπως στις Άλπεις έχουν χρησιμοποιηθεί φράχτες με ικανότητα ανάρσεως έως και 2500 KNm, δηλαδή ενέργειας μιας βραχόμαζας 6250 kg με ταχύτητα 20 m/s. Τα τελευταία χρόνια η ενέργεια που μπορούν να απορροφήσουν έφτασε τα 8000 KNm. Το υλικό τους είναι συνήθως μεταλλικά συρματόσχοινα και πλέγματα ή αλληλοεμπλεκόμενοι δακτύλιοι. Από μελέτες έχει

αποδειχθεί ότι οι τελευταίοι έχουν την καλύτερη απόκριση καθώς απορροφούν μεγαλύτερη ενέργεια και παραμόρφωση. Υπάρχουν μόνο περιορισμένες πληροφορίες για τη χρησιμότητα άλλων υλικών (Tajima et al., 2003). Το εύκαμπτο πλέγμα στηρίζεται σε μεταλλικά υποστυλώματα από γαλβανισμένο μορφοσίδηρο τύπου ΗΕΒ/ΗΕΑ με μεταλλική βάση πακτωμένη στο έδαφος με αγκύρια. Η θεμελίωση συνήθως αποτελείται από κάποιο πέδιλο ή φρεάτιο σκυροδέματος. Σε περιοχές εδάφους χαμηλής αντοχής, στη θεμελίωση έχουν χρησιμοποιηθεί πάσσαλοι μικρής διαμέτρου (micro-piles). Πληροφορίες για τις πιο σύγχρονες μεθόδους θεμελίωσης έχουν διατυπωθεί από τους Turner et al. (2009). Τα πλεονεκτήματα τους είναι πολλά και για αυτό έχουν χρησιμοποιηθεί σε πολλές περιπτώσεις σχεδιασμού ανάσχεσης βραχοπτώσεων. Μπορούν να τοποθετηθούν γρήγορα από εξειδικευμένο προσωπικό, έχουν χαμηλό κόστος σε σχέση με άλλες πιθανές λύσεις, είναι αποτελεσματικοί και αξιόπιστοι. Ωστόσο, η αντοχή τους στη διάβρωση είναι ένας παράγοντας που πρέπει να μελετάται. Σύμφωνα με την ΕΟΤΑ (European Organisation for Technical Approvals) ο χρόνος αποτελεσματικής λειτουργίας δεν ξεπερνά τα 25 χρόνια ή μπορεί να είναι ακόμα πιο περιορισμένος για περιοχές έντονης κατάπτωσης. Πιο συγκεκριμένα, ακόμα και μια μεσαίου μεγέθους βραχόπτωση, παραμορφώνει αρκετά το πλέγμα και μειώνει έτσι το διαθέσιμο για ανάσχεση ύψος του φράχτη. Στην περίπτωση μεγαλύτερου μεγέθους φαινομένου τα συστήματα απόσβεσης ενέργειας είναι πιθανόν να χρειάζονται αντικατάσταση ή συντήρηση. Δεν μπορούν να εφαρμοσθούν όταν αναμένονται καταπτώσεις πολύ μεγάλης ενέργειας καθώς και για βραχοτεμάχια που η τροχιά τους είναι εκτός του πεδίου ανάσχεσης. Σε ορεινές περιοχές που αναμένονται χιονοστιβάδες κατά τους χειμερινούς μήνες μέχρι τώρα δεν έχει υπάρξει κάποιο σύστημα ανάσχεσης που να έχει ανταπεξέλθει ικανοποιητικά στο δυναμικό φορτίο του χιονιού (Margareth, 1995; Nicot et al. 2002). Οι διαστάσεις, η ποιότητα των υλικών καθώς και οι τεχνικές προδιαγραφές τους είναι τυποποιημένες, και συνοδεύονται από σχετικά πιστοποιητικά. Τα συστήματα αυτά είναι πολύ αποτελεσματικά για την ανάσχεση των βραχοπτώσεων και από κάθε περιβαλλοντική άποψη αβλαβή, καθώς διαθέτουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- ❖ Προσαρμοστικότητα σε κάθε μορφολογική και γεωμορφολογική περίπτωση χάρη στην αρθρωτή δομή του συστήματος, τον συνδυασμό ειδικών εξαρτημάτων και την πολυμορφία των βάσεων στήριξης οι οποίες μπορούν να προσαρμοστούν εύκολα στα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά της περιοχής που πρόκειται να προστατευθεί.
- ❖ Ευκολία και οικονομία στην τοποθέτηση, εύκολη τοποθέτηση των μεμονωμένων εξαρτημάτων και τον περιορισμένο αριθμό διατηρημάτων και για τη θεμελίωση των ορθοστατών και για την αγκύρωση των συρματοσχοινών.
- ❖ Ευκολία και οικονομία στην συντήρηση, χάρη στην αρθρωτή δομή του συστήματος, την εύκολη συναρμολόγηση-αποσυναρμολόγηση των μεμονωμένων εξαρτημάτων
- ❖ Ελαστικό σύστημα με επίδραση χαμηλών δυνάμεων στα μεμονωμένα εξαρτήματα.
- ❖ Περιορισμένες παραμορφώσεις και διατήρηση επαρκούς ύψους της προστατευτικής ασπίδας μετά την πρόσκρουση βράχου στο εύκαμπτο πέτασμα ανάσχεσης.
- ❖ Απόλυτη αποτελεσματικότητα σε ταυτόχρονες προσκρούσεις σε διάφορα τμήματα του φράχτη ή σε δευτερεύουσες προσκρούσεις στο ίδιο τμήμα χάρη στη σύνδεση όλων των τμημάτων του και την συνεργασία ολόκληρης της εμπρόσθιας πλευράς κατά τη διάρκεια της πρόσκρουσης. Οι ενέργειες των πτώσεων απορροφούνται από το πλέγμα και την κατασκευή στήριξής του. Οι προκύπτουσες εξωτερικές τάσεις διοχετεύονται από τα αγκύρια στο έδαφος.
- ❖ Καμία περιβαλλοντική επιβάρυνση χάρη στη οπτική διαπερατότητα και τα ανοιχτόχρωμα στοιχεία της κατασκευής.



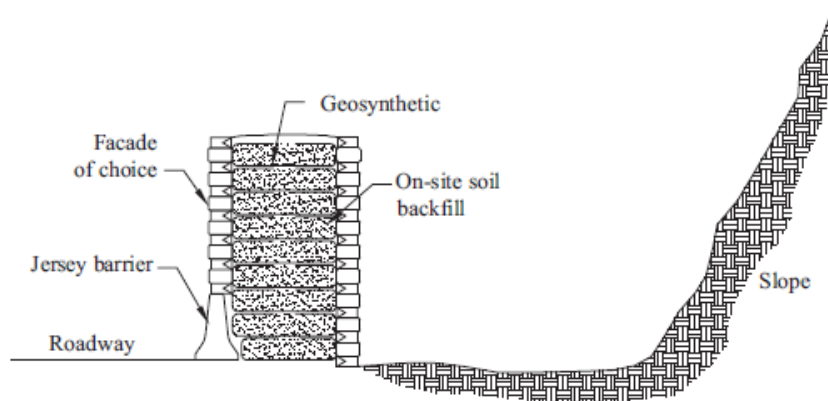


Εικόνα 25: Λεπτομέρειες συστήματος φράκτη αναχαίτισης

Πηγή: Central Federal Lands Highway, www.cflhd.gov

5.3 Οπλισμένα επιχώματα (MSE walls)

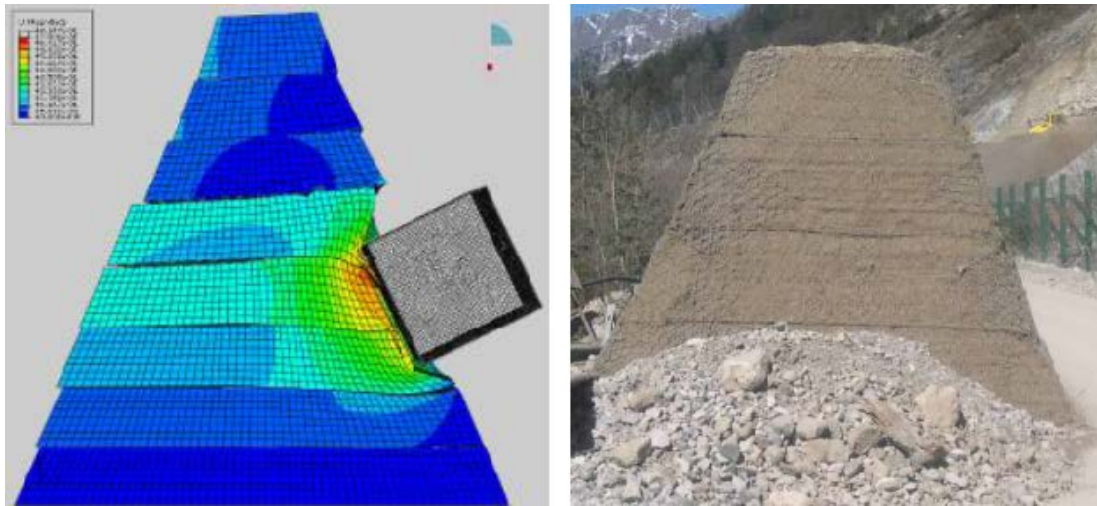
Πρόκειται για οπλισμένα επιχώματα, εξέλιξη των αναχωμάτων, που είναι ικανά να ανταποκριθούν σε κρούσεις μεσαίας έως και μεγάλης κλίμακας. Κατασκευάζονται σε οριζόντιες στρώσεις από επιτόπου εδαφικό υλικό ή αδρανή κατάλληλου μεγέθους και ενισχύονται με δομικά υλικά όπως γεωύφασμα ή μεταλλικά πλέγματα ανά περίπου 50 cm εδαφικού υλικού. Το ύψος του μπορεί να φτάσει τα 4 m.



Εικόνα 26: Μηχανικά σταθεροποιημένος τοίχος

Πηγή: Central Federal Lands Highway, www.cflhd.gov

Από την εφαρμογή τέτοιων κατασκευών έχει αποδειχτεί η αποτελεσματικότητά τους σε επαναλαμβανόμενες βραχοπτώσεις. Η ανάντη παρειά μπορεί να επενδυθεί με υλικό ξυλείας για την καλύτερη απορρόφηση ενέργειας και την προστασία του τοίχου ενώ η κατόντη μπορεί να προσαρμοστεί στις ανάγκες του έργου.



Εικόνα 27: Οπλισμένα επιχώματα

Πηγή : Maccaferri.com

5.3.1 Φράχτες-Τοίχοι αντιστήριξης σκυροδέματος

Οι φράχτες από σκυρόδεμα (Jersey barriers) σχεδιάζονται για την ανάσχεση τεμαχών με μικρής τάξης ενέργειας, συνήθως κάτω των 80 KJ .

Στο χαμηλό κόστος και στην ευκολία κατασκευής τους οφείλουν την ευρεία χρήση τους. Οι τοίχοι αντιστήριξης που κατασκευάζονται ευρύτατα για τη σταθεροποίηση των πρανών οδοποιίας λειτουργούν επίσης ανασταλτικά στις βραχοπτώσεις.



Εικόνα 28: Καταστροφή από την πτώση βράχων

Πηγή: Central Federal Lands Highway, www.cflhd.gov



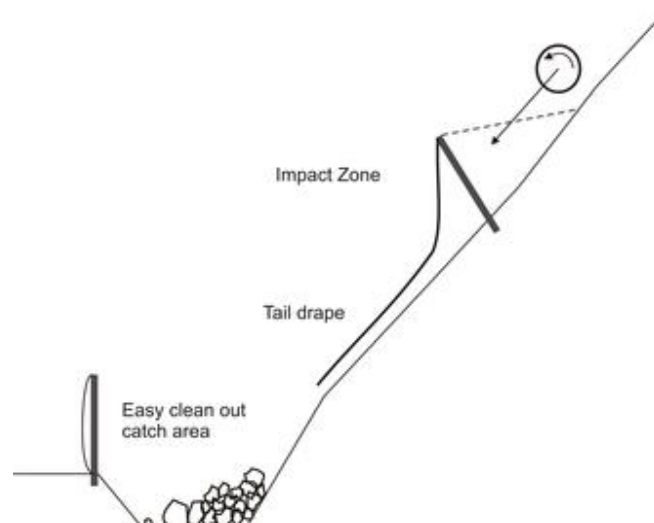
Εικόνα 29: Τοίχος αντιστήριξης

Πηγή: Central Federal Lands Highway, www.cflhd.gov

5.4 Υβριδικά συστήματα

Τα υβριδικά συστήματα (Attenuators, Hybrid Barriers or Hanger Nets (Glover *et al.*, 2010; Dhakal *et al.*, 2011)) είναι συνδυασμός μεταλλικών πλεγμάτων και φραχτών ανάσχεσης. Διαφέρουν στο ότι στη βάση τους δεν είναι αγκυρωμένα αλλά διαθέτουν ένα μέρος του πλέγματος που κείται στο πρηνές. Τα πλεονεκτήματά τους είναι :

- ❖ Μπορούν να αντέξουν αρκετά μεγαλύτερου μεγέθους βραχοπτώσεις καθώς δρουν αποσβένοντας την ενέργειά τους και όχι αιχμαλωτίζοντας τα τεμάχια.
- ❖ Η απορρόφηση ενέργειας γίνεται σταδιακά, οδηγώντας τους βράχους σε κάποιο προσχεδιασμένο σημείο περισυλλογής.
- ❖ Σε περιοχές έντονων χιονοπτώσεων και αποσαθρωμένου επιφανειακού υλικού, οι ροές αυτές λόγω των κλιματικών αλλαγών δεν συσσωρεύονται στην κατασκευή και έτσι δεν μειώνουν την αποτελεσματικότητά τους και το διαθέσιμο ύψος ανάσχεσης.
- ❖ Τα βραχοτεμάχια που αποκολλούνται από το πρηνές δεν προκαλούν ίδιου μεγέθους ζημιά στα δακτυλιωτά φρένα (αποσβεστήρες ενέργειας).



Εικόνα 30: Υβριδικά συστήματα

Πηγή: Central Federal Lands Highway, www.cflhd.gov

5.5 Τάφροι περισυλλογής

Οι τάφροι περισυλλογής έχουν χρησιμοποιηθεί για πολλά χρόνια με σκοπό να εμποδίσουν ένα τέμαχος βράχου που αποκολλάται από ένα πρηνές να φτάσει στο οδόστρωμα. Πρέπει να είναι προσβάσιμοι από μηχανικά μέσα για την εκκαθάριση τους. Ωστόσο, η κατασκευή τους οδηγεί στην κατασκευή πρηνών μεγαλύτερου ύψους αν απαιτείται μεγάλο πλάτος για την αναχαίτιση μιας βραχώπτωσης και επομένως σε δυσμενέστερες συνθήκες συνολικής ευστάθειας. Τα λογισμικά που εκτιμούν τις τροχιές των τεμαχών (CRSP-3D , Roc fall) μπορούν να βοηθήσουν στο σχεδιασμό τους.

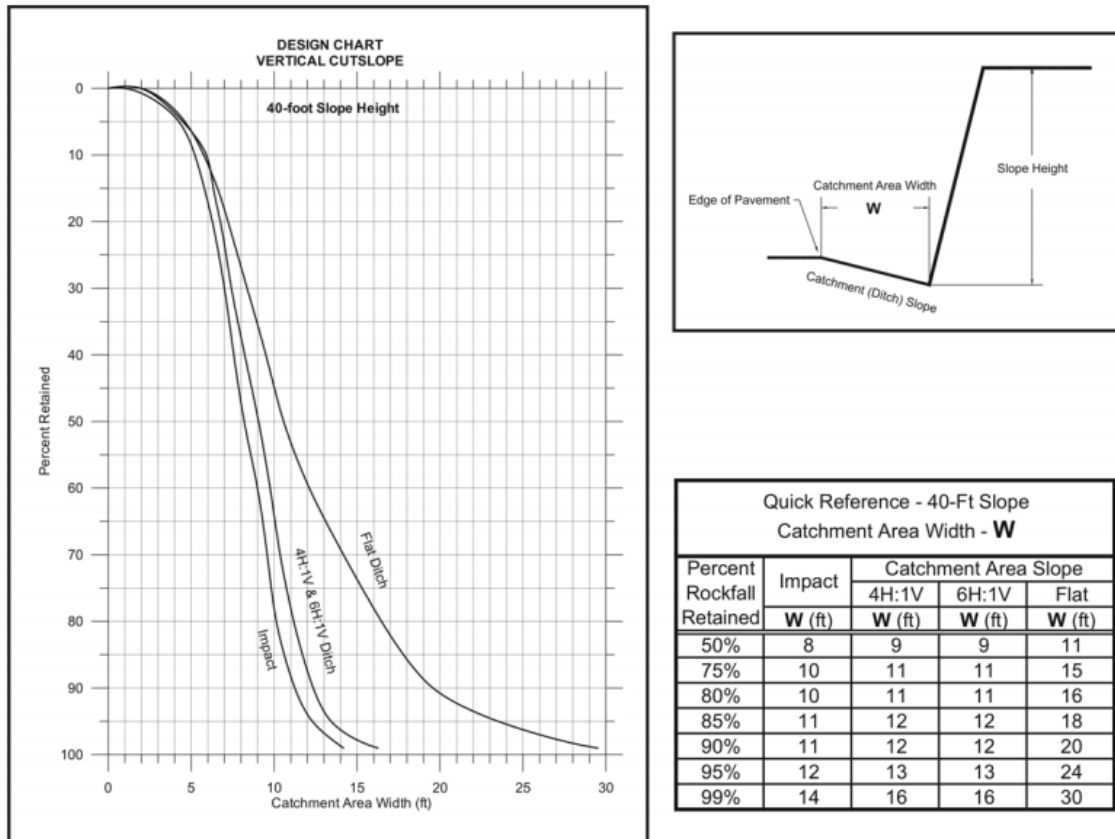
Σχεδιασμός

Ο Ritchie (1963) ήταν ο πρώτος που μελέτησε την αποτελεσματικότητα των κατασκευών αυτών, δημοσιεύοντας το εγχειρίδιο σχεδιασμού "Ritchie Ditch Criteria". Το 2002 το τμήμα μεταφορών του Oregon (ODOT-Oregon Department of Transportation) εξέδωσε τον οδηγό «Rockfall Catchment Area Design Guide» που τροποποίησε τα συμπεράσματα του Ritchie ώστε να είναι περισσότερα συμβατά με τα σημερινά δεδομένα και τις προδιαγραφές των σύγχρονων αυτοκινητοδρόμων. Τα δύο συστήματα χρησιμοποιούνται και σήμερα, με προτίμηση στο δεύτερο καθώς οι οδηγίες του Ritchie δεν ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις της AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials).

Για το σκοπό αυτό η ODOT (Pierson et al. 2001) έκανε εκτενή πειράματα σε πρηνή διαφόρων υψών και κλίσεων για τον προσδιορισμό των βέλτιστων χαρακτηριστικών των τάφρων, που περιλαμβάνονται στο "Rockfall Catchment Area Design Guide". Τα πρηνή που χρησιμοποιήθηκαν είχαν ομαλό μέτωπο, που σημαίνει πως για την ασφαλή εφαρμογή αυτών των διαγραμμάτων απαιτείται προσαρμογή στα φυσικά πρηνή, επί τόπου εκτίμηση των γεωτεχνικών παραμέτρων από έμπειρο προσωπικό και όχι απλή εφαρμογή τους. Ένα παράδειγμα φαίνεται παρακάτω.

Για ύψη πρηνών άνω των 24 μέτρων ή για πρηνή με εμφανή πιθανά σημεία εκκίνησης μιας βραχώπτωσης κατασκευάζονται υβριδικοί τάφροι, δηλαδή τάφροι σε συνδυασμό με κάποιο φράχτη ανάσχεσης, όπως αναφέρθηκαν παραπάνω. Αυξάνεται με αυτό τον τρόπο η αποτελεσματικότητα της τάφρου χωρίς να απαιτείται μεγαλύτερο πλάτος αυτής.





Εικόνα 31: Παράδειγμα σχεδιασμού τάφρου

Πηγή: Oregon Department of Transportation

5.6 Κανονιστικές διατάξεις

Για την αποτελεσματική λειτουργία των μέτρων ανάσχεσης είναι πολύ σημαντικό να έχει κατανοηθεί από τους μηχανικούς ο τρόπος λειτουργίας τους καθώς και το πεδίο εφαρμογής τους. Λόγω της πολυπλοκότητας, του δυναμικού του φαινομένου της βραχόπτωσης και του πιθανοτικού χαρακτήρα που εμπεριέχει, η απόκριση ενός τέτοιου συστήματος βασίζεται σε πρότυπες δοκιμές ώστε να προσδιορίζονται κάθε φορά οι ελάχιστες δυνατότητές του. Οι πρώτες οδηγίες εκδόθηκαν επίσημα στην Ελβετία (Gerber, 2001). Καθορίζουν τις μεθοδολογίες δοκιμών επί διαφόρων τύπων φραχτών αναχαίτισης για τον προσδιορισμό της μέγιστης ενέργειας που μπορούν να αναλάβουν, τις αντίστοιχες δυνάμεις στα συρματόσχοινα και στους αποσβεστήρες ενέργειας, στο εναπομένον ύψος μετά από μια βραχόπτωση, και στην απόδοση τους για μικρά και μεγάλα περιστατικά καθώς και τις εργασίες συντήρησης.





Εικόνα 32: Δοκιμές συστημάτων πριν την εφαρμογή τους

Πηγή: Geobruigg

Το 2008 εκδόθηκε η ευρωπαϊκή οδηγία ETAG 027 (Peila et al., 2009). Εφαρμόζεται στα κράτη-μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Το πρότυπο ETAG 027 καθορίζει τις δοκιμές με παρόμοιο τρόπο όπως οι ελβετικές οδηγίες και έπειτα από επιτυχημένες δοκιμές και ελέγχους αναγνώρισης και τυποποίησης των υλικών και διαδικασιών που χρησιμοποιούν οι κατασκευαστές τους επιτρέπει την τοποθέτηση του σήματος CE που σημαίνει ότι είναι εναρμονισμένα με τις βασικές οδηγίες. Ωστόσο, αυτές είναι οι ελάχιστες απαιτούμενες προδιαγραφές και σε περιπτώσεις ακραίων συνθηκών πρέπει να λαμβάνεται ειδική μέριμνα (Wienberg et al., 2008, Volkwein et al., 2009). Αντίστοιχες επί τόπου δοκιμές εφαρμόζονται και αμέσως μετά την εγκατάσταση των μέτρων (Thommen, 2008; Gotardi και Gononi, 2010). Τα δοκίμια που χρησιμοποιούνται κατασκευάζονται από σκυρόδεμα σύμφωνα με τα πρότυπα της ΕΟΤΑ.

6 Πειραματική διερεύνηση

6.1 Στόχοι πειραματικής διερεύνησης

Μετά τη βιβλιογραφική ανασκόπηση πάνω στο θέμα των βραχοπτώσεων και το σχεδιασμό τόσο της εργαστηριακής δοκιμής όσο και των πειραμάτων πεδίου, καταρτίστηκε πρόγραμμα δοκιμών στο εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Βραχομηχανικής του Τομέα Γεωτεχνικής με στόχο:

- 1) Να προσδιοριστεί η επίδραση του σχήματος πάνω στους συντελεστές αναπήδησης (κάθετος, εφαπτομενικός και συνολικός), χρησιμοποιώντας τρία διαφορετικά σχήματα (σφαίρα, πολύγωνο και κύβος) καθώς επίσης και τεμάχια τυχαίας μορφής.
- 2) Να μελετηθεί η επίδραση του φαινομένου της κλίμακας. Να πραγματοποιηθεί, δηλαδή, συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του εργαστηρίου με εκείνα του πεδίου και να εκτιμηθεί κατά πόσο επιδρά η κλίμακα πάνω στον προσδιορισμό των συντελεστών αναπήδησης.
- 3) Να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα της τρισδιάστατης ανάλυσης της τροχιάς των τεμαχίων πάνω στο φαινόμενο, σε αντίθεση με παλαιότερες μελέτες οι οποίες βασίζονται σε δισδιάστατες αναλύσεις για την εκτίμηση των συντελεστών αναπήδησης.

6.2 Πειραματική μέθοδος

Για την τρισδιάστατη καταγραφή της κίνησης του που εκτελούν τα βραχοτεμάχια χρησιμοποιήθηκαν δυο φωτομηχανές υψηλής ευκρίνειας με δυνατότητα λήψης 60 συνεχόμενων εικόνων το δευτερόλεπτο. Η τρισδιάστατη αποτύπωση του τεμαχίου επιτυγχάνεται με τη χρήση στερεοφωτογραμμετρικών μεθόδων.

6.2.1 Γενικές αρχές φωτογραμμετρίας

Σκοπός της στερεοφωτογραμμετρίας είναι ο προσδιορισμός των συντεταγμένων ενός σημείου ή ενός αντικείμενου στον τρισδιάστατο χώρο χρησιμοποιώντας πληροφορία από δισδιάστατες φωτογραφίες που το απεικονίζουν. Γενικά συμμετέχουν τρία συστήματα συντεταγμένων στη φωτογραμμετρική επεξεργασία:

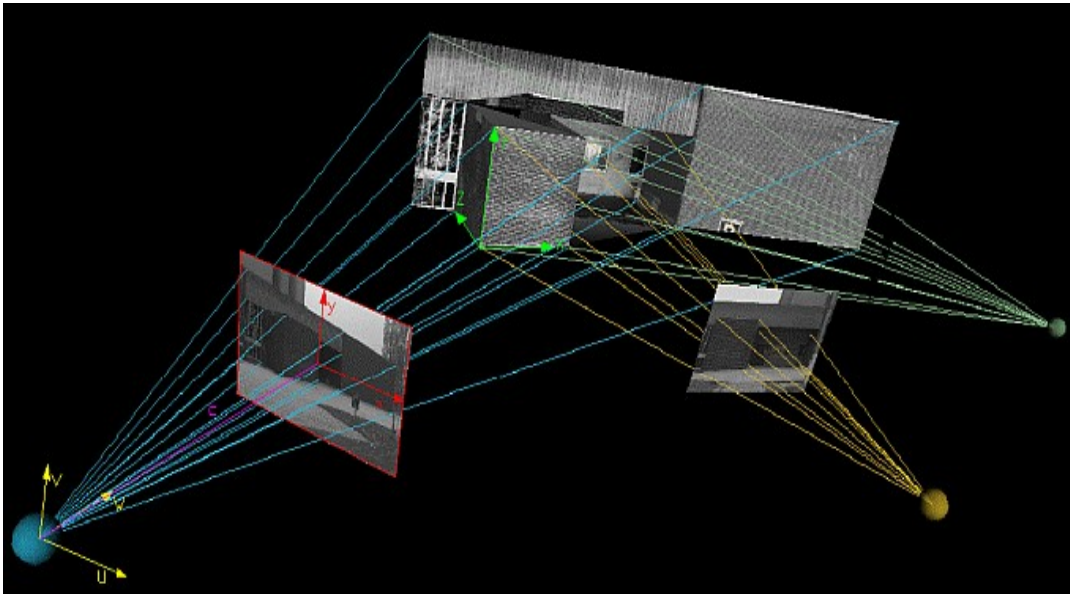
- ❖ του φωτογραφικού επιπέδου
- ❖ της φωτογραφικής εικόνας και
- ❖ του τρισδιάστατου χώρου

Σύστημα συντεταγμένων του φωτογραφικού επιπέδου

Η μέτρηση των συντεταγμένων των εικονιζόμενων σημείων σε μια εικόνα γίνεται στο σύστημα του φωτογραφικού επιπέδου. Πρόκειται για ένα δισδιάστατο (x,y) σύστημα συντεταγμένων που σαν αρχή έχει την προβολή του κέντρου των φακών της φωτομηχανής στο επίπεδο του ψηφιακού αισθητήρα. Το κέντρο των φακών αποτελεί και το κέντρο προβολής από το οποίο διέρχονται όλες οι οπτικές γραμμές που αποτυπώνουν τα αντικείμενα του τρισδιάστατου χώρου στο δισδιάστατο φωτογραφικού επιπέδου.

Σύστημα συντεταγμένων της φωτομηχανής

Πρόκειται για ένα τρισδιάστατο (U,V,W) σύστημα συντεταγμένων που έχει σαν αρχή το κέντρο των φακών με τον άξονα του βάθους W κάθετο προς το φωτογραφικό επίπεδο και τους άξονες U,V παράλληλους προς τους άξονες x,y του συστήματος συντεταγμένων του φωτογραφικού επιπέδου.



Εικόνα 33: Φωτογραμμετρικά συστήματα μέτρησης συντεταγμένων

Σύστημα συντεταγμένων του 3D χώρου

Πρόκειται για το σύστημα συντεταγμένων του χώρου (X,Y,Z). Η σύνδεση μεταξύ του επίγειου συστήματος συντεταγμένων και του συστήματος συντεταγμένων της φωτομηχανής προκύπτει αν υποθέσουμε ότι για τη μετάβαση από το ένα σύστημα στο άλλο αρκεί να γίνουν τρεις μεταθέσεις (παράλληλα προς τους τρεις άξονες X₀,Y₀,Z₀ που ορίζουν στο επίγειο σύστημα τις συντεταγμένες του κέντρου των φακών και την αρχή του 3D συστήματος συντεταγμένων της φωτομηχανής) τρεις στροφές (ω, φ, κ γύρω από κάθε άξονα) και μία μεταβολή της κλίμακας των μετρήσεων. Σε μορφή πινάκων η σχέση ορίζεται από τη μορφή

$$\begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} = \lambda \cdot R(\omega, \phi, \kappa) \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

όπου R(ω,φ,κ) είναι ένα μητρώο 3x3 που αποτελείται από αθροίσματα τριγωνομετρικών συναρτήσεων των γωνιών στροφής ω, φ και κ των αξόνων X,Y,Z ώστε να συμπέσουν με τους άξονες U,V,W και λ είναι ο συντελεστής κλίμακας της σμίκρυνσης των ειδώλων στη φωτογραφία. Κάθε σημείο που μετράται στην εικόνα στο σύστημα συντεταγμένων της φωτογραφικής μηχανής (U,V,W) έχει σταθερή συντεταγμένη βάθους $W = -c$, όπου c είναι η εστιακή απόσταση της φωτογραφικής μηχανής, δηλαδή η απόσταση του κέντρου των φακών της από το φωτογραφικό επίπεδο και (x₀,y₀) η προβολή του κέντρου των φακών στο φωτογραφικό επίπεδο. Οι παράμετροι (c,x₀,y₀) μαζί με τις διαστάσεις του ψηφιακού αισθητήρα ορίζουν τις παραμέτρους της εσωτερικής γεωμετρίας της φωτομηχανής. Ο προσδιορισμός των παραμέτρων της εσωτερικής γεωμετρίας της φωτομηχανής ονομάζεται εσωτερικός προσανατολισμός. Αντίθετα η θέση (X₀,Y₀,Z₀) του κέντρου των φακών και οι στροφές (ω,φ,κ) των αξόνων του επίγειου συστήματος ώστε να συμπέσουν με τους άξονες του συστήματος συντεταγμένων

της φωτομηχανής, αποτελούν στοιχεία της θέσης και προσανατολισμού της φωτογραφικής λήψης στο επίπεδο σύστημα συντεταγμένων και ο προσδιορισμός των 6 αυτών παραμέτρων ονομάζεται εξωτερικός προσανατολισμός. Η σχέση μετατρέπεται στη μορφή:

$$\begin{aligned} x &= x_0 - c \cdot \frac{(X - X_0) \cdot R_{11} + (Y - Y_0) \cdot R_{12} + (Z - Z_0) \cdot R_{13}}{(X - X_0) \cdot R_{31} + (Y - Y_0) \cdot R_{32} + (Z - Z_0) \cdot R_{33}} \\ y &= y_0 - c \cdot \frac{(X - X_0) \cdot R_{21} + (Y - Y_0) \cdot R_{22} + (Z - Z_0) \cdot R_{23}}{(X - X_0) \cdot R_{31} + (Y - Y_0) \cdot R_{32} + (Z - Z_0) \cdot R_{33}} \end{aligned} \quad (6.2)$$

λόγω της παραλληλίας με των αξόνων U,V του συστήματος της φωτογραφικής μηχανής με τους x,y του φωτογραφικού επιπέδου.

Από τις τρεις εξισώσεις που προκύπτουν μπορούμε να οδηγηθούμε με διαίρεση των δύο πρώτων από την τρίτη σε ένα σύστημα δύο εξισώσεων απαλείφοντας με τον τρόπο αυτό το συντελεστή κλίμακας λ, που χαρακτηρίζονται ως εξισώσεις συγγραμμικότητας και είναι η βάση της στερεοσκοπικής φωτογραμμετρικής επεξεργασίας:

$$\begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ -c \end{bmatrix} = \lambda \cdot R(\omega, \phi, \kappa) \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

Οι σχέσεις αυτές συνδέουν τις φωτογραφικές συντεταγμένες (x,y) της εικόνας ενός σημείου στο φωτογραφικό επίπεδο, με τις επίπεδες συντεταγμένες του (X,Y,Z) μέσω των στοιχείων της εσωτερικής γεωμετρίας της φωτομηχανής (c,x₀,y₀) και των συντεταγμένων στάσης (X₀,Y₀,Z₀) της φωτογραφικής μηχανής στο επίπεδο σύστημα συντεταγμένων και των γωνιών στροφής ανάμεσα στα δύο τρισδιάστατα συστήματα συντεταγμένων (στοιχεία εξωτερικού προσανατολισμού).

6.2.2 Στερεοσκοπική Φωτογραμμετρία

Με χρήση δυο εικόνων, δηλαδή με την μέτρηση των εικονοσυντεταγμένων x,y του ίδιου σημείου σε δύο εικόνες (που ονομάζεται ομόλογο σημείο), προκύπτουν δύο ζεύγη εξισώσεων της παραπάνω μορφής (6.2) που μπορούν να λυθούν με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων και να εξαγουν τη θέση του σημείου στο χώρο δηλαδή τις συντεταγμένες X,Y,Z. Η τεχνική αυτή ονομάζεται φωτογραμμετρική εμπροσθοτομία. Βασική προϋπόθεση για την επίλυση της φωτογραμμετρικής εμπροσθοτομίας είναι να έχουν προσδιοριστεί προηγουμένως τα στοιχεία εσωτερικού προσανατολισμού των φωτομηχανών. Ο προσδιορισμός της θέσης των φωτογραφικών στάσεων και των γωνιών στροφής των αξόνων ονομάζεται φωτογραμμετρική οπισθοτομία και είναι δυνατόν να γίνει και πάλι με επίλυση εξισώσεων της μορφής (6.1) εφόσον είναι γνωστή η θέση τριών τουλάχιστον σημείων που εικονίζονται σε κάθε εικόνα στο τρισσορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων του εδάφους. Η επάρκεια των τριών σημείων για την επίλυση της φωτογραμμετρικής οπισθοτομίας οφείλεται στο γεγονός ότι οι έξι άγνωστοι παράμετροι του προσανατολισμού των εικόνων X,Y,Z,ω,φ,κ μπορούν να υπολογιστούν καθώς κάθε ένα από τα τρία σημεία συνεισφέρει στο προς επίλυση σύστημα εξισώσεων με 2 εξισώσεις άρα συνολικά έχουμε 6 εξισώσεις για 6 αγνώστους.

Τα κύρια χαρακτηριστικά της στερεοφωτογραμμετρικής μεθοδολογίας αποτύπωσης είναι:

- ❖ Η ανακατασκευή των γεωμετριών του αντικειμένου στο χώρο μπορεί να γίνει μέσω συνεχούς ή σημειακής απόδοσης, προσδιορίζοντας άμεσα λεπτομέρειες και πολύπλοκα ή δύσκολα προσπελάσιμα σημεία αξιοποιώντας δυνατότητες της ψηφιακής τεχνολογίας ανάλυσης εικόνας (image processing)
- ❖ Η μαθηματική επεξεργασία των δεδομένων είναι δύσκολη και χρονοβόρα όμως διατίθενται κώδικες Η/Υ, εμπορικοί ή ανοιχτού κώδικα (open source), που μπορούν να χρησιμοποιηθούν και από χρήστες μη εξειδικευμένους στη στερεοφωτογραμμετρία.
- ❖ Γίνεται άμεση ανακατασκευή της στερεομετρίας του αντικειμένου.
- ❖ Ο εξοπλισμός πεδίου είναι από χαμηλού κόστους μέχρι μέτριου.

6.2.3 Βαθμονόμηση συστήματος μετρήσεων

Η βαθμονόμηση των φωτομηχανών και του στερεοζεύγους έγινε με τον ελεύθερα διαθέσιμο κώδικα “Camera Calibration Toolbox for Matlab”. Ο κώδικας αυτός επιτρέπει τον παράλληλο υπολογισμό τόσο των εσωτερικών όσο και των εξωτερικών παραμέτρων προσανατολισμού του συστήματος των φωτομηχανών. Αυτό επιτρέπει την εγκατάσταση των δυο φωτομηχανών σε οποιαδήποτε θέση είναι βολική για την καταγραφή των εκτελούμενων τροχιών, γεγονός που διευκολύνει την διενέργεια των πειραμάτων στο ύπαιθρο.

Το υπολογιστικό περιβάλλον της MatLab αντιλαμβάνεται τις έγχρωμες εικόνες σαν τρεις πίνακες, έναν για κάθε χρωματικό κανάλι (RGB). Το μέγεθος των πινάκων ισούται με την ανάλυση της εικόνας. Κάθε στοιχείο λαμβάνει τιμές που αντιπροσωπεύει την τονικότητα του χρώματος σε κάθε κανάλι, καθώς επίσης η θέση που βρίσκεται στον πίνακα (γραμμή, στήλη) ταυτίζεται με τις συντεταγμένες του σημείου στο σύστημα του φωτογραφικού επιπέδου.

Για να γίνει η βαθμονόμηση του συστήματος πρέπει αρχικά να σχεδιασθεί τετραγωνικός κάρναβος μορφής σκακιέρας και να επικολληθεί σε μια επίπεδη επιφάνεια. Το μέγεθος κάθε τετραγώνου χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της κλίμακας. Συνεπώς ανάλογα με την εκάστοτε απόσταση του στόχου από την θέση εγκατάστασης των φωτομηχανών, πρέπει να προσαρμόζεται το μέγεθος του τετραγώνου. Εν συνεχεία, γίνεται ταυτόχρονα από τις δύο φωτομηχανές, η απόκτηση των εικόνων μεταφέροντας τον κάρναβο σε θέσεις πλησίον της περιοχής που θα γίνουν οι μετρήσεις των συντεταγμένων των τροχιών.

Γενικά, συνιστάται η βαθμονόμηση να γίνεται με τουλάχιστον πέντε εικόνες ώστε τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης να είναι αξιόπιστα. Στην πράξη, δεδομένου ότι στον κώδικα τα υπολογιστικά βήματα είναι πλήρως αυτοματοποιημένα, ο απαιτούμενος χρόνος επεξεργασίας για κάθε επιπρόσθετη εικόνα είναι ελάχιστος, ενώ παράλληλα η ακρίβεια προσδιορισμού των παραμέτρων εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού αυξάνει σημαντικά. Συνεπώς, επιλέχθηκε η βαθμονόμηση να γίνεται με 15 έως 20 εικόνες, που προσδίδουν ακρίβεια προσδιορισμού της τάξεως των 0,2 εικονοστοιχείων.

Αφού αποκτηθούν οι εικόνες βαθμονόμησης μεταφέρονται στο υπολογιστικό περιβάλλον της MatLab όπου και γίνεται η επεξεργασία τους. Αρχικά, οι εικόνες από κάθε κάμερα βαθμονομούνται ξεχωριστά.



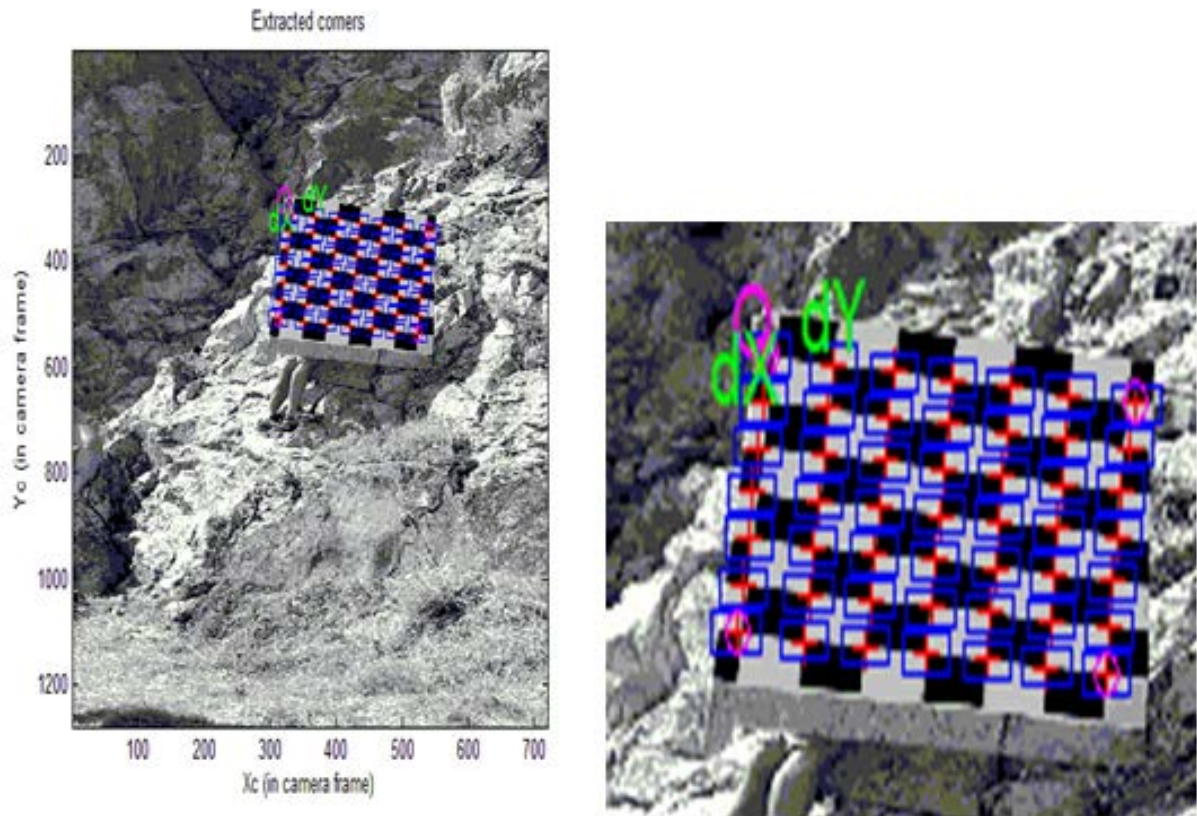
Εικόνα 34: Εικόνα βαθμονόμησης από αριστερή φωτομηχανή



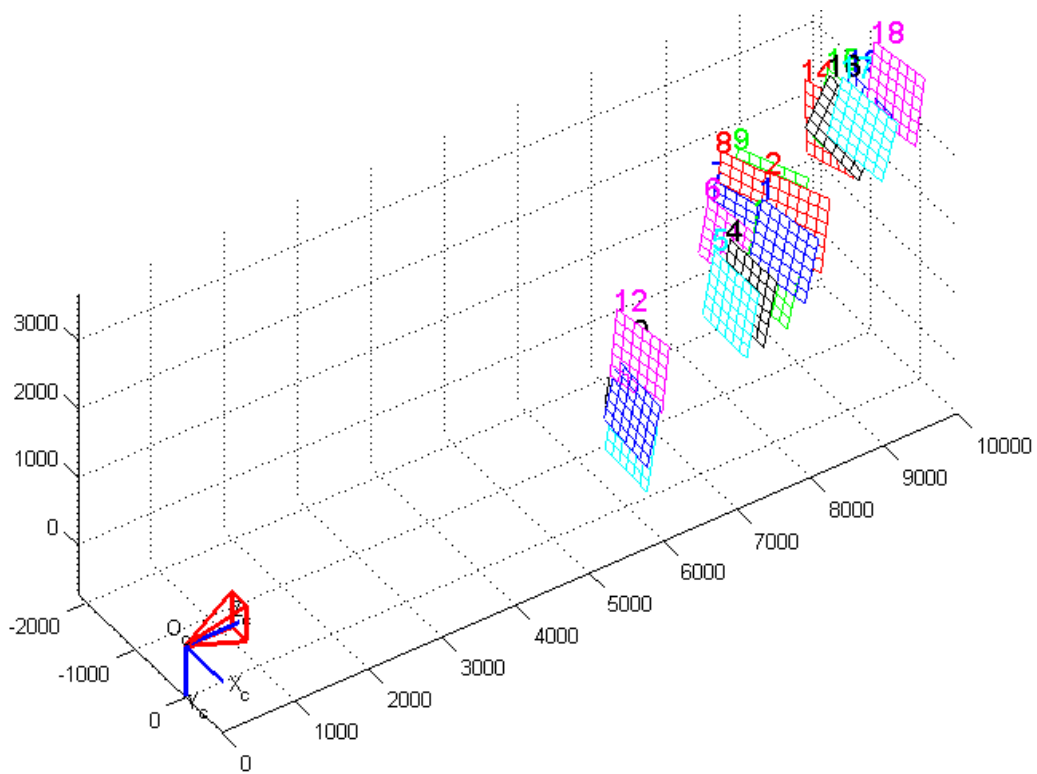
Εικόνα 35: Εικόνα βαθμονόμησης από δεξιά φωτομηχανή

Σε κάθε εικόνα προσδιορίζονται τα όρια του καννάβου επιλέγοντας τα αντίστοιχα σημεία. Στην συνέχεια προσδιορίζεται η ακριβής θέση των γωνιών των τετραγώνων του καννάβου από τον κώδικα εκτελώντας έναν αλγόριθμο που εντοπίζει τα όρια αλλαγής των χρωμάτων του καννάβου (εικόνα 36).

Επαναλαμβάνοντας την διαδικασία σε όλες τις εικόνες από κάθε κάμερα προσδιορίζονται οι παράμετροι βαθμονόμησης βάσει ενός αλγορίθμου μη γραμμικής βελτιστοποίησης. Οι παράμετροι του εσωτερικού προσανατολισμού είναι 9 (2 για το εστιακό βάθος, 2 για το κεντρικό σημείο προβολής και 5 για την παραμόρφωση εξ αιτίας των φακών) και 6 για κάθε εικόνα (3 για την μεταφορά και 3 για την στροφή). Συνεπώς, εφόσον χρησιμοποιηθούν 20 εικόνες βαθμονόμησης το σύστημα έχει 129 άγνωστες παραμέτρους (9 εσωτερικές και 6x20 εξωτερικές). Μετά την ολοκλήρωση της βαθμονόμησης είναι εφικτή η ανακατασκευή της πληροφορίας στις τρεις διαστάσεις από κάθε κάμερα ξεχωριστά (εικόνα 37).



Εικόνα 36: Εντοπισμός των σημείων βαθμονόμησης

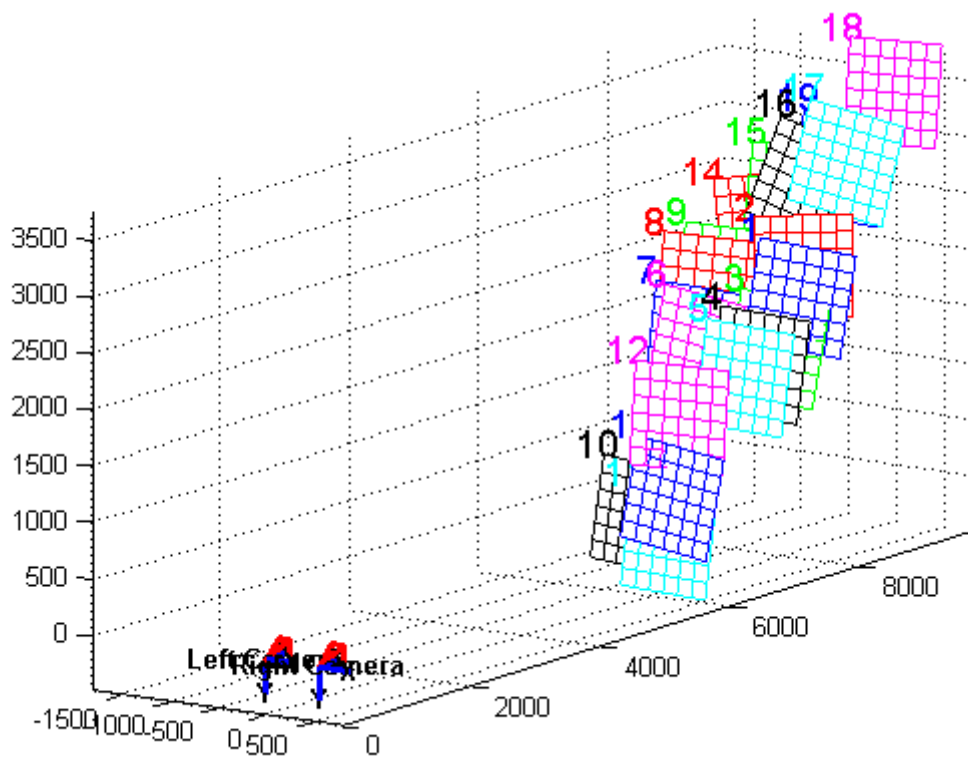


Εικόνα 37: Ανακατασκευή των εικόνων βαθμονόμησης στον τρισδιάστατο χώρο UVW (σε mm)

Επί πρόσθετα, υπολογίζεται το σφάλμα προσδιορισμού των συντεταγμένων ενός σημείου στο χώρο σε μονάδες εικονοστοιχείου (pixel). Η μετατροπή του σφάλματος σε μονάδες μήκους είναι συνάρτηση της απόστασης του σημείου από την θέση της φωτομηχανής, και αυξάνει όσο μεγαλώνει η απόσταση του σημείου από αυτήν.

Για το παράδειγμα βαθμονόμησης που φαίνεται στις εικόνες της ενότητας αυτής, το μέγεθος της πλευράς του εικονοστοιχείου είναι 0,35 και 0,55 cm για απόσταση 6 και 10 m αντίστοιχα από την φωτομηχανή. Συνεπώς, το σφάλμα στις x,y συντεταγμένες ανέρχεται σε 0,8 και 1,4 mm αντίστοιχα.

Για την βαθμονόμηση του στερεοζεύγους, οι παράμετροι εσωτερικού προσανατολισμού παραμένουν για κάθε φωτομηχανή σταθερές. Ενώ για τον προσδιορισμό του εξωτερικού συστήματος προσανατολισμού χρησιμοποιείται το σύστημα συντεταγμένων της αριστερής φωτομηχανής ως την αρχή των αξόνων και υπολογίζονται οι παράμετροι μετάθεσης και στροφής που απαιτούνται ώστε να ταυτιστούν τα σημεία των καννάβων βαθμονόμησης της δεξιάς φωτομηχανής με αυτά της αριστερής, υπό την προϋπόθεση ότι όλα τα σημεία είναι ομόλογα (εικόνα 38).



Εικόνα 38: Προσδιορισμός των εξωτερικών παραμέτρων προσανατολισμού του στερεοζεύγους (σε mm)

6.3 Κατασκευή δοκιμών

6.3.1 Κατασκευή δοκιμών πεδίου

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

Παρ' όλα αυτά, για να μελετηθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η επίδραση του σχήματος πάνω στο φαινόμενο μορφώθηκαν εκτός από σφαιρικά, κυβικά και πολυγωνικά σύμφωνα με τα πρότυπα της ETAG (European Technical Approval Guideline). Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι οι διαστάσεις των κύβων ήταν 15x15x15 cm, η διάμετρος των σφαιρών 15 cm και η μέγιστη διάσταση των πολυγωνικών 17 cm, ενώ το βάρος όλων των δοκιμών ήταν περίπου 7 kg.

Η διαμόρφωση των δοκιμών έγινε με την χρήση ξύλινων και μεταλλικών καλουπιών τα οποία κατασκευάστηκαν στο εργαστήριο Βραχομηχανικής και Τεχνικής Γεωλογίας του Ε.Μ.Π.. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε με σκοπό την προσομοίωση του βραχώδους τεμάχους ήταν ένεμα υψηλής αντοχής της εταιρείας Sika με ειδικό βάρος ίσο με 2000 kg/m^3 .



Εικόνα 39: Παρασκευή ενέματος

Πιο συγκεκριμένα, το SikaGrout-212 είναι ενός συστατικού, έτοιμο προς χρήση, τσιμεντοειδούς βάσης κονίαμα, όπου με απλή ανάμιξη νερού σχηματίζεται ένα διογκούμενο, ρευστό και ομοιογενές χυτό κονίαμα που παρουσιάζει υψηλές μηχανικές αντοχές μετά από σύντομο χρόνο ωρίμανσης. Η θλιπτική αντοχή του υλικού μετά από 28 ημέρες δίνεται από τον κατασκευαστή ίση με 50 MPa. Το βάρος των δοκιμών επιλέχθηκε λαμβάνοντας υπόψη τις δυσκολίες μεταφοράς στο χώρο διεξαγωγής πειραμάτων. Ωστόσο, το μέγεθος αυτό προσομοιάζει επιτυχώς ένα φυσικό κομμάτι βράχου.



Εικόνα 40: Καλούπι πολυγωνικού δοκιμίου



Εικόνα 41: Καλούπι πολυγωνικού δοκιμίου



Εικόνα 42: Καλούπι σφαιρικού δοκιμίου



Εικόνα 43: Καλούπι κυβικού δοκιμίου

Τέλος, τα δοκίμια βάφτηκαν με κατάλληλο χρώμα προκειμένου να είναι ευδιάκριτα από τις φωτογραφικές μηχανές.



Εικόνα 44: Δοκίμια πειράματος

6.3.2 Κατασκευή δοκιμών πειραμάτων εργαστηρίου

Χρησιμοποιήθηκε το ίδιο ένεμα υψηλής αντοχής για τη κατασκευή των τεμαχών, πάλι με την χρήση καλουπιών για τη διαμόρφωση των τριών σχημάτων. Οι διαστάσεις των δοκιμών επιλέχθηκαν με τέτοιο τρόπο προκειμένου να επιτευχθεί η απαιτούμενη αναλογία με τις διαστάσεις των δοκιμών πεδίου και να γίνει συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων πάνω στους συντελεστές αναπήδησης. Στις δοκιμές αυτές τα δοκίμια χρωματίστηκαν προκειμένου να είναι ευδιάκριτα από τις φωτογραφικές μηχανές και για να αξιοποιηθούν σε μελλοντική έρευνα για την μελέτη της επίδρασης της περιστροφής στο φαινόμενο.

Οι εργαστηριακές δοκιμές είναι ιδιαίτερα χρήσιμες για τον προσδιορισμό των κρίσιμων παραμέτρων και του τρόπου που αυτές επηρεάζουν τους συντελεστές αναπήδησης. Τα πλεονεκτήματα είναι κυρίως η επαναληψιμότητα των δοκιμών και ο καλύτερος έλεγχος των παραμέτρων. Βασικό μειονέκτημα είναι το περιορισμένο μέγεθος των στοιχείων που αποτελούν το πείραμα, σε σχέση με αυτό που επηρεάζει στην πράξη τις τεχνικές κατασκευές.

Για τον έλεγχο της επίδρασης της κλίμακας εφαρμόζονται οι αρχές της διαστατικής ανάλυσης, σύμφωνα με το θεώρημα π (Buckingham, 1924).

Σε μια εξίσωση που εκφράζει ένα φυσικό συσχετισμό μεταξύ μεγεθών πρέπει να υπάρχει αριθμητική και διαστατική ισότητα. Για την επίτευξη της ομοιότητας μεταξύ ενός ομοιώματος και της πραγματικής κατάστασης, απαιτείται η εκπλήρωση των παρακάτω κριτηρίων:

- ❖ Γεωμετρική ομοιότητα – οι λόγοι των ομόλογων διαστάσεων μεταξύ ομοιώματος και πρωτοτύπου πρέπει να ισούνται με μια σταθερή ποσότητα.
- ❖ Κινηματική ομοιότητα – οι τροχιές ομόλογων τεμαχίων πρέπει να είναι γεωμετρικά όμοιες και οι λόγοι των ταχυτήτων (ή των επιταχύνσεων) τους να ισούνται.
- ❖ Δυναμική ομοιότητα – πρέπει να εμφανίζεται γεωμετρική και κινηματική ομοιότητα και συγχρόνως οι λόγοι των ομόλογων δυνάμεων να ισούνται.

Η επίτευξη της ομοιότητας είναι αρκετά δύσκολη στην πράξη, αφού παραδείγματος χάρη η επιτάχυνση της βαρύτητας δεν μπορεί να ελεγχθεί στην επιφάνεια της γης χωρίς ειδικό εξοπλισμό.

Για τον υπολογισμό των συντελεστών αναλογίας, χρησιμοποιείται η διαστατική ανάλυση κατά την οποία επιχειρείται ο περιορισμός των ανεξάρτητων μεταβλητών στις ελάχιστες δυνατές και γίνεται η έκφραση των υπολοίπων μεταβλητών σε αδιάστατες παραμέτρους.

Οι θεμελιώδεις διαστατικές παράμετροι είναι:

- ❖ Μήκος (m) → (L)
- ❖ Μάζα (kg) → (M)
- ❖ Χρόνος (s) → (T)

Τα μεγέθη που υπεισέρχονται στον υπολογισμό των συντελεστών αναπήδησης, ή επηρεάζουν το μέγεθος τους, εκφρασμένα στις θεμελιώδεις διαστάσεις, φαίνονται στον πίνακα 17:

Για τον ορισμό της σχέσης αναλογίας του φαινομένου μεταξύ του ομοιώματος και της πραγματικής κατάστασης, εκφράζονται οι λόγοι μεταξύ των θεμελιωδών μεγεθών ως εξής:

Κλίμακα Μήκους: $\lambda = L_r / L_m$

Κλίμακα Χρόνου: $\tau = T_r / T_m$

Κλίμακα Μάζας: $\mu = M_r / M_m$

Όπου οι όροι του αριθμητή αφορούν στην διάσταση στην πραγματική κατάσταση ($r = \text{real}$) και αυτοί του παρονομαστή αφορούν στο ομοίωμα ($m = \text{model}$).

Οι δεσμεύσεις μεταξύ των δυο περιπτώσεων είναι:

- ❖ η επιτάχυνση της βαρύτητας που είναι σταθερή, και
- ❖ η πυκνότητα των υλικών η οποία ομοίως σταθερή δεδομένου ότι το υλικό είναι ίδιο



Πίνακας 17: Μεγέθη σχετικά με τους συντελεστές

	Μέγεθος	Μονάδα	Συμβολισμός
Μήκος	l	m	L
Χρόνος	t	s	T
Μάζα	m	kg	M
Μεταθετική ταχύτητα	v	m/s	L T ⁻¹
Γωνιακή ταχύτητα	ω	rad/s	T ⁻¹
Επιτάχυνση	a	m/s ²	L T ⁻²
Δύναμη	F	Kgm/s ²	M L T ⁻²
Πυκνότητα	ρ	Kg/m ³	M L ⁻³
Μέτρο Ελαστικότητας	Es	Kg/ms ²	M L ⁻¹ T ⁻²
Ενέργεια	E	Kgm ² /s ²	M L ² T ⁻²
Τραχύτητα	ΜΟΗ	-	-
Γωνία Τριβής	φ	°	-
Συντελεστής αναπήδησης	R	-	-

Συνεπώς, εξ αιτίας της βαρύτητας έχουμε:

$$\frac{g_R}{g_M} = 1 \rightarrow \frac{L_R T_R^{-2}}{L_M T_M^{-2}} = 1 \rightarrow \lambda \tau^{-2} = 1 \rightarrow \tau = \lambda^{1/2} \quad (6.5)$$

Και από την δέσμευση της πυκνότητας:

$$\frac{\rho_R}{\rho_M} = 1 \rightarrow \frac{M_R \cdot L_R^{-3}}{M_M \cdot L_M^{-3}} = 1 \rightarrow \mu \cdot \lambda^{-3} = 1 \rightarrow \mu = \lambda^3 \quad (6.6)$$

Βάσει των παραπάνω περιορισμών και για όλα τα μεγέθη που υπεισέρχονται στο πρόβλημα, οι λόγοι ομοιότητας μεταξύ του ομοιώματος και της πραγματικής κατάστασης μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει του λ.

❖ Μεγέθη μήκους (εμβαδού και όγκου):

$$\frac{l_R}{l_M} = \frac{L_R}{L_M} = \lambda \quad (6.7)$$

$$\frac{A_R}{A_M} = \frac{L_R^2}{L_M^2} = \lambda^2 \quad (6.8)$$

$$\frac{V_R}{V_M} = \frac{L_R^3}{L_M^3} = \lambda^3 \quad (6.9)$$



❖ Μεγέθη ταχυτήτων:

$$\frac{v_R}{v_M} = \frac{L_R \cdot T_R^{-1}}{L_M \cdot T_M^{-1}} = \lambda \cdot \tau^{-1} = \lambda \cdot (\lambda^{1/2})^{-1} \rightarrow \frac{v_R}{v_M} = \lambda^{1/2} \quad (6.10)$$

❖ Μεγέθη δυνάμεων:

$$\frac{F_R}{F_M} = \frac{M_R \cdot L_R \cdot T_R^{-2}}{M_M \cdot L_M \cdot T_M^{-2}} = \mu \cdot \lambda \cdot \tau^{-2} = (\lambda^3) \cdot \lambda \cdot (\lambda^{1/2})^{-2} \rightarrow \frac{F_R}{F_M} = \lambda^3 \quad (6.11)$$

❖ Μεγέθη ενεργειών:

$$\frac{E_R}{E_M} = \frac{M_R \cdot L_R^2 \cdot T_R^{-2}}{M_M \cdot L_M^2 \cdot T_M^{-2}} = \mu \cdot \lambda^2 \cdot \tau^{-2} = (\lambda^3) \cdot \lambda^2 \cdot (\lambda^{1/2})^{-2} \rightarrow \frac{E_R}{E_M} = \lambda^4 \quad (6.12)$$

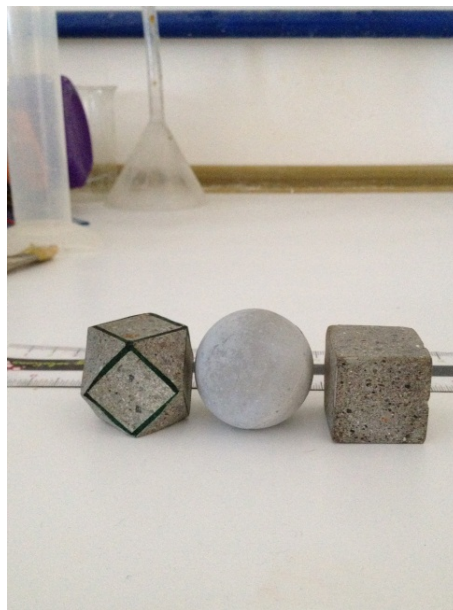
❖ Μεγέθη τάσεων, ελαστικότητας:

$$\frac{E_{S_R}}{E_{S_M}} = \frac{M_R \cdot L_R^{-1} \cdot T_R^{-2}}{M_M \cdot L_M^{-1} \cdot T_M^{-2}} = \mu \cdot \lambda^{-1} \cdot \tau^{-2} = (\lambda^3) \cdot \lambda^{-1} \cdot (\lambda^{1/2})^{-2} \rightarrow \frac{E_{S_R}}{E_{S_M}} = \lambda \quad (6.13)$$

Τα αδιάστατα μεγέθη, π.χ. συντελεστές αναπήδησης ή συντελεστές τραχύτητας κ.α., θα πρέπει να έχουν την ίδια τιμή τόσο στο ομοίωμα όσο και στην πραγματικότητα.

Σύμφωνα με τις απαιτήσεις της γεωμετρικής ομοιότητας για την επιτυχή προσομοίωση των πειραμάτων, οι διαστάσεις των τεμαχίων για τα πειράματα εργαστηρίου, εφαρμόζοντας τον τύπο (6.7) της γεωμετρικής ομοιότητας και θεωρώντας $\lambda = 5$, προέκυψαν :

- ❖ Σφαίρα : $D = 4$ cm
- ❖ Κύβος : $a = 3$ cm
- ❖ Πολυγωνικό: $a = 3,2$ cm,



Εικόνα 45: Δοκίμια



Έικονα 46: Πίπτοντα τεμάχια εργαστηρίου



Εικονα 47: Διαμόρφωση βραχωδών δοκιμών

Βάσει της διαδικασίας αυτής μεταξύ των πειραμάτων εργαστηρίου και πεδίου, προκύπτει γεωμετρική και κινηματική ομοιότητα. Όμως λόγω της απαίτησης που προκύπτει από τα μεγέθη τάσεων και ελαστικότητας, δεν επιτυγχάνεται δυναμική ομοιότητα.

6.4 Ιδιότητες υλικών

Πριν την περιγραφή της διαδικασίας εκτέλεσης πειραμάτων εργαστηρίου και πεδίου κρίνεται απαραίτητη η παρουσίαση των εργαστηριακών δοκιμών προσδιορισμού ιδιοτήτων των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν. Τα υλικά αυτά είναι το ένεμα υψηλής αντοχής και ασβεστόλιθος από την περιοχή του Υμηττού στην οποία πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα πεδίου. Για την πραγματοποίηση των δοκιμών αρχικά τα βραχώδη τεμάχια διατρήθηκαν και μορφοποιήθηκαν για να αποκτήσουν κατάλληλες διαστάσεις, όπως φαίνεται και στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 48: Διάτρηση δοκιμίων βράχου



Εικόνα 49: Κοπή και λείανση άκρων κυλινδρικών βραχωδών δοκιμίων

Όλες οι δοκιμές που περιγράφονται παρακάτω πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Βραχομηχανικής και Τεχνικής Γεωλογίας του Ε.Μ.Π σύμφωνα με τα πρότυπα της Διεθνούς Ένωσης Βραχομηχανικής (International Society for Rock Mechanics-ISRM).

Μονοαξονική θλιπτική αντοχή και παραμορφωσιμότητα

Προκειμένου να προσδιοριστεί η μονοαξονική θλιπτική αντοχή και παραμορφωσιμότητα του βράχου του Υμηττού ελήφθησαν από την συγκεκριμένη περιοχή τεμάχια, από τα οποία διατρήθηκαν τα κυλινδρικά δοκίμια (καρότα). Κατά τη δοκιμή αυτή, ένα κυλινδρικό δοκίμιο φορτίζεται με σταθερό ρυθμό θλιπτικά μέχρις ότου να αστοχήσει. Πάνω στο δοκίμιο είναι τοποθετημένα ειδικά μηκυσιοόμετρα με σκοπό να καταγραφεί τόσο η αξονική όσο και η πλευρική παραμόρφωσή του. Με τον τρόπο αυτό, κατασκευάζονται καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων και προσδιορίζονται το μέτρο ελαστικότητας Young (E) και ο λόγος Poisson (ν).



Εικόνα 50: Δοκίμιο με τα μηχανισιόμετρα κατά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης

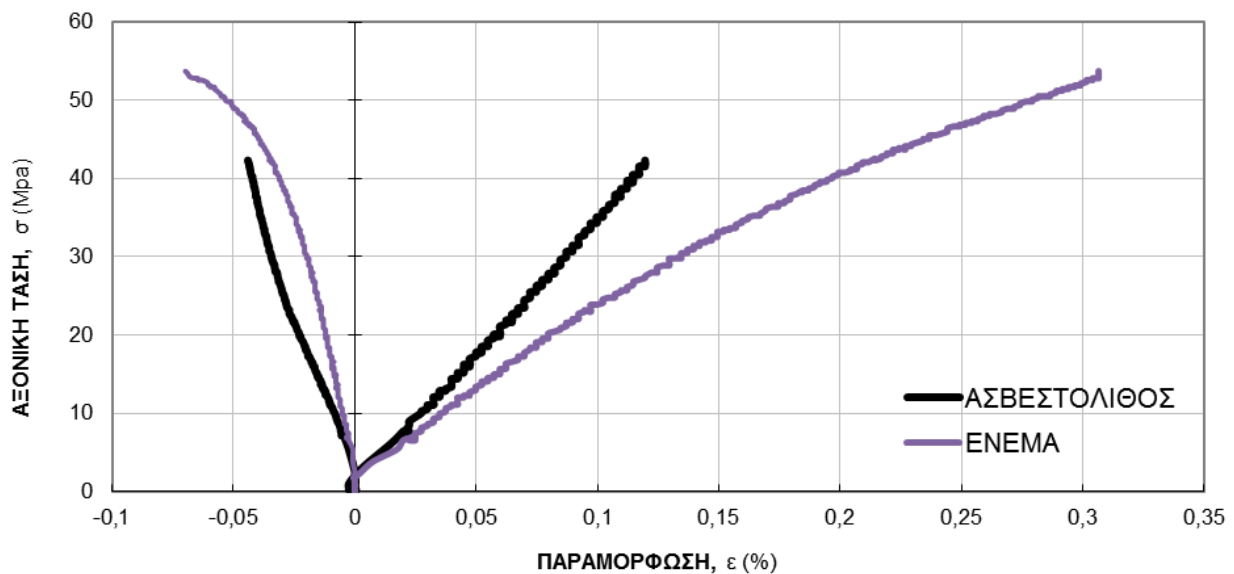


Εικόνα 51: Αστοχία ενέματος σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης

Πίνακας 18: Υπολογισμός θλιπτικής αντοχής, E και ν

α/α δοκμής	Υλικό	d (mm)	L (mm)	χρόνος (λεπτά)	σ_c (MPa)	ρ (kN/m ³)	E (GPa)	ν	$\sigma_{c(50)}$ (MPa)
1	Ασβεστόλιθος	52,3	119	7,4	62,38	25,89	36,9	0,347	62,88
2	Ένεμα	55,3	118	7,2	54,17	21,71	18,3	0,173	55,16

Παρακάτω φαίνονται τα διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων των υλικών.



Διάγραμμα 1 : Διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων υλικών πειράματος

Εφελκυστική αντοχή

Μέσω της δοκιμής δίσκου (Brazilian test) προσδιορίζεται η εφελκυστική αντοχή των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν τόσο στο εργαστήριο όσο και στο πεδίο. Η δοκιμή αυτή βασίζεται στο γεγονός πως όταν ένα δοκίμιο βράχου υπόκειται σε διαξονική καταπόνηση (κατά γενέτειρα) αυτό αστοχεί τις περισσότερες φορές σε εφελκυσμό, όταν η μία κύρια τάση είναι εφελκυστική και η άλλη θλιπτική, με τη τελευταία να μην είναι τρεις φορές μεγαλύτερη από την εφελκυστική τάση. Η εφελκυστική αντοχή του υλικού προσδιορίζεται μέσω της σχέσης:

$$\sigma_t = 0.636 \cdot \frac{P}{D \cdot t} \quad (\text{MPa}) \quad (6.14)$$

Όπου: P το φορτίο κατά την αστοχία (N)

D η διάμετρος του δοκιμίου (mm)

t το πάχος του δοκιμίου μετρημένο στο κέντρο (mm)

Πίνακας 19: Υπολογισμός εφελκυστικής αντοχής

α/α δοκιμής	Υλικό	d (mm)	t (mm)	ρ (kN/m ³)	Φορτίο θραύσης- P (kN)	σ_t (MPa)
1	Ασβεστόλιθος	52,20	25,20	25,03	17,30	8,36
2		52,00	26,80	26,12	14,00	6,39
3	Ένεμα	55,51	31,20	21,81	20,10	7,39
4		55,54	28,30	21,94	18,90	7,66
5		55,53	28,70	21,93	18,60	7,43

**Εικόνα 52: Δοκιμή εφελκυστικής αντοχής (Brazilian Test)**



Εικόνα 53: Δοκίμιο ενέματος μετά την αστοχία του σε εφελκυσμό

Ταχύτητα διάδοσης υπερήχων

Η χρήση των υπερήχων (ultrasonic testing) αποτελεί μία μη καταστρεπτική μέθοδο, με την οποία ανιχνεύονται τόσο ασυνέχειες όσο και μηχανικές ιδιότητες των υλικών, όπως το μέτρο ελαστικότητας E , ο λόγος Poisson ν καθώς και το μέτρο διάτμησης G . Για τη δοκιμή αυτή χρησιμοποιούνται μηχανικά κύματα, τα οποία διακρίνονται σε διαμήκη και εγκάρσια. Η διάδοση του ήχου εξαρτάται από την φύση του υλικού μέσα στο οποίο διαδίδεται. Επομένως, οι ταχύτητες διάδοσης των διαμήκων c_l και των εγκάρσιων κυμάτων c_t είναι σταθερές των υλικών και συνδέονται με τις ελαστικές σταθερές μέσω των σχέσεων:

$$c_l = \sqrt{\frac{E \cdot (1 - \nu)}{\rho \cdot (1 + \nu) \cdot (1 - 2 \cdot \nu)}} \quad (6.15)$$

$$c_t = \sqrt{\frac{E}{2 \cdot \rho \cdot (1 + \nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (6.16)$$

$$\nu = \frac{0.5 \cdot \left(\frac{c_l}{c_t}\right)^2 - 1}{\left(\frac{c_l}{c_t}\right)^2 - 1} = \frac{c_l^2 - 2 \cdot c_t^2}{2 \cdot c_l^2 - 2 \cdot c_t^2} \quad (6.17)$$

$$E = (1 + \nu) \cdot \rho \cdot c_t^2 \quad (6.18)$$

$$G = \rho \cdot c_t^2 \quad (6.19)$$

Όπου: ρ η πυκνότητα του υλικού

c_l η ταχύτητα διάδοσης των διαμήκων κυμάτων

c_t η ταχύτητα διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων

Οι ταχύτητες αυτές ορίζονται με τη μέτρηση του χρόνου διάδοσης (t_l και t_t) και της απόστασης d μεταξύ του πομπού και του δέκτη κατά την πραγματοποίηση της δοκιμής.

$$v_l = \frac{d}{t_l} \quad (6.20)$$

$$v_t = \frac{d}{t_t} \quad (6.21)$$



Εικόνα 54: Εργαστηριακός εξοπλισμός για τη μέτρηση διάδοσης των υπερήχων

Πίνακας 20 : Υπολογισμός E, ν μέσω υπερήχων

α/α δοκιμής	Υλικό	v_p (m/s)	v_s (m/s)	E (GPa)	ν	G (GPa)
1	Ασβεστόλιθος	4959,4	3363,8	64,9	0,074	30,2
2		5469,9	3092,9	64,1	0,265	25,3
3	Ένεμα	4132,2	2568,7	33,3	0,185	14,1
4		4339,6	2474,5	34,5	0,259	13,7
5		4330,8	2672,9	38,2	0,192	16,0

Σφύρα Schmidt

Η μέτρηση της αναπήδησης (R) μέσω της σφύρας Schmidt τύπου L χρησιμοποιείται για τον έμμεσο προσδιορισμό τόσο της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής των βραχωδών υλικών όσο και του μέτρου ελαστικότητάς τους. Η σφύρα Schmidt αποτελείται από ένα έμβολο που συγκρατείται με ένα ελατήριο το οποίο ελευθερώνεται όταν το έμβολο πιέζεται πάνω σε μια επιφάνεια. Η ενέργεια που έχει το ελατήριο όταν επιστρέφει εξαρτάται από τη σκληρότητα του υλικού και εκφράζεται ως λόγος των μηκών του ελατηρίου πριν και μετά την κρούση. Έτσι, στα πειράματα πεδίου με τη σφύρα Schmidt μετρήθηκε η σκληρότητα των βραχωδών πρανών. Πιο συγκεκριμένα, σε κάθε πρανές κάναμε 20 μετρήσεις. Από αυτές κρατήσαμε τις 10 υψηλότερες τιμές, υπολογίσαμε το μέσο όρο τους και τελικά βρήκαμε την σκληρότητα του βράχου. Ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και στο εργαστήριο.



Εικόνα 55: Σφύρα Schmidt

Πίνακας 21: Τιμές σφύρας Schmidt

	Θέση 1-Θέατρο Βράχων	Θέση 2-Θέατρο Βράχων
α/α	R_L	R_L
1	48	54
2	48	52
3	46	49
4	44	47
5	44	46
6	44	42
7	44	42
8	42	38
9	42	36
10	42	36
M.O.	44,4	44,4

6.5 Περιγραφή δοκιμών Πεδίου

6.5.1 Γεωλογικό υπόβαθρο του Υμηττού

Ο Υμηττός, που βρίσκεται στην Νοτιοανατολική Αττική, χωρίζει το λεκανοπέδιο των Αθηνών από αυτό των Μεσογείων. Το σχήμα του είναι επίμηκες και εκτείνεται από το Σταυρό Αγίας Παρασκευής βόρεια, έως τον Σαρωνικό κόλπο νότια και έχει μήκος περί τα 12,5km.

Το μεγαλύτερο υψόμετρο είναι 1026 μέτρα στην κορυφή του, τον Εύζωνα. Στη μέση περίπου του μήκους του χαμηλώνει έως τα 454 μέτρα στην περιοχή της Ντούκας και χωρίζει σε δύο τμήματα τον Υμηττό. Το βόρειο τμήμα που έχει διεύθυνση ΒΒΑ-ΝΝΔ και το νότιο που έχει διεύθυνση Β-Ν και δεν αποτελεί συνέχεια του βόρειου, αλλά έχει μετακινηθεί προς τα ανατολικά από ένα ρήγμα με σημαντική συνιστώσα αριστερής οριζόντιας ολίσθησης, που περνάει από το ρέμα της Αργυρούπολης και συνεχίζεται ανατολικότερα στο Σέσι και το διάσελο της Ντούκας.

Η κλίση της μορφολογίας είναι εντονότερη στα ανατολικά πρηνή από ότι στα δυτικά. Το υδρογραφικό δίκτυο έχει κυρίως διεύθυνση Α-Δ και εξαφανίζεται στους πρόποδες.

Η κύρια μάζα του Υμηττού δομείται από μεταμορφωμένα πετρώματα όπου διακρίνονται τρεις τεκτονικές ενότητες. Η κατώτερη ονομάζεται Βάρης-Κύρου Πήρα και αποτελείται από σχιστόλιθους, μάρμαρα και δολομίτες. Πάνω από αυτή, με απότομη τεκτονική επαφή βρίσκεται η ενότητα Υμηττού που αποτελείται από μάρμαρα και σχιστόλιθους. Η επαφή χαρακτηρίζεται από το σχηματισμό τεκτονικών πετρωμάτων, απότομο κατακόρυφο ανάγλυφο «Ρέδι» και κοιλάττες ή σπήλαια.

Πάνω από τις δύο προαναφερόμενες ενότητες, ακολουθεί τεκτονικά (απότομη επαφή) η ενότητα Λαυρίου-Αττικής, που αποτελείται από διάφορους τύπους σχιστόλιθων και απομονωμένων λόγω διάβρωσης ασβεστολιθικών μαζών.

Η κύρια μάζα του Υμηττού είναι ένα τεκτονικό κέρας με διαδοχικά ρήγματα με επικρατέστερη διεύθυνση Β-Ν, που χωρίζει δύο τεκτονικές τάφρους, το λεκανοπέδιο των Αθηνών δυτικά, από το λεκανοπέδιο των Μεσογείων ανατολικά. Στα κράσπεδα του Υμηττού υπάρχουν νεώτερα μεταλλικά ιζήματα, κυρίως πλευρικά κορήματα που αποτελούν καλλιεργήσιμες εκτάσεις.

Ο κύριος όγκος του Υμηττού μαζί με τους λόφους που αποτελούν συνέχειά του και τις ορεινές μάζες της Μερέντας, του Κερατοβουνίου και του Ολύμπου ανατολικότερα, σχηματίζουν έναν ενιαίο καρστικό υδροφόρο ορίζοντα, που εκφορτίζεται στη θάλασσα από την περιοχή Βουλιαγμένης έως την Αγία Μαρίνα από υφάλμυρες παράκτιες και υποθαλάσσιες πηγές.



Εικόνα 56: : Πρανές στον Υμηττό



Εικόνα 57: Πρανές στον Υμηττό

6.5.2 Θέση δοκιμών - Θέατρο Βράχων Βύρωνα



Εικόνα 58: Δορυφορική απεικόνιση χώρου διεξαγωγής πειράματος (Θέατρο Βράχων)

Πηγή: Google Maps

Για την εκτέλεση των δοκιμών αρχικά εντοπίστηκε ένας όγκος βράχου που σχηματίζει 2 πρανή με ευκολία πρόσβασης και έγιναν δοκιμές σε 2 θέσεις όπως φαίνεται στην εικόνα 58.

Αποτύπωση πρανού

Προηγήθηκε των δοκιμών η αποτύπωση των 2 πρανών, χρησιμοποιώντας προφιλόμετρο, σφύρα Schmidt, μετροταινία. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα :

Πίνακας 22: Στοιχεία θέσεων δοκιμών

	Ύψος ρίψεων (m)	Κλίση (°)	Σκληρότητα (Schmidt)	JRC
Θέση 1	3	75	44,4	8-10
Θέση 2	3	55	44,4	7-9



Εικόνα 59: Θέση 1 – Υμηττός

Το πρώτο πρανές έχει ύψος 5 μέτρων , κλίση 75° , τραχύτητα 8-10, σκληρότητα 44,4 σύμφωνα με την σφύρα Schmidt, όπως μετρήθηκαν επί τόπου. Η επιφάνεια του ήταν αρκετά ομαλή. Στη συνέχεια, τοποθετήθηκαν οι φωτογραφικές μηχανές σε απόσταση 10 μέτρων από το πρανές και σχεδόν παράλληλα σε αυτό για την καλύτερη καταγραφή των βραχοπτώσεων. Η μεταξύ τους απόσταση ήταν περίπου 1 μέτρο. Πραγματοποιήθηκαν συνολικά 52 ρίψεις. Επίσης, έγιναν ρίψεις τυχαίων τεμαχών παρόμοιας μάζας με εκείνα που φτιάχτηκαν στο εργαστήριο τα οποία συλλέχθηκαν επί τόπου. Πριν από την εκτέλεση των δοκιμών γίνεται κατάλληλη βαθμονόμηση των καμερών με την βοήθεια ενός κανάβου γνωστών διαστάσεων ο οποίος φτιάχτηκε στο εργαστήριο και έτσι ορίστηκε ένα τρισδιάστατο σύστημα συντεταγμένων για τη περαιτέρω επεξεργασία των καταγραφών μέσω κατάλληλου λογισμικού.

Πίνακας 23: Θέση 1-Υμηττός

Σχήμα	Αριθμός ρίψεων
κύβος	20
σφαίρα	6
πολυγωνικό	14
τυχαίο	12



Εικόνα 60: Θέση 2 – Υμηττός

Το δεύτερο πρανές έχει ύψος 6 μέτρων , κλίση 55° , τραχύτητα 7-9, σκληρότητα 44,4 , όπως μετρήθηκαν επί τόπου. Η επιφάνεια του ήταν αρκετά ανώμαλη. Ωστόσο, εντοπίστηκε μια επιφάνεια περίπου 1 m^2 αρκετά ομαλή στην οποία ρίφθηκαν τα δοκίμια. Στη συνέχεια, τοποθετήθηκαν οι φωτογραφικές μηχανές σε απόσταση 9,5 μέτρων από το πρανές και σχεδόν παράλληλα σε αυτό για την καλύτερη καταγραφή των βραχοπτώσεων. Η μεταξύ τους απόσταση ήταν περίπου 0,5 μέτρα. Πραγματοποιήθηκαν συνολικά 49 ρίψεις. Επίσης, έγιναν καταγραφές τυχαίων τεμαχίων παρόμοιας μάζας με εκείνα που φτιάχτηκαν στο εργαστήριο τα οποία συλλέχθηκαν επί τόπου.

Πίνακας 24: Θέση 2-Υμηττός

Σχήμα	Αριθμός ρίψεων
κύβος	14
σφαίρα	9
πολυγωνικό	15
τυχαίο	11



Εικόνα 61: Θέση 2 - Υμηττός



Εικόνα 62: Διασπορά δοκιμίων



Εικόνα 63: Καταγραφή ρίψεων

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

- ❖ ενεργοποιούνται οι κάμερες ταχείας λήψεως,
- ❖ γίνονται οι απαραίτητες ρυθμίσεις σε αυτές,
- ❖ γίνεται η βαθμονόμηση του συστήματος συντεταγμένων μέσω κανάβου,
- ❖ πραγματοποιείται η ρίψη όλων των δοκιμίων,
- ❖ συλλέγονται τα δοκίμια και ανυψώνονται με τα χέρια εκ νέου στη θέση ρίψης,
- ❖ αποθηκεύεται το αρχείο και μεταφέρεται σε φορητό ηλεκτρονικό υπολογιστή για τις περαιτέρω ενέργειες επεξεργασίας.

6.6 Δοκιμές Εργαστηρίου

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

- ❖ την επαναληψιμότητα λόγω των ελεγχόμενων συνθηκών,
- ❖ την δυνατότητα μεταβολής των συνθηκών κρούσης (γωνία πρόσπτωσης, ύψος ρίψης, υλικό κ.α.),
- ❖ την σχετικά ταχεία εκτέλεση έκαστης δοκιμής.

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία αποφασίστηκε να γίνουν και πειράματα εργαστηρίου ώστε να συγκριθούν τα αποτελέσματά τους με αυτά των πειραμάτων πεδίου και να αξιολογηθεί η επίδραση των φαινομένων κλίμακας.

6.6.1 Διαδικασία εκτέλεσης εργαστηριακών πειραμάτων

Προκειμένου να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή προσομοίωση με το φυσικό φαινός του Υμηττού, συλλέχθηκε από το πεδίο βραχώμαζα μεγέθους περίπου 15x25x40 cm βάρους 40 kg. Τοποθετήθηκε με τον κατάλληλο τρόπο ώστε να διαμορφώνονται επιφάνειες πρόσπτωσης 20°, 45° και 70°. Οι κλίσεις επιλέχθηκαν έτσι ώστε να είναι παρόμοιες με αυτές των δοκιμών πεδίου. Χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια βάρους 60 gr κατασκευασμένα από το ίδιο ένεμα υψηλής αντοχής, σχήματος σφαιρικού, κυβικού και πολυγωνικού κατά ETAG.

Με σκοπό να επιτευχθεί κινηματική ομοιότητα με τις δοκιμές πεδίου υπολογίσθηκε ότι η ταχύτητα κρούσης πρέπει να ικανοποιεί τη σχέση (6.10) :

$$\frac{v_R}{v_M} = \frac{L_R T_R^{-1}}{L_M T_M^{-1}} = \lambda \tau^{-1} = \lambda (\lambda^{1/2})^{-1} \rightarrow \frac{v_R}{v_M} = \lambda^{1/2}$$

Για $\lambda = 5$ και ταχύτητα κρούσης δοκιμών πεδίου περίπου 8 m/s προέκυψε ταχύτητα κρούσης δοκιμών εργαστηρίου ίση με 3,6 m/s που αντιστοιχεί σε ύψος εκκίνησης της πτώσης 60 – 70 cm. Τα δοκίμια αφέθηκαν με το χέρι από το ύψος αυτό. Οι φωτογραφικές μηχανές τοποθετήθηκαν σε απόσταση 2,5 από την επιφάνεια πρόσπτωσης. Η διαδικασία εκτέλεσης είναι ίδια με αυτή του πεδίου, σαφώς πιο γρήγορη και ελεγχόμενη.

Πίνακας 25: Αριθμός ρίψεων εργαστηρίου

Σχήμα	Κλίση		
	20°	45°	70°
κύβος	44	28	30
σφαίρα	44	28	30
πολυγωνικό	52	28	30

Από τις δοκιμές αυτές επεξεργάστηκαν 15 από κάθε περίπτωση για τον προσδιορισμό των συντελεστών αναπήδησης (λόγω μικρής διασποράς) ενώ παρατηρήθηκε ότι από τις συνολικές ρίψεις, αναπήδηση εμφανίστηκε σε ποσοστό:

Πίνακας 26: Ποσοστό δοκιμών που αναπήδησαν

Σχήμα	Κλίση		
	30°	50°	70°
κύβος	55	64	*
πολυγωνικό	75	68	*
σφαίρα	100	75	*

Ειδικά για την κλίση των 70° παρατηρήθηκε ένας είδος εκτροπής από την αρχική πορεία των δοκιμών.

6.7 Όργανα και συσκευές

Για τον υπολογισμό των συντελεστών αναπήδησης απαιτείται η ακριβής αποτύπωση της εκτελούμενης τροχιάς. Για την καταγραφή της, χρησιμοποιήθηκαν δύο φωτογραφικές μηχανές ταχείας λήψης οι οποίες έχουν τη δυνατότητα καταγραφής 60 λήψεων το δευτερόλεπτο (frames per sond - fps), με την απαιτούμενη κάθε φορά λεπτομέρεια της καταγραφής.

Οι φωτογραφικές μηχανές ταχείας λήψεως τοποθετήθηκαν επί σταθερών φωτογραφικών τρίποδων σε συγκεκριμένη κάθε φορά απόσταση από το εξεταζόμενο πρηνές.

Χαρακτηριστικά από τις φωτογραφικές μηχανές:

- ❖ Canon EOS 600d
- ❖ 18 Mega Pixels
- ❖ 60 frames per sond-Full HD video

Συμπληρωματικά χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω:

- ❖ Ηλεκτρονικό αποστασιόμετρο - κλισιόμετρο χειρός τύπου Disto D3 της εταιρείας Leica για το προσδιορισμό του ύψους πτώσης (απόκλιση οργάνου $\pm 0,2$ mm) και της κλίσης του επιπέδου πρόσκρουσης (απόκλιση γωνιών $\pm 0,1^\circ$)
- ❖ Τραπεζοκόφτης βραχιδών υλικών
- ❖ Συσκευή λείανσης βραχιδών δοκιμών
- ❖ Ηλεκτρονικός ζυγός ακριβείας ($\pm 0,01$ gr)
- ❖ Ογκομετρικοί κύλινδροι για τον προσδιορισμό της πυκνότητας
- ❖ Νήμα της στάθμης
- ❖ Ηλεκτρονικό παχύμετρο ($\pm 0,01$ mm)



Εικόνα 64: Φωτογραφικές μηχανές

6.8 Επεξεργασία δοκιμών

6.8.1 Τρισδιάστατη αποτύπωση πρानούς

Έχοντας προσδιορίζει τις παραμέτρους βαθμονόμησης του στερεοζεύγους, μπορούν να προσδιορισθούν οι συντεταγμένες στον τρισδιάστατο χώρο οποιουδήποτε σημείου απεικονίζεται και από τις δυο εικόνες, στο σύστημα συντεταγμένων μίας εκ των δυο φωτομηχανών. Για τον προσδιορισμό της γεωμετρίας του πρानούς απαιτείται η εύρεση των ομόλογων σημείων του πρानούς στις δυο εικόνες. Αυτό μπορεί να γίνει εύκολα και με ακρίβεια χρησιμοποιώντας τεχνικές συσχέτισης εικόνων (image correlation) μηχανικής όρασης.

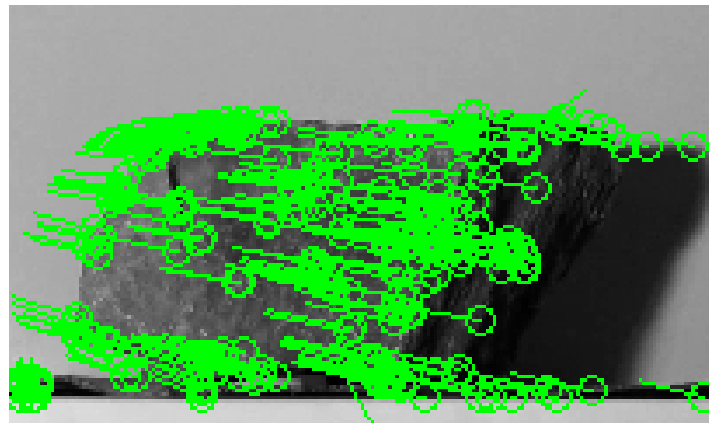
Στις τεχνικές συσχέτισης ή συνταύτισης εικόνων χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι που σαρώνουν τις δυο εικόνες με σκοπό να εντοπίσουν αυτόματα τα ομόλογα σημεία, εντοπίζοντας κοινά μοτίβα πληροφορίας (χρώματος, τονικότητας ή άλλων) μεταξύ αυτών. Στην πράξη πλεονεκτεί έναντι της χειροκίνητης σήμανσης των ομολογιών αφού η διαδικασία είναι σαφέστερα ταχύτερη, αντικειμενική και αποδίδει μεγάλο πλήθος σημείων.

Ενδεικτικά, για την ανακατασκευή της επιφάνειας πρόσκρουσης σε πείραμα εργαστηρίου, τα ομόλογα σημεία που αποδίδει ο χρησιμοποιούμενος αλγόριθμος μεταξύ των τμημάτων ενδιαφέροντος των εικόνων που παρουσιάζονται στην εικόνα 66 είναι περίπου 300. Τα ομόλογα σημεία που αποδίδονται από τον αλγόριθμο παρουσιάζονται στην εικόνα 66, όπου με κύκλο σημαίνεται το σημείο στην εικόνα που παρουσιάζεται και η γραμμή συνδέει το εν λόγω σημείο με την θέση του στην άλλη εικόνα. Συνεπώς η γραμμή δείχνει την πορεία που πρέπει να διαγραφεί για να ταυτιστούν οι δυο εικόνες. Ένα ποιοτικό μέτρο αξιολόγησης της αντιστοιχίας των ομόλογων σημείων είναι οι γραμμές που

απεικονίζονται να είναι μεταξύ τους παράλληλες και το μήκος να είναι ίδιο για σημεία που βρίσκονται στην ίδια απόσταση από τις φωτομηχανές. Όπως παρατηρείται από την εικόνα 66 η διαδικασία της συσχέτισης αποδίδει εξαιρετικά αποτελέσματα.

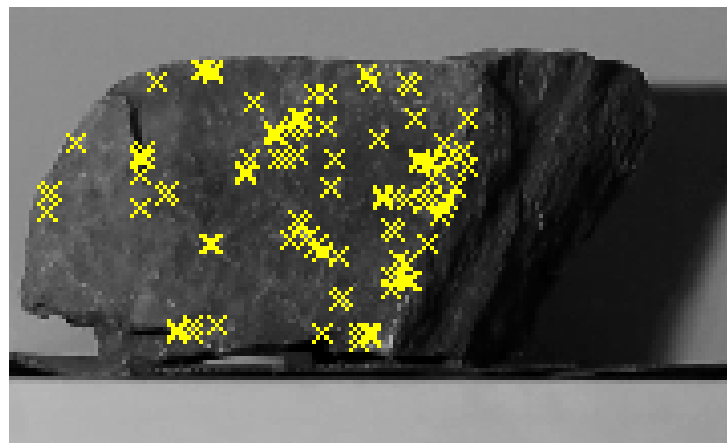


Εικόνα 65: Εικόνες από τις δυο φωτομηχανές για την ανακατασκευή της επιφάνειας πρόσκρουσης



Εικόνα 66: Ομόλογα σημεία μεταξύ των δυο εικόνων

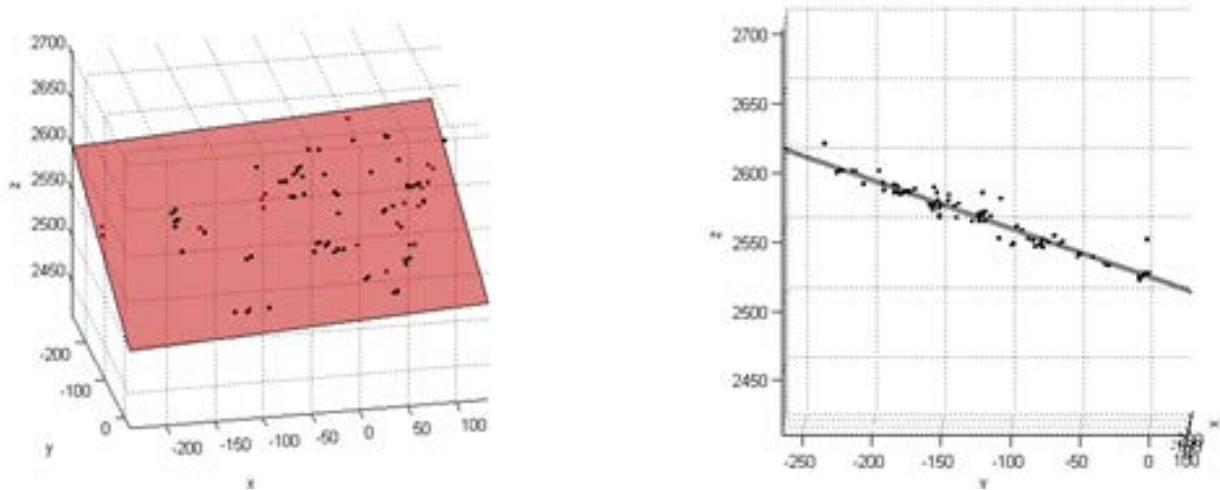
Στην συνέχεια γίνεται καθορισμός των ορίων της επιφάνειας πρόσκρουσης και διατηρούνται τα ομόλογα σημεία που ανήκουν σε αυτήν (εικόνα 67). Εφαρμόζοντας την διαδικασία της φωτογραμμετρικής εμπροσθοτομίας υπολογίζονται οι συντεταγμένες των σημείων αυτών στον τρισδιάστατο χώρο, με αποτέλεσμα την ακριβή αποτύπωση της επιφάνειας πρόσκρουσης.



Εικόνα 67: Ομόλογα σημεία μεταξύ των δυο εικόνων που ανήκουν στην επιφάνεια πρόσκρουσης

6.9 Σύστημα αξόνων Αναλύσεων

Έχοντας προσδιορίσει στο χώρο ένα πλήθος σημείων που ανήκουν στην επιφάνεια πρόσκρουσης, με την μέθοδο που περιγράφεται παραπάνω, η επιφάνεια πρόσκρουσης προσομοιώνεται ως το βέλτιστο επίπεδο που διέρχεται από αυτά, σύμφωνα με την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων (εικόνα 68).

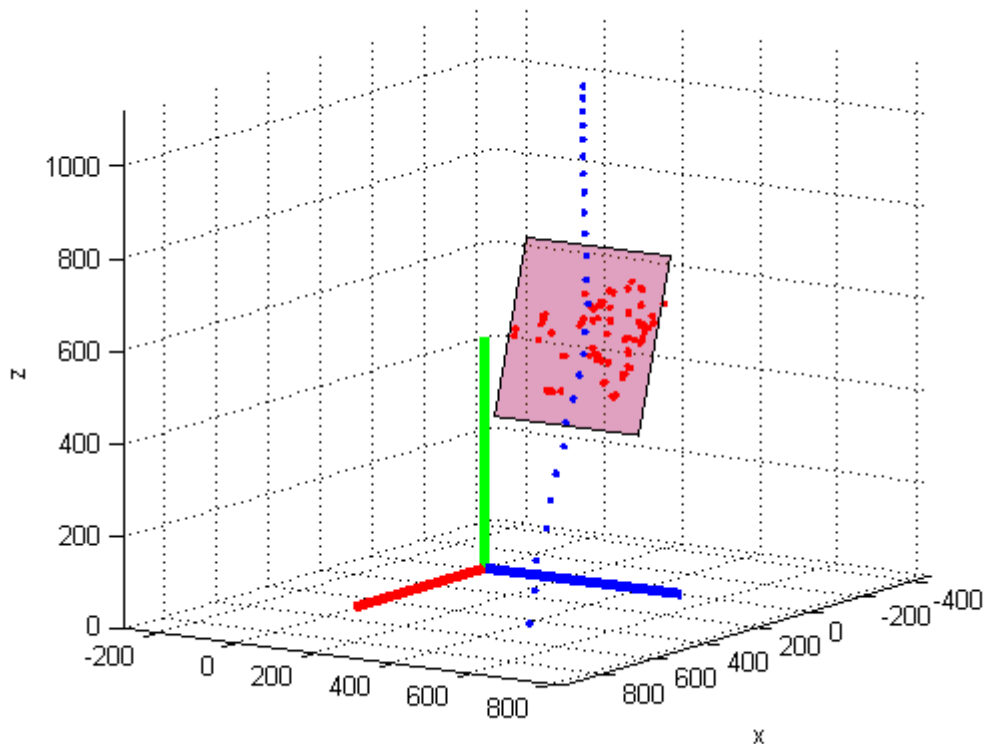


Εικόνα 68: Τρισδιάστατη απεικόνιση του πρानούς στο σύστημα συντεταγμένων της φωτομηχανής (σε mm)

Το σύστημα συντεταγμένων της φωτομηχανής δεν είναι εύχρηστο για την διενέργεια των αναλύσεων, αφού ο προσανατολισμός των αξόνων είναι τυχαίος σε σχέση με το πρानές και την κίνηση των τεμαχών. Συνεπώς το σύστημα της φωτομηχανής στρέφεται και μετατοπίζεται ώστε ο νέος άξονας Z να ταυτίζεται με την κατακόρυφο, δηλαδή την διεύθυνση της βαρύτητας, και οι νέοι άξονες X και Y να βρίσκονται επί του κάθετου στο διάνυσμα της βαρύτητας επιπέδου. Ο άξονας X επιλέγεται να έχει την διεύθυνση της προβολής της φοράς μεγίστης κλίσης του πρανούς στο κάθετο επίπεδο της βαρύτητας και ο άξονας Y να συμπίπτει με την διεύθυνση του πρανούς.

Για τον προσδιορισμό της διεύθυνσης του άξονα Z χρησιμοποιήθηκε νήμα της στάθμης ενώ η διεύθυνση του άξονα Y προσδιορίζεται από την ευθεία που ορίζεται από την τομή του επιπέδου πρόσκρουσης και του επιπέδου που είναι κάθετο στο διάνυσμα της βαρύτητας, έτσι ο Y άξονας ταυτίζεται με την διεύθυνση των παρατάξεων της επιφάνειας πρόσκρουσης. Τέλος, ο άξονας X υπολογίζεται ως το κάθετο διάνυσμα στο επίπεδο που σχηματίζουν οι άξονες Z και Y. Έχοντας προσδιορίσει τις διευθύνσεις των αξόνων λαμβάνεται αυθαίρετα το σημείο αρχής των αξόνων έτσι ώστε το σύνολο να κίνησης να βρίσκεται στους θετικούς ημιάξονες.

Στην εικόνα 69 φαίνεται το σύστημα αξόνων της ανάλυσης, όπου ο άξονας Z σημαίνεται με πράσινο, ο άξονας X με κόκκινο και ο Y με μπλε χρώμα. Επίσης φαίνονται τα σημεία που ορίζουν το πρανές (κόκκινα σημεία) καθώς επίσης και το επίπεδο που ορίζουν, ενώ επίσης παρουσιάζεται ενδεικτικά και μια καταγεγραμμένη τροχιά.



Εικόνα 69: Σύστημα αξόνων αναλύσεων (μονάδες διαγράμματος σε mm)

Έτσι θεωρώντας αυθαίρετα ότι η διεύθυνση του Βορρά ταυτίζεται με αυτήν του άξονα X προκύπτει ότι το αζιμούθιο ή ισοδύναμα η φορά μέγιστης κλίσης του πρανούς είναι 0° , ενώ παράλληλα υπολογίζεται και η κλίση του επιπέδου πρόσκρουσης επί του επιπέδου YZ, ή οποία είναι και η μέγιστη κλίση του επιπέδου. Η τιμή κλίσης της επιφάνειας αποτελεί στοιχείο επαλήθευσης της τρισδιάστατης αποτύπωσης του πρανούς συγκρινόμενη με τις μετρήσεις που ελήφθησαν επί τόπου με την χρήση της γεωλογικής πυξίδας.

Επί πρόσθετα, ο έλεγχος της ακρίβειας της ανακατασκευής της τρισδιάστατης πληροφορίας γίνεται στο σύστημα αξόνων της φωτομηχανής συγκρίνοντας διάφορες αποστάσεις που προκύπτουν από την τρισδιάστατη αποτύπωση με τις αντίστοιχες που μετρήθηκαν επί τόπου από την θέση εγκατάστασης των μηχανών με χρήση ηλεκτρονικού αποστασιόμετρου και μετροταινίας.

6.9.1 Εύρεση θέσεως τεμαχών

Για την ανάλυση της κίνησης στις τρεις διαστάσεις πρέπει αρχικά να επεξεργαστούν τα τμήματα των μαγνητοσκοπήσεων από τις δυο φωτομηχανές, ώστε να είναι δυνατή η επιλογή των ομόλογων σημείων για κάθε ζεύγος στιγμιότυπων. Για να γίνει αυτό αρχικά γίνεται συγχρονισμός των δυο καταγραφών μέσω του λογισμικού Premiere CS6, το οποίο είναι εξειδικευμένο πρόγραμμα επεξεργασίας μαγνητοσκοπήσεων (μοντάζ). Ο συγχρονισμός γίνεται μέσω ταύτισης των κυματομορφών του ήχου μεταξύ των δυο καταγραφών, αφού η καταγραφή του ήχου γίνεται σε πολύ υψηλότερες συχνότητες σε σχέση με την καταγραφή της εικόνας. Εν συνέχεια, έχοντας συγχρονίσει τις καταγραφές και επισημάνει τα στιγμιότυπα που απεικονίζουν την κίνηση των τεμαχών, εισάγονται τα αρχεία κινηματογράφησης στο περιβάλλον της MatLab όπου και εξάγονται τα στιγμιότυπα σε μορφή εικόνας (.bmp).

Έπειτα, με χρήση διαφορετικού κώδικα, προβάλλονται διαδοχικά τα στερεοζεύγη όπου και σημαίνονται από το χρήστη τα απαιτούμενα ομόλογα σημεία του τεμάχους, ώστε να είναι δυνατή η τρισδιάστατη ανακατασκευή του κέντρου μάζας του τεμάχους. Για κάθε σχήμα που μελετήθηκε χρησιμοποιήθηκε διαφορετικός κώδικας υπολογισμού του κέντρου μάζας του.

Συγκεκριμένα, τα σφαιρικά τεμάχη προσεγγίσθηκαν στο φωτογραφικό επίπεδο με κύκλο αφού η σφαίρα προβάλλεται ως κύκλος στην κεντρική προβολή. Τα πολυγωνικά τεμάχη προσεγγίζουν το σχήμα της σφαίρας, συνεπώς για τον εντοπισμού του κέντρου τους χρησιμοποιήθηκε η ίδια μέθοδος. Για τον προσδιορισμό των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του κύκλου, χρησιμοποιήθηκε ο υπό-κώδικας "CircleFitByPratt" που είναι ελεύθερα διαθέσιμος μέσω του διαδικτύου (Pratt, 1987). Τα δεδομένα που εισάγονται στη συνάρτηση αυτή είναι οι συντεταγμένες σημείων επί της περιφέρειας της σφαίρας που θέλουμε να προσεγγίσουμε με κύκλο. Τα σημεία αυτά επιλέγονται με την συσκευή κατάδειξης (ποντίκι) και εισάγονται στην συνάρτηση ενώ εξάγονται τα στοιχεία του κύκλου που προσεγγίζει καλύτερα το αρχικό σχήμα, δηλαδή οι συντεταγμένες του κέντρου x και y και η ακτίνα R του αντιπροσωπευτικού κύκλου.

Για τα κυβικά τεμάχη σημαίνονται με την ίδια διαδικασία δυο εμφανείς αντιδιαμετρικές ακμές τους. Το κέντρο μάζας υπολογίζεται ως το μέσο της ευθείας που τις συνδέει, αφού οι ακμές του κύβου εγγράφονται ή και περιγράφονται από μια σφαίρα, ένα ζεύγος αντιδιαμετρικών ακμών ορίζει ένα ευθύγραμμο τμήμα στον χώρο το μέσο του οποίου ταυτίζεται με το κέντρο της σφαίρας και άρα με το κέντρο μάζας.

Αντίστοιχα, το κέντρο μάζας των τυχαίων σχημάτων προσδιορίστηκε προσεγγιστικά θεωρώντας ότι ταυτίζεται με το κέντρο βάρους της επιφάνειας που προβάλλεται στο φωτογραφικό επίπεδο. Για τον υπολογισμό του σημείου αυτού, μέσω του αντίστοιχου υπό-κώδικα, επισημαίνονται σημεία επί της περιφέρειας του τεμάχους που να αποδίδουν κατά το δυνατόν καλύτερα το περίγραμμα του τυχαίου σχήματος.

Ο προσδιορισμός του κέντρου μάζας των τεμαχών γίνεται για κάθε ομόλογο ζεύγος εικόνων που αποτελούν την συνολική καταγραφή της κίνησης, η επισήμανση των σημείων αποτελούν το πλέον χρονοβόρο τμήμα της πειραματικής διαδικασίας. Στην συνέχεια με την μέθοδο της φωτογραμμετρικής εμπροσθοτομίας προσδιορίζονται οι συντεταγμένες του κέντρου μάζας στον χώρο. Ενώνοντας το σύνολο των συντεταγμένων που προκύπτουν από κάθε ζεύγος εικόνων, δημιουργείται ένας πίνακας $n \times 3$ με τις συντεταγμένες του κέντρου μάζας στο σύστημα αξόνων UVW σε κάθε στήλη. Εν συνέχεια εφαρμόζεται μητρώϊκά η στροφή και η μετάθεση που χρησιμοποιήθηκε για την μετατροπή του συστήματος συντεταγμένων UVW της φωτομηχανής στο εύχρηστο σύστημα συντεταγμένων XYZ της ανάλυσης. Τέλος, προστίθεται μια στήλη στον πίνακα με τις συντεταγμένες της κίνησης τα στοιχεία της οποίας ισούνται σε κάθε γραμμή με τον αριθμό της γραμμής επί την ταχύτητα λήψης των μαγνητοσκοπήσεων, προσδιορίζοντας έτσι τον χρόνο κάθε θέσης του τεμάχους, θεωρώντας ως αρχή ($t=0s$) το πρώτο σημείο της κίνησης.



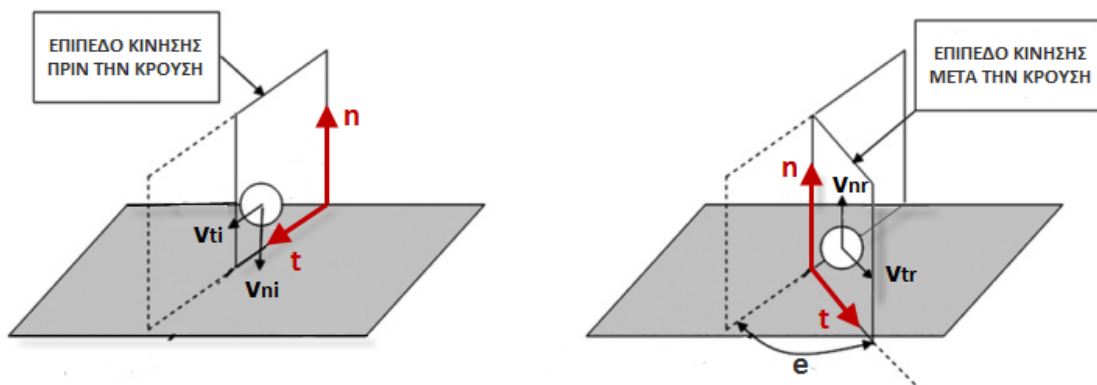
6.9.2 Υπολογισμός κινηματικών χαρακτηριστικών

Στη συνέχεια έχοντας πλέον τη θέση του κέντρου μάζας στον χώρο για κάθε στιγμιότυπο της δοκιμής, εντοπίζονται τα σημεία πριν και μετά τη κρούση, διαχωρίζοντας έτσι την τροχιά σε δυο σκέλη. Για κάθε σκέλος της κίνησης εφαρμόζεται ανά άξονα μια μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων ως προς τον χρόνο, με σκοπό αφενός τον περιορισμό του σφάλματος των συντεταγμένων και αφετέρου την απόκτηση των εξισώσεων που περιγράφουν την μετατόπιση του τεμάχους με τον χρόνο.

Η εξίσωση της μετατόπισης κατά τον άξονα Z επιλέγεται ως δευτέρου βαθμού, αφού η επιτάχυνση είναι σταθερή και ίση με την επιτάχυνση της βαρύτητας ($9,81 \text{ ms}^{-2}$), συνεπώς η δεύτερη παράγωγος της εξίσωσης θα πρέπει να ισούται με την σταθερά της βαρύτητας. Στους άξονες X και Y δεν επιδρά κάποια επιπλέον δύναμη, συνεπώς η επιτάχυνση είναι μηδενική και άρα η μετατόπιση στους άξονες αυτούς περιγράφεται με εξίσωση πρώτου βαθμού.

Γνωρίζοντας πλέον τις εξισώσεις των τροχιών, προεκτείνονται προς την επιφάνεια πρόσκρουσης, προσδιορίζοντας έτσι τα σημεία κρούσης και αναπήδησης ως τα σημεία τομής των παραπάνω εξισώσεων με την εξίσωση του επίπεδου μετατοπισμένη προς ανάντη κατά την μισή διάσταση του τεμάχους.

Γενικότερα, χωρίς την επιβολή κάποιας εξωτερικής δύναμης από την στιγμή έναρξης της κίνησης, το κέντρο μάζας του τεμάχους διαγράφει τροχιά που οποία ανήκει σε ένα επίπεδο. Συνεπώς κάθε σκέλος της κίνησης μπορεί να αναλυθεί σε ένα επίπεδο. Ορίζοντας ένα νέο σύστημα αξόνων στο επίπεδο της τροχιάς, όπου ως άξονας η ορίζεται ο κάθετος άξονας στο επίπεδο πρόσκρουσης και ως t ο εφαπτομενικός, η κίνηση μπορεί να αναλυθεί με τις κλασσικές δυσδιάστατες εξισώσεις της κινηματικής, και να προσδιοριστούν οι συντελεστές αναπήδησης (κάθετος και εφαπτομενικός), όπως περιγράφηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια.



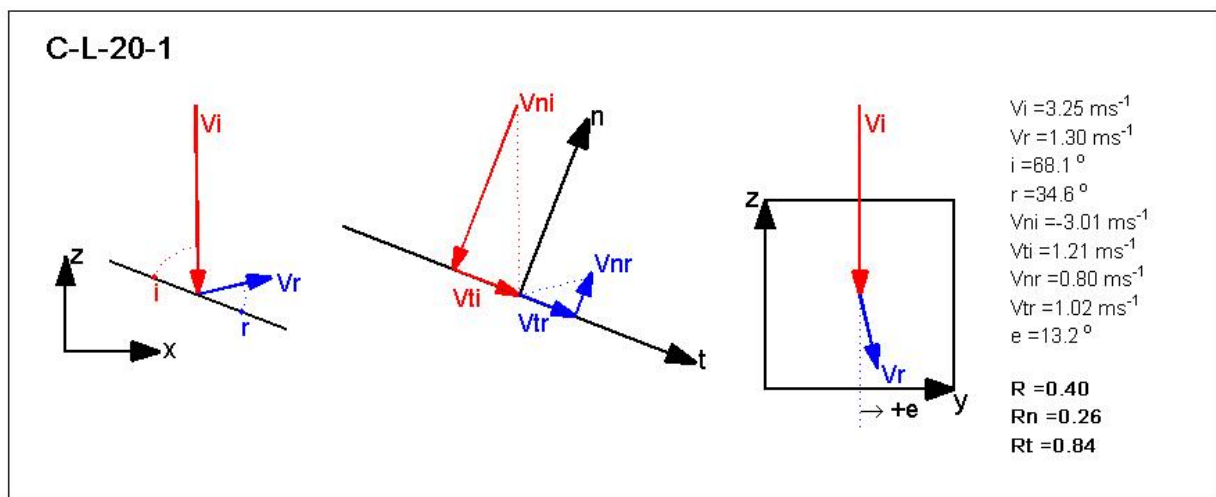
Εικόνα 70. Ανάλυση στα επίπεδα κίνησης.

Μεταξύ των δυο νέων n - t συστημάτων συντεταγμένων που ορίζονται για τα σκέλη πριν και μετά την κρούση είναι προφανές ότι ο κάθετος άξονας έχει ίδια διεύθυνση, όμως ο εφαπτομενικός άξονας δύναται να έχει διαφορετική διεύθυνση καθώς μπορεί να υπάρξει πλευρική εκτροπή εξ αιτίας της κρούσης, η οποία υπολογίζεται ως την γωνία που σχηματίζεται μεταξύ των αξόνων t των δυο σκελών της τροχιάς.

Βάσει των παραπάνω, χρησιμοποιήθηκε πρότυπος κώδικας H/Y για τον υπολογισμό των εξής χαρακτηριστικών κάθε κρούσης:

- ❖ v_i η συνολική ταχύτητα πριν την κρούση (m/s)
- ❖ v_{ni} η ταχύτητα κάθετα στο πρηνές, πριν την κρούση (m/s)
- ❖ v_{ti} η ταχύτητα παράλληλα στο πρηνές, στο επίπεδο κίνησης πριν την κρούση (m/s)
- ❖ v_r η συνολική ταχύτητα μετά την κρούση (m/s)
- ❖ v_{nr} η ταχύτητα κάθετα στο πρηνές, μετά την κρούση (m/s)
- ❖ v_{tr} η ταχύτητα παράλληλα στο πρηνές, στο επίπεδο κίνησης μετά την κρούση (m/s)
- ❖ i η γωνία πρόσκρουσης μεταξύ του πρηνούς και διανύσματος ταχύτητας πριν την κρούση ($^\circ$)
- ❖ r η γωνία αναπήδησης μεταξύ του πρηνούς και διανύσματος ταχύτητας μετά την κρούση ($^\circ$)
- ❖ θ κλίση της επιφάνειας πρόσκρουσης ως προς τον ορίζοντα ($^\circ$)
- ❖ R_n ο συντελεστής αναπήδησης κατά τον άξονα n
- ❖ R_t ο συντελεστής αναπήδησης κατά τον άξονα t
- ❖ R ο συνολικός συντελεστής αναπήδησης
- ❖ e η αλλαγή διεύθυνσης κατά το επίπεδο zy εξ αιτίας της κρούσης ($^\circ$)

Τα αποτελέσματα αποδίδονται σχηματικά από τον κώδικά στην μορφή που παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 71: Χαρακτηριστικά μεγέθη

7 Παρουσίαση-Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια παρουσίαση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Μελετάται η επίδραση του σχήματος στο φαινόμενο, γίνεται συγκριτική αξιολόγηση αποτελεσμάτων πεδίου και εργαστηρίου καθώς επίσης και της αποτελεσματικότητας της τρισδιάστατης απεικόνισης των τροχιών των βραχοτεμαχίων.

7.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Στους πίνακες 28-31 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των πειραμάτων για τα κυβικά, πολυγωνικά, σφαιρικά και τυχαίου σχήματος αντίστοιχα. Λόγω της τυχαιότητας του φαινομένου για κάθε σειρά δοκιμών έγιναν αρκετές επαναλήψεις. Στους πίνακες αυτούς φαίνεται ο μέσος όρος (Μ.Ο.), η τυπική απόκλιση (Τ.Α.) , η ελάχιστη τιμή (Ε.Τ.) και η μέγιστη τιμή (Μ.Τ.) για κάθε σειρά δοκιμών. Αναλυτικότερα, τα αποτελέσματα κάθε δοκιμής παρουσιάζονται στο παράρτημα.

Πίνακας 27: Αποτελέσματα πειραμάτων για κυβικά δοκίμια

Κύβος	θ (°)	Αριθμός δοκιμών		V_i (m/s)	V_r (m/s)	$V_{n,i}$ (m/s)	$V_{t,i}$ (m/s)	$V_{n,r}$ (m/s)	$V_{t,r}$ (m/s)	R	Rn	Rt	e (°)	i (°)	r (°)
Εργαστήριο	20°	15	M.O.	3,26	1,39	-3,01	1,24	0,69	1,18	0,43	0,23	0,96	5,7	67,8	27,8
			T.A.	0,06	0,26	0,05	0,05	0,18	0,30	0,08	0,06	0,24	21,3	0,5	9,0
			E.T.	3,13	0,87	-3,1	1,17	0,39	0,78	0,3	0,1	0,6	-22,3	67	13
			M.T.	3,37	1,81	-2,9	1,34	1,05	1,65	0,6	0,4	1,4	48,8	69	41
	45°	13	M.O.	3,42	2,17	-2,39	2,44	0,65	2,05	0,64	0,27	0,84	7,8	44,6	15,3
			T.A.	0,07	0,32	0,06	0,07	0,32	0,30	0,10	0,14	0,12	8,9	1,2	8,0
			E.T.	3,34	1,46	-2,5	2,34	0,23	1,44	0,4	0,1	0,6	-10	43	5,4
			M.T.	3,57	2,57	-2,3	2,58	1,25	2,49	0,8	0,5	1	15,2	47	32
	70°	14	M.O.	3,45	3,06	-1,04	3,28	0,63	2,99	0,89	0,61	0,91	4,1	17,5	11,4
			T.A.	0,15	0,24	0,05	0,14	0,21	0,28	0,05	0,22	0,06	10,0	0,4	4,6
			E.T.	3,21	2,56	-1,1	3,06	0,23	2,44	0,8	0,2	0,8	-18	17	3,3
			M.T.	3,71	3,41	-1	3,53	0,91	3,38	1	0,9	1	17,8	18	18
Πεδίο	55°	14	M.O.	7,43	4,44	-3,53	6,54	1,50	4,13	0,60	0,42	0,63	-11,6	28,3	19,1
			T.A.	0,47	0,75	0,17	0,47	0,65	0,76	0,09	0,19	0,11	10,4	1,3	8,1
			E.T.	6,44	2,93	-3,9	5,59	0,79	2,68	0,4	0,2	0,4	-33	26	8,9
			M.T.	8,03	5,26	-3,2	7,18	2,9	4,99	0,7	0,8	0,8	8,02	31	37
	75°	20	M.O.	8,72	6,61	-1,58	8,58	2,29	6,14	0,76	1,46	0,72	16,9	10,3	19,6
			T.A.	0,76	0,77	0,19	0,75	0,75	0,84	0,07	0,49	0,08	16,4	1,2	6,9
			E.T.	7,53	5,47	-2	7,42	0,87	5,04	0,6	0,5	0,6	-22	8,4	6,8
			M.T.	10,2	8,1	-1,3	10,1	3,41	7,91	0,9	2,3	0,9	46,7	13	31

Πίνακας 28: Αποτελέσματα πειραμάτων για πολυγωνικά δοκίμια

Πολυγωνικό	θ (°)	Αριθμός δοκιμών		V_i (m/s)	V_r (m/s)	$V_{n,i}$ (m/s)	$V_{t,i}$ (m/s)	$V_{n,r}$ (m/s)	$V_{t,r}$ (m/s)	R	R _n	R _t	e (°)	i (°)	r (°)
Εργαστήριο	20°	14	M.O.	3,24	1,56	-2,99	1,24	0,99	1,18	0,48	0,33	0,95	-9,3	67,9	37,8
			T.A.	0,05	0,24	0,04	0,04	0,19	0,29	0,08	0,07	0,23	20,8	0,5	9,7
			E.T.	3,17	1,19	-3,07	1,16	0,67	0,68	0,37	0,22	0,55	-38,9	66,9	24,4
			M.T.	3,32	2,04	-2,94	1,29	1,30	1,63	0,63	0,44	1,30	34,1	68,6	51,9
	45°	14	M.O.	3,41	2,06	-2,38	2,44	0,93	1,78	0,60	0,39	0,73	11,3	45,0	26,2
			T.A.	0,04	0,22	0,04	0,04	0,35	0,39	0,06	0,15	0,15	11,2	1,2	13,3
			E.T.	3,33	1,73	-2,43	2,35	0,34	1,09	0,52	0,15	0,46	-6,5	43,5	7,8
			M.T.	3,47	2,57	-2,30	2,50	1,54	2,47	0,75	0,66	1,01	34,9	46,5	52,4
	70°	13	M.O.	3,32	3,00	-0,98	3,18	0,58	2,93	0,90	0,59	0,92	1,6	17,4	10,6
			T.A.	0,15	0,26	0,08	0,14	0,30	0,30	0,06	0,32	0,07	7,7	0,4	6,2
			E.T.	3,10	2,65	-1,10	2,97	0,20	2,43	0,81	0,20	0,76	-11,1	16,8	3,2
			M.T.	3,57	3,48	-0,83	3,40	1,19	3,47	0,98	1,30	1,02	16,0	17,9	25,0
Πεδίο	55°	15	M.O.	7,55	4,75	-3,55	6,66	1,02	4,63	0,63	0,29	0,69	-6,0	28,0	11,8
			T.A.	0,29	0,66	0,21	0,33	0,34	0,67	0,09	0,10	0,09	14,0	2,1	4,2
			E.T.	7,21	3,57	-3,88	6,13	0,49	3,46	0,50	0,13	0,56	-21,2	25,3	4,9
			M.T.	8,35	5,97	-3,22	7,54	1,94	5,89	0,81	0,55	0,89	28,2	31,8	22,4
	75°	14	M.O.	8,40	7,13	-1,63	8,24	2,09	6,78	0,85	1,32	0,82	19,9	11,1	16,2
			T.A.	0,55	0,61	0,22	0,55	0,67	0,62	0,05	0,54	0,06	14,8	1,5	5,3
			E.T.	7,58	6,07	-1,92	7,42	1,13	5,75	0,74	0,65	0,70	-0,5	8,8	9,7
			M.T.	9,41	7,96	-1,19	9,26	4,14	7,67	0,91	2,91	0,90	52,2	13,3	32,2



Πίνακας 29: Αποτελέσματα πειραμάτων για σφαιρικά δοκίμια

Σφαίρα	θ (°)	Αριθμός δοκιμών		V_i (m/s)	V_r (m/s)	$V_{n,i}$ (m/s)	$V_{t,i}$ (m/s)	$V_{n,r}$ (m/s)	$V_{t,r}$ (m/s)	R	Rn	Rt	e (°)	i (°)	r (°)
Εργαστήριο	20°	15	M.O.	3,21	1,82	-2,96	1,24	1,40	1,04	0,57	0,47	0,84	6,4	67,8	50,8
			T.A.	0,09	0,24	0,09	0,05	0,46	0,41	0,07	0,15	0,33	19,9	0,4	18,8
			E.T.	2,99	1,40	-3,11	1,17	0,44	0,42	0,43	0,14	0,36	-42,7	67,2	10,4
			M.T.	3,35	2,23	-2,74	1,32	1,80	1,91	0,67	0,61	1,58	32,6	68,6	74,3
	45°	14	M.O.	3,46	2,17	-2,41	2,47	1,21	1,73	0,63	0,50	0,70	5,4	44,5	33,3
			T.A.	0,06	0,13	0,04	0,06	0,43	0,36	0,04	0,18	0,14	4,3	1,1	14,0
			E.T.	3,36	2,02	-2,46	2,37	0,35	1,03	0,58	0,14	0,43	-1,8	42,8	7,0
			M.T.	9,41	7,96	0,22	9,26	4,14	7,67	0,91	2,91	1,58	12,7	46,2	59,9
	70°	14	M.O.	3,39	2,98	-1,02	3,23	0,76	2,87	0,88	0,75	0,89	2,5	17,5	14,3
			T.A.	0,07	0,22	0,04	0,07	0,21	0,27	0,06	0,22	0,08	7,3	0,5	4,9
			E.T.	3,22	2,64	-1,08	3,06	0,43	2,46	0,77	0,39	0,76	-10,6	16,5	7,1
			M.T.	3,49	3,28	-0,97	3,33	1,18	3,24	0,97	1,22	1,01	12,8	18,3	24,4
Πεδίο	55°	9	M.O.	7,41	4,45	-3,57	6,49	1,56	4,12	0,60	0,44	0,64	2,5	28,7	20,5
			T.A.	0,37	0,61	0,21	0,33	0,54	0,76	0,10	0,15	0,13	15,4	1,0	9,4
			E.T.	6,65	3,58	-3,82	5,81	0,84	2,80	0,47	0,23	0,42	-18,5	27,1	10,6
			M.T.	7,90	5,36	-3,23	6,98	2,23	4,98	0,77	0,62	0,86	30,7	30,4	37,4
	75°	6	M.O.	8,20	6,01	-1,61	8,04	2,75	5,17	0,74	1,74	0,65	19,6	11,9	27,5
			T.A.	0,57	0,95	0,34	0,54	1,01	1,46	0,12	0,62	0,20	15,3	1,1	14,4
			E.T.	7,45	4,61	-1,96	7,36	1,72	3,33	0,54	1,05	0,40	-1,7	10,1	13,3
			M.T.	8,80	7,49	-1,02	8,58	4,44	7,05	0,87	2,77	0,84	36,2	12,8	48,9

Στις δοκιμές πεδίου τα σφαιρικά δοκίμια αστόχησαν κατά την κρούση με το πρανές και για αυτό το λόγο προέκυψαν λιγότερες δοκιμές από αυτά. Αυτή η συμπεριφορά δικαιολογείται σε σύγκριση με τα κυβικά και πολυγωνικά δοκίμια από το φανερά μικρότερο χρόνο επαφής που έχουν με το πρανές. Λόγω σχήματος η κρούση συμβαίνει πολύ γρήγορα με αποτέλεσμα την αύξηση των τάσεων που επιδρούν στο τέμαχος με συνέπεια την αστοχία. Αντιθέτως, τα κυβικά και πολυγωνικά δοκίμια λόγω των γωνιών που διαθέτουν και με την περιστροφή που υφίστανται κατά την επαφή με το πρανές, αυξάνουν το χρόνο επαφής τους κατά την κρούση με αποτέλεσμα να αποσβένεται ένα μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειάς τους σταδιακά και όχι ακαριαία, όπως συμβαίνει με τα σφαιρικά.

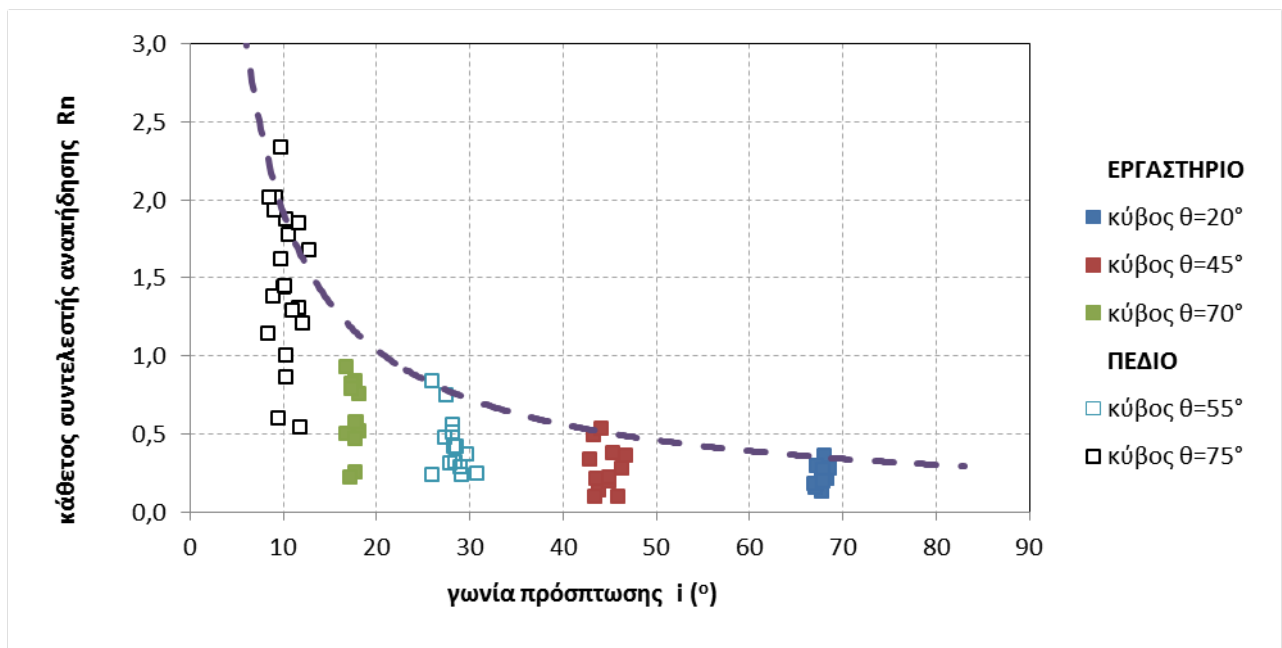
Πίνακας 30: Αποτελέσματα πειραμάτων για τεμάχια τυχαίου σχήματος

Τυχαίο	θ (°)	Αριθμός δοκιμών		V_i (m/s)	V_r (m/s)	$V_{n,i}$ (m/s)	$V_{t,i}$ (m/s)	$V_{n,r}$ (m/s)	$V_{t,r}$ (m/s)	R	R_n	R_t	e (°)	i (°)	r (°)
Πεδίο	55°	11	M.O.	7,55	5,12	-3,56	6,66	1,68	4,78	0,68	0,47	0,72	-8,3	28,0	18,9
			T.A.	0,39	0,57	0,20	0,38	0,70	0,64	0,08	0,19	0,10	11,3	1,3	8,5
			E.T.	7,06	4,51	-4,00	6,15	0,52	3,95	0,55	0,16	0,57	-25,7	25,8	5,6
			M.T.	8,37	6,34	-3,25	7,35	2,69	5,86	0,81	0,75	0,84	16,9	30,2	32,8
	75°	12	M.O.	8,34	6,14	-1,15	8,25	1,95	5,76	0,74	1,79	0,71	11,4	8,0	17,5
			T.A.	1,25	1,11	0,36	1,23	0,81	1,12	0,12	0,79	0,14	15,8	2,3	7,5
			E.T.	5,41	4,49	-1,85	5,37	0,31	4,26	0,56	0,45	0,51	-20,5	3,2	3,0
			M.T.	8,37	8,52	-0,53	9,94	3,86	8,38	0,94	3,19	0,90	35,6	11,1	32,5

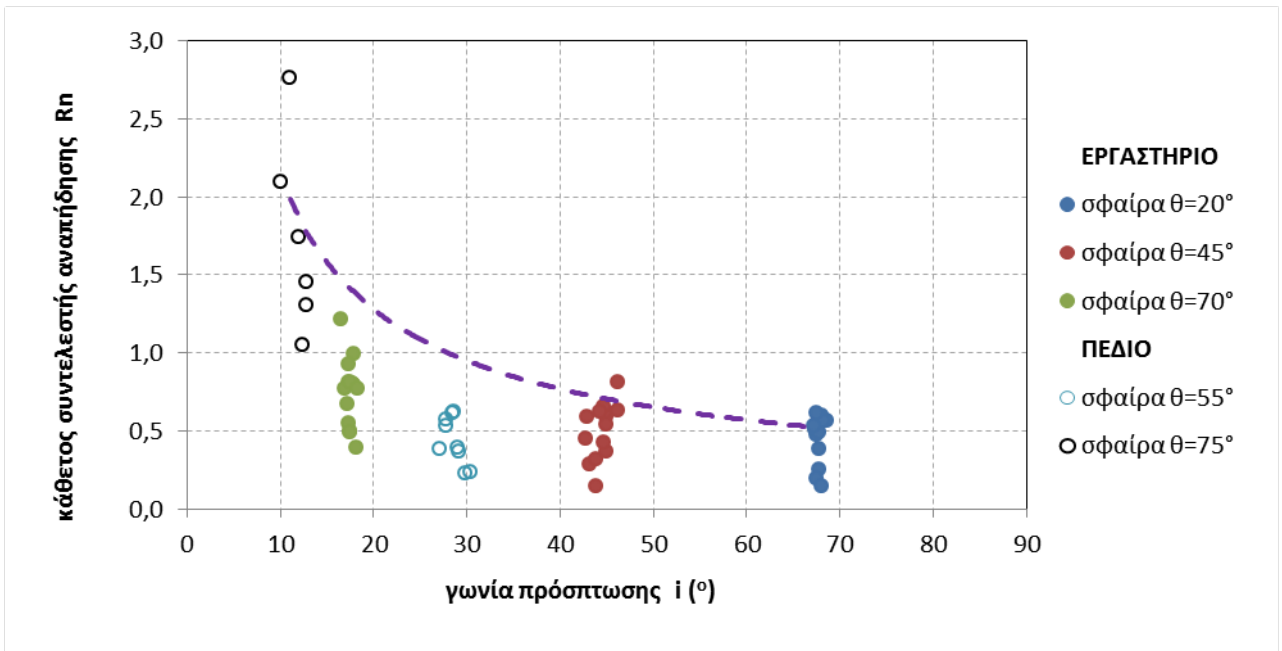
7.2 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

7.2.1 Κάθετος συντελεστής αναπήδησης – Γωνία πρόσπτωσης

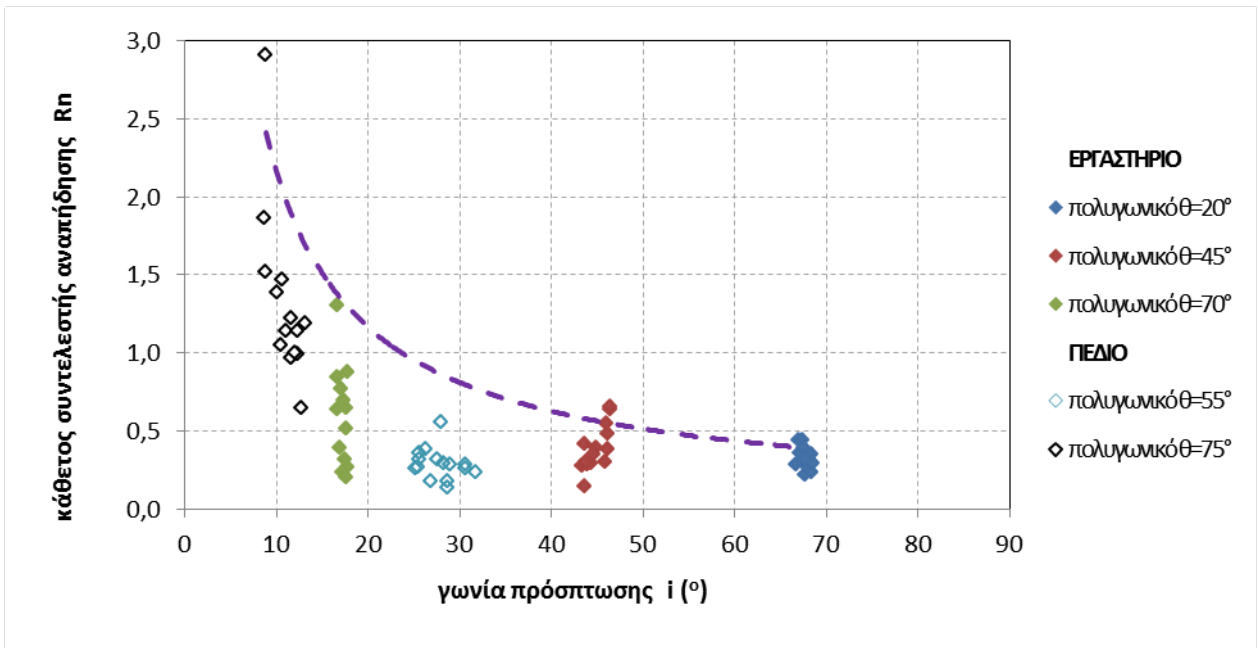
Στα διαγράμματα 2 έως 4 παρουσιάζονται για τα κανονικά σχήματα οι τιμές του κάθετου συντελεστή αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης, για τις δοκιμές εργαστηρίου και πεδίου. Στα γραφήματα αυτά παρουσιάζεται επίσης η τάση της συγκεκριμένης σχέσης που προκύπτει από τις μέγιστες τιμές του συντελεστή αναπήδησης για κάθε σειρά. Χρησιμοποιήθηκε η μέγιστη τιμή για κάθε σειρά δοκιμών δεδομένου ότι αυτή οδηγεί σε συντηρητική αντιμετώπιση του φαινομένου.



Διάγραμμα 2 : Γωνία πρόσπτωσης συναρτήσει του κάθετου συντελεστή αναπήδησης για κυβικά δοκίμια

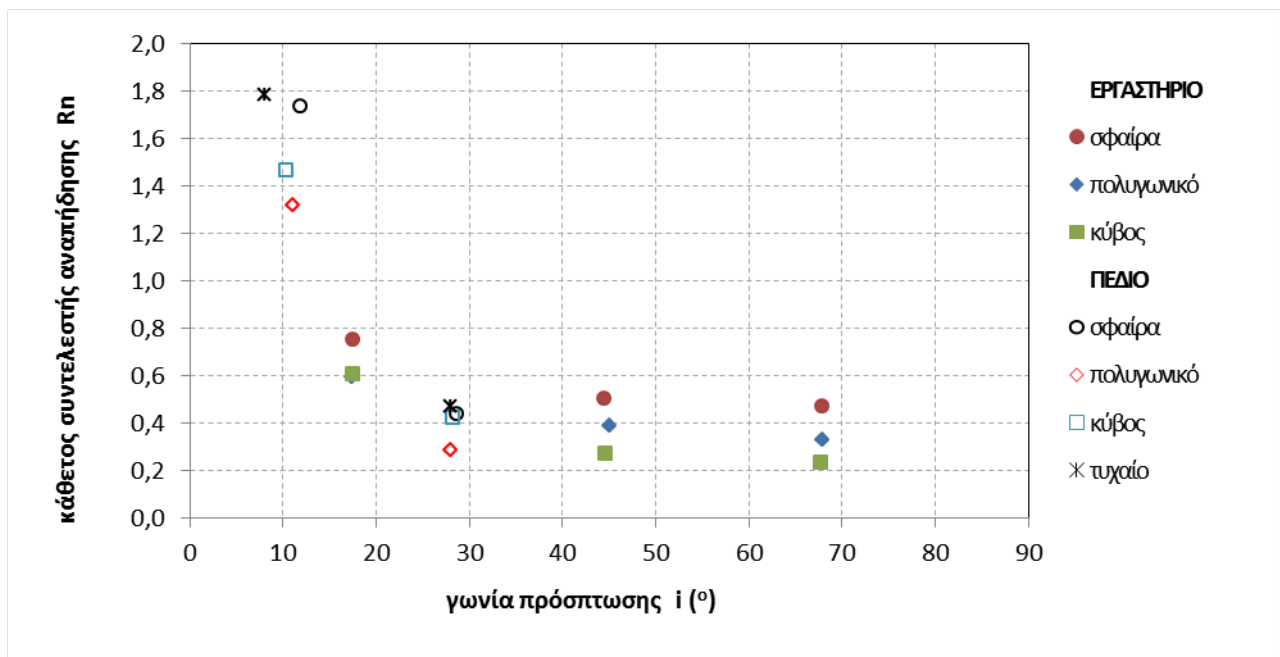


Διάγραμμα 3 : Γωνία πρόσπτωσης συναρτήσει του κάθετου συντελεστή αναπήδησης για σφαιρικά δοκίμια



Διάγραμμα 4 : Γωνία πρόσπτωσης συναρτήσει του κάθετου συντελεστή αναπήδησης για πολυγωνικά δοκίμια

Στο διάγραμμα 5 παρουσιάζονται για όλα τα δοκίμια που εξετάστηκαν ο μέσος όρος των τιμών για κάθε σειρά δοκιμών.



Διάγραμμα 5 : Γωνία πρόσπτωσης συναρτήσει των μέσων όρων των κάθετων συντελεστών αναπήδησης για όλα τα δοκίμια

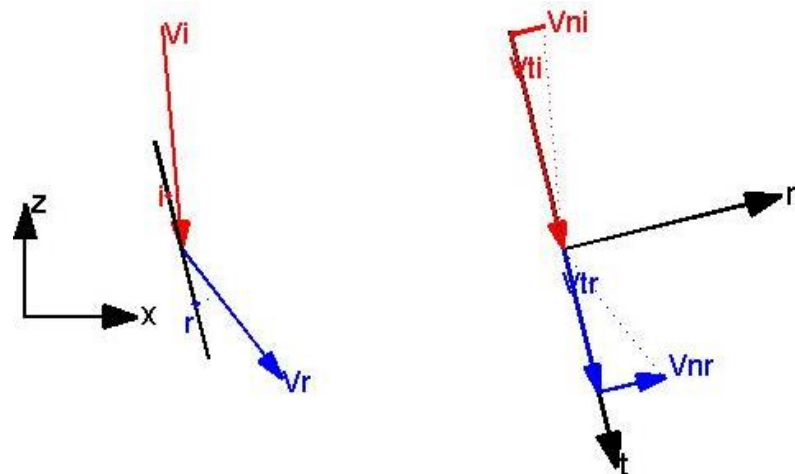
Βάσει των παραπάνω παρατηρούνται τα εξής:

- ❖ Ανεξαρτήτως σχήματος η διασπορά του κάθετου συντελεστή αναπήδησης μειώνεται με την αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης (ή ισοδύναμα τη μείωση της κλίσης του πρानούς).
- ❖ Ανεξαρτήτως σχήματος παρατηρείται εκθετική μείωση του κάθετου συντελεστή αναπήδησης, με την αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης.
- ❖ Στο πεδίο για κλίση πρानούς ίση με 75° ανεξαρτήτως σχήματος τεμάχους οι περισσότερες τιμές είναι άνω της μονάδας. Συγκεκριμένα, για κυβικά δοκίμια το 85%, για πολυγωνικά το 79% και για σφαιρικά το 100%. Αντιθέτως στην κλίση των 55° όλες οι τιμές των συντελεστών είναι κάτω από τη μονάδα.

Θεωρητικώς, όταν ο συντελεστής αναπήδησης R είναι ίσος με το μηδέν τότε θεωρείται ότι το βραχοτέμαχος ακινητοποιείται στην επιφάνεια του εδάφους χωρίς να αναπηδά εμφανίζοντας μία πλήρως πλαστική συμπεριφορά. Όταν ο συντελεστής είναι μικρότερος της μονάδας, τότε λέγεται ανελαστική κρούση, ενώ τιμή ίση με τη μονάδα αντιστοιχεί σε τελείως ελαστική κρούση χωρίς απώλεια ενέργειας (Goldsmith, 1964). Για το συνολικό συντελεστή αναπήδησης η μονάδα θεωρείται ως άνω όριο καθώς κατά τη κρούση παρατηρείται πάντοτε απώλεια ενέργειας. Όταν, όμως, αναλυθεί η συνολική ταχύτητα σε κάθετη και εφαπτομενική συνιστώσα, τότε πολλές φορές προκύπτουν για το κάθετο συντελεστή αναπήδησης τιμές μεγαλύτερες της μονάδας. Μέχρι πρόσφατα, τιμές πάνω από τη μονάδα δεν θεωρούνταν αποδεκτές.

Οι Azzoni *et al.* (1995) απέδωσαν τις υψηλές τιμές του κάθετου συντελεστή αναπήδησης στον συνδυασμό της περιστροφής και της αναπήδησης που υφίσταται το τεμάχιο. Παρόμοια προσέγγιση πραγματοποιήθηκε από τους Buzzi *et al.* (2012) Πιστεύεται, δηλαδή, ότι οι τιμές πάνω από την μονάδα οφείλονται στην αλληλεπίδραση της περιστροφικής ενέργειας, του σχήματος του τεμάχους και της μικρής γωνίας πρόσπτωσης (μικρότερη από 15 μοίρες). Επίσης, σημαντικό ρόλο στο καθορισμό των

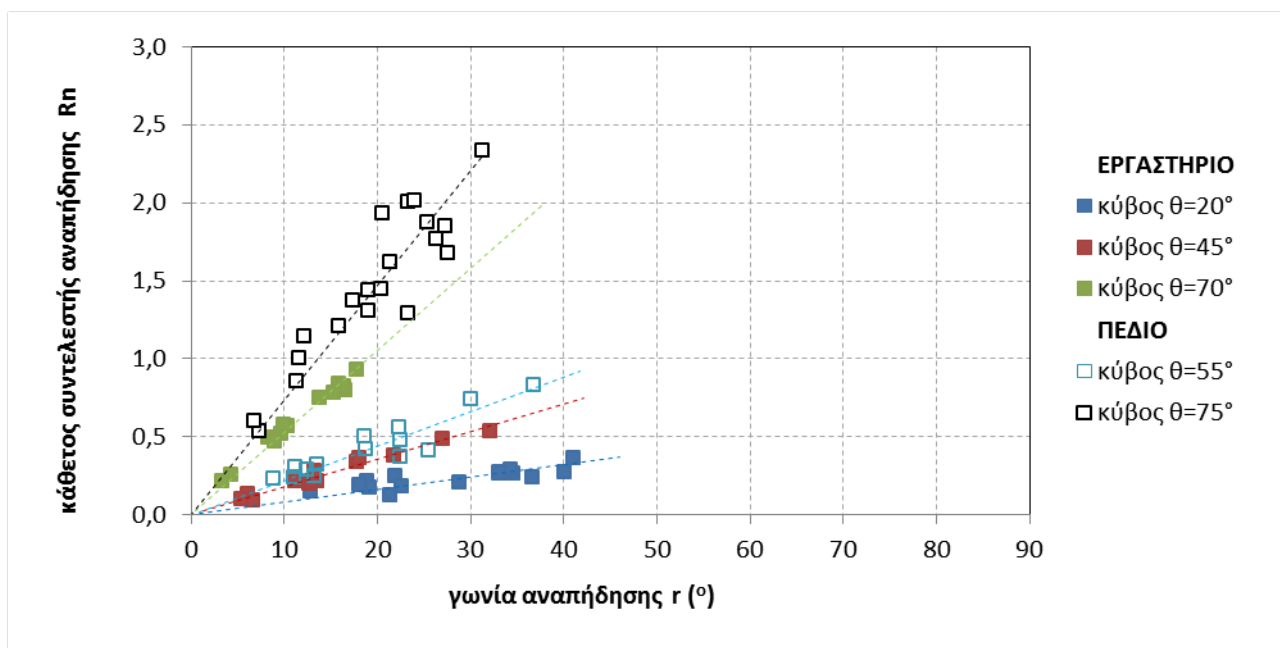
τιμών του R_n έχει η θέση του κέντρου της μάζας του τεμάχους κατά την πρόσκρουσή του ως προς το σημείο της πρόσπτωσης. Ο Paronuzzi (2009) θεώρησε, εκτός των άλλων, ότι τιμές πάνω από τη μονάδα οφείλονται στα χαρακτηριστικά της πλαγιάς, όπως η κλίση, η σκληρότητα και η τραχύτητα. Οι Bourgier *et al.* (2009) προέβλεψαν τιμές πάνω από τη μονάδα για μικρές γωνίες πρόσπτωσης χρησιμοποιώντας στοχαστικά μοντέλα ανάλυσης των τροχιών. Αντίστοιχες παρατηρήσεις υποδείχθηκαν και από άλλους ερευνητές (Spadari *et al.*, 2011; Asteriou *et al.*, 2012; Ushiro *et al.*, 2000).



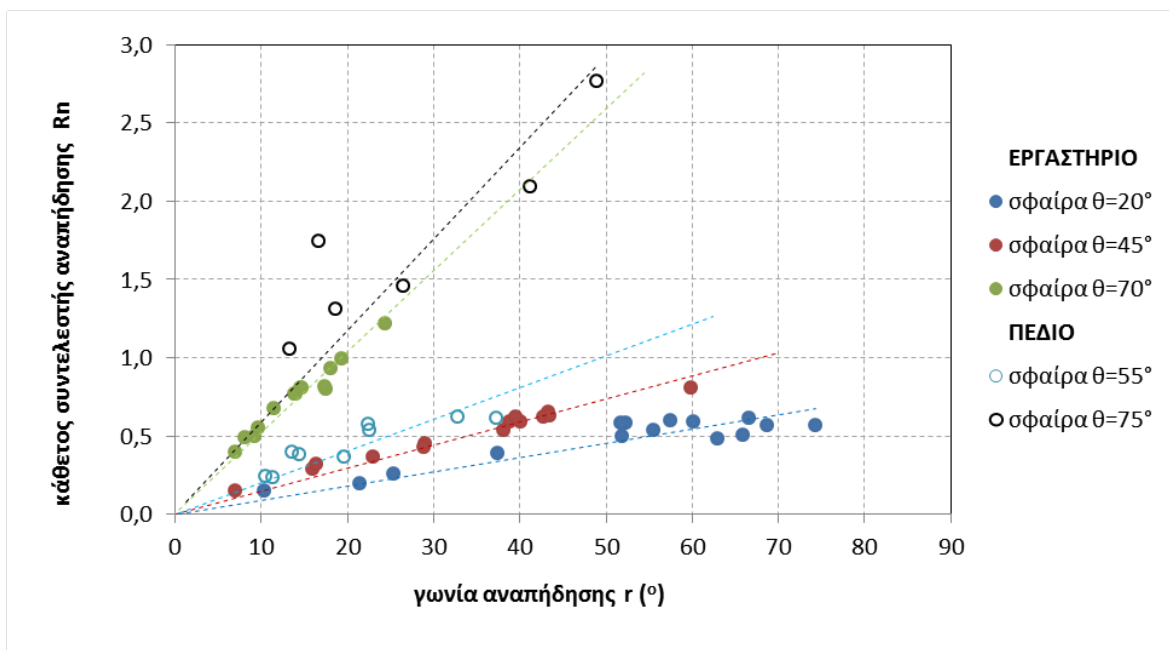
Εικόνα 72 : Αναπήδηση με γωνία αναπήδησης μεγαλύτερη της γωνίας πρόσπτωσης

7.2.2 Κάθετος συντελεστής αναπήδησης – Γωνία αναπήδησης

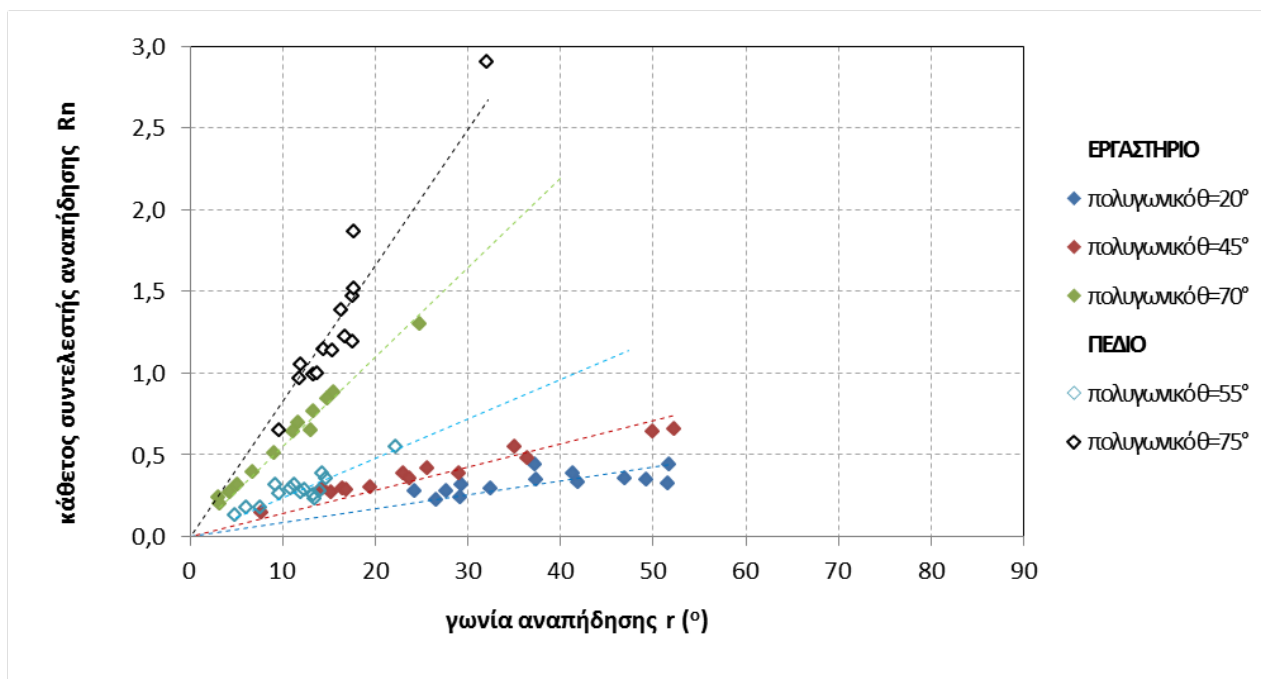
Στα διαγράμματα 6 έως 8 παρουσιάζονται για τα κανονικά σχήματα οι τιμές του κάθετου συντελεστή αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας αναπήδησης, για τις δοκιμές εργαστηρίου και πεδίου. Στα γραφήματα αυτά παρουσιάζεται επίσης η τάση που διέπει την συγκεκριμένη σχέση.



Διάγραμμα 6 : Γωνία αναπήδησης συναρτήσει του κάθετου συντελεστή αναπήδησης για κυβικά δοκίμια



Διάγραμμα 7 : Γωνία αναπήδησης συναρτήσει του κάθετου συντελεστή αναπήδησης για σφαιρικά δοκίμια



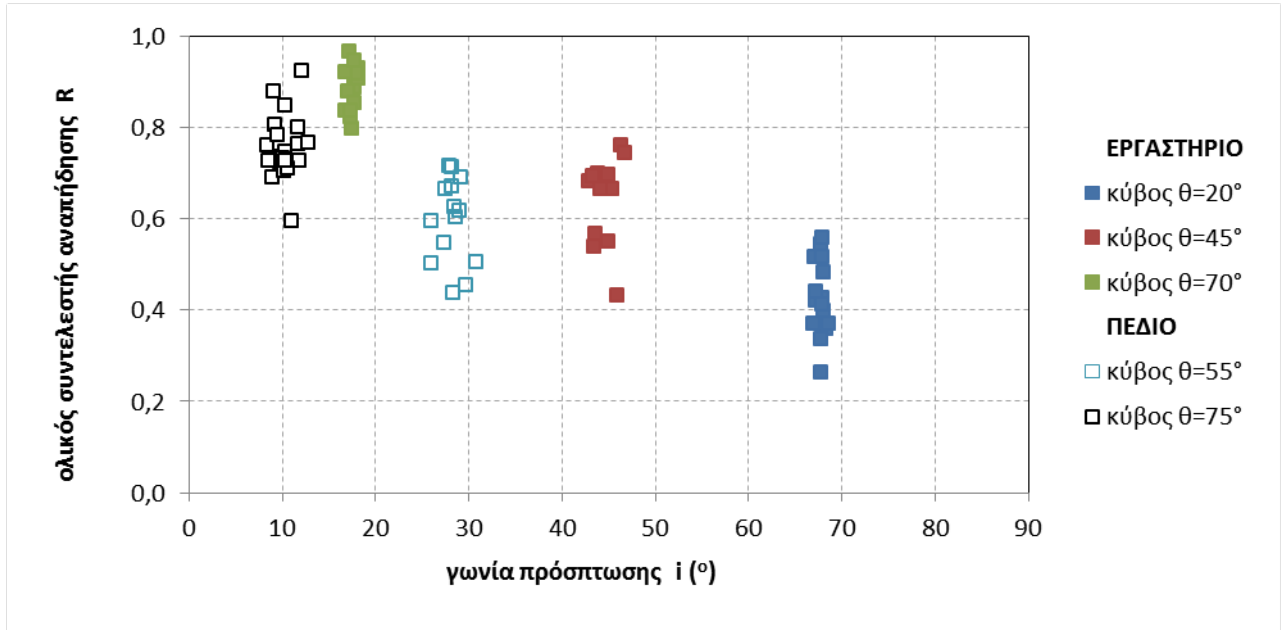
Διάγραμμα 8 : Γωνία αναπήδησης συναρτήσει του κάθετου συντελεστή αναπήδησης για πολυγωνικά δοκίμια

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούνται τα εξής:

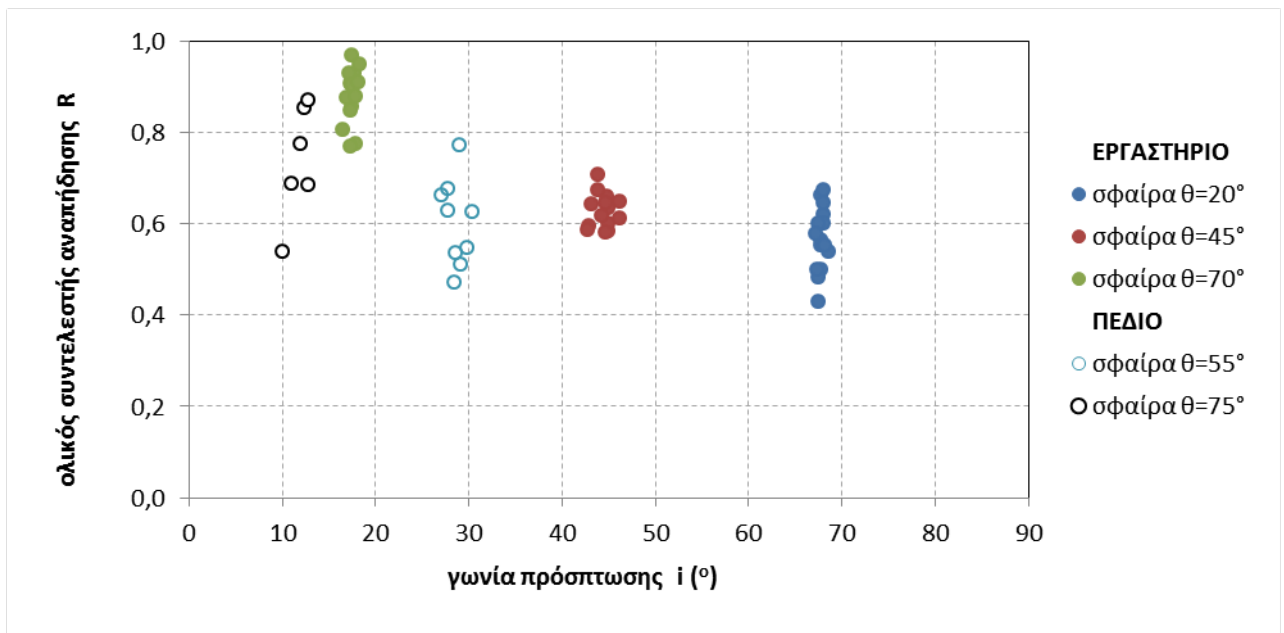
- ❖ Τόσο στο εργαστήριο όσο και στο πεδίο ανεξαρτήτου του σχήματος, όσο αυξάνεται η γωνία αναπήδησης τόσο αυξάνεται ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης.
- ❖ Όσο πιο σφαιρικό είναι το τέμαχος, τόσο μεγαλύτερη είναι η γωνία αναπήδησης.
- ❖ Υπάρχει πολύ καλή γραμμική συσχέτιση του κάθετου συντελεστή αναπήδησης με τη γωνία αναπήδησης.

7.3 Ολικός συντελεστής αναπήδησης – Γωνία πρόσπτωσης

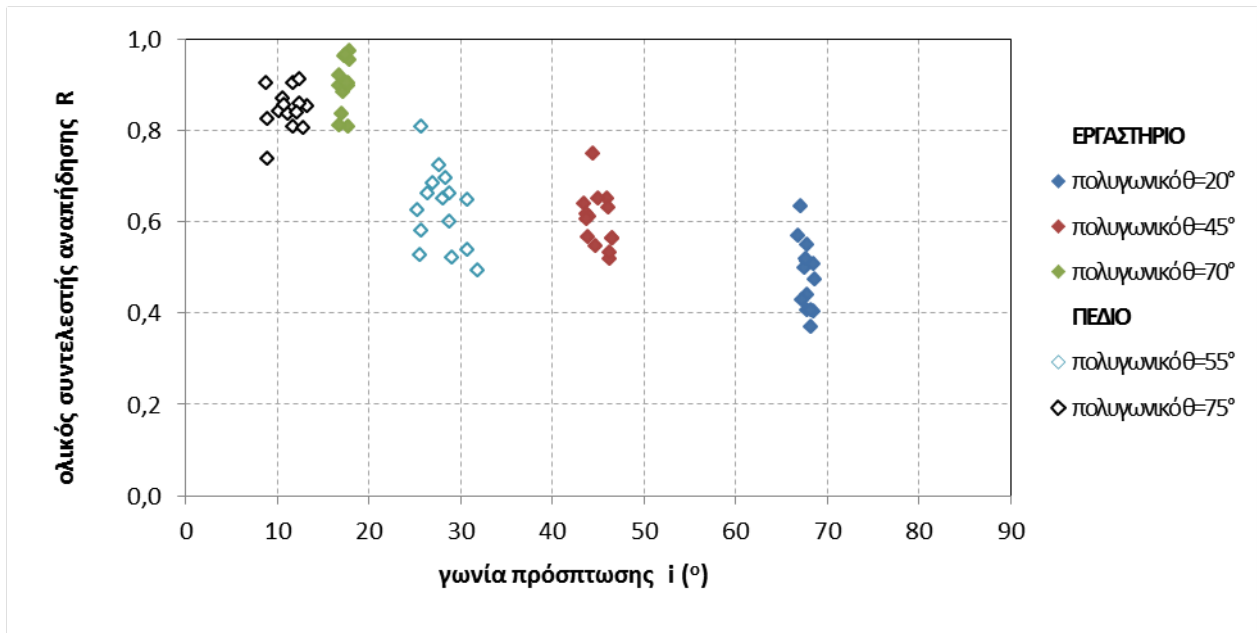
Στα διαγράμματα 9 έως 11 παρουσιάζονται για τα κανονικά σχήματα οι τιμές του ολικού συντελεστή αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης, για τις δοκιμές εργαστηρίου και πεδίου.



Διάγραμμα 9 : Γωνία πρόσπτωσης συναρτήσει του ολικού συντελεστή αναπήδησης για κυβικά δοκίμια

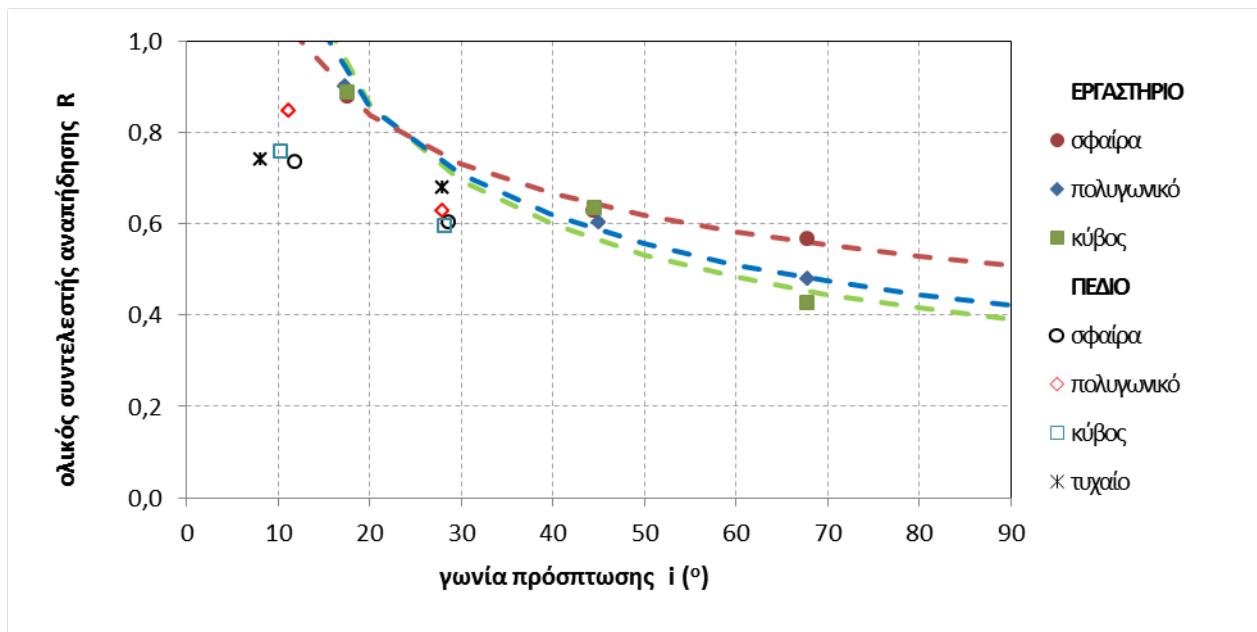


Διάγραμμα 10 : Γωνία πρόσπτωσης συναρτήσει του ολικού συντελεστή αναπήδησης για σφαιρικά δοκίμια



Διάγραμμα 11 : Γωνία πρόσπτωσης συναρτήσει του ολικού συντελεστή αναπήδησης για πολυγωνικά δοκίμια

Στο διάγραμμα 12 παρουσιάζονται για όλα τα δοκίμια που εξετάστηκαν ο μέσος όρος των τιμών για κάθε σειρά δοκιμών.



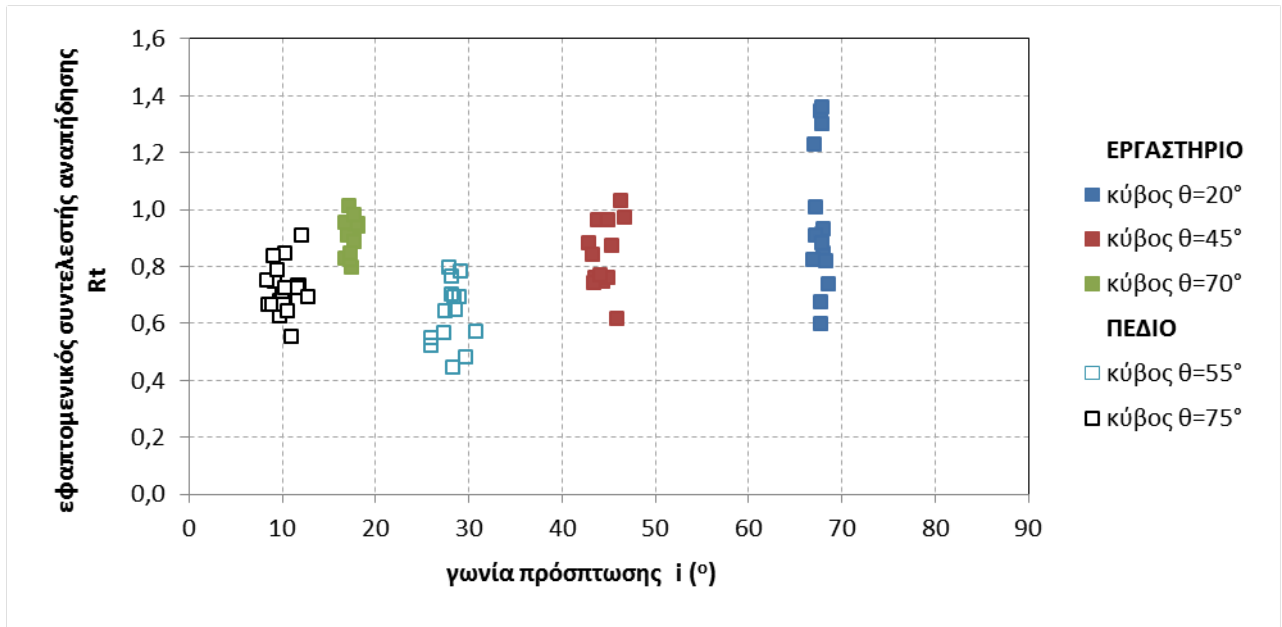
Διάγραμμα 12 : Γωνία πρόσπτωσης συναρτήσει των μέσων όρων των ολικών συντελεστών αναπήδησης για όλα τα δοκίμια

Βάσει των παραπάνω διαγραμμάτων παρατηρούνται τα εξής:

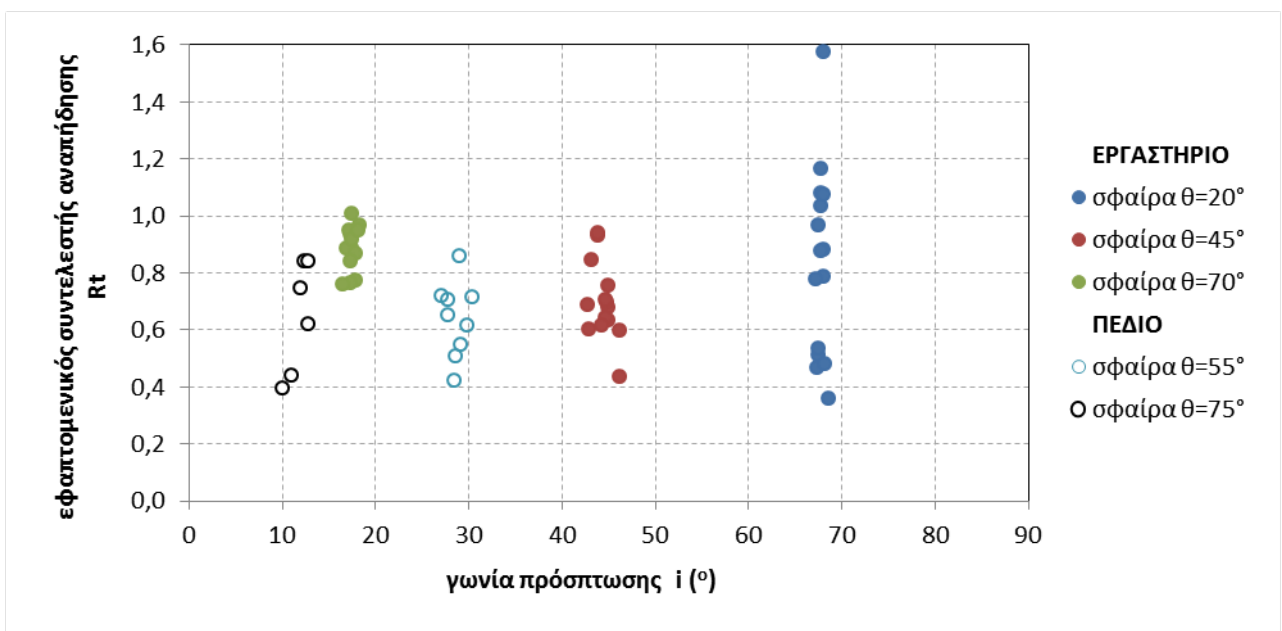
- ❖ Όπως και στις τιμές του κάθετου συντελεστή αναπήδησης, ανεξαρτήτως σχήματος παρατηρείται εκθετική μείωση του ολικού συντελεστή καθώς αυξάνεται η γωνία πρόσπτωσης.
- ❖ Ανεξαρτήτως σχήματος και κλίσης πρσανούς παρατηρείται μικρότερη διασπορά τιμών στις τιμές του ολικού συντελεστή αναπήδησης σε σύγκριση με αυτές του κάθετου συντελεστή αναπήδησης. Ως εκ τούτου η συσχέτιση του ολικού συντελεστή αναπήδησης με τη γωνία πρόσπτωσης είναι καλύτερη.
- ❖ Η τιμή του είναι πάντοτε μικρότερη της μονάδας, όπως είναι το θεωρητικά αναμενόμενο.

7.4 Εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης – Γωνία πρόσπτωσης

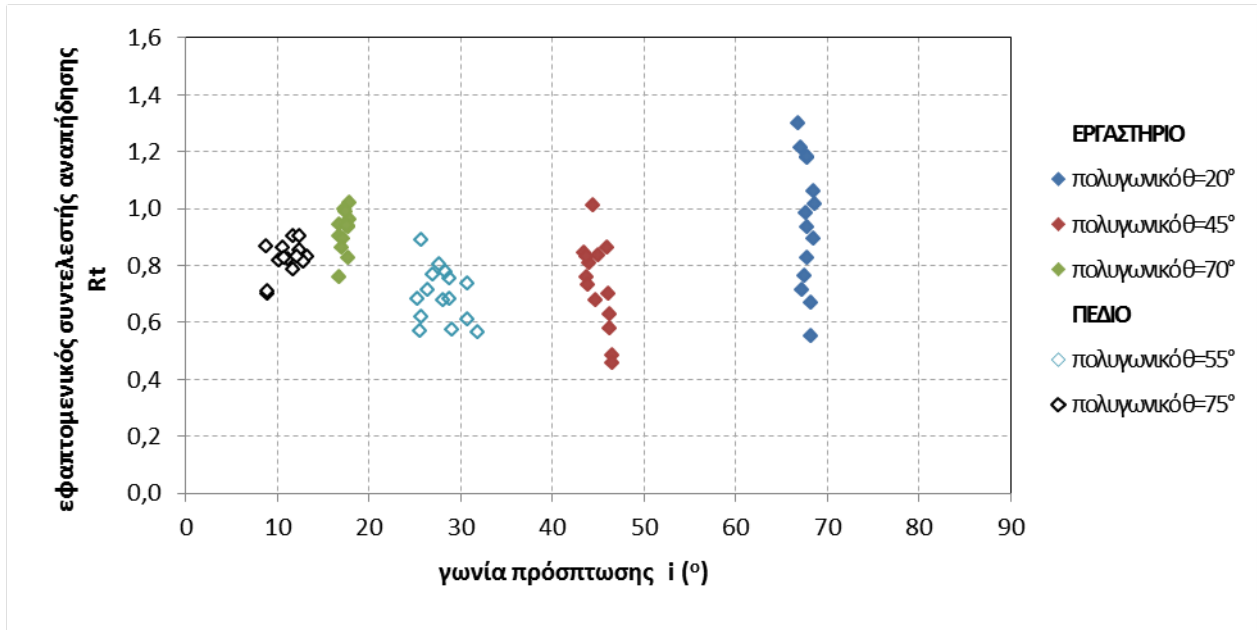
Στα διαγράμματα 13 έως 15 παρουσιάζονται για τα κανονικά σχήματα οι τιμές του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης, για τις δοκιμές εργαστηρίου και πεδίου.



Διάγραμμα 13 : Γωνία πρόσπτωσης συναρτήσει του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης για κυβικά δοκίμια

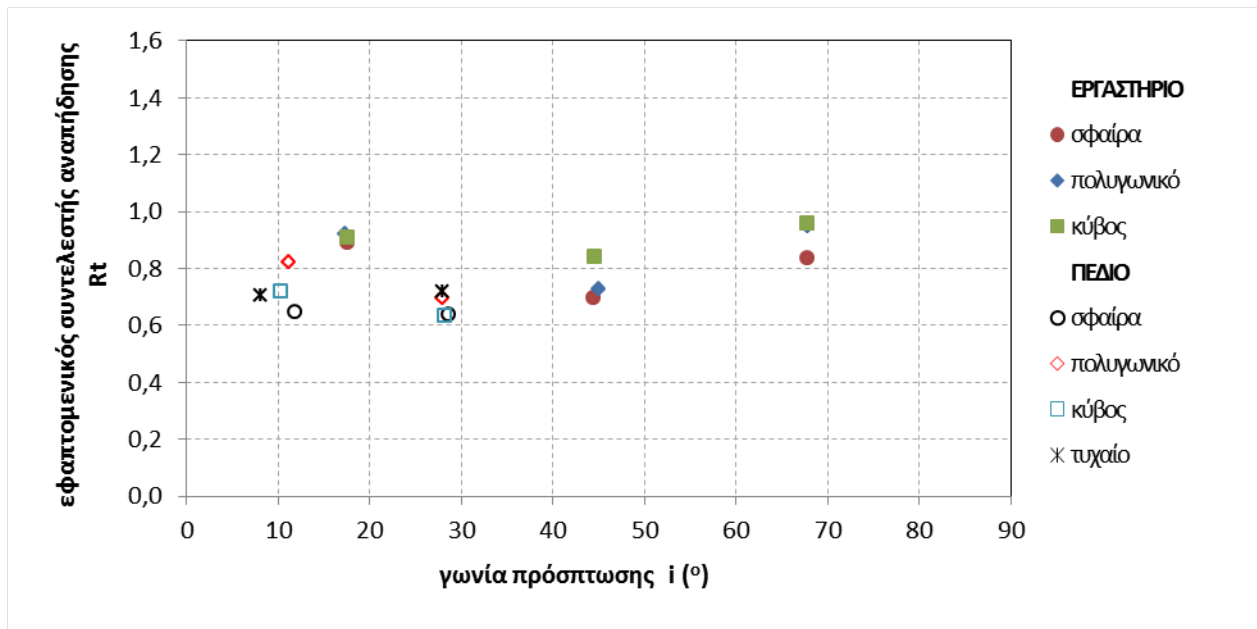


Διάγραμμα 14 : Γωνία πρόσπτωσης συναρτήσει του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης για σφαιρικά δοκίμια



Διάγραμμα 15 : Γωνία πρόσπτωσης συναρτήσε του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης για πολυγωνικά δοκίμια

Στο διάγραμμα 16 παρουσιάζονται για όλα τα δοκίμια που εξετάστηκαν ο μέσος όρος των τιμών για κάθε σειρά δοκιμών.



Διάγραμμα 16 : Γωνία πρόσπτωσης συναρτήσε των μέσων όρων των εφαπτομενικών συντελεστών αναπήδησης για όλα τα δοκίμια

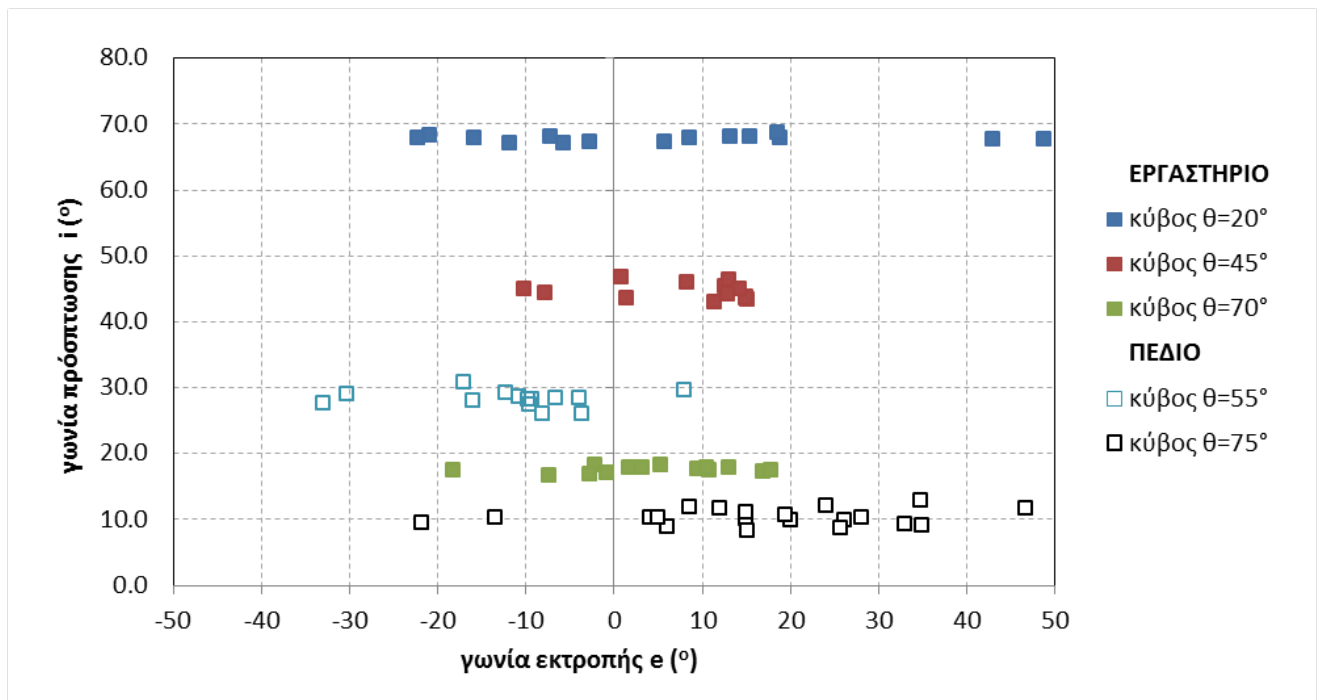


Προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις :

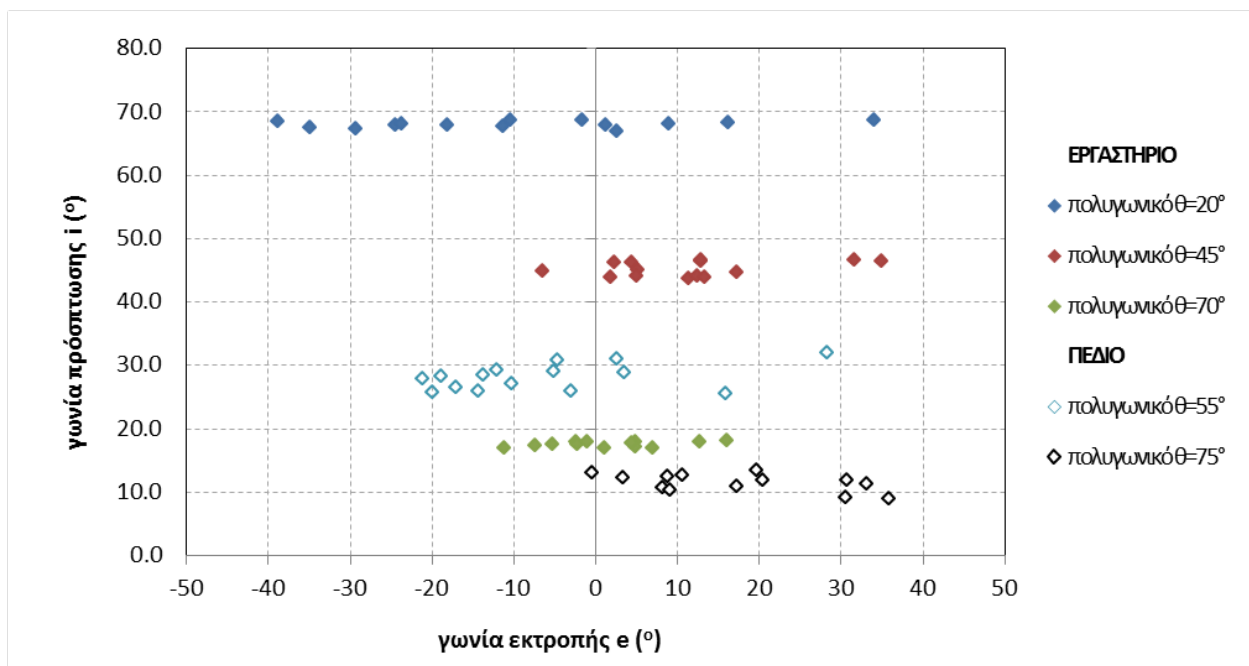
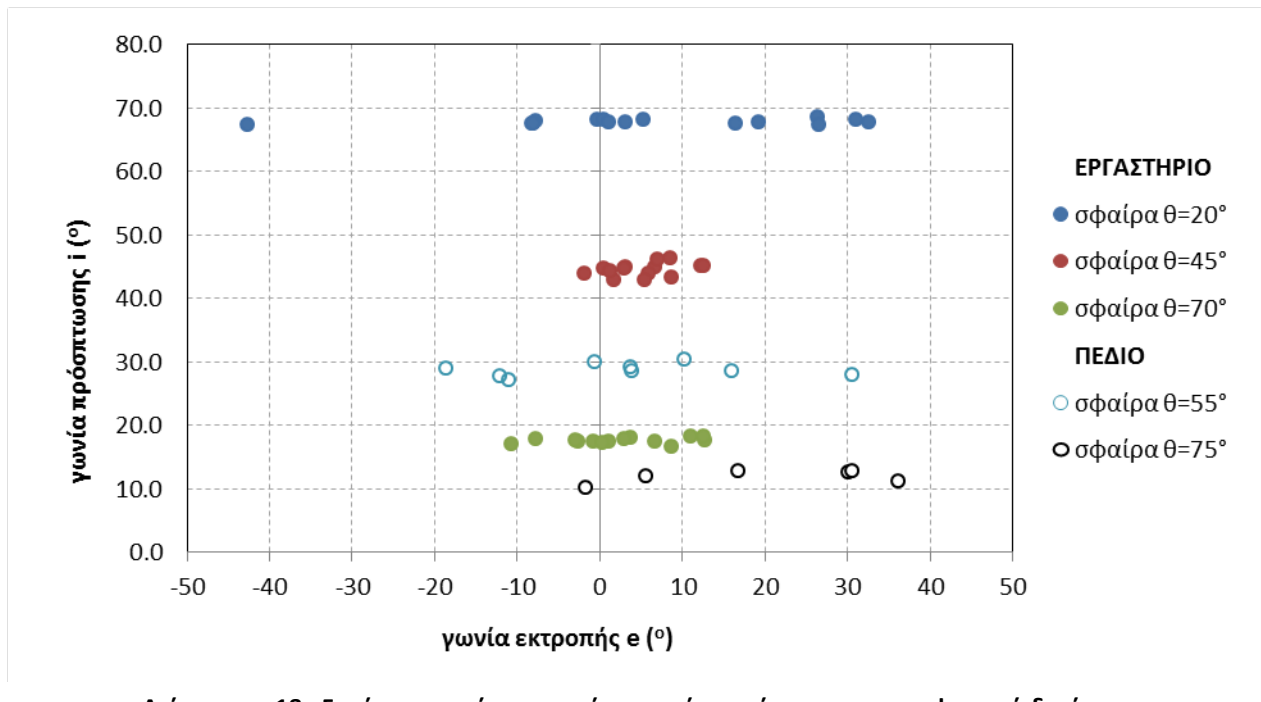
- ❖ Στο εργαστήριο, ανεξαρτήτως σχήματος, μεταξύ κλίσεων 30° έως 50° παρατηρούνται ελάχιστες τιμές για τον εφαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης.
- ❖ Στο εργαστήριο κυρίως, ανεξαρτήτως σχήματος, η διασπορά των τιμών του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης αυξάνεται με την αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης, αντίστροφα από την συμπεριφορά του κάθετου συντελεστή αναπήδησης.
- ❖ Στο πεδίο προσδιορίστηκαν μικρότερες τιμές του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης από ότι στο εργαστήριο.
- ❖ Στο εργαστήριο παρατηρούνται τιμές του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης άνω της μονάδας για μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης.
- ❖ Γενικά, με εξαίρεση τις μεγάλες τιμές που παρατηρούνται για τον εφαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης στις μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης, οι τιμές του μπορούν να θεωρηθούν σταθερές και ανεξάρτητες τις γωνίας πρόσπτωσης.

7.5 Γωνία πρόσπτωσης – Γωνία εκτροπής

Στα διαγράμματα 17 έως 19 παρουσιάζονται για τα κανονικά σχήματα οι τιμές της γωνίας πρόσπτωσης συναρτήσει της γωνίας εκτροπής, για τις δοκιμές εργαστηρίου και πεδίου.



Διάγραμμα 17 : Γωνία εκτροπής συναρτήσει γωνίας πρόσπτωσης για κυβικά δοκίμια



Βάσει των διαγραμμάτων αυτών προκύπτουν :

- ❖ Στο εργαστήριο, ανεξαρτήτως σχήματος, για κλίση πρανούς 20° η διασπορά της γωνίας εκτροπής είναι μεγαλύτερη από ότι για κλίσεις πρανούς 40° και 70° . Όσο αυξάνει η κλίση του πρανούς τόσο σημαντικότερη γίνεται η επίδραση της βαρύτητας που καθοδηγεί το τέμαχος, μειώνοντας έτσι την πλευρική εκτροπή.

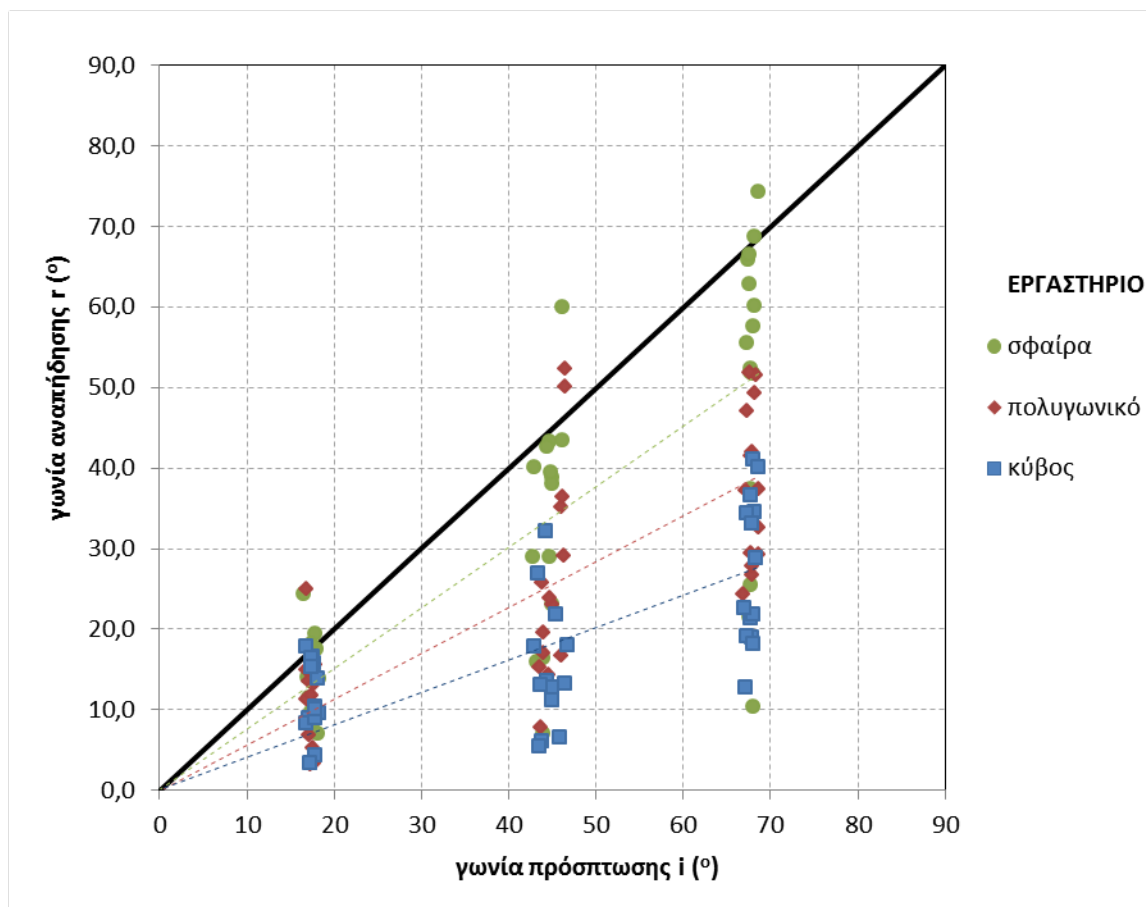


- ❖ Τόσο στο εργαστήριο όσο και στο πεδίο παρατηρήθηκε σε κάποιες σειρές δοκιμών εκτροπή προς συγκεκριμένη κατεύθυνση. Αυτό μπορεί να οφείλεται είτε λόγω τοπικής ανωμαλίας της επιφάνειας πρόσκρουσης είτε λόγω του τρόπου ρίψης των δοκιμών.

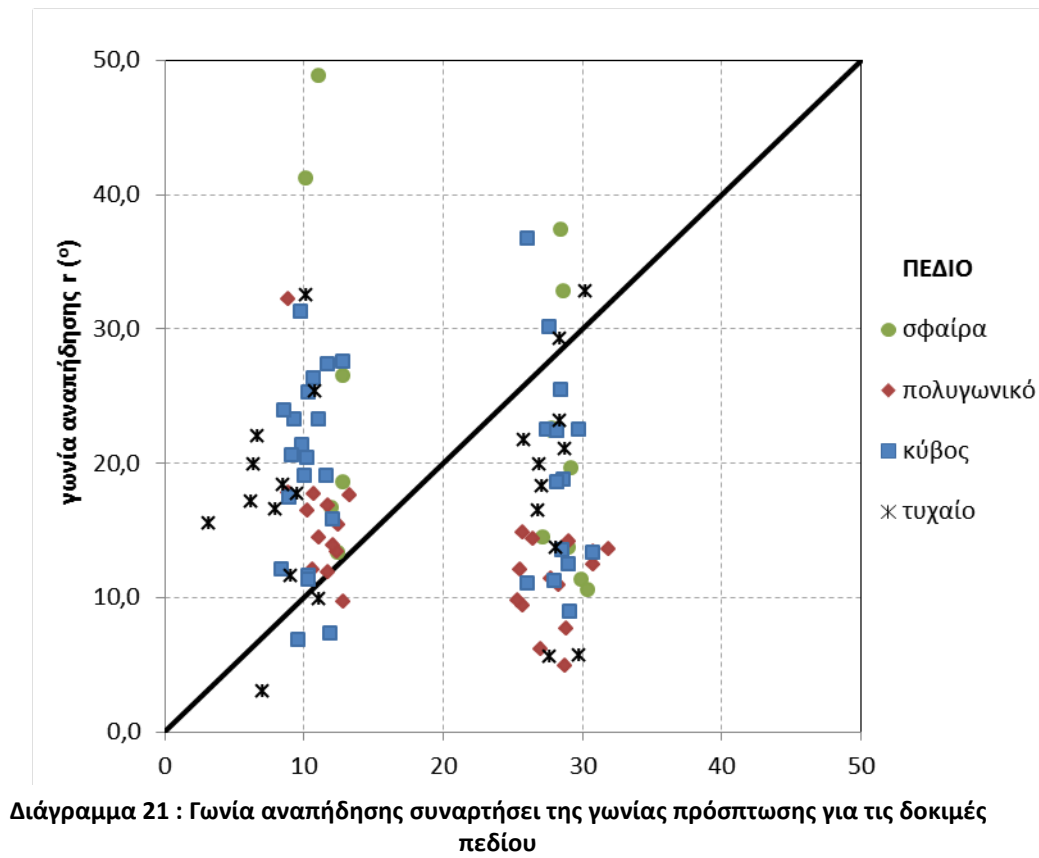
7.6 Γωνία αναπήδησης – Γωνία πρόσπτωσης

Στο διάγραμμα 20 παρουσιάζονται για τα κανονικά σχήματα οι τιμές της γωνίας αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης, για τις δοκιμές εργαστηρίου.

Στο διάγραμμα 21 παρουσιάζονται για τα κανονικά και τυχαία σχήματα οι τιμές της γωνίας πρόσπτωσης συναρτήσει της γωνίας εκτροπής, για τις δοκιμές πεδίου.



Διάγραμμα 20 : Γωνία αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης για τις δοκιμές εργαστηρίου



Από τα διαγράμματα αυτά προκύπτει ότι στις δοκιμές πεδίου παρατηρείται με μεγαλύτερη συχνότητα γωνία αναπήδησης μεγαλύτερη από τη γωνία πρόσπτωσης. Αυτό δικαιολογεί εν μέρει τη συχνότερη παρατήρηση τιμών του κάθετου συντελεστή αναπήδησης μεγαλύτερου της μονάδας για τις δοκιμές πεδίου σε σύγκριση με αυτές του εργαστηρίου.

8 Σύνοψη

8.1 Συμπεράσματα

Στη συνέχεια παρατίθενται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των εργαστηριακών και επιτόπου δοκιμών όπως παρουσιάζονται στα αντίστοιχα γραφήματα και αναφέρονται στην επίδραση του σχήματος και της κλίμακας. Δίνονται επίσης συγκεντρωτικοί πίνακες με τους συντελεστές αναπήδησης (μέση και μέγιστη τιμή) και γίνεται συγκριτική αξιολόγηση των συμπερασμάτων με αυτά άλλων ερευνητών.

Συντελεστές αναπήδησης ανεξάρτητα από το σχήμα

Η διασπορά του κάθετου συντελεστή αναπήδησης μειώνεται με την αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης (ή ισοδύναμα τη μείωση της κλίσης του πρηνούς). Επίσης, παρατηρείται μικρότερη διασπορά τιμών στις τιμές του ολικού συντελεστή αναπήδησης σε σύγκριση με τον κάθετο συντελεστή. Ως εκ τούτου, η συσχέτιση του ολικού συντελεστή αναπήδησης με τη γωνία πρόσπτωσης είναι καλύτερη. Στο εργαστήριο, η διασπορά των τιμών του εφαπτομενικού συντελεστή αυξάνεται με την αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης, αντίστροφα απ' ό τι παρατηρείται στη συμπεριφορά του κάθετου συντελεστή.

Με την αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης παρατηρείται εκθετική μείωση τόσο του κάθετου όσο και του ολικού συντελεστή αναπήδησης.

Για κλίση πρηνούς μεγαλύτερης περίπου των 75° η πλειονότητα των τιμών του κάθετου συντελεστή αναπήδησης είναι μεγαλύτερες της μονάδας, σε αντίθεση με την κλίση των 55° .

Στις εργαστηριακές δοκιμές για κλίσεις των επιφανειών πρόσπτωσης μεταξύ των 30° και 50° παρατηρούνται ελάχιστες τιμές για τον εφαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης.

Στο εργαστήριο, για κλίση της επιφάνειας πρόσπτωσης ίση με 20° , η διασπορά της γωνίας εκτροπής είναι μεγαλύτερη από ότι για τις μεγαλύτερες κλίσεις των 40° και 70° .

Τόσο στο εργαστήριο όσο και στο πεδίο, όσο αυξάνεται η γωνία αναπήδησης τόσο αυξάνεται και ο κάθετος συντελεστής, ενώ παράλληλα παρατηρείται καλή γραμμική συσχέτιση της γωνίας αναπήδησης με τον κάθετο συντελεστή.

Επίδραση σχήματος

Όσο πιο σφαιρική είναι η μορφή του τεμάχους, τόσο μεγαλύτερη είναι η γωνία αναπήδησης. Επίσης, ανεξάρτητα από τη γωνία πρόσπτωσης, όσο πιο σφαιρικό είναι το τέμαχος τόσο πιο μεγάλη είναι η διασπορά του κάθετου συντελεστή αναπήδησης, όπως παρατηρήθηκε στις εργαστηριακές δοκιμές.

Σύγκριση πεδίου και εργαστηρίου (αξιολόγηση κλίμακας)

Παρόλο που οι κλίσεις των επιφανειών πρόσπτωσης μεταξύ του πεδίου και του εργαστηρίου έχουν διαφορά από 5° έως κα 10° , οι τιμές του ολικού συντελεστή αναπήδησης έχουν το ίδιο εύρος και συγκλίνουν στις ίδιες τιμές. Αξίζει να σημειωθεί ότι στο εργαστήριο η κινητική ενέργεια των τεμαχών, κατά την πρόσκρουση, ήταν της τάξης των 0.4 J ενώ στο πεδίο των 172 J , δηλαδή κατά 400 φορές μεγαλύτερη. Συνεπώς συμπεραίνεται ότι αναφορικά με τους συντελεστές αναπήδησης η γεωμετρική ομοιότητα αρκεί για τον εύλογο προσδιορισμό τους.



Στο πεδίο σε σύγκριση με το εργαστήριο ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης εμφανίζει τιμές μεγαλύτερες της μονάδας για μικρές γωνίες πρόσπτωσης (κυρίως κάτω από 15°).

Και στο πεδίο και στο εργαστήριο υπάρχει καλή γραμμική συσχέτιση μεταξύ του κάθετου συντελεστή αναπήδησης και της γωνίας αναπήδησης. Επίσης, παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η γωνία αναπήδησης τόσο αυξάνεται και ο κάθετος συντελεστής.

Στο εργαστήριο σε σύγκριση με το πεδίο ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης εμφανίζει τιμές μεγαλύτερες της μονάδας, γεγονός το οποίο παρατηρείται κυρίως για μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης. Επίσης, παρατηρείται γωνία αναπήδησης μικρότερη από τη γωνία πρόσπτωσης, σε αντίθεση με το πεδίο, γεγονός το οποίο αιτιολογεί γιατί ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης είναι μεγαλύτερος από τη μονάδα.

Στο πεδίο παρατηρείται μεγαλύτερη εκτροπή απ'ότι στο εργαστήριο, γιατί οι συνθήκες είναι λιγότερο ελεγχόμενες και η επιφάνεια πρόσπτωσης παρουσιάζει μεγαλύτερη ανωμαλία (τραχύτητα μεγάλης κλίμακας).

Βάσει αυτών συμπεραίνεται ότι η προσέγγιση του φαινομένου με δοκιμές μικρής κλίμακας στο εργαστήριο, είναι ικανή για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων, την καλύτερη κατανόηση του πολύπλοκου φαινομένου της αναπήδησης, και τον προσδιορισμό χαρακτηριστικών τιμών για τους συντελεστές αναπήδησης, αντιπροσωπευτικών για την διαστασιολόγηση μέτρων αντιμετώπισης πραγματικών φαινομένων.

Συγκεντρωτικός πίνακας για όλους τους συντελεστές αναπήδησης

Παρακάτω παρουσιάζονται συγκεντρωτικοί πίνακες για όλους τους συντελεστές αναπήδησης και για τα 4 διαφορετικά σχήματα που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτέλεση των πειραμάτων τόσο στο εργαστήριο όσο και το πεδίο. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζεται ο αριθμός των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν σε κάθε κλίση θ (°) της επιφάνειας πρόσπτωσης, ο μέσος όρος και η μέγιστη τιμή των συντελεστών αναπήδησης.

Πίνακας 31 : Συντελεστές αναπήδησης για κυβικά δοκίμια

Κύβος	θ (°)	Αριθμός δοκιμών	Μέγεθος	R	Rn	Rt
Εργαστήριο	20°	15	Μέσος όρος	0,43	0,23	0,96
			Μέγιστη τιμή	0,56	0,36	1,36
	45°	13	Μέσος όρος	0,64	0,27	0,84
			Μέγιστη τιμή	0,76	0,53	1,03
	70°	14	Μέσος όρος	0,89	0,61	0,91
			Μέγιστη τιμή	0,97	0,93	1,01
Πεδίο	55°	14	Μέσος όρος	0,60	0,42	0,63
			Μέγιστη τιμή	0,72	0,83	0,80
	75°	20	Μέσος όρος	0,76	1,46	0,72
			Μέγιστη τιμή	0,92	2,33	0,91

Πίνακας 32 : Συντελεστές αναπήδησης για πολυγωνικά δοκίμια

Πολυγωνικό	θ (°)	Αριθμός δοκιμών	Μέγεθος	R	Rn	Rt
Εργαστήριο	20°	14	Μέσος όρος	0,48	0,33	0,95
			Μέγιστη τιμή	0,63	0,44	1,30
	45°	14	Μέσος όρος	0,60	0,39	0,73
			Μέγιστη τιμή	0,75	0,66	1,01
	70°	13	Μέσος όρος	0,90	0,59	0,92
			Μέγιστη τιμή	0,98	1,30	1,02
Πεδίο	55°	15	Μέσος όρος	0,63	0,29	0,69
			Μέγιστη τιμή	0,81	0,55	0,89
	75°	24	Μέσος όρος	0,85	1,32	0,82
			Μέγιστη τιμή	0,91	2,91	0,90

Πίνακας 33 : Συντελεστές αναπήδησης για σφαιρικά δοκίμια

Σφαίρα	θ (°)	Αριθμός δοκιμών	Μέγεθος	R	Rn	Rt
Εργαστήριο	20°	15	Μέσος όρος	0,57	0,47	0,84
			Μέγιστη τιμή	0,67	0,61	1,58
	45°	14	Μέσος όρος	0,63	0,50	0,70
			Μέγιστη τιμή	0,91	2,91	1,58
	70°	14	Μέσος όρος	0,88	0,75	0,89
			Μέγιστη τιμή	0,97	1,22	1,01
Πεδίο	55°	9	Μέσος όρος	0,60	0,44	0,64
			Μέγιστη τιμή	0,77	0,62	0,86
	75°	6	Μέσος όρος	0,74	1,74	0,65
			Μέγιστη τιμή	0,87	2,77	0,84

Πίνακας 34 : Συντελεστές αναπήδησης για τυχαία δοκίμια

Τυχαίο	θ ($^{\circ}$)	Αριθμός δοκιμών	Μέγεθος	R	Rn	Rt
Πεδίο	55 $^{\circ}$	11	Μέσος όρος	0,68	0,47	0,72
			Μέγιστη τιμή	0,81	0,75	0,84
	75 $^{\circ}$	12	Μέσος όρος	0,74	1,79	0,71
			Μέγιστη τιμή	0,94	3,19	0,90

Πίνακας 35 : Συντελεστές αναπήδησης για όλα τα σχήματα

	θ ($^{\circ}$)	Μέγεθος	R	Rn	Rt
Εργαστήριο	20 $^{\circ}$	Μέσος όρος	0,49	0,34	0,92
	45 $^{\circ}$	Μέσος όρος	0,62	0,39	0,76
	70 $^{\circ}$	Μέσος όρος	0,89	0,65	0,91
Πεδίο	55 $^{\circ}$	Μέσος όρος	0,63	0,41	0,67
	75 $^{\circ}$	Μέσος όρος	0,77	1,58	0,72

Συγκριτική αξιολόγηση με άλλους ερευνητές

Οι Broilli (1974), Gerber (1995), Buzzì και Spadari (2011) παρατήρησαν σε πειράματα πεδίου ότι σε μικρές γωνίες πρόσπτωσης (κάτω από 15 $^{\circ}$), η περιστροφική κίνηση που πραγματοποιείται λόγω πρόσκρουσης έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της κάθετης ταχύτητας με παράλληλη μείωση της εφαπτομενικής. Παράλληλα, παρατηρήθηκε, όπως και στα πειράματα της παρούσας διατριβής, ότι όσο πιο εφαπτομενική είναι η πρόσπτωση πάνω στην επιφάνεια, τόσο υψηλότερες ταχύτητες αναπήδησης παρατηρούνται, γεγονός το οποίο δικαιολογεί γιατί ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης είναι μεγαλύτερος της μονάδας. Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι οι Spadari et al. (2011) στα πειράματα που πραγματοποίησαν βρήκαν τιμή του κάθετου συντελεστή αναπήδησης ίση με 1,98.

Ο Habib (1977) πραγματοποιώντας πειράματα πεδίου παρατήρησε ότι ο ολικός συντελεστής αναπήδησης εξαρτάται και από το σχήμα αλλά και από τη γωνία πρόσπτωσης, γεγονός το οποίο επιβεβαιώνεται και από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής.

Οι Wu (1985) και Chau (1999) πραγματοποιώντας πειράματα εργαστηρίου παρατήρησαν ότι η αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης προκαλεί αύξηση του κάθετου συντελεστή αναπήδησης σε αντίθεση με τα δικά μας πειράματα.

Οι Wong (2000), Richards (2001), Cagnoli και Manga (2003) μελέτησαν την επίδραση του σχήματος πάνω στους συντελεστές αναπήδησης. Βρέθηκε ότι ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης μειώνεται με την μετάβαση από στρογγυλεμένο σε γωνιώδες τεμάχος. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι για δοκιμές ελεύθερης πτώσης σε κεκλιμένη επιφάνεια ότι ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης μειώνεται με την αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης, το οποίο επιβεβαιώνεται και από τα δικά μας πειράματα.

Οι Pfeiffer και Bowen (1989) εκτελώντας μια σειρά από δοκιμές παρατήρησαν ότι ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης επηρεάζεται περισσότερο συγκριτικά με τον εφαπτομενικό, ενώ οι Ushiro *et al.* (2000) ανέφεραν ότι δεν επηρεάζεται σημαντικά ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης από τις συνθήκες πρόσκρουσης.

Αξιολόγηση πειραματικής μεθοδολογίας

Η μέθοδος μέτρησης που χρησιμοποιήθηκε επέτρεψε την τρισδιάστατη καταγραφή της κίνησης του τεμάχους. Σε γενικές γραμμές, αν και ιδιαίτερα χρονοβόρα στην εφαρμογή της, η επεξεργασία των δοκιμών είναι σχετικά απλή. Η απόλυτη τιμή του σφάλματος δεν μπορεί να προσδιοριστεί, παραμένει όμως μικρότερη της ακρίβειας καταγραφής, που είναι το εικονοστοιχείο της φωτομηχανής, συνεπώς με την χρήση φωτωμηχανών υψηλής ανάλυσης το σφάλμα είναι πρακτικά αμελητέο.

Τα βασικά πλεονεκτήματα της νέας αυτής μεθόδου που αναπτύσσεται στο Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Βραχομηχανικής είναι:

- ❖ η δυνατότητα μέτρησης της περιστροφής των δοκιμών στο χώρο, και της συνεκτίμησής της στον υπολογισμό των συντελεστών αναπήδησης
- ❖ η δυνατότητα προσδιορισμού του ακριβή προσανατολισμού του τεμάχους κατά την κρούση, και άρα της μελέτης της επίδρασης αυτού
- ❖ η ευκολία πραγματοποίησης δοκιμών πεδίου, αφού δεν υπάρχει περιορισμός στην θέση εγκαταστάτης των φωτομηχανών. Με την μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενη μεθοδολογία, απαιτείται η φωτομηχάνη να είναι παράλληλη με το επίπεδο κίνησης των τεμαχών. Αυτό θέτει σημαντικούς περιορισμούς στις προσφερόμενες θέσεις διεξαγωγής πειραμάτων πεδίου, αφού σπάνια εντοπίζεται πρηνές που να ικανοποιεί αυτήν την απαίτηση.
- ❖ Η δυνατότητα μέτρησης της εκτροπής του τεμάχους, ως προς το επίπεδο κίνησης, εξ αιτίας της κρούσης.

8.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Για την παρούσα διπλωματική εργασία δημιουργήθηκε ένα πρόγραμμα ανάλυσης κίνησης σε ηλεκτρονικό υπολογιστή και προσδιορίστηκαν μέσω εργαστηριακών δοκιμών και πειραμάτων πεδίου κάποιες από τις παραμέτρους που επιδρούν στις καταπτώσεις βράχων.

Για μελλοντική έρευνα προτείνεται η εξέταση της επίδρασης της περιστροφικής κίνησης πάνω στους συντελεστές αναπήδησης. Επίσης, μπορεί να εξεταστεί και η επίδραση της μάζας στο φαινόμενο χρησιμοποιώντας δοκίμια με διαφορετικό μέγεθος. Το φαινόμενο μπορεί να μελετηθεί εκτός από βραχώδεις επιφάνειες πρόσπτωσης και σε εδαφικές, όπως η περίπτωση πρηνών που καλύπτονται από κορήματα ή ελλουβιακό μανδύα. Κρίνεται απαραίτητο να πραγματοποιηθούν δοκιμές παραβολικής ρίψης στο πεδίο και να γίνει συγκριτική αξιολόγηση με τις ήδη υπάρχουσες εργαστηριακές δοκιμές.



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

- Agliardi, F. and G. B. Crosta. "High Resolution Three-Dimensional Numerical Modelling of Rockfalls." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 40, no. 4 (2003): 455-471.
- Ansari, M. K., M. Ahmad, R. Singh and T. N. Singh. "Rockfall Hazard Assessment at Ajanta Cave, Aurangabad, Maharashtra, India." *Arabian Journal of Geosciences*, (2013): 1-8.
- Asteriou, P., H. Saroglou and G. Tsiambaos. "Geotechnical and Kinematic Parameters Affecting the Coefficients of Restitution for Rock Fall Analysis." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 54, no. 0 (2012): 103-113.
- Azzoni, A. and M. H. de Freitas. "Experimentally Gained Parameters, Decisive for Rock Fall Analysis." *Rock Mechanics and Rock Engineering* 28, no. 2 (1995): 111-124.
- Azzoni, A., P. P. Rossi, E. Drigo, G. P. Giani and A. Zaninetti. "In Situ Observation of Rockfall Analysis Parameters." *Landslides, Proceedings of the 6th International Symposium on Landslides in Christchurch 1*, (1992): 307-314.
- Bolin, H., C. Lide, P. Xuanming, L. Guanning, C. Xiaoting, D. Haogang and L. Tianci. "Assessment of the Risk of Rockfalls in Wu Gorge, Three Gorges, China." *Landslides* 7, no. 1 (2010): 1-11.
- Bourrier, Franck, Luuk Dorren, François Nicot, Frédéric Berger and Félix Darve. "Toward Objective Rockfall Trajectory Simulation Using a Stochastic Impact Model." *Geomorphology* 110, no. 3-4 (2009): 68-79.
- Bozzolo, D. and R. Pamini. "Simulation of Rock Falls Down a Valley Side." *Acta Mechanica* 63, no. 1-4 (1986): 113-130.
- Broili, L. "Relations between Scree Slope Morphometry and Dynamics of Accumulation Processes." *Rock Fall Dynamics and Protective Work Effectiveness* 90, (1977): 11-23.
- Buckingham, E. "Dimensional Analysis." *Phil. Mag.* 48, (1924): 141-145.
- Budetta, P. and A. Santo. "Morphostructural Evolution and Related Kinematics of Rockfalls in Campania (Southern Italy): A Case Study." *Engineering Geology* 36, no. 3-4 (1994): 197-210.
- Buzzi, O., A. Giacomini and M. Spadari. "Laboratory Investigation on High Values of Restitution Coefficients." *Rock Mechanics and Rock Engineering* 45, no. 1 (2012): 35-43.
- Cagnoli, B. and M. Manga. "Pumice-Pumice Collisions and the Effect of the Impact Angle." *Geophysical Research Letters* 30, no. 12 (2003): 38-1.
- Chan, Y. C., C. F. Chan and S. W. C. Au. "Design of a Boulder Fence in Hong Kong." *Rock engineering and excavation in an urban environment. Proc. conference, Hong Kong, 1986, (Institution of Mining & Metallurgy, London; IMM N.American Publications Center, Brookfield, VT), (1986): 87-96.*
- Chau, K. T., R. H. C. Wong, J. Liu, J. J. Wu and C. F. Lee. "Shape Effects on the Coefficient of Restitution During Rockfall Impacts." 541-544, 1999.
- Chau, K. T., R. H. C. Wong and J. J. Wu. "Coefficient of Restitution and Rotational Motions of Rockfall Impacts." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 39, no. 1 (2002): 69-77.



- Christen, M., P. Bartelt and U. Gruber. "Ramms - a Modelling System for Snow Avalanches." *Debris Flows and Rockfalls Based on IDL 4*, (2007): 289-292.
- Descoedres, F. and T. Zimmermann. "Three-Dimensional Dynamic Calculation of Rockfalls." *Proc. 6th Congress International Society for Rock Mechanics, Montreal, 1987. Vol. 1*, (1987): 337-342.
- Dhakal, S., N. P. Bhandary, R. Yatabe and N. Kinoshita. "Experimental, Numerical and Analytical Modelling of a Newly Developed Rockfall Protective Cable-Net Structure." *Natural Hazards and Earth System Science* 11, no. 12 (2011): 3197-3212.
- Dorren, L. K. A. , F. Berger and U. S. Putterli. "Real-Size Experiments and 3-D Simulation of Rockfall on Forested and Non-Forested Slopes." *Natural Hazards and Earth System Science* 6, no. 1 (2006): 145-153.
- Dorren, L. K. A., B. Maier, U. S. Putterli and A. C. Seijmonsbergen. "Combining Field and Modelling Techniques to Assess Rockfall Dynamics on a Protection Forest Hillslope in the European Alps." *Geomorphology* 57, no. 3-4 (2004): 151-167.
- Dorren, L. K. A. and A. C. Seijmonsbergen. "Comparison of Three Gis-Based Models for Predicting Rockfall Runout Zones at a Regional Scale." *Geomorphology* 56, no. 1-2 (2003): 49-64.
- Fornaro, M., D. Peila and M. Nebbia. "Block Falls on Rock Slopes-Application of a Numerical Simulation Program to Some Real Cases." *Int. Congress IAEG*, (1990): 2173-2180.
- Gerber, W. "Guideline for the Approval of Rockfall Protection Kits." *Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL) and the Swiss Federal Research Institute*, (2001).
- Giacomini, A., O. Buzzi, B. Renard and G. P. Giani. "Experimental Studies on Fragmentation of Rock Falls on Impact with Rock Surfaces." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 46, no. 4 (2009): 708-715.
- Giacomini, A., K. Thoeni, C. Lambert, S. Booth and S. W. Sloan. "Experimental Study on Rockfall Drapery Systems for Open Pit Highwalls." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 56, no. 0 (2012): 171-181.
- Giani, G. P. *Rock Slope Stability Analysis*, 1992.
- Giani, G. P., A. Giacomini, M. Migliazza and A. Segalini. "Experimental and Theoretical Studies to Improve Rock Fall Analysis and Protection Work Design." *Rock Mechanics and Rock Engineering* 37, no. 5 (2004): 369-389.
- Glover, J., A. Volkwein, F. Dufour, M. Denk and A. Roth. "Rockfall Attenuator and Hybrid Drape Systems - Design and Testing Considerations." *Third Euro-Mediterranean Symposium on Advances in Geomaterials and Structures*, (2010): 379-384.
- Goldsmith, W. "Impact: The Theory and Physical Behavior of Colliding Solids." *Edward Arnold, London*, (1960).
- Gottardi, G. and L. Govoni. "Full-Scale Modelling of Falling Rock Protection Barriers." *Rock Mechanics and Rock Engineering* 43, no. 3 (2010): 261-274.
- Guzzetti, Fausto, Giovanni Crosta, Riccardo Detti and Federico Agliardi. "Stone: A Computer Program for the Three-Dimensional Simulation of Rock-Falls." *Computers & Geosciences* 28, no. 9 (2002): 1079-1093.
- Habib, P. "Note Sur Le Rebondissement Des Blocs Rocheux." *Proceedings of the Meeting on Rockfall Dynamics and Protective Works Effectiveness*, (1977): 25-38.



- Heidenreich, B. "Small- and Half-Scale Experimental Studies of Rockfall Impacts on Sandy Slopes." Ph.D Thesis, (2004).
- Hoek, E. "Rockfall: A Computer Program for Prediction Rockfall Trajectories." *ISRM News J* 2, (1987): 4-16.
- Hoek, E., "Analysis of Rockfall Hazards".
- Hongey, Chen, Chen Rong-Her and Huang Tsan-Hwei. "An Application of an Analytical Model to a Slope Subject to Rockfalls." *Bulletin - Association of Engineering Geologists* 31, no. 4 (1994): 447-458.
- Hungr, O. and S. G. Evans. "Engineering Evaluation of Fragmental Rockfall Hazards." *Landslides. Proc. 5th symposium, Lausanne, 1988. Vol. 1, (1988): 685-690.*
- Kamijo, A., S. Onda, H. Masuya and Y. Tanaka. "Fundamental Test on Restitution Coefficient and Frictional Coefficient of Rock Fall." *5th Symposium on Impact Problems in Civil Engineering, (2000): 83-86.*
- Kobayashi, Y., E. L. Harp and T. Kagawa. "Simulation of Rockfalls Triggered by Earthquakes." *Rock Mechanics and Rock Engineering* 23, no. 1 (1990): 1-20.
- Labieuse, V. and F. Descoeurdes. "Possibilities and Difficulties in Predicting Rockfall Trajectories." *Joint Japan-Swiss Scientific Seminar on Impact Load by Rock Falls and Design of Protection Structures, (1999): 29-36.*
- Labieuse, V. and B. Heidenreich. "Half-Scale Experimental Study of Rockfall Impacts on Sandy Slopes." *Natural Hazards and Earth System Science* 9, no. 6 (2009): 1981-1993.
- Lan, Hengxing, C. Derek Martin and C. H. Lim. "Rockfall Analyst: A Gis Extension for Three-Dimensional and Spatially Distributed Rockfall Hazard Modeling." *Computers & Geosciences* 33, no. 2 (2007): 262-279.
- Muthunthan, B., S. Shu, N. Sasiharan, O. Al Hattamleh, T. Badger, S. Lowell and J. Duffy. "Analysis and Design of Wiremesh/Cable Net Slope Protection [Online]." *Research Report WARD, (2005).*
- Nicot, F., M. Gay and J. M. Tacnet. "Interaction between a Snow Mantel and a Flexible Structure: A New Method to Design Avalanche Nets." *Cold Regions Science and Technology* 34, no. 2 (2002): 67-84.
- Pfeiffer, T. J. and T. D. Bowen. "Computer Simulation of Rockfalls." *Bulletin - Association of Engineering Geologists* 26, no. 1 (1989): 135-146.
- Pierson, L. A., S. A. Davis and R. Van Vickie. "Rockfall Hazard Rating System Implementation Manual." *Rockfall Hazard Rating System Implementation Manual, (1990).*
- Pratt, V. "Direct Least-Squares Fitting of Algebraic Surface." *Computer Graphics (ACM)* 21, no. 4 (1987): 145-152.
- Rammer, W., M. Brauner, L. Dorren, F. Berger and M. Lexer. "Validation of an Integrated 3d Forest - Rockfall Model." *Geophys. Res. Abstr* 9, (2007): 04634.
- Richards, L. R. "Rockfall Protection: A Review of Current Analytical and Design Methods." *Proc. II Ciclo di Conferenze di Meccanica e Ingegneria Delle Rocce* 11, (1988): 1-13.
- Richards, L. R., B. Peng and D. H. Bell. "Laboratory and Field Evaluation of the Normal Coefficient of Restitution for Rocks." *Proceedings of Proc. ISRM Regional Symposium EUROCK2001, (2001): 149-155.*



- Ritchie, A. M. "Evaluation of Rockfall and Its Control." Highway Research Record 17, no. 17 (1963): 13-28.
- Robotham, M. E., H. Wang and G. Walton. "Assessment of Risk from Rockfall from Active and Abandoned Quarry Slopes." Transactions - Institution of Mining & Metallurgy, Stion A 104, no. Jan-April (1995): A25-A33.
- Rochet, L. "Development of Numerical Models for the Analysis of Propagation of Rock-Falls." (1987): 479-484.
- Ronco, C., C. Oggeri and D. Peila. "Design of Reinforced Ground Embankments Used for Rockfall Protection." Natural Hazards and Earth System Science 9, no. 4 (2009): 1189-1199.
- Saroglou, H., V. Marinos, P. Marinos and G. Tsiambaos. "Rockfall Hazard and Risk Assessment: An Example from a High Promontory at the Historical Site of Monemvasia, Greece." Natural Hazards and Earth System Science 12, no. 6: 1823-1836.
- Scioldo, G. "User Guide Isomap & Rotomap - 3d Surface Modelling and Rockfall Analysis." Geo&Soft International, (2006).
- Spadari, M., A. Giacomini, O. Buzzi, S. Fityus and G. P. Giani. "In Situ Rockfall Testing in New South Wales, Australia." International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 49, no. 0 (2012): 84-93.
- Spang, R. M. "Protection against Rockfall-Stepchild in the Design of Rock Slopes." 6 Int. Congress on Rock Mechanics, (1987): 551-557.
- Spang, R. M. and R. W. Rautenstrauch. "Empirical and Mathematical Approaches to Rockfall Protection and Their Practical Applications." Landslides. Proc. 5th symposium, Lausanne, 1988. Vol. 2, (1988): 1237-1243.
- Statham, I. "A Scree Slope Rockfall Model." Earth Surface Processes 1, (1976): 43-62.
- Stevens, W. "Rockfall: A Tool for Probabilistic Analysis, Design of Remedial Measures and Prediction of Rockfalls." RocFall: A Tool for Probabilistic Analysis, Design of Remedial Measures and Prediction of Rockfalls, (1998).
- Stronge, W. J. "Rigid Body Collisions with Friction." Proc. R. Soc. Lond. 431, (1990): 169-181.
- Tajima, T., K. Maegawa, M. Iwasaki, K. Shinohara and K. Kawakami. "Evaluation of Pocket-Type Rock Net by Full-Scale Tests." Proc. of 33rd IABSE Symposium, (2009): 8.
- Thommen, R. A. "Testing of Various Types of Rockfall Flexible Wire Rope Mitigation Barrier: An Overview of Testing to Date." 59th Highway Geology Symposium, Santa Fe, (2008).
- Topal, T., M. Akin and U. A. Ozden. "Assessment of Rockfall Hazard around Afyon Castle, Turkey." Environmental Geology 53, no. 1 (2007): 191-200.
- Turner, R., J. D. Duffy and J. P. Turner. "Post Foundations for Flexible Rockfall Fences." Proc. 60th Highway Geology Symposium, (2009).
- Urciuoli, G. "Sperimentazione Sulla Caduta Di Blocchi Lungo Un Pendio Nella Formazione Calcareao-Dolomitica Della Penisola Sor- Rentina." Proc. Convengo Cartografia e Monitoraggio Dei Movimenti Franosi, (1988): 35-54.
- Ushiro, T., S. Shinohara, K. Tanida and N. Yagi. "A Study on the Motion of Rockfalls on Slopes." Proceedings of the 5th Symposium on Impact Problems in Civil Engineering, (2000): 91-96.



- Varnes, D. J. "Slope Movement Types and Processes." Transportation Board, National Academy of Sciences, Special Report 176, (1978): 11-33.
- Volkwein, A., K. Schellenberg, V. Labiouse, F. Agliardi, F. Berger, F. Bourrier, L. K. A. Dorren, W. Gerber and M. Jaboyedoff. "Rockfall Characterisation and Structural Protection - a Review." Natural Hazards and Earth System Science 11, no. 9 (2011): 2617-2651.
- Wienberg, N., H. Weber and M. Toniolo. "Testing of Flexible Barriers - Behind the Guideline." Swiss Fed. Research Inst. WSL, (2008): 114-116.
- Woltjer, M., W. Rammer, M. Brauner, R. Seidl, G. M. J. Mohren and M. J. Lexer. "Coupling a 3d Patch Model and a Rockfall Module to Assess Rockfall Protection in Mountain Forests." Journal of Environmental Management 87, no. 3 (2008): 373-388.
- Wong, R. H. C., K. W. Ho and K. T. Chau. "Shape and Mechanical Properties of Slope Material Effects on the Coefficient of Restitution of Rockfall Study." Proc. Fourth North Am. Rock Mech. Symp., (2000): 507-514.
- Wu, Shie-Shin. "Rockfall Evaluation by Computer Simulation." Transportation Research Record, no. 1031 (1985): 1-5.
- Wyllie, D. C. and N. I. Norrish. "Stabilization of Rock Slopes." Special Report - National Research Council, Transportation Research Board 247, (1996): 474-504.
- Yang, M., T. Fukawa, Y. Ohnishi, S. Nishiyama, S. Miki, Y. Hirakawa and S. Mori. "The Application of 3-Dimensional Dda with a Spherical Rigid Block for Rockfall Simulation." International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 41, no. SUPPL. 1 (2004): 2B 25 1-6.
- Yoshida, H. "Movement of Boulders on Slope and Its Simulation, Recent Studies on Rockfall Control in Japan." Tech. Rep, (1998).

Ελληνική Βιβλιογραφία

- Αστερίου, Π., Ευθυμίου, Β., 'Διερεύνηση χαρακτηριστικών τροχιάς καταπτώσεων σε βραχώδη πρανή- Επίδραση κινηματικών παραμέτρων', (2011).
- Γιόκαρη, Σ., 'Καταπτώσεις βράχων-Πειραματική διερεύνηση επίδρασης χαρακτηριστικών της επιφάνειας πρόσπτωσης', (2013).
- Κουλούρη, Ι., 'Εκτίμηση επικινδυνότητας βραχωδών πρανών-Παραδείγματα από τον ελλαδικό χώρο', (2011).
- Σακελλαρίου, Μ., Κοζάνης, Σ., Γουλάκος, Σ. 'Το πρόβλημα των καταπτώσεων βραχοτεμαχών και η αντιμετώπιση του σε συγκοινωνιακά έργα'. Πρακτικά 1ου πανελληνίου συνεδρίου οδοποιίας, (1995).
- Μπεκρή, Ε., 'Εκτίμηση Γεωτεχνικών Παραμέτρων για Καταπτώσεις Βραχών', Διπλωματική Εργασία. Ε.Μ.Π., (2010).
- Σαρόγλου, Ι.Χ., Μπεκρή, Ε., Τσιαμπάος, Γ. 'Προσδιορισμός Κρίσιμων Παραμέτρων Γεωλογικών Σχηματισμών για την Προσομοίωση της Πτώσης Βραχωδών Τεμαχών σε Πρανή'. 6ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής. Βόλος, (2010).



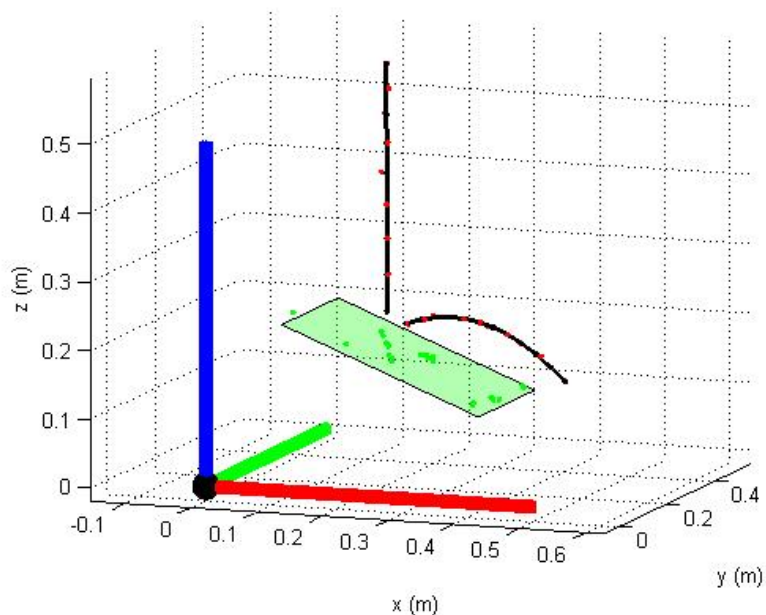


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ
ΚΥΒΙΚΟ ΔΟΚΙΜΙΟ
ΚΛΙΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ: 20°

α/α	V_i (m/s)	V_r (m/s)	$V_{n,i}$ (m/s)	$V_{t,i}$ (m/s)	$V_{n,r}$ (m/s)	$V_{t,r}$ (m/s)	R	R _n	R _t	e (°)	i (°)	r (°)
1	3.25	1.30	-3.01	1.21	0.80	1.02	0.40	0.26	0.84	13.2	68.1	34.6
2	3.37	1.21	-3.13	1.24	0.65	1.02	0.36	0.21	0.82	-20.9	68.3	28.7
3	3.33	0.87	-3.06	1.31	0.39	0.78	0.26	0.13	0.60	48.8	67.8	21.3
4	3.30	1.40	-3.05	1.24	0.83	1.13	0.43	0.27	0.91	8.6	67.9	33.1
5	3.21	1.66	-2.94	1.30	0.45	1.60	0.52	0.15	1.23	-11.8	67.1	12.8
6	3.25	1.77	-3.01	1.22	0.65	1.65	0.54	0.22	1.35	18.9	67.8	18.9
7	3.24	1.81	-3.01	1.21	0.75	1.65	0.56	0.25	1.36	-22.3	68.0	21.9
8	3.13	1.51	-2.90	1.17	1.05	1.09	0.48	0.36	0.93	-7.2	68.0	41.0
9	3.24	1.36	-2.99	1.25	0.52	1.26	0.42	0.17	1.01	-2.7	67.2	19.1
10	3.19	1.07	-2.96	1.21	0.70	0.81	0.34	0.24	0.67	43.0	67.8	36.7
11	3.26	1.21	-3.03	1.18	0.83	0.87	0.37	0.27	0.74	18.5	68.7	40.1
12	3.29	1.45	-3.03	1.27	0.88	1.15	0.44	0.29	0.91	5.8	67.3	34.4
13	3.23	1.33	-2.99	1.21	0.79	1.07	0.41	0.26	0.88	-15.9	67.9	33.1
14	3.31	1.23	-3.02	1.34	0.55	1.10	0.37	0.18	0.82	-5.7	67.0	22.6
15	3.25	1.68	-3.01	1.22	0.58	1.58	0.52	0.19	1.30	15.5	68.0	18.1

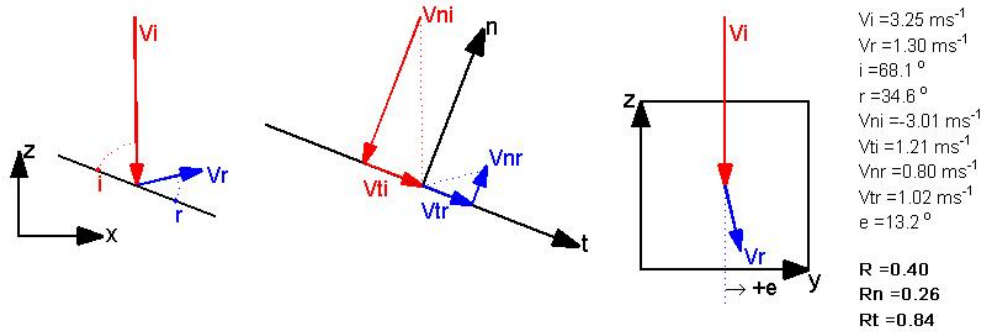


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

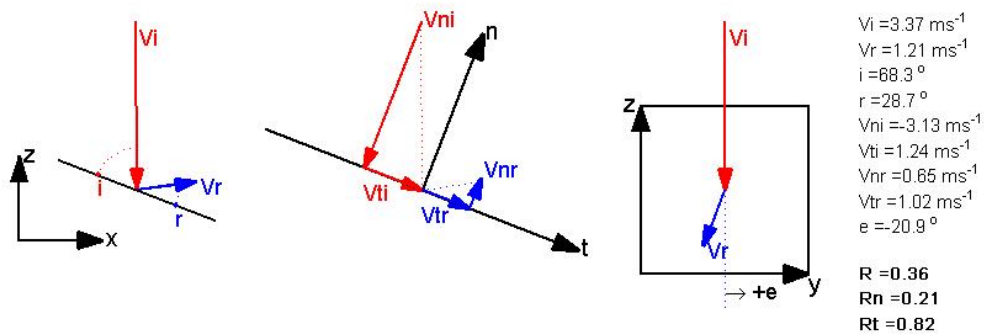


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

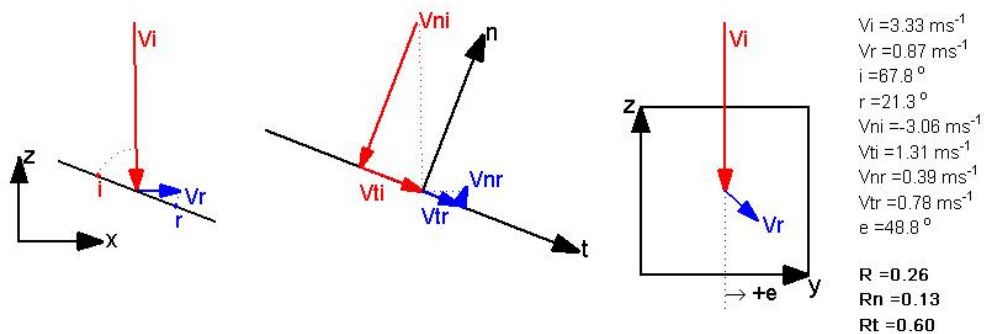
C-L-20-1



C-L-20-2



C-L-20-3

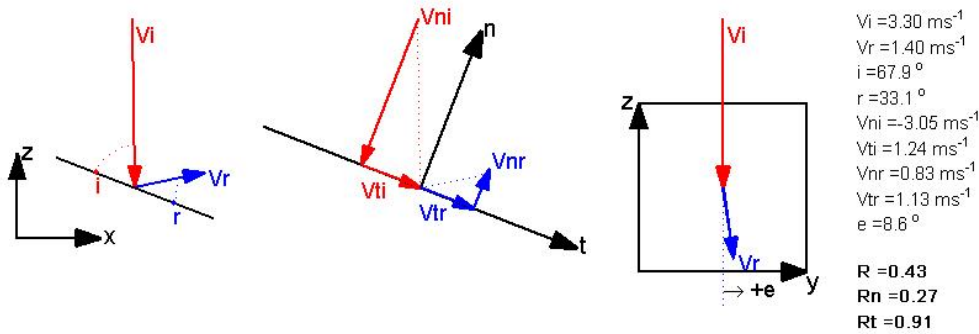


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

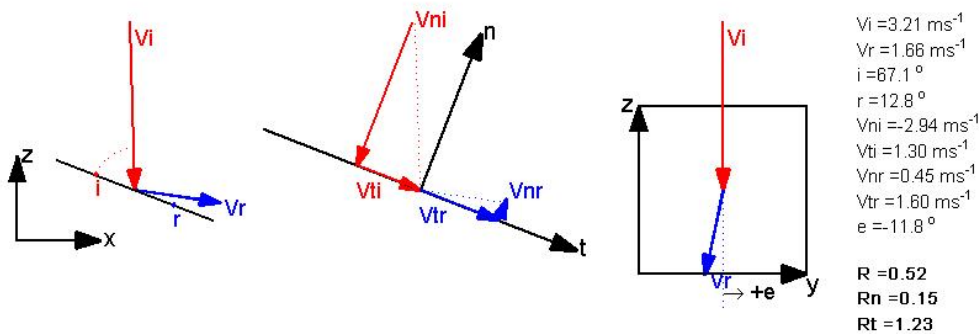


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

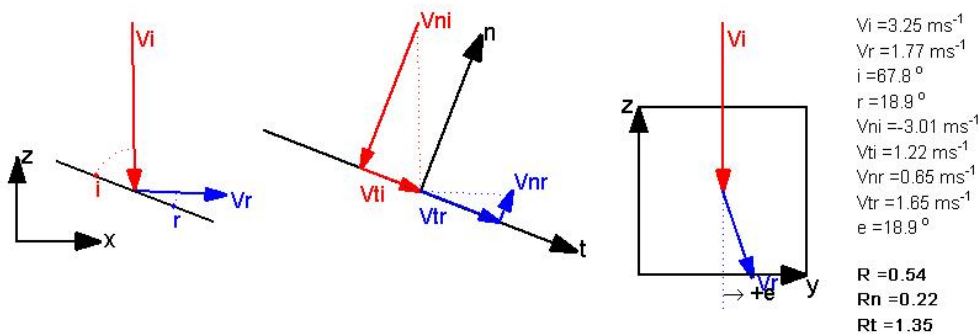
C-L-20-4



C-L-20-5



C-L-20-6

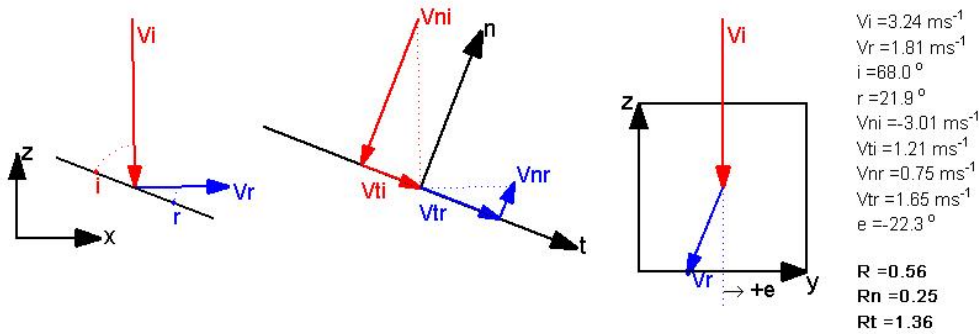


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

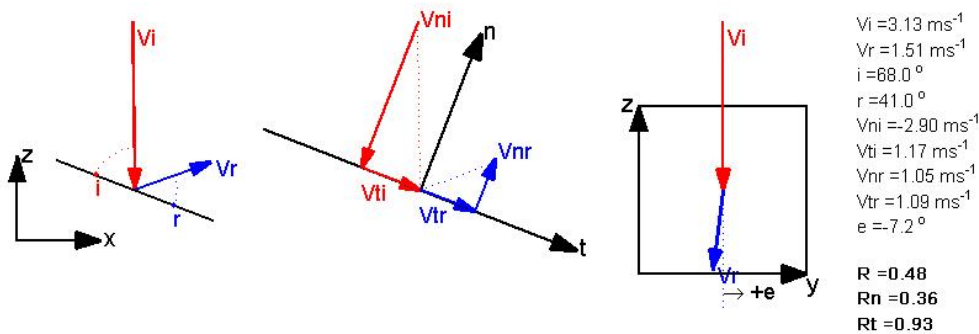


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

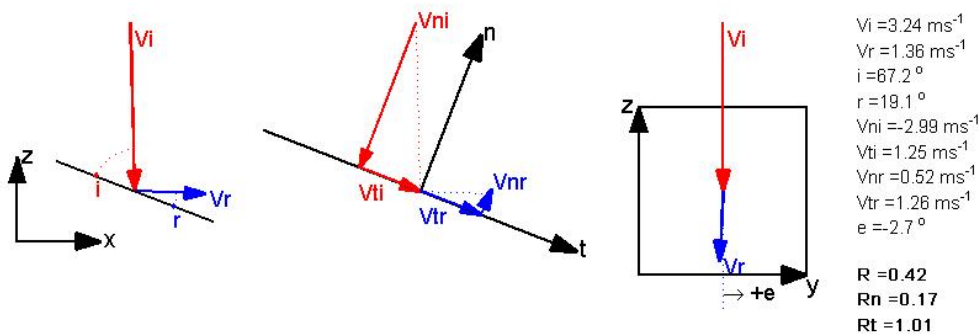
C-L-20-7



C-L-20-8



C-L-20-9

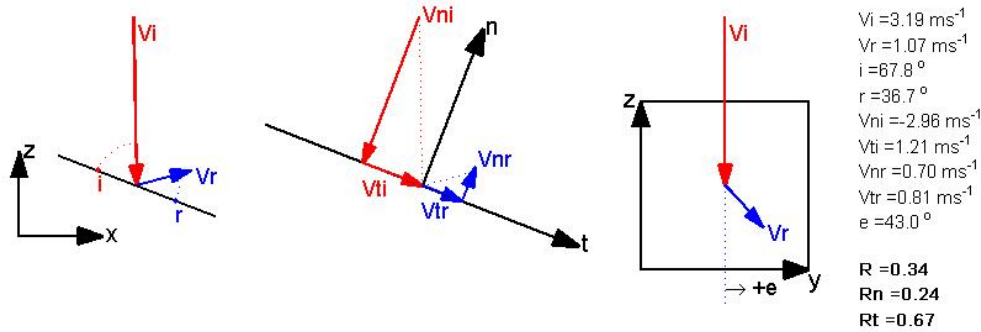


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

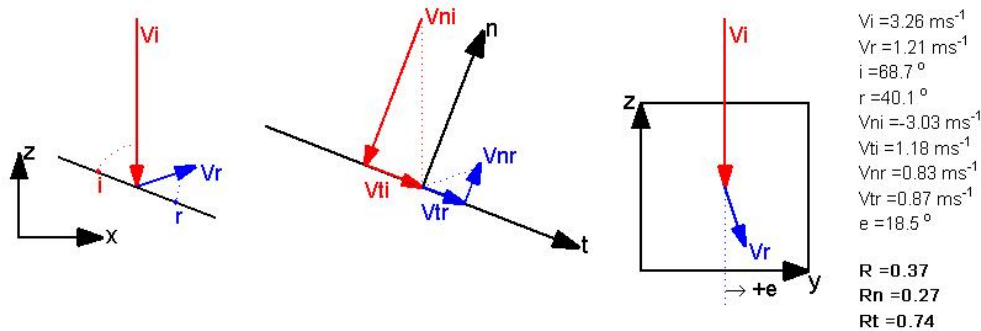


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

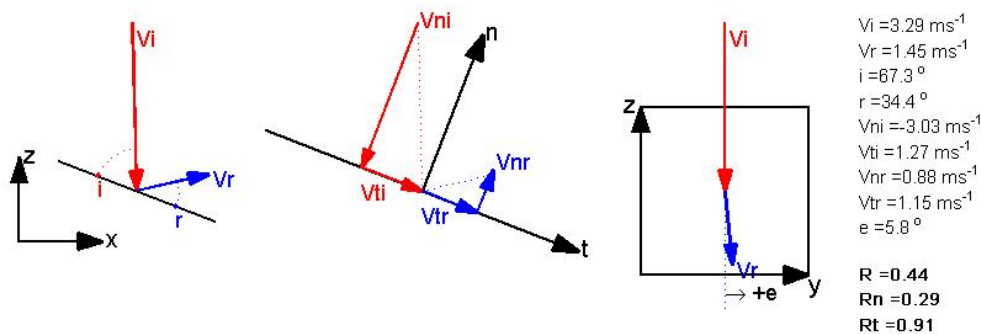
C-L-20-10



C-L-20-11



C-L-20-12

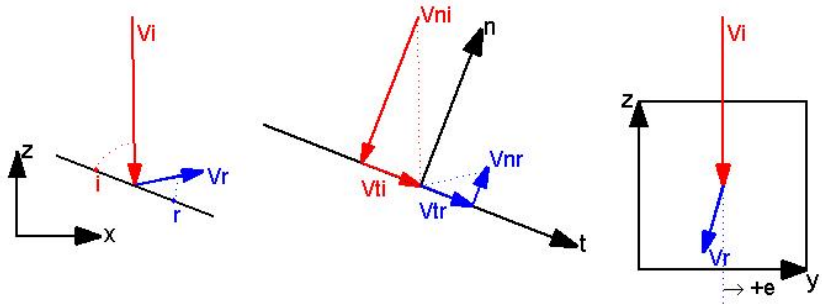


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ



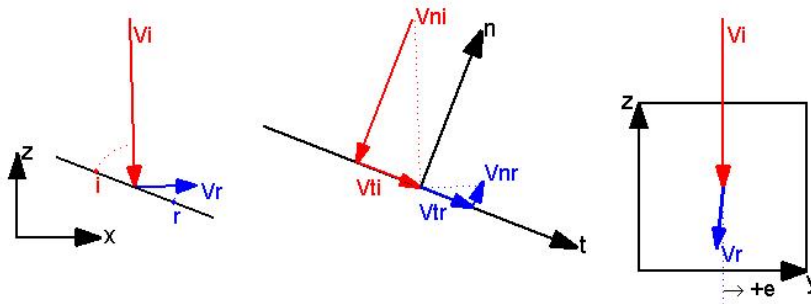
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

C-L-20-13



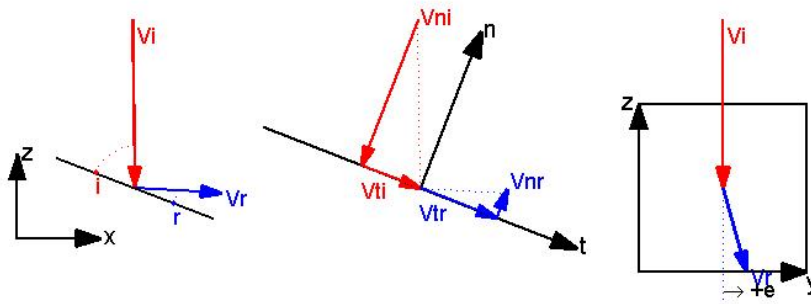
$V_i = 3.23 \text{ ms}^{-1}$
 $V_r = 1.33 \text{ ms}^{-1}$
 $i = 67.9^\circ$
 $r = 33.1^\circ$
 $V_{ni} = -2.99 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{ti} = 1.21 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{nr} = 0.78 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{tr} = 1.07 \text{ ms}^{-1}$
 $e = -15.9^\circ$
 $R = 0.41$
 $R_n = 0.26$
 $R_t = 0.88$

C-L-20-14



$V_i = 3.31 \text{ ms}^{-1}$
 $V_r = 1.23 \text{ ms}^{-1}$
 $i = 67.0^\circ$
 $r = 22.6^\circ$
 $V_{ni} = -3.02 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{ti} = 1.34 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{nr} = 0.55 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{tr} = 1.10 \text{ ms}^{-1}$
 $e = -5.7^\circ$
 $R = 0.37$
 $R_n = 0.18$
 $R_t = 0.82$

C-L-20-15



$V_i = 3.25 \text{ ms}^{-1}$
 $V_r = 1.68 \text{ ms}^{-1}$
 $i = 68.0^\circ$
 $r = 18.1^\circ$
 $V_{ni} = -3.01 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{ti} = 1.22 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{nr} = 0.58 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{tr} = 1.58 \text{ ms}^{-1}$
 $e = 15.5^\circ$
 $R = 0.52$
 $R_n = 0.19$
 $R_t = 1.30$

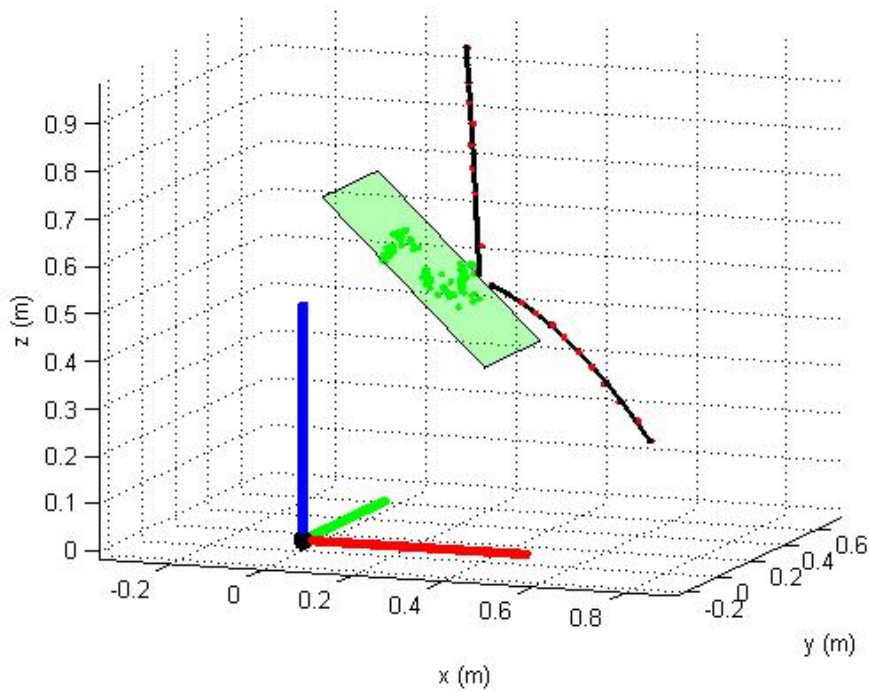


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ

ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ
ΚΥΒΙΚΟ ΔΟΚΙΜΙΟ
ΚΛΙΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ: 45°

α/α	V_i (m/s)	V_r (m/s)	$V_{n,i}$ (m/s)	$V_{t,i}$ (m/s)	$V_{n,r}$ (m/s)	$V_{t,r}$ (m/s)	R	R _n	R _t	e (°)	i (°)	r (°)
1	3.44	2.41	-2.39	2.48	0.32	2.39	0.70	0.13	0.96	14.9	43.8	6.1
2	3.35	2.29	-2.29	2.45	0.77	2.16	0.68	0.33	0.88	11.5	42.9	17.8
3	3.38	1.86	-2.37	2.41	0.50	1.79	0.55	0.21	0.75	-7.8	44.4	13.5
4	3.44	2.30	-2.45	2.41	0.92	2.10	0.67	0.38	0.87	12.6	45.4	21.8
5	3.36	1.46	-2.41	2.34	0.23	1.44	0.43	0.10	0.62	8.3	45.9	6.6
6	3.40	2.36	-2.34	2.47	1.14	2.07	0.69	0.49	0.84	15.2	43.4	27.0
7	3.38	1.86	-2.42	2.37	0.47	1.80	0.55	0.20	0.76	-10.2	44.9	12.7
8	3.57	2.03	-2.47	2.58	0.52	1.96	0.57	0.21	0.76	15.0	43.7	13.0
9	3.37	2.57	-2.35	2.42	0.65	2.49	0.76	0.28	1.03	13.1	46.4	13.2
10	3.39	2.53	-2.35	2.44	0.85	2.38	0.74	0.36	0.97	0.8	46.7	18.0
11	3.42	2.38	-2.42	2.42	0.53	2.32	0.70	0.22	0.96	14.2	45.0	11.2
12	3.57	1.93	-2.46	2.58	0.24	1.91	0.54	0.10	0.74	1.4	43.5	5.4
13	3.34	2.22	-2.34	2.39	1.25	1.84	0.66	0.53	0.77	13.0	44.2	32.2

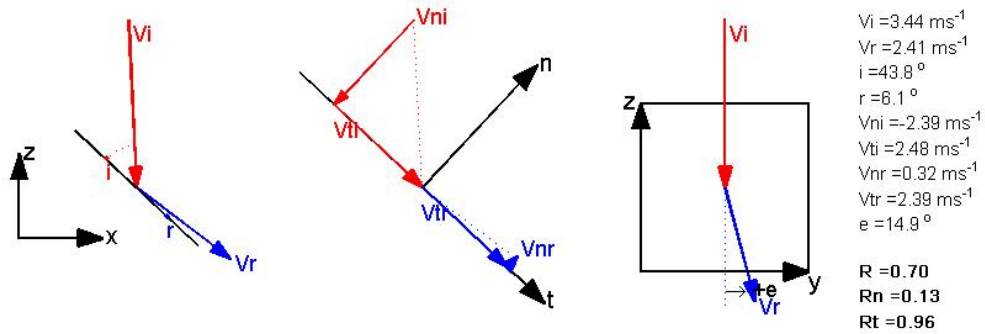


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

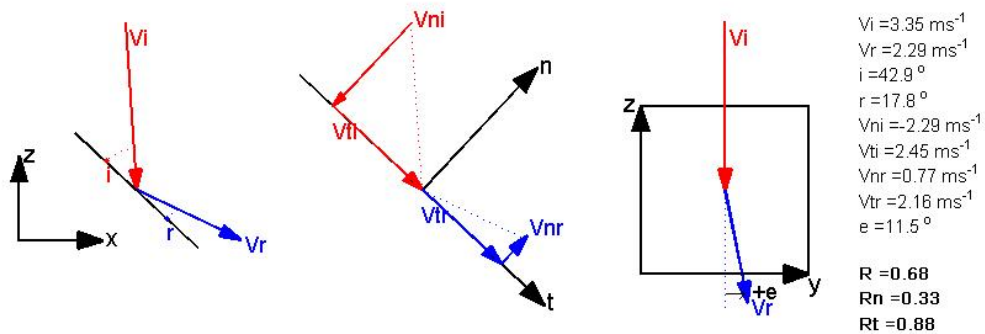


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

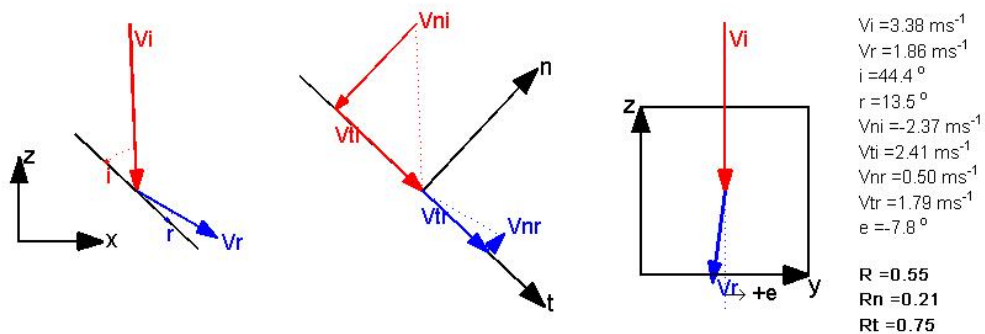
C-L-45-1



C-L-45-2



C-L-45-3

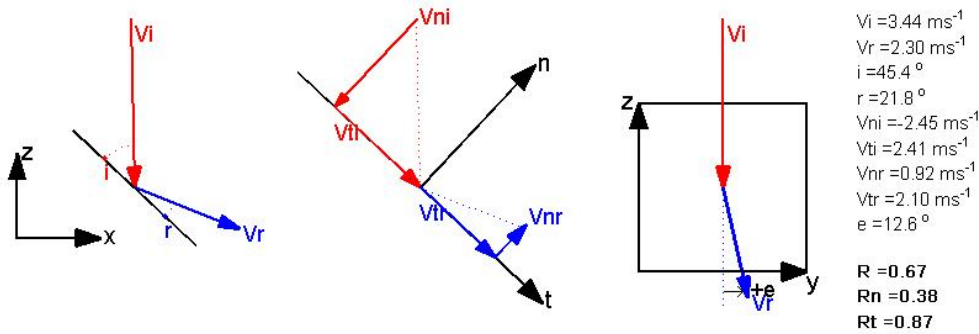


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

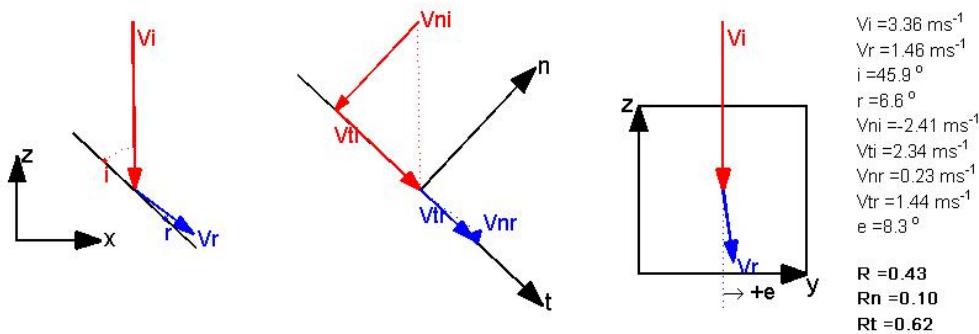


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

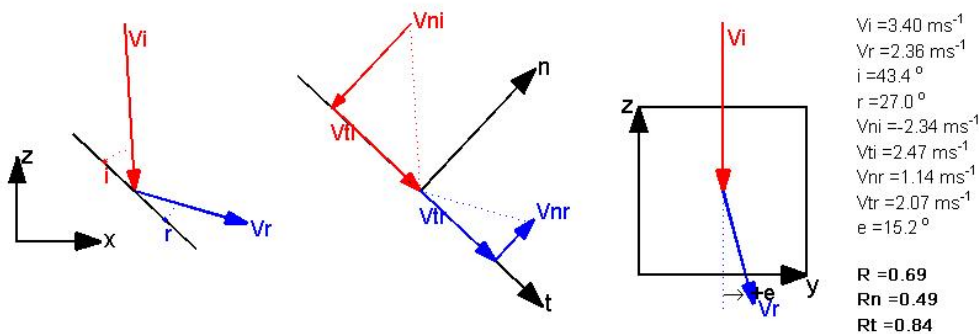
C-L-45-4



C-L-45-5



C-L-45-6

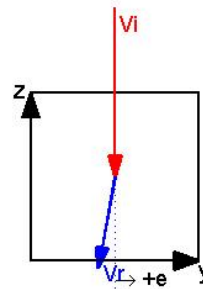
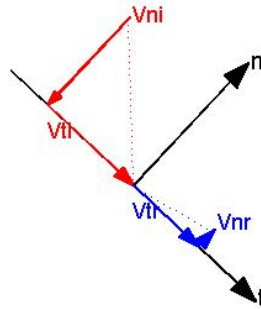
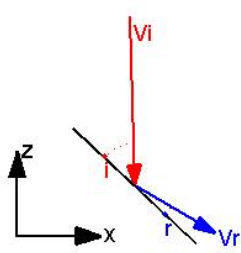


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ



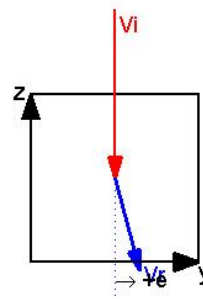
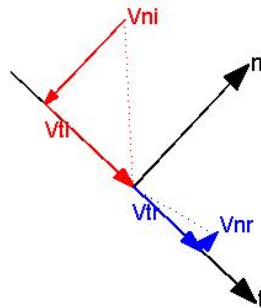
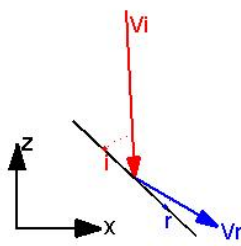
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

C-L-45-7



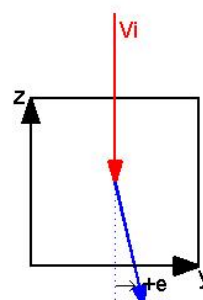
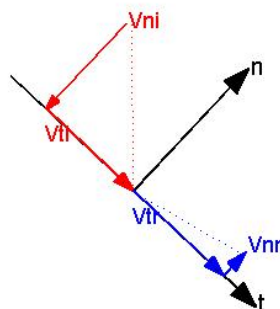
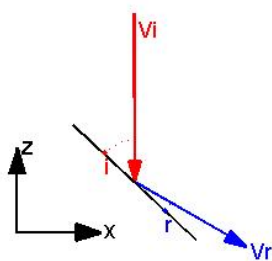
$V_i = 3.38 \text{ ms}^{-1}$
 $V_r = 1.88 \text{ ms}^{-1}$
 $i = 44.9^\circ$
 $r = 12.7^\circ$
 $V_{ni} = -2.42 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{ti} = 2.37 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{nr} = 0.47 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{tr} = 1.80 \text{ ms}^{-1}$
 $e = -10.2^\circ$
 $R = 0.55$
 $R_n = 0.20$
 $R_t = 0.76$

C-L-45-8



$V_i = 3.57 \text{ ms}^{-1}$
 $V_r = 2.03 \text{ ms}^{-1}$
 $i = 43.7^\circ$
 $r = 13.0^\circ$
 $V_{ni} = -2.47 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{ti} = 2.58 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{nr} = 0.52 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{tr} = 1.96 \text{ ms}^{-1}$
 $e = 15.0^\circ$
 $R = 0.57$
 $R_n = 0.21$
 $R_t = 0.76$

C-L-45-9



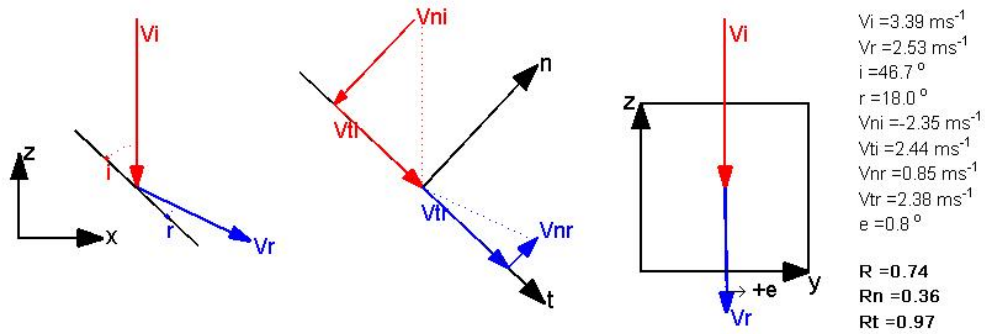
$V_i = 3.37 \text{ ms}^{-1}$
 $V_r = 2.57 \text{ ms}^{-1}$
 $i = 46.4^\circ$
 $r = 13.2^\circ$
 $V_{ni} = -2.35 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{ti} = 2.42 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{nr} = 0.65 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{tr} = 2.48 \text{ ms}^{-1}$
 $e = 13.1^\circ$
 $R = 0.76$
 $R_n = 0.28$
 $R_t = 1.03$

ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

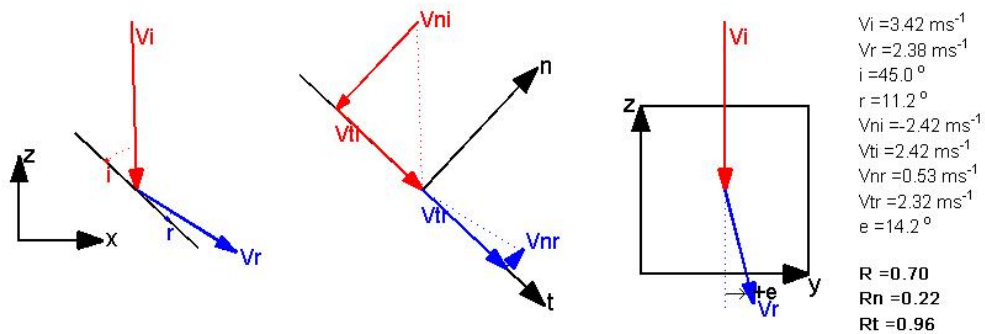


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

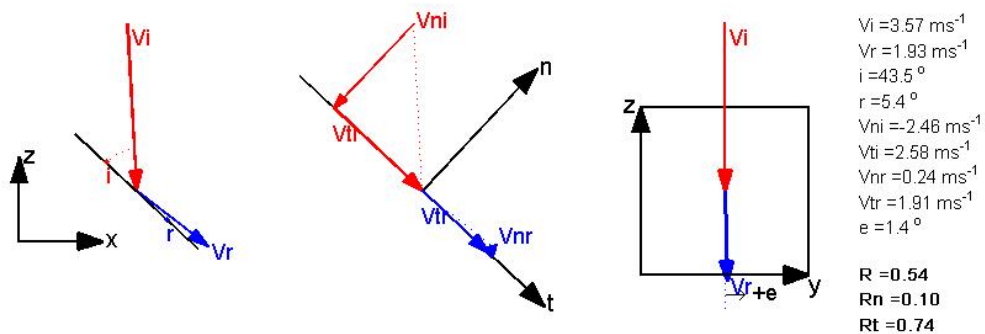
C-L-45-10



C-L-45-11

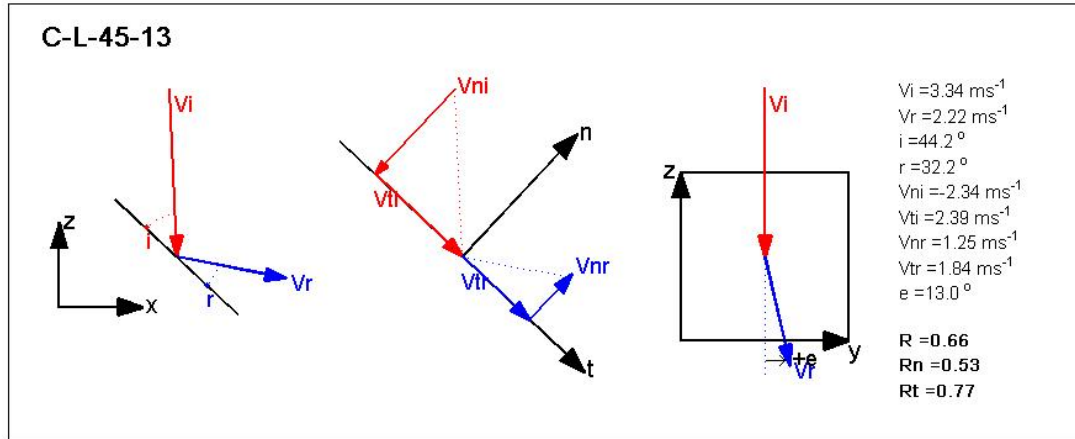


C-L-45-12





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ



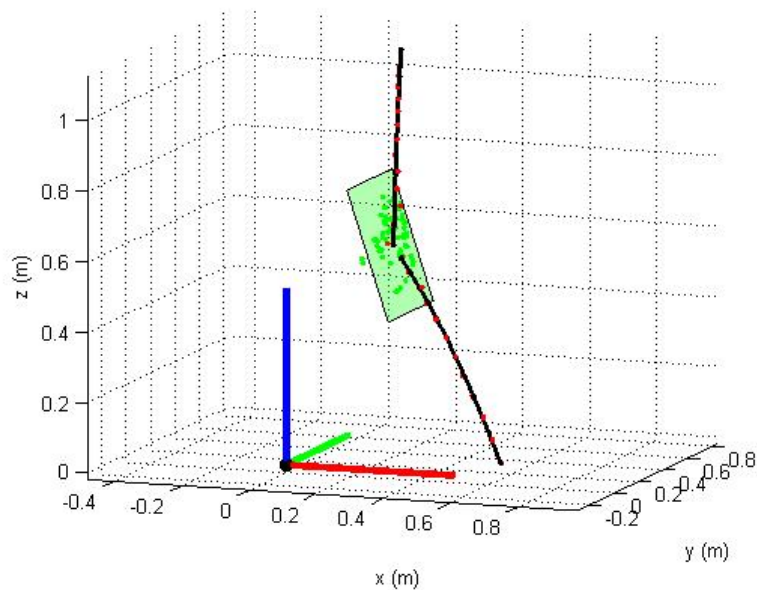


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ

ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ
ΚΥΒΙΚΟ ΔΟΚΙΜΙΟ
ΚΛΙΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ: 70°

α/α	V_i (m/s)	V_r (m/s)	$V_{n,i}$ (m/s)	$V_{t,i}$ (m/s)	$V_{n,r}$ (m/s)	$V_{t,r}$ (m/s)	R	R _n	R _t	e (°)	i (°)	r (°)
1	3.39	3.01	-1.03	3.23	0.86	2.88	0.89	0.84	0.89	9.5	17.7	15.8
2	3.21	2.56	-0.97	3.06	0.77	2.44	0.80	0.80	0.80	-18.2	17.6	16.6
3	3.37	2.82	-0.98	3.22	0.91	2.67	0.84	0.93	0.83	-7.3	16.8	17.8
4	3.51	2.89	-1.05	3.35	0.87	2.76	0.82	0.82	0.82	10.8	17.4	16.4
5	3.59	3.28	-1.10	3.42	0.28	3.27	0.91	0.25	0.96	1.7	17.8	4.3
6	3.43	3.12	-1.07	3.26	0.56	3.07	0.91	0.52	0.94	5.2	18.2	9.6
7	3.50	3.39	-1.04	3.34	0.23	3.38	0.97	0.22	1.01	17.0	17.3	3.3
8	3.27	3.04	-1.02	3.11	0.77	2.94	0.93	0.75	0.95	-2.1	18.2	13.9
9	3.33	2.93	-0.98	3.18	0.49	2.89	0.88	0.50	0.91	-0.7	17.0	8.9
10	3.71	3.41	-1.14	3.53	0.65	3.35	0.92	0.57	0.95	13.1	17.8	10.3
11	3.49	3.22	-1.02	3.34	0.50	3.18	0.92	0.50	0.95	-2.7	16.9	8.4
12	3.68	3.15	-1.12	3.50	0.53	3.10	0.86	0.47	0.89	10.5	17.8	9.0
13	3.42	3.25	-1.05	3.26	0.60	3.19	0.95	0.57	0.98	3.2	17.8	10.0
14	3.33	2.79	-1.00	3.17	0.78	2.68	0.84	0.78	0.84	17.8	17.4	15.3

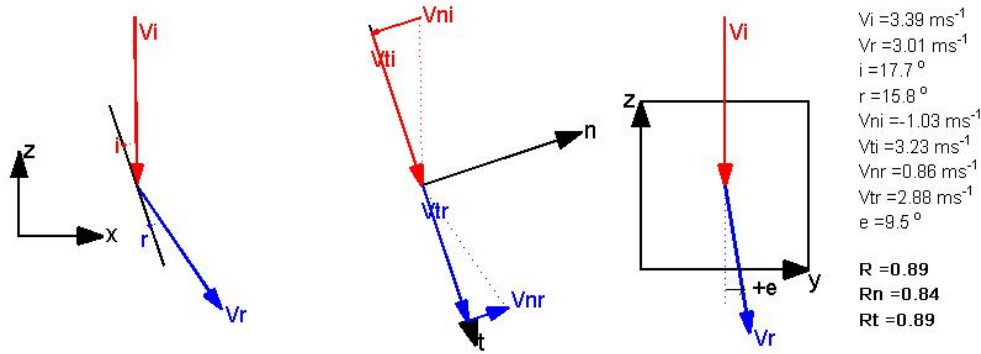


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

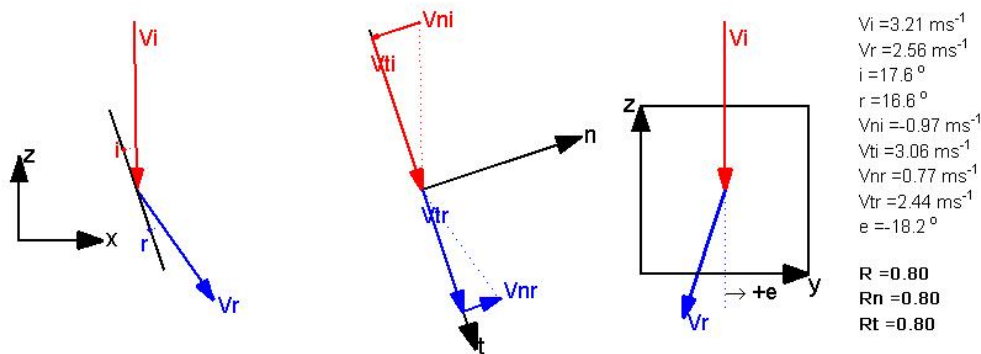


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

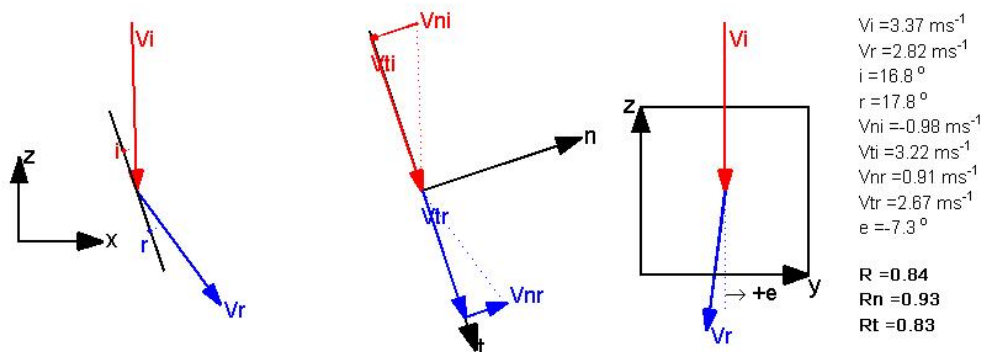
C-L-70-1



C-L-70-2



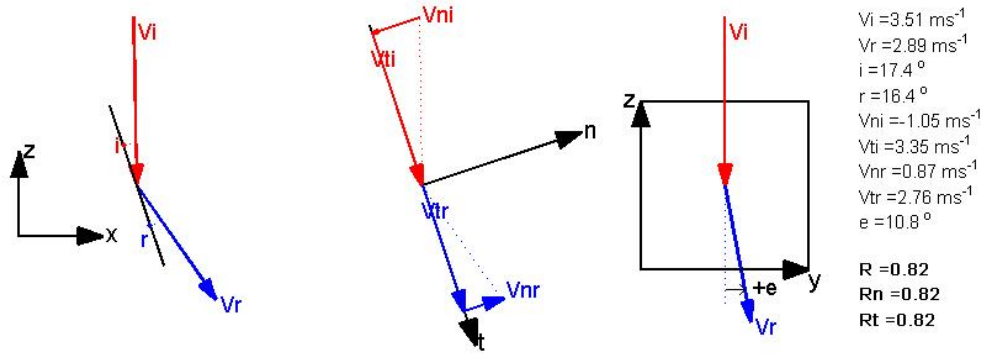
C-L-70-3



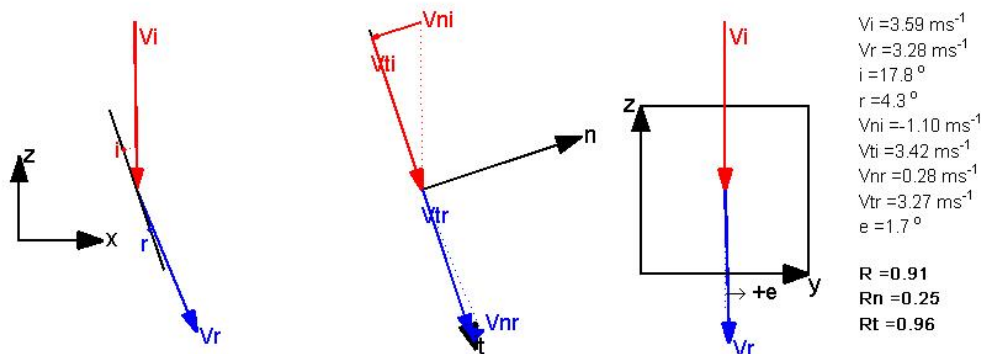


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

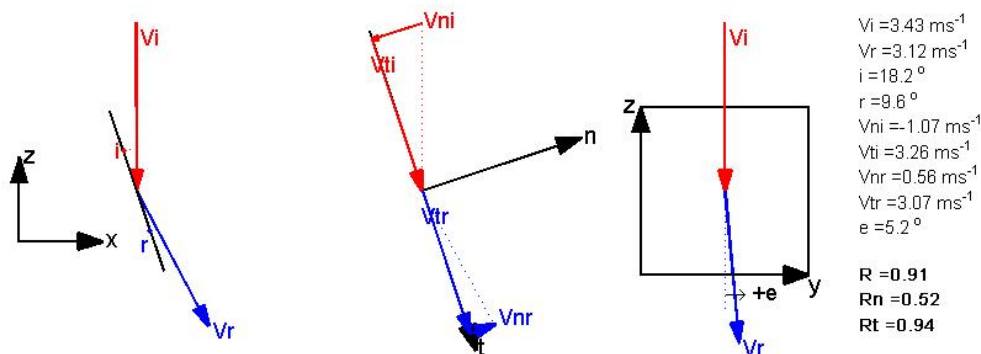
C-L-70-4



C-L-70-5



C-L-70-6

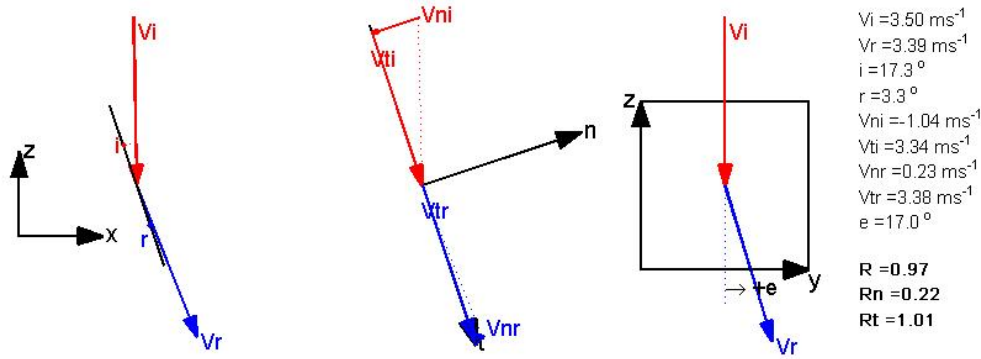


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

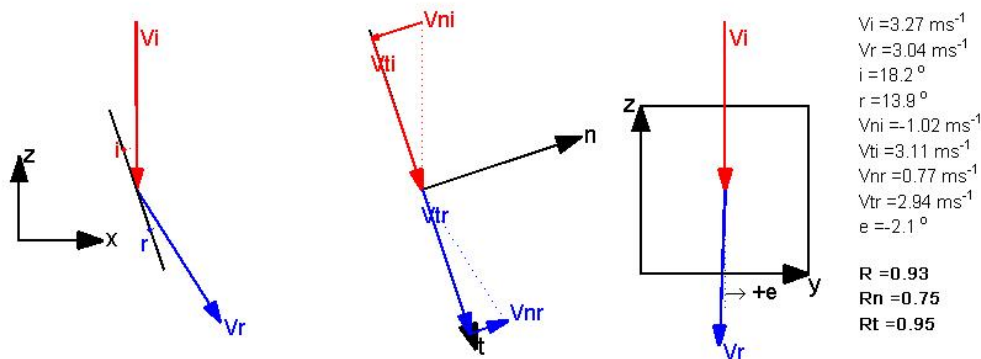


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

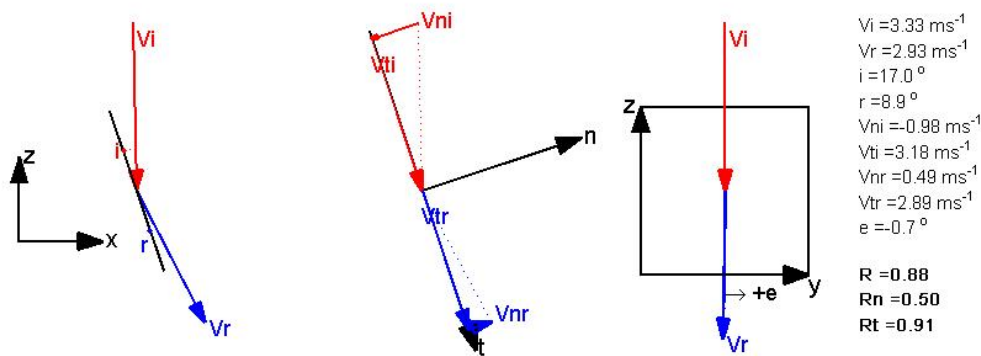
C-L-70-7



C-L-70-8



C-L-70-9

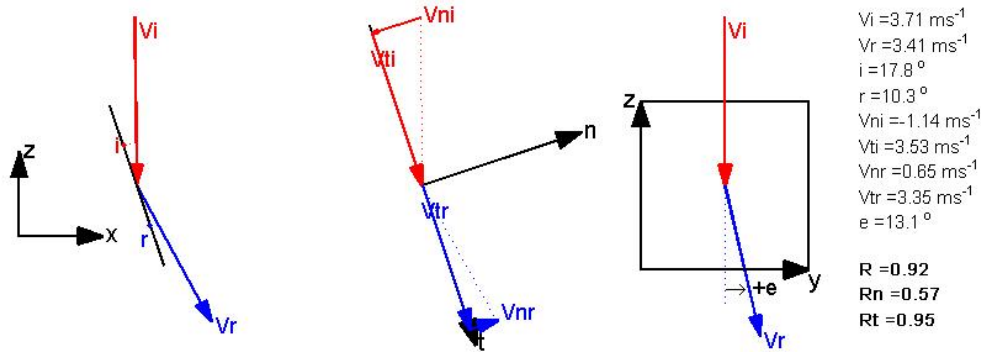


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

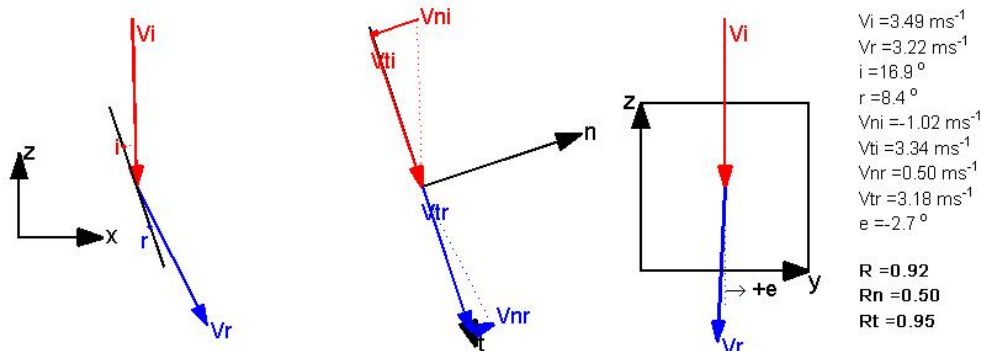


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

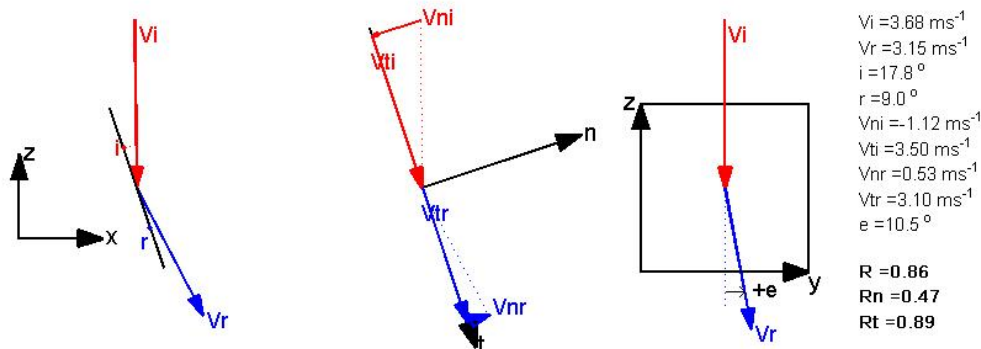
C-L-70-10



C-L-70-11



C-L-70-12

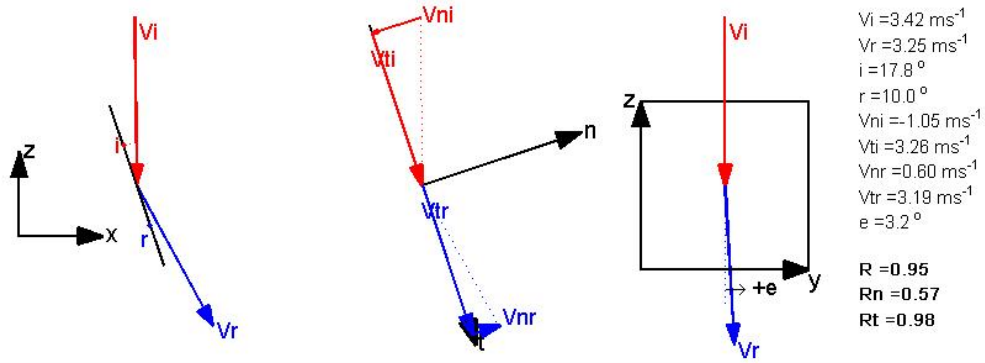


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

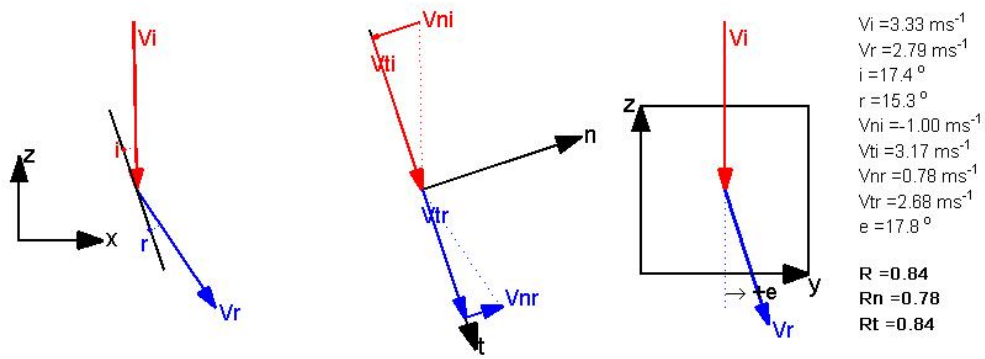


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

C-L-70-13



C-L-70-14



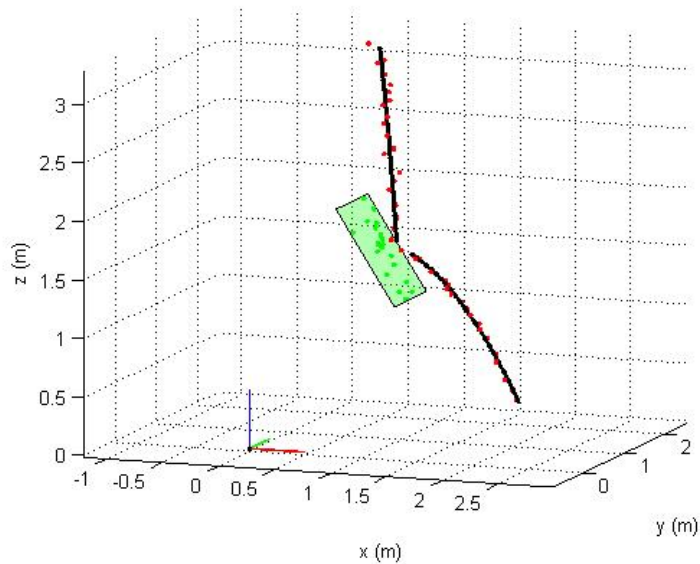


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ IV

ΔΟΚΙΜΕΣ ΠΕΔΙΟΥ
ΚΥΒΙΚΟ ΔΟΚΙΜΙΟ
ΚΛΙΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ: 55°

α/α	V_i (m/s)	V_r (m/s)	$V_{n,i}$ (m/s)	$V_{t,i}$ (m/s)	$V_{n,r}$ (m/s)	$V_{t,r}$ (m/s)	R	R_n	R_t	e ($^\circ$)	i ($^\circ$)	r ($^\circ$)
1	6.44	2.93	-3.20	5.59	1.18	2.68	0.46	0.37	0.48	8.0	29.7	22.5
2	6.93	4.79	-3.39	6.05	0.79	4.72	0.69	0.23	0.78	-12.3	29.1	8.9
3	6.90	3.50	-3.54	5.93	0.87	3.38	0.51	0.25	0.57	-17.0	30.8	13.3
4	7.88	4.69	-3.48	7.07	2.90	3.69	0.60	0.83	0.52	-8.1	26.0	36.7
5	7.50	4.99	-3.49	6.64	2.59	4.27	0.67	0.74	0.64	-32.9	27.6	30.1
6	8.01	4.03	-3.54	7.18	0.84	3.94	0.50	0.24	0.55	-3.6	26.0	11.0
7	7.12	5.10	-3.35	6.28	1.03	4.99	0.72	0.31	0.80	-16.0	28.0	11.2
8	7.70	4.83	-3.69	6.76	1.18	4.69	0.63	0.32	0.69	-3.9	28.5	13.5
9	7.45	4.49	-3.58	6.53	1.50	4.23	0.60	0.42	0.65	-10.7	28.6	18.7
10	7.76	4.25	-3.59	6.88	1.70	3.89	0.55	0.47	0.57	-9.6	27.4	22.5
11	7.35	3.22	-3.51	6.46	1.45	2.88	0.44	0.41	0.45	-6.5	28.4	25.4
12	7.81	5.26	-3.70	6.88	2.07	4.83	0.67	0.56	0.70	-9.3	28.2	22.4
13	8.03	4.97	-3.91	7.02	1.12	4.85	0.62	0.29	0.69	-30.2	29.0	12.5
14	7.19	5.14	-3.40	6.33	1.72	4.84	0.71	0.51	0.76	-9.8	28.2	18.6

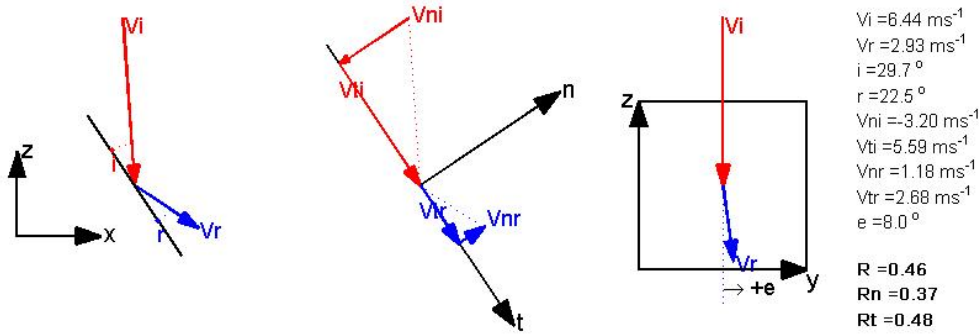


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

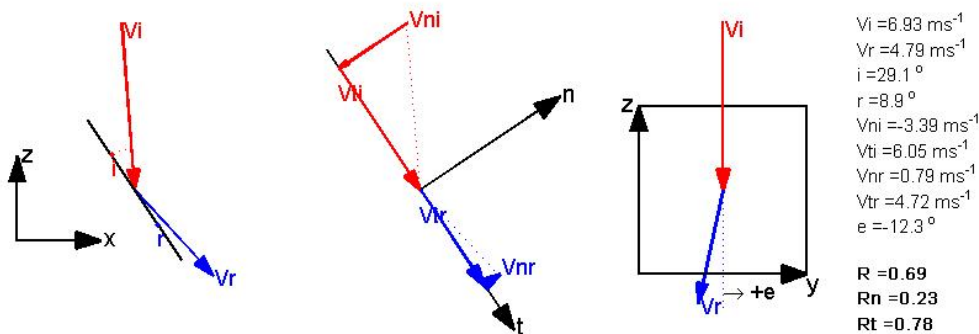


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

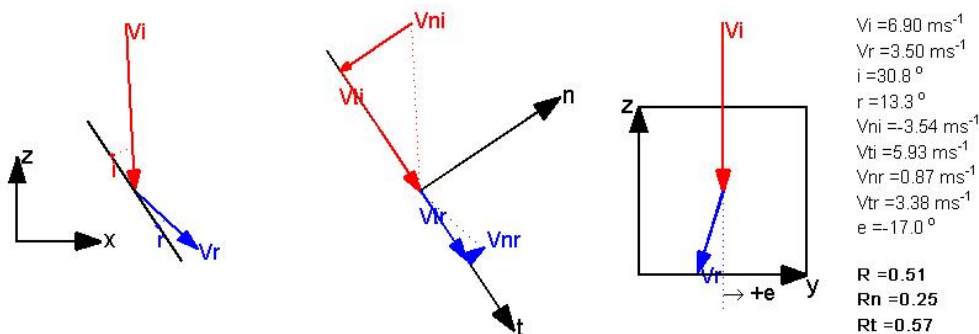
C-F-55-1



C-F-55-2



C-F-55-3

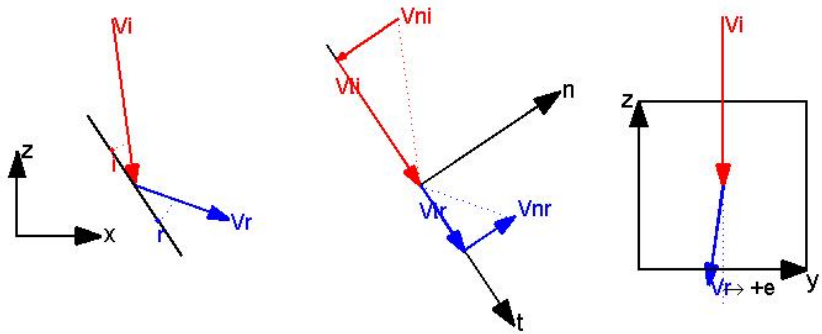


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

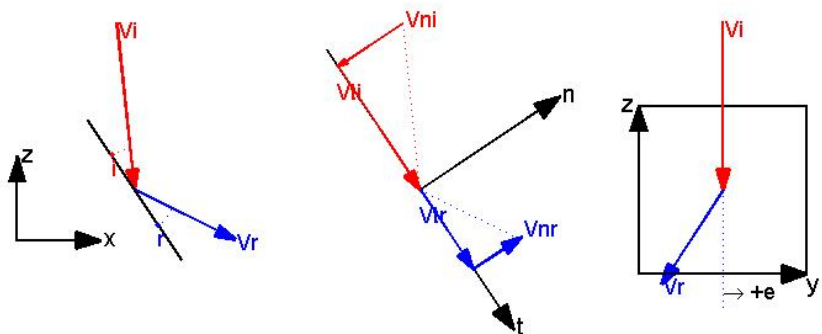


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

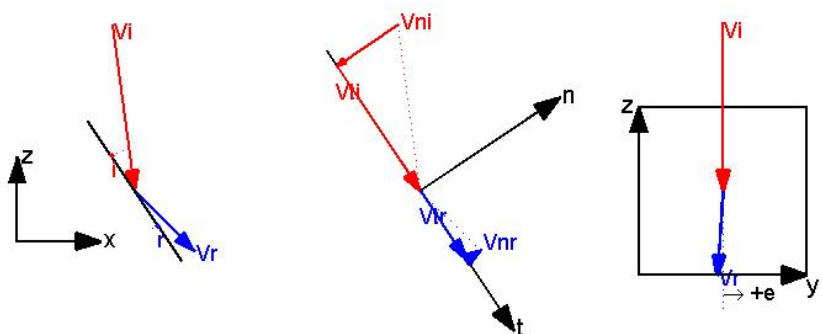
C-F-55-4



C-F-55-5



C-F-55-6

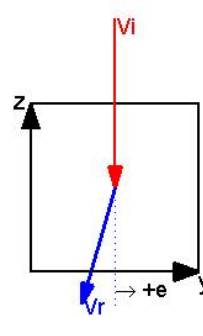
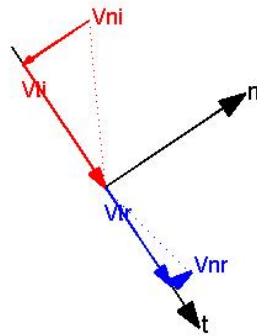
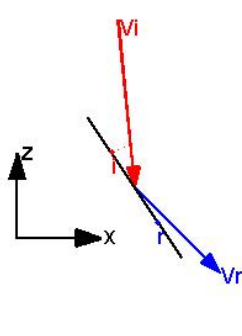


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ



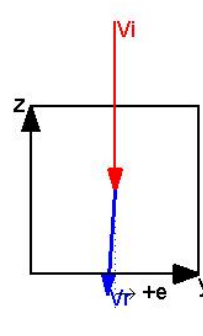
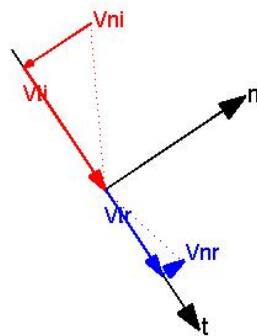
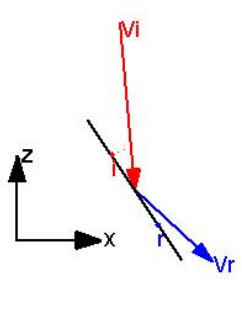
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

C-F-55-7



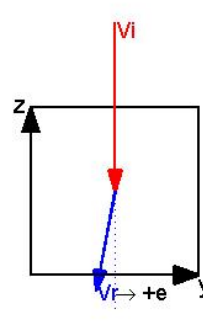
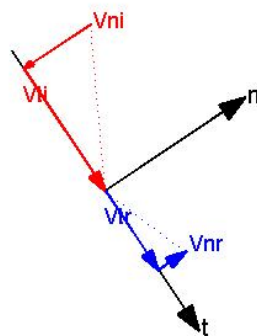
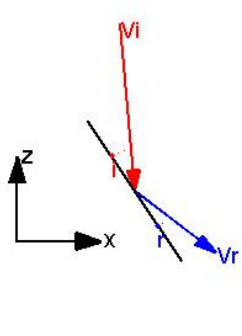
$V_i = 7.12 \text{ ms}^{-1}$
 $V_r = 5.10 \text{ ms}^{-1}$
 $i = 28.0^\circ$
 $r = 11.2^\circ$
 $V_{ni} = -3.35 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{ti} = 6.28 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{nr} = 1.03 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{tr} = 4.99 \text{ ms}^{-1}$
 $e = -16.0^\circ$
 $R = 0.72$
 $R_n = 0.31$
 $R_t = 0.80$

C-F-55-8



$V_i = 7.70 \text{ ms}^{-1}$
 $V_r = 4.83 \text{ ms}^{-1}$
 $i = 28.5^\circ$
 $r = 13.5^\circ$
 $V_{ni} = -3.69 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{ti} = 6.76 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{nr} = 1.18 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{tr} = 4.69 \text{ ms}^{-1}$
 $e = -3.9^\circ$
 $R = 0.63$
 $R_n = 0.32$
 $R_t = 0.69$

C-F-55-9



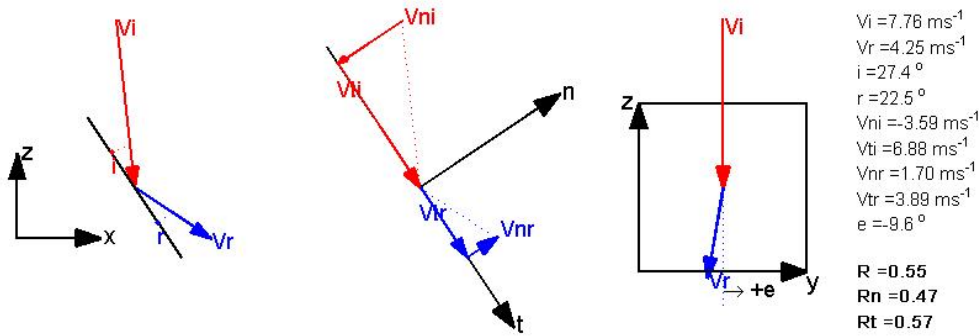
$V_i = 7.45 \text{ ms}^{-1}$
 $V_r = 4.49 \text{ ms}^{-1}$
 $i = 28.6^\circ$
 $r = 18.7^\circ$
 $V_{ni} = -3.58 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{ti} = 6.53 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{nr} = 1.50 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{tr} = 4.23 \text{ ms}^{-1}$
 $e = -10.7^\circ$
 $R = 0.60$
 $R_n = 0.42$
 $R_t = 0.65$

ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

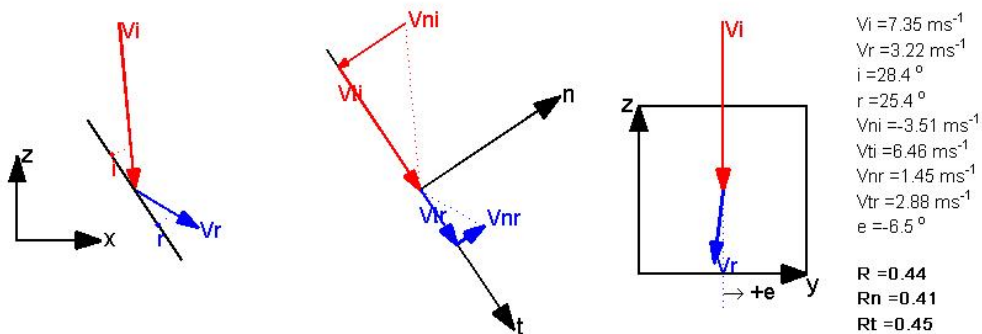


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

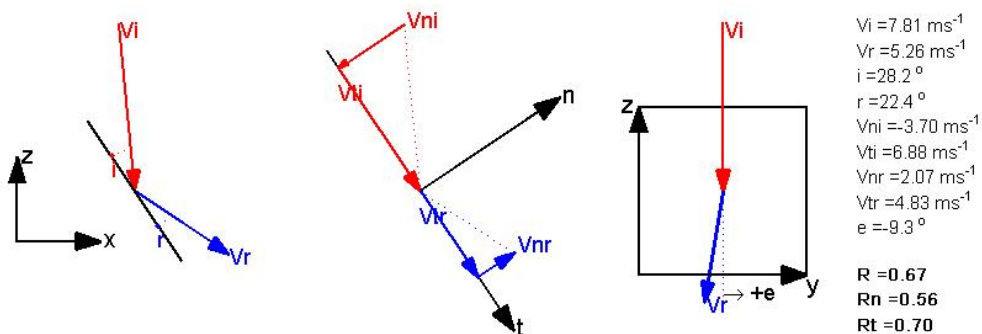
C-F-55-10



C-F-55-11



C-F-55-12

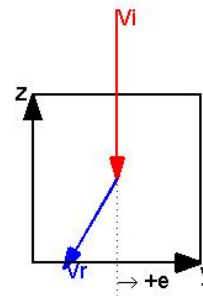
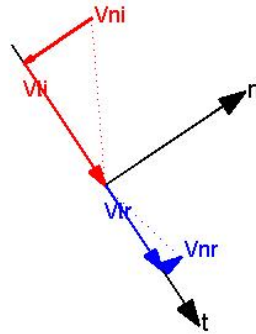
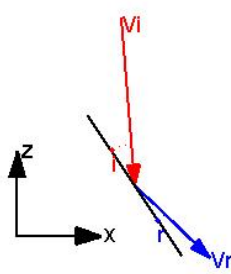


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ



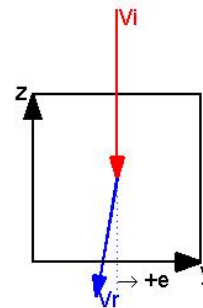
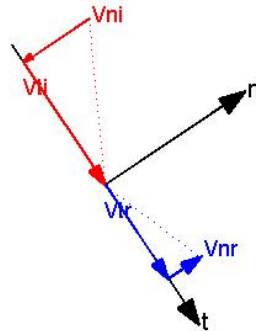
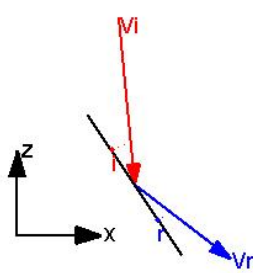
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

C-F-55-13



$V_i = 8.03 \text{ ms}^{-1}$
 $V_r = 4.97 \text{ ms}^{-1}$
 $i = 29.0^\circ$
 $r = 12.5^\circ$
 $V_{ni} = -3.91 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{ti} = 7.02 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{nr} = 1.12 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{tr} = 4.85 \text{ ms}^{-1}$
 $e = -30.2^\circ$
 $R = 0.62$
 $R_n = 0.29$
 $R_t = 0.69$

C-F-55-14



$V_i = 7.19 \text{ ms}^{-1}$
 $V_r = 5.14 \text{ ms}^{-1}$
 $i = 28.2^\circ$
 $r = 18.6^\circ$
 $V_{ni} = -3.40 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{ti} = 6.33 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{nr} = 1.72 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{tr} = 4.84 \text{ ms}^{-1}$
 $e = -9.8^\circ$
 $R = 0.71$
 $R_n = 0.51$
 $R_t = 0.76$

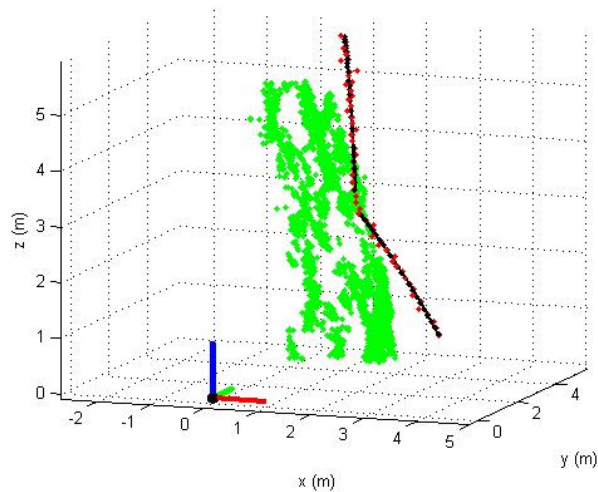


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ V

ΔΟΚΙΜΕΣ ΠΕΔΙΟΥ
ΚΥΒΙΚΟ ΔΟΚΙΜΙΟ
ΚΛΙΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ: 75°

α/α	V_i (m/s)	V_r (m/s)	$V_{n,i}$ (m/s)	$V_{t,i}$ (m/s)	$V_{n,r}$ (m/s)	$V_{t,r}$ (m/s)	R	R _n	R _t	e ($^\circ$)	i ($^\circ$)	r ($^\circ$)
1	7.53	5.47	-1.31	7.42	2.12	5.04	0.73	1.62	0.68	26.2	9.9	21.4
2	8.37	6.16	-1.45	8.25	3.39	5.14	0.74	2.33	0.62	20.0	9.8	31.2
3	8.70	6.49	-1.57	8.56	2.95	5.79	0.75	1.87	0.68	28.1	10.3	25.3
4	8.14	6.56	-1.34	8.03	2.69	5.99	0.81	2.01	0.75	33.1	9.3	23.3
5	7.85	5.77	-1.39	7.73	2.01	5.41	0.73	1.44	0.70	14.9	10.1	19.0
6	9.53	8.10	-1.73	9.37	1.73	7.91	0.85	1.00	0.84	4.2	10.3	11.6
7	10.23	7.44	-1.56	10.11	3.15	6.74	0.73	2.01	0.67	25.8	8.6	23.9
8	9.83	7.47	-1.47	9.72	1.67	7.28	0.76	1.14	0.75	15.1	8.4	12.1
9	7.75	5.63	-1.61	7.58	0.87	5.57	0.73	0.54	0.73	8.6	11.9	7.3
10	7.82	5.98	-1.59	7.66	2.08	5.61	0.76	1.30	0.73	12.1	11.7	19.1
11	8.14	7.52	-1.71	7.96	2.07	7.23	0.92	1.21	0.91	24.0	12.1	15.8
12	9.08	7.11	-1.53	8.95	0.92	7.05	0.78	0.60	0.79	-21.7	9.6	6.8
13	8.61	5.96	-1.37	8.50	1.89	5.65	0.69	1.38	0.67	6.1	9.0	17.5
14	8.56	7.54	-1.39	8.45	2.69	7.04	0.88	1.93	0.83	35.0	9.2	20.5
15	9.10	6.42	-1.63	8.96	2.36	5.97	0.71	1.45	0.67	5.1	10.2	20.4
16	8.42	5.98	-1.57	8.27	2.79	5.29	0.71	1.77	0.64	19.5	10.7	26.3
17	8.55	6.86	-1.74	8.37	3.22	6.06	0.80	1.85	0.72	46.7	11.7	27.4
18	9.55	5.70	-1.85	9.37	2.39	5.17	0.60	1.29	0.55	15.0	11.1	23.3
19	9.53	6.94	-1.73	9.38	1.48	6.78	0.73	0.86	0.72	-13.5	10.3	11.3
20	9.16	7.04	-2.04	8.93	3.41	6.16	0.77	1.67	0.69	34.7	12.8	27.6

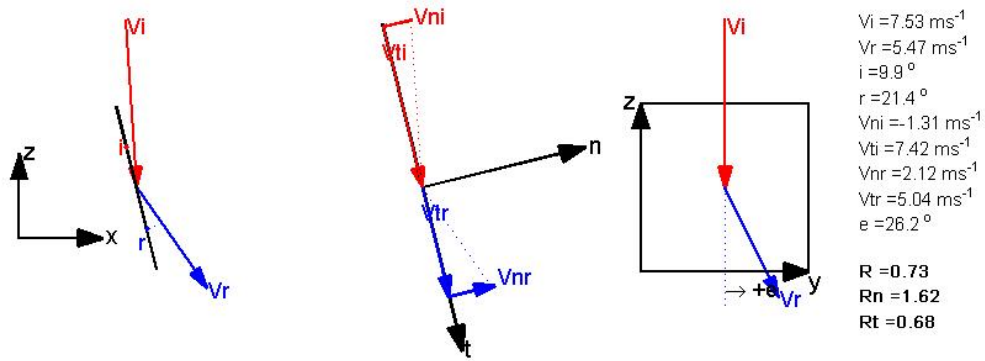


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

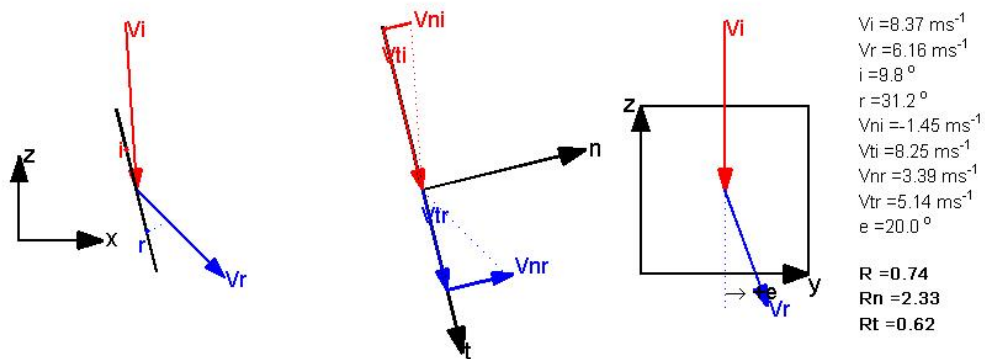


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

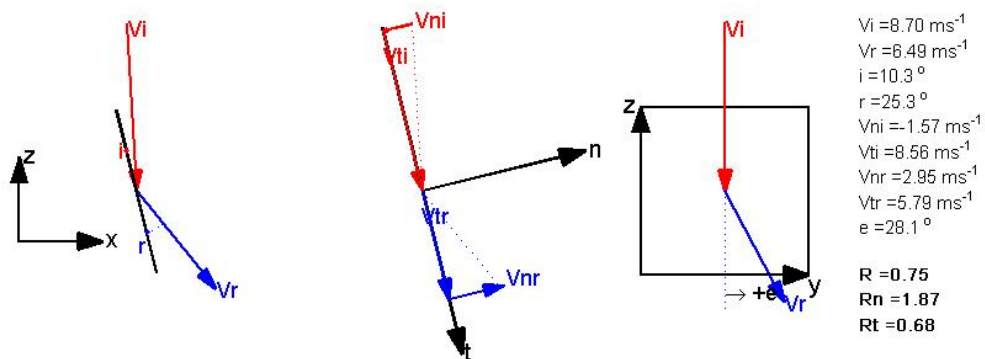
C-F-75-1



C-F-75-2



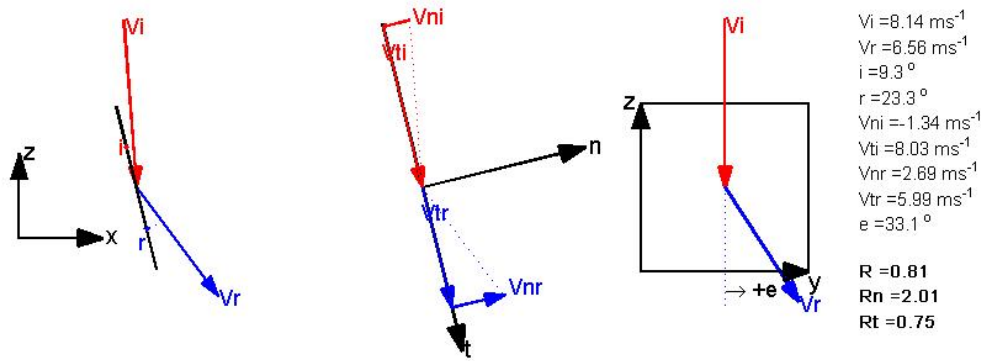
C-F-75-3



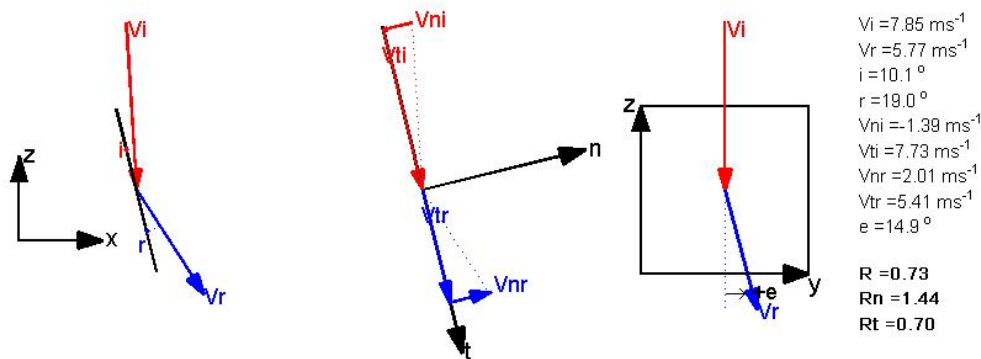


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

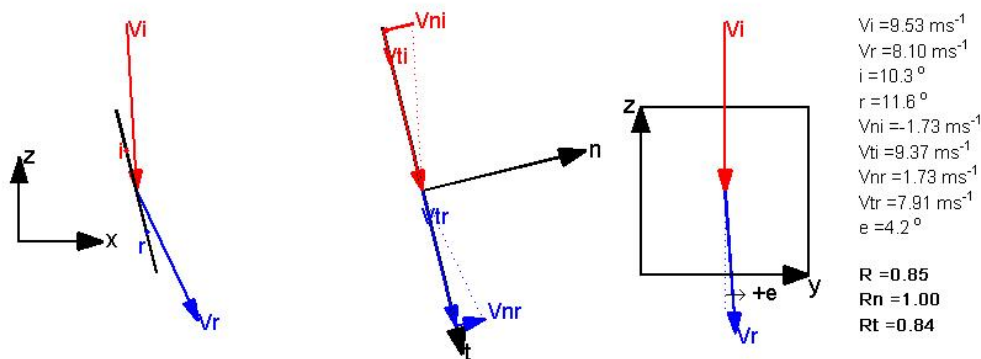
C-F-75-4



C-F-75-5



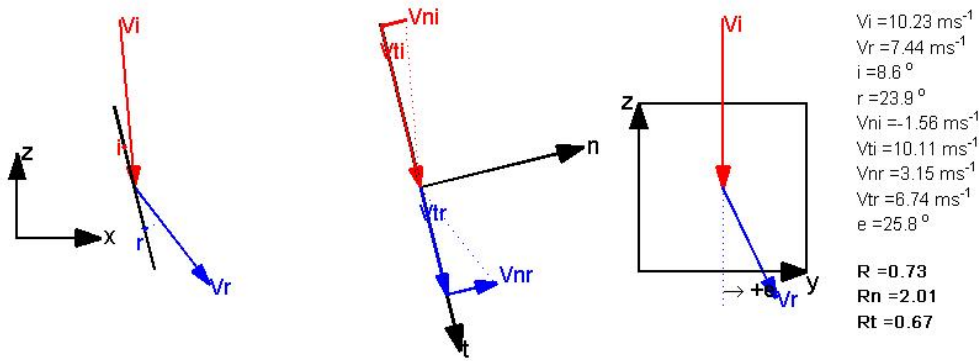
C-F-75-6



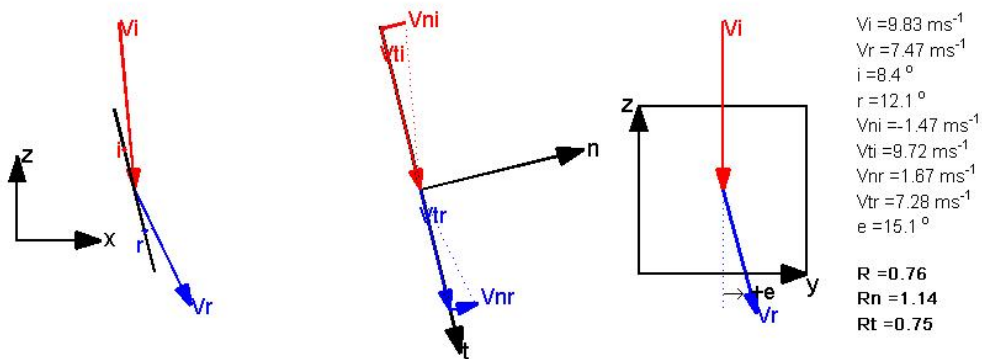


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

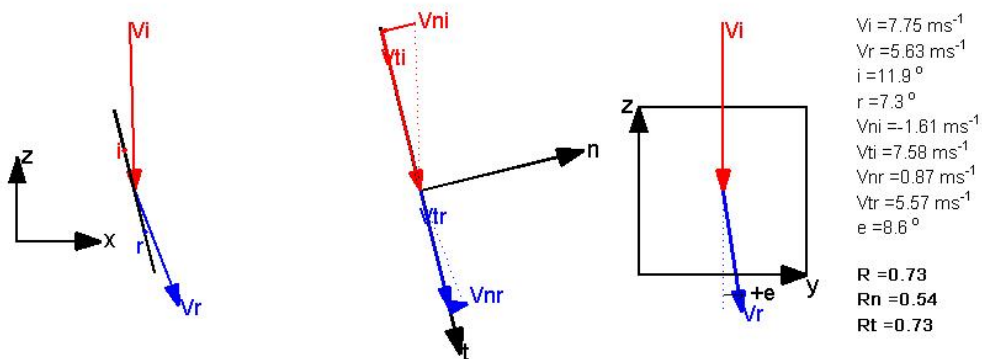
C-F-75-7



C-F-75-8



C-F-75-9

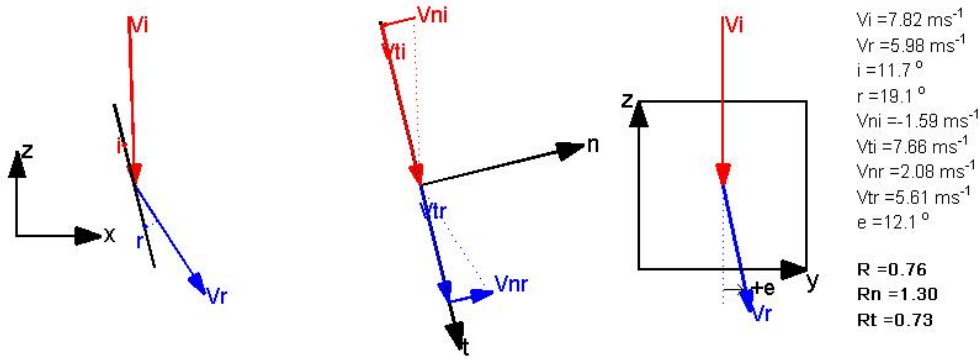


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

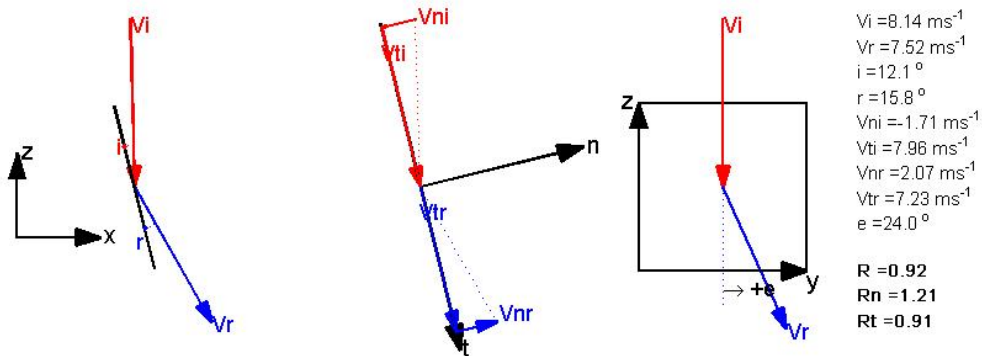


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

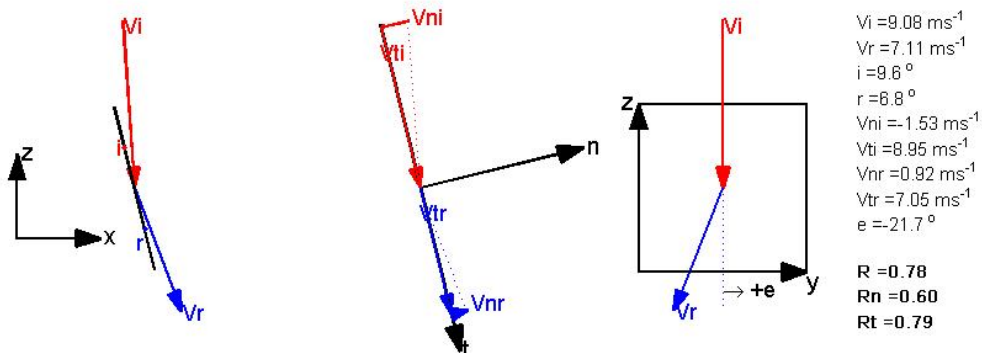
C-F-75-10



C-F-75-11



C-F-75-12

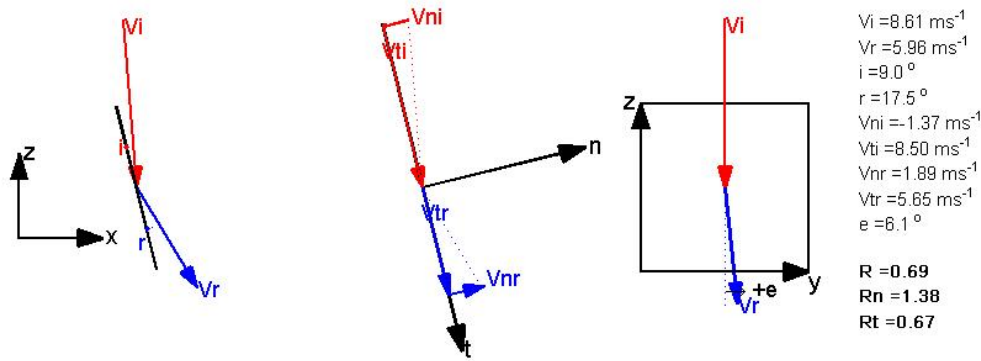


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

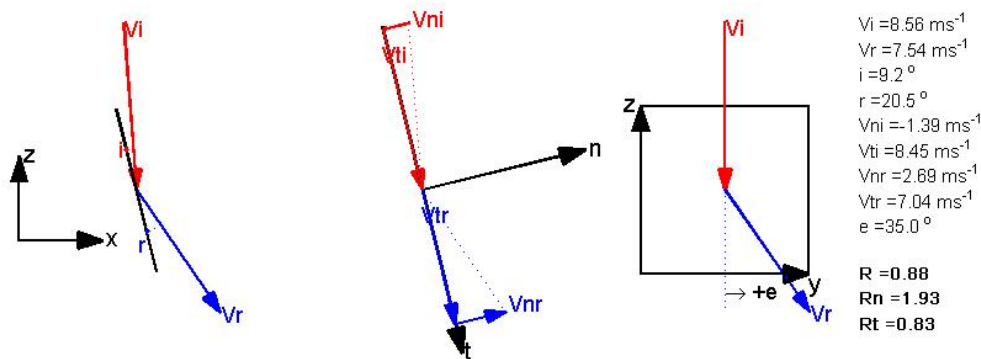


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

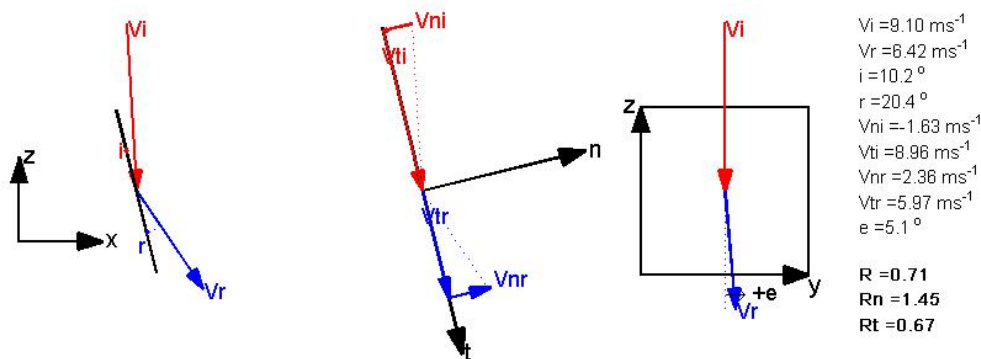
C-F-75-13



C-F-75-14



C-F-75-15

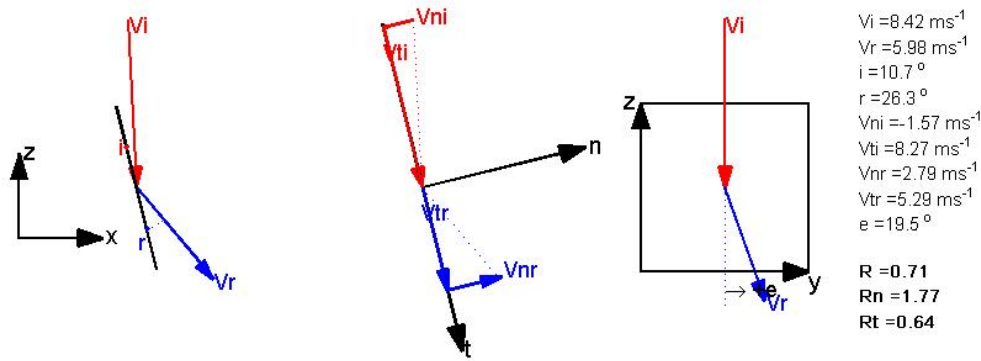


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

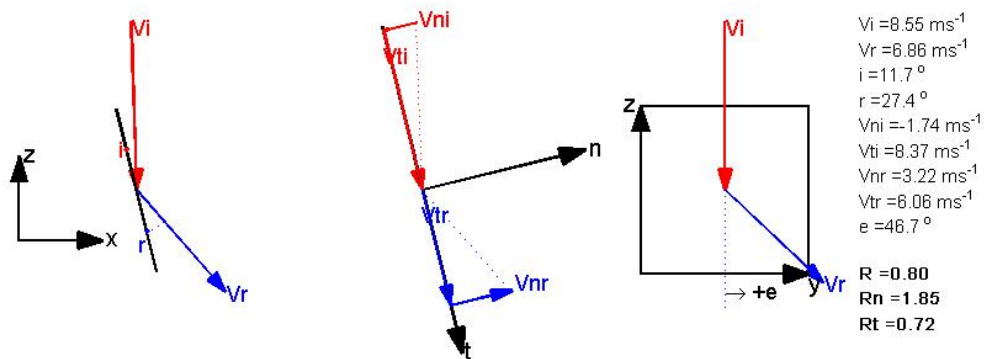


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

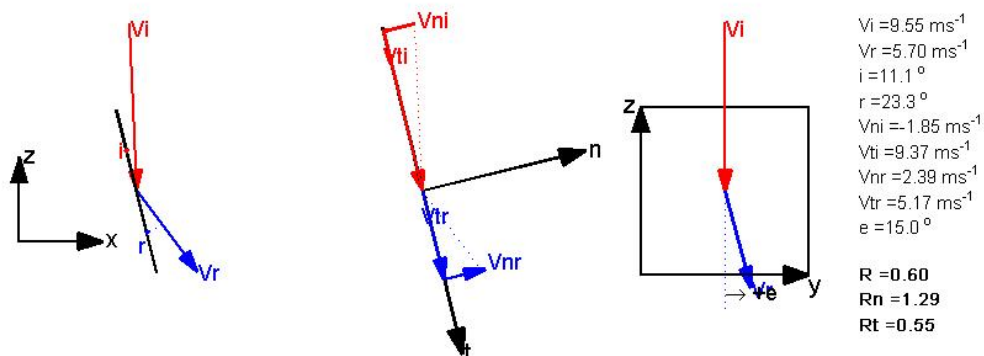
C-F-75-16



C-F-75-17



C-F-75-18

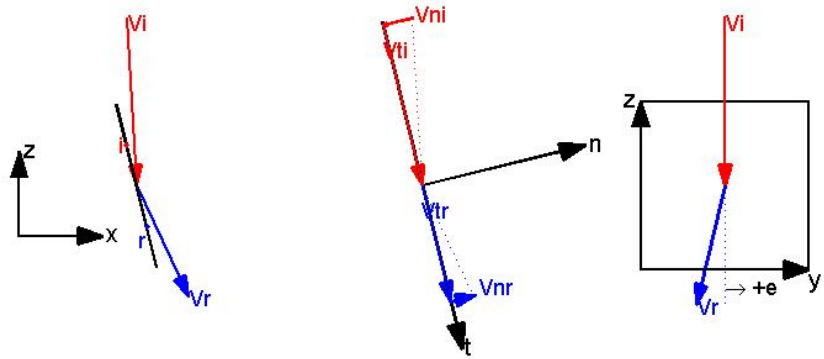


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ



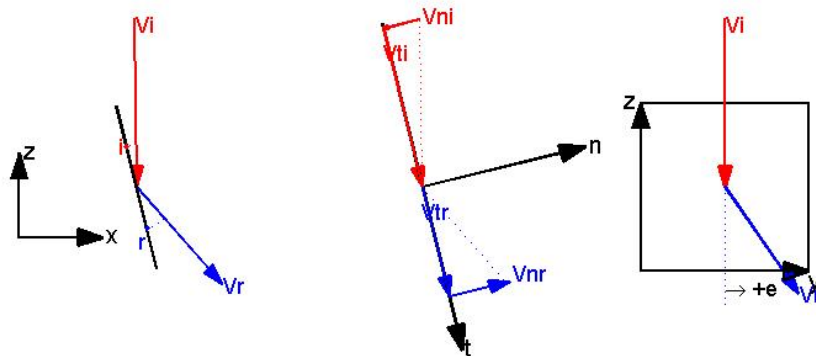
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

C-F-75-19



$V_i = 9.53 \text{ ms}^{-1}$
 $V_r = 8.94 \text{ ms}^{-1}$
 $i = 10.3^\circ$
 $r = 11.3^\circ$
 $V_{ni} = -1.73 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{ti} = 9.38 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{nr} = 1.48 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{tr} = 6.78 \text{ ms}^{-1}$
 $e = -13.5^\circ$
 $R = 0.73$
 $R_n = 0.86$
 $R_t = 0.72$

C-F-75-20



$V_i = 9.16 \text{ ms}^{-1}$
 $V_r = 7.04 \text{ ms}^{-1}$
 $i = 12.8^\circ$
 $r = 27.6^\circ$
 $V_{ni} = -2.04 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{ti} = 8.93 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{nr} = 3.41 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{tr} = 6.16 \text{ ms}^{-1}$
 $e = 34.7^\circ$
 $R = 0.77$
 $R_n = 1.67$
 $R_t = 0.69$

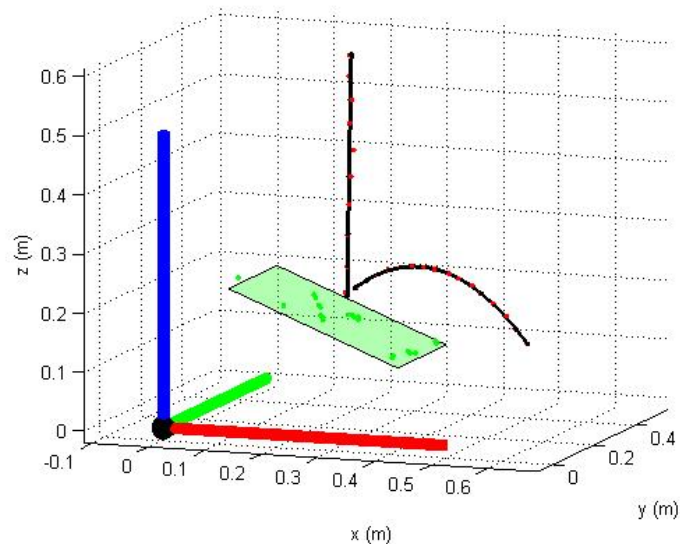


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ VI

ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ
ΠΟΛΥΓΩΝΙΚΟ ΔΟΚΙΜΙΟ
ΚΛΙΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ: 20°

α/α	V_i (m/s)	V_r (m/s)	$V_{n,i}$ (m/s)	$V_{t,i}$ (m/s)	$V_{n,r}$ (m/s)	$V_{t,r}$ (m/s)	R	Rn	Rt	e (°)	i (°)	r (°)
1	3.27	1.34	-3.03	1.24	0.67	1.16	0.41	0.22	0.93	-24.5	67.8	26.7
2	3.21	2.04	-2.94	1.29	1.30	1.57	0.63	0.44	1.22	-29.3	67.1	37.3
3	3.29	1.69	-3.05	1.24	0.86	1.45	0.51	0.28	1.18	8.9	67.9	27.8
4	3.21	1.19	-2.96	1.24	0.97	0.68	0.37	0.33	0.55	-38.9	68.3	51.6
5	3.32	1.35	-3.07	1.27	0.73	1.13	0.40	0.24	0.89	-1.6	68.5	29.2
6	3.20	1.83	-2.94	1.25	0.83	1.63	0.57	0.28	1.30	2.5	66.9	24.4
7	3.21	1.60	-2.97	1.22	1.30	0.93	0.50	0.44	0.76	-11.3	67.6	51.9
8	3.17	1.61	-2.95	1.16	1.04	1.23	0.51	0.35	1.06	-10.5	68.6	37.5
9	3.22	1.42	-2.99	1.21	1.01	1.00	0.44	0.34	0.83	-23.7	67.9	42.0
10	3.30	1.41	-3.05	1.27	1.08	0.91	0.43	0.36	0.72	-34.9	67.3	47.1
11	3.21	1.67	-2.97	1.21	1.16	1.20	0.52	0.39	0.99	-18.2	67.7	41.5
12	3.20	1.30	-2.97	1.19	1.03	0.79	0.41	0.35	0.67	16.2	68.2	49.4
13	3.26	1.55	-3.01	1.24	0.89	1.26	0.47	0.30	1.02	34.1	68.6	32.6
14	3.26	1.79	-3.00	1.28	0.95	1.52	0.55	0.32	1.18	1.3	67.7	29.5

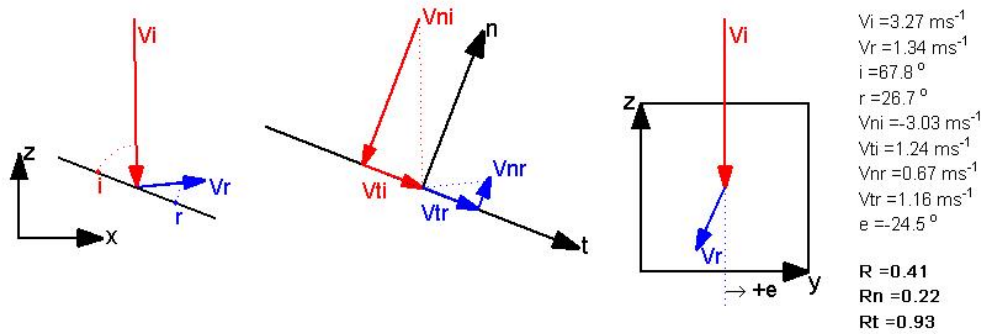


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

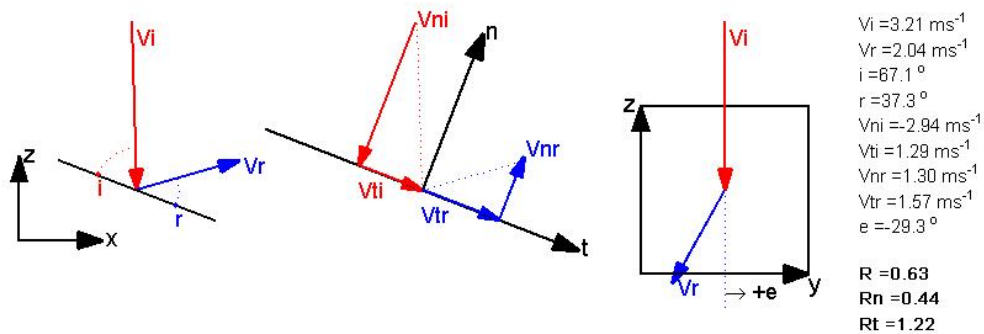


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

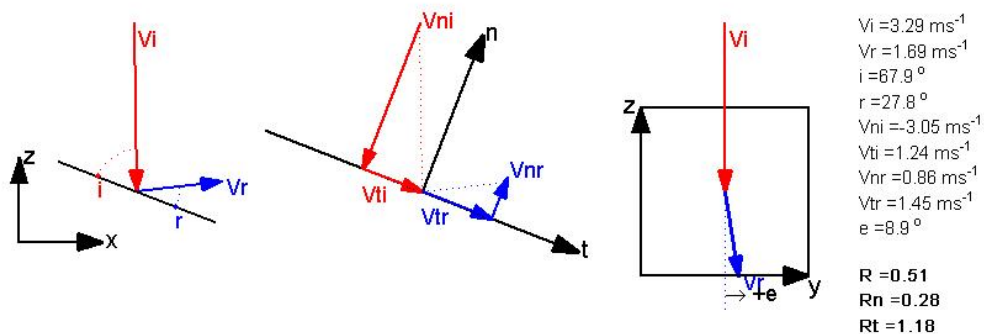
E-L-20-1



E-L-20-2



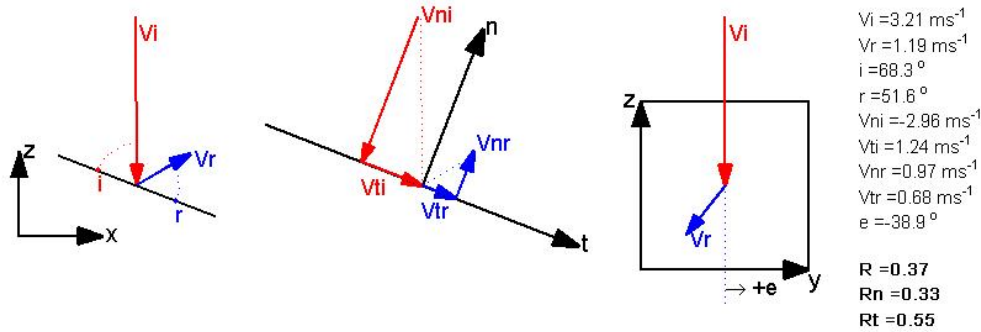
E-L-20-3



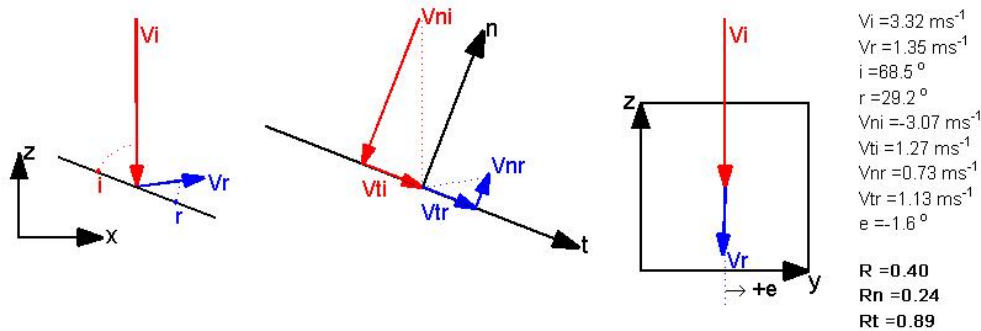


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

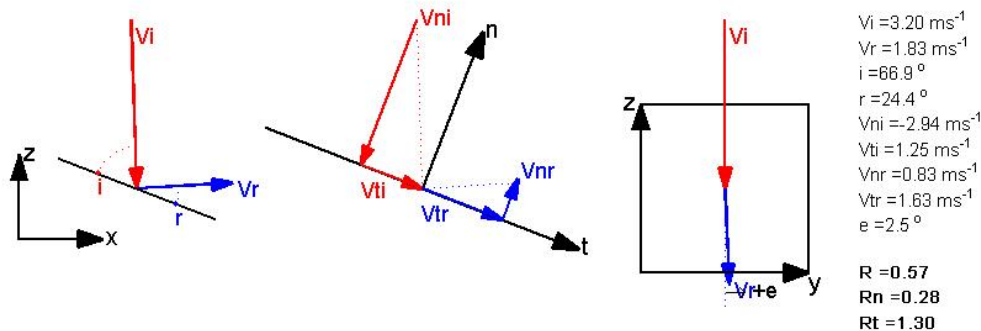
E-L-20-4



E-L-20-5



E-L-20-6

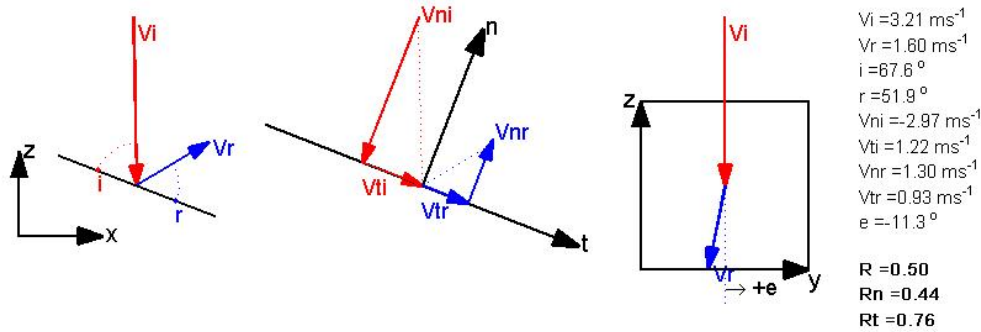


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

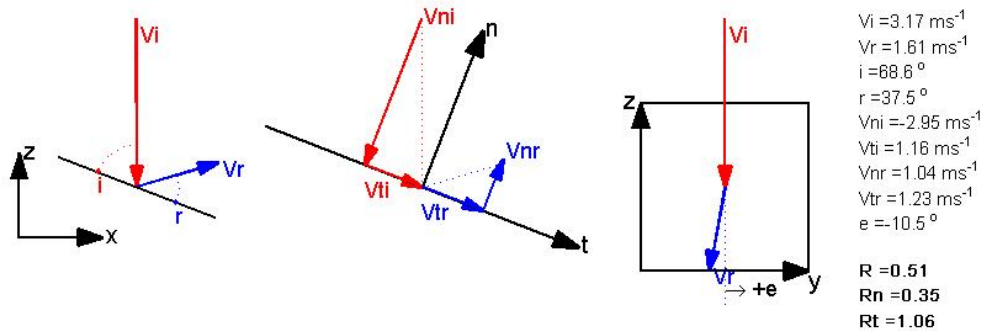


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

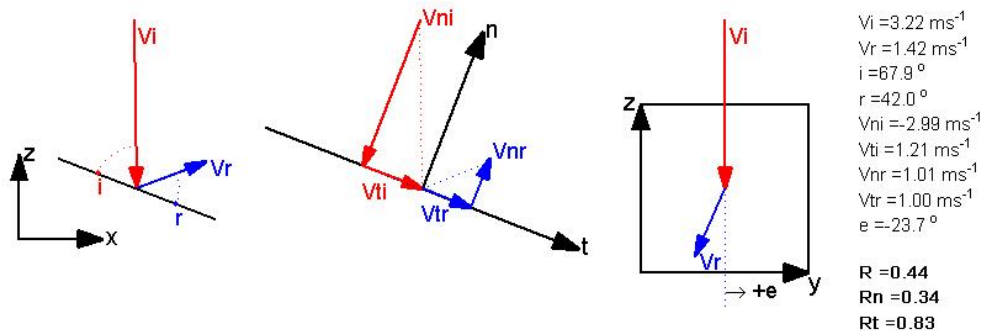
E-L-20-7



E-L-20-8



E-L-20-9

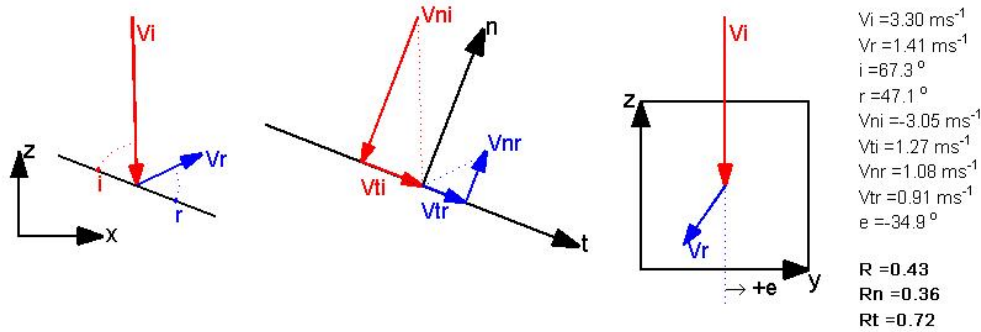


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

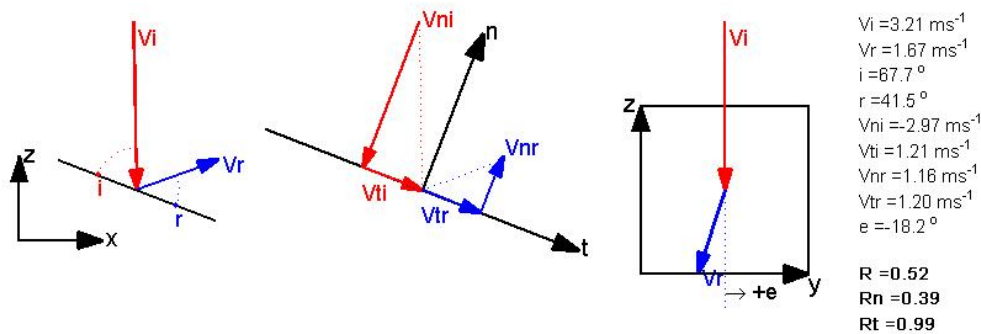


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

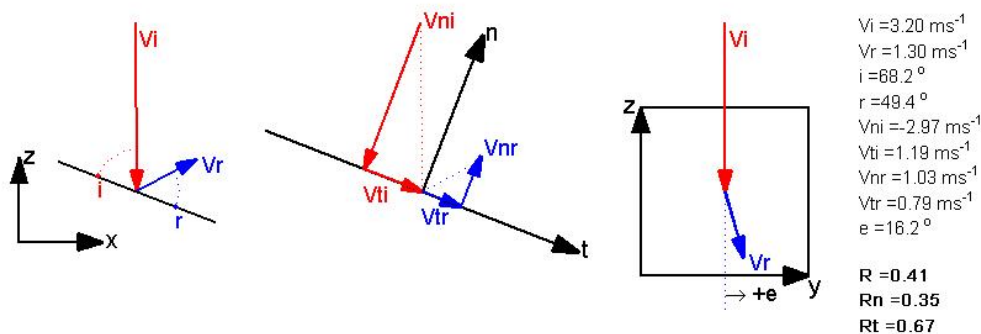
E-L-20-10



E-L-20-11



E-L-20-12

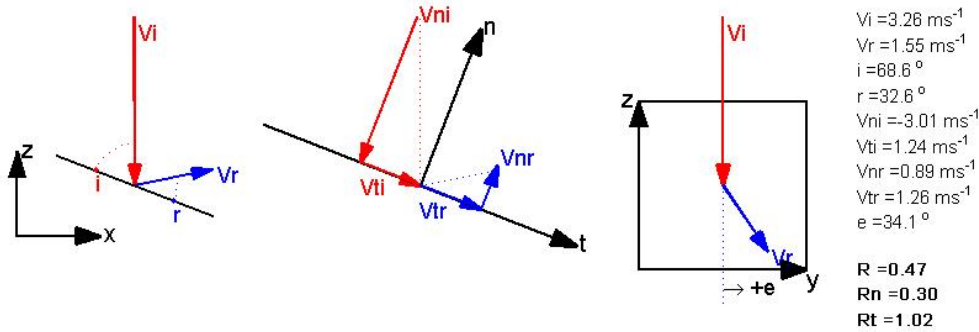


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

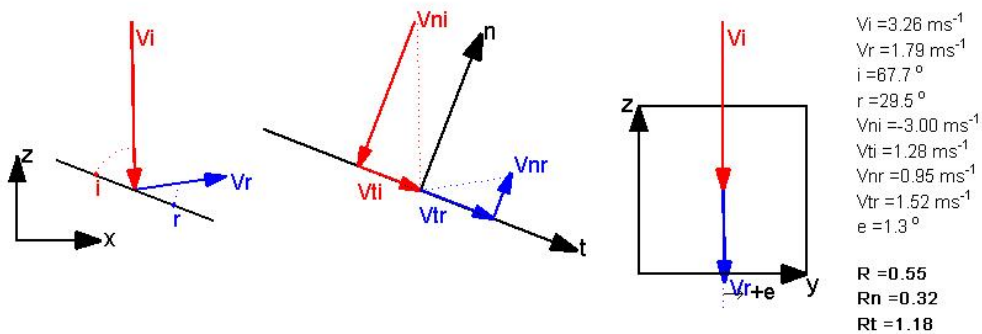


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

E-L-20-13



E-L-20-14



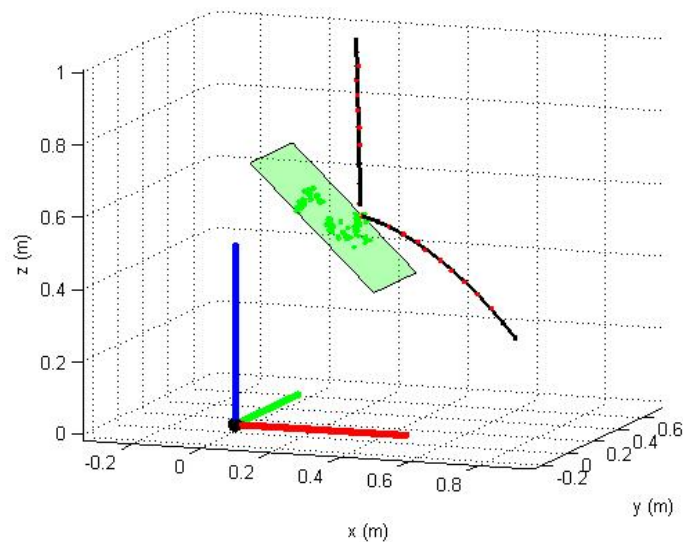


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ VII

ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ
ΠΟΛΥΓΩΝΙΚΟ ΔΟΚΙΜΙΟ
ΚΛΙΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ: 45°

α/α	V_i (m/s)	V_r (m/s)	$V_{n,i}$ (m/s)	$V_{t,i}$ (m/s)	$V_{n,r}$ (m/s)	$V_{t,r}$ (m/s)	R	Rn	Rt	e ($^\circ$)	i ($^\circ$)	r ($^\circ$)
1	3.36	2.19	-2.34	2.41	0.70	2.08	0.65	0.30	0.86	4.3	46.0	16.7
2	3.43	2.20	-2.37	2.48	0.65	2.10	0.64	0.27	0.85	11.4	43.5	15.4
3	3.46	2.14	-2.40	2.49	1.00	1.89	0.62	0.42	0.76	1.8	43.8	25.7
4	3.41	1.93	-2.39	2.43	1.53	1.17	0.57	0.64	0.48	31.6	46.5	50.1
5	3.42	2.57	-2.40	2.44	0.71	2.47	0.75	0.29	1.01	17.3	44.5	14.4
6	3.43	2.23	-2.43	2.42	0.94	2.02	0.65	0.39	0.83	5.2	45.0	23.1
7	3.44	2.11	-2.40	2.47	0.68	1.99	0.61	0.29	0.81	12.5	44.0	17.0
8	3.47	1.97	-2.41	2.50	0.73	1.83	0.57	0.30	0.73	5.0	43.9	19.6
9	3.34	1.83	-2.30	2.43	0.81	1.64	0.55	0.35	0.68	-6.5	44.7	23.9
10	3.35	1.73	-2.38	2.35	0.91	1.47	0.52	0.38	0.63	12.9	46.3	29.2
11	3.33	1.88	-2.34	2.37	1.54	1.09	0.57	0.66	0.46	12.9	46.5	52.4
12	3.39	2.06	-2.35	2.45	0.34	2.03	0.61	0.15	0.83	13.3	43.7	7.8
13	3.42	2.16	-2.38	2.45	1.31	1.72	0.63	0.55	0.70	2.3	46.1	35.2
14	3.43	1.83	-2.40	2.45	1.15	1.42	0.53	0.48	0.58	34.9	46.2	36.5

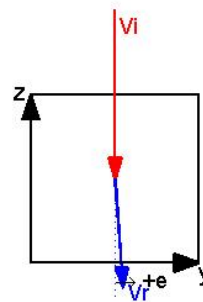
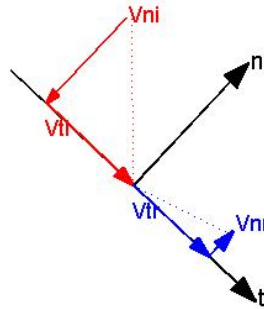
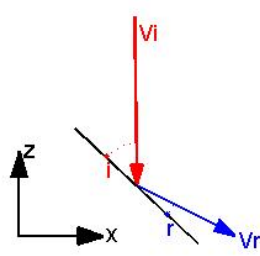


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ



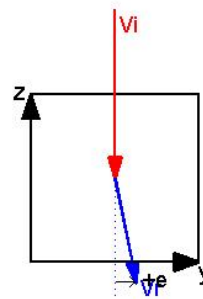
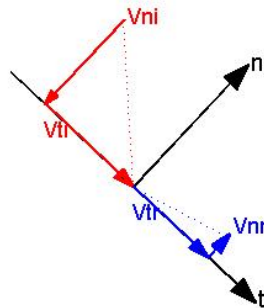
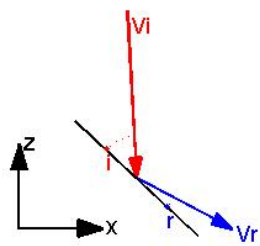
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

E-L-45-1



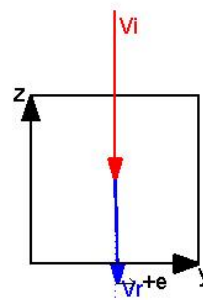
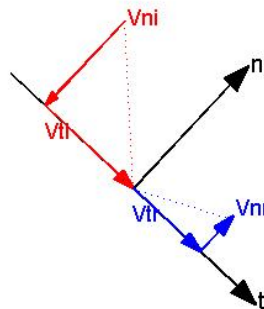
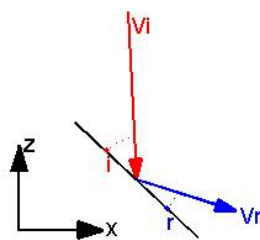
$V_i = 3.36 \text{ ms}^{-1}$
 $V_r = 2.19 \text{ ms}^{-1}$
 $i = 46.0^\circ$
 $r = 16.7^\circ$
 $V_{ni} = -2.34 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{ti} = 2.41 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{nr} = 0.70 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{tr} = 2.08 \text{ ms}^{-1}$
 $e = 4.3^\circ$
 $R = 0.65$
 $R_n = 0.30$
 $R_t = 0.86$

E-L-45-2



$V_i = 3.43 \text{ ms}^{-1}$
 $V_r = 2.20 \text{ ms}^{-1}$
 $i = 43.5^\circ$
 $r = 15.4^\circ$
 $V_{ni} = -2.37 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{ti} = 2.48 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{nr} = 0.65 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{tr} = 2.10 \text{ ms}^{-1}$
 $e = 11.4^\circ$
 $R = 0.64$
 $R_n = 0.27$
 $R_t = 0.85$

E-L-45-3

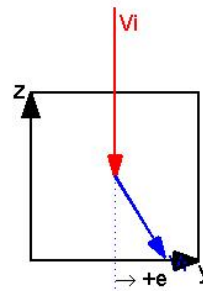
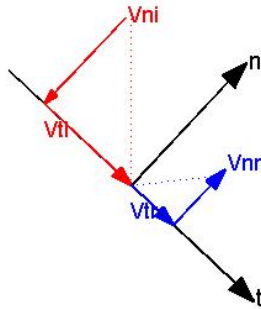
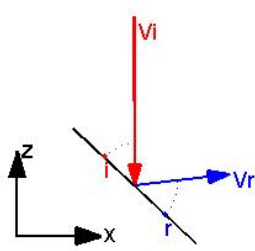


$V_i = 3.46 \text{ ms}^{-1}$
 $V_r = 2.14 \text{ ms}^{-1}$
 $i = 43.8^\circ$
 $r = 25.7^\circ$
 $V_{ni} = -2.40 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{ti} = 2.49 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{nr} = 1.00 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{tr} = 1.89 \text{ ms}^{-1}$
 $e = 1.8^\circ$
 $R = 0.62$
 $R_n = 0.42$
 $R_t = 0.76$



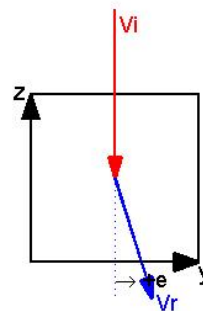
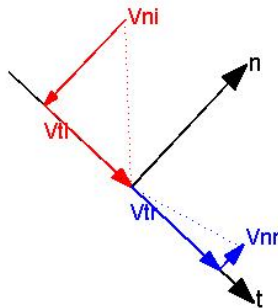
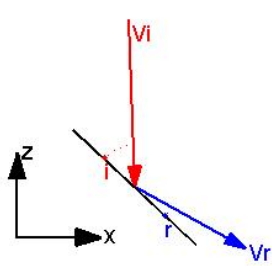
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

E-L-45-4



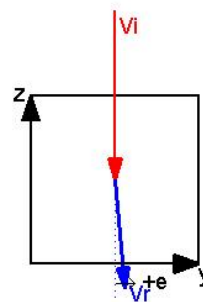
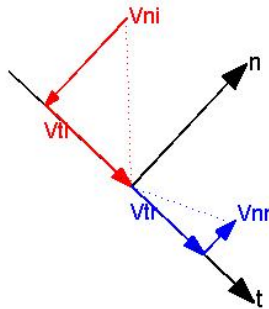
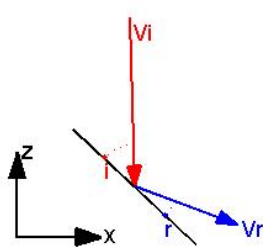
$V_i = 3.41 \text{ ms}^{-1}$
 $V_r = 1.93 \text{ ms}^{-1}$
 $i = 46.5^\circ$
 $r = 50.1^\circ$
 $V_{ni} = -2.39 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{ti} = 2.43 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{nr} = 1.53 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{tr} = 1.17 \text{ ms}^{-1}$
 $e = 31.6^\circ$
 $R = 0.57$
 $R_n = 0.64$
 $R_t = 0.48$

E-L-45-5



$V_i = 3.42 \text{ ms}^{-1}$
 $V_r = 2.57 \text{ ms}^{-1}$
 $i = 44.5^\circ$
 $r = 14.4^\circ$
 $V_{ni} = -2.40 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{ti} = 2.44 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{nr} = 0.71 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{tr} = 2.47 \text{ ms}^{-1}$
 $e = 17.3^\circ$
 $R = 0.75$
 $R_n = 0.29$
 $R_t = 1.01$

E-L-45-6



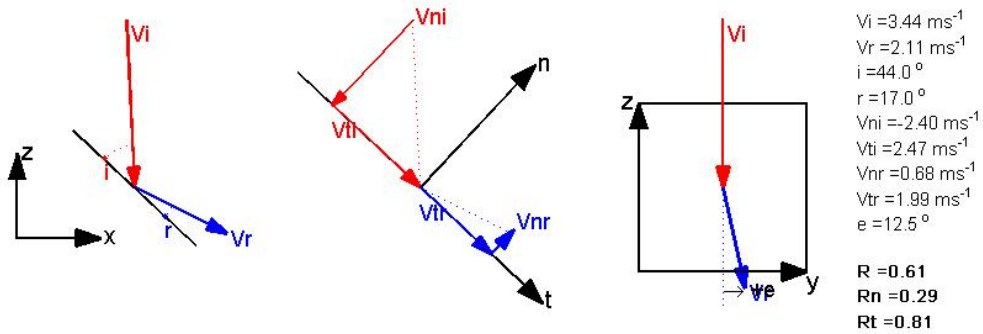
$V_i = 3.43 \text{ ms}^{-1}$
 $V_r = 2.23 \text{ ms}^{-1}$
 $i = 45.0^\circ$
 $r = 23.1^\circ$
 $V_{ni} = -2.43 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{ti} = 2.42 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{nr} = 0.94 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{tr} = 2.02 \text{ ms}^{-1}$
 $e = 5.2^\circ$
 $R = 0.65$
 $R_n = 0.39$
 $R_t = 0.83$

ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

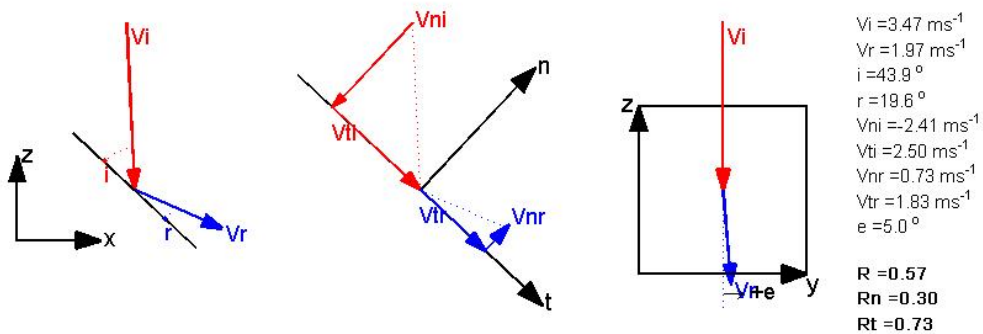


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

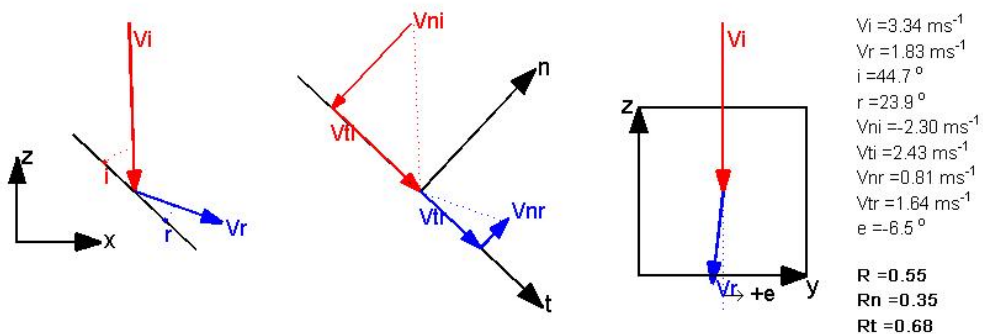
E-L-45-7



E-L-45-8



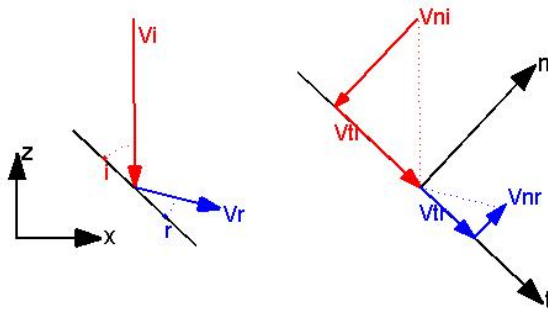
E-L-45-9





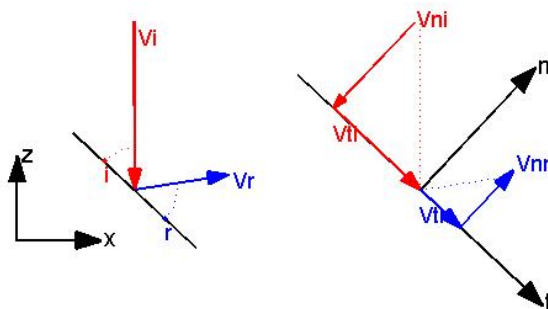
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

E-L-45-10



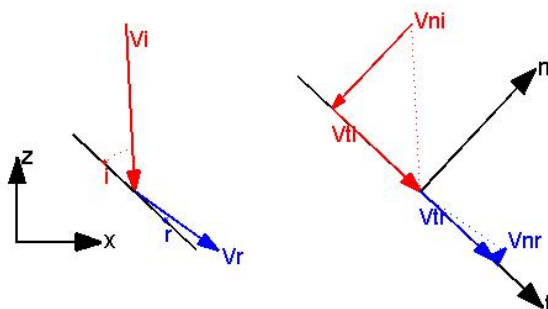
$V_i = 3.35 \text{ ms}^{-1}$
 $V_r = 1.73 \text{ ms}^{-1}$
 $i = 46.3^\circ$
 $r = 29.2^\circ$
 $V_{ni} = -2.38 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{ti} = 2.35 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{nr} = 0.91 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{tr} = 1.47 \text{ ms}^{-1}$
 $e = 12.9^\circ$
 $R = 0.52$
 $R_n = 0.38$
 $R_t = 0.63$

E-L-45-11



$V_i = 3.33 \text{ ms}^{-1}$
 $V_r = 1.88 \text{ ms}^{-1}$
 $i = 46.5^\circ$
 $r = 52.4^\circ$
 $V_{ni} = -2.34 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{ti} = 2.37 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{nr} = 1.54 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{tr} = 1.09 \text{ ms}^{-1}$
 $e = 12.9^\circ$
 $R = 0.57$
 $R_n = 0.66$
 $R_t = 0.46$

E-L-45-12

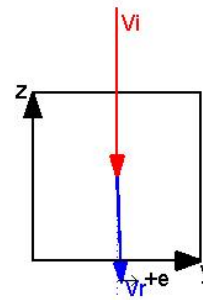
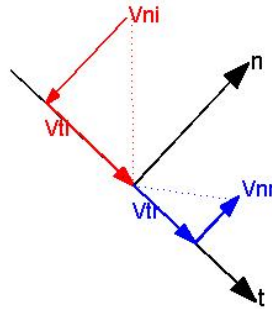
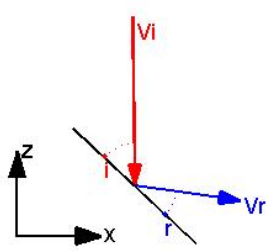


$V_i = 3.39 \text{ ms}^{-1}$
 $V_r = 2.06 \text{ ms}^{-1}$
 $i = 43.7^\circ$
 $r = 7.8^\circ$
 $V_{ni} = -2.35 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{ti} = 2.45 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{nr} = 0.34 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{tr} = 2.03 \text{ ms}^{-1}$
 $e = 13.3^\circ$
 $R = 0.61$
 $R_n = 0.15$
 $R_t = 0.83$



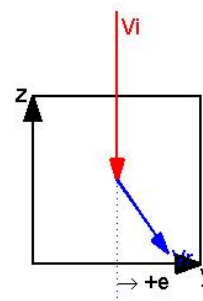
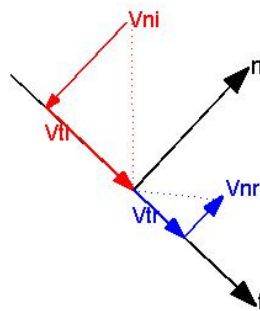
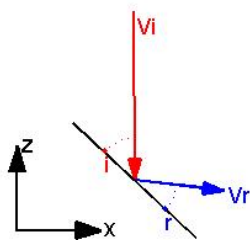
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

E-L-45-13



$V_i = 3.42 \text{ ms}^{-1}$
 $V_r = 2.18 \text{ ms}^{-1}$
 $i = 46.1^\circ$
 $r = 35.2^\circ$
 $V_{ni} = -2.38 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{ti} = 2.45 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{nr} = 1.31 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{tr} = 1.72 \text{ ms}^{-1}$
 $e = 2.3^\circ$
 $R = 0.63$
 $R_n = 0.55$
 $R_t = 0.70$

E-L-45-14



$V_i = 3.43 \text{ ms}^{-1}$
 $V_r = 1.83 \text{ ms}^{-1}$
 $i = 46.2^\circ$
 $r = 36.5^\circ$
 $V_{ni} = -2.40 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{ti} = 2.45 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{nr} = 1.15 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{tr} = 1.42 \text{ ms}^{-1}$
 $e = 34.9^\circ$
 $R = 0.53$
 $R_n = 0.48$
 $R_t = 0.58$

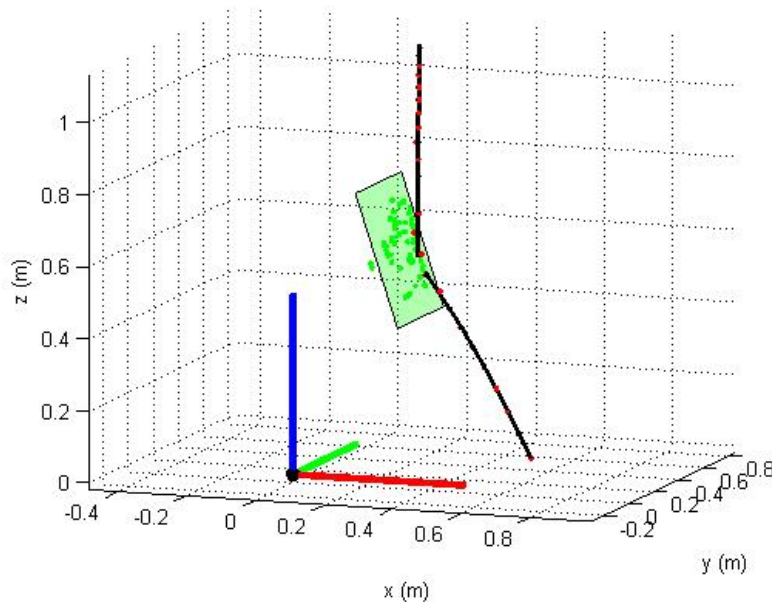


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ VIII

ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ
ΠΟΛΥΓΩΝΙΚΟ ΔΟΚΙΜΙΟ
ΚΛΙΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ: 70°

α/α	V_i (m/s)	V_r (m/s)	$V_{n,i}$ (m/s)	$V_{t,i}$ (m/s)	$V_{n,r}$ (m/s)	$V_{t,r}$ (m/s)	R	R _n	R _t	e (°)	i (°)	r (°)
1	3,57	3,48	-1,10	3,40	0,30	3,47	0,98	0,27	1,02	4,8	17,9	4,4
2	3,19	2,88	-0,97	3,03	0,50	2,84	0,90	0,51	0,93	-2,5	17,7	9,3
3	3,48	3,33	-1,07	3,31	0,94	3,19	0,96	0,88	0,96	16,0	17,9	15,7
4	3,10	2,79	-0,90	2,97	0,76	2,68	0,90	0,85	0,90	-11,1	16,8	15,0
5	3,14	3,03	-0,83	3,02	0,20	3,02	0,97	0,24	1,00	-2,3	17,3	3,2
6	3,31	2,93	-0,94	3,17	0,72	2,84	0,88	0,77	0,89	-7,3	17,1	13,5
7	3,21	2,69	-0,90	3,08	0,36	2,66	0,84	0,40	0,86	4,8	17,1	6,9
8	3,56	3,20	-1,09	3,39	0,22	3,19	0,90	0,20	0,94	12,7	17,7	3,4
9	3,27	2,65	-1,00	3,12	0,65	2,57	0,81	0,65	0,83	-1,0	17,7	13,2
10	3,27	3,01	-0,98	3,12	0,63	2,94	0,92	0,64	0,94	7,0	16,8	11,2
11	3,33	2,71	-0,91	3,20	1,19	2,43	0,81	1,30	0,76	1,1	16,8	25,0
12	3,40	3,29	-1,02	3,25	0,71	3,21	0,97	0,70	0,99	-5,3	17,4	11,8
13	3,37	3,04	-0,98	3,22	0,31	3,03	0,90	0,32	0,94	4,4	17,6	5,2

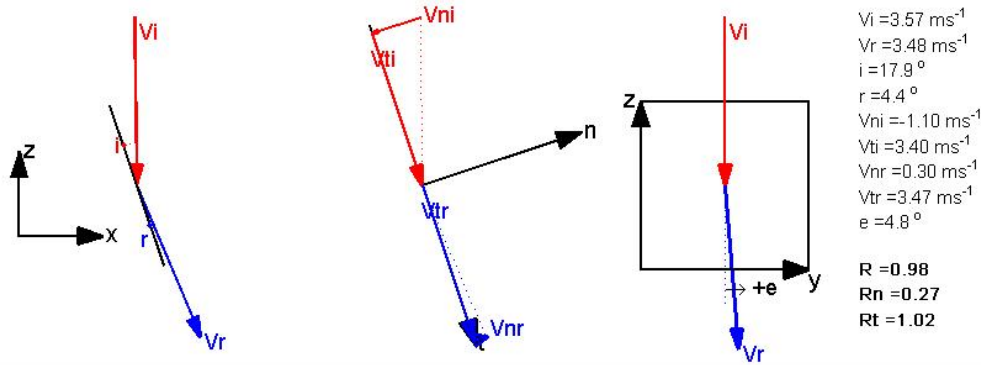


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

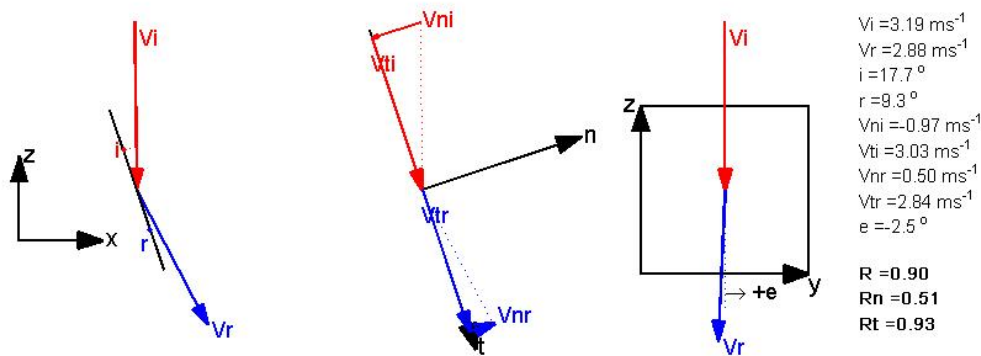


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

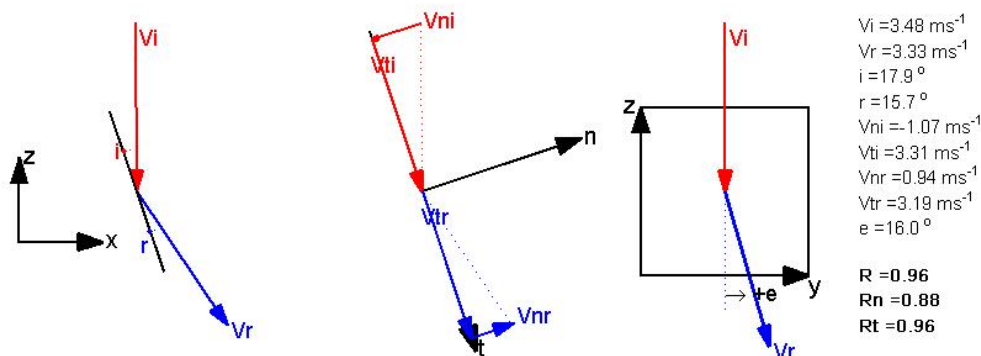
E-L-70-1



E-L-70-2



E-L-70-3

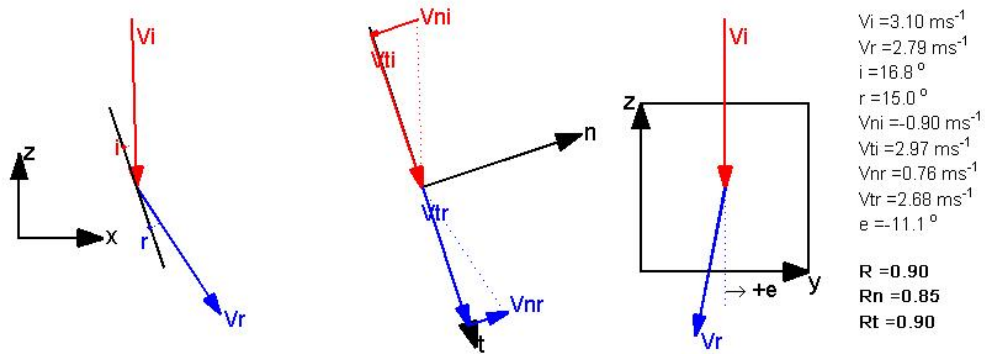


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

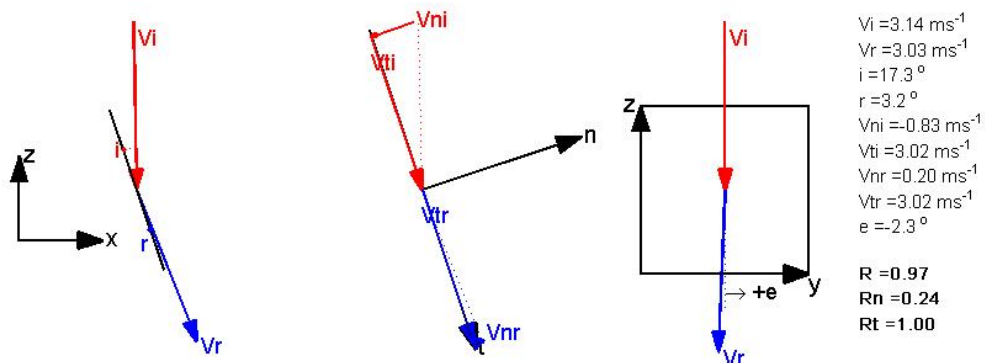


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

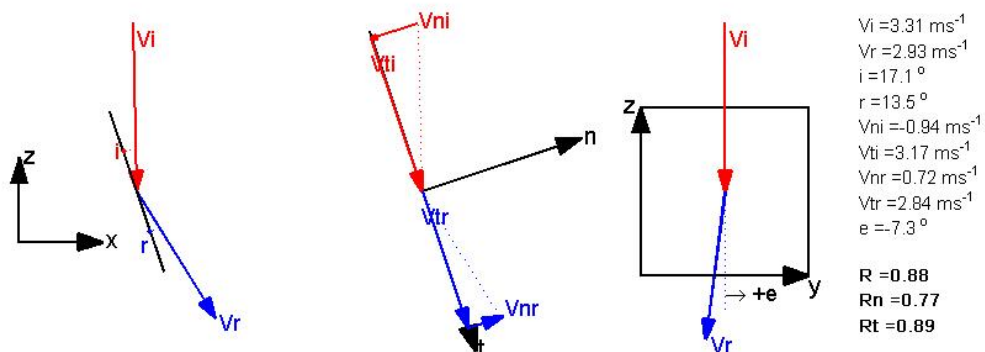
E-L-70-4



E-L-70-5



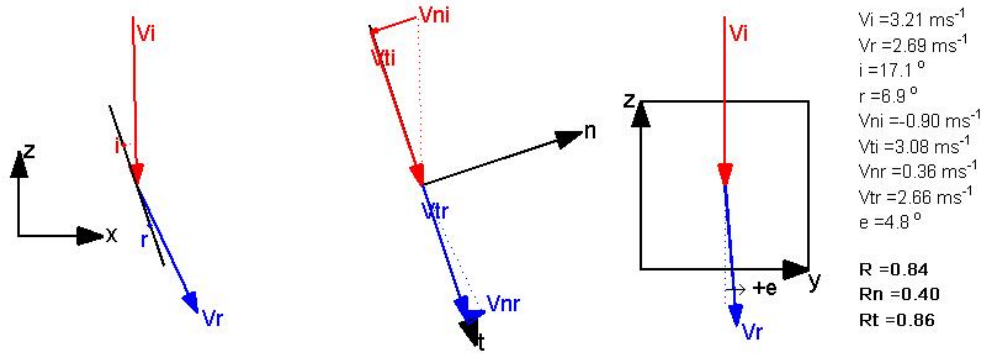
E-L-70-6



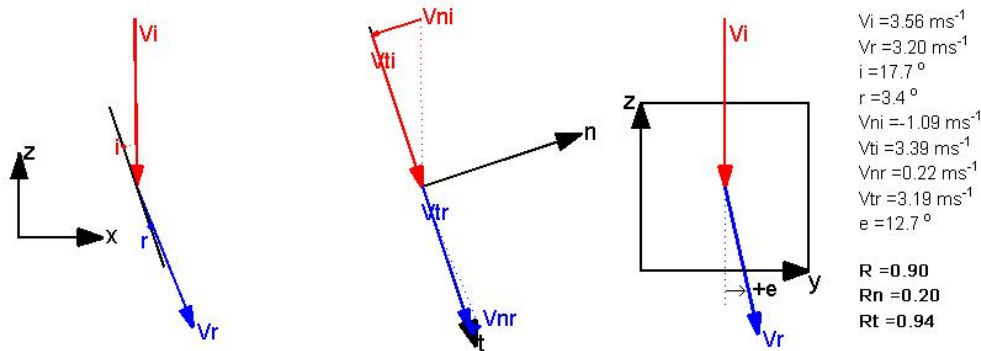


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

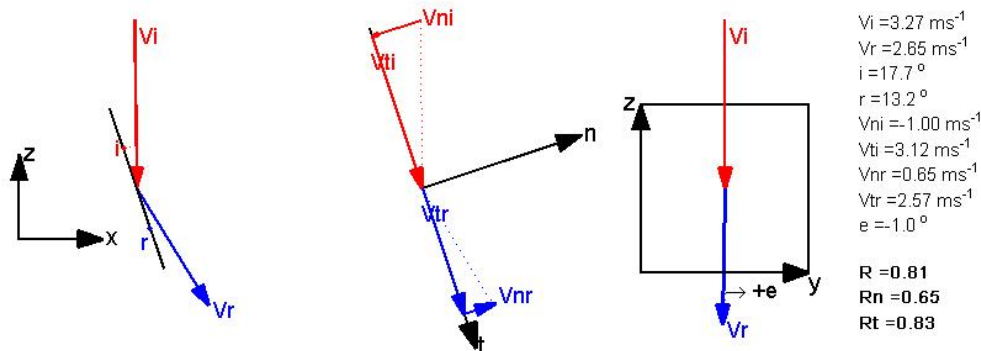
E-L-70-7



E-L-70-8



E-L-70-9

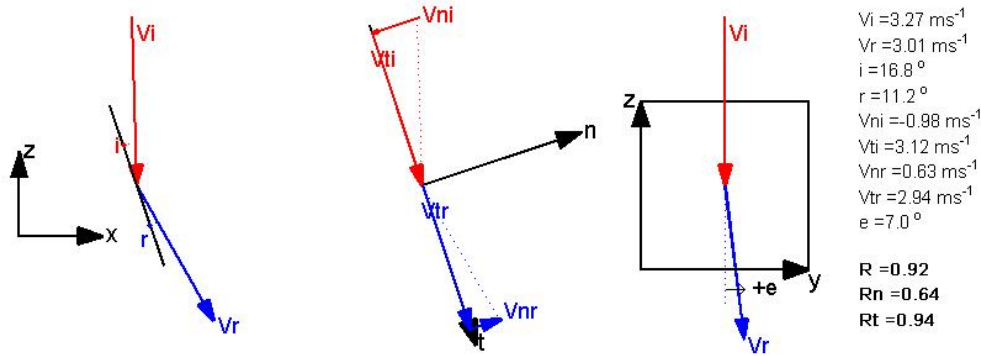


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

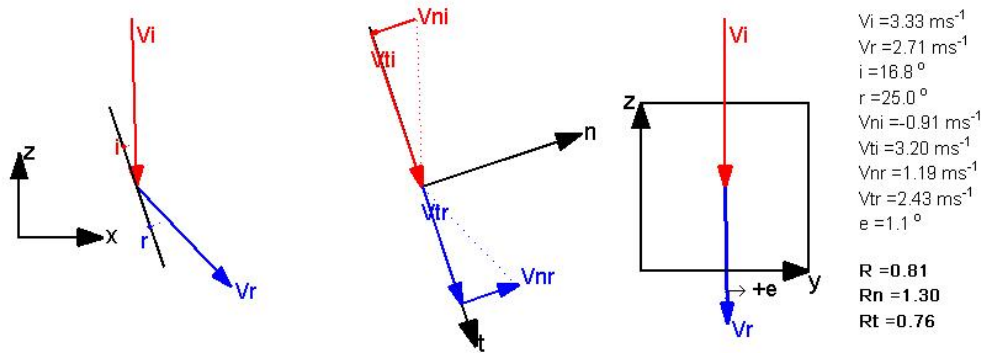


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

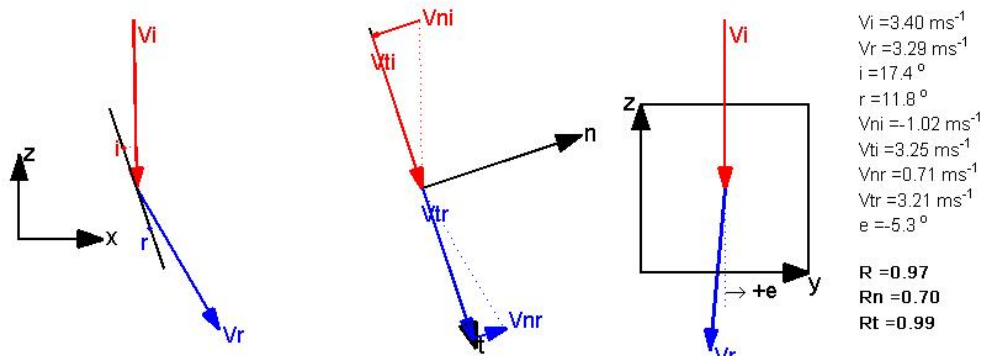
E-L-70-10



E-L-70-11



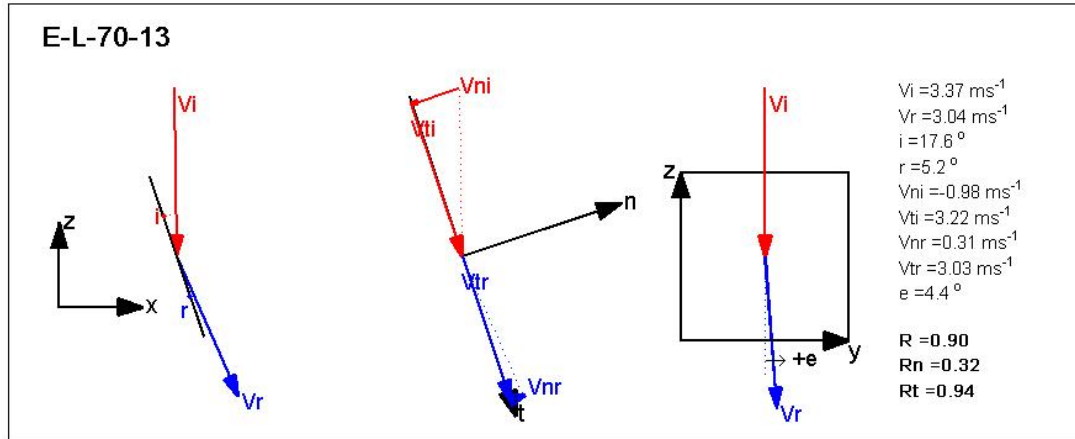
E-L-70-12



ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ



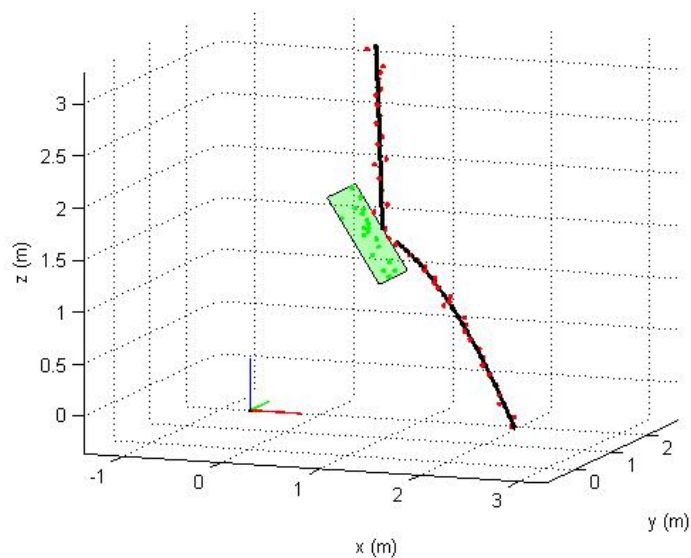


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΧ

ΔΟΚΙΜΕΣ ΠΕΔΙΟΥ
ΠΟΛΥΓΩΝΙΚΟ ΔΟΚΙΜΙΟ
ΚΛΙΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ: 55°

α/α	V_i (m/s)	V_r (m/s)	$V_{n,i}$ (m/s)	$V_{t,i}$ (m/s)	$V_{n,r}$ (m/s)	$V_{t,r}$ (m/s)	R	Rn	Rt	e (°)	i (°)	r (°)
1	7,21	3,57	-3,81	6,13	0,90	3,46	0,50	0,24	0,56	28,2	31,8	13,6
2	7,36	4,77	-3,77	6,33	1,08	4,65	0,65	0,29	0,73	-4,7	30,7	12,4
3	7,47	4,50	-3,62	6,54	0,65	4,45	0,60	0,18	0,68	-5,1	28,8	7,7
4	7,38	4,89	-3,30	6,60	1,28	4,72	0,66	0,39	0,71	-17,1	26,4	14,3
5	7,37	5,97	-3,22	6,63	1,02	5,89	0,81	0,32	0,89	-14,4	25,7	9,4
6	8,35	5,23	-3,60	7,54	0,95	5,15	0,63	0,26	0,68	15,9	25,3	9,8
7	7,24	4,98	-3,30	6,45	0,59	4,94	0,69	0,18	0,77	-10,3	27,0	6,2
8	7,56	4,08	-3,88	6,49	1,00	3,95	0,54	0,26	0,61	2,5	30,8	13,4
9	7,34	5,11	-3,49	6,46	1,03	5,01	0,70	0,29	0,78	-13,7	28,3	11,0
10	7,45	4,86	-3,51	6,57	1,94	4,46	0,65	0,55	0,68	-18,9	28,0	22,4
11	7,66	3,99	-3,73	6,69	1,05	3,85	0,52	0,28	0,58	-12,1	29,0	14,2
12	7,84	5,69	-3,67	6,94	1,17	5,57	0,72	0,32	0,80	-21,2	27,7	11,4
13	7,67	5,09	-3,71	6,72	0,49	5,07	0,66	0,13	0,75	3,4	28,8	4,9
14	7,56	3,99	-3,28	6,81	0,89	3,89	0,53	0,27	0,57	-20,0	25,5	12,1
15	7,78	4,52	-3,39	7,01	1,21	4,35	0,58	0,36	0,62	-3,1	25,7	14,9

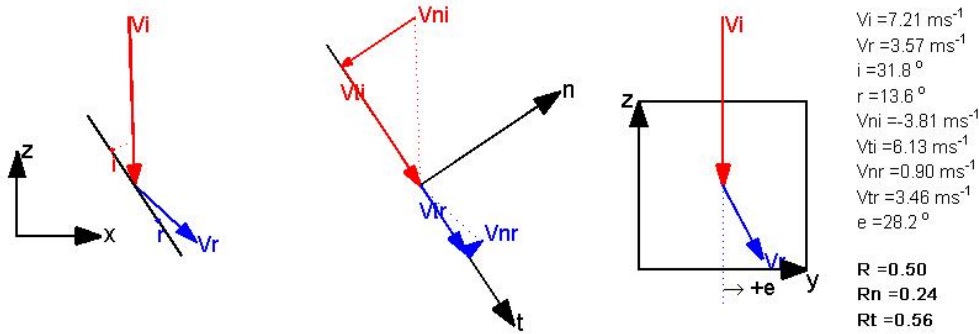


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

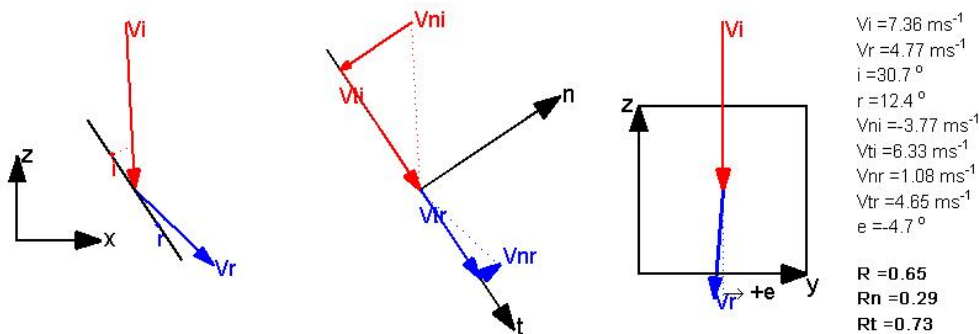


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

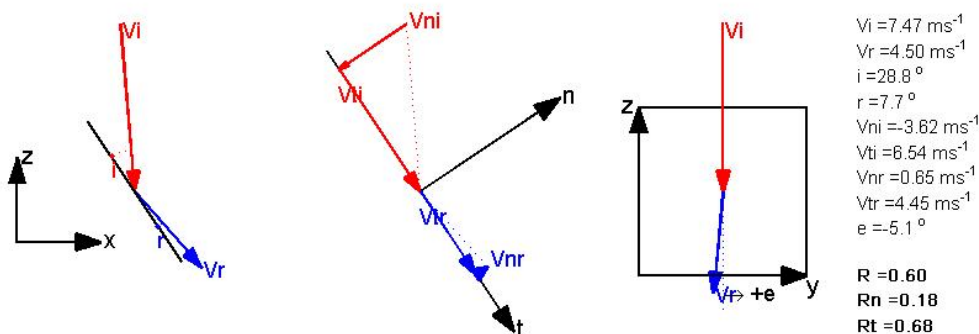
E-F-55-1



E-F-55-2



E-F-55-3

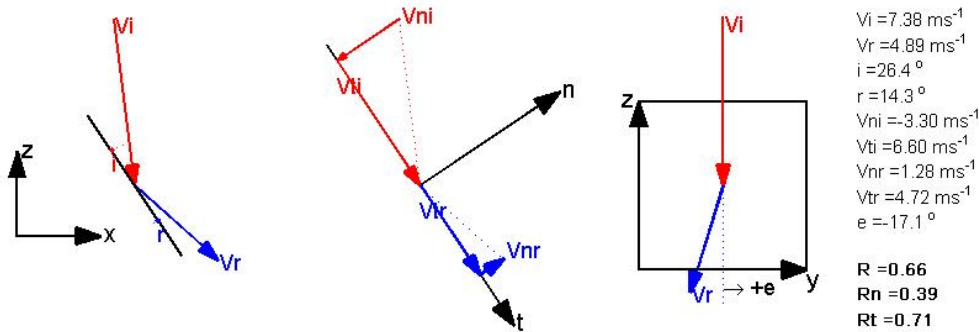


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

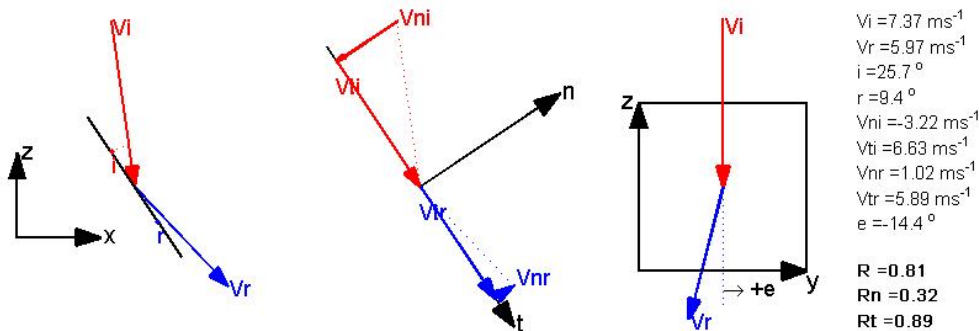


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

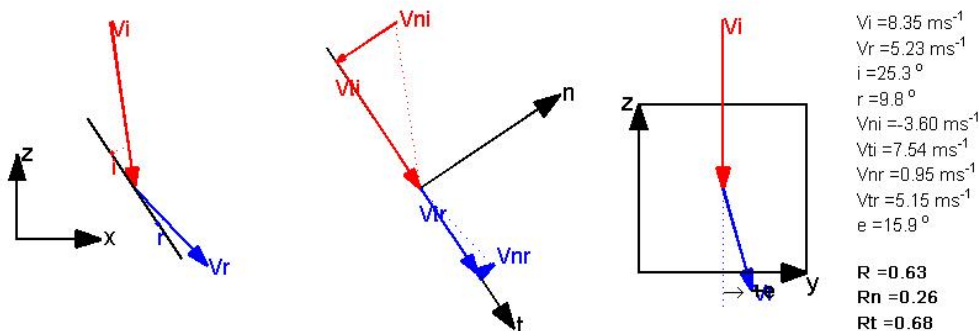
E-F-55-4



E-F-55-5



E-F-55-6

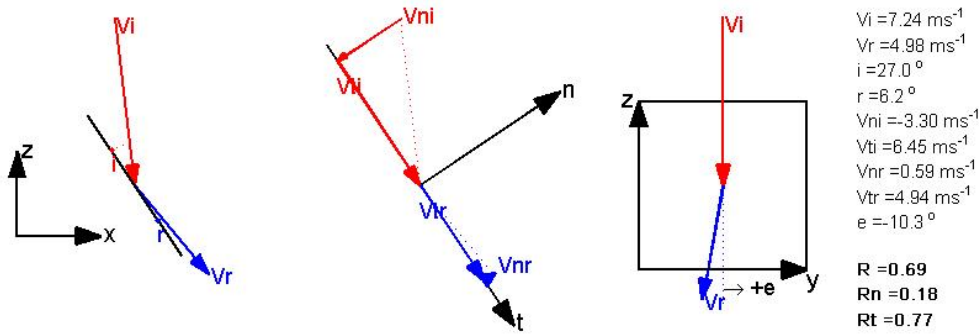


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

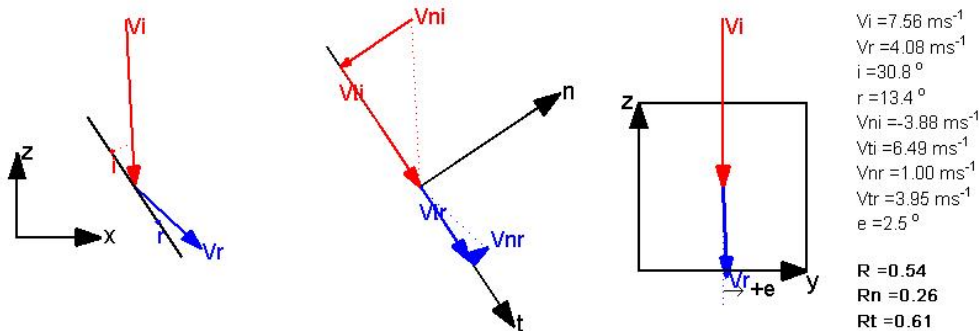


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

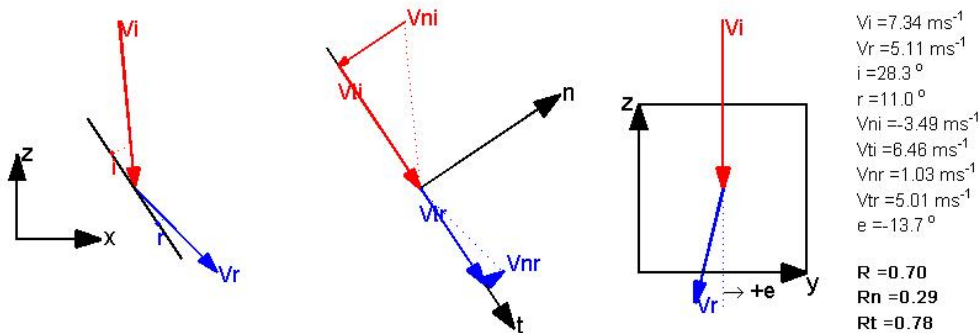
E-F-55-7



E-F-55-8



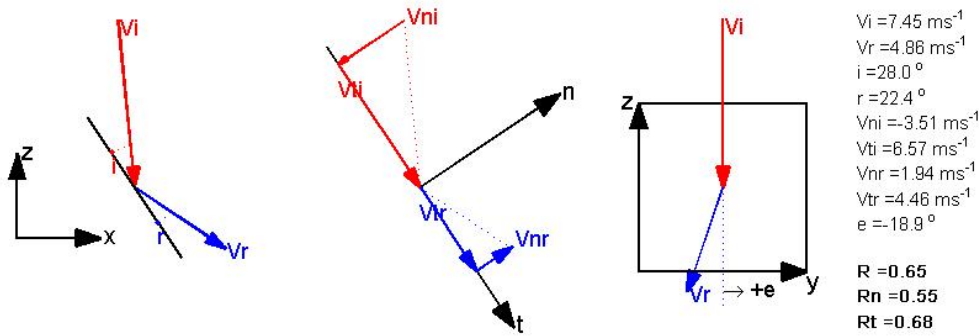
E-F-55-9



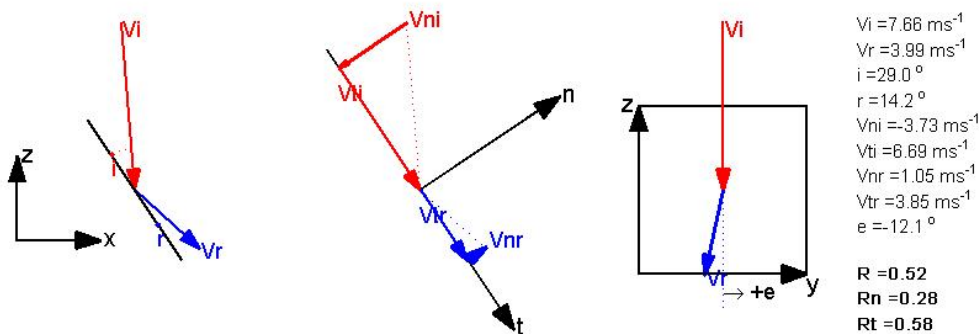


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

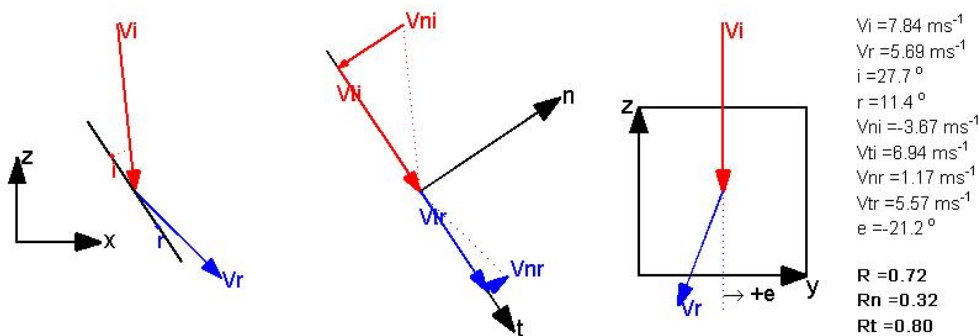
E-F-55-10



E-F-55-11



E-F-55-12

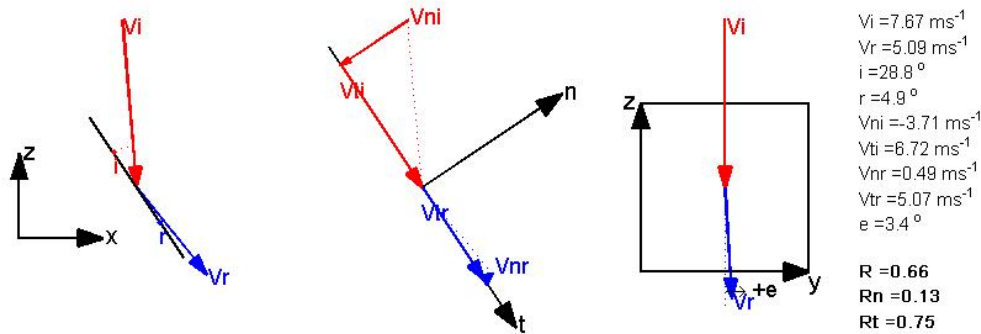


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

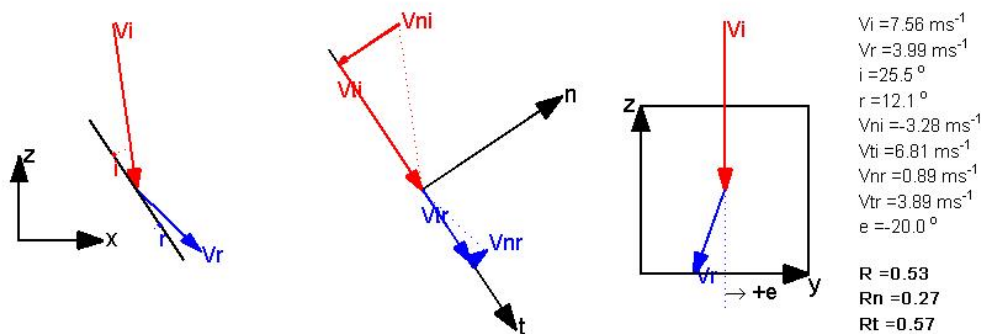


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

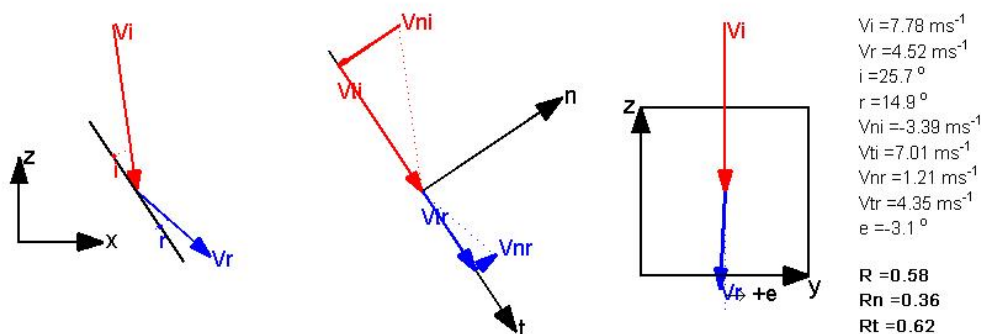
E-F-55-13



E-F-55-14



E-F-55-15



ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

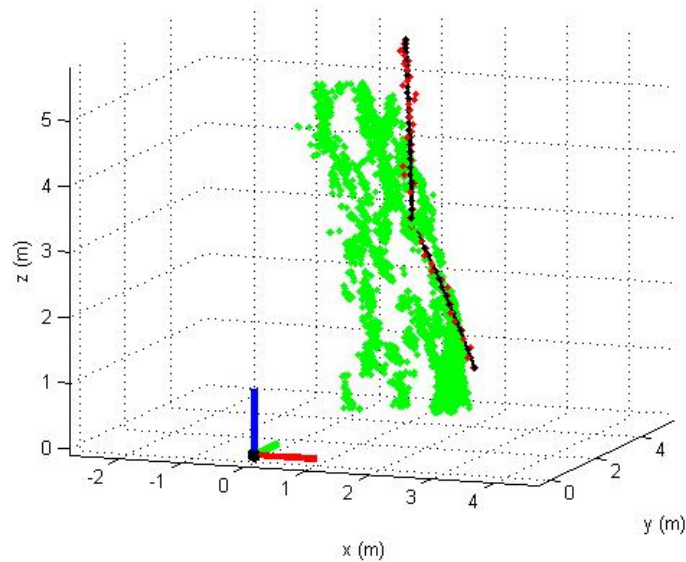


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Χ

ΔΟΚΙΜΕΣ ΠΕΔΙΟΥ
ΠΟΛΥΓΩΝΙΚΟ ΔΟΚΙΜΙΟ
ΚΛΙΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ: 75°

α/α	V_i (m/s)	V_r (m/s)	$V_{n,i}$ (m/s)	$V_{t,i}$ (m/s)	$V_{n,r}$ (m/s)	$V_{t,r}$ (m/s)	R	R _n	R _t	e (°)	i (°)	r (°)
1	7,58	6,14	-1,55	7,42	1,90	5,84	0,81	1,22	0,79	20,4	11,7	16,9
2	8,10	7,32	-1,66	7,93	1,61	7,14	0,90	0,97	0,90	30,7	11,7	11,9
3	8,61	7,51	-1,61	8,46	1,69	7,32	0,87	1,05	0,86	8,2	10,6	12,1
4	9,07	7,50	-1,42	8,96	4,14	6,26	0,83	2,91	0,70	52,2	8,8	32,2
5	9,41	7,95	-1,69	9,26	2,35	7,59	0,84	1,39	0,82	9,0	10,2	16,4
6	8,60	7,20	-1,67	8,43	1,91	6,94	0,84	1,14	0,82	33,1	11,1	14,5
7	8,33	7,11	-1,92	8,10	2,29	6,73	0,85	1,19	0,83	19,7	13,3	17,7
8	8,40	7,23	-1,80	8,21	1,79	7,00	0,86	0,99	0,85	8,8	12,3	13,4
9	8,13	6,96	-1,53	7,98	2,25	6,59	0,86	1,47	0,83	17,2	10,7	17,7
10	7,60	6,88	-1,19	7,50	2,22	6,51	0,91	1,87	0,87	35,9	8,8	17,8
11	8,22	6,07	-1,30	8,11	1,97	5,75	0,74	1,52	0,71	30,5	8,9	17,8
12	7,79	6,28	-1,73	7,59	1,13	6,18	0,81	0,65	0,81	-0,5	12,8	9,7
13	9,08	7,64	-1,91	8,88	1,91	7,40	0,84	1,00	0,83	3,3	12,1	13,9
14	8,70	7,96	-1,88	8,50	2,14	7,67	0,91	1,14	0,90	10,7	12,4	15,4

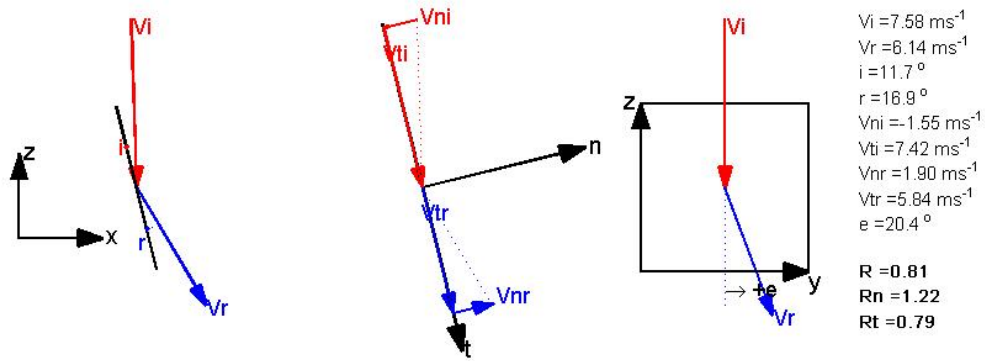


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

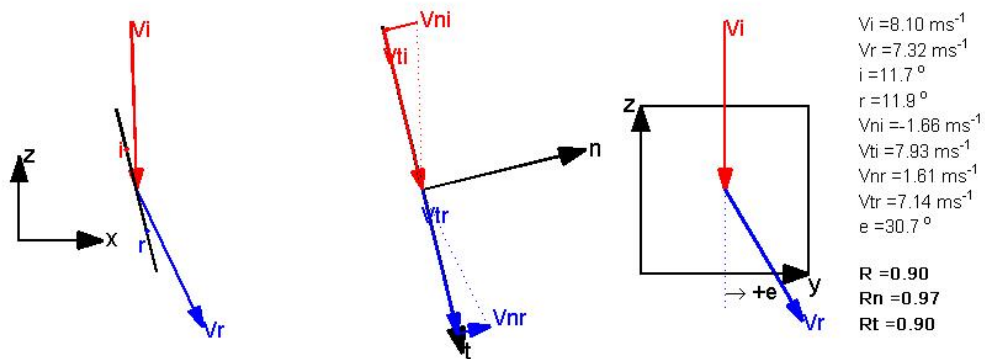


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

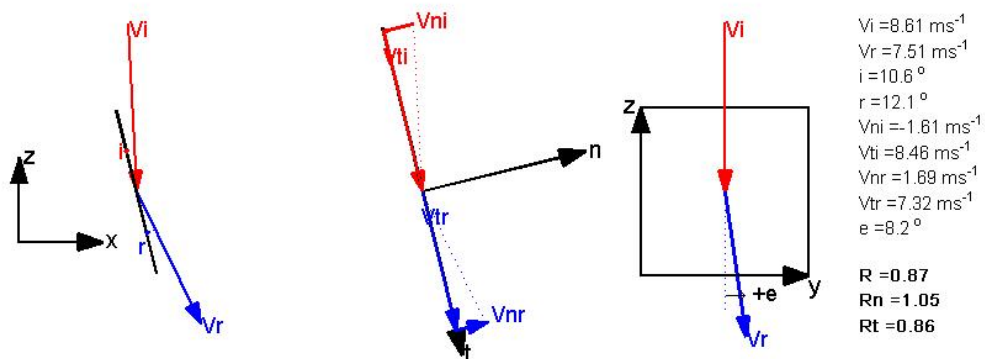
E-F-75-1



E-F-75-2



E-F-75-3

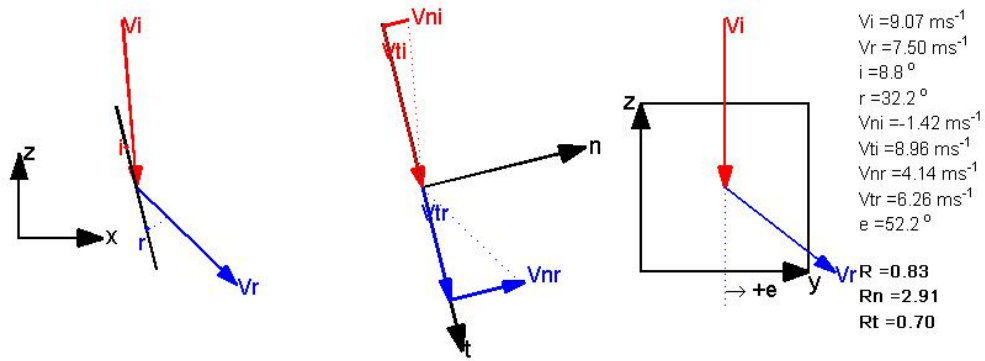


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

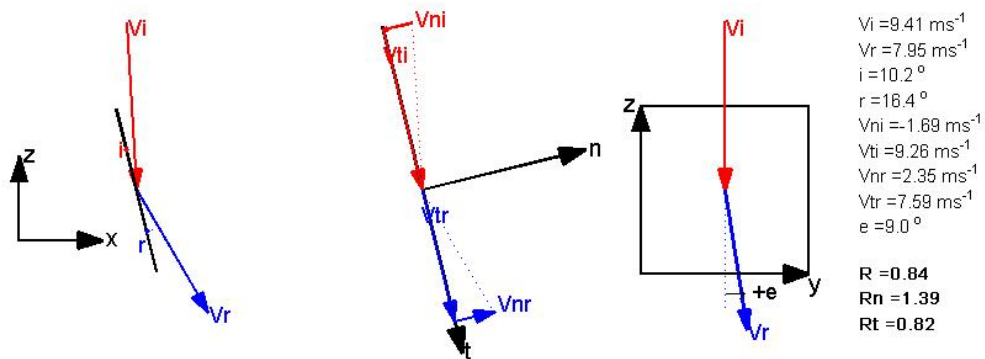


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

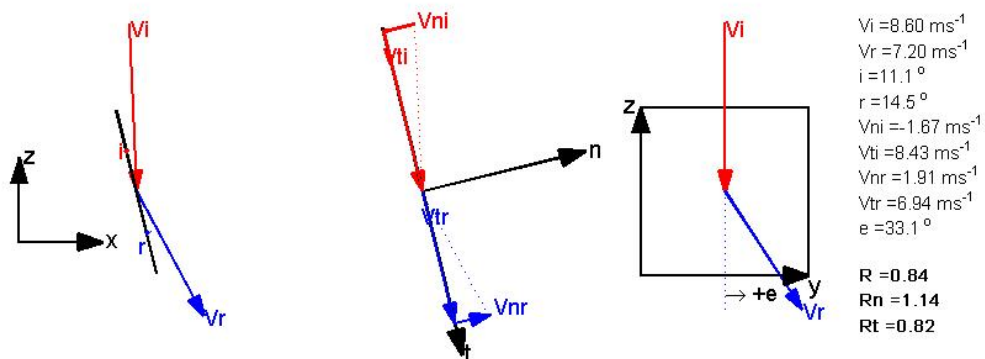
E-F-75-4



E-F-75-5



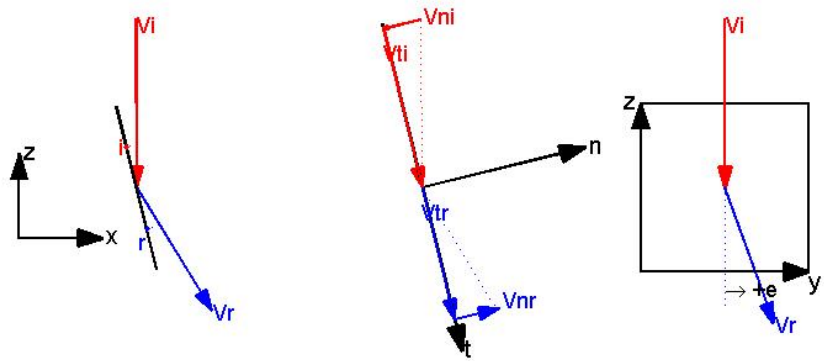
E-F-75-6





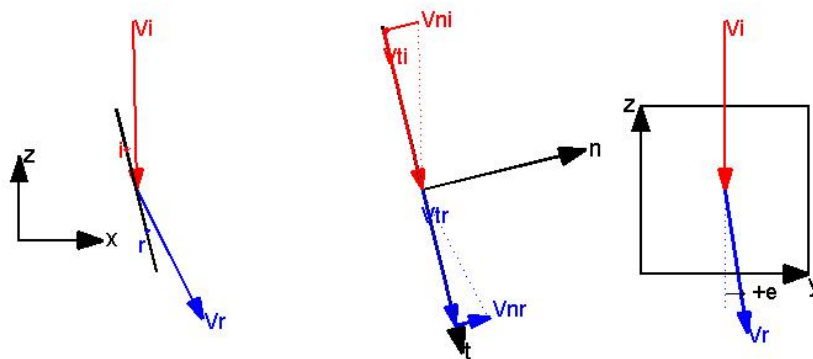
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

E-F-75-7



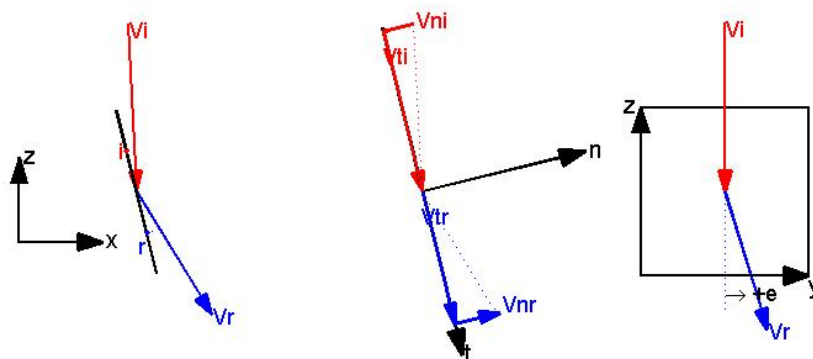
$V_i = 8.33 \text{ ms}^{-1}$
 $V_r = 7.11 \text{ ms}^{-1}$
 $i = 13.3^\circ$
 $r = 17.7^\circ$
 $V_{ni} = -1.92 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{ti} = 8.10 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{nr} = 2.29 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{tr} = 6.73 \text{ ms}^{-1}$
 $e = 19.7^\circ$
 $R = 0.85$
 $R_n = 1.19$
 $R_t = 0.83$

E-F-75-8



$V_i = 8.40 \text{ ms}^{-1}$
 $V_r = 7.23 \text{ ms}^{-1}$
 $i = 12.3^\circ$
 $r = 13.4^\circ$
 $V_{ni} = -1.80 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{ti} = 8.21 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{nr} = 1.79 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{tr} = 7.00 \text{ ms}^{-1}$
 $e = 8.8^\circ$
 $R = 0.86$
 $R_n = 0.99$
 $R_t = 0.85$

E-F-75-9

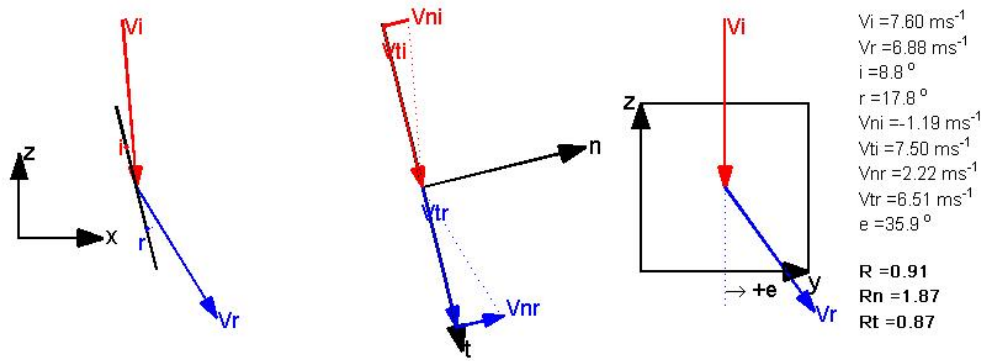


$V_i = 8.13 \text{ ms}^{-1}$
 $V_r = 6.98 \text{ ms}^{-1}$
 $i = 10.7^\circ$
 $r = 17.7^\circ$
 $V_{ni} = -1.53 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{ti} = 7.98 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{nr} = 2.25 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{tr} = 6.59 \text{ ms}^{-1}$
 $e = 17.2^\circ$
 $R = 0.86$
 $R_n = 1.47$
 $R_t = 0.83$

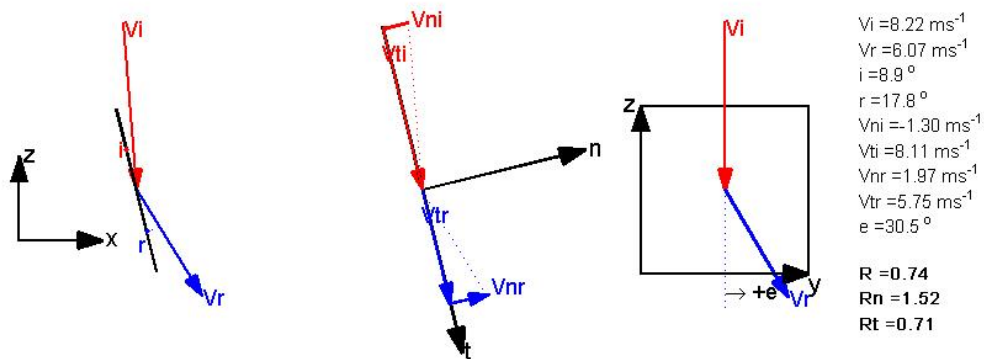


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

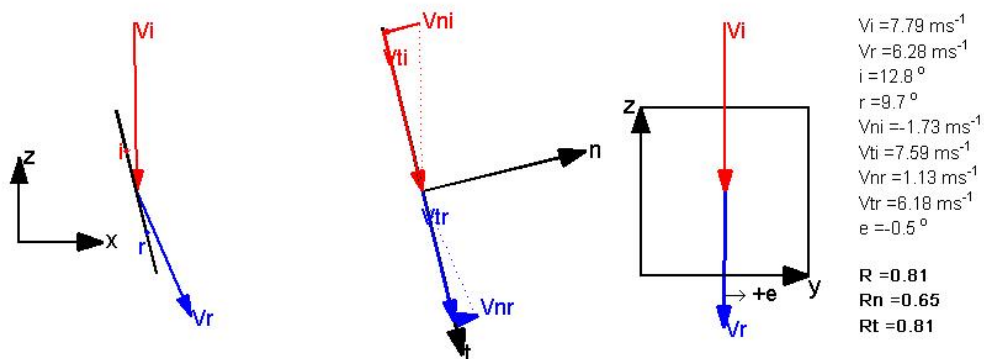
E-F-75-10



E-F-75-11



E-F-75-12

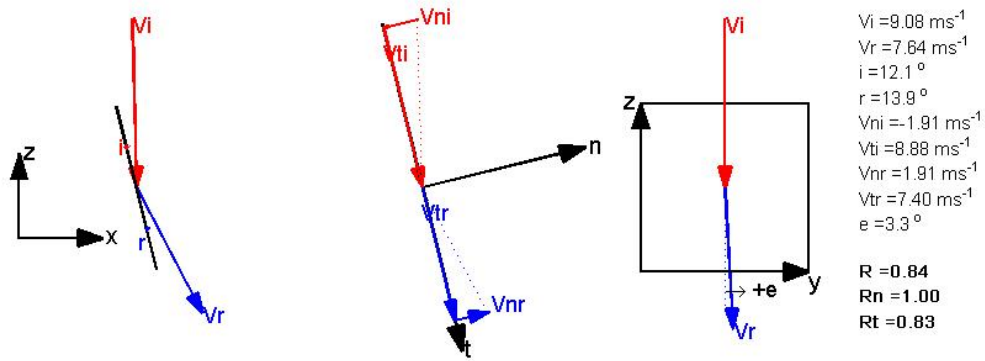


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

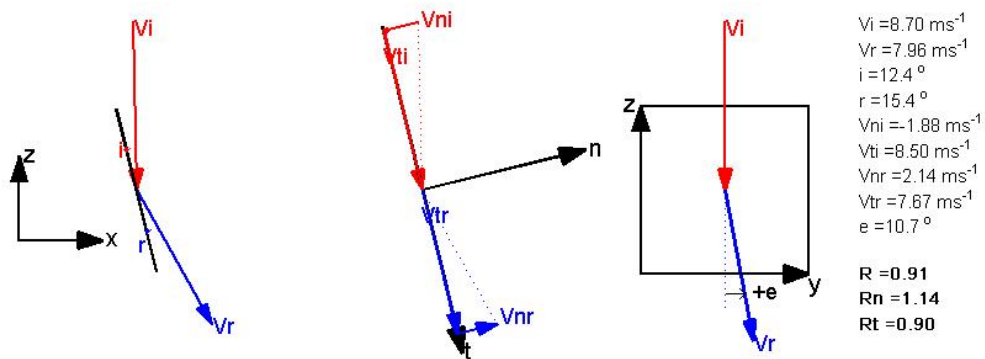


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

E-F-75-13



E-F-75-14



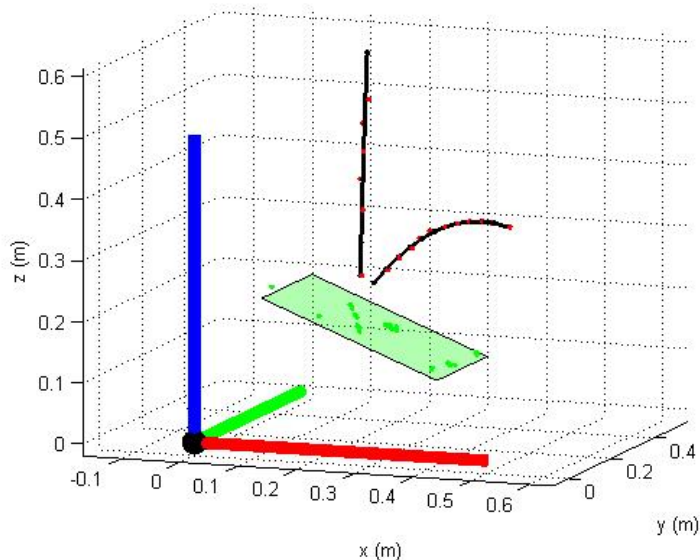


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΧΙ

ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ
ΣΦΑΙΡΙΚΟ ΔΟΚΙΜΙΟ
ΚΛΙΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ: 20°

α/α	V_i (m/s)	V_r (m/s)	$V_{n,i}$ (m/s)	$V_{t,i}$ (m/s)	$V_{n,r}$ (m/s)	$V_{t,r}$ (m/s)	R	R_n	R_t	e (°)	i (°)	r (°)
1	3,17	1,97	-2,94	1,18	1,73	0,93	0,62	0,59	0,79	-0,3	68,1	60,1
2	3,20	1,60	-2,96	1,21	0,76	1,41	0,50	0,26	1,16	19,3	67,7	25,4
3	3,26	1,40	-2,99	1,32	0,59	1,27	0,43	0,20	0,97	-8,1	67,5	21,5
4	3,35	2,23	-3,11	1,26	1,80	1,31	0,66	0,58	1,03	3,1	67,8	52,3
5	3,16	1,53	-2,90	1,25	1,39	0,64	0,48	0,48	0,51	16,4	67,6	62,9
6	3,29	1,82	-3,03	1,29	1,16	1,39	0,55	0,38	1,08	32,6	67,7	37,5
7	3,26	1,96	-3,02	1,21	0,44	1,91	0,60	0,14	1,58	31,1	68,1	10,4
8	3,20	1,73	-2,98	1,17	1,68	0,42	0,54	0,56	0,36	26,4	68,6	74,3
9	2,99	1,50	-2,74	1,19	1,39	0,56	0,50	0,51	0,47	-42,7	67,4	65,9
10	3,17	2,05	-2,94	1,19	1,76	1,05	0,65	0,60	0,88	-7,8	68,0	57,6
11	3,22	2,17	-2,99	1,20	1,75	1,29	0,67	0,58	1,07	0,4	68,1	51,7
12	3,25	1,84	-3,01	1,23	1,49	1,08	0,56	0,49	0,88	1,2	67,7	51,9
13	3,30	1,83	-3,05	1,28	1,72	0,61	0,55	0,57	0,48	5,2	68,2	68,7
14	3,16	1,90	-2,87	1,32	1,76	0,70	0,60	0,61	0,53	-8,0	67,5	66,6
15	3,14	1,82	-2,88	1,26	1,54	0,98	0,58	0,53	0,78	26,5	67,2	55,6

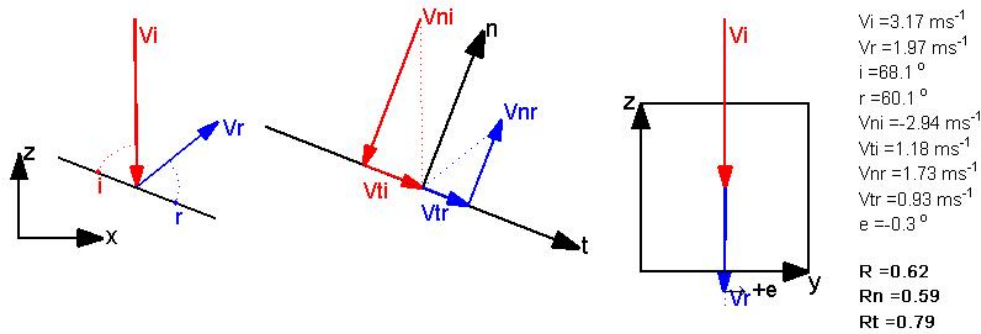


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

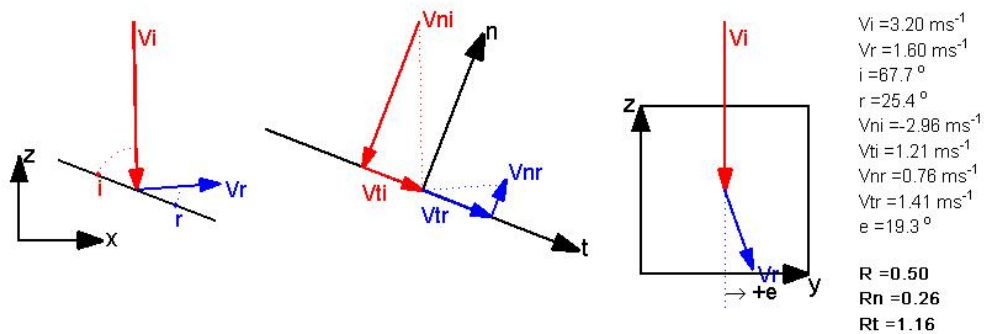


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

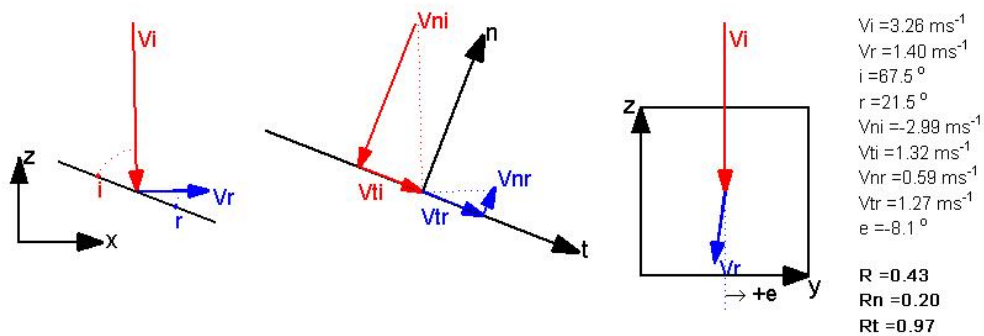
S-L-20-1



S-L-20-2



S-L-20-3

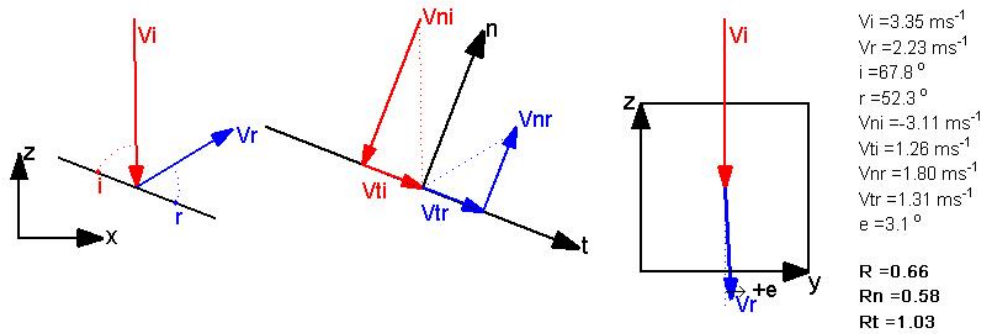


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

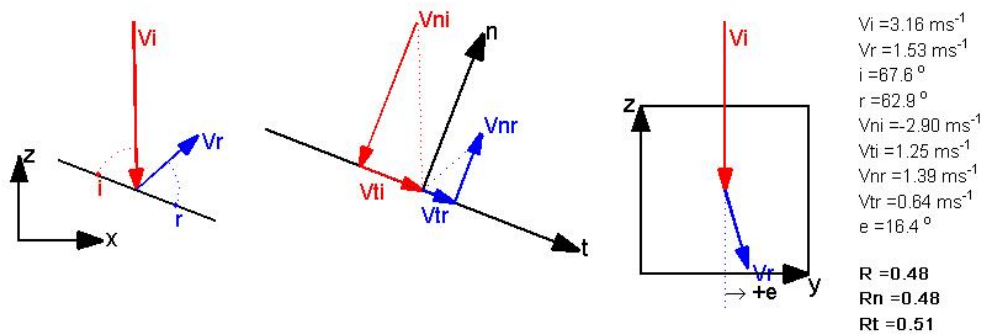


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

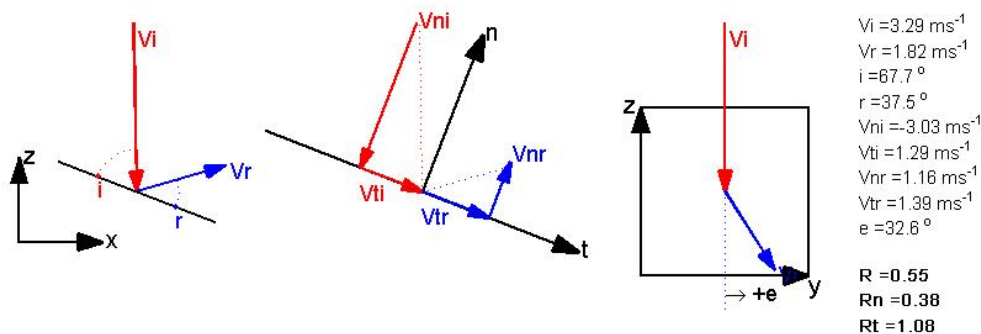
S-L-20-4



S-L-20-5



S-L-20-6

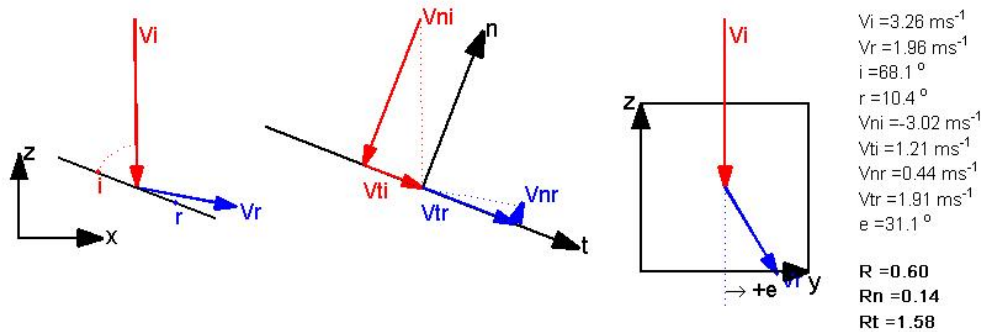


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

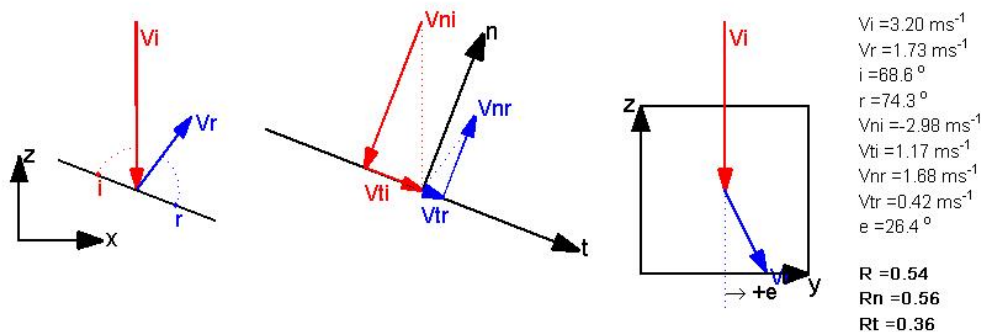


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

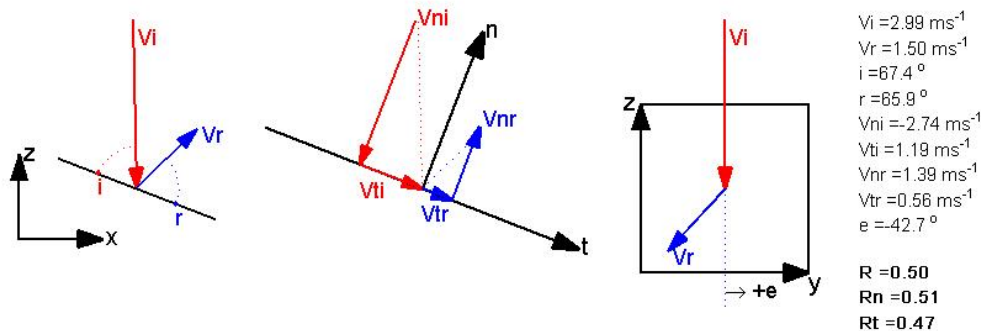
S-L-20-7



S-L-20-8



S-L-20-9

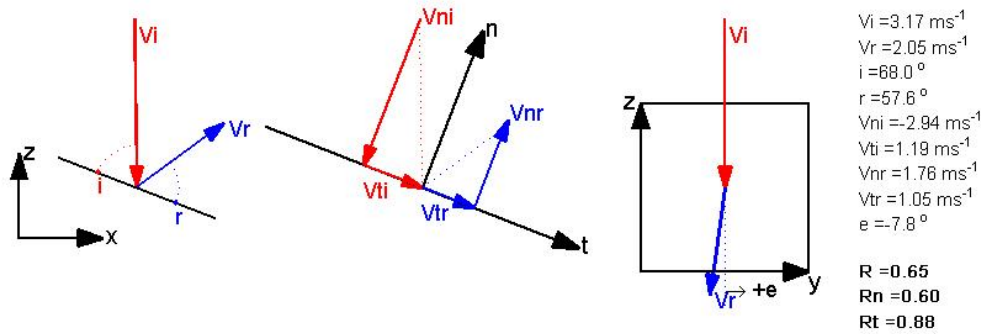


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

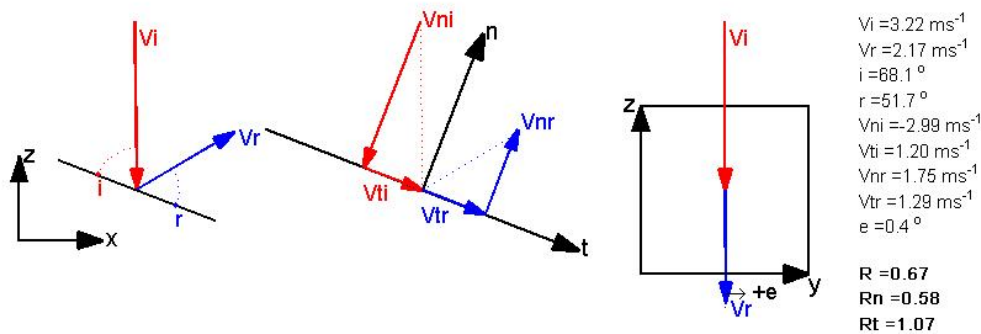


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

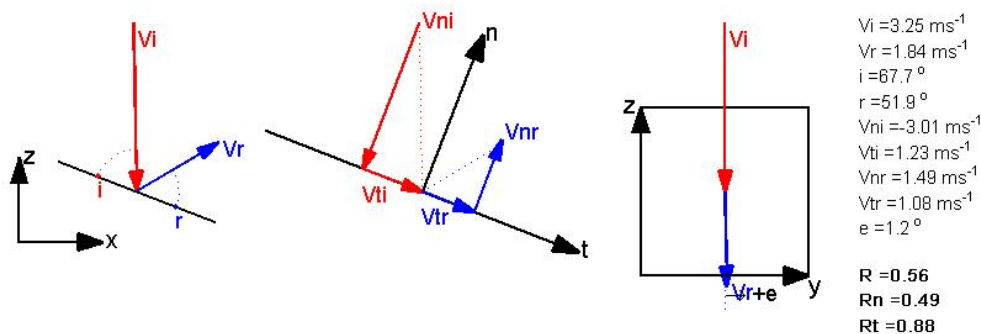
S-L-20-10



S-L-20-11



S-L-20-12

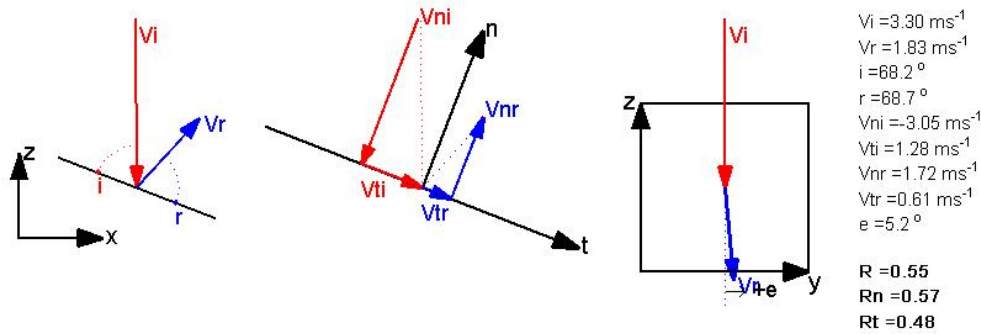


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

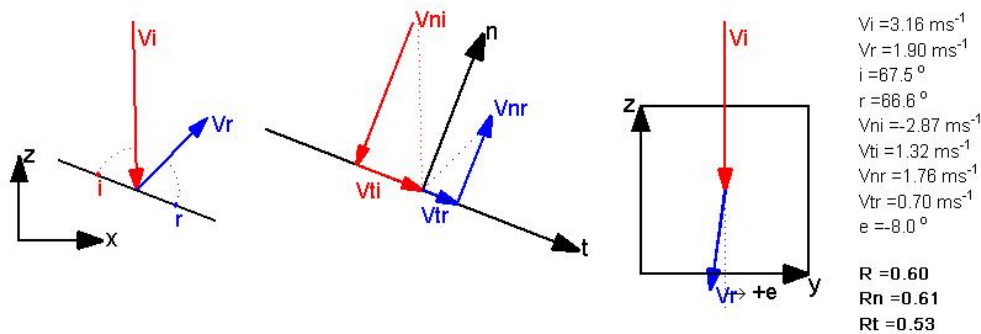


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

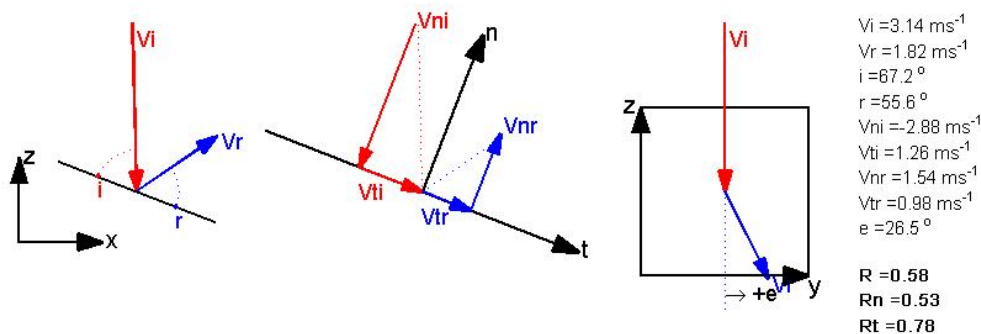
S-L-20-13



S-L-20-14



S-L-20-15



ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

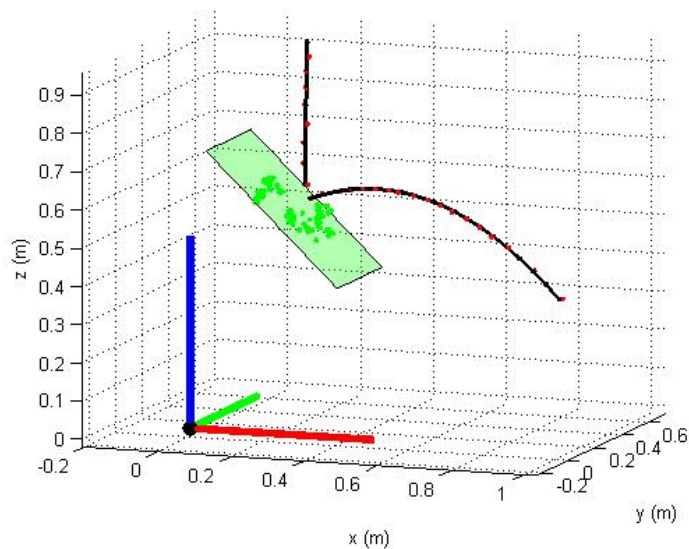


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΧΙΙ

ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ
ΣΦΑΙΡΙΚΟ ΔΟΚΙΜΙΟ
ΚΛΙΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ: 45°

α/α	V_i (m/s)	V_r (m/s)	$V_{n,i}$ (m/s)	$V_{t,i}$ (m/s)	$V_{n,r}$ (m/s)	$V_{t,r}$ (m/s)	R	R _n	R _t	e (°)	i (°)	r (°)
1	3,38	2,02	-2,31	2,47	1,36	1,49	0,60	0,59	0,60	1,8	42,9	40,1
2	3,41	2,16	-2,41	2,40	1,42	1,63	0,63	0,59	0,68	12,4	45,0	38,8
3	3,45	2,02	-2,44	2,44	1,31	1,54	0,59	0,54	0,63	6,8	45,0	38,1
4	3,40	2,24	-2,40	2,40	1,49	1,68	0,66	0,62	0,70	3,2	44,8	39,5
5	3,49	2,24	-2,40	2,54	0,68	2,14	0,64	0,29	0,84	8,7	43,2	15,9
6	3,49	2,26	-2,46	2,48	1,61	1,59	0,65	0,65	0,64	0,6	44,7	43,3
7	3,52	2,38	-2,45	2,53	0,35	2,35	0,68	0,14	0,93	-1,8	43,9	7,0
8	3,36	2,19	-2,39	2,37	1,93	1,03	0,65	0,81	0,43	7,1	46,2	59,9
9	3,48	2,47	-2,42	2,50	0,76	2,35	0,71	0,31	0,94	5,9	43,9	16,3
10	3,55	2,09	-2,42	2,60	1,08	1,79	0,59	0,45	0,69	5,4	42,8	29,0
11	3,45	2,07	-2,40	2,47	0,88	1,87	0,60	0,37	0,76	12,7	45,0	23,1
12	3,49	2,16	-2,44	2,49	1,52	1,53	0,62	0,62	0,61	1,2	44,3	42,7
13	3,44	2,11	-2,40	2,46	1,51	1,47	0,61	0,63	0,60	8,6	46,2	43,5
14	3,49	2,03	-2,46	2,47	1,05	1,74	0,58	0,43	0,70	3,0	44,7	28,9

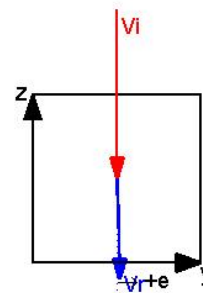
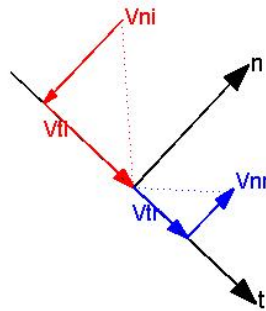
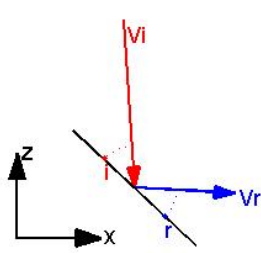


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ



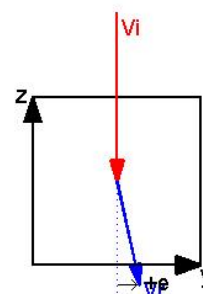
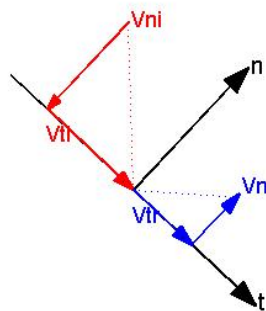
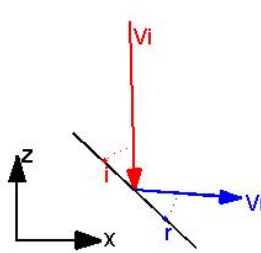
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

S-L-45-1



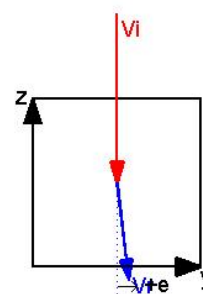
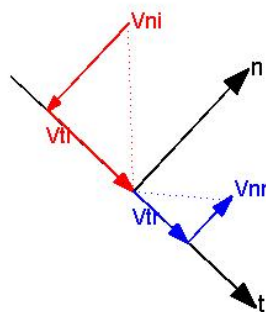
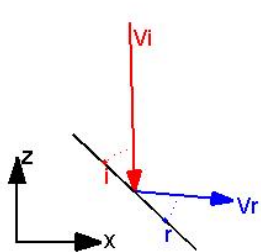
$V_i = 3.38 \text{ ms}^{-1}$
 $V_r = 2.02 \text{ ms}^{-1}$
 $i = 42.9^\circ$
 $r = 40.1^\circ$
 $V_{ni} = -2.31 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{ti} = 2.47 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{nr} = 1.36 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{tr} = 1.49 \text{ ms}^{-1}$
 $e = 1.8^\circ$
 $R = 0.60$
 $R_n = 0.59$
 $R_t = 0.60$

S-L-45-2



$V_i = 3.41 \text{ ms}^{-1}$
 $V_r = 2.16 \text{ ms}^{-1}$
 $i = 45.0^\circ$
 $r = 38.8^\circ$
 $V_{ni} = -2.41 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{ti} = 2.40 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{nr} = 1.42 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{tr} = 1.63 \text{ ms}^{-1}$
 $e = 12.4^\circ$
 $R = 0.63$
 $R_n = 0.59$
 $R_t = 0.68$

S-L-45-3

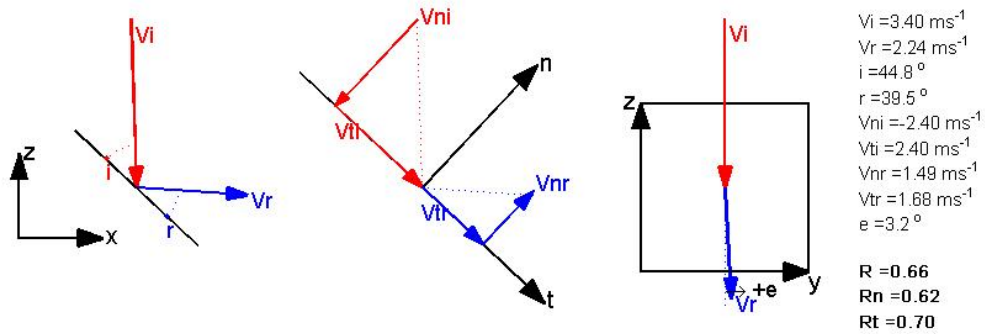


$V_i = 3.45 \text{ ms}^{-1}$
 $V_r = 2.02 \text{ ms}^{-1}$
 $i = 45.0^\circ$
 $r = 38.1^\circ$
 $V_{ni} = -2.44 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{ti} = 2.44 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{nr} = 1.31 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{tr} = 1.54 \text{ ms}^{-1}$
 $e = 6.8^\circ$
 $R = 0.59$
 $R_n = 0.54$
 $R_t = 0.63$

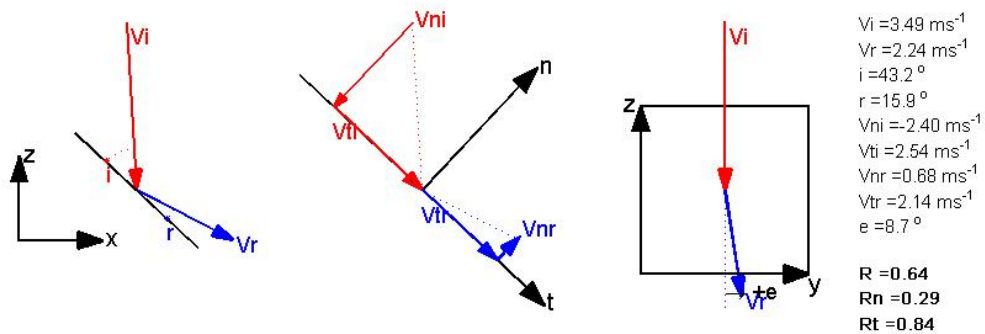


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

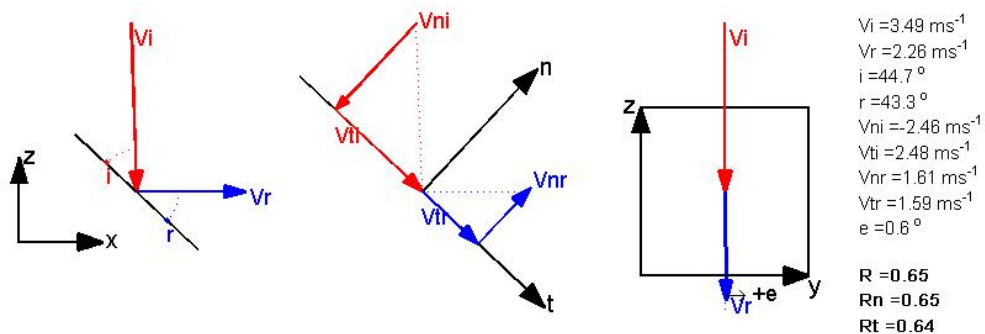
S-L-45-4



S-L-45-5



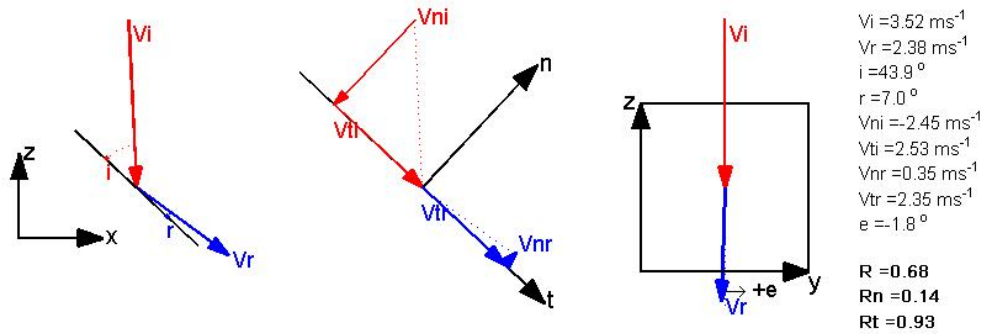
S-L-45-6



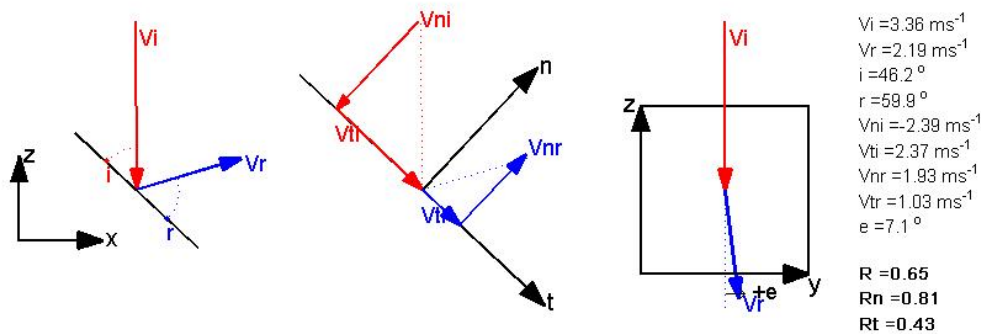


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

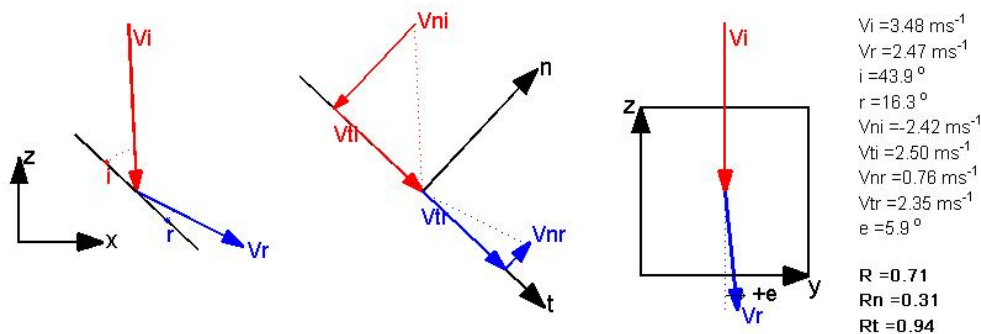
S-L-45-7



S-L-45-8



S-L-45-9

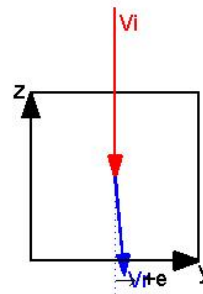
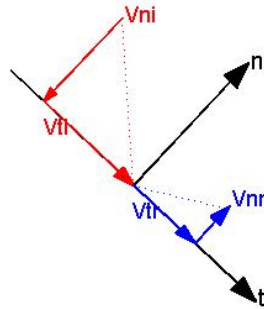
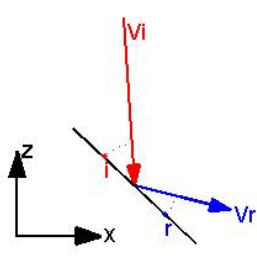


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ



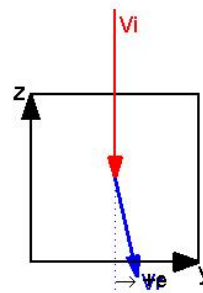
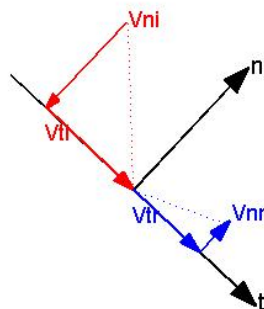
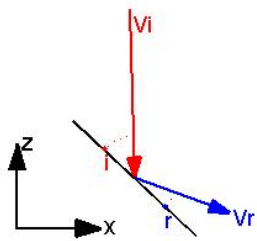
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

S-L-45-10



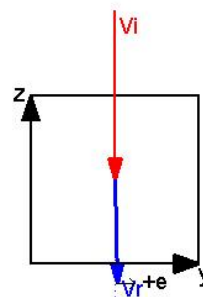
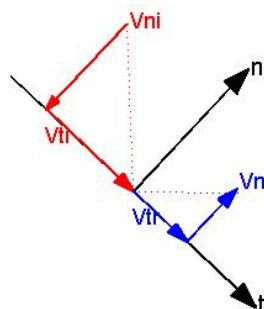
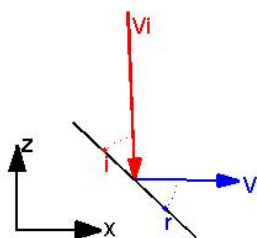
$V_i = 3.55 \text{ ms}^{-1}$
 $V_r = 2.09 \text{ ms}^{-1}$
 $i = 42.8^\circ$
 $r = 29.0^\circ$
 $V_{ni} = -2.42 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{ti} = 2.60 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{nr} = 1.08 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{tr} = 1.79 \text{ ms}^{-1}$
 $e = 5.4^\circ$
 $R = 0.59$
 $R_n = 0.45$
 $R_t = 0.69$

S-L-45-11



$V_i = 3.45 \text{ ms}^{-1}$
 $V_r = 2.07 \text{ ms}^{-1}$
 $i = 45.0^\circ$
 $r = 23.1^\circ$
 $V_{ni} = -2.40 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{ti} = 2.47 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{nr} = 0.88 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{tr} = 1.87 \text{ ms}^{-1}$
 $e = 12.7^\circ$
 $R = 0.60$
 $R_n = 0.37$
 $R_t = 0.76$

S-L-45-12



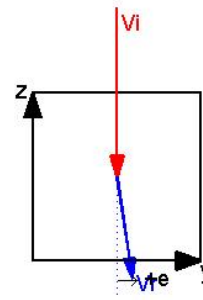
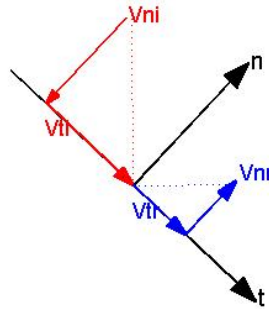
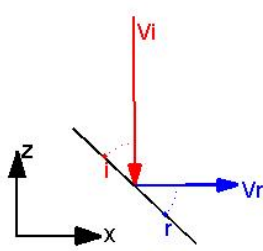
$V_i = 3.49 \text{ ms}^{-1}$
 $V_r = 2.18 \text{ ms}^{-1}$
 $i = 44.3^\circ$
 $r = 42.7^\circ$
 $V_{ni} = -2.44 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{ti} = 2.49 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{nr} = 1.52 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{tr} = 1.53 \text{ ms}^{-1}$
 $e = 1.2^\circ$
 $R = 0.62$
 $R_n = 0.62$
 $R_t = 0.61$

ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ



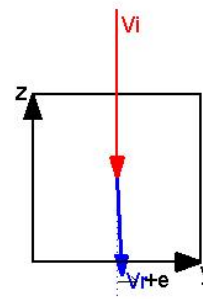
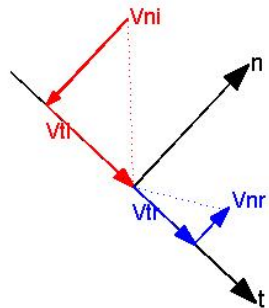
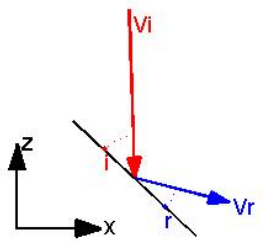
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

S-L-45-13



$V_i = 3.44 \text{ ms}^{-1}$
 $V_r = 2.11 \text{ ms}^{-1}$
 $i = 46.2^\circ$
 $r = 43.5^\circ$
 $V_{ni} = -2.40 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{ti} = 2.48 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{nr} = 1.51 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{tr} = 1.47 \text{ ms}^{-1}$
 $e = 8.6^\circ$
 $R = 0.61$
 $R_n = 0.63$
 $R_t = 0.60$

S-L-45-14



$V_i = 3.49 \text{ ms}^{-1}$
 $V_r = 2.03 \text{ ms}^{-1}$
 $i = 44.7^\circ$
 $r = 28.9^\circ$
 $V_{ni} = -2.46 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{ti} = 2.47 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{nr} = 1.05 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{tr} = 1.74 \text{ ms}^{-1}$
 $e = 3.0^\circ$
 $R = 0.58$
 $R_n = 0.43$
 $R_t = 0.70$

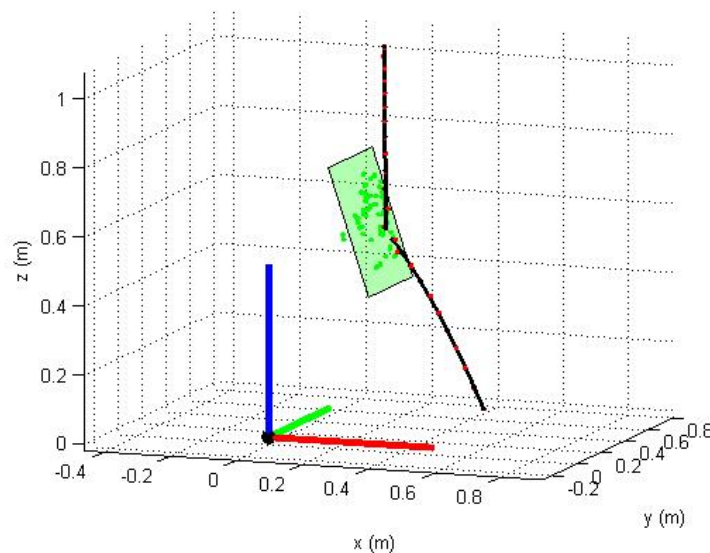


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΧΙΙΙ

ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ
ΣΦΑΙΡΙΚΟ ΔΟΚΙΜΙΟ
ΚΛΙΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ: 70°

α/α	V_i (m/s)	V_r (m/s)	$V_{n,i}$ (m/s)	$V_{t,i}$ (m/s)	$V_{n,r}$ (m/s)	$V_{t,r}$ (m/s)	R	R_n	R_t	e (°)	i (°)	r (°)
1	3,37	2,89	-1,01	3,21	0,50	2,84	0,86	0,50	0,89	1,1	17,5	9,3
2	3,32	3,02	-0,99	3,17	0,55	2,97	0,91	0,55	0,94	-2,5	17,3	9,7
3	3,37	3,28	-1,02	3,22	0,50	3,24	0,97	0,49	1,01	-2,9	17,5	8,1
4	3,46	2,69	-1,07	3,29	0,85	2,55	0,78	0,80	0,77	3,7	17,9	17,5
5	3,49	3,25	-1,06	3,33	0,86	3,13	0,93	0,81	0,94	3,0	17,7	14,6
6	3,43	2,64	-1,03	3,27	0,83	2,50	0,77	0,81	0,77	-0,8	17,4	17,4
7	3,35	3,11	-0,98	3,20	0,66	3,04	0,93	0,68	0,95	0,3	17,2	11,5
8	3,38	2,72	-0,97	3,24	1,18	2,46	0,81	1,22	0,76	8,7	16,5	24,4
9	3,35	2,94	-0,98	3,21	0,76	2,84	0,88	0,77	0,89	-10,6	17,0	14,1
10	3,44	3,12	-1,04	3,28	0,84	3,00	0,91	0,81	0,91	12,8	17,5	14,8
11	3,44	3,27	-1,08	3,26	0,83	3,16	0,95	0,77	0,97	12,6	18,3	13,9
12	3,47	3,16	-1,08	3,30	0,43	3,14	0,91	0,39	0,95	11,1	18,1	7,1
13	3,22	2,83	-0,99	3,06	0,99	2,66	0,88	1,00	0,87	-7,7	17,9	19,4
14	3,31	2,81	-0,99	3,15	0,92	2,65	0,85	0,93	0,84	6,7	17,4	18,2

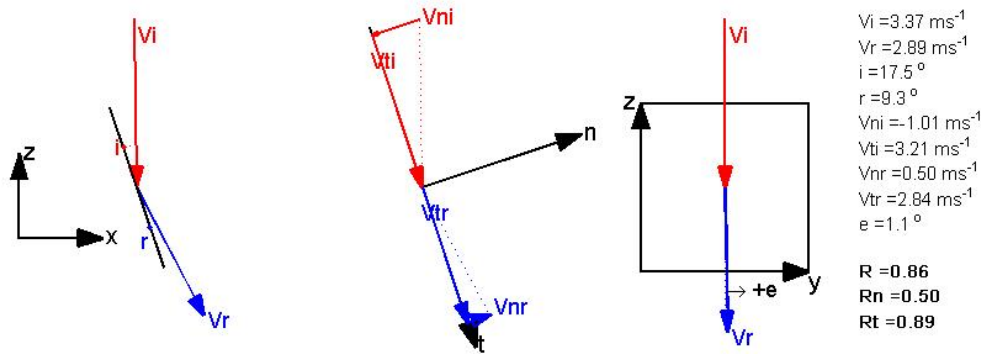


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

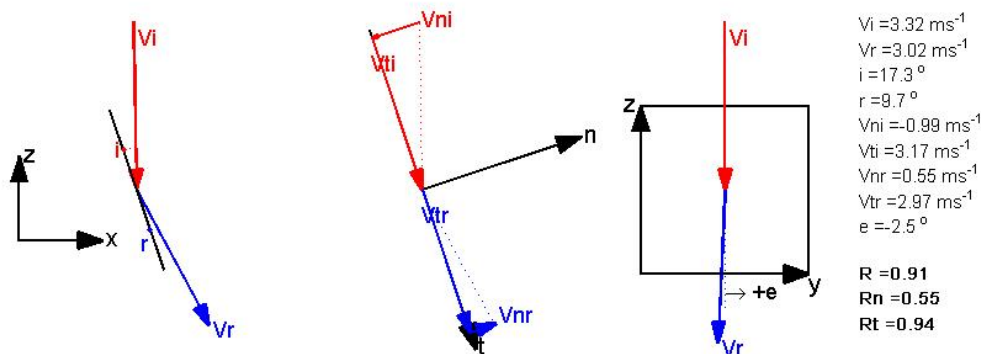


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

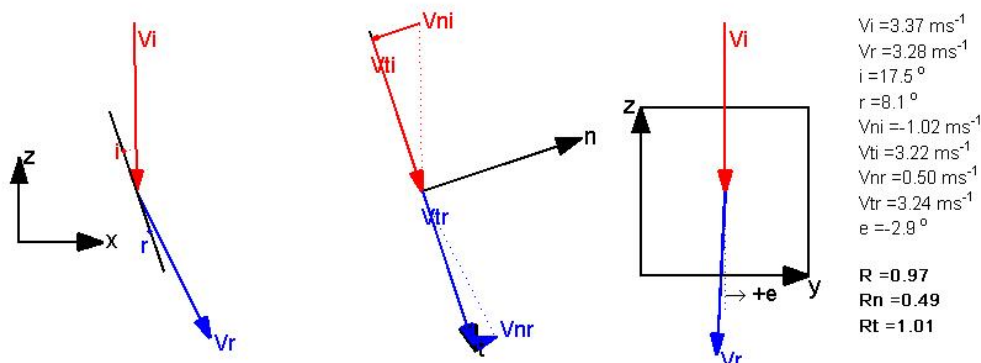
S-L-70-1



S-L-70-2



S-L-70-3

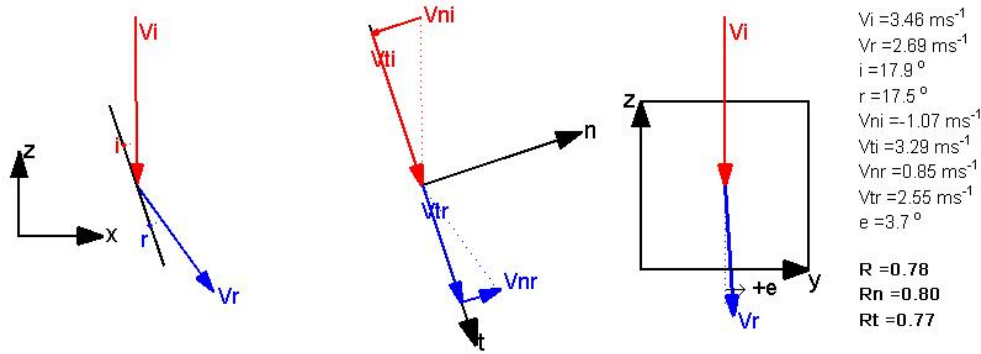


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

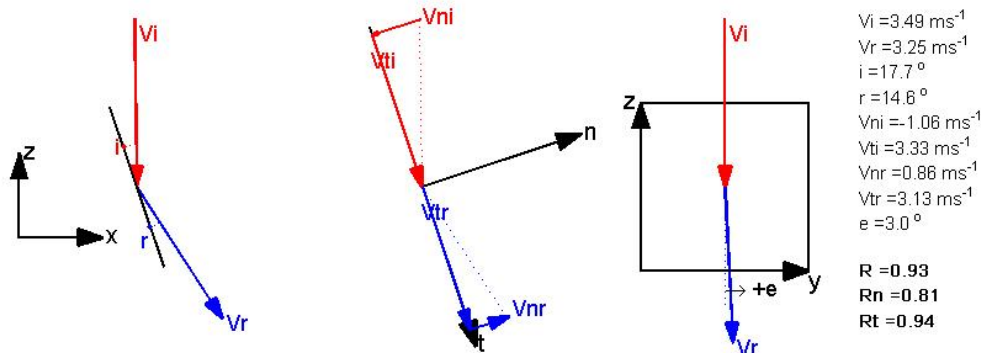


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

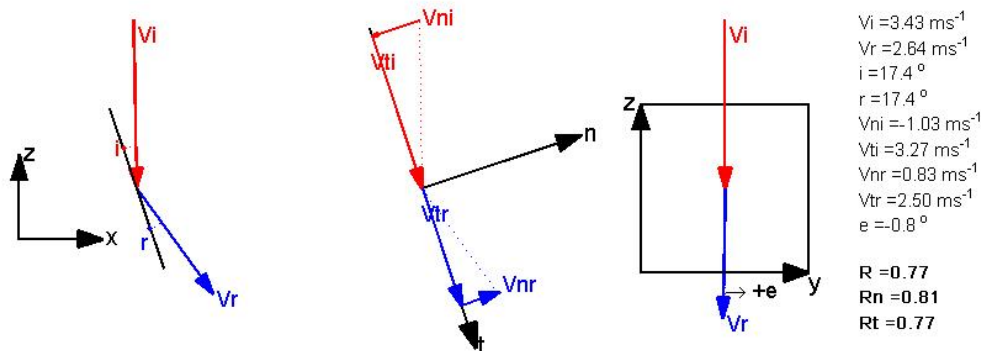
S-L-70-4



S-L-70-5



S-L-70-6

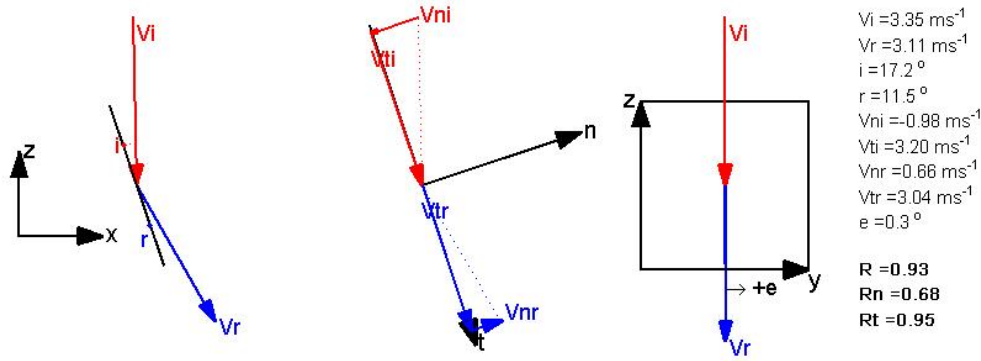


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

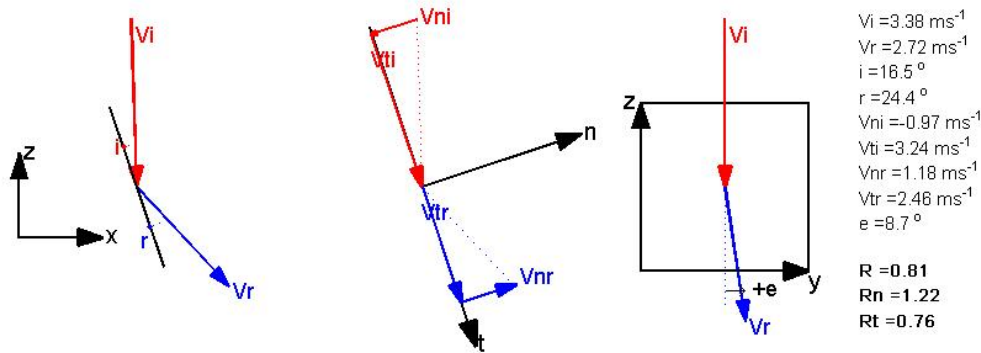


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

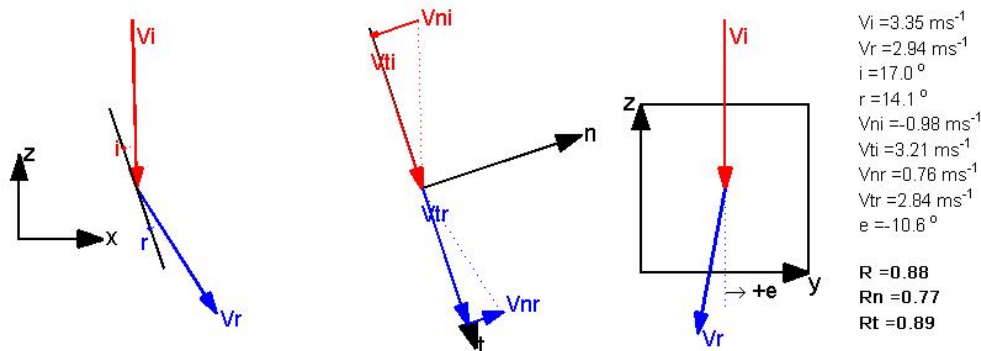
S-L-70-7



S-L-70-8



S-L-70-9

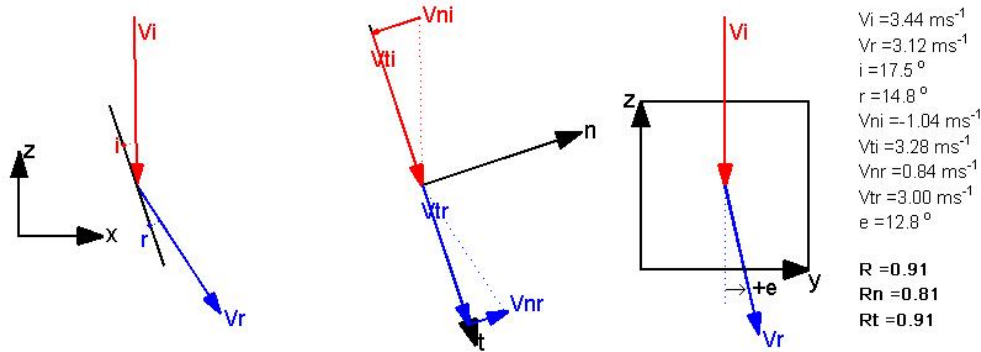


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

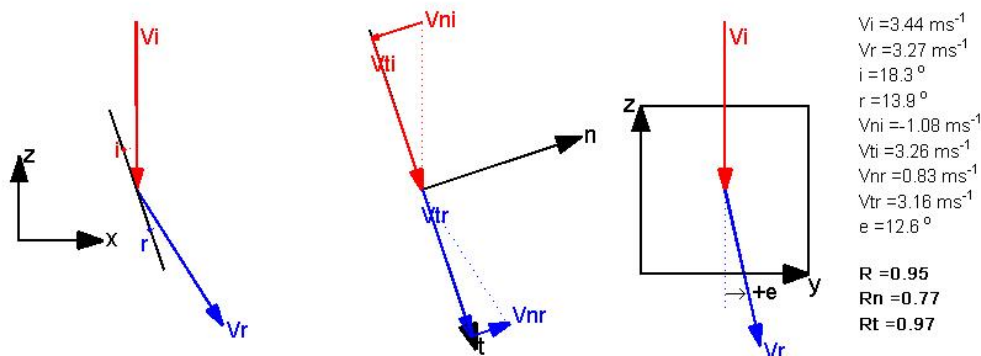


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

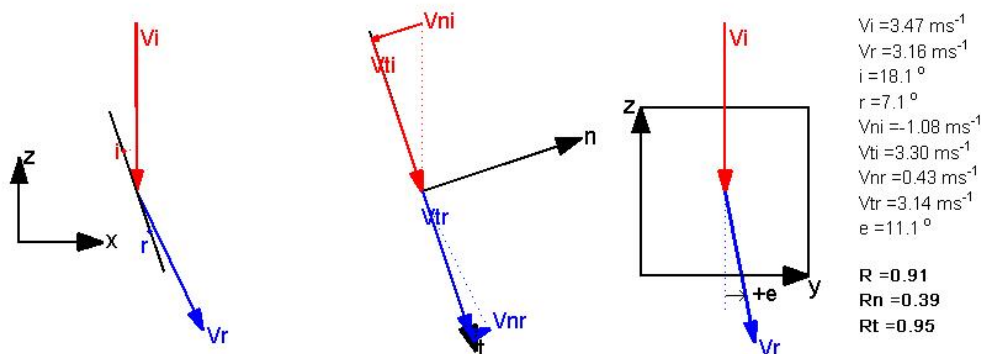
S-L-70-10



S-L-70-11



S-L-70-12

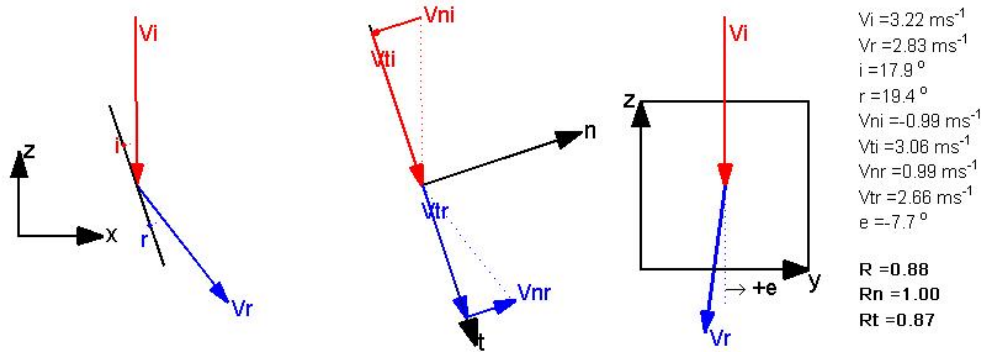


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

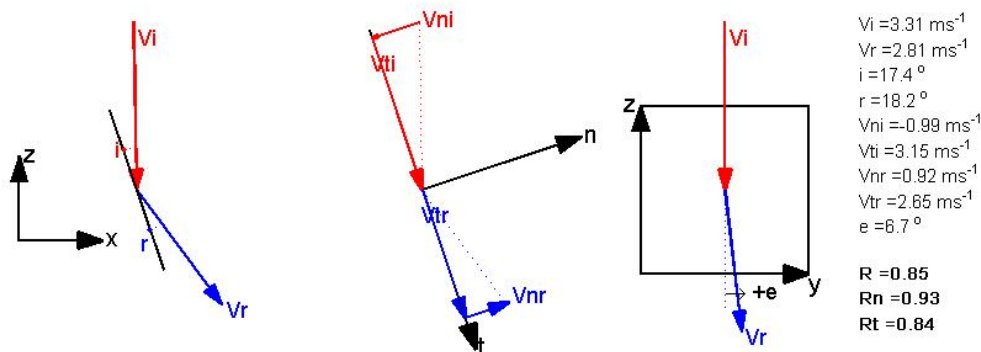


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

S-L-70-13



S-L-70-14



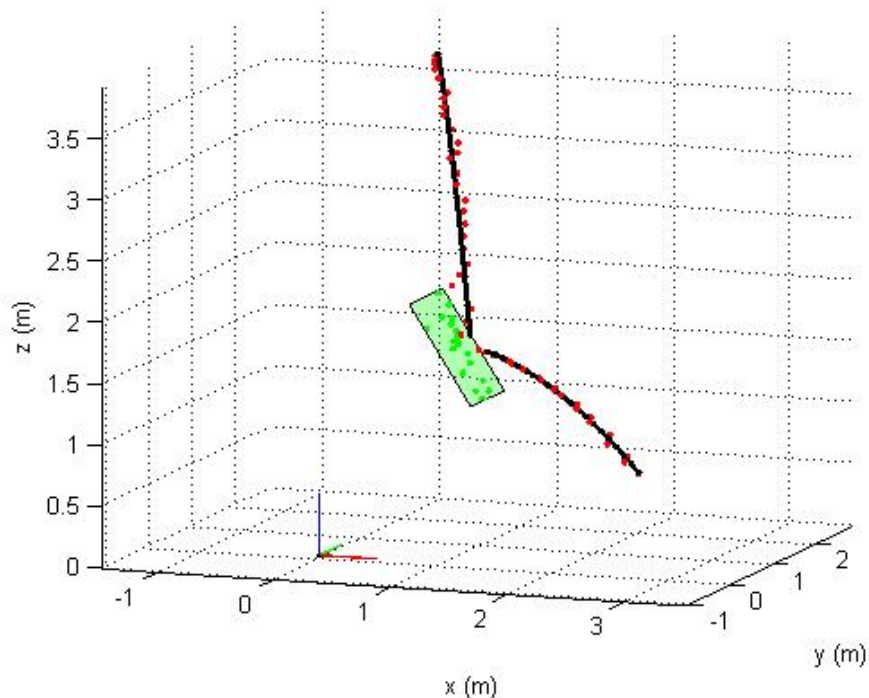


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΧΙΥ

ΔΟΚΙΜΕΣ ΠΕΔΙΟΥ
ΣΦΑΙΡΙΚΟ ΔΟΚΙΜΙΟ
ΚΛΙΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ: 55°

α/α	V_i (m/s)	V_r (m/s)	$V_{n,i}$ (m/s)	$V_{t,i}$ (m/s)	$V_{n,r}$ (m/s)	$V_{t,r}$ (m/s)	R	R _n	R _t	e (°)	i (°)	r (°)
1	7,32	4,00	-3,66	6,34	0,84	3,91	0,55	0,23	0,62	-0,6	29,9	11,3
2	6,65	5,14	-3,23	5,81	1,27	4,98	0,77	0,39	0,86	-18,5	29,0	13,7
3	7,90	5,36	-3,70	6,98	2,13	4,92	0,68	0,57	0,70	-12,0	27,8	22,4
4	7,34	4,87	-3,36	6,52	1,28	4,69	0,66	0,38	0,72	-10,9	27,1	14,5
5	7,20	4,53	-3,38	6,36	1,80	4,15	0,63	0,53	0,65	30,7	27,8	22,6
6	7,34	3,94	-3,53	6,44	2,19	3,27	0,54	0,62	0,51	16,1	28,6	32,8
7	7,81	3,99	-3,82	6,81	1,39	3,73	0,51	0,36	0,55	3,8	29,2	19,6
8	7,50	4,69	-3,80	6,47	0,91	4,61	0,63	0,24	0,71	10,3	30,4	10,6
9	7,59	3,58	-3,63	6,66	2,23	2,80	0,47	0,61	0,42	3,9	28,5	37,4

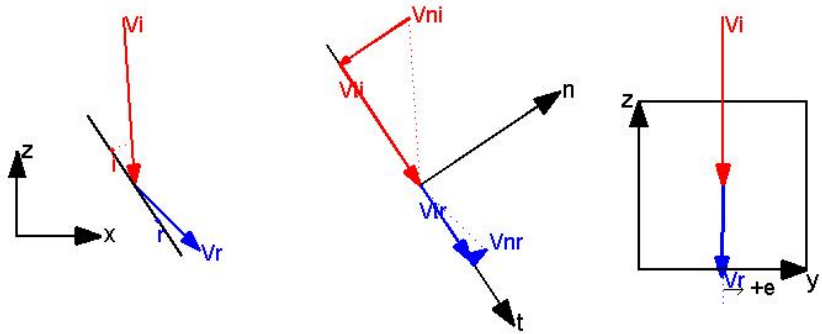


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

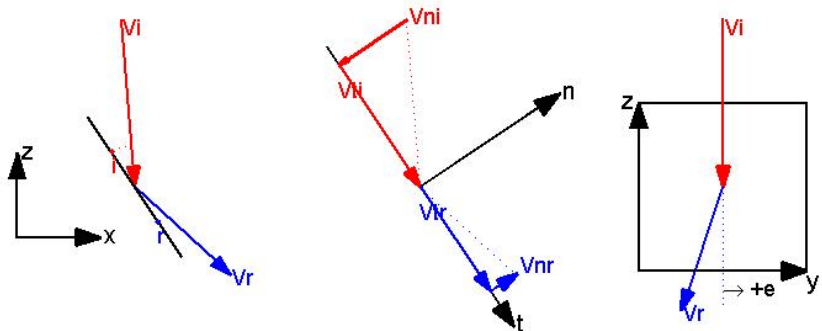


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

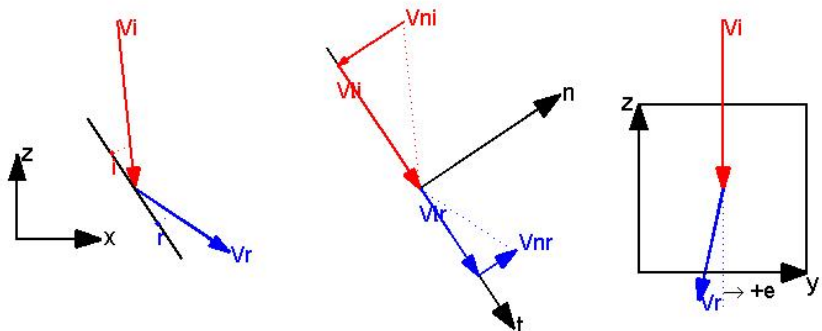
S-F-55-1



S-F-55-2



S-F-55-3

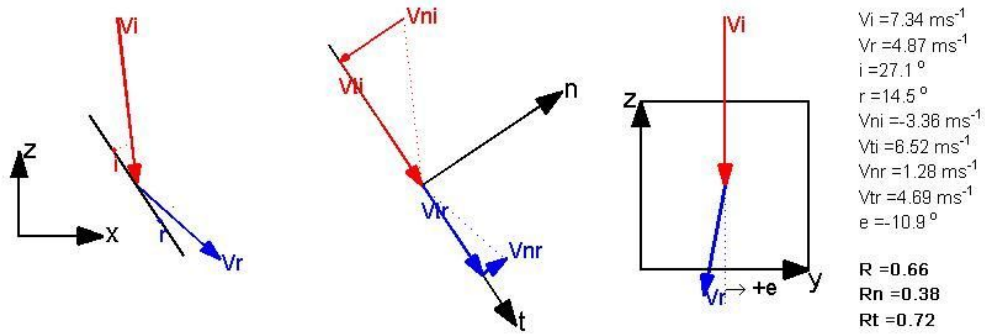


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

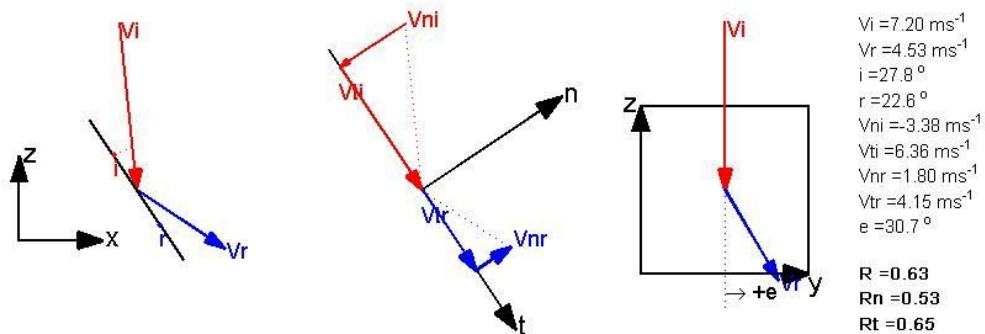


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

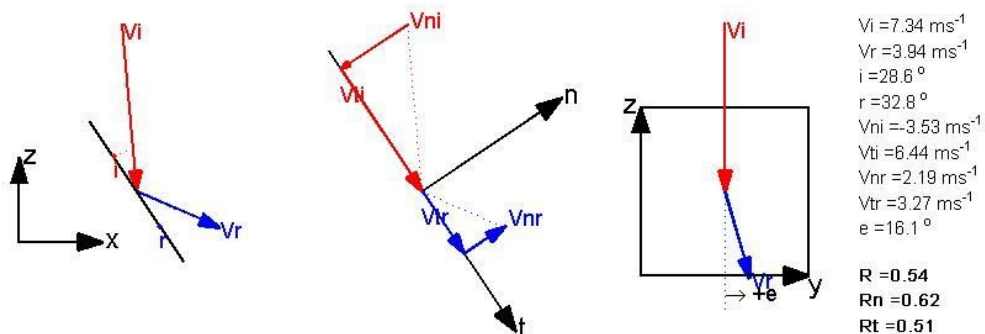
S-F-55-4



S-F-55-5



S-F-55-6

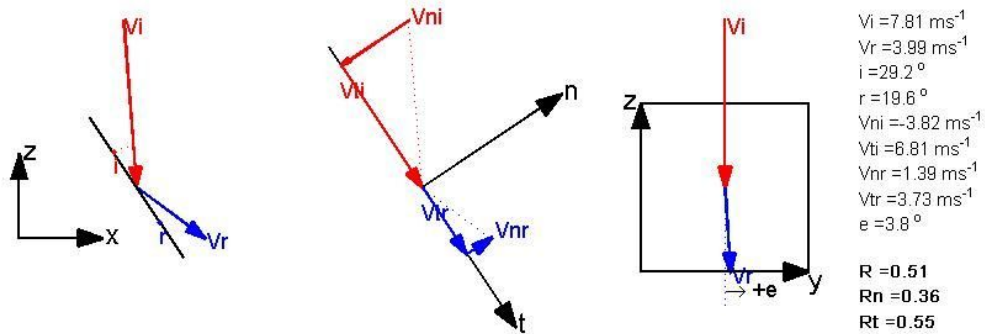


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

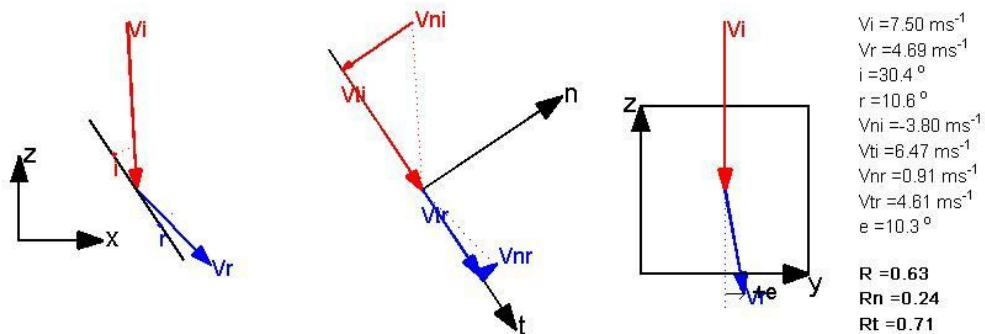


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

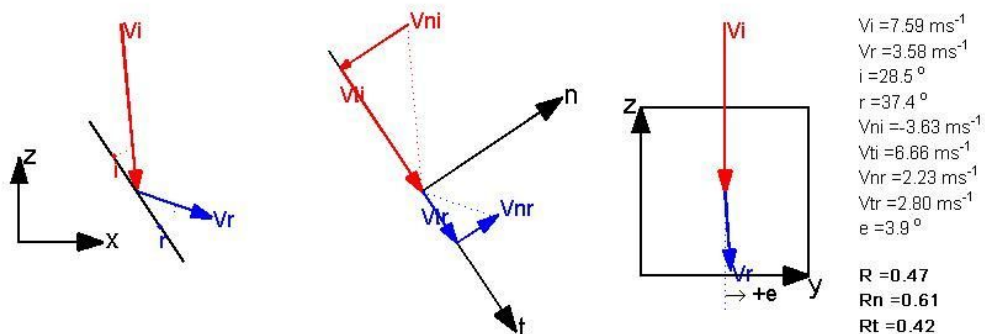
S-F-55-7



S-F-55-8



S-F-55-9



ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

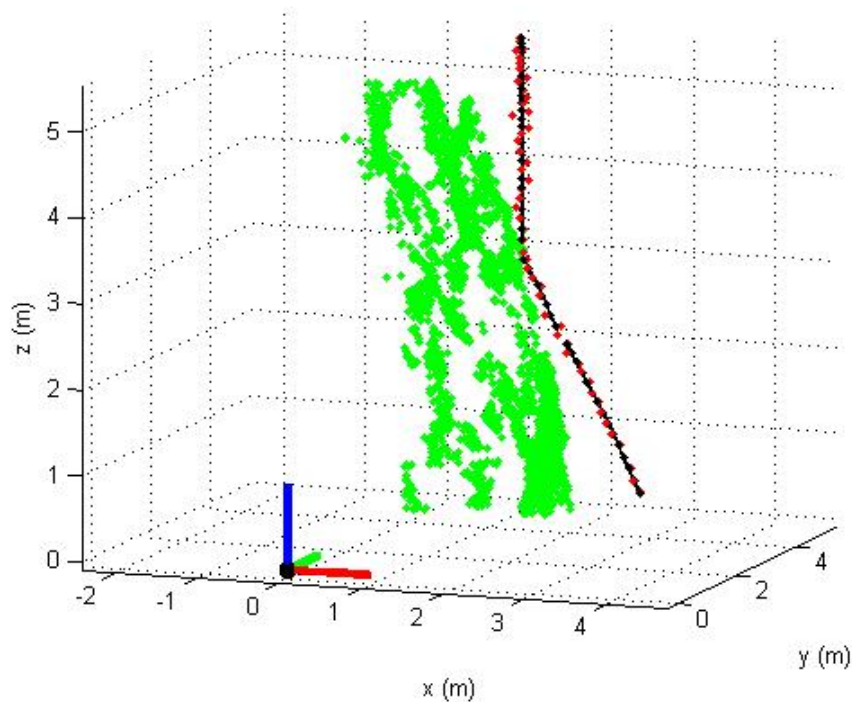


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ XV

ΔΟΚΙΜΕΣ ΠΕΔΙΟΥ
ΣΦΑΙΡΙΚΟ ΔΟΚΙΜΙΟ
ΚΛΙΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ: 75°

α/α	V_i (m/s)	V_r (m/s)	$V_{n,i}$ (m/s)	$V_{t,i}$ (m/s)	$V_{n,r}$ (m/s)	$V_{t,r}$ (m/s)	R	R _n	R _t	e (°)	i (°)	r (°)
1	7,54	6,44	-1,63	7,36	1,72	6,20	0,85	1,05	0,84	30,2	12,5	13,3
2	8,53	4,61	-1,52	8,40	3,19	3,33	0,54	2,09	0,40	-1,7	10,1	41,2
3	7,45	5,78	-1,02	7,38	1,78	5,50	0,78	1,74	0,75	5,6	12,0	16,7
4	8,60	7,49	-1,92	8,38	2,51	7,05	0,87	1,31	0,84	16,8	12,8	18,6
5	8,30	5,71	-1,61	8,14	4,44	3,59	0,69	2,77	0,44	36,2	11,1	48,9
6	8,80	6,05	-1,96	8,58	2,85	5,33	0,69	1,46	0,62	30,6	12,8	26,5

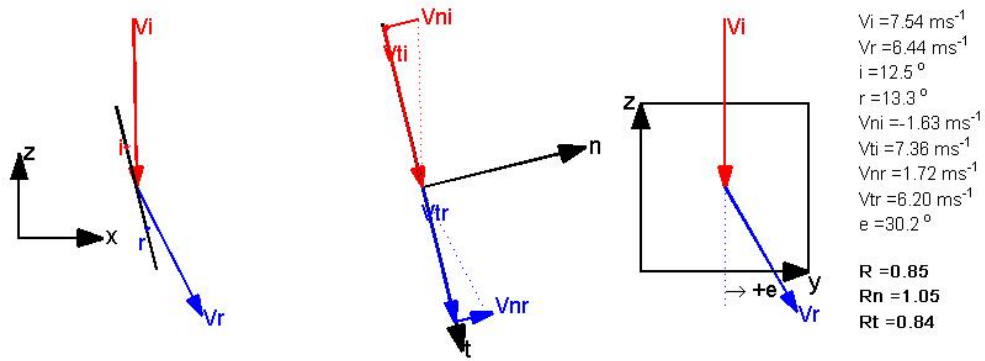


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

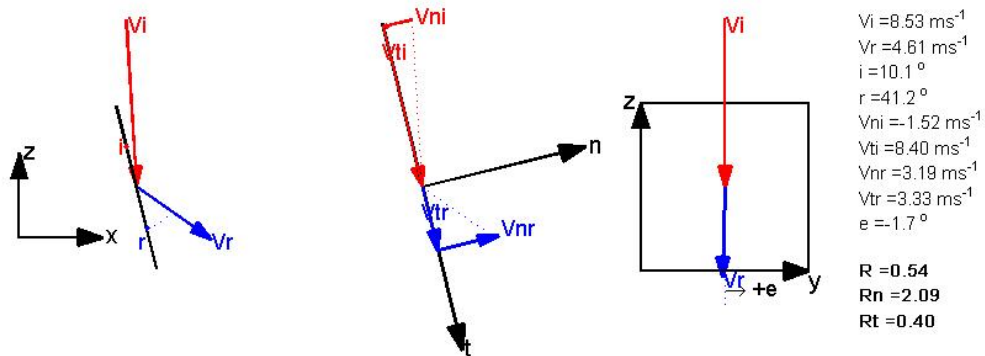


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

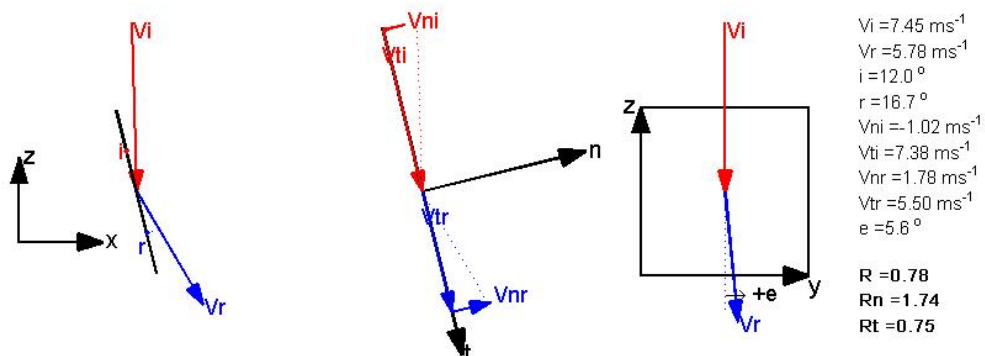
S-F-75-1



S-F-75-2



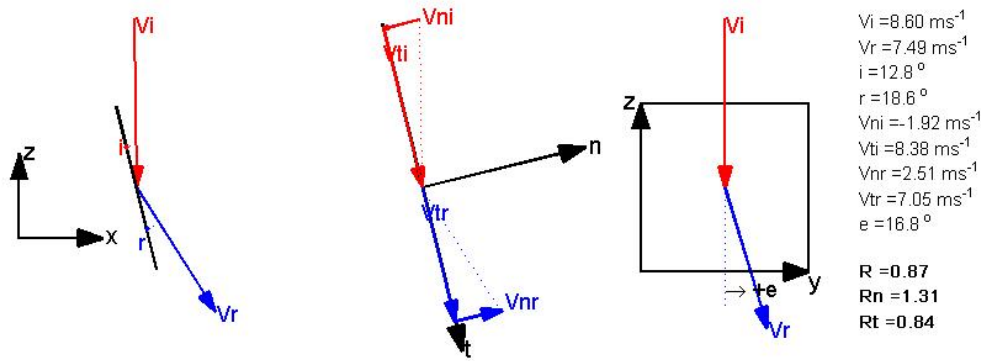
S-F-75-3



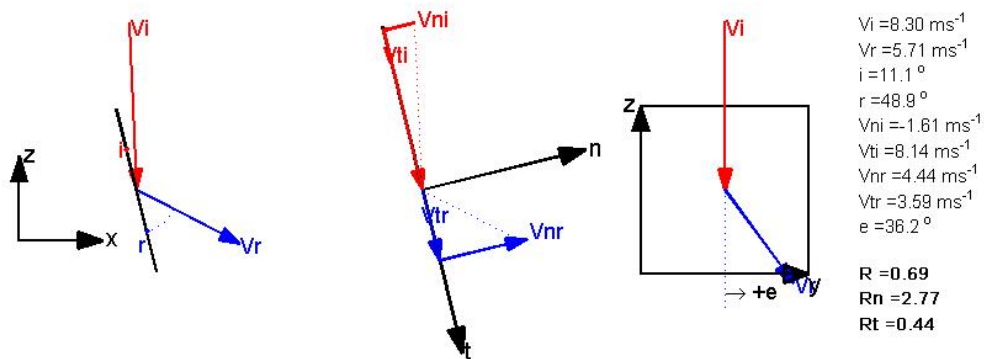


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

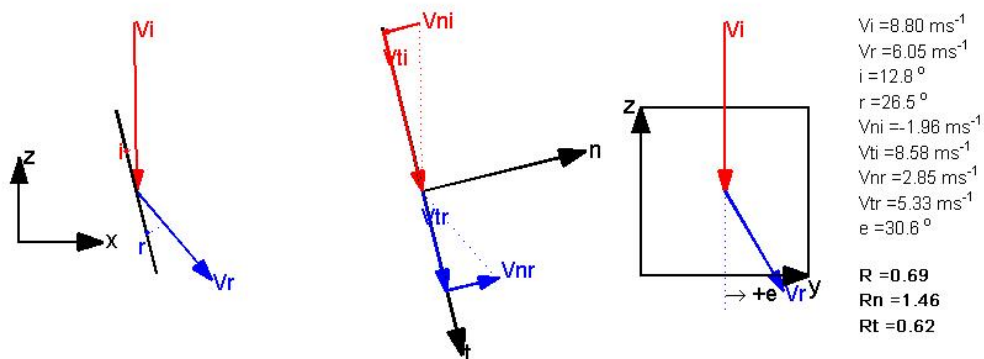
S-F-75-4



S-F-75-5



S-F-75-6



ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

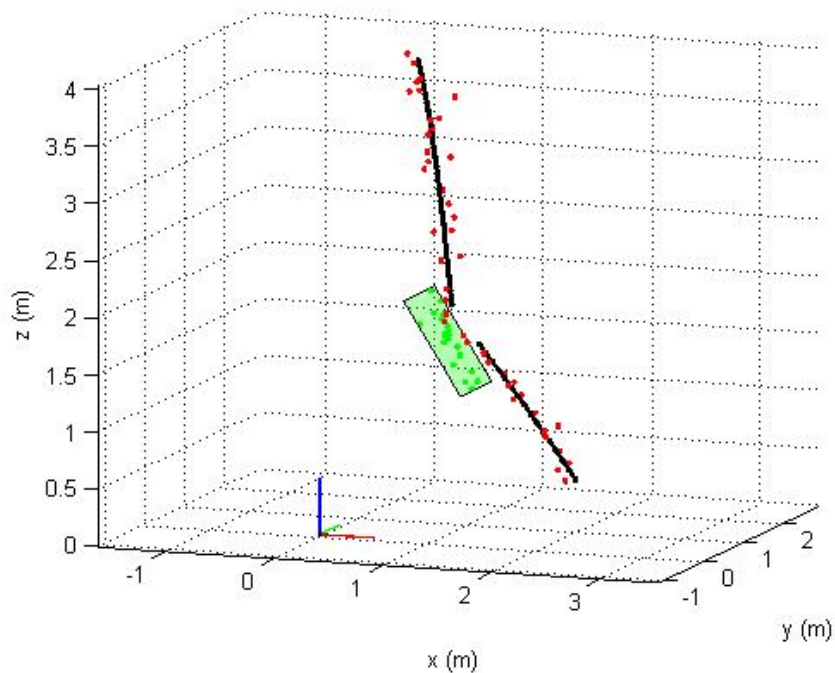


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΧVI

ΔΟΚΙΜΕΣ ΠΕΔΙΟΥ
ΔΟΚΙΜΙΟ ΤΥΧΑΙΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ
ΚΛΙΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ: 55°

α/α	V_i (m/s)	V_r (m/s)	$V_{n,i}$ (m/s)	$V_{t,i}$ (m/s)	$V_{n,r}$ (m/s)	$V_{t,r}$ (m/s)	R	R _n	R _t	e (°)	i (°)	r (°)
1	7,06	5,03	-3,29	6,25	0,52	5,00	0,71	0,16	0,80	-25,7	27,6	5,6
2	7,78	6,34	-3,40	7,00	2,40	5,86	0,81	0,71	0,84	-4,8	25,8	21,7
3	7,84	5,03	-3,57	6,98	1,78	4,70	0,64	0,50	0,67	-12,2	26,9	19,9
4	7,80	4,78	-3,57	6,94	1,61	4,50	0,61	0,45	0,65	-14,8	27,1	18,3
5	7,12	4,84	-3,59	6,15	2,69	4,03	0,68	0,75	0,66	-8,1	30,2	32,8
6	7,17	4,51	-3,25	6,39	1,34	4,31	0,63	0,41	0,67	-5,4	26,8	16,5
7	8,37	4,61	-4,00	7,35	1,88	4,21	0,55	0,47	0,57	-4,4	28,4	23,2
8	7,55	5,78	-3,57	6,66	1,38	5,61	0,76	0,39	0,84	-19,1	28,1	13,7
9	7,23	5,27	-3,60	6,27	0,56	5,24	0,73	0,16	0,84	-15,2	29,8	5,7
10	7,55	5,52	-3,64	6,62	2,06	5,12	0,73	0,57	0,77	1,3	28,7	21,1
11	7,63	4,57	-3,64	6,71	2,30	3,95	0,60	0,63	0,59	16,9	28,3	29,2

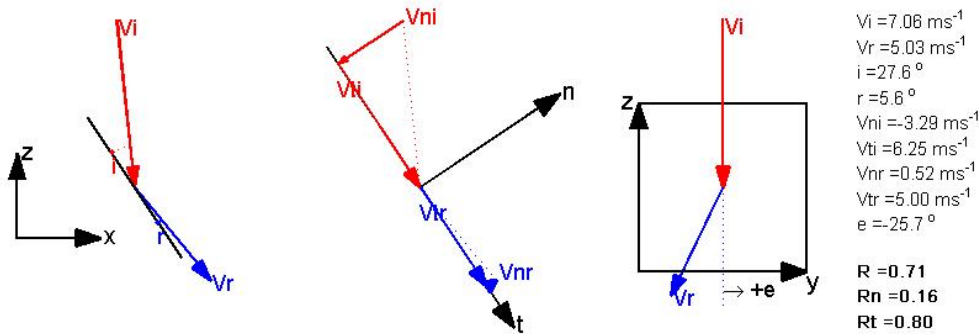


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

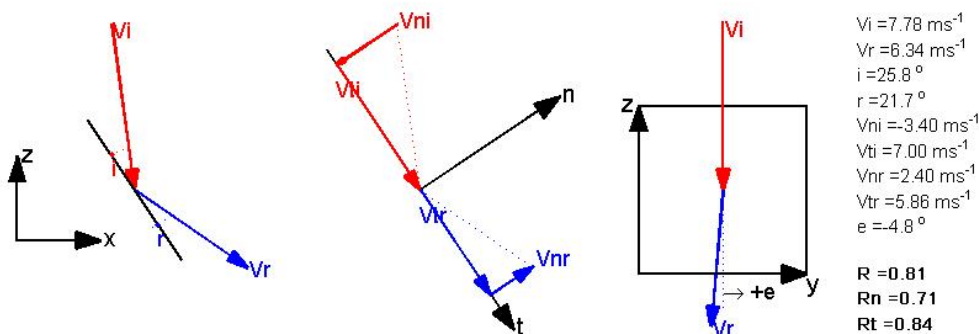


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

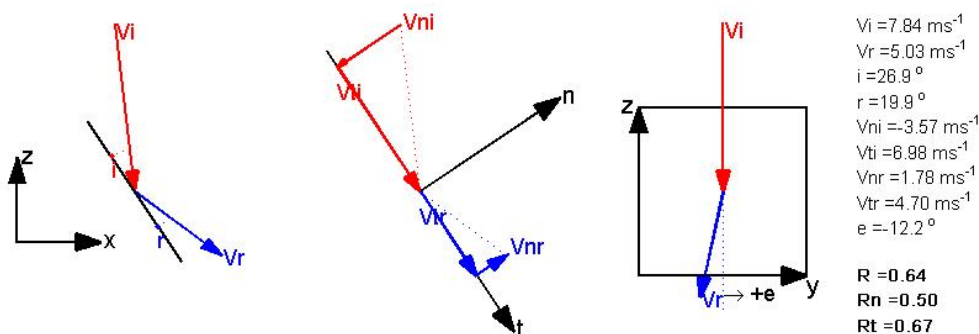
R-F-55-1



R-F-55-2



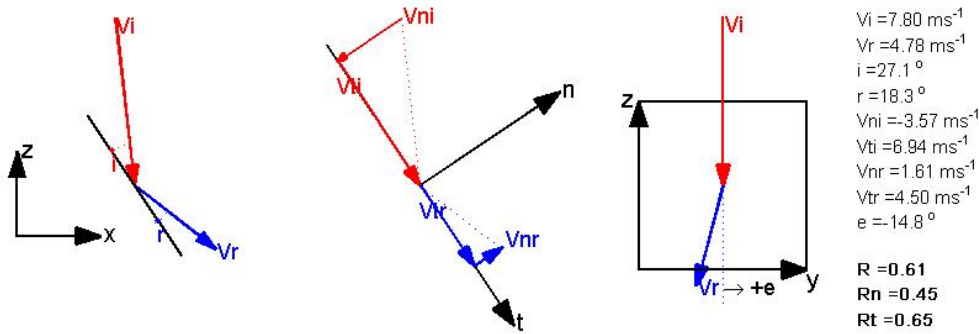
R-F-55-3



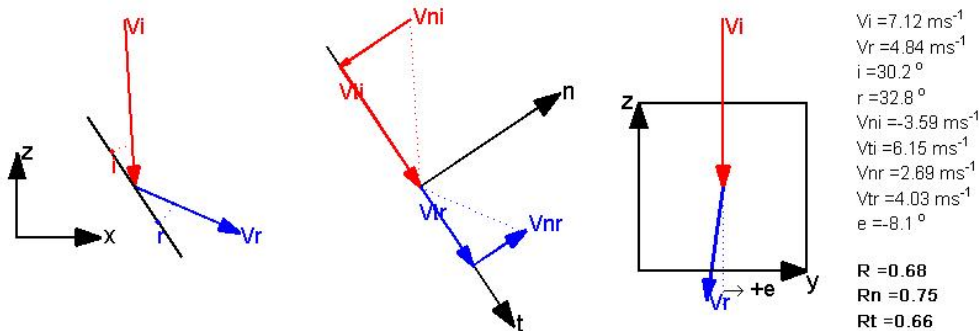


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

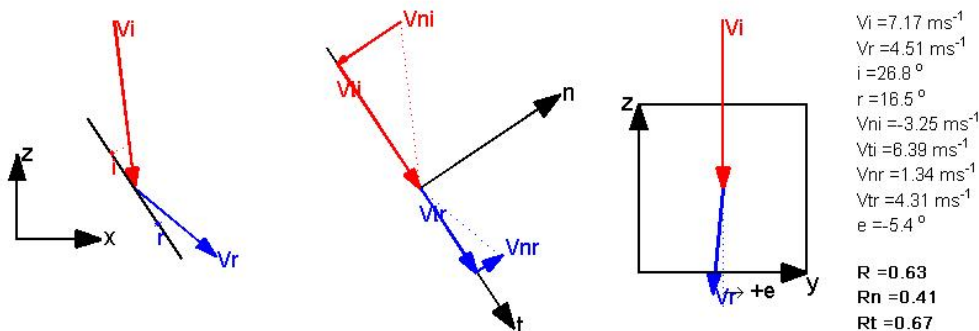
R-F-55-4



R-F-55-5



R-F-55-6

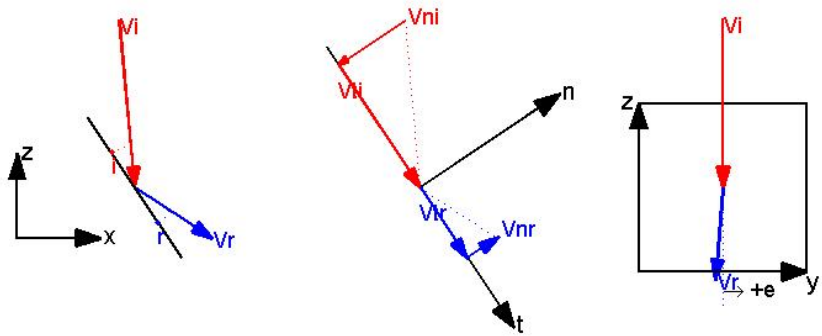


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

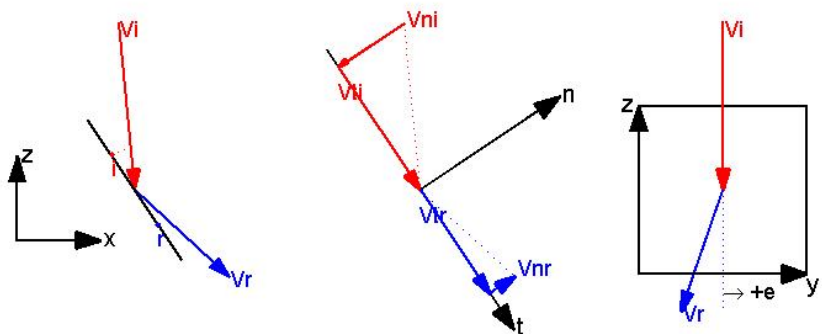


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

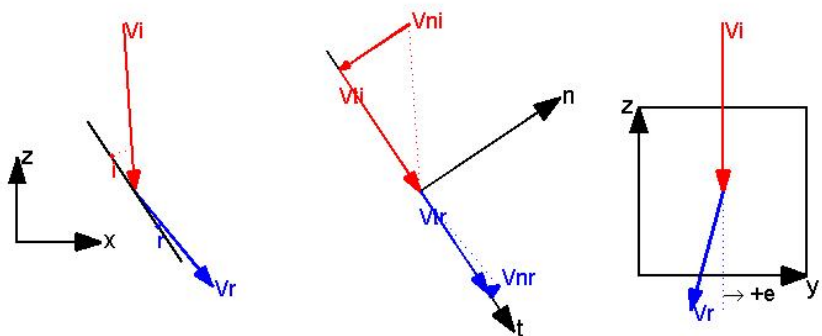
R-F-55-7



R-F-55-8



R-F-55-9

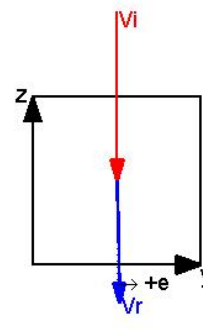
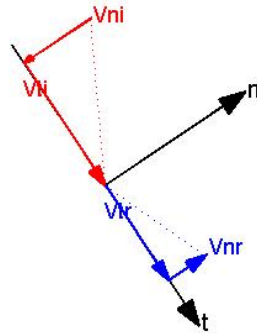
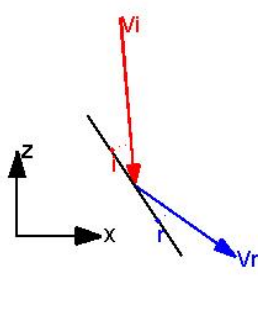


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ



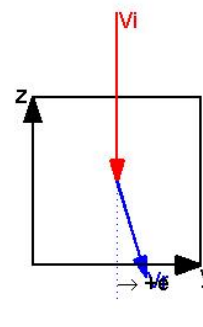
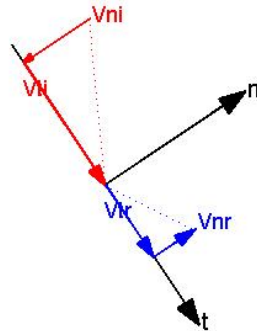
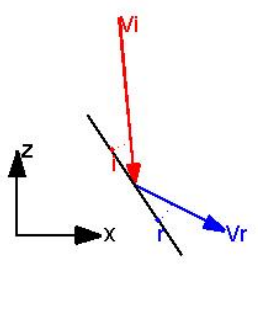
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

R-F-55-10



$V_i = 7.55 \text{ ms}^{-1}$
 $V_r = 5.52 \text{ ms}^{-1}$
 $i = 28.7^\circ$
 $r = 21.1^\circ$
 $V_{ni} = -3.64 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{ti} = 6.62 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{nr} = 2.08 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{tr} = 5.12 \text{ ms}^{-1}$
 $e = 1.3^\circ$
 $R = 0.73$
 $R_n = 0.57$
 $R_t = 0.77$

R-F-55-11



$V_i = 7.63 \text{ ms}^{-1}$
 $V_r = 4.57 \text{ ms}^{-1}$
 $i = 28.3^\circ$
 $r = 29.2^\circ$
 $V_{ni} = -3.64 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{ti} = 6.71 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{nr} = 2.30 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{tr} = 3.95 \text{ ms}^{-1}$
 $e = 16.9^\circ$
 $R = 0.60$
 $R_n = 0.63$
 $R_t = 0.59$

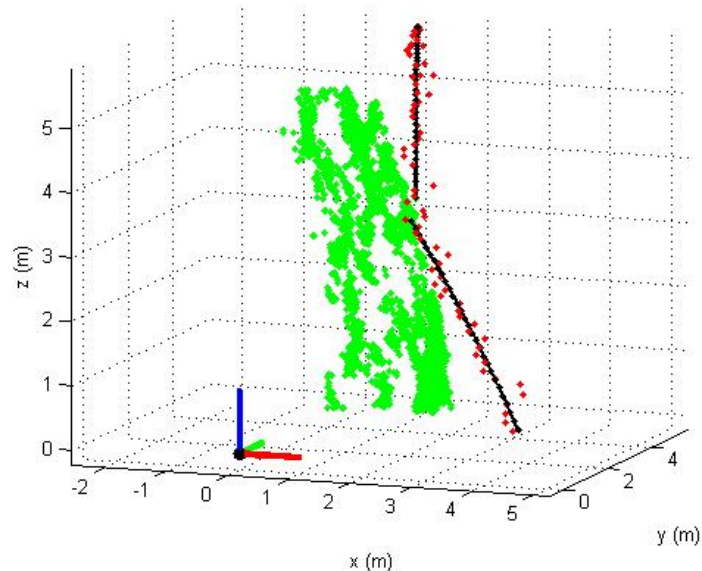


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΧVII

ΔΟΚΙΜΕΣ ΠΕΔΙΟΥ
ΔΟΚΙΜΙΟ ΤΥΧΑΙΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ
ΚΛΙΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ: 75°

α/α	V_i (m/s)	V_r (m/s)	$V_{n,i}$ (m/s)	$V_{t,i}$ (m/s)	$V_{n,r}$ (m/s)	$V_{t,r}$ (m/s)	R	R _n	R _t	e (°)	i (°)	r (°)
1	7,03	6,59	-1,17	6,93	2,11	6,24	0,94	1,81	0,90	35,6	9,5	17,7
2	5,41	4,49	-0,69	5,37	0,31	4,48	0,83	0,45	0,83	20,5	7,1	3,0
3	7,51	6,86	-1,07	7,44	2,01	6,56	0,91	1,88	0,88	18,3	7,9	16,5
4	8,22	5,16	-0,95	8,17	1,93	4,78	0,63	2,03	0,59	-0,8	6,3	19,9
5	8,53	4,80	-1,55	8,39	2,21	4,26	0,56	1,43	0,51	19,5	10,7	25,4
6	9,55	8,52	-1,85	9,37	1,54	8,38	0,89	0,83	0,89	28,8	11,1	9,9
7	8,50	6,26	-1,37	8,39	1,37	6,10	0,74	1,00	0,73	13,1	9,1	11,6
8	8,48	5,34	-1,02	8,42	2,17	4,88	0,63	2,13	0,58	16,0	6,7	22,0
9	8,98	6,11	-1,01	8,92	1,96	5,78	0,68	1,93	0,65	3,5	6,2	17,1
10	8,33	5,85	-0,53	8,31	1,70	5,59	0,70	3,19	0,67	-8,5	3,2	15,6
11	9,49	6,98	-1,34	9,40	3,86	5,81	0,74	2,89	0,62	11,0	10,1	32,5
12	10,01	6,68	-1,20	9,94	2,23	6,30	0,67	1,86	0,63	-20,5	8,5	18,4

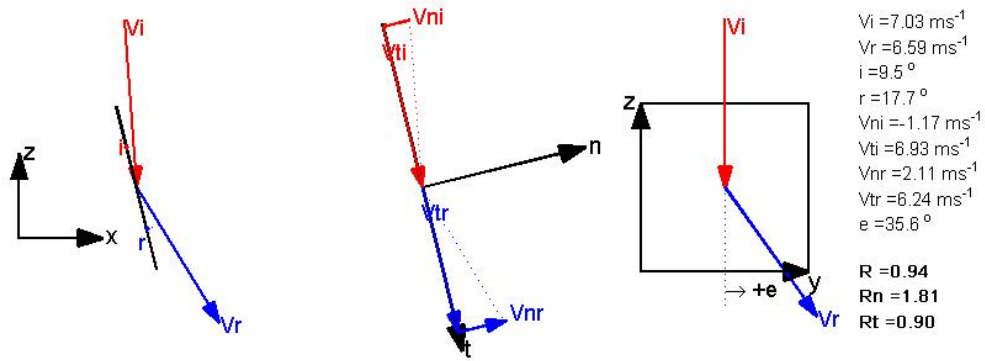


ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΒΟΥΔΡΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΚΩΣΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

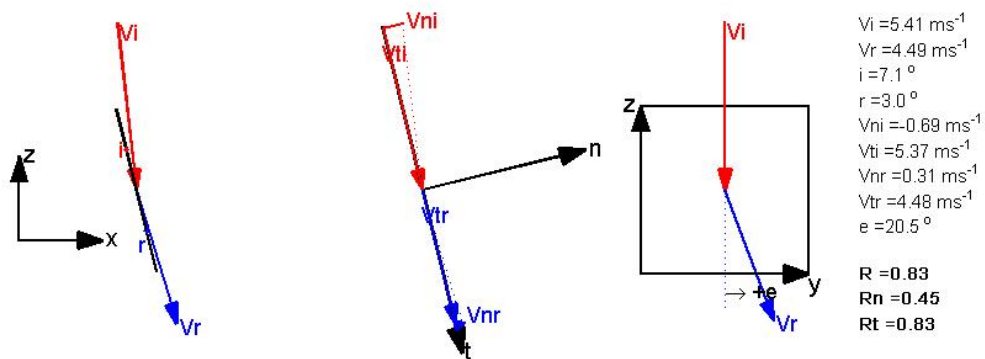


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

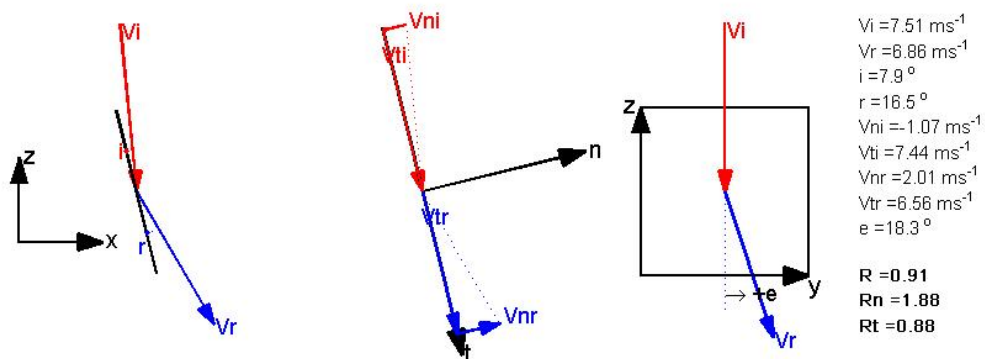
R-F-75-1



R-F-75-2



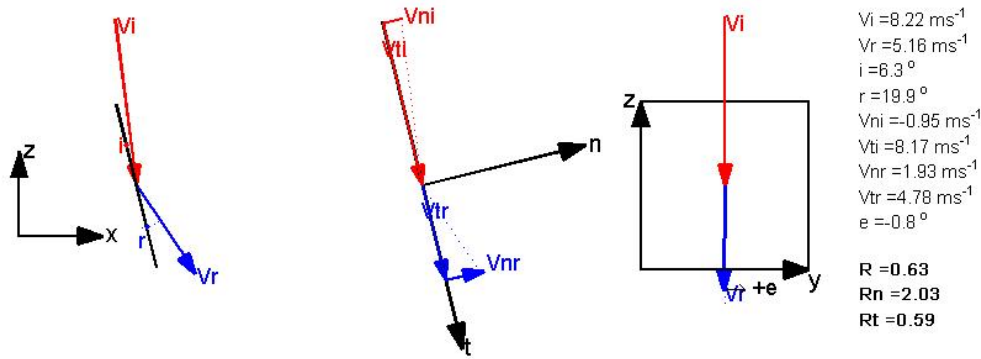
R-F-75-3



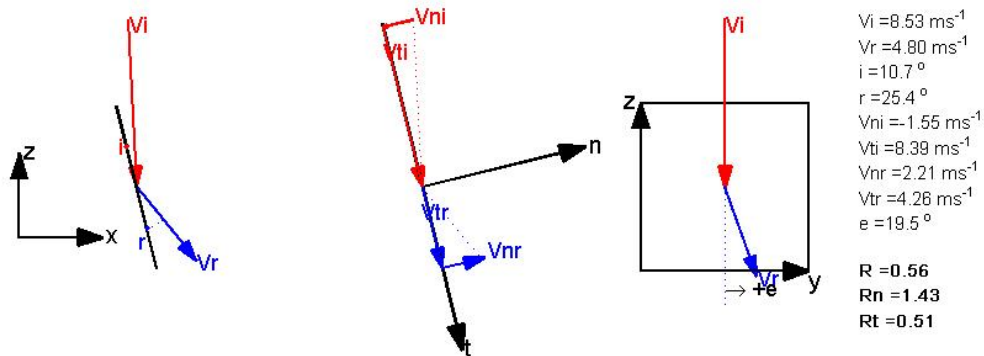


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

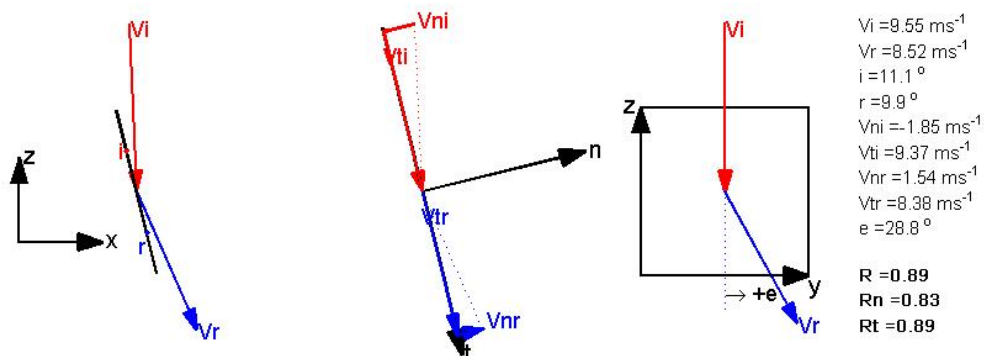
R-F-75-4



R-F-75-5



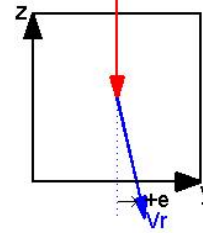
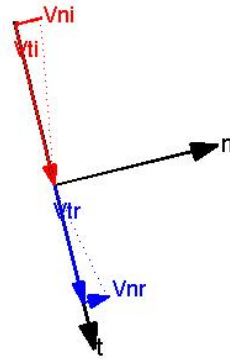
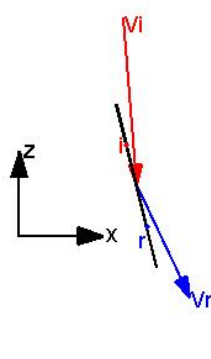
R-F-75-6





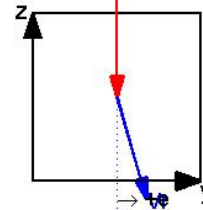
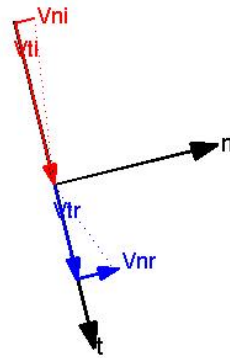
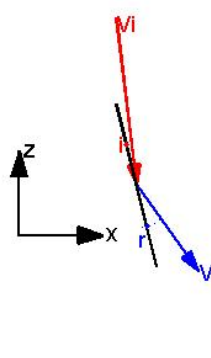
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

R-F-75-7



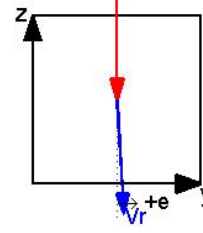
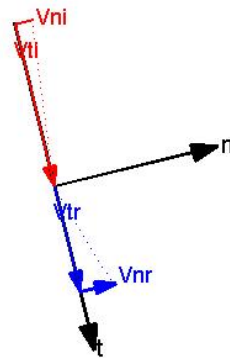
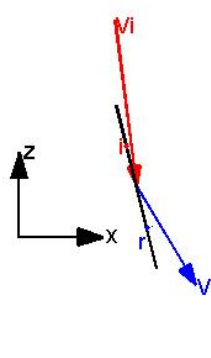
$V_i = 8.50 \text{ ms}^{-1}$
 $V_r = 6.26 \text{ ms}^{-1}$
 $i = 9.1^\circ$
 $r = 11.6^\circ$
 $V_{ni} = -1.37 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{ti} = 8.39 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{nr} = 1.37 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{tr} = 6.10 \text{ ms}^{-1}$
 $e = 13.1^\circ$
 $R = 0.74$
 $R_n = 1.00$
 $R_t = 0.73$

R-F-75-8



$V_i = 8.48 \text{ ms}^{-1}$
 $V_r = 5.34 \text{ ms}^{-1}$
 $i = 6.7^\circ$
 $r = 22.0^\circ$
 $V_{ni} = -1.02 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{ti} = 8.42 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{nr} = 2.17 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{tr} = 4.88 \text{ ms}^{-1}$
 $e = 16.0^\circ$
 $R = 0.63$
 $R_n = 2.13$
 $R_t = 0.58$

R-F-75-9

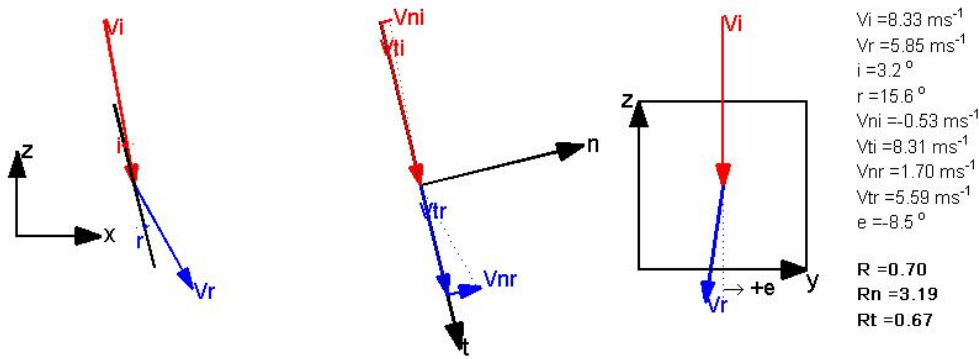


$V_i = 8.98 \text{ ms}^{-1}$
 $V_r = 6.11 \text{ ms}^{-1}$
 $i = 6.2^\circ$
 $r = 17.1^\circ$
 $V_{ni} = -1.01 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{ti} = 8.92 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{nr} = 1.96 \text{ ms}^{-1}$
 $V_{tr} = 5.78 \text{ ms}^{-1}$
 $e = 3.5^\circ$
 $R = 0.68$
 $R_n = 1.93$
 $R_t = 0.65$

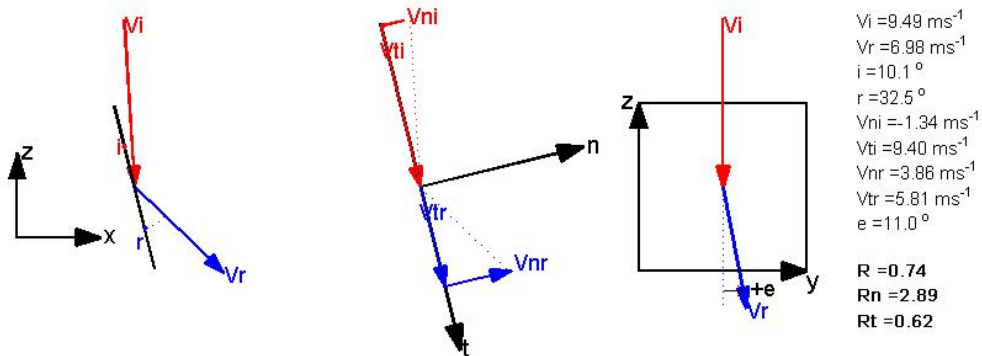


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΟΠΤΩΣΕΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

R-F-75-10



R-F-75-11



R-F-75-12

