

Διαστασιολόγηση τάφρων ανάσχεσης καταπτώσεων



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Διαστασιολόγηση τάφρων ανάσχεσης καταπτώσεων



Κάνζας Νικόλαος: Αριθμός μητρώου cw6859

Επιβλέπων καθηγητής : Παύλος Αστερίου
Αθήνα Ιούνιος 2021



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Όνοματεπώνυμο φοιτητή: **ΚΑΝΖΑΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ**

Τίτλος
Διπλωματικής Εργασίας:

Διαστασιολόγηση τάφρων ανάσχεσης καταπτώσεων

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι
Τριμελή Εξεταστική Επιτροπή:

Πάυλος Αστερίου
Επισκέπτης Καθηγητής
Επιβλέπων

Γεώργιος Μπελόκας
Επίκουρος Καθηγητής
Μέλος

Ελένη Καπόγιαννη
Επισκέπτης Καθηγητής
Μέλος

ΑΙΓΑΛΕΩ, Ιούλιος 2021

Διαστασιολόγηση τάφρων ανάσχεσης καταπτώσεων

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Κάνζας Νικόλαος του Φαίδωνα, με αριθμό μητρώου cw6859 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι: «Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος. Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου».

Ο Δηλών
[Κάνζας Νικόλαος]
[υπογραφή]



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αναφέρεται στις καταπτώσεις βράχων, ένα φαινόμενο κατά το οποίο αστοχούν βραχώδη τεμάχη από πρηνή και μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα κατά την κατάπτωσή τους, με το κύριο πρόβλημα να παρατηρείται στα οδικά δίκτυα ορεινών περιοχών ή σε βραχώδη ορύγματα. Στόχος των μέτρων προστασίας είναι ο βράχος που θα αστοχήσει να συγκρατηθεί από τα διάφορα μέτρα ανάσχεσης καταπτώσεων που υπάρχουν για την προστασία του δρόμου και των χρηστών. Σε ορισμένες ωστόσο περιπτώσεις, είτε λόγω έλλειψης μέτρων αντιμετώπισης είτε μη επαρκών μέτρων, τα τεμάχη δύναται να βρεθούν στο οδόστρωμα κλείνοντας τον δρόμο. Σπανιότερα, κάποιο τέμαχος είναι πιθανό να προσκρούσει σε όχημα. Για την αποφυγή της παραπάνω κατάστασης, είναι πολύ σημαντική η σωστή διαστασιολόγηση και τοποθέτηση μέτρων ανάσχεσης καταπτώσεων. Στην παρούσα διπλωματική γίνεται αρχικά μια περιγραφή των κατολισθήσεων, του συμβάντος όπου αστοχούν βραχώδη εδάφη και βράχοι υπό την επίδραση της βαρύτητας. Στην συνέχεια, αναφέρονται αναλυτικά τα αίτια που προκαλούν τις καταπτώσεις και γίνεται ανασκόπηση των διάφορων μέτρων αντιμετώπισης των καταπτώσεων τεμαχών. Η μεγαλύτερη έμφαση δίνεται στις τάφρους ανάσχεσης καταπτώσεων, που αποτελούν αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής. Καταπτώσεις βράχων, συμβαίνουν συνήθως μετά από σεισμικές δονήσεις και ισχυρές βροχοπτώσεις. Στα περισσότερα βραχώδη πρηνή, είναι εμφανή τα τεμάχη που είναι επιρρεπή σε πτώση λόγω των ασυνεχειών που διαχωρίζουν το βραχώδες υλικό σε επιμέρους τεμάχη. Αξιολογώντας πληροφορίες από την παρατήρηση του πρανούς και των τεμαχών, των καιρικών συνθηκών και την πιθανότητα του να γίνει σεισμός, μπορεί να προβλεφθεί η αστοχία και να ληφθούν μέτρα αντιμετώπισης. Για τον σκοπό αυτό, στην παρούσα εργασία γίνεται παραμετρική ανάλυση με τη χρήση του εξειδικευμένου λογισμικού RocFall, εξετάζοντας τις βασικές παραμέτρους που επηρεάζουν τη διαστασιολόγηση των τάφρων ανάσχεσης σε πρηνή οδοποιία. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζεται το ύψος και η κλίση του πρανούς, οι συντελεστές αναπήδησης – που σχετίζονται με το είδος του υλικού που δομεί το πρηνές και διάφορες κλίσεις τάφρων ανάσχεσης.

Λέξεις – κλειδιά: Κατάπτωση βράχων, μέτρα ανάσχεσης καταπτώσεων, τάφροι ανάσχεσης καταπτώσεων, αίτια καταπτώσεων, συντελεστής αναπήδησης, λογισμικό Rocfall.

ABSTRACT

This bachelor thesis concerns the rockfalls, a phenomenon that can cause slope failures, which can lead to problems due to block falls onto the road network of mountainous regions or rocky cuts. The aim of the protection measures is to restrain the falling blocks in order to protect the users of the road network. However, sometimes rock failures may affect in a negative way, like blocking a part of the road network due to the limited or non-existent precaution measures. For the avoidance of the aforementioned situations, dimensioning and the establishment of the necessary rock fall precaution measures are considered to be an important priority. In this particular thesis, a detailed description is being made about rock falls, the phenomenon that results in rock failure. Furthermore, the triggering factors that provoke rock fall occurrences and a review of the precaution measures for the rock falls are being elaborated. The most important part of this thesis is the rock fall cut. The main triggering factors of the rock falls are the seismic vibrations and heavy rainfalls. The majority of rocky slopes, due to the discontinuities that divide the rockmass into rock blocks, is noticeable in the parts of the cuts that are prone to fail. Taking into consideration the condition of the rocky slope, the meteorological conditions of the study area and the likelihood to earthquakes, the appropriate measures can be taken for the avoidance of rock failure. For this purpose, in this particular study a parametric analysis with the use of a specific program -that is called "Rocfall"- is conducted, examining the main parameters that affect the dimensioning of the ditches that are created from road constructions. More specifically, the parameters examined with the analyses performed are: the height and the slope of the cut, the coefficients of restitution that are related to the rock type of the cut and various catchment ditches geometries.

Keywords: Rock fall, rock fall prevention measures, catchment ditch trenches, triggering factors of rock fall, coefficient of restitution, and program "Rocfall".

Περιεχόμενα

Σκοπός Εργασίας και Ανασκόπηση.....	13
Ευχαριστίες	14
Κεφάλαιο 1	15
1.1 Γενική ανασκόπηση.....	15
1.2 Κατολισθήσεις	15
1.2.1 Ταχύτητα και τύπος μετακίνησης.....	16
1.2.2 Υλικά και τύπος μετακίνησης	17
1.3 Περιστατικά καταπτώσεων.....	22
Κεφάλαιο 2	25
2.1 Αίτια καταπτώσεων.....	25
2.1.1 Τοπογραφικό ανάγλυφο.....	25
2.1.2 Τεκτονική	26
2.1.3 Ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις	26
2.1.4 Αποσάθρωση	28
2.1.5 Χλωρίδα	30
2.1.6 Σεισμική φόρτιση	32
2.1.7 Ανθρώπινη δραστηριότητα	33
2.1.8 Ασυνέχειες.....	33
2.1.8.1 Παράμετροι μηχανικής περιγραφής ασυνεχειών	33
2.2 Μέτρα αντιμετώπισης.....	42
2.2.1 Γενικά στοιχεία	42
2.2.2 Ενεργητικά μέτρα	42
2.2.3 Παθητικά μέτρα.....	45
2.2.4 Στοιχεία για την εφαρμογή των μέτρων προστασίας	52
Κεφάλαιο 3	53
3.1 Τάφροι ανάσχεσης καταπτώσεων.....	53
3.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα	54
3.2.1 Πλεονεκτήματα.....	54
3.2.2 Μειονεκτήματα	54
3.3 Μελέτη των τάφρων ανάσχεσης	55
3.4 Απόσταση πρόσκρουσης.....	61
3.5 Απόσταση Κύλισης	61
3.6 Διαδικασία σχεδιασμού με τη μέθοδο ΟΔΟΤ.....	62
3.7 Σύστημα αξιολόγησης κινδύνου καταπτώσεων	65
3.8 Ελληνικοί κανονισμοί.....	69

3.8.1 Κανονισμός Μελετών Ερευνών (ΚΜΕ)	69
3.8.2 Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων (ΟΜΟΕ)	72
Κεφάλαιο 4	74
4.1 Ανάλυση φαινομένου – Εξισώσεις κίνησης	74
4.1.1 Παραβολική τροχιά	74
4.1.2 Ολίσθηση	75
4.1.3 Κύλιση	76
4.1.4 Αναπήδηση	78
4.1.4.1 Φαινόμενο κρούσης	79
4.1.4.2 Συντελεστές αναπήδησης	80
4.1.4.3 Τιμές Συντελεστών αναπήδησης	82
4.1.4.4 Παράγοντες που επηρεάζουν τους συντελεστές αναπήδησης	86
4.2 Εμπειρικές συσχετίσεις μεταξύ των ιδιοτήτων τεμαχών και των συντελεστών αναπήδησης	87
4.3 Ειδικές περιπτώσεις πρόσκρουσης	89
4.3.1 Θραύση τεμάχους	90
4.3.2 Δημιουργία κρατήρα στην επιφάνεια	91
Κεφάλαιο 5	94
5.1 Λογισμικό Rocfall	94
5.2 Στοιχεία λογισμικού	94
5.3 Επιλογές ανάλυσης	95
Κεφάλαιο 6	102
6.1 Αναλύσεις του Rocfall	102
6.2 Επιλογές δεδομένων	103
6.3 Εξαγωγή αποτελεσμάτων	104
6.4 Ανάλυση αποτελεσμάτων	106
6.4.1 Αποτελέσματα	106
6.4.1.1 Αποτελέσματα αναλύσεων σε ύψος πρανούς 12 μέτρα με συντελεστή κάθετης αναπήδησης 0,45	107
6.4.1.2 Αποτελέσματα αναλύσεων σε ύψος πρανούς 12 μέτρα με συντελεστή κάθετης αναπήδησης 0,35	111
6.4.1.3 Αποτελέσματα αναλύσεων σε ύψος πρανούς 12 μέτρα με συντελεστή κάθετης αναπήδησης 0,25	115
6.4.1.4 Αποτελέσματα αναλύσεων σε ύψος πρανούς 8 μέτρα με συντελεστή κάθετης αναπήδησης 0,45	119
6.4.1.5 Αποτελέσματα αναλύσεων σε ύψος πρανούς 8 μέτρα με συντελεστή κάθετης αναπήδησης 0,35	123

6.4.1.6 Αποτελέσματα αναλύσεων σε ύψος πρανούς 8 μέτρα με συντελεστή κάθετης αναπήδησης 0,25	127
6.4.1.7 Αποτελέσματα αναλύσεων σε ύψος πρανούς 4 μέτρα με συντελεστή κάθετης αναπήδησης 0,45	131
6.4.1.8 Αποτελέσματα αναλύσεων σε ύψος πρανούς 4 μέτρα με συντελεστή κάθετης αναπήδησης 0,35	135
6.4.1.9 Αποτελέσματα αναλύσεων σε ύψος πρανούς 4 μέτρα με συντελεστή κάθετης αναπήδησης 0,25	139
6.5 Συμπεράσματα	143
Κεφάλαιο 7	147
7.1 Σύνοψη	147
7.2 Προτάσεις για μελλοντική αξιοποίηση της ανάλυσης.....	148
Βιβλιογραφία.....	153
Παράρτημα	156

Εικόνες, Πίνακες και Διαγράμματα

Εικόνα (1.2) Ταχύτητα μετακίνησης, χαρακτηρισμός και κατάταξη της ταχύτητας (Cruden & Varnes, 1996).....	16
Εικόνα (1.1) Ταχύτητα μετακίνησης και χαρακτηρισμός (Cruden & Varnes, 1996)	16
Πίνακας (1.1) Χαρακτηρισμός κατολίσθησης με βάση την ταχύτητα μετακίνησης	16
Πίνακας (1.2) Χαρακτηρισμός κατολίσθησης με βάση την ταχύτητα μετακίνησης	17
Εικόνα (1.3) Πτώση βράχων Τρόδος (must.com.cy)	18
Εικόνα (1.4) Ανατροπή βράχου ΗΠΑ Γιούτα (Novotny, 2013) Varnes landslide classification 1978).....	18
Εικόνα (1.6) Μεταφορική ολίσθηση (ONEGeologykids, n.d.) (onegeology.org)	19
Εικόνα (1.5) Περιστροφική ολίσθηση (ONEGeologykids, n.d.) (onegeology.org)	19
Εικόνα (1.7) Είδη κατολίσθησης (ARIZONA GEOLOGICAL SURVEY, 2021) (azgs.arizona.edu)	20
Εικόνα (1.8) Ταξινόμηση κατολισθήσεων κατά Varnes 1978 (Novotny, 2013) (Varnes landslide classification 1978).....	21
Εικόνα (1.9) Χάρτης ευαισθησίας καταπτώσεων (Saroglou, 2019) (researchgate.net)	22
Εικόνα (1.10) Χάρτης κλίσης πρηνών (Saroglou, 2019) (researchgate.net)	23
Εικόνα (1.11) Παραλία ναυάγιο Ζάκυνθος (Προσωπικό αρχείο)	24
Εικόνα (2.1) Αίτια καταπτώσεων (Αστερίου, 2021)	25
Εικόνα (2.2) Τεκτονική δραστηριότητα Ελλάδας (oasp.gr).....	26
Εικόνα (2.3) Χάρτης μέσης ετήσιας βροχόπτωσης (geogreece.gr).....	27
Εικόνα (2.4) Υδρολογικός κύκλος νερού (USGS, 2018) (www.usgs.gov)	28
Εικόνα (2.5) Υδρολογική και μηχανική επίδραση δέντρου στην ευστάθεια πρηνών (iorscience.ior.org) (Mulyono, et al., 2018)	30
Εικόνα (2.6) Χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας Ελλάδας (civilprotection.gr) (ΦΕΚ, 2003) ..	32
Εικόνα (2.7) Δυσμενής και ευμενής προσανατολισμός ασυνέχειας (Αστερίου, 2020).....	34
Πίνακας (2.1) Ταξινόμηση αποστάσεων ασυνεχειών	34
Εικόνα (2.8) Αποστάσεις Ασυνεχειών (Αστερίου, 2020).....	35
Πίνακας (2.2) Ταξινόμηση συνέχειας και εξάπλωσης	35
Εικόνα (2.9) Εμμόνη Εξάπλωση και Συνέχεια ασυνέχειας (Wikipedia, 2020) (en.Wikipedia.org).....	36
Εικόνα (2.10) Σφύρα Schmidt και διάγραμμα Schmidt (Αστερίου, 2020)	37
Εικόνα (2.11) Γεωλογικό σφυρί (Indiamart.com).....	37
Πίνακας (2.3) Ταξινόμηση των τοιχωμάτων με την σκληρότητα Schmidt.....	38
Πίνακας (2.4) Ταξινόμηση βραχώδους υλικού με την χρήση σφυριού και μαχαριού	38
Εικόνα (2.12) Όργανο μέτρησης - αποτύπωσης επιφάνειας (Αστερίου, 2020)	39
Εικόνα (2.13) Τυποποιημένα προφίλ τραχύτητας επιφανειών και τιμές JRC (Αστερίου, 2020)	39
Πίνακας (2.5) Ταξινόμηση ανοίγματος ασυνεχειών	40
Εικόνα (2.14) Ανοίγματα ασυνεχειών, κλειστή, ανοιχτή και με υλικό πλήρωσης (Αστερίου, 2020).....	40
Πίνακας (2.6) Περιγραφή υπόγειου νερού εντός ασυνεχειών χωρίς και με υλικό πλήρωσης	41
Εικόνα (2.15) Επιφάνεια που έχει αποκολληθεί βράχος, και έντονες ασυνέχειες (Μαλακάσα) (Προσωπικό αρχείο).....	41
Εικόνα (2.16) Αφαίρεση βράχων με εκσκαφέα (onlinerpubs.trb.org)	42
Εικόνα (2.17) Αφαίρεση βράχων με ειδικό εκσκαφέα (onlinerpubs.trb.org)	42

Εικόνα (2.20) Αφαίρεση βράχων από εργάτες με ανυψωτικό μηχάνημα (onlinerepubs.trb.org)	43
Εικόνα (2.19) Αφαίρεση βράχων από εργάτες με ανυψωτικό μηχάνημα (onlinerepubs.trb.org)	43
Εικόνα (2.18) Αφαίρεση βράχων από εργάτες με σχοινιά (onlinerepubs.trb.org)	43
Εικόνα (2.22) Αφαίρεση βράχων από εργάτες με ανυψωτικό μηχάνημα (onlinerepubs.trb.org)	43
Εικόνα (2.21) Αφαίρεση βράχων από εργάτες με ανυψωτικό μηχάνημα (onlinerepubs.trb.org)	43
Εικόνα (2.23) Αγκύριο, (Λόφος Σικελίας Καλλιθέα) (Προσωπικό αρχείο)	43
Εικόνα (2.24) Μεγάλος βράχος και αγκύρια υποστήριξης (Αστερίου, 2021)	44
Εικόνα (2.27) Δύσκαμπτος φράχτης και χαντάκι (Μαλακάσα) (Προσωπικό αρχείο)	45
Εικόνα (2.26) Δύσκαμπτος φράχτης (Μαλακάσα) (Προσωπικό αρχείο)	45
Εικόνα (2.25) Δύσκαμπτος φράχτης (Μαλακάσα) (Προσωπικό αρχείο)	45
Εικόνα (2.31) Κατασκευαστικό σχέδιο εύκαμπτου φράχτη (fhwa.dot.gov)	46
Εικόνα (2.30) Εύκαμπτος φράχτης (geotech.hr)	46
Εικόνα (2.29) Εύκαμπτος φράχτης (Λόφος Σικελίας Καλλιθέα) (Προσωπικό αρχείο)	46
Εικόνα (2.28) Διατομή εύκαμπτου φράχτη (Αστερίου, 2016)	46
Εικόνα (2.32) Συγκράτηση βράχου από εύκαμπτο φράχτη (Αστερίου, 2016)	47
Εικόνα (2.33) Λεπτομέρειες αποσβεστήρων εύκαμπτων φραχτών (geotech.hr)	47
Εικόνα (2.34) Εύκαμπτος φράχτης χωρίς μηχανισμούς απόσβεσης (geobrugg.com)	47
Εικόνα (2.35) Μεταλλικό πλέγμα (Μαλακάσα) (Προσωπικό αρχείο)	48
Εικόνα (2.36) Μεταλλικό πλέγμα (Μαλακάσα) (Προσωπικό αρχείο)	48
Εικόνα (2.37) Μεταλλικό πλέγμα (Maccaferri.com)	48
Εικόνα (2.38) Μεταλλικό πλέγμα με αγκύρια (Λόφος Σικελίας Καλλιθέα) (Προσωπικό αρχείο)	49
Εικόνα (2.39) Επίχωμα ανάσχεσης καταπτώσεων (Maccaferri.com)	49
Εικόνα (2.40) Τυπική διατομή οπλισμένου επιχώματος (Protection Badger, Duffy, Schellenberg)	50
Εικόνα (2.41) Οπλισμένο επίχωμα (building.govt.nz)	50
Εικόνα (2.42) Συμβατικό επίχωμα με υποστήριξη λίθων (building.govt.nz)	50
Εικόνα (2.43) Επίχωμα από συρματοκιβώτια (building.govt.nz)	50
Εικόνα (2.44) Διαφορετικοί τύποι στεγάστρων. (a) Τυπικό οπλισμένου σκυροδέματος (b) Κυκλικής διατομής τύπου κελύφους από οπλισμένο σκυρόδεμα (c) Επιτόπου κατασκευασμένο από οπλισμένο σκυρόδεμα (d) Σύμμικτο στέγαστρο. (Protection Badger, Duffy, Schellenberg)	51
Εικόνα (2.45) Στέγαστρο καταπτώσεων (Αστερίου, 2021)	51
Εικόνα (2.46) Αντοχή παθητικών μέτρων προστασίας στην κινητική ενέργεια των τεμαχών (Αστερίου, 2021)	52
Εικόνα (3.1) Τάφρος ανάσχεσης καταπτώσεων (fhwa.dot.gov)	53
Εικόνα (3.3) Διάγραμμα σχεδίασης τάφρων (Ritchie 1963) (Oregon.gov/ODOT)	55
Εικόνα (3.2) Κίνηση τεμάχους συναρτήσεως γωνίας πρανούς (Ritchie 1963) (Oregon.gov/ODOT)	55
Εικόνα (3.4) Τυπική διατομή τάφρου ανάσχεσης στο Όρεγκον με διαφορετικές κλίσεις τάφρου (fhwa.dot.gov)	56
Εικόνα (3.5) Τάφρος γεμάτη με υλικά καταπτώσεων (researchgate.net)	56
Εικόνα (3.6) Τυπική διατομή της τάφρου του Ritchie (dot.ny.gov)	58
Εικόνα (3.7) Χαρακτηριστικά στοιχεία της μελέτης (Oregon.gov/ODOT)	59

Εικόνα (3.8) Επιτόπου δοκιμές κατάπτωσης βράχων (Oregon.gov/ODOT).....	60
Εικόνα (3.9) Τέμαχος συγκρατημένο σε τάφρο (Μαλακάσα) (Προσωπικό αρχείο).....	60
Εικόνα (3.10) Τέμαχος συγκρατημένο σε τάφρο (Μαλακάσα) (Προσωπικό αρχείο).....	60
Εικόνα (3.11) Διάφορες περιπτώσεις κατάπτωσης με διαφορετικές αποστάσεις πρόσκρουσης (oregon.gov/ODOT).....	61
Εικόνα (3.12) Απόσταση κύλισης (oregon.gov/ODOT)	62
Εικόνα (3.13) Διάγραμμα διαστασιολόγησης τάφρου (oregon.gov/ODOT).....	63
Εικόνα (3.14) Έλεγχος απόδοσης τάφρου ανάσχεσης (oregon.gov/ODOT)	64
Εικόνα (3.15) Σύστημα αξιολόγησης κινδύνου καταπτώσεων (R.H.R.S)	65
Εικόνα (3.16) Βαθμοί συναρτήσεως ύψους πρηνούς (R.H.R.S) (rocscience.com)	66
Εικόνα (3.17) Πρηνές επιρρεπές σε καταπτώσεις (Μαλακάσα) (Προσωπικό αρχείο).....	68
Πίνακας (3.1) Μέγιστες κλίσεις ορυγμάτων (ΚΜΕ).....	69
Εικόνα (3.18) Διατομή τάφρου και τοίχου ανάσχεσης, πίνακας επιλογής πλάτους τάφρου και επεξήγηση σημείων (ΚΜΕ 28.2.96).....	71
Πίνακας (3.2) Διαστάσεις τάφρου ανάσχεσης καταπτώσεων βραχωδών ορυγμάτων (ΟΜΟΕ – Δ).....	72
Εικόνα (3.19) Τυπικές διατομές τάφρου ανάσχεσης, με μεταλλικό στηθαίο και με στηθαίο NJ (ΟΜΟΕ-Δ).....	73
Εικόνα (4.1) Είδη κίνησης τεμάχους πάνω στο πρηνές μετά την αποκόλλησή του (Αστερίου, 2016).....	74
Εικόνα (4.2) Παραβολική κίνηση (physicslessons.blogspot.com)	74
Εικόνα (4.3) Παραβολική κίνηση (Αστερίου, 2016)	74
Εικόνα (4.4) Ολίσθηση τεμάχους (researchgate.net)	75
Εικόνα (4.5) Περιστροφική κίνηση, μεταφορική κίνηση και συνδυασμός τους, κύλιση (physics.stackexchange.com)	76
Εικόνα (4.6) Κύλιση σε κεκλιμένο επίπεδο (physics.stackexchange.com)	76
Πίνακας (4.1) Τιμές συντελεστή κύλισης - ολίσθησης (Αστερίου 2016)	78
Πίνακας (4.2) Παράμετροι που επηρεάζουν την αναπήδηση (Αστερίου, 2016).....	78
Εικόνα (4.7) Αναπήδηση τεμαχών (Αστερίου, 2021)	79
Εικόνα (4.8) Συντελεστές αναπήδησης (Αστερίου, 2021).....	80
Πίνακας (4.3) Τιμές συντελεστών αναπήδησης από την βιβλιογραφία.....	83
Εικόνα (4.9) Διάγραμμα κάθετου και εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης Fornaro (Αστερίου, 2016)	88
Εικόνα (4.10) Θραυσμένο τέμαχος σε δύο κύρια κομμάτια (Μαλακάσα) (Προσωπικό αρχείο).....	90
Εικόνα (4.11) Θραύση τεμάχους σε τέσσερα στάδια. (α) Κατάπτωση (β) Πρόσκρουση με επιφάνεια (γ) θραύση τεμάχους σε κομμάτια (δ) εκτόξευση θραυόμενων τεμαχών (Πήλιο Ευβοίας) (Προσωπικό αρχείο)	91
Εικόνα (4.12) Κρατήρας από σφαιρικό δοκίμιο (hindawi.com).....	92
Εικόνα 5.1) Λογότυπο RocFall και τροχιές τεμαχών (geoengineer.org)	94
Εικόνα (5.2) Περιβάλλον εργασίας Rocfall.....	95
Εικόνα (5.3) Διατομή πρηνούς σχεδιασμένο με χρήση συντεταγμένων	95
Εικόνα (5.4) Διατομή πρηνούς σχεδιασμένο ελεύθερα	95
Εικόνα (5.5) Επιλογή αρχικών συνθηκών.....	96
Πίνακας (5.1) Τύποι υλικού και συντελεστές τους με βάση το Rocfall	97
Εικόνα (5.6) Παράθυρο επιλογής υλικού και συντελεστών	97
Εικόνα (5.7) Τραχύτητα επιφάνειας πρηνούς.....	98
Εικόνα (5.8) Ρυθμίσεις και τελικές επιλογές εξειδικευμένων επιλογών	98

Εικόνα (5.9) Τροχιά με και χωρίς συνυπολογισμό περιστροφικής ταχύτητας	100
Εικόνα (5.10) Διάγραμμα επιλογής συντελεστή διόρθωσης με ταχύτητα τεμάχους.....	100
Εικόνα (5.11) Τυπικό παράδειγμα πρανούς με φράχτη ανάσχεσης.....	101
Πίνακας (6.1) Βασικές παράμετροι σχεδιασμού και ανάλυσης για τις τάφρους ανάσχεσης καταπτώσεων	102
Εικόνα(6.2) 60/8/0.25 Ανάλυση	104
Εικόνα (6.1) 90/12/0.45 Ανάλυση	104
Εικόνα (6.3) Ανάλυση τροχιών πολλών τεμαχών και διάγραμμα Αριθμού τεμαχών – Απόσταση ηρεμίας, Ακολουθεί την κανονική κατανομή.....	105
Πίνακας (6.2) Αποτελέσματα αναλύσεων σε ύψος πρανούς 12 μέτρα με συντελεστή κάθετης αναπήδησης 0,45	107
Διαγράμματα (6.1),(6.2),(6.3) Διαγράμματα απόστασης ηρεμίας συναρτήσει κλίσης πρανούς για P100, P95 και P50.....	108
Διαγράμματα (6.4),(6.5),(6.6) Διαγράμματα ύψους αναπήδησης συναρτήσει κλίσης πρανούς για οριζόντιες αποστάσεις από τον πόδα του πρανούς 1,2,3,4 και 5 μέτρα.	109
Διαγράμματα (6.7),(6.8),(6.9) Διαγράμματα ύψους αναπήδησης σε 1,3 και 5 μέτρα οριζόντιας απόστασης από τον πόδα του πρανούς συναρτήσει της κλίσης πρανούς.....	110
Πίνακας (6.3) Αποτελέσματα αναλύσεων σε ύψος πρανούς 12 μέτρα με συντελεστή κάθετης αναπήδησης 0,35	111
Διαγράμματα (6.10),(6.11),(6.12) Διαγράμματα απόστασης ηρεμίας συναρτήσει κλίσης πρανούς για P100, P95 και P50.....	112
Διαγράμματα (6.13),(6.14),(6.15) Διαγράμματα ύψους αναπήδησης συναρτήσει κλίσης πρανούς για οριζόντιες αποστάσεις από τον πόδα του πρανούς 1,2,3,4 και 5 μέτρα.	113
Διαγράμματα (6.16),(6.17),(6.18) Διαγράμματα ύψους αναπήδησης σε 1,3 και 5 μέτρα οριζόντιας απόστασης από τον πόδα του πρανούς συναρτήσει της κλίσης πρανούς.....	114
Πίνακας (6.4) Αποτελέσματα αναλύσεων σε ύψος πρανούς 12 μέτρα με συντελεστή κάθετης αναπήδησης 0,25	115
Διαγράμματα (6.19),(6.20),(6.21) Διαγράμματα απόστασης ηρεμίας συναρτήσει κλίσης πρανούς για P100, P95 και P50.....	116
Διαγράμματα (6.22),(6.23),(6.24) Διαγράμματα ύψους αναπήδησης συναρτήσει κλίσης πρανούς για οριζόντιες αποστάσεις από τον πόδα του πρανούς 1,2,3,4 και 5 μέτρα.	117
Διαγράμματα (6.25),(6.26),(6.27) Διαγράμματα ύψους αναπήδησης σε 1,3 και 5 μέτρα οριζόντιας απόστασης από τον πόδα του πρανούς συναρτήσει της κλίσης πρανούς.....	118
Πίνακας (6.5) Αποτελέσματα αναλύσεων σε ύψος πρανούς 8 μέτρα με συντελεστή κάθετης αναπήδησης 0,45	119
Διαγράμματα (6.28),(6.29),(6.30) Διαγράμματα απόστασης ηρεμίας συναρτήσει κλίσης πρανούς για P100, P95 και P50.....	120
Διαγράμματα (6.31),(6.32),(6.33) Διαγράμματα ύψους αναπήδησης συναρτήσει κλίσης πρανούς για οριζόντιες αποστάσεις από τον πόδα του πρανούς 1,2,3,4 και 5 μέτρα.	121
Διαγράμματα (6.34),(6.35),(6.36) Διαγράμματα ύψους αναπήδησης σε 1,3 και 5 μέτρα οριζόντιας απόστασης από τον πόδα του πρανούς συναρτήσει της κλίσης πρανούς.....	122
Πίνακας (6.6) Αποτελέσματα αναλύσεων σε ύψος πρανούς 8 μέτρα με συντελεστή κάθετης αναπήδησης 0,35	123
Διαγράμματα (6.37),(6.38),(6.39) Διαγράμματα απόστασης ηρεμίας συναρτήσει κλίσης πρανούς για P100, P95 και P50.....	124
Διαγράμματα (6.40),(6.41),(6.42) Διαγράμματα ύψους αναπήδησης συναρτήσει κλίσης πρανούς για οριζόντιες αποστάσεις από τον πόδα του πρανούς 1,2,3,4 και 5 μέτρα.	125

Διαγράμματα (6.43),(6.44),(6.45) Διαγράμματα ύψους αναπήδησης σε 1,3 και 5 μέτρα οριζόντιας απόστασης από τον πόδα του πρανού συναρτήσει της κλίσης πρανού.....	126
Πίνακας (6.7) Αποτελέσματα αναλύσεων σε ύψος πρανού 8 μέτρα με συντελεστή κάθετης αναπήδησης 0,25	127
Διαγράμματα (6.46),(6.47),(6.48) Διαγράμματα απόστασης ηρεμίας συναρτήσει κλίσης πρανού για P100, P95 και P50.....	128
Διαγράμματα (6.49),(6.50),(6.51) Διαγράμματα ύψους αναπήδησης συναρτήσει κλίσης πρανού για οριζόντιες αποστάσεις από τον πόδα του πρανού 1,2,3,4 και 5 μέτρα.	129
Διαγράμματα (6.52),(6.53),(6.54) Διαγράμματα ύψους αναπήδησης σε 1,3 και 5 μέτρα οριζόντιας απόστασης από τον πόδα του πρανού συναρτήσει της κλίσης πρανού.....	130
Πίνακας (6.8) Αποτελέσματα αναλύσεων σε ύψος πρανού 4 μέτρα με συντελεστή κάθετης αναπήδησης 0,45	131
Διαγράμματα (6.55),(6.56),(6.57) Διαγράμματα απόστασης ηρεμίας συναρτήσει κλίσης πρανού για P100, P95 και P50.....	132
Διαγράμματα (6.58),(6.59),(6.60) Διαγράμματα ύψους αναπήδησης συναρτήσει κλίσης πρανού για οριζόντιες αποστάσεις από τον πόδα του πρανού 1,2,3,4 και 5 μέτρα.	133
Διαγράμματα (6.61),(6.62),(6.63) Διαγράμματα ύψους αναπήδησης σε 1,3 και 5 μέτρα οριζόντιας απόστασης από τον πόδα του πρανού συναρτήσει της κλίσης πρανού.....	134
Πίνακας (6.9) Αποτελέσματα αναλύσεων σε ύψος πρανού 4 μέτρα με συντελεστή κάθετης αναπήδησης 0,35	135
Διαγράμματα (6.64),(6.65),(6.66) Διαγράμματα απόστασης ηρεμίας συναρτήσει κλίσης πρανού για P100, P95 και P50.....	136
Διαγράμματα (6.67),(6.68),(6.69) Διαγράμματα ύψους αναπήδησης συναρτήσει κλίσης πρανού για οριζόντιες αποστάσεις από τον πόδα του πρανού 1,2,3,4 και 5 μέτρα.	137
Διαγράμματα (6.70),(6.71),(6.72) Διαγράμματα ύψους αναπήδησης σε 1,3 και 5 μέτρα οριζόντιας απόστασης από τον πόδα του πρανού συναρτήσει της κλίσης πρανού.....	138
Πίνακας (6.10) Αποτελέσματα αναλύσεων σε ύψος πρανού 4 μέτρα με συντελεστή κάθετης αναπήδησης 0,25	139
Διαγράμματα (6.73),(6.74),(6.75) Διαγράμματα απόστασης ηρεμίας συναρτήσει κλίσης πρανού για P100, P95 και P50.....	140
Διαγράμματα (6.76),(6.77),(6.78) Διαγράμματα ύψους αναπήδησης συναρτήσει κλίσης πρανού για οριζόντιες αποστάσεις από τον πόδα του πρανού 1,2,3,4 και 5 μέτρα.	141
Διαγράμματα (6.79),(6.80),(6.81) Διαγράμματα ύψους αναπήδησης σε 1,3 και 5 μέτρα οριζόντιας απόστασης από τον πόδα του πρανού συναρτήσει της κλίσης πρανού.....	142
Εικόνα (6.4) Ανάλυση 90/12/0.45. Ύψος αναπήδησης σε 1 μέτρο οριζόντιας μετακίνησης από τον πόδα του πρανού.....	144
Πίνακας (6.11) Μέγιστες τιμές ανάλυσης.....	145
Εικόνα (7.1) Αστοχία μικρού τοίχου από κατάπτωση (ΕΟ Χαλκίδας – Αιδηψού) (Προσωπικό αρχείο).....	149
Εικόνα (7.2) Συνδυασμός κατάπτωσης με αστοχία βραχώμαζας. Μη επαρκής τοίχος (ΕΟ Χαλκίδας – Αιδηψού) (Προσωπικό αρχείο)	149
Εικόνα (7.3) Τέμαχος που αστόχησε (ΕΟ Χαλκίδας – Αιδηψού) (Προσωπικό αρχείο).....	150
Εικόνα (7.4) Μεταλλικό πλέγμα και αγκύριο που αστόχησε (Μαλακάσα) (Προσωπικό αρχείο).....	150
Εικόνα (7.5) Τάφρος ανάσχεσης καταπτώσεων με υποστήριξη από δύσκαμπτο φράχτη (Χαλκίδα) (Προσωπικό αρχείο)	151
Εικόνα (7.6) Μεταλλικό Δίχτυ γεμάτο με προϊόντα καταπτώσεων (ΕΟ Χαλκίδας – Αιδηψού) (Προσωπικό αρχείο).....	151

Εικόνα (7.7) Πολλαπλά μέτρα προστασίας. Φράχτης σκυροδέματος, μεταλλικοί φράχτες, και τάφος. (ΕΟ Χαλκίδας – Αιδηψού) (Προσωπικό αρχείο)	151
Εικόνα (7.9) Μεταλλικό δίκτυ αγκυρωμένο σε φράχτη σκυροδέματος (Αυτοκινητόδρομος Α11 Σχηματαρίου – Χαλκίδας) (Προσωπικό αρχείο)	152
Εικόνα (7.10) Πολλαπλά μέτρα προστασίας (ΕΟ Χαλκίδας – Αιδηψού) (Προσωπικό αρχείο)	152
Εικόνα (7.8) Θραύση τεμάχους σε πέντε στάδια. (α) Κατάπτωση (β) Πρόσκρουση με επιφάνεια (γ) θραύση τεμάχους σε κομμάτια (δ,ε) εκτόξευση θραυόμενων τεμαχών (Πήλιο Ευβοίας) (Προσωπικό αρχείο)	152

Εισαγωγή

Σκοπός Εργασίας και Ανασκόπηση

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η μελέτη των τάφρων ανάσχεσης καταπτώσεων. Αρχικά, γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση του φαινομένου των καταπτώσεων βράχων και των μέτρων αντιμετώπισής τους. Η έμφαση δίνεται στο κομμάτι των τάφρων ανάσχεσης καταπτώσεων, που είναι και το μέτρο αντιμετώπισης που αναλύεται παραμετρικά με την χρήση του λογισμικού Rocfall. Η διαδικασία της παραμετρικής ανάλυσης θα μας εξάγει αποτελέσματα για διαφορετικές περιπτώσεις δεδομένων, δημιουργώντας διαγράμματα για μέγιστες αποστάσεις ηρεμίας ή ακινητοποίησης, μέγιστα ύψη αναπήδησης και ύψη αναπήδησης για διάφορες θέσεις μετά τον πόδα του πρανούς. Ο σκοπός αυτής της ανάλυσης είναι η εύρεση αποστάσεων ηρεμίας και αναπήδησεων, ώστε στην συνέχεια με βάση αυτά τα εξαγόμενα αποτελέσματα, να γίνει διαστασιολόγηση τάφρων ανάσχεσης καταπτώσεων, δηλαδή εύρεση βάθους και πλάτους για τις διάφορες περιπτώσεις που θα αναλυθούν.

Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται αναφορά στο αρχικό φαινόμενο που χρειάζεται την αντιμετώπιση και είναι οι κατολισθήσεις. Η ανασκόπηση γίνεται σύμφωνα με το σύστημα ταξινόμησης κατολισθήσεων του Varnes 1978, το οποίο είναι και το πλέον χρησιμοποιούμενο. Χωρίζει αρκετές περιπτώσεις αστοχίας σε κατηγορίες ανάλογα με το υλικό και τύπο μετακίνησης και την ταχύτητα που αναπτύσσουν. Στο τέλος του κεφαλαίου αναφέρονται κάποια πρόσφατα συμβάντα καταπτώσεων.

Στο Κεφάλαιο 2 αναγράφονται αναλυτικά τα αίτια που προκαλούν τις κατολισθήσεις και καταπτώσεις βράχων, ενώ γίνεται και πιο λεπτομερής ανάλυση στις ασυνέχειες, καθώς με βάση την γεωμετρία και τις ιδιότητές τους προκύπτει η αστοχία τεμάχους. Στο δεύτερο μέρος του κεφαλαίου γίνεται περιγραφή των μέτρων αντιμετώπισης των καταπτώσεων.

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφεται λεπτομερώς η τάφρος ανάσχεσης καταπτώσεων, που είναι και το μέτρο που αναλύεται παραμετρικά με το Rocfall σε επόμενο κεφάλαιο. Επίσης, περιγράφεται και αναλύεται η πρώτη μέθοδος υπολογισμού διαστάσεων τάφρων από τον Ritchie το 1969. Στην συνέχεια, αναλύεται μια πιο πρόσφατη μελέτη τάφρων από το τμήμα μεταφορών του Όρεγκον. Τέλος, γίνονται αναφορές στους Ελληνικούς κανονισμούς για τις τάφρους, τον ΟΜΟΕ και τον ΚΜΕ.

Στο Κεφάλαιο 4 αναλύονται οι εξισώσεις κίνησης και τα φαινόμενα που σχετίζονται με τις καταπτώσεις βράχων και την κίνηση που πραγματοποιούν από την θέση αστοχίας μέχρι την θέση ηρεμίας. Οι σημαντικότεροι παράγοντες των καταπτώσεων, που χρησιμοποιήθηκαν και στην ανάλυση με το λογισμικό, είναι οι συντελεστές αναπήδησης. Έτσι, προστέθηκε πίνακας με τιμές που έχουν εξαχθεί από μελέτες αλλά και χρήση εμπειρικών εξισώσεων για τον υπολογισμό τους. Στο τέλος του κεφαλαίου, παρουσιάζονται επιγραμματικά δύο ειδικές περιπτώσεις και εμπειρικές εξισώσεις για την θραύση τεμάχους και την δημιουργία κρατήρα στην επιφάνεια.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται το λογισμικό Rocfall, της εταιρίας Rocscience, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την παραμετρική ανάλυση. Επεξηγούνται οι δυνατότητες του λογισμικού και οι επιλογές των δεδομένων που γίνανε για την ανάλυση.

Στο Κεφάλαιο 6 γίνεται η πλήρης ανασκόπηση των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν. Με βάση τα δεδομένα που επιλέχθηκαν αρχικά, εξήχθησαν αποτελέσματα για τις αποστάσεις ηρεμίας και τα ύψη αναπήδησης σε διάφορες θέσεις για οριζόντια τάφρο και κλίσεις τάφρου 1:6 και 1:3. Τα μεγέθη που ενδιαφέρουν είναι τα ύψη αναπήδησης σε οριζόντια απόσταση 1 έως 5 μέτρα από τον πόδα του πρανούς και η οριζόντια απόσταση που έφτασε το 50%, 95% και 100% των τεμαχών. Τα παραπάνω έχουν καταγραφεί σε πίνακες και αναπαρίστανται σε αντίστοιχα διαγράμματα. Στο τέλος του κεφαλαίου, παρουσιάζονται συμπεράσματα με βάση τα αποτελέσματα των αναλύσεων και γίνεται σύνδεση με τις τάφρους ανάσχεσης καταπτώσεων.

Στο Κεφάλαιο 7 γίνεται η σύνοψη της παρούσας διπλωματικής εργασίας και γίνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω για την σημαντική βοήθεια που μου παρείχε και την ενασχόλησή του με την παρούσα διπλωματική τον επιβλέποντα καθηγητή Δρ. Παύλο Αστερίου που χωρίς την βοήθεια του δεν θα ήταν δυνατή η εκπόνηση αυτής της απαιτητικής εργασίας.

Επίσης θέλω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και την σύντροφό μου.

Κεφάλαιο 1

1.1 Γενική ανασκόπηση

Οι καταπτώσεις βράχων είναι ένα φαινόμενο κατά το οποίο τεμάχια βράχου διαφόρων μεγεθών, αποκολλώνται από ένα πρανές λόγω μείωσης της διατμητικής αντοχής τους και ακολουθώντας κάποιες τροχιές που εξαρτώνται από πολλές παραμέτρους, καταλήγουν σε μία νέα θέση ισορροπίας.

Η χάραξη και η κατασκευή νέων δρόμων που διέρχονται από έντονα ανάγλυφα, οδήγησε στην ανάγκη αναλυτικότερης μελέτης του φαινομένου αναπτύσσοντας σχετικά λογισμικά και την κατασκευή μέτρων αντιμετώπισης για την προστασία των διάφορων έργων και των χρηστών τους.

Η ανάλυση των καταπτώσεων είναι δύσκολη λόγω των ακανόνιστων σχημάτων των τεμαχίων, των ευμετάβλητων φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων και της αλληλεπίδρασης τους με τα πρανή. Η πολυπλοκότητα αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι το έδαφος, οι βράχοι, τα πρανή, δημιουργήθηκαν από την φύση με διάφορες διεργασίες χωρίς κάποια τυποποίηση, όπως στο τσιμέντο και στον χάλυβα. Οι πρώτες ύλες για τα τελευταία έχουν ληφθεί από την φύση, έχουν όμως διαμορφωθεί και τυποποιηθεί ώστε να γνωρίζουμε με μεγαλύτερη ακρίβεια τις ιδιότητες τους. Αντίθετα, για τα εδάφη και τους βράχους απαιτούνται πολλοί εργαστηριακοί έλεγχοι, κάποιοι βασικοί και απλοί, άλλοι πιο σύνθετοι και χρονοβόροι, παρέχοντας αποτελέσματα τα οποία μπορεί να μην είναι αντιπροσωπευτικά για όλη την περιοχή ενδιαφέροντος, καθώς οι δοκιμές μπορούν να δώσουν διαφορετικά αποτελέσματα για ένα δείγμα από ένα μέρος και άλλα από δεύτερο.

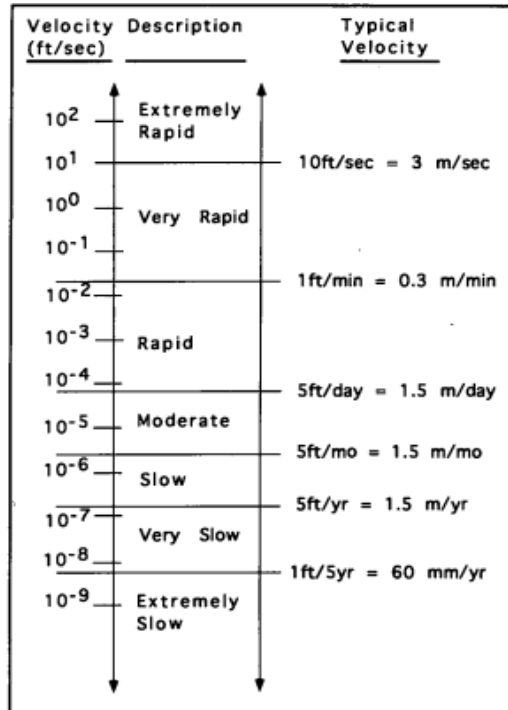
1.2 Κατολισθήσεις

Κατολίσθηση είναι το φαινόμενο κατά το οποίο συμβαίνουν μετακινήσεις βράχων και εδαφών υπό την δύναμη της βαρύτητας, όταν αυτά έχουν υπερβεί την διατμητική αντοχή τους. Γίνεται διάκριση βραχοπτώσεων και εδαφικών ροών με δύο κύρια κριτήρια.

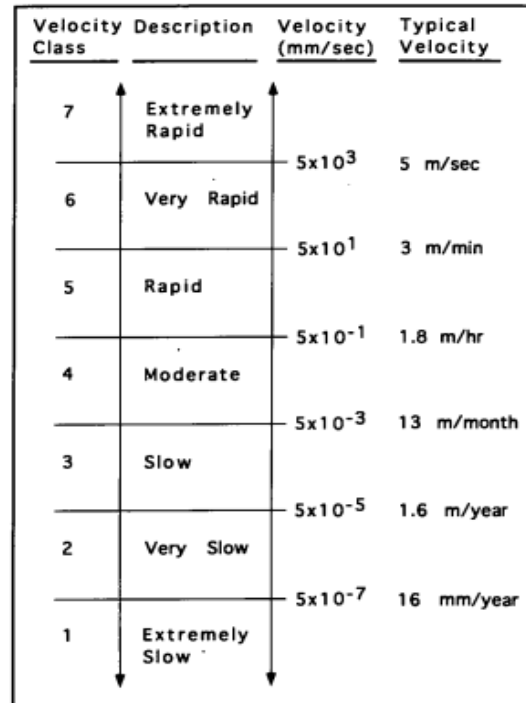
1. Την ταχύτητα
2. Το υλικό και τον τύπο μετακίνησης

1.2.1 Ταχύτητα και τύπος μετακίνησης

Από (Cruden & Varnes, 1996) χρησιμοποιούνται δύο διαγράμματα που διακρίνουν τις κατολισθήσεις με βάση την ταχύτητα και τον τύπο μετακίνησής τους.



Εικόνα (1.1) Ταχύτητα μετακίνησης και χαρακτηρισμός (Cruden & Varnes, 1996)



Εικόνα (1.2) Ταχύτητα μετακίνησης, χαρακτηρισμός και κατάταξη της ταχύτητας (Cruden & Varnes, 1996)

Πίνακας (1.1) Χαρακτηρισμός κατολίσθησης με βάση την ταχύτητα μετακίνησης

Περιγραφή	Ταχύτητα
Εξαιρετικά ταχείες	$>3,0\text{ m/s}$
Πολύ ταχείες	$0,3\text{ m/min}$
Ταχείες	$1,5\text{ m/day}$
Μέσες	$1,5\text{ m/month}$
Αργές	$1,5\text{ m/year}$
Πολύ αργές	$0,06\text{ m/year}$
Εξαιρετικά αργές	$<0,06\text{ m/year}$

Πίνακας (1.2) Χαρακτηρισμός κατολίσθησης με βάση την ταχύτητα μετακίνησης

Βαθμός	Περιγραφή	Ταχύτητα
7	Εξαιρετικά ταχείες	>5,0 m/s
6	Πολύ ταχείες	3 m/min
5	Ταχείες	1,8 m/hour
4	Μέσες	13 m/month
3	Αργές	1,6 m/year
2	Πολύ αργές	0,016 m/year
1	Εξαιρετικά αργές	<0,016 m/year

Στην Εικόνα (1.2), δίνεται και μία επταβάθμια κλίμακα που δείχνει το μέγεθος των καταστροφών, από την μεγαλύτερη καταστροφή (7), μέχρι την κλίμακα (1), που ουσιαστικά η κατολίσθηση καταγράφεται και γίνεται αντιληπτή μόνο από όργανα μετρήσεων.

- Εξαιρετικά ταχείες (7): Καταστροφή μεγάλης βιαιότητας, έργα καταστρέφονται από την πρόσκρουση με τα εκτοπισμένα υλικά, πολλοί θάνατοι, απίθανη η διαφυγή.
- Πολύ ταχείες (6): Χάνονται μερικές ζωές, η ταχύτητα είναι πολύ μεγάλη για να επιτρέψει σε όλους τους ανθρώπους να διαφύγουν.
- Ταχείες (5): Πιθανή η εκκένωση για διαφυγή, κατασκευές, περιουσίες και εξοπλισμοί καταστρέφονται.
- Μέσες (4): Ορισμένες προσωρινές και μη ευαίσθητες κατασκευές μπορούν να διατηρηθούν προσωρινά.
- Αργές (3): Διορθωτικές κατασκευές μπορούν να πραγματοποιηθούν κατά την διάρκεια της κίνησης, μη ευαίσθητες κατασκευές μπορούν να διατηρηθούν με συχνές εργασίες συντήρησης εάν η συνολική κίνηση δεν είναι μεγάλη κατά την διάρκεια μίας συγκεκριμένης επιτάχυνσης.
- Πολύ αργές (2): Μερικές μόνιμες κατασκευές παραμένουν χωρίς ζημιές από την κίνηση.
- Εξαιρετικά αργές (1): Μη αντιληπτή χωρίς όργανα μέτρησης, δυνατή η κατασκευή αλλά με μέτρα προστασίας.

1.2.2 Υλικά και τύπος μετακίνησης

Σύμφωνα με την ταξινόμηση των κατολισθήσεων κατά Varnes (1978), τα υλικά κατολισθήσεων διακρίνονται σε βράχους, σε συντρίμια βράχων ή κορήματα και σε εδάφη. Ξεκινώντας από το είδος του υλικού που μετακινήθηκε, σε συνδυασμό με το είδος της μετακίνησης, ονοματίζεται η εκάστοτε κατολίσθηση σε κάποια περιοχή. Τα είδη μετακινήσεων περιλαμβάνουν τις καταπτώσεις, τις ανατροπές, τις ολισθήσεις, τις εξαπλώσεις τις ροές και συνδυασμό αυτών. Παρακάτω παρατίθενται οι ορισμοί και η περιγραφή των διαφόρων τύπων κατολίσθησης.



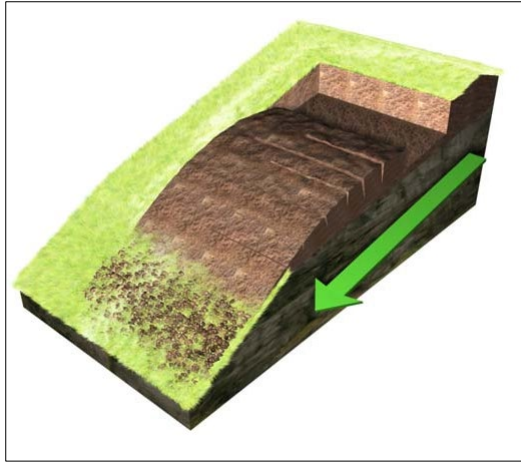
Εικόνα (1.3) Πτώση βράχων Τρόδος (must.com.cy)

- **Καταπτώσεις** είναι απότομες και γρήγορες μετακινήσεις κυρίως βραχώδους αλλά και εδαφικού υλικού, που συσσωρεύεται στους πρόποδες των πρανών. Εκδηλώνεται γρήγορα και με πολύ μεγάλη ταχύτητα κίνησης.
- **Ανατροπές** είναι οι αστοχίες που συμβαίνουν όταν περιστρέφεται βραχώδες και εδαφικό υλικό, γύρω από έναν άξονα που βρίσκεται χαμηλότερα από το κέντρο βάρους του τεμάχους ή του όγκου του υλικού, υπό την δράση της βαρύτητας και του νερού που μπορεί να βρίσκεται εντός των ασυνεχειών και να ασκεί επιπρόσθετες υδροστατικές δυνάμεις.

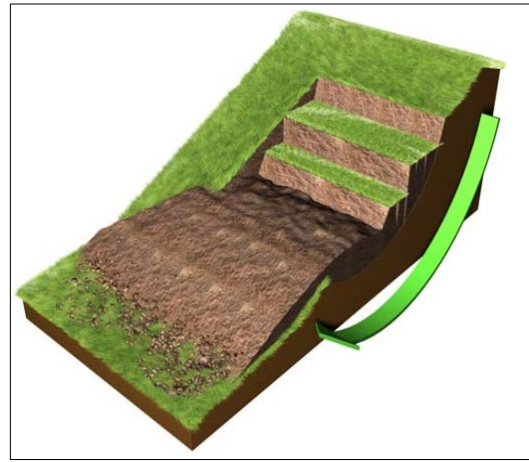


Εικόνα (1.4) Ανατροπή βράχου ΗΠΑ Γιούτα (Novotny, 2013) Varnes landslide classification 1978)

- **Ολισθήσεις** διαχωρίζονται στην περιστροφική και στην μεταφορική ολίσθηση. Η μεταφορική ολίσθηση αφορά την μετακίνηση εδαφικών μαζών και βράχων παράλληλα με την κλίση του πρανούς. Περιλαμβάνει τις εδαφικές ολισθήσεις και τις ολισθήσεις τεμαχών. Και στις δύο περιπτώσεις, η ύπαρξη μεγάλης ποσότητας νερού, οδηγεί τα εδάφη σε μεγάλη πλαστιμότητα που φτάνει και την υδαρή κατάσταση προκαλώντας αστάθεια, και τα τεμάχια σε επιπρόσθετες υδροστατικές δυνάμεις και υποπιέσεις στην επιφάνεια επαφής με το πρανές. Η περιστροφική ολίσθηση αφορά την κίνηση εδαφικών και βραχωδών υλικών σε κυκλικό τόξο. Οι δυνάμεις αστάθειας τείνουν να περιστρέψουν τα υλικά ως προς ένα τόξο κύκλου. Ο κύκλος που δίνει τον μικρότερο συντελεστή ασφαλείας ονομάζεται κρίσιμος κύκλος αστοχίας.



Εικόνα (1.6) Μεταφορική ολίσθηση
(ONEGeologykids, n.d.) (onegeology.org)



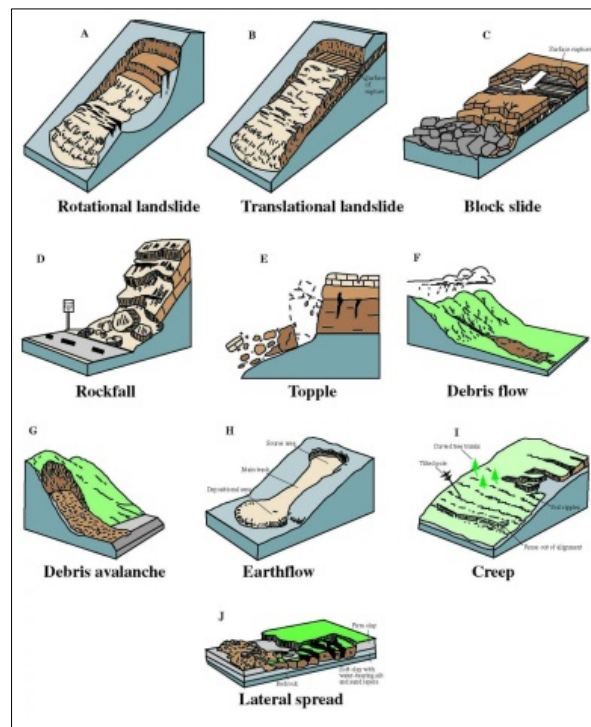
Εικόνα (1.5) Περιστροφική ολίσθηση
(ONEGeologykids, n.d.) (onegeology.org)

- **Η πλευρική εξάπλωση** εμφανίζεται σε ήπιες πλαγιές και σε επίπεδο έδαφος. Η κίνηση των υλικών είναι πλευρική και συνοδεύεται από διάτμηση του εδάφους και δημιουργία εφελκυστικών ρωγμών. Η αστοχία προκαλείται μετά από έντονη διαβροχή του εδάφους όπου γίνεται κορεσμένο και χάνει την συνοχή του, μετατρέποντας το σε λάσπη. Όταν το νερό υποχωρεί και στεγνώνει το έδαφος, παραμένει στην κατάσταση που ήταν μετά την κατολίσθηση με πολλές ρωγμές και χαλαρωμένο. Η πλευρική εξάπλωση είναι πολύ συχνή μετά από σεισμούς.
- **Οι ροές** είναι σύνθετες και εξαρτώνται σημαντικά από τα υλικά που κατολισθαίνουν και την ταχύτητα τους. Τα εδάφη που ρέουν έχουν ιδιότητες παχύρευστου υγρού. Ξεκινούν την ροή τους όταν χάνεται η δύναμη συνοχής. Ανάλογα την ταχύτητα της ροής τους και των υλικών διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:


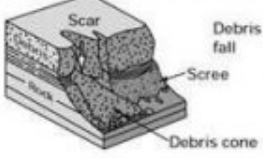
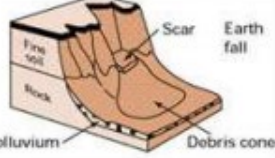

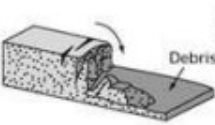
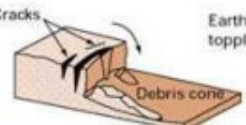

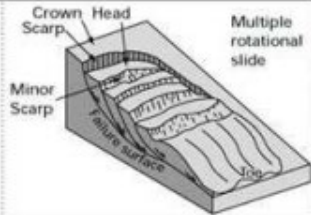

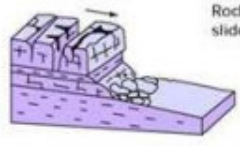
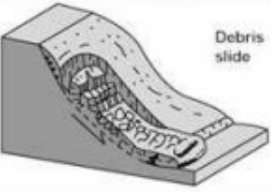
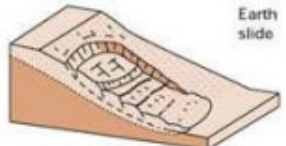
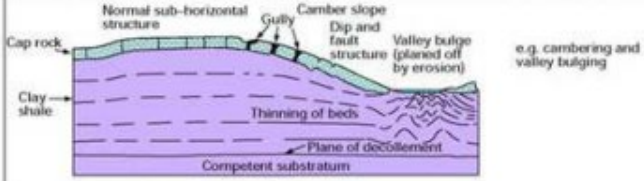

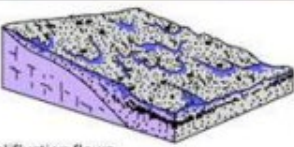


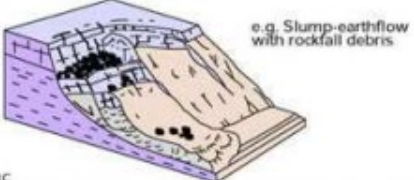
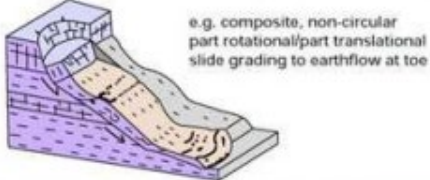
 - **Ερπυσμός** είναι ο βραδύτερος τύπος βαρυτικής μετακίνησης και μετράται σε μερικά χιλιοστά τον χρόνο. Συμβαίνει σε όλες τις κλίσεις πρανών και περιλαμβάνει χαλαρά υλικά και αποσαθρωμένα. Κατά τον ερπυσμό, τα κατώτερα στρώματα του υλικού που κατολισθαίνει αναπτύσσουν μεγαλύτερες τριβές από ότι στην επιφάνεια με αποτέλεσμα να κινούνται πιο αργά συγκριτικά με τα επιφανειακά. Λόγω της πολύ μικρής ταχύτητας αλλά και της διαφοράς της με το βάθος, παρατηρείται καμπύλωση των κορμών των δέντρων, τα οποία τείνουν προς τον ήλιο, και στράβωμα σε στύλους ηλεκτρικού ρεύματος και σε κατασκευές. Δεν είναι καταστροφική κίνηση, αλλά μπορεί σε βάθος χρόνου να δώσει μεγαλύτερες κατολισθήσεις.

- **Εδαφορές** περιλαμβάνουν κινήσεις μαζών με ταχύτητα που κυμαίνεται από μερικά χιλιοστά έως μερικά μέτρα ημερησίως. Είναι περιοδικές και μπορεί να διαρκέσουν μέχρι και μερικά χρόνια. Εκδηλώνονται μετά από ισχυρές βροχοπτώσεις.
- **Ροές κορημάτων** αποτελούνται από κόκκους με μεγαλύτερη διάμετρο από την άμμο. Το κυρίως υλικό αποτελείται από κροκάλες και γενικά, χοντρόκοκκα εδάφη. Συμβαίνουν σε πρηνή με εντονότερη κλίση και μετά από ισχυρές βροχοπτώσεις σε περιοχές χωρίς φυτοκάλυψη. Οι ταχύτητες μετακίνησης των υλικών κυμαίνονται από 2 μέτρα έως 40 χιλιόμετρα την ώρα.
- **Λασποροές** αποτελούνται από λεπτόκοκκα εδάφη, αργίλους και άμμους, και εκδηλώνονται μετά από έντονη βροχόπτωση, όπως ακριβώς και με την ροή κορημάτων. Η περιεκτικότητα σε νερό είναι πολύ μεγάλη. Αναπτύσσονται μεγάλες ταχύτητες που φτάνουν τα 100 χιλιόμετρα την ώρα .

Οι ροές κορημάτων και οι λασποροές λόγω των μεγάλων ταχυτήτων τους είναι επικίνδυνες και όταν εκδηλώνονται σε απομακρυσμένες περιοχές και σε πολύ ψηλά πρηνή φτάνουν ταχύτητες μεγαλύτερες από 200 χιλιόμετρα την ώρα και ονομάζονται χιονοστιβάδες κορημάτων. Τέλος η σύνθετη κίνηση αποτελεί συνδυασμό των παραπάνω.



Εικόνα (1.7) Είδη κατολίσθησης (ARIZONA GEOLOGICAL SURVEY, 2021) (azgs.arizona.edu)

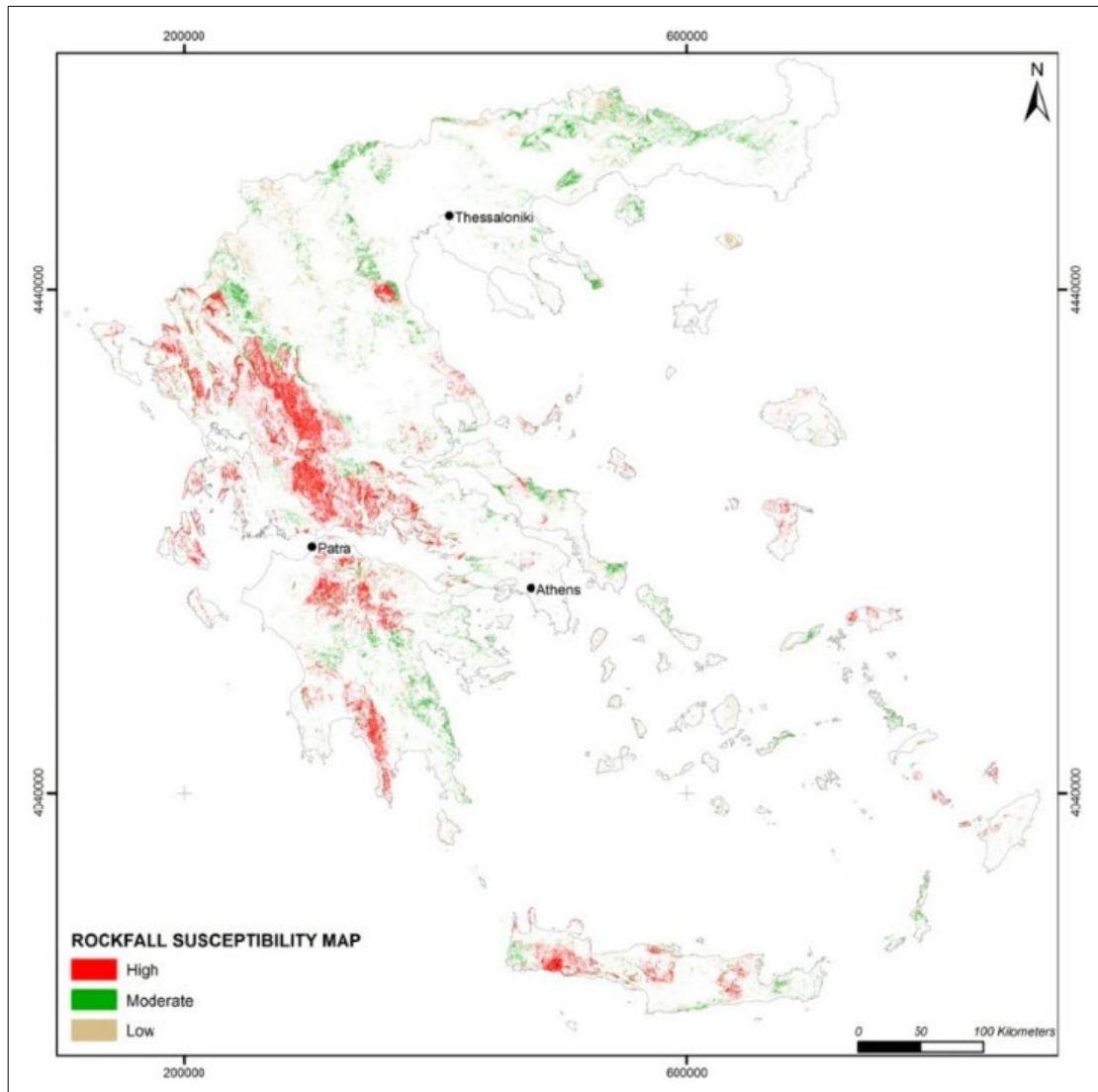
Material	ROCK	DEBRIS	EARTH
FALLS	 Rock fall	 Debris fall Scree Debris cone	 Earth fall Colluvium Debris cone
TOPPLES	 Rock topple	 Debris topple Debris cone	 Earth topple Debris cone
SLIDES	 Single rotational slide (slump) Failure surface	 Multiple rotational slide Crown Scarp Head Minor Scarp Failure surface	 Successive rotational slides
	 Rock slide	 Debris slide	 Earth slide
SPREADS	 e.g. cambering and valley bulging		 Earth spread
FLOWS	 Solifluction flows (Periglacial debris flows)	 Debris flow	 Earth flow (mud flow)
COMPLEX	 e.g. Slump-earthflow with rockfall debris		 e.g. composite, non-circular part rotational/part translational slide grading to earthflow at toe

Εικόνα (1.8) Ταξινόμηση κατολισθήσεων κατά Varnes 1978 (Novotny, 2013) (Varnes landslide classification 1978)

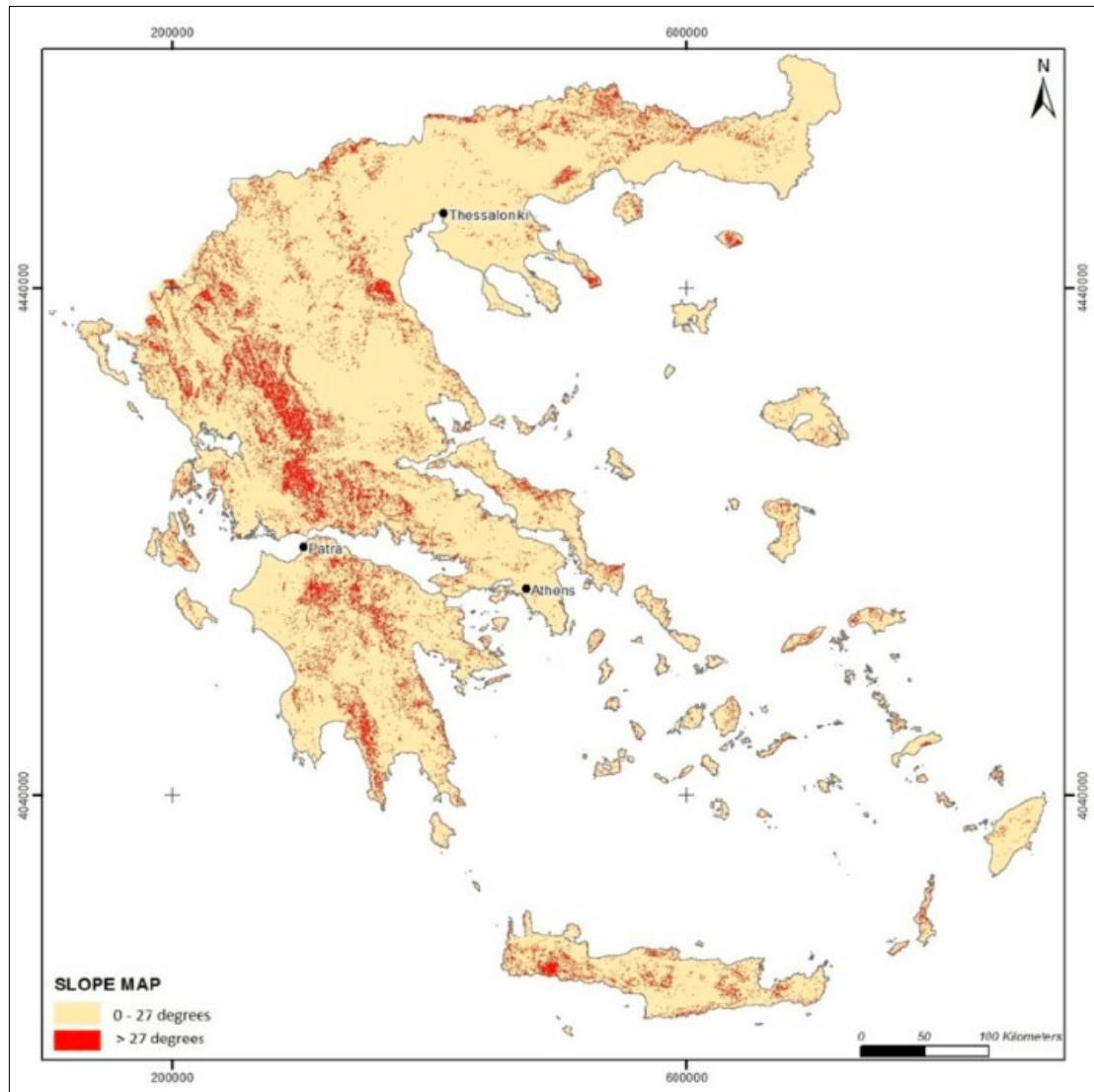
Στην Ελλάδα που λόγω του ανάγλυφού της συμβαίνουν πολύ συχνά κατολισθητικά φαινόμενα, είναι απαραίτητη η γνώση αυτών για την σωστή αντιμετώπιση τους και την προστασία των ανθρώπων και περιουσιών τους. Οι κατολισθήσεις ακολουθούνται κατά κύριο λόγο μετά από σεισμούς και έντονα καιρικά φαινόμενα, που αλλάζουν τις συνθήκες ισορροπίας.

1.3 Περιστατικά καταπτώσεων

Τα περιστατικά καταπτώσεων στην Ελλάδα είναι αμέτρητα. Κάποια συμβαίνουν χωρίς επιπτώσεις, σε άλλα απαιτείται κλείσιμο δρόμων για τον καθαρισμό του οδοστρώματος από τα υλικά και άλλα προκαλούν μεγάλα προβλήματα, ειδικά όταν συμβαίνουν κοντά σε οικισμούς και σε μεγάλους δρόμους, τα οποία είναι επικίνδυνα για την ανθρώπινη ζωή και τις κατασκευές. Εκτός των παραπάνω υπάρχουν και περιπτώσεις περιοχών που συμβαίνουν καταπτώσεις και κατολισθήσεις οι οποίες έχουν τουριστικό υπόβαθρο και προσελκύουν χιλιάδες κόσμο κάθε χρόνο.



Εικόνα (1.9) Χάρτης ευαισθησίας καταπτώσεων (Saroglou, 2019) (researchgate.net)



Εικόνα (1.10) Χάρτης κλίσης πρηνών (Saroglou, 2019) (researchgate.net)

Πολύ συχνά είναι τα φαινόμενα καταπτώσεων στις περιοχές με βουνά και οροσειρές όπου τα πρηνή είναι πολύ ψηλά και έχουν μεγάλες κλίσεις. Είναι δεδομένο πως μετά από ισχυρές βροχές και σεισμικές δονήσεις θα υπάρξουν κατολισθήσεις και καταπτώσεις βράχων, είτε μικρής είτε μεγάλης έκτασης. Τα φαινόμενα είναι πάρα πολλά και το βασικό πρόβλημα που δημιουργούν είναι αναστολή λειτουργίας των οδικών δικτύων. Παρακάτω τίθενται μερικά πρόσφατα περιστατικά.

- 4 Μαρτίου 2021 Πτώση βράχων από τα Μετέωρα μετά από τον ισχυρό σεισμό 5,9 Ρίχτερ που σημειώθηκε στην Ελασσόνα, δεν προκλήθηκαν ζημιές καθώς τα βράχια έπεσαν σε ένα μικρό ασύλλιο που βρισκόταν στους πρόποδες και συγκράτησε τα κομμάτια.
- 13 Ιανουαρίου 2021 Καταπτώσεις βράχων σημειώθηκαν στις γύρω ορεινές περιοχές των Τρικάλων μετά από έντονες βροχοπτώσεις, κλείνοντας το οδικό δίκτυο των γύρω περιοχών. Δεν υπήρξαν περαιτέρω ζημιές.

- 17 Δεκεμβρίου 2009 Μεγάλης έκτασης καταπτώσεις βράχων συμβαίνουν στα Τέμπη. Η αρχική εκτίμηση ήταν πως λόγω της διάνοιξης των νέων σηράγγων προκλήθηκαν αναταραχές στο πρσανές, προερχόμενες από τις δονήσεις των μηχανημάτων διάνοιξης και των εκρηκτικών. Μετά από εξέταση κρίθηκε πως δεν επηρέασε τις καταπτώσεις η διάνοιξη, αλλά τελικά αποδόθηκε σε ακραίο γεωλογικό φαινόμενο. Αποτέλεσμα ήταν να κλείσει η εθνική οδός και η σύνδεση της Αθήνας με την Θεσσαλονίκη γινόταν από επαρχιακούς δρόμους.
- 13 Σεπτεμβρίου 2018 Συνδυασμός καταπτώσεων βράχων και κατάρρευσης βραχώμαζας συμβαίνει σε μία από τις διασημότερες παραλίες του κόσμου, την παραλία ναυάγιο στην Ζάκυνθο. Συνέβη μεσημέρι χρονική περίοδο κατά την οποία πηγαίνει αρκετός κόσμος καθώς ήταν Σεπτέμβριος. Το αποτέλεσμα ήταν να τραυματιστούν 7 άνθρωποι και να αναποδογυρίσουν τουριστικές βάρκες από τα κύματα



που δημιουργήθηκαν μετά την πτώση. Η παραλία έκλεισε για κάποιο διάστημα για να πραγματοποιηθεί έλεγχος. Εκτός αυτού η περιοχή του Ιονίου χρήζει προσοχής καθώς βρίσκεται πάνω στο Ελληνικό τόξο. Η περιοχή αυτή έχει δώσει και δίνει έντονους σεισμούς οι οποίοι παλαιότερα είχαν καταστρέψει μεγάλο μέρος των νησιών. Αρκετές ακόμα παραλίες του Ιονίου κρίνονται ευαίσθητες η ακόμα και επικίνδυνες.

Εικόνα (1.11) Παραλία ναυάγιο Ζάκυνθος (Προσωπικό αρχείο)

Κεφάλαιο 2

2.1 Αίτια καταπτώσεων

Όλες οι διεργασίες που συμβαίνουν στην επιφάνεια και στο εσωτερικό της γης αλλά και στην ατμόσφαιρα οδηγούν σε αναδιαμόρφωση του ανάγλυφου της και αλλαγή στην ισορροπία των πρανών. Αυτή η ισορροπία μεταβάλλεται συνεχώς εξαιτίας των διάφορων παραγόντων και της επίδρασης του καθενός ξεχωριστά. Στα πρανή, που μελετάμε τα αποτελέσματα αυτών των διεργασιών, οδηγούν σε κατολισθήσεις. Ανάλογα με το είδος του πρανού συμβαίνει και διαφορετικό είδος κατολίθησης. Οι καταπτώσεις αφορούν βραχώδη και ημιβραχώδη πρανή.



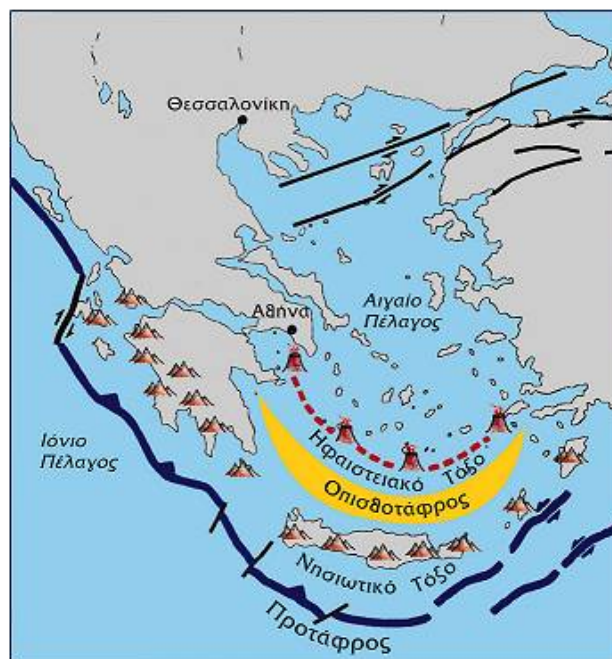
Εικόνα (2.1) Αίτια καταπτώσεων (Αστερίου, 2021)

2.1.1 Τοπογραφικό ανάγλυφο

Είναι η μορφολογία του εδάφους μίας περιοχής. Στα έντονα ανάγλυφα είναι συνηθέστερο να παρατηρούνται κατολισθητικά φαινόμενα διότι οι διεργασίες, σε συνεργασία με την βαρύτητα, τείνουν να μετακινήσουν τα εδαφικά υλικά από υψηλότερα προς τα χαμηλότερα. Ο έλεγχος ενός ανάγλυφου, απαιτεί την χαρτογράφησή του ώστε να αποτυπωθούν οι ισοϋψείς και να υπάρχει καλύτερη γνώση σχετικά με την περιοχή μελέτης. Από τις ισοϋψείς μπορούν να ληφθούν πληροφορίες σχετικά με την περιοχή ενδιαφέροντος. Οι ισοϋψείς δίνουν στοιχεία σχετικά με την ισοδιάσταση και την πυκνωση τους, όπου όσο πυκνότερες είναι τόσο πιο απότομο είναι το πρανές και έτσι χρήζει προσοχής για εκδήλωση κατολισθητικών φαινομένων.

2.1.2 Τεκτονική

Αποτελεί την γεωλογική ανάλυση του εσωτερικού της γης και των μετακινήσεων που συμβαίνουν στον μανδύα και στον φλοιό της εξαιτίας των τεκτονικών πλακών. Αποτέλεσμα αυτής είναι οι βυθίσεις και οι ανυψώσεις περιοχών που συμβαίνουν εξαιτίας των διεργασιών στο εσωτερικό. Η μετακίνηση των τεκτονικών πλακών οδηγεί σε πολύ ισχυρές φορτίσεις μεταξύ τους, με αποτέλεσμα να προκαλούνται αλλαγές στα γήινα ανάγλυφα και σεισμικές δονήσεις. Εκτός των πολύ μεγάλων μεταβολών που συμβαίνουν στο υπέδαφος, ενδιαφέρει άμεσα τον μηχανικό η ύπαρξη ρηγμάτων στην περιοχή. Διακρίνονται σε κανονικά, ανάστροφα οριζόντιας ολίσθησης και πλάγια, ανάλογα με την σχετική μετακίνηση των τμημάτων. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η δημιουργία γεωλογικών δομών, όπως είναι οι διακλάσεις και οι πτυχές.

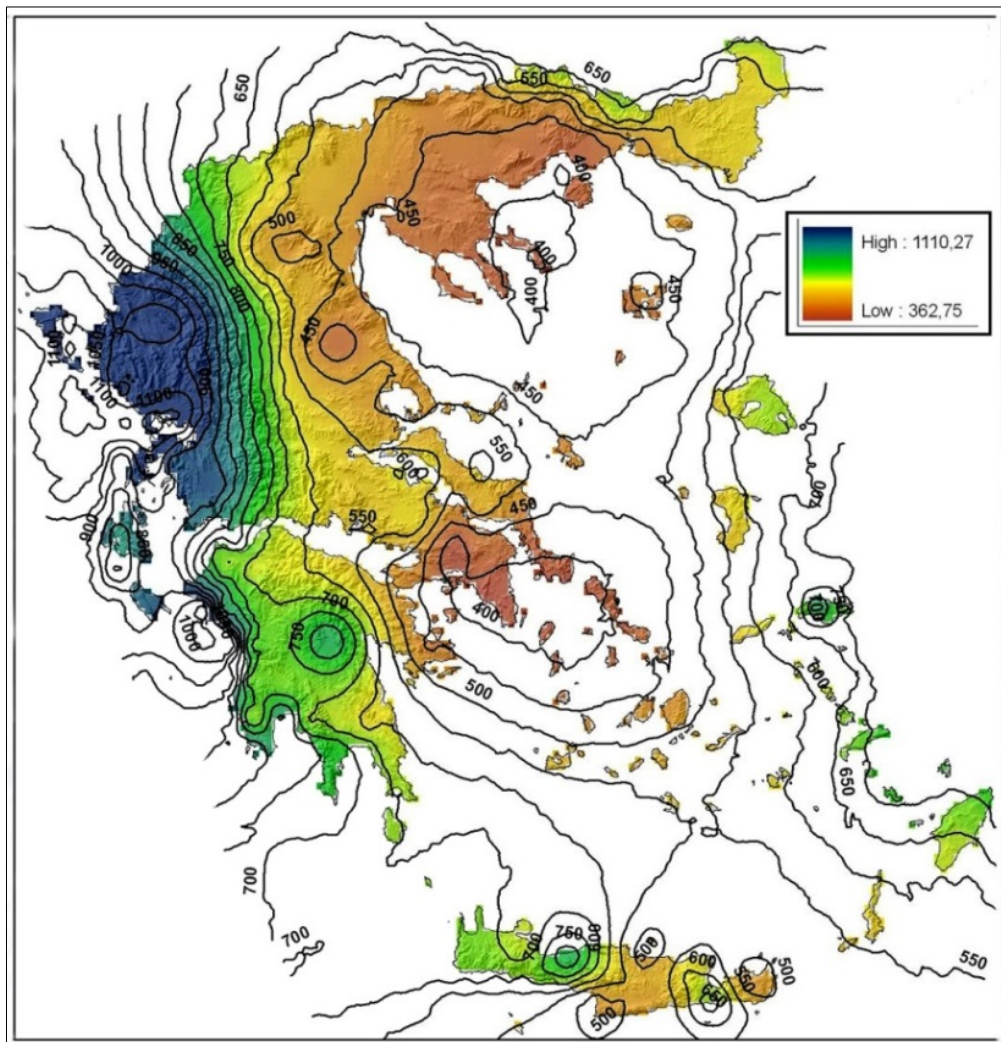


Εικόνα (2.2) Τεκτονική δραστηριότητα Ελλάδας (oasp.gr)

2.1.3 Ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις

Είναι οι διάφορες μορφές με τις οποίες το νερό καταλήγει από την ατμόσφαιρα στην επιφάνεια της γης. Αυτές είναι η βροχή το χιόνι και το χαλάζι. Μετά την πτώση στην επιφάνεια της γης, το νερό σε συνδυασμό με το ανάγλυφο του εδάφους ρέει πάνω της με την μορφή ποταμών, ρυακιών, όπου καταλήγουν σε φυσικές ή τεχνητές λίμνες. Πέρα από την επιφανειακή ροή, το νερό διηθείται υπόγεια, εμπλουτίζοντας τους υπόγειους υδροφορείς. Η υπόγεια διήθηση συμβαίνει εξαιτίας των κενών που υπάρχουν μεταξύ των εδαφικών κόκκων και των ασυνεχειών στους βράχους, το οποίο νερό κινείται εντός των πόρων. Τέλος, το επιφανειακό και το υπόγειο νερό, εξατμίζεται λόγω του ήλιου μετατρέποντας το σε υδρατμούς οι οποίοι επιστρέφουν στην ατμόσφαιρα όπου δημιουργούν τα σύννεφα. Αντίστοιχη διαδικασία είναι η διαπνοή, όπου τα φυτά με την χρήση των ριζικών τους συστημάτων, απορροφούν το

υπόγειο νερό και το στέλνουν στην ατμόσφαιρα με την μορφή υδρατμών με την χρήση πόρων που υπάρχουν στα φύλλα τους. Η διαφορά τους είναι πως στην εξάτμιση επιδρά ο ήλιος και η ζέστη, ενώ στην διαπνοή, επιδρούν τα φυτά. Οι δύο διαδικασίες αυτές, στέλνουν υδρατμούς στην ατμόσφαιρα, όπου με την διαδικασία της συμπύκνωσης δημιουργούνται τα σύννεφα, τα οποία επιστρέφουν στην επιφάνεια της γης το νερό υπό μορφή βροχής, χιονιού και χαλαζιού. Όλα τα παραπάνω συνθέτουν τον υδρολογικό κύκλο του νερού, που ουσιαστικά είναι η ανακύκλωση του νερού. Το νερό μετά από βροχόπτωση εισχωρεί στα κενά του εδάφους και στις ρωγμές κάνοντας το κορεσμένο, με αποτέλεσμα να αλλάζουν οι ενεργές τάσεις. Το έδαφος μετά χάνει μεγάλο μέρος της αντοχής του και συμπεριφέρεται σαν λάσπη η οποία ρέει οδηγώντας σε κατολισθήσεις, και αυξάνεται το συνολικό βάρος του εδάφους μειώνοντας έτσι περεταίρω την ευστάθεια του πρανούς.



Εικόνα (2.3) Χάρτης μέσης ετήσιας βροχόπτωσης (geogreece.gr)

- Η κρυστάλλωση αλάτων είναι η μηχανική αποσάθρωση όπου διαλυμένα άλατα που βρίσκονται στους πόρους και ρωγμές, κρυσταλλώνονται με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο όγκος τους και να ασκούν πολύ μεγάλες δυνάμεις στα πετρώματα όπως ακριβώς και το νερό όταν παγώνει. Αυτού του είδους η αποσάθρωση συμβαίνει σε βραχώδης ακτές, όπου το θαλασσινό νερό με την επίδραση των κυματισμών, εισχωρεί στα κενά και στα κοιλώματα των βράχων. Μετά την εξάτμιση του νερού, τα άλατα παραμένουν στα βράχια όπου κρυσταλλώνονται, αυξάνουν σε όγκο και λόγω των μεγάλων πιέσεων, θρυμματίζουν τους βράχους σε μικρότερα κομμάτια.
- Η θερμική συστολή και διαστολή είναι η διαδικασία κατά την οποία αλλάζουν οι διαστάσεις ενός σώματος, με την μεταβολή της θερμοκρασίας. Στην διαστολή αυξάνονται οι διαστάσεις επειδή θερμαίνεται, ενώ στην συστολή ελαττώνονται οι διαστάσεις επειδή ψύχεται. Στα πετρώματα, επειδή αυτά αποτελούνται από διαφορετικά ορυκτά, η μεταβολή του σχήματος δεν είναι ομοιόμορφη καθώς κάθε υλικό αντιδρά διαφορετικά στην μεταβολή της θερμοκρασίας. Η συνεχόμενη αυτή μεταβολή, και οι πιέσεις που ασκεί το ένα ορυκτό στο άλλο οδηγούν στον θρυμματισμό των πετρωμάτων.

Κατά την χημική αποσάθρωση συμβαίνει εξαλλοίωση των πετρωμάτων με αποτέλεσμα την αλλαγή της ορυκτολογικής σύστασης τους, με την βοήθεια κυρίως του νερού και του διοξειδίου του άνθρακα. Αποτέλεσμα αυτής είναι η παραγωγή λεπτόκοκκων υλικών. Οι κύριες χημικές διεργασίες είναι:

- Η διάλυση κατά την οποία τα οξέα που μπορεί να έχει το νερό διαλύουν τον ασβεστόλιθο. Οι ανθρώπινες δραστηριότητες, αυξάνουν το διοξείδιο του άνθρακα που εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα, με αποτέλεσμα να παράγεται η όξινη βροχή η οποία στην συνέχεια αφού πέσει στην επιφάνεια, πραγματοποιεί τις διάφορες αντιδράσεις με τα οξέα που περιέχει και τα πετρώματα.
- Η διάλυση κατά την οποία ιόντα των ορυκτών αντικαθιστώνται από ιόντα υδρογόνου του νερού με αποτέλεσμα τα ορυκτά να αποσυντίθενται.
- Η οξειδωση κατά την οποία το οξυγόνο της ατμόσφαιρας αντιδρά χημικά με τα στοιχεία που αποτελούνται τα πετρώματα.

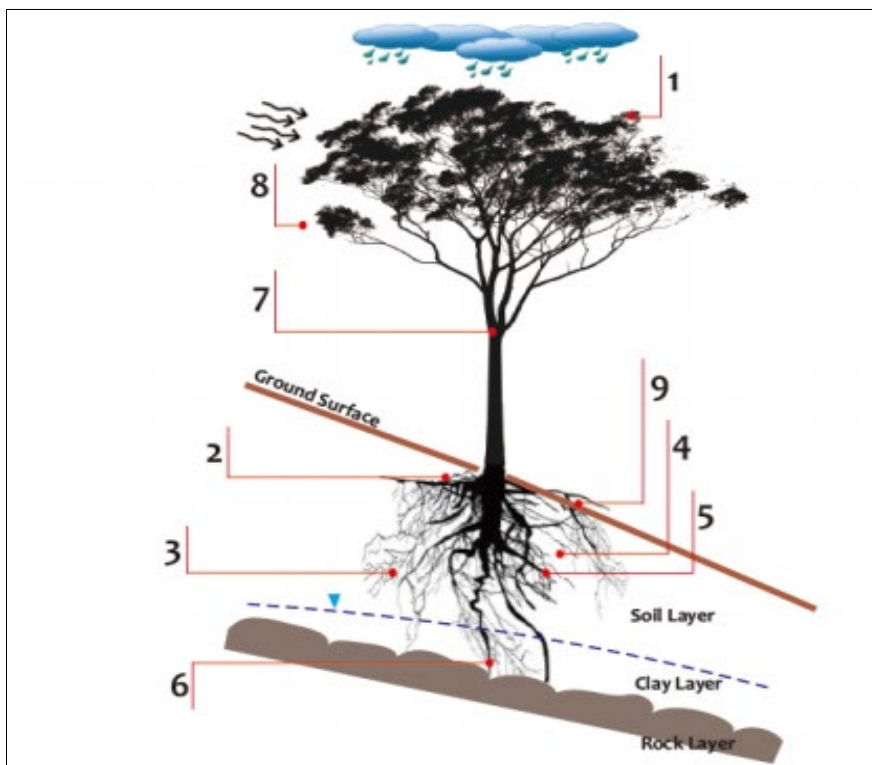
Η βιολογική αποσάθρωση συμβαίνει λόγω της επίδρασης φυτών, ζώων και μικροοργανισμών. Μπορεί να είναι είτε μηχανική είτε χημική αποσάθρωση είτε συνδυασμός τους, ανάλογα με τον τρόπο που επιδρά το κάθε ένα με τα πετρώματα. Οι φυτικοί οργανισμοί, με την χρήση του ριζικού τους συστήματος, τεμαχίζουν τα πετρώματα ώστε να εισχωρήσουν οι ρίζες στο έδαφος. Πρόκειται για μηχανική αποσάθρωση καθώς τεμαχίζει το αρχικό πέτρωμα σε μικρότερα κομμάτια. Οι ζωικοί οργανισμοί προκαλούν και τα δύο είδη αποσάθρωσης.

Αρχικά τα ζώα, σκάβουν λαγούμια για να βρουν τροφή και να φωλιάσουν, το οποίο σκάψιμο χαλαρώνει τα πετρώματα και τα εδάφη. Επιπλέον, τα περιττώματα και τα κουφάρια των νεκρών ζώων, συμβάλουν με χημικές αντιδράσεις για την χημική αποσάθρωση.

Οι βασικοί παράγοντες που ελέγχουν την αποσάθρωση είναι η ορυκτολογική σύσταση που καθορίζει την χημική σύνθεση από την οποία αποτελείται ένα πέτρωμα και το πόσο ανθεκτικό είναι σε χημικές αλλαγές, το κλίμα που εξαρτάται από τις κλιματολογικές συνθήκες μιας περιοχής και ιδιαίτερα την θερμοκρασία, την υγρασία και την εξάπλωση της χλωρίδας και πανίδας, και ο χρόνος που οδηγεί σε όλες τις αλλαγές στο γήινο ανάγλυφο.

2.1.5 Χλωρίδα

Η χλωρίδα επηρεάζει άμεσα την ευστάθεια των πρανών, με την άποψη που κυριαρχεί να είναι πως συμβάλουν στην ευστάθεια περισσότερο από ότι στην ανατροπή. Δέντρα τα οποία έχουν αναπτύξει σε μεγάλο βάθος τις ρίζες τους, λειτουργούν σαν σπλισμοί του εδάφους και η ιδιότητά τους να απορροφούν το νερό των υπόγειων υδροφορέων, κάνουν τα πρανή πιο σταθερά. Η κλίση των πρανών παίζει σημαντικό ρόλο στην επίδραση των φυτών στην συνολική ευστάθεια. Στις μεγάλες κλίσεις, το βάρος των δέντρων, δίνει επιπρόσθετα φορτία ανατροπής τα οποία είναι μεγαλύτερα από τα φορτία ευστάθειας λόγω της επίδρασης των ριζών τους. Σε μικρές κλίσεις συμβαίνει το αντίθετο.



Εικόνα (2.5) Υδρολογική και μηχανική επίδραση δέντρου στην ευστάθεια πρανών (iopscience.iop.org) (Mulyono, et al., 2018)

Όσον αφορά την αστάθεια που προκαλούν, οφείλεται στο γεγονός πως οι ρίζες για να εισχωρήσουν στο έδαφος, μπορεί να χρειαστεί να διαλύσουν βράχους και να προκαλέσουν ρωγμές στα εδάφη, μειώνοντας τοπικά την συνοχή των εδαφών. Άλλος μηχανισμός αστοχίας, οφείλεται στα φορτία του ανέμου και εξαρτώνται σημαντικά από το ύψος των δέντρων και την ταχύτητα του ανέμου που πνέει.

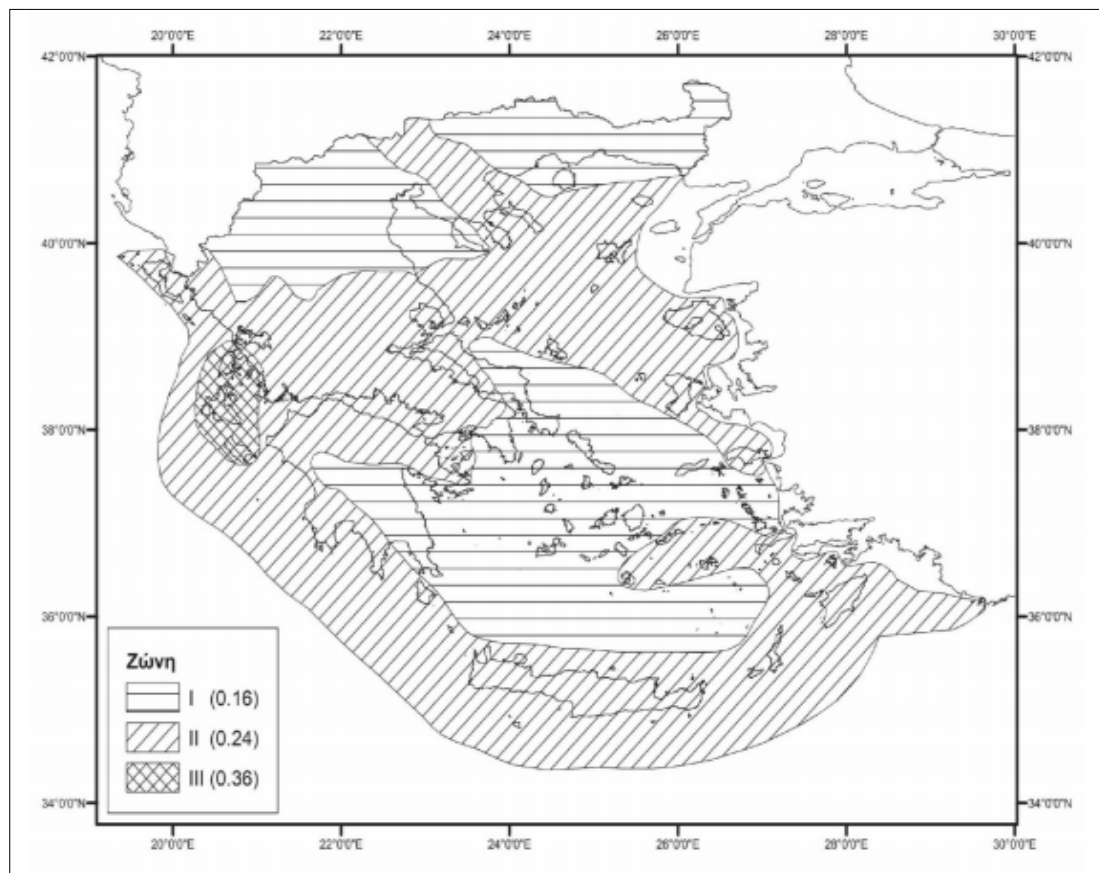
Με βάση την Εικόνα (2.6), τα 9 νούμερα δείχνουν την συνολική επίδραση ενός δέντρου στην ευστάθεια του πρανούς. Από (Muliyil, et al., 2018) παρουσιάζεται συνοπτικά η επίδραση των 9 στοιχείων.

1. Τα φύλλα, αναχαιτίζουν τις βροχοπτώσεις, προκαλώντας απορρόφηση και εξάτμιση του νερού και μειώνοντας τον όγκο του νερού που διηθείται υπόγεια.
2. Οι ρίζες και τα μέλη του δέντρου, αυξάνουν την τραχύτητα στην επιφάνεια του εδάφους και την διαπερατότητα του επεκτείνοντας την διείσδυση του νερού.
3. Οι ρίζες, απορροφούν νερό από το έδαφος και απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα με τον μηχανισμό της διαπνοής, μειώνοντας έτσι το νερό στα κενά του εδάφους.
4. Η μείωση της υγρασίας του εδάφους από την απορρόφηση της ρίζας, ξηραίνει το έδαφος με αποτέλεσμα το έδαφος να σπάσει αποκτώντας ρωγμές αυξάνοντας την διείσδυση.
5. Οι ρίζες, ενισχύουν το έδαφος αυξάνοντας την συνολική αντοχή του.
6. Οι ρίζες των φυτών, αγκυρώνονται στα βαθιά στρώματα του εδάφους, παρέχοντας επιπλέον υποστήριξη στο επιφανειακό έδαφος μέσω της αγκύρωσης.
7. Το βάρος των φυτών, σε συνδυασμό με την ανάλογη κλίση, επιβαρύνει την ανατροπή με αποτέλεσμα την καθοδική κίνηση.
8. Τα φυτά είναι εκτεθειμένα σε ισχυρούς ανέμους, οι οποίοι μεταβιβάζουν δυναμικά φορτία στο πρανές.
9. Οι ρίζες δένουν το έδαφος και μειώνουν την ευαισθησία σε διάβρωση.

2.1.6 Σεισμική φόρτιση

Είναι το σημαντικότερο είδος φόρτισης που επηρεάζει όλων των ειδών τις κατασκευές, τα πρανή και τα εδάφη, και ολόκληρο το ανάγλυφο και το εσωτερικό της γης. Οφείλεται στην κίνηση των τεκτονικών πλακών οι οποίες όταν συγκρούονται και έρχονται σε επαφή ασκούν πολύ μεγάλες δυνάμεις μεταξύ τους και συσσωρεύουν ενέργεια μέσω της παραμόρφωσης τους.

Όταν ξεπερνούν την αντοχή τους, σπάνε με αποτέλεσμα την απελευθέρωση τεράστιων ποσών ενέργειας, που μεταδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις με την μορφή κυμάτων. Τα κύματα αυτά μετά από κάποιο χρονικό διάστημα, φτάνουν στην κατασκευή ή στο πρανές ενδιαφέροντος, ασκώντας δυναμικά φορτία και προκαλώντας ταλαντώσεις στις κατασκευές και επιπλέον δυνάμεις αστάθειας στα πρανή, μειώνοντας τον συντελεστή ασφαλείας. Η Ελλάδα είναι η 6^η σειсмоγενής χώρα παγκοσμίως, οπότε οι σεισμικές δονήσεις είναι πολύ συχνές. Χωρίζεται σε τρεις ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας. Ανάλογα την περιοχή που βρίσκεται, επιλέγεται διαφορετικός συντελεστής εδαφικής επιτάχυνσης που χρησιμοποιείται στον σχεδιασμό έργων και στον έλεγχο ευστάθειας πρανών και τεμαχών. Η σεισμική φόρτιση, αποσταθεροποιεί πέτρες και βράχια των πρανών θέτοντάς τα σε κίνηση που οδηγεί σε καταπτώσεις. Μεγαλύτερης έντασης σεισμοί, δίνουν και μεγαλύτερο όγκο υλικών κατάπτωσης.



Εικόνα (2.6) Χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας Ελλάδας (civilprotection.gr) (ΦΕΚ, 2003)

2.1.7 Ανθρώπινη δραστηριότητα

Είναι η οποιαδήποτε παρέμβαση του ανθρώπου ώστε να κατασκευάσει και να διαμορφώσει έργα υποδομής για την επέκτασή του. Στα πρανή, η βασικές παρεμβάσεις του ανθρώπου αφορούν στην κατασκευή νέων δρόμων, διάνοιξη σηράγγων, δημιουργία ορυχείων, και σταθεροποίηση των πρανών. Για όλες τις παραπάνω δραστηριότητες, απαιτούνται μεγάλες δομικές μηχανές και μηχανήματα διάνοιξης, τα οποία σπάνε τους βράχους των πρανών και ταυτόχρονα οι δονήσεις προκαλούν αστάθεια και δημιουργία ασυνεχειών.

2.1.8 Ασυνέχειες

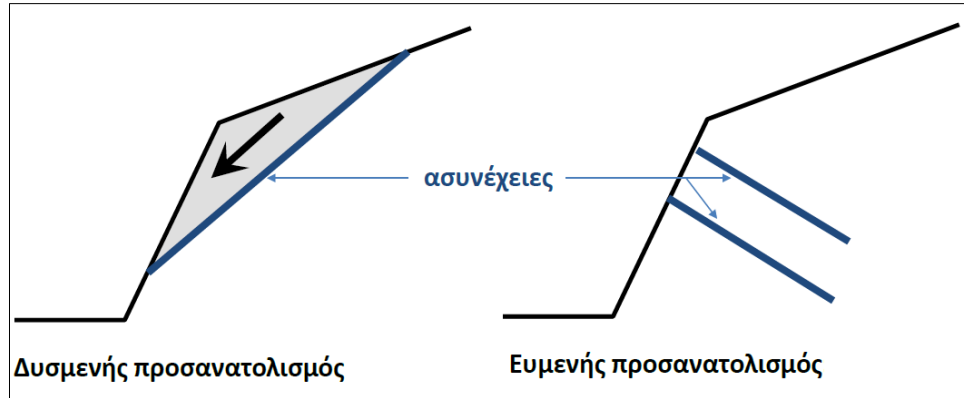
Είναι επίπεδα αδυναμίας των βράχων που διαχωρίζει τα πετρώματα, οι οποίες έχουν πολύ μικρή αντοχή σε εφελκυσμό. Οι ασυνέχειες μπορεί να είναι, συστηματικές και να διαχωρίζουν τον βράχο σε αρκετά μέρη, η μοναδιαίες που δεν συναντώνται συστηματικά. Και οι δύο περιπτώσεις αυτές εξαρτώνται από την κλίμακα του έργου και την ποιότητα του βράχου. Οι ασυνέχειες, είναι τα επίπεδα πάνω στα οποία θα κινηθεί ο βράχος και θα αστοχήσει.

2.1.8.1 Παράμετροι μηχανικής περιγραφής ασυνεχειών

Η περιγραφή των ασυνεχειών όσον αφορά την μηχανική αντοχή, γίνεται με τις παρακάτω παραμέτρους οι οποίες προτείνονται από την διεθνή ένωση βραχομηχανικής (ISRM 1981). (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2019)

1. Προσανατολισμός
2. Απόσταση
3. Εξάπλωση – Συνέχεια
4. Αντοχή τοιχωμάτων
5. Τραχύτητα
6. Άνοιγμα
7. Υλικό πλήρωσης
8. Συνθήκες υπόγειου νερού

Ο προσανατολισμός μιας ασυνέχειας, μας δείχνει την διεύθυνση την φορά και την κλίση που έχει μια ασυνέχεια στον χώρο ως προς κάποιο σύστημα αναφοράς που συνήθως είναι ο Βορράς. Με την πληροφόρηση του προσανατολισμού, μπορούμε να αξιολογήσουμε αν ένα τείχος είναι επιρρεπές σε αποκόλληση και μετακίνηση ανάλογα με το αν είναι δυσμενής η ευμενής ο προσανατολισμός.

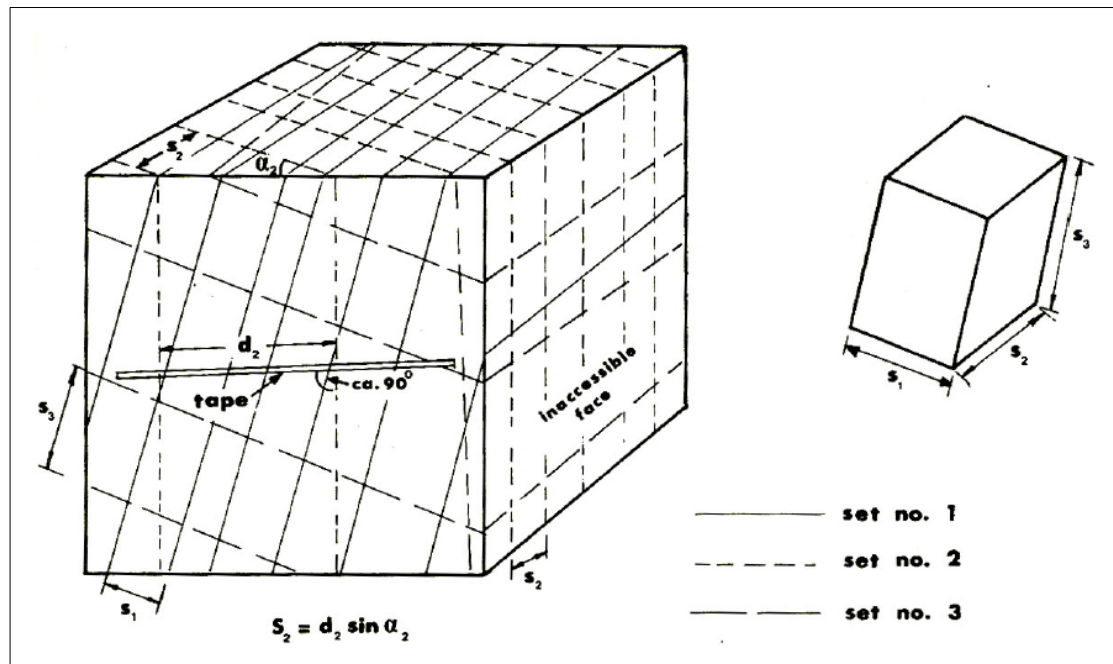


Εικόνα (2.7) Δυσμενής και ευμενής προσανατολισμός ασυνέχειας (Αστερίου, 2020)

Η απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών, χωρίζει το τείχος σε μικρότερα και ελέγχει το μέγεθός τους. Μεγάλες αποστάσεις δίνουν μεγαλύτερα τεμάχια ενώ αντίστοιχα μικρότερες αποστάσεις δίνουν μικρότερα. Με βάση την απόσταση εξετάζονται οι διαστάσεις των επιμέρους τεμαχίων που τα διαχωρίζουν οι ασυνέχειες. Οι αποστάσεις, ταξινομούνται με βάση τον παρακάτω πίνακα. Επίσης ορίζεται η πυκνότητα ασυνεχειών ως ο αριθμός τους ανά τρέχον μέτρο.

Πίνακας (2.1) Ταξινόμηση αποστάσεων ασυνεχειών

Εξαιρετικά μικρή	< 20 mm
Πολύ μικρή	20 – 60 mm
Μικρή	60 – 200 mm
Μέση	200 – 600 mm
Μεγάλη	600 – 2000 mm
Πολύ μεγάλη	2000 – 6000 mm
Εξαιρετικά μεγάλη	> 6000 mm

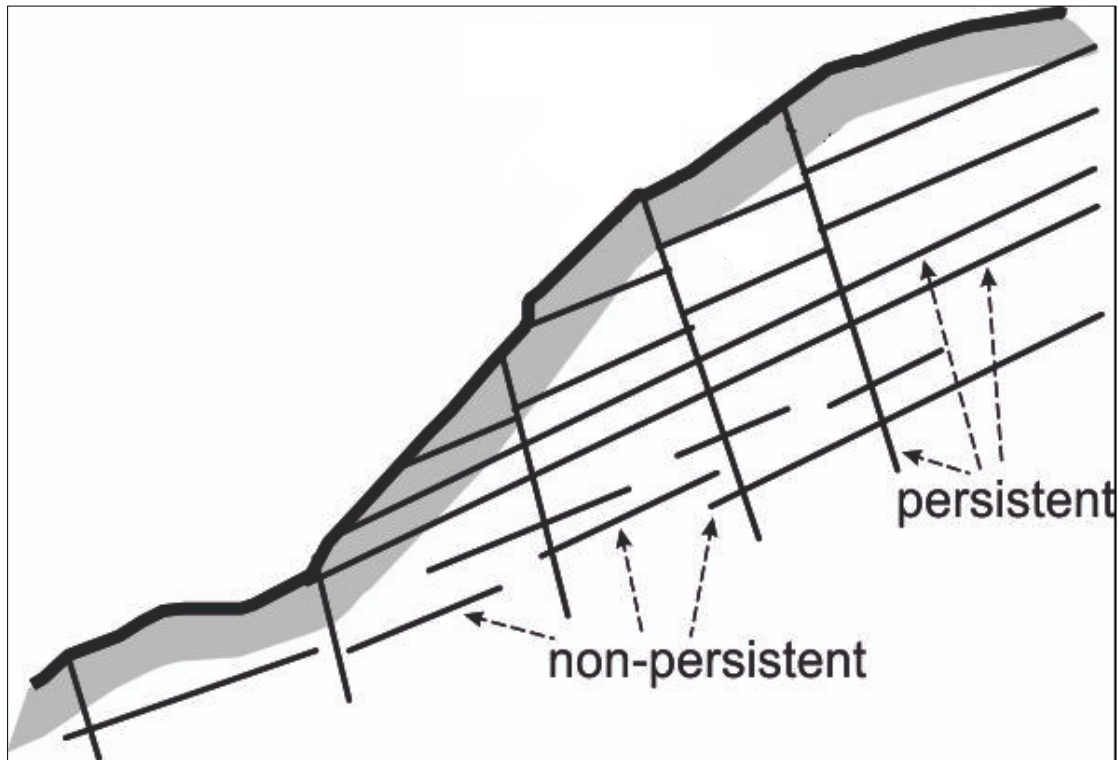


Εικόνα (2.8) Αποστάσεις Ασυνεχειών (Αστερίου, 2020)

Η εξάπλωση και η συνέχεια καθορίζουν κατά πόσο μια ασυνέχεια εκτείνεται στον βράχο χωρίς να διακόπτεται. Στην περίπτωση που η ασυνέχεια είναι συνεχής σε όλο το μήκος του βράχου, τότε μπορεί να αστοχήσει ολισθαίνοντας πάνω στην επιφάνεια αυτή. Αν η ασυνέχεια δεν είναι συνεχής και διακόπτεται τότε μπορεί να θεωρηθεί ότι ο βράχος είναι σταθερός και δεν κινδυνεύει με αστοχία. Τέλος αν η ασυνέχεια, τέμνει άλλες ασυνέχειες τότε η αστοχία συμβαίνει με σύνθετη μορφή. Οι συνέχειες ταξινομούνται με βάση το μήκος τους στον πίνακα (2.2).

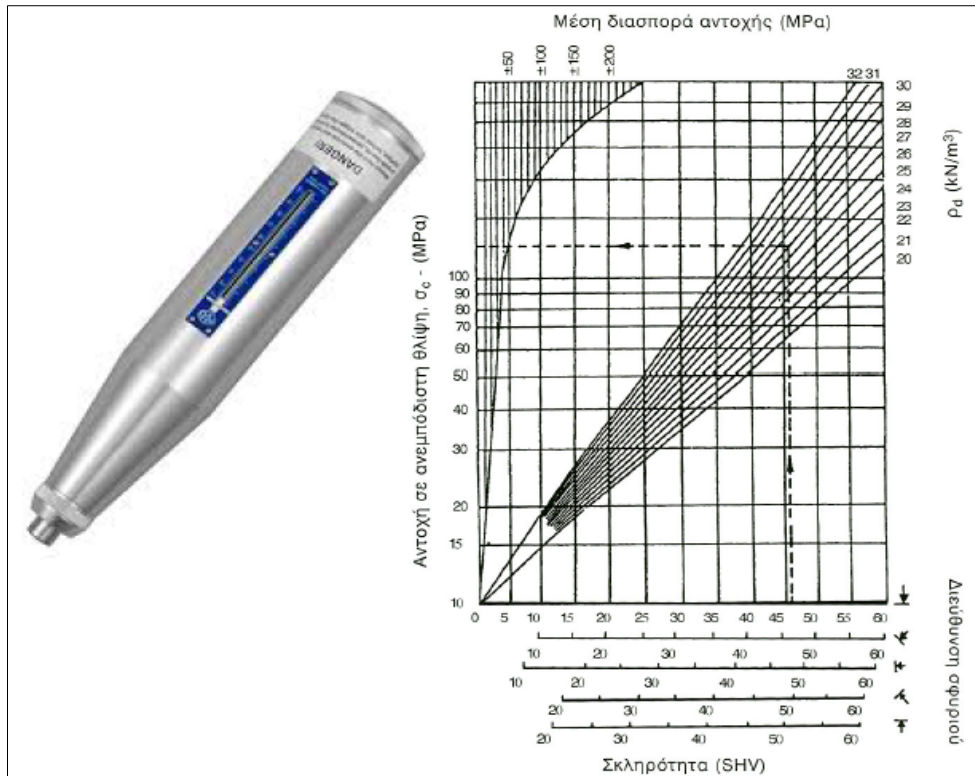
Πίνακας (2.2) Ταξινόμηση συνέχειας και εξάπλωσης

Πολύ μικρή	< 1 m
Μικρή	1 – 3 m
Μέση	3 – 10 m
Υψηλή	10 – 20 m
Πολύ υψηλή	> 20 m



Εικόνα (2.9) Εμμονή Εξάπλωση και Συνέχεια ασυνέχειας (Wikipedia, 2020) (en.Wikipedia.org)

Η αντοχή τοιχωμάτων των ασυνεχειών, είναι η παράμετρος που δείχνει την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη των τοιχωμάτων. Είναι μικρότερης αντοχής από τα άρρηκτα πετρώματα καθώς τα τοιχώματα έχουν δεχτεί αποσάθρωση και επειδή το ίδιο το τοίχωμα ήταν επιφάνεια στην οποία συνέβη αστοχία κατά μήκος της. Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη προσδιορίζεται με 2 τρόπους: με την χρήση της σφύρας Schmidt και με την χρήση μαχαιριδίου και γεωλογικού σφυριού. Η σφύρα Schmidt είναι ένα εργαλείο μη καταστροφικού ελέγχου της αντοχής διάφορων υλικών. Στην άκρη της έχει ένα έμβολο το οποίο με προσκρούει στην επιφάνεια του υλικού και προσδιορίζει την σκληρότητα (SHV) της. Ανάλογα της σκληρότητας εκτιμάται η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη με κάποια αβεβαιότητα. Στον παρακάτω πίνακα, δίνονται τιμές με τις οποίες ταξινομούνται τα τοιχώματα των ασυνεχειών σύμφωνα με την σκληρότητα.



Εικόνα (2.10) Σφύρα Schmidt και διάγραμμα Schmidt (Αστερίου, 2020)



Εικόνα (2.11) Γεωλογικό σφυρί (Indiamart.com)

Πίνακας (2.3) Ταξινόμηση των τοιχωμάτων με την σκληρότητα Schmidt

Πολύ μαλακά	< 10
Μαλακά	10 – 20
Μέτρια	20 – 50
Σκληρά	50 – 60
Πολύ σκληρά	> 60

Επίσης δίνεται ένας ακόμα ποιοτικός πίνακας, όταν γίνεται εκτίμηση της αντοχής των τοιχωμάτων με την χρήση γεωλογικού σφυριού και μαχαιριού.

Πίνακας (2.4) Ταξινόμηση βραχώδους υλικού με την χρήση σφυριού και μαχαιριού

Κατάταξη πετρώματος	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (MPa)	Επί τόπου εκτίμηση
Εξαιρετικά υψηλής αντοχής	> 250	Ο πυρήνας δεν σπάει με το γεωλογικό σφυρί
Πολύ υψηλής αντοχής	100 – 250	Για να σπάσει ο πυρήνας χρειάζονται πολλά χτυπήματα με το γεωλογικό σφυρί
Υψηλής αντοχής	50 – 100	Για να σπάσει ο πυρήνας χρειάζονται περισσότερα από ένα χτυπήματα
Μέσης αντοχής	25 – 50	Ο πυρήνας δεν χαράσσεται με μαχαίρι και μπορεί να σπάσει με ένα χτύπημα γεωλογικού σφυριού
Χαμηλής αντοχής	5 – 25	Ο πυρήνας χαράσσεται δύσκολα με το μαχαίρι και η μύτη του σφυριού δημιουργεί αβαθείς χαραγιές
Πολύ χαμηλής αντοχής	1 – 5	Ο πυρήνας σπάει σε πολλά κομμάτια με ένα χτύπημα με το σφυρί και χαράσσεται εύκολα με το μαχαίρι
Εξαιρετικά χαμηλής αντοχής	0.25 – 1	Ο πυρήνας χαράσσεται εύκολα με το νύχι του αντίχειρα

Η τραχύτητα δείχνει πόσο λεία ή πόσο τραχεία είναι η επιφάνεια της ασυνέχειας και είναι πολύ σημαντική για την διατμητική της αντοχή. Εκτός από την βασική γωνία τριβής, η τραχύτητα προσφέρει διατμητική αντοχή μέσω της γωνίας της τραχύτητας. Η μέγιστη διατμητική αντοχή μιας ασυνέχειας μπορεί να προσδιοριστεί με την εξίσωση BARTON.

$$\tau = \sigma_n \times \tan \left[\phi_b + JRC \times \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right] \quad (\text{Εξ. 2.1})$$

Όπου:

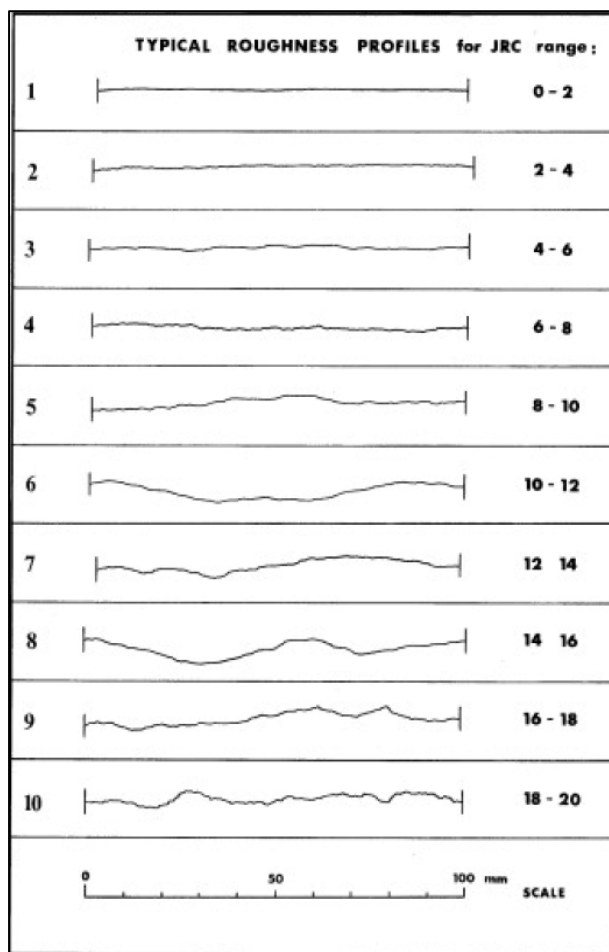
τ : Η μέγιστη διατμητική αντοχή

σ_n : Η επιβαλλόμενη ορθή τάση

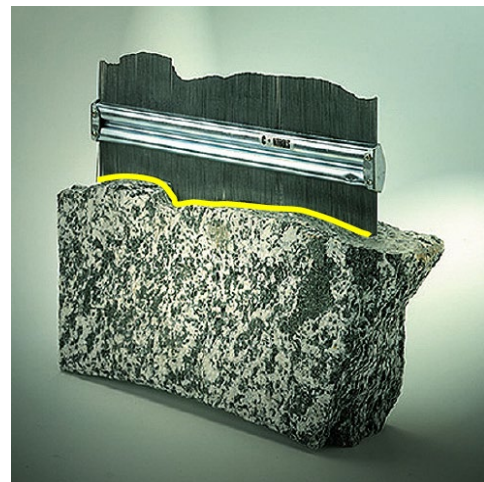
ϕ_b : Η βασική γωνία τριβής

JRC: Συντελεστής τραχύτητας ασυνεχειών που ορίζεται από τυποποιημένα προφίλ

JCS: Η αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη των τοιχωμάτων που ορίζεται από το διάγραμμα Schmidt.



Εικόνα (2.13) Τυποποιημένα προφίλ τραχύτητας επιφανειών και τιμές JRC (Αστερίου, 2020)

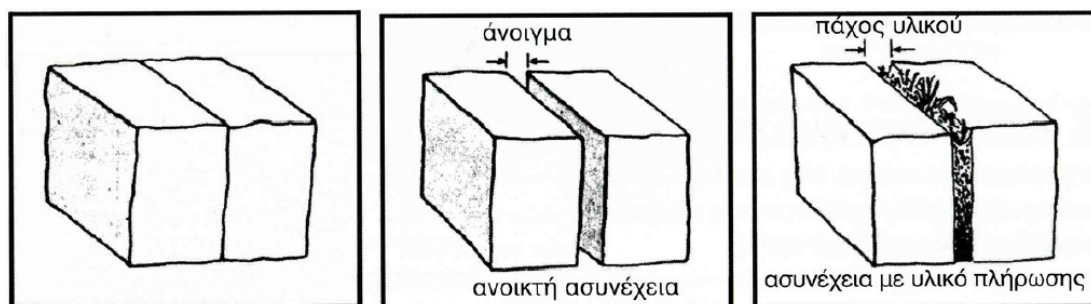


Εικόνα (2.12) Όργανο μέτρησης - αποτύπωσης επιφάνειας (Αστερίου, 2020)

Το άνοιγμα, είναι η κάθετη απόσταση μεταξύ των τοιχωμάτων της ασυνέχειας, η οποία χωρίζει σε επιμέρους τμήματα έναν βράχο. Μια ασυνέχεια μπορεί να είναι κλειστή, ανοιχτή, η γεμάτη με υλικό πλήρωσης. Το άνοιγμα των ασυνεχειών ταξινομείται με βάση το μήκος του και χαρακτηρισμό από πολύ κλειστή έως εξαιρετικά πλατιά.

Πίνακας (2.5) Ταξινόμηση ανοίγματος ασυνεχειών

Πολύ κλειστές	< 0,1 mm
Κλειστές	0,1 – 0,25 mm
Μερικά ανοιχτές	0,25 – 0,5 mm
Ανοιχτές	0,5 – 2,5 mm
Μέτρια πλατιές	2,5 – 10 mm
Πλατιές	> 10 mm
Πολύ πλατιές	1 – 10 cm
Εξαιρετικά πλατιές	10 – 100 cm



Εικόνα (2.14) Ανοίγματα ασυνεχειών, κλειστή, ανοιχτή και με υλικό πλήρωσης (Αστερίου, 2020)

Το υλικό πλήρωσης είναι το υλικό το οποίο βρίσκεται μέσα στην ασυνέχεια, λειτουργώντας σαν συνδετικό μέσο μεταξύ των τοιχωμάτων του βράχου. Το υλικό πλήρωσης μπορεί να είναι ασβεστικό, αργιλικό, αμμώδες, ιλυώδες και συνδυασμός τους. Το είδος και το πάχος του υλικού, καθορίζει την διατμητική αντοχή και την διαπερατότητα.

Οι συνθήκες υπόγειου νερού, καθορίζουν και ελέγχουν την επίδραση του νερού στις ασυνέχειες. Το υπόγειο νερό που κυκλοφορεί εντός των κενών, προκαλεί διάφορα προβλήματα όπως αποσάθρωση και προκαλεί επιπλέον υδροστατικές φορτίσεις. Στον παρακάτω πίνακα, περιγράφεται εμπειρικά η κατάσταση του υπόγειου νερού εντός των ασυνεχειών.

Πίνακας (2.6) Περιγραφή υπόγειου νερού εντός ασυνεχειών χωρίς και με υλικό πλήρωσης

Κατηγορία	Χωρίς υλικό πλήρωσης	Με υλικό πλήρωσης
1	Πολύ κλειστή και στεγνή χωρίς πιθανότητα εμφάνισης νερού	Υλικό πολύ στερεοποιημένο και αδιαπέρατο χωρίς δυνατότητα εμφάνισης νερού
2	Στεγνή χωρίς παρουσία νερού	Υλικό υγρό χωρίς ελεύθερο νερό
3	Στεγνή με ενδείξεις νερού	Υλικό υγρό με παρουσία σταγόνων
4	Υγρή χωρίς ελεύθερο νερό	Υλικό με ενδείξεις απόπλυσης και με συνεχή ροή νερού
5	Ροή νερού όχι συνεχής αλλά με μορφή σταγόνων	Υλικό τοπικά αποπλυμένο με σημαντική ροή νερού
6	Συνεχής ροή νερού	Υλικό εντελώς αποπλυμένο με ροή νερού υπό πίεση

Όλα τα παραπάνω συνθέτουν τα αίτια των καταπτώσεων. Η επίδραση της αποσάθρωσης και της χλωρίδας, είναι τα αίτια τα οποία οδηγούν στην διάρρηξη των βράχων, δημιουργώντας τις ασυνέχειες που είναι η επιφάνεια στην οποία συμβαίνει η αστοχία, λόγω της μηδενικής σχεδόν αντοχής. Οι κατακρημνίσεις, η σεισμική φόρτιση το τοπογραφικό ανάγλυφο και οι ανθρώπινες δραστηριότητες είναι οι δράσεις που διαταράσσουν την ισορροπία, προκαλώντας αποκολλήσεις και καταπτώσεις των βράχων.



Εικόνα (2.15) Επιφάνεια που έχει αποκολληθεί βράχος, και έντονες ασυνέχειες (Μαλακάσα) (Προσωπικό αρχείο)

2.2 Μέτρα αντιμετώπισης

2.2.1 Γενικά στοιχεία

Τα μέτρα αντιμετώπισης των καταπτώσεων αφορούν οποιαδήποτε έργα πραγματοποιούνται για την ανάσχεση, συλλογή, αφαίρεση και αύξηση της αντοχής βράχων από πρηνή τα οποία είναι επιρρεπή σε κατάπτωση. Τα έργα αυτά ποικίλουν και εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες. Το κύριο τεχνικό έργο που επηρεάζεται από τις καταπτώσεις βράχων είναι τα οδικά δίκτυα των ορεινών περιοχών, όπου και απαιτούνται μέτρα ανάσχεσης καταπτώσεων. Εκτός από την φθορά ή ακόμα και την μερική καταστροφή του έργου κινδυνεύουν και οι χρήστες οι οποίοι μπορεί να βρεθούν αντιμέτωποι με καταπτώσεις διακινδυνεύοντας ακόμα και την ζωή τους. Τα μέτρα αντιμετώπισης χωρίζονται στα ενεργητικά και στα παθητικά. Τα ενεργητικά αφορούν όλα τα έργα που μπορούν να πραγματοποιηθούν για την αποφυγή της αστοχίας από το πρηνές, ενώ τα παθητικά αφορούν όλα τα έργα που γίνονται για την ανάσχεση του βράχου μετά την αποκόλλησή του.

2.2.2 Ενεργητικά μέτρα

1. **Αφαίρεση επικίνδυνων τεμαχών.** Αποτελεί διαδικασία κατά την οποία γίνεται ελεγχόμενη αφαίρεση των επικίνδυνων βράχων που βρίσκονται σε οριακή ισορροπία. Αποτελεί μια οικονομική λύση, καθώς δεν απαιτούνται πολλά έργα και αφού γίνει η αφαίρεση του βράχου, τότε αποκαθίσταται σημαντικά η ολική ισορροπία και περιορίζεται ο κίνδυνος αποκόλλησης μετά από σεισμό ή βροχή.



Εικόνα (2.17) Αφαίρεση βράχων με ειδικό εκσκαφέα (onlinerepubs.trb.org)



Εικόνα (2.16) Αφαίρεση βράχων με εκσκαφέα (onlinerepubs.trb.org)



Εικόνα (2.18) Αφαίρεση βράχων από εργάτες με σχοινιά (onlinerpubs.trb.org)



Εικόνα (2.19) Αφαίρεση βράχων από εργάτες με ανυψωτικό μηχάνημα (onlinerpubs.trb.org)



Εικόνα (2.20) Αφαίρεση βράχων από εργάτες με ανυψωτικό μηχάνημα (onlinerpubs.trb.org)



Εικόνα (2.21) Αφαίρεση βράχων από εργάτες με ανυψωτικό μηχάνημα (onlinerpubs.trb.org)



Εικόνα (2.22) Αφαίρεση βράχων από εργάτες με ανυψωτικό μηχάνημα (onlinerpubs.trb.org)

- 2. Αγκυρώσεις.** Είναι χαλύβδινές ράβδοι ή συρματοσχοινα που τοποθετούνται σε τεμάχια για να τα σταθεροποιήσουν στο πρανές. Η διαδικασία περιλαμβάνει διάτρηση με τρυπάνι μέχρι την εύρεση υγιούς βράχου, τοποθέτηση της ράβδου, τσιμέντωση και περίσφιξη με παξιμάδια. Η τοποθέτηση και ο αριθμός των αγκυρών, εξαρτάται από το μέγεθος του βράχου. Τα αγκύρια, αυξάνουν πολύ σημαντικά την ευστάθεια των τεμαχίων και αποτρέπουν την αποκόλλησή τους.



Εικόνα (2.23) Αγκύριο, (Λόφος Σικελίας Καλλιθέα) (Προσωπικό αρχείο)



Εικόνα (2.24) Μεγάλος βράχος και αγκύρια υποστήριξης (Αστερίου, 2021)

3. **Ενίσχυση με ενέματα.** Είναι μέθοδος όπου διοχετεύεται μέσα στις ασυνέχειες και στα κενά των βράχων ειδικό παχύρευστο υλικό το οποίο κλείνει τα ανοίγματα και με το πέρασ του χρόνου πήζει. Αποτέλεσμα αυτού είναι η σημαντική αύξηση των μηχανικών ιδιοτήτων των ασυνεχειών και η δημιουργία συνοχής μεταξύ των διακριτών τεμαχών.
4. **Αποστράγγιση.** Η εισαγωγή σωλήνων αποστράγγισης σε διάφορα σημείο σε ένα πρανές συλλέγει και απομακρύνει το νερό που συγκεντρώνεται στο πρανές και εισχωρεί στα κενά και στις ασυνέχειες μετά από βροχόπτωση. Το επιπλέον νερό που βρίσκεται στις ασυνέχειες ασκεί υδροστατικές δυνάμεις αυξάνοντας τα φορτία αστοχίας.
5. **Αλλαγή γεωμετρίας πρανούς.** Αφορά στην αλλαγή της κλίσης του πρανούς και στην κατασκευή αναβαθμών ώστε να μειωθεί η ταχύτητα κίνησης του τεμάχους ώστε να σταματήσει σε κάποιον αναβαθμό.

2.2.3 Παθητικά μέτρα

1. **Φράχτες ανάσχεσης.** Χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Τους δύσκαμπτους και τους εύκαμπτους. Οι δύσκαμπτοι φράχτες, είναι κατασκευές από σκυρόδεμα σαν τοίχος αντιστήριξης, στον οποίο προσκρούει το τέμαχος και καταλήγει στο πίσω μέρος του όπου υπάρχει τάφρος. Τοποθετούνται στον πόδα του πρανούς, και χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα και σαν στηθαία ασφαλείας τύπου Jersey στα οδικά δίκτυα.



Εικόνα (2.25) Δύσκαμπτος φράχτης (Μαλακάσα) (Προσωπικό αρχείο)

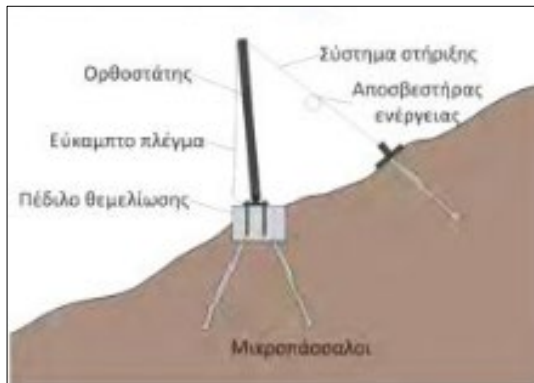


Εικόνα (2.26) Δύσκαμπτος φράχτης (Μαλακάσα) (Προσωπικό αρχείο)



Εικόνα (2.27) Δύσκαμπτος φράχτης και χαντάκι (Μαλακάσα) (Προσωπικό αρχείο)

Οι εύκαμπτοι φράχτες, είναι κατασκευασμένοι από μεταλλικά στοιχεία και μπορούν να τοποθετηθούν εκτός από τον πόδα του πρανούς και σε κάποια ενδιάμεση θέση ώστε να ανασχέσει τον βράχο πριν φτάσει σε χαμηλότερα σημεία. Αποτελούνται από μεταλλικά υποστυλώματα πακτωμένα στο πρανές, από ένα μεταλλικό δίχτυ ή πλέγμα το οποίο είναι πολύ εύκαμπτο, και από μηχανισμούς απόσβεσης της ενέργειας. Σκοπός τους είναι να συγκρατούν στο δίχτυ όλα τα υλικά καταπτώσεων.



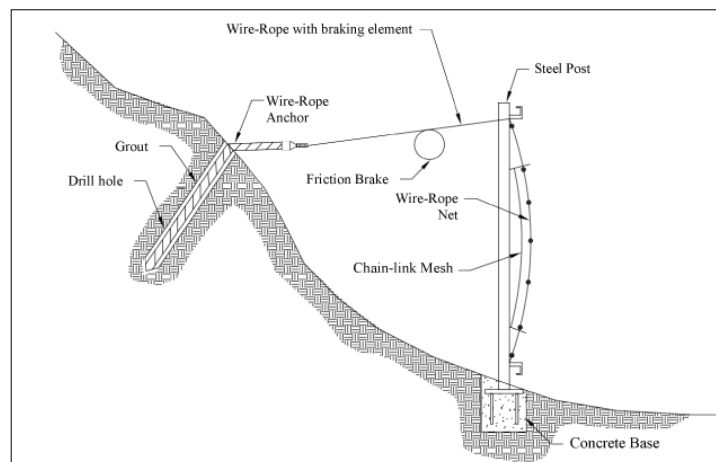
Εικόνα (2.28) Διατομή εύκαμπτου φράχτη (Αστερίου, 2016)



Εικόνα (2.29) Εύκαμπτος φράχτης (Λόφος Σικελίας Καλλιθέα) (Προσωπικό αρχείο)



Εικόνα (2.30) Εύκαμπτος φράχτης (geotech.hr)



Εικόνα (2.31) Κατασκευαστικό σχέδιο εύκαμπτου φράχτη (fhwa.dot.gov)



Εικόνα (2.32) Συγκράτηση βράχου από εύκαμπτο φράχτη (Αστερίου, 2016)



Εικόνα (2.33) Λεπτομέρειες αποσβεστήρων εύκαμπτων φραχτών (geotech.hr)



Εικόνα (2.34) Εύκαμπτος φράχτης χωρίς μηχανισμούς απόσβεσης (geobrugg.com)

Οι εύκαμπτοι φράχτες τοποθετούνται εύκολα σε όλα τα πρανή και με μικρό κόστος κατασκευής. Επίσης είναι εύκολη η αντικατάσταση κάποιου τμήματος ή εξοπλισμού του φράχτη σε περίπτωση που υπάρξει διαρροή του μετά από μια πολύ μεγάλη πρόσκρουση βράχου η οποία θα δώσει πολύ μεγάλες φορτίσεις και παραμορφώσεις. Λόγω της μεταλλικής του κατασκευής, όλα τα εξαρτήματά του είναι ευαίσθητα σε διάβρωση που οδηγεί κυρίως στην ανάπτυξη σκουριάς, μειώνοντας έτσι τις μηχανικές ιδιότητες του.

- 2. Μεταλλικά πλέγματα.** Είναι μεταλλικά δίχτυα ή πλέγματα τα οποία αγκυρώνονται στην κορυφή του πρανού και το υπόλοιπο σώμα τους καλύπτει όλη την επιφάνεια του μέχρι τον πόδα. Το πλέγμα, περιορίζει σημαντικά την κίνηση και την ταχύτητα των βράχων, μη επιτρέποντας τους να ξεφύγουν από την επιφάνεια του πρανού. Αφού διανύσουν ελεγχόμενα όλο το σώμα του πρανού, καταλήγουν στον πόδα όπου υπάρχει χαντάκι ή φράχτης που ανακόπτει την κίνηση. Το πλέγμα μπορεί επίσης να είναι αγκυρωμένο σε διάφορα σημεία πάνω στο πρανές. Είναι οικονομικό και μπορεί να τοποθετηθεί σε κάθε είδος πρανού.



Εικόνα (2.35) Μεταλλικό πλέγμα (Μαλακάσα)
(Προσωπικό αρχείο)



Εικόνα (2.36) Μεταλλικό πλέγμα (Μαλακάσα)
(Προσωπικό αρχείο)



Εικόνα (2.37) Μεταλλικό πλέγμα (Maccaferri.com)

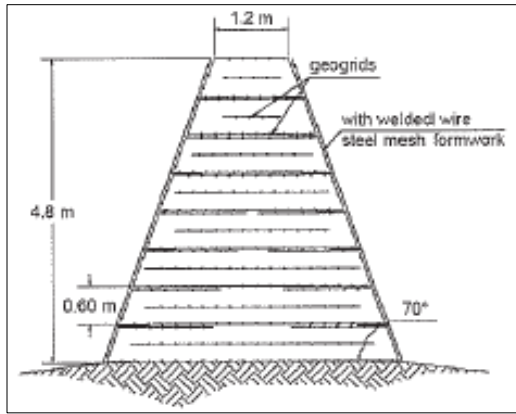


Εικόνα (2.38) Μεταλλικό πλέγμα με αγκύρια
(Λόφος Σικελίας Καλλιθέα) (Προσωπικό αρχείο)

- 3. Κατασκευή επιχώματων.** Κατασκευάζονται στον πόδα των πρανών, όπως τα κανονικά επιχώματα των δρόμων. Μπορούν να οπλιστούν με συνθετικά υλικά και μεταλλικές ράβδους αυξάνοντας την αντοχή τους και μειώνοντας την κλίση του. Είναι τα ισχυρότερα μέτρα αντιμετώπισης αλλά απαιτούν μεγάλους όγκους χωματισμών και υλικών καθώς και αρκετό χώρο για την κατασκευή τους. Μπορούν να συγκρατήσουν πολύ μεγάλα τεμάχια χωρίς να υποστούν ζημιές. Πίσω από το επίχωμα, βρίσκεται χαντάκι όπου καταλήγουν οι πέτρες μετά την πρόσκρουση.



Εικόνα (2.39) Επίχωμα ανάσχεσης καταπτώσεων (Maccaferri.com)



Εικόνα (2.40) Τυπική διατομή οπλισμένου επιχώματος (Protection Badger, Duffy, Schellenberg)



Εικόνα (2.41) Οπλισμένο επίχωμα (building.govt.nz)

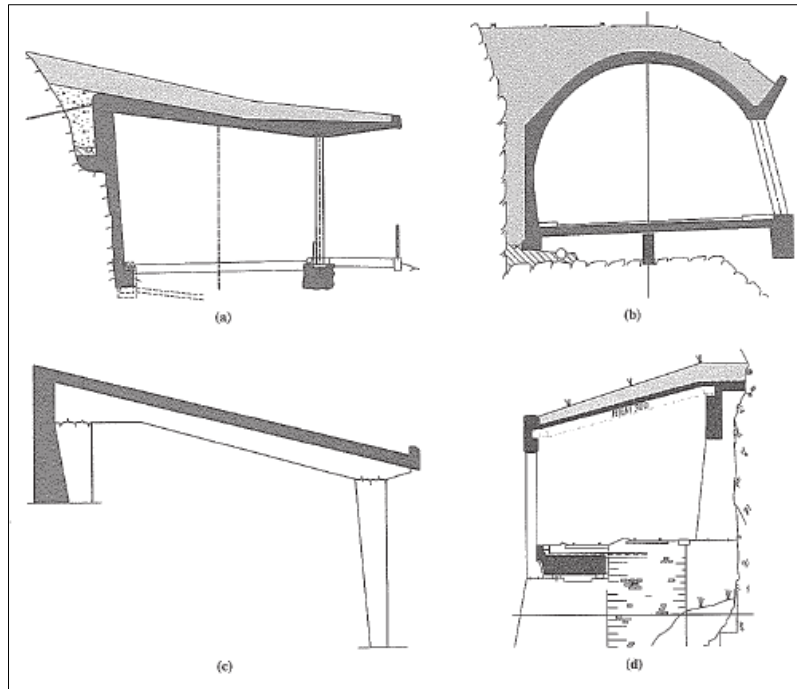


Εικόνα (2.42) Συμβατικό επίχωμα με υποστήριξη λίθων (building.govt.nz)



Εικόνα (2.43) Επίχωμα από συρματοκιβώτια (building.govt.nz)

4. **Στέγαστρα καταπτώσεων.** Είναι βαριές κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα, που τοποθετούνται στα οδικά δίκτυα, σε σημεία στα οποία εκδηλώνονται συχνά καταπτώσεις. Οι βράχοι που πέφτουν, συγκρατούνται στο στέγαστρο και ανακόπτονται εκεί ή αλλιώς μπορεί με διαφορετική διάταξη της οροφής να κυλίσει πάνω της και να απομακρυνθεί τελείως, πέφτοντας σε απρόσιτες περιοχές που δεν θα επηρεάσει η πτώση του βράχου. Το ταβάνι είναι διαστρωμένο με σκύρα, ώστε να μην φθείρετε το σκυρόδεμα από κρούσεις βράχων.



Εικόνα (2.44) Διαφορετικοί τύποι στεγαστρών. (a) Τυπικό οπλισμένου σκυροδέματος (b) Κυκλικής διατομής τύπου κελύφους από οπλισμένο σκυρόδεμα (c) Επιτόπου κατασκευασμένο από οπλισμένο σκυρόδεμα (d) Σύμμικτο στέγαστρο. (Protection Badger, Duffy, Schellenberg)

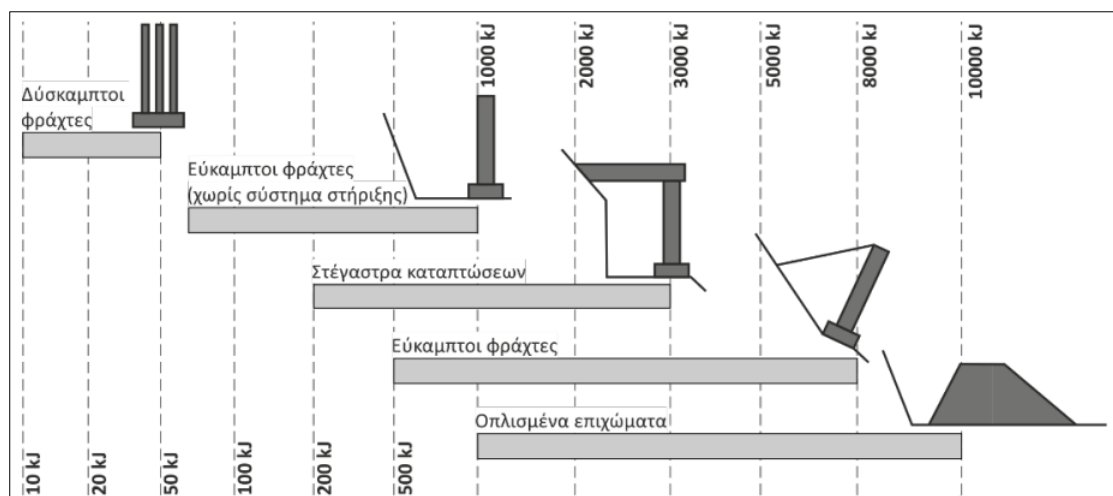


Εικόνα (2.45) Στέγαστρο καταπτώσεων (Αστερίου, 2021)

2.2.4 Στοιχεία για την εφαρμογή των μέτρων προστασίας

Το κάθε μέτρο έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά του. Απαιτείται πλήρης έρευνα της περιοχής και ολοκληρωμένη μελέτη του έργου προτού γίνει οποιαδήποτε κατασκευή. Η περιοχή κατασκευής των μέτρων έχει σημαντικό ρόλο κυρίως όταν υπάρχει ανθρώπινη δραστηριότητα και η κατάπτωση βράχου θα προκαλούσε προβλήματα.

Εκτός της περιοχής σημαντικός παράγοντας είναι και ο διαθέσιμος χώρος για την κατασκευή του έργου. Σε τμήμα οδικού δικτύου ο χώρος είναι αρκετά περιορισμένος οπότε θα απαιτούνταν μικρότερης έκτασης μέτρα. Τέλος σημαντικός παράγοντας είναι και το μέγεθος των τεμαχών που μπορούν να αποκολληθούν. Γνωρίζοντας ένα τυπικό μέγεθος των βράχων που υπάρχουν στο πρανές, μπορεί να γίνει η καλύτερη επιλογή του έργου ώστε να μην καταστραφεί από μια κατάπτωση μεγάλου βράχου.



Εικόνα (2.46) Αντοχή παθητικών μέτρων προστασίας στην κινητική ενέργεια των τεμαχών (Αστερίου, 2021)

Κεφάλαιο 3

3.1 Τάφροι ανάσχεσης καταπτώσεων

Οι τάφροι ανάσχεσης καταπτώσεων είναι έργα που κατασκευάζονται κυρίως σε οδικά δίκτυα. Το ένα άκρο βρίσκεται στον πόδα του πρανούς και το άλλο στην αρχή του καταστρώματος του δρόμου με τον σκοπό να συγκρατούν τα προϊόντα καταπτώσεων. Οι τάφροι μπορούν να κατασκευαστούν με διάφορες διατομές όπως τριγωνική, τραπεζοειδής και ορθογωνική. Επικρατέστερη είναι η τριγωνική στην οποία έχουν πραγματοποιηθεί και οι περισσότερες μελέτες, είναι η οικονομικότερη και ευκολότερη στην διαμόρφωση και συνδέεται πολύ καλά με τους κανονισμούς ασφαλείας για την κυκλοφορία. Επίσης, μπορεί σε κάποιες περιπτώσεις να λειτουργεί συνδυαστικά και σαν τάφος απορροής όμβριων υδάτων. Μπορεί να είναι επενδεδυμένη ή ανεπένδυτη, με μικρή φυτοκάλυψη ή πληρωμένη με αδρανή.



Εικόνα (3.1) Τάφος ανάσχεσης καταπτώσεων (fhwa.dot.gov)

3.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Όπως όλα τα έργα έτσι και η τάφροι ανάσχεσης έχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Σε κάθε περίπτωση, γίνεται τεχνικοοικονομική μελέτη για την καλύτερη απόδοση του έργου.

3.2.1 Πλεονεκτήματα

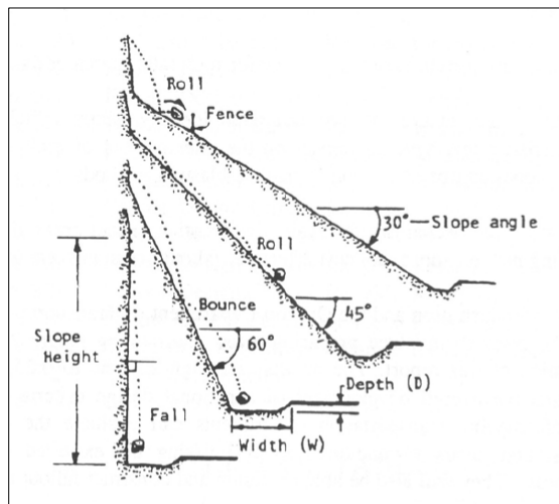
- Αρκετά οικονομικό μέτρο στην περίπτωση που μελετάται ταυτόχρονα με τον δρόμο που θα προστατεύει.
- Εύκολη πρόσβαση, ακόμα και από μηχανήματα, για την απομάκρυνση των τεμαχίων που έχουν συκρατηθεί από την τάφρο.
- Εύκολη και οικονομική η συντήρησή της σε περίπτωση φθοράς από κατάπτωση.
- Μπορεί να λειτουργήσει και σαν τάφρος απορροής όμβριων υδάτων.
- Λειτουργεί αποτελεσματικότερα ανεπένδυτη, λόγω των μικρότερων συντελεστών αναπήδησης που αναπτύσσονται μεταξύ του τεμάχους και των εδαφικών υλικών και της βλάστησης, συγκριτικά με την επένδυση από σκυρόδεμα που οι συντελεστές αυτοί αυξάνονται. Αποτέλεσμα, αυτού είναι το μικρότερο συνολικό κόστος.

3.2.2 Μειονεκτήματα

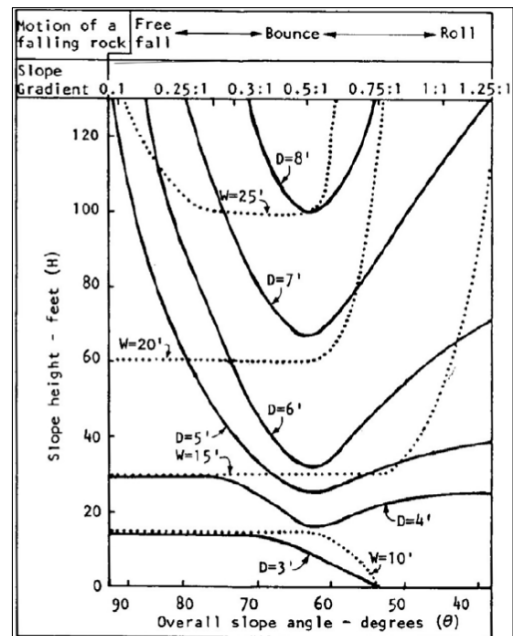
- Μπορεί να συλλέξει τεμάχια περιορισμένου μεγέθους και κινητικής ενέργειας.
- Για την συγκράτηση μεγάλων τεμαχίων στην τάφρο απαιτούνται μεγαλύτερα βάθη εκσκαφής και αύξηση του πλάτους, με αποτέλεσμα το κόστος και το εύρος κατάληψης της διατομής να αυξάνονται.
- Συνήθως μαζί με την τάφρο, απαιτείται και η τοποθέτηση πρόσθετου μέτρου με επικρατέστερα την εισαγωγή δύσκαμπτου φράχτη, τύπου στηθαίου New Jersey (N. J.), ή την προσθήκη μεταλλικού πλέγματος για την καθοδήγηση του τεμάχους και την απόθεσή του στην τάφρο.
- Σε περιοχές με έντονη βροχόπτωση, που η παροχή σχεδιασμού είναι μεγάλη, απαιτούνται επιπλέον έργα για την αποστράγγιση του δρόμου και πλέον η τάφρος δεν μπορεί να λειτουργήσει σαν τάφρος απορροής όμβριων υδάτων.
- Για την εύρεση της γεωμετρίας της τάφρου, απαιτούνται λεπτομερείς αναλύσεις καταπτώσεων με χρήση πιθανοτικών μοντέλων.
- Οι μέθοδοι διαστασιολόγησης είναι περιορισμένες και βασίζονται σε πολλές παραδοχές, καθώς το φαινόμενο των καταπτώσεων είναι πολύπλοκο και η μετατροπή του σε φυσικό ή μαθηματικό μοντέλο είναι δύσκολη.

3.3 Μελέτη των τάφρων ανάσχεσης

Ο πρώτος που ασχολήθηκε με την διαστασιολόγηση και μελέτη των τάφρων ανάσχεσης καταπτώσεων ήταν ο Arthur M. Ritchie, που μαζί με το τμήμα εθνικών οδών της Ουάσιγκτον (WDOT), δημοσίευσε το 1963 την μελέτη του με τίτλο “Αξιολόγηση των καταπτώσεων και του ελέγχου τους” που μέχρι και σήμερα χρησιμοποιείται. Αρχικά, η μελέτη αφορούσε στον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών της κίνησης μετά την αστοχία, σε συνδυασμό με την διαμόρφωση και το ύψος του πρανούς, ώστε να προσδιορίσει την αναμενόμενη απόσταση που θα προσκρούσει ένα τέμαχος. Διερεύνησε επίσης, πως θα σταματούσε ένα τέμαχος που είχε αναπτύξει πολύ μεγάλη γωνιακή ταχύτητα, την στιγμή που θα έπεφτε μέσα στην τάφρο, ώστε να μην μπορέσει να την υπερπηδήσει και να ξεφύγει. Η μελέτη, περιλάμβανε την ρίψη βράχων σε παλαιά λατομεία και σε διάφορες πλαγιές στην Ουάσιγκτον.

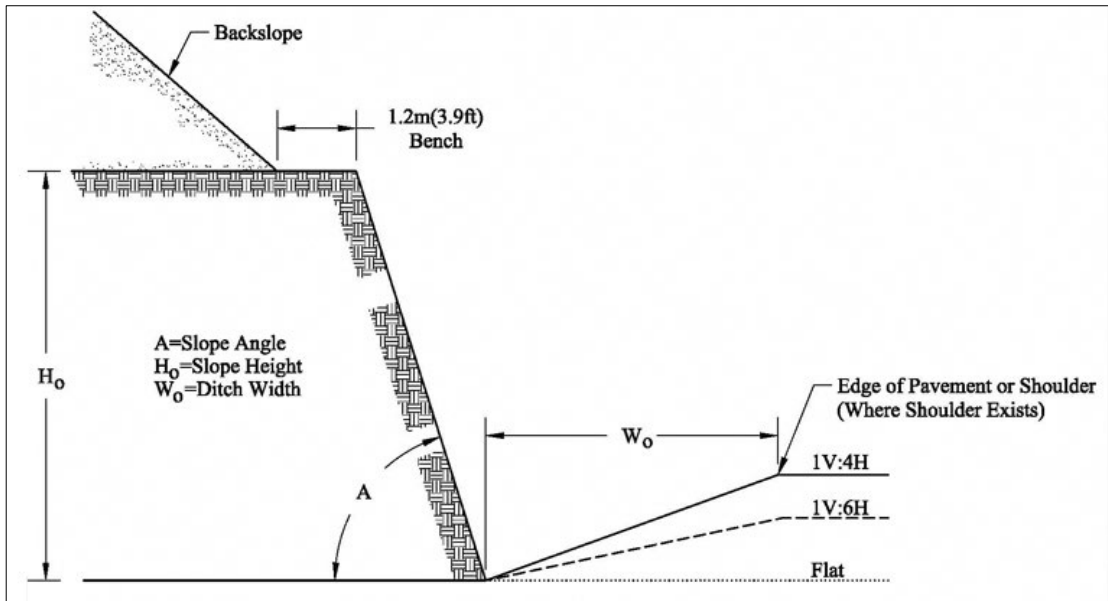


Εικόνα (3.2) Κίνηση τεμάχους συναρτήσει γωνίας πρανούς (Ritchie 1963) (Oregon.gov/ODOT)

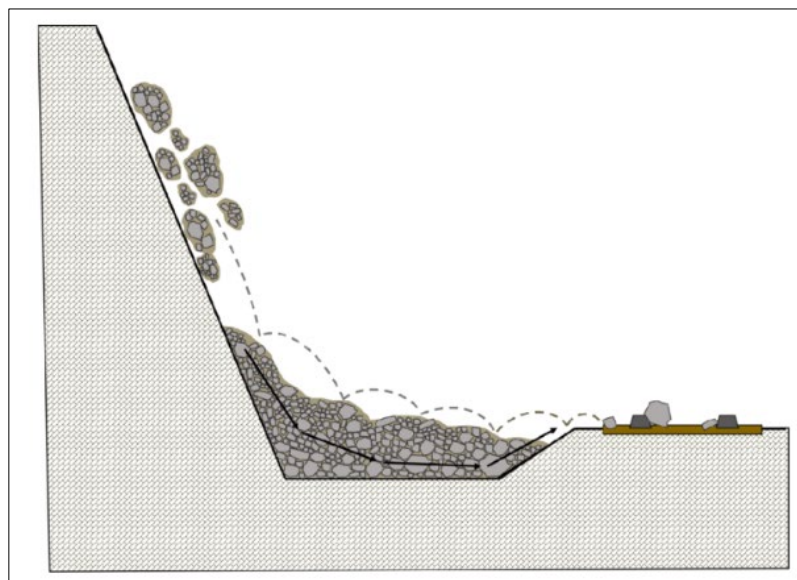


Εικόνα (3.3) Διάγραμμα σχεδίασης τάφρων (Ritchie 1963) (Oregon.gov/ODOT)

Ο Ritchie, κατήρτισε ένα εμπειρικό διάγραμμα (Εικόνα (3.3)), το οποίο δείχνει την κίνηση που ακολουθεί ένα τέμαχος μετά την αποκόλλησή του από ένα πρανός. Η κίνηση αυτή, εξαρτάται από την γωνία του πρανούς και πιο συγκεκριμένα: Από 60° έως 90°, η κίνηση θα είναι ελεύθερη πτώση, με λίγες αναπηδήσεις τείνοντας προς τις 60°. Από 45° έως 60°, η κίνηση θα είναι παραβολική με συνεχείς αναπηδήσεις και τείνοντας στις 45° θα υπάρχει ικανότητα και για κύλιση. Από 30° έως 45°, θα πραγματοποιείται κύλιση, που θα συνδυάζεται με ολίσθηση.



Εικόνα (3.4) Τυπική διατομή τάφρου ανάσχεσης στο Όρεγκον με διαφορετικές κλίσεις τάφρου (fhwa.dot.gov)



Εικόνα (3.5) Τάφρος γεμάτη με υλικά καταπτώσεων (researchgate.net)

Σε συνδυασμό με όλα τα παραπάνω, ο Ritchie προχώρησε στα παρακάτω συμπεράσματα.

1. Ανεξάρτητα από το σχήμα ή το μέγεθος του βράχου, ο τρόπος μετακίνησής του πάνω στο πρανές είναι συνάρτηση της κλίσης του πρανούς.
2. Σε πιο απότομες πλαγιές, παρόλο που η αρχική κίνηση ενός βράχου είναι η κύλιση, μετά από μικρή απόσταση, ο βράχος αρχίζει να αναπηδά και μετά είτε συνεχίζει να αναπηδά κατά μήκος του πρανούς, είτε η κίνηση γίνεται ελεύθερη πτώση, ανάλογα με την κλίση του πρανούς.

3. Οι βράχοι που πέφτουν με ελεύθερη πτώση, σπάνια δίνουν μεγάλη αναπήδηση μετά την πρόσκρουση. Αντιθέτως, γίνεται αλλαγή της μεταθετικής ταχύτητας σε γωνιακή ταχύτητα.

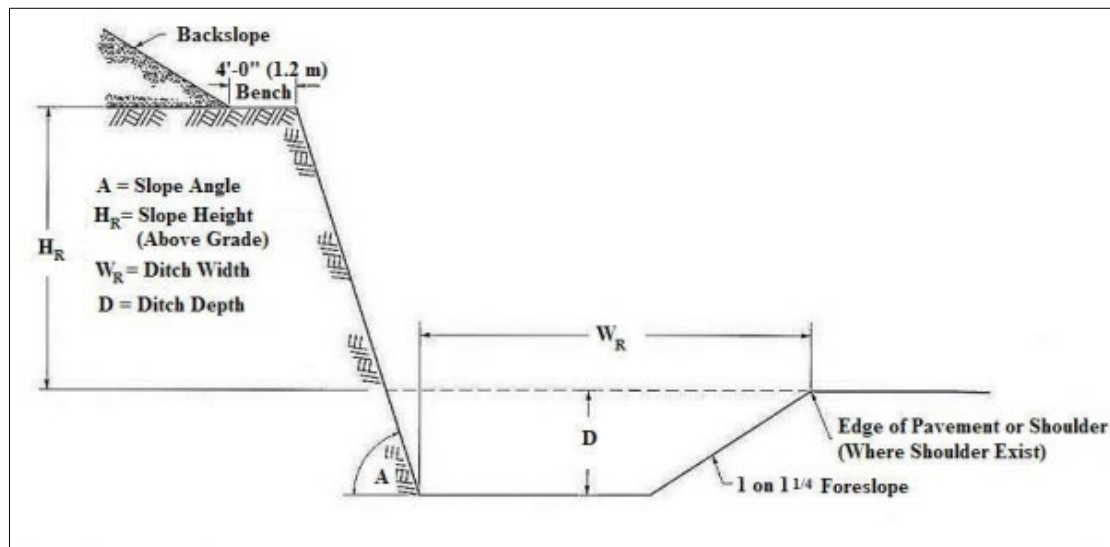
Επιπλέον, συνδυάζοντας τα παραπάνω, για την διαστασιολόγηση των τάφρων σε αυτοκινητόδρομους, ο Ritchie πρότεινε ένα διάγραμμα (Εικόνα (3.2)), που δίνει το βάθος και το πλάτος της τάφρου βάσει του ύψους και της κλίσης του πρανούς. Το διάγραμμα σχεδίασης τάφρων, βοήθησε σημαντικά τους μηχανικούς, διότι εκτός από τις διαστάσεις των τάφρων, μπορούσαν να προβούν σε αντίστροφη διαδικασία, διαμορφώνοντας την κλίση και το ύψος του πρανούς για δεδομένες διαστάσεις τάφρων.

Το διάγραμμα χρησιμοποιείται ακόμα και σήμερα από πολλές Πολιτείες των Η.Π.Α. για την διαστασιολόγηση τάφρων των αυτοκινητοδρόμων τους. Το σημαντικότερο μειονέκτημα που παρουσιάζεται, είναι πως ο Ritchie για τις δοκιμές, χρησιμοποίησε τραπεζοειδή τάφρο με μεγάλο βάθος με κλίση τοιχωμάτων 1V:1,25H που συνέδεε το άκρο της τάφρου με την αρχή του οδοστρώματος, ώστε με την μεγάλη αυτή κλίση που άγγιζε τις 40 μοίρες, να μην επιτρέπει την κύλιση των βράχων προς τα έξω. Σπάνια πλέον χρησιμοποιούνται βαθιές τάφροι και μεγάλης κλίσης τοιχώματα, διότι δεν συσχετίζονται με τους τωρινούς κανονισμούς των AASHTO και MUTCD για την ασφάλεια αυτής της ζώνης του δρόμου. Η χρήση αυτών των τάφρων, περιορίζεται μόνο σε πολύ ακραίες περιοχές επικινδυνότητας καταπτώσεων.

Σε επόμενες μελέτες που έγιναν διαπιστώθηκαν κάποιοι περιορισμοί σχετικά με την μελέτη του Ritchie, στην οποία ρίφθηκαν λίγοι βράχοι. Επίσης, όντας ο πρώτος μελετητής που ασχολήθηκε με τις τάφρους, δεν είχε κάπου να βασιστεί παρά μόνο στις παρατηρήσεις που έκανε ο ίδιος, αλλά και η έλλειψη λογισμικών και χρήση εξελιγμένων μηχανημάτων έκανε την έρευνα πιο δύσκολη. Οι περιορισμοί ήταν οι εξής:

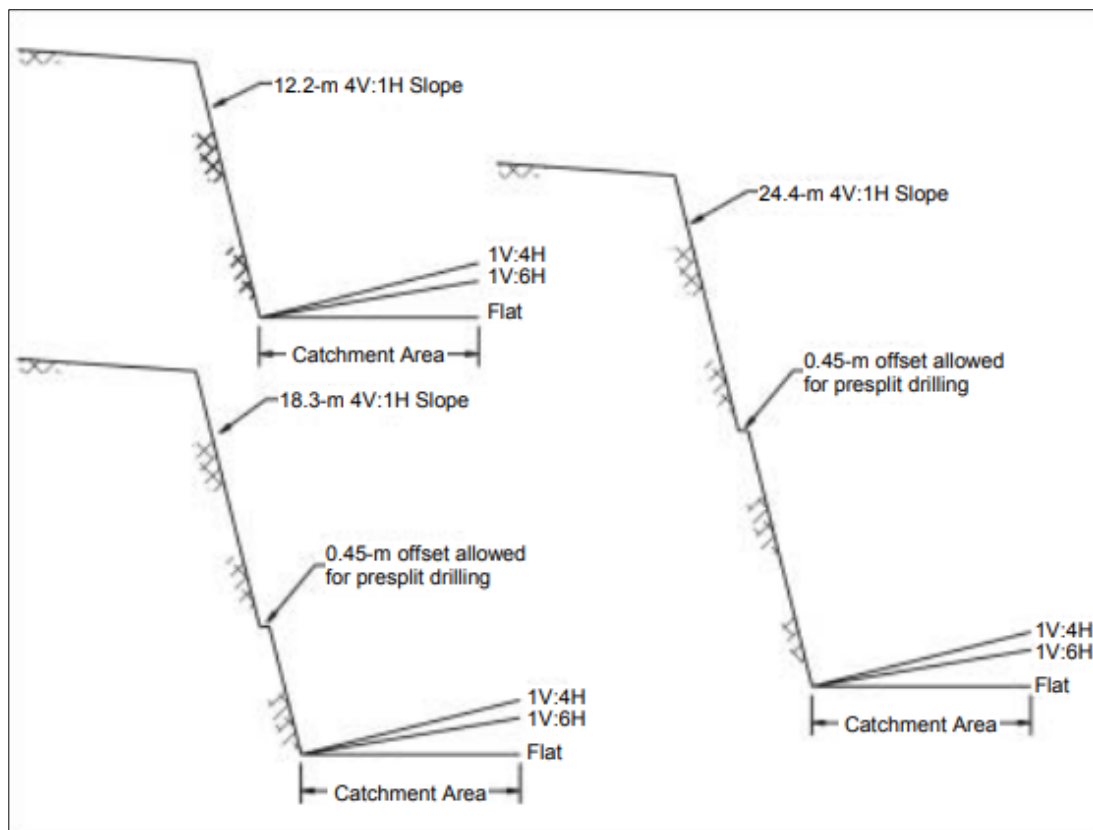
1. Το διάγραμμα του Ritchie δίνει πάντα τις ίδιες διαστάσεις τάφρου, για συγκεκριμένα ύψη και κλίσεις πρανών και δεν παρέχει μέσο σχεδιασμού για την ποσοστιαία συγκράτηση τεμαχών εντός της τάφρου και δεν υπάρχει κάποια προσέγγιση οφέλους/κόστους.
2. Ο σχεδιασμός της τάφρου του Ritchie βασίζεται στην κατασκευή μεγάλου πλάτους ώστε η αρχική πρόσκρουση του βράχου να είναι εντός της τάφρου. Ο σχεδιασμός της τάφρου αποτελείται από 0,9 – 2,4 μέτρα βάθους με επίπεδο πυθμένα και κλίσεις τοιχωμάτων 1V:1,25H, για τον περιορισμό της διαφυγής λόγω κύλισης του τεμάχους. Αυτές οι κλίσεις και τα βάθη των τάφρων, δεν συνδυάζονται με τα σύγχρονα πρότυπα ασφαλείας, επειδή η κλίση είναι πολύ μεγάλη και τυχόν αυτοκίνητα που θα πέσουν δεν θα μπορούν να βγουν. Για αυτό τον λόγο, αυτές οι τάφροι απαιτούν την κατασκευή προστατευτικού κιγκλιδώματος ή στηθαίου ασφαλείας.

3. Η μελέτη του Ritchie και οι ρίψεις των βράχων έγιναν σε τραχεία πρηνή αυτοκινητοδρόμων, λατομείων και άλλων λόφων με εμπόδια, μεταβάλλοντας έτσι τα χαρακτηριστικά της κατάπτωσης. Στους σημερινούς αυτοκινητοδρόμους, γίνεται καθαρισμός και ελεγχόμενες ανατινάξεις των πρηνών ώστε τα πρηνή να γίνουν ασφαλέστερα χωρίς εμπόδια με χαρακτηριστικά κατάπτωσης πιο ομαλά.



Εικόνα (3.6) Τυπική διατομή της τάφρου του Ritchie (dot.ny.gov)

Αργότερα, ακολούθησαν και άλλες μελέτες και αναλύσεις ώστε να διαμορφωθούν οι τάφροι σύμφωνα με τους κανόνες και τα πρότυπα ασφαλείας και να συγκριθούν με την πρώτη μελέτη του Ritchie. Μια από τις σημαντικότερες είναι η μελέτη του τμήματος μεταφορών του Όρεγκον το 1994. Αυτή περιλάμβανε την μελέτη των καταπτώσεων και της συγκράτησής τους από πρηνή κλίσης 4V:1H με 3 διαφορετικά ύψη πρηνών, 12,2m, 18,3m και 24,4m και με 3 διαφορετικές κλίσεις τάφρων, οριζόντια, με 1V:4H και 1V:6H.



Εικόνα (3.7) Χαρακτηριστικά στοιχεία της μελέτης (Oregon.gov/ODOT)

Από τότε και μέχρι σήμερα έχουν πραγματοποιηθεί πάρα πολλές μελέτες, με ρίψη βράχων διάφορων σχημάτων και όγκου, από διαφορετικά πρηνή και σε διαφορετικές τάφρους. Η εξέλιξη των υπολογιστών έδωσε μια παραπάνω ώθηση για την αντιμετώπιση των καταπτώσεων και επέτρεψε την σύγκριση μεταξύ της υπολογιστικής ανάλυσης με την ανάλυση πεδίου. Πλέον, μπορεί να πραγματοποιηθεί με μεγάλη ευκολία, εξολοκλήρου μελέτη των τάφρων και των καταπτώσεων για μια οποιαδήποτε θέση κατασκευής χωρίς την χρήση των έτοιμων διαγραμμάτων. Παρόλα αυτά τα διαγράμματα έχουν μεγάλη αξιοπιστία και μπορεί να γίνεται σύγκριση των διαφόρων μελετών με τα ήδη υπάρχοντα διαγράμματα για καλύτερο αποτέλεσμα. Τέλος, είναι πολύ σημαντικό να επιλέγεται ποσοστό συγκράτησης βράχων στην τάφρο, όπου ανάλογα το ποσοστό που θέλουμε να συγκρατηθεί διαστασιολογούμε με γνώμονα το οικονομικό κριτήριο.



Εικόνα (3.8) Επιτόπου δοκιμές κατάπτωσης βράχων (Oregon.gov/ODOT)



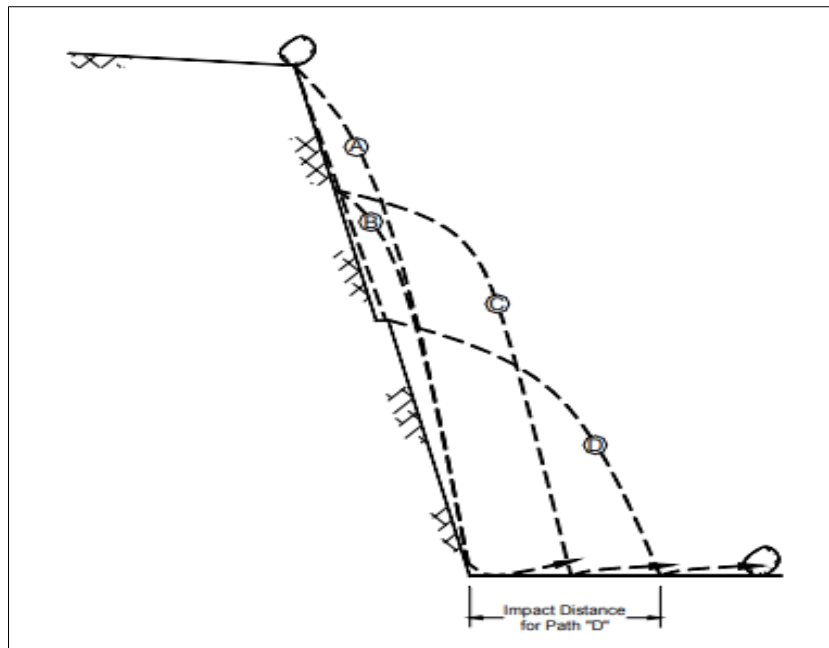
Εικόνα (3.10) Τέμαχος συγκρατημένο σε τάφρο (Μαλακάσα) (Προσωπικό αρχείο)



Εικόνα (3.9) Τέμαχος συγκρατημένο σε τάφρο (Μαλακάσα) (Προσωπικό αρχείο)

3.4 Απόσταση πρόσκρουσης

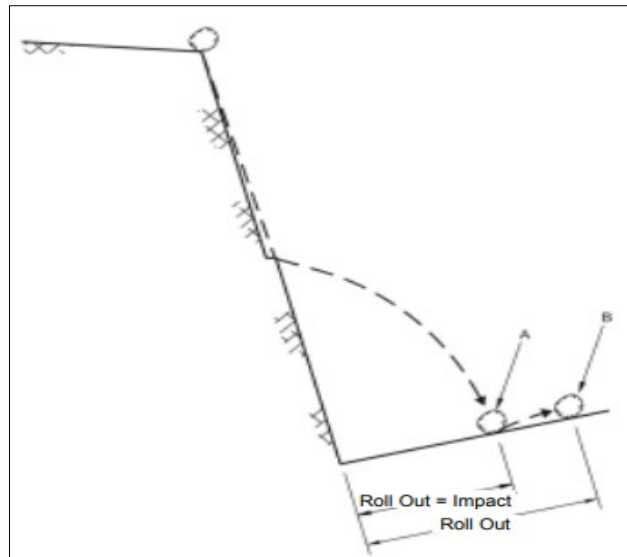
Η απόσταση πρόσκρουσης, είναι η απόσταση από τον πόδα του πρανούς μέχρι το σημείο όπου θα προσκρούσει πρώτη φορά ένας βράχος. Εξαρτάται από το ύψος και την κλίση του πρανούς και την αλληλεπίδραση του τεμάχους με την επιφάνεια του πρανούς. Η κλίση της τάφρου δεν παίζει κάποιο ρόλο στην απόσταση πρόσκρουσης αλλά συμβάλει στο πως θα εξελιχθεί η κίνησή του τεμάχους μετά την πρώτη πρόσκρουση. Η κλίση της τάφρου βοηθάει, ώστε μετά την πρόσκρουση, το τεμάχος να αναπηδήσει προς την πλευρά του πρανούς, ενώ σε επίπεδη τάφρο το τεμάχος θα αναπηδήσει προς το οδόστρωμα.



Εικόνα (3.11) Διάφορες περιπτώσεις κατάπτωσης με διαφορετικές αποστάσεις πρόσκρουσης (oregon.gov/ODOT)

3.5 Απόσταση Κύλισης

Μετά την πρόσκρουση, ένα τεμάχος έχει την πιθανότητα να κυλίσει εντός της τάφρου. Η απόσταση που θα διανύσει το τεμάχος μέχρι το σημείο που θα σταματήσει ονομάζεται απόσταση κύλισης. Επηρεάζεται σημαντικά από την κλίση της τάφρου όπου όσο μεγαλύτερη κλίση έχει τόσο μικρότερη θα είναι η απόσταση κύλισης.



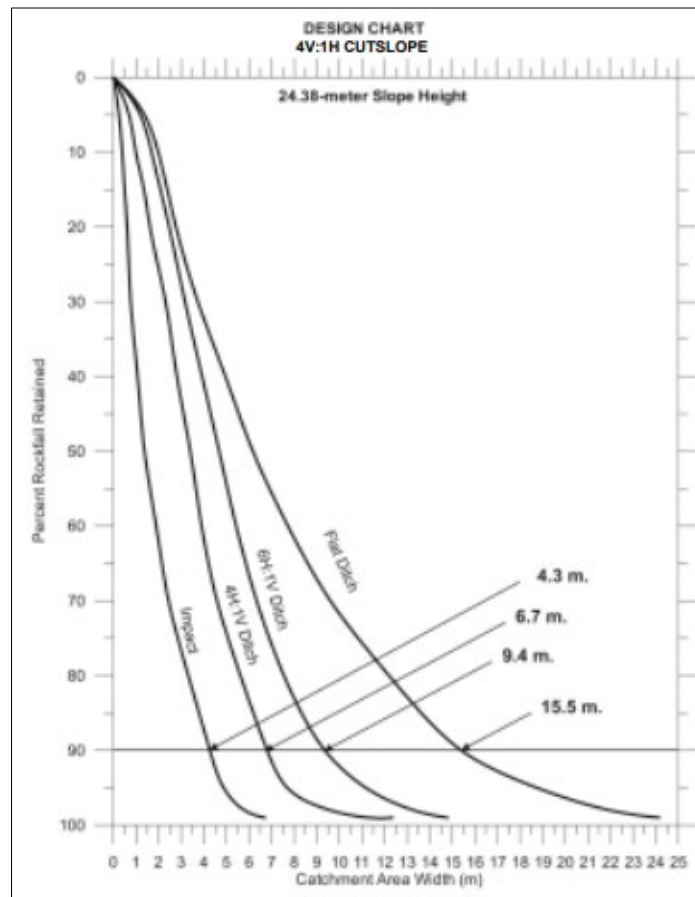
Εικόνα (3.12) Απόσταση κύλισης (oregon.gov/ODOT)

Προκύπτουν δύο περιπτώσεις:

1. Ο βράχος μετά την πτώση, δεν κινείται πέρα από το σημείο πρόσκρουσης. Σε αυτή την περίπτωση η απόσταση κύλισης είναι ίση με την απόσταση πρόσκρουσης. Αυτή η περίπτωση, περιλαμβάνει και την περίπτωση όπου οι βράχοι θα κυλίσουν προς τα πίσω στον πόδα του πρανούς από το σημείο πρόσκρουσης. (Περίπτωση A (Εικόνα (3.12))
2. Ο βράχος μετά την πτώση, κυλάει προς την πλευρά του οδοστρώματος, έχοντας διανύσει μια μέγιστη απόσταση ίση με την απόσταση πρόσκρουσης και την απόσταση κύλισης. Σε αυτήν την περίπτωση, η απόσταση κύλισης είναι μεγαλύτερη από την απόσταση πρόσκρουσης. (Περίπτωση B (Εικόνα (3.12))

3.6 Διαδικασία σχεδιασμού με τη μέθοδο ODOT

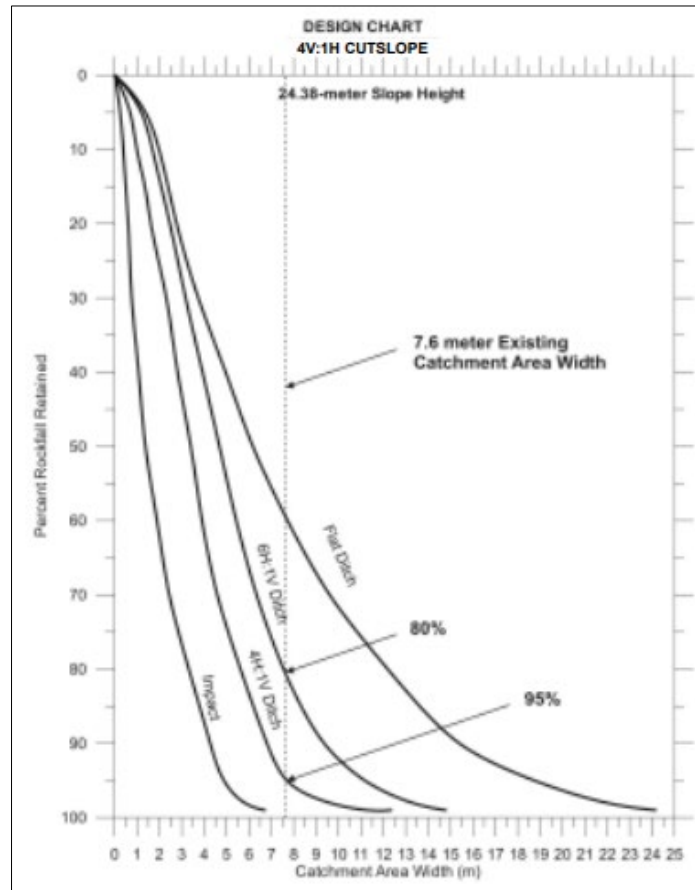
Παρακάτω, γίνεται ανάλυση και περιγραφή της κατασκευής νέας τάφρου σε τμήμα οδικού δικτύου και η αξιολόγηση και ανακατασκευή υφιστάμενης. Πρώτα, γίνεται μια συνολική αξιολόγηση του πρανούς και υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας για τον έλεγχο της συνολικής ευστάθειας του πρανούς και διάφορων ευαίσθητων τεμαχών. Μετά τον έλεγχο, επιλέγονται διατομές σε όλο το μήκος μελέτης, οι οποίες είναι επικίνδυνες για την εκδήλωση κατάπτωσης. Στην συνέχεια, επιλέγεται από διαγράμματα, το ύψος του πρανούς και η κλίση του για την επιλογή διαστάσεων της τάφρου με βάση το ποσοστό τεμαχών που θέλουμε να συγκρατήσει η τάφρος. Τέλος, αφού ολοκληρωθεί η κατασκευή της, γίνεται έλεγχος με την ελεγχόμενη ρίψη τεμαχών ώστε να διαπιστωθεί η επάρκεια της τάφρου και αν το ποσοστό συγκράτησης είναι κοντά σε αυτό που επιλέχθηκε.



Εικόνα (3.13) Διάγραμμα διαστασιολόγησης τάφρου (oregon.gov/ODOT)

Στην Εικόνα (3.13) φαίνεται ένα διάγραμμα υπολογισμού διαστάσεων τάφρου που προέκυψε από υπολογιστικές μελέτες από το τμήμα μεταφορών του Όρεγκον. Η επιλογή του διαγράμματος είναι τυχαία ώστε να μπορεί να γίνει διαγραμματική επεξήγηση των όρων που το συνθέτουν. Η συγκεκριμένη περίπτωση αναφέρεται σε πρανές με ύψος 24,4 μέτρα και κλίση 4V:1H. Στον κατακόρυφο άξονα γίνεται η επιλογή του ποσοστού συγκράτησης όπου πρακτικά κυμαίνεται από το 1% έως το 99%. Στον οριζόντιο άξονα επιλέγεται η τιμή του πλάτους της τάφρου. Οι τέσσερις καμπύλες, είναι οι οδηγίες που θα διαστασιολογήσουν την τάφρο. Επιλέγοντας αρχικά το ποσοστό συγκράτησης που μας ενδιαφέρει, προχωράμε δεξιά μέχρι η ευθεία να τμήσει τις τέσσερις καμπύλες. Από κάθε σημείο τομής, συνεχίζουμε προς τα κάτω, από όπου επιλέγεται το κατάλληλο μήκος τάφρου. Οι τέσσερις καμπύλες αποτελούνται από την πρώτη που είναι η καμπύλη απόστασης πρόσκρουσης, την δεύτερη που είναι για κλίση τάφρου 1V:4H, η τρίτη που είναι για κλίση τάφρου 1V:6H, και η τέταρτη που είναι για οριζόντια τάφρο. Για 90% συγκράτηση τα μήκη των τάφρων και η απόσταση πρόσκρουσης, φαίνονται στην Εικόνα (3.13).

Στην περίπτωση ήδη υπάρχουσας τάφρου για τον έλεγχο της επάρκειάς της γίνεται αντίστροφη ανάλυση. Μετριέται στο πεδίο το μήκος της τάφρου, η κλίση και το ύψος του πρανούς. Ανάλογα με την κλίση της τάφρου ελέγχεται το ποσοστό συγκράτησης των βράχων. Για μετρούμενο μήκος τάφρου 7,6m, και τα ίδια χαρακτηριστικά πρανούς με το προηγούμενο παράδειγμα, το ποσοστό συγκράτησης για τάφρο με κλίση 1V:4H είναι 95% ενώ για τάφρο 1V:6H το ποσοστό είναι 80%.



Εικόνα (3.14) Έλεγχος απόδοσης τάφρου ανάσχεσης (oregon.gov/ODOT)

Η ίδια διαδικασία για την διαστασιολόγηση καινούργιας ή τον έλεγχο επάρκειας υπάρχουσας, μπορεί να γίνει και με άλλα διαγράμματα που έχουν θεσπιστεί, είτε από μετρήσεις πεδίου είτε με την χρήση λογισμικού.

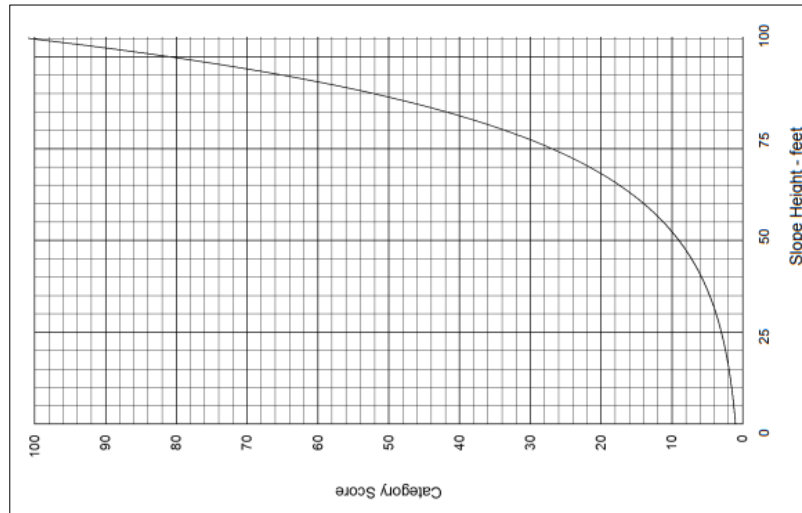
3.7 Σύστημα αξιολόγησης κινδύνου καταπτώσεων

Η κατασκευή μεγάλων αυτοκινητόδρομων και σιδηροδρομικών γραμμών σε έντονα ανάγλυφα οδήγησε στην ανάγκη μεγαλύτερης ανάλυσης ώστε να υπάρχει γνώση των καταπτώσεων οι οποίες επηρεάζουν την ασφάλεια του έργου και των ανθρώπων. Κυρίως στα δύο παραπάνω έργα, λόγω του μεγάλου μήκους τους που διαπερνάει τα πρανή, κάνει την γεωτεχνική μελέτη σχεδόν ακατόρθωτη για όλη την περιοχή. Για αυτόν τον λόγο, έγινε προσπάθεια από γεωλόγους και γεωτεχνικούς, για την κατάταξη των καταπτώσεων και την ποιοτική περιγραφή τους. Το γνωστότερο και πλέον χρησιμοποιούμενο σύστημα, είναι το σύστημα αξιολόγησης κινδύνου καταπτώσεων που αναπτύχθηκε από το τμήμα αυτοκινητοδρόμων του Όρεγκον. Το συγκεκριμένο σύστημα, θέτει κάποια χαρακτηριστικά του πρανούς και των αυτοκινητοδρόμων μαζί με βαθμολόγηση με βάση κάποια κριτήρια.

CATEGORY		RATING CRITERIA AND SCORE				
		POINTS 3	POINTS 9	POINTS 27	POINTS 81	
SLOPE HEIGHT		25 FT	50 FT	75 FT	100 FT	
DITCH EFFECTIVENESS		Good catchment	Moderate catchment	Limited catchment	No catchment	
AVERAGE VEHICLE RISK		25% of the time	50% of the time	75% of the time	100% of the time	
PERCENT OF DECISION SIGHT DISTANCE		Adequate site distance, 100% of low design value	Moderate sight distance, 80% of low design value	Limited site distance, 60% of low design value	Very limited sight distance, 40% of low design value	
ROADWAY WIDTH INCLUDING PAVED SHOULDERS		44 feet	36 feet	28 feet	20 feet	
GEOLOGIC CHARACTER	CASE 1	STRUCTURAL CONDITION	Discontinuous joints, favorable orientation	Discontinuous joints, random orientation	Discontinuous joints, adverse orientation	Continuous joints, adverse orientation
		ROCK FRICTION	Rough, irregular	Undulating	Planar	Clay infilling or slickensided
	CASE 2	STRUCTURAL CONDITION	Few differential erosion features	Occasional erosion features	Many erosion features	Major erosion features
		DIFFERENCE IN EROSION RATES	Small difference	Moderate difference	Large difference	Extreme difference
BLOCK SIZE		1 FT	2 FT	3 FT	4 FT	
QUANTITY OF ROCKFALL/EVENT		3 cubic yards	6 cubic yards	9 cubic yards	12 cubic yards	
CLIMATE AND PRESENCE OF WATER ON SLOPE		Low to moderate precipitation; no freezing periods, no water on slope	Moderate precipitation or short freezing periods or intermittent water on slope	High precipitation or long freezing periods or continual water on slope	High precipitation and long freezing periods or continual water on slope and long freezing periods	
ROCKFALL HISTORY		Few falls	Occasional falls	Many falls	Constant falls	

Εικόνα (3.15) Σύστημα αξιολόγησης κινδύνου καταπτώσεων (R.H.R.S)

- **Ύψος πρανούς.** Πρόκειται για την κατακόρυφη απόσταση από τον πόδα μέχρι το ανώτατο σημείο μιας πλαγιάς. Όσο μεγαλύτερο ύψος έχει ένα πρανές, τόσο πιο μεγάλη κινητική ενέργεια θα έχει αποκτήσει ένα τεμάχος όταν θα φτάσει σε χαμηλά σημεία, με αποτέλεσμα να εκτοξευτεί σε μεγαλύτερες αποστάσεις και να μην συγκρατηθεί από κάποιο έργο ανάσχεσης.



Εικόνα (3.16) Βαθμοί συναρτήσεως ύψους πρανούς (R.H.R.S) (rocscience.com)

- **Αποτελεσματικότητα τάφρου.** Η αποτελεσματικότητα της τάφρου μετρείται με την ικανότητά της να συγκρατεί τα τεμάχη, εμποδίζοντάς τα να φτάσουν στο δρόμο. Αυτό εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του πρανούς και τις διαστάσεις της τάφρου. Κατατάσσεται σε 4 κατηγορίες με βάση την (Εικόνα (#)). Καλή συγκράτηση. Όλα ή σχεδόν όλα τα τεμάχη, συγκρατούνται από την τάφρο. Μέτρια συγκράτηση. Τα περισσότερα τεμάχη συγκρατούνται, ενώ λίγες φορές, καταλήγουν στο οδόστρωμα. Περιορισμένη συγκράτηση. Τα τεμάχη που αστοχούν καταλήγουν συχνά στο οδόστρωμα. Χωρίς συγκράτηση. Δεν υπάρχει τάφρος ή, αν υπάρχει είναι αναποτελεσματική καθώς δεν συγκρατεί σχεδόν τίποτα.
- **Κίνδυνος λόγω οχήματος.** Ο κίνδυνος λόγω οχήματος αναφέρεται στην πιθανότητα να βρίσκεται ένα όχημα στην επικίνδυνη ζώνη καταπτώσεων για κάποιο χρονικό διάστημα. Το ποσοστό υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση.

$$AVR = \left[\frac{ADT \left(\frac{cars}{hour} \right) * slope\ length\ (miles)}{Posted\ speed\ limit\ (mph)} \right] * 100\% \quad (Εξ. 3.1)$$

Όπου:

1. **ADT:** ((Average Daily Traffic) (cars/hour)). Μέση ημερήσια κυκλοφορία.
 2. **Slope length:** Μήκος της ζώνης μελέτης του πρανούς.
 3. **Posted speed limit:** Το όριο ταχύτητας του οδικού δικτύου.
- **Ποσοστιαία απόφαση απόστασης όρασης.** Χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του μήκους του δρόμου (σε πόδια) που ο οδηγός θα πρέπει να λάβει απόφαση για την επιβράδυνση του οχήματός του ή για την αποφυγή εμποδίων από τις καταπτώσεις. Η απόσταση αυτή καθορίζει την αντίδραση του οδηγού από την στιγμή που θα αντιληφθεί το εμπόδιο μέχρι την στιγμή που θα ακινητοποιήσει το όχημα ή που θα χρειαστεί για να το αποφύγει. Το ποσοστό, υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση.

$$DSD = \left[\frac{(\text{Πραγματική απόσταση})}{\text{Απόσταση απόφασης}} \right] * 100\% \quad (\text{Εξ. 3.2})$$

- **Πλάτος οδοστρώματος.** Η απόσταση από το ένα άκρο του οδοστρώματος στο άλλο. Μεγαλύτερο πλάτος οδοστρώματος, δίνει και μεγαλύτερο χώρο για ελιγμούς για την αποφυγή εμποδίων.
- **Γεωλογικός χαρακτήρας.** Αφορά όλες τις γεωλογικές παραμέτρους που προκαλούν τις καταπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση περιγράφονται οι ασυνέχειες που υπάρχουν μεταξύ των τεμαχών και αφορούν στην ιδανικότερη περίπτωση όπου ο προσανατολισμός είναι ευμενής με αυξημένη την τραχύτητα έως την χειρότερη περίπτωση όπου ο προσανατολισμός είναι δυσμενής και η επιφάνεια της ασυνέχειας είναι λεία. Στην δεύτερη περίπτωση, περιγράφεται η επίδραση της αποσάθρωσης και της διάβρωσης.
- **Μέγεθος τεμαχών ή ποσότητα καταπτώσεων ανά συμβάν.** Αυτή η περίπτωση αφορά πρώτα στον έλεγχο του είδους των υλικών κατάπτωσης. Στην περίπτωση που η αστοχία είναι ενός μεμονωμένου τεμαχούς τότε η μέτρηση γίνεται με το μέγεθος τεμαχών. Αν πάλι εκτός από το τέμαχος καταπέφτει και άλλο υλικό, τότε η μέτρηση γίνεται με βάση την ποσότητα των καταπτώσεων. Μπορεί εύκολα να αποτυπωθεί από παλαιότερα συμβάντα.

- **Κλίμα και παρουσία νερού.** Η παρουσία του νερού σε συνεργασία με το κλίμα επηρεάζει σημαντικά την ευστάθεια των τεμαχών. Εκτός του ότι το νερό ασκεί υδροστατικές δυνάμεις μέσα στα κενά των ασυνεχειών, το σύστημα ταξινόμησης δίνει και μια περιγραφή σχετικά με την επίδραση του παγετού. Το νερό όταν παγώνει διογκώνεται με αποτέλεσμα την άσκηση μεγάλων πιέσεων. Η δυσμενέστερη περίπτωση περιλαμβάνει τον συνδυασμό των παραπάνω σε μεγάλες ποσότητες για μεγάλο χρονικό διάστημα.
- **Προϊστορία καταπτώσεων.** Πρόκειται για την καταμέτρηση όλων των περιστατικών των καταπτώσεων που έχουν συμβεί στην περιοχή που εκτείνεται ο δρόμος.

Όλα τα παραπάνω και με την κατάλληλη πληροφόρηση πεδίου, δίνουν μια βαθμολογία για το πρανές, για τον δρόμο και την κυκλοφορία, όσο μεγαλύτερη η βαθμολογία που συγκεντρώνεται από τις παραμέτρους, τόσο πιο επικίνδυνο είναι το πρανές. Η βαθμολόγηση είναι πολύ σημαντική για την αποφυγή άσχημων καταστάσεων όπως καταστροφή σε έργα υποδομής και περιουσίες ή ακόμα και απώλειες ανθρώπων. Είναι μια πολύ καλή πρώτη προσέγγιση για την αναγνώριση της περιοχής, αλλά απαιτούνται και λεπτομερέστερες μελέτες.



Εικόνα (3.17) Πρανές επιρρεπές σε καταπτώσεις (Μαλακάσα) (Προσωπικό αρχείο)

3.8 Ελληνικοί κανονισμοί

Σε αυτή την ενότητα, γίνεται αναφορά στις Ελληνικές διατάξεις για τις τάφρους ανάσχεσης καταπτώσεων ή βραχοπαγίδες. Οι δύο κύριοι Ελληνικοί κανονισμοί για τις βραχοπαγίδες είναι ο ΟΜΟΕ και ο ΚΜΕ.

3.8.1 Κανονισμός Μελετών Ερευνών (ΚΜΕ)

Το παρακάτω κείμενο, λαμβάνεται από (Κανονισμός Μελετών Ερευνών, Υποκεφάλαιο 1.7 Γεωμετρικός σχεδιασμός – Πρανή Ορυγμάτων / Επιχωμάτων Έκδοση 28.2.96).

Κατά γενικό κανόνα (με εξαίρεση ειδικές περιπτώσεις) θα πρέπει να εφαρμόζονται στα έργα κλίσεις πρανών ορυγμάτων και επιχωμάτων όσο το δυνατόν περισσότερο ήπιες, το οποίο θα προσφέρει θετικά αποτέλεσμα :

- Στην μεγαλύτερη ευστάθεια των πρανών.
- Στην καλύτερη περιβαλλοντική ένταξη των έργων στο τοπίο.
- Στην ευχερέστερη εργασία φύτευσης των πρανών και συντήρησης του πράσινου.

Πίνακας (3.1) Μέγιστες κλίσεις ορυγμάτων (ΚΜΕ)

ΠΡΑΝΗ ΟΡΥΓΜΑΤΩΝ			
ΓΑΙΩΗΜΙΒΡΑΧΩΔΗ		ΒΡΑΧΩΔΗ	
Ύψος H (m)	Μέγιστη κλίση h: b	Ύψος H (m)	Μέγιστη κλίση h: b
H ≤ 10,0	1 : 1,5 (1 : 1)	H ≤ 5,0	1 : 1 (2 : 1)
H > 10,0	1 : 1	H > 5,0	3 : 1

- Για πρανή ορυγμάτων ύψους μεγαλύτερου των 10 μέτρων τότε απαιτείται μελέτη ευστάθειας πρανών ορύγματος.
- Επίσης απαιτείται και η σύνταξη μελέτης ευστάθειας πρανών όταν το ύψος είναι μικρότερο των 5 μέτρων, εάν οι γεωτεχνικές συνθήκες το απαιτούν, ασταθής μάζες, παρουσία υδροφόρου ορίζοντα.

- Για πρανή ορυγμάτων με κλίση $h : b \geq 1 : 1$ και για ύψος $H > 5$ m θα πρέπει να διαμορφώνεται στη στάθμη του καταστρώματος τάφρος ανάσχεσης καταπτώσεων για την παγίδευση και συλλογή των προϊόντων καταπτώσεων από την αποκόλληση και κατάπτωση μεμονωμένων λίθων από την επιφάνεια του πρανού. Τις περισσότερες φορές, οι τάφροι συνδυάζονται και με τοίχο ανάσχεσης καταπτώσεων.
- Το πλάτος της τάφρου αναχαίτισης καταπτώσεων και στοιχεία του τοίχου αναχαίτισης σε οδικά έργα δείχνονται στην (Εικόνα(3.18)) για διάφορα ύψη και κλίσεις πρανών. Η διαμόρφωση έχει γίνει με την προϋπόθεση ότι θα κατασκευασθεί τοίχος αναχαίτισης καταπτώσεων, που θα συμπληρώσει το έργο της τάφρου αναχαίτισης καταπτώσεων. Με την διαμόρφωση του έργου τάφρου – τοίχου, δεν απαιτείται εκβάθυνση της τάφρου που θα χρειαζόταν αν δεν υπήρχε ο τοίχος. Εναλλακτικά, είναι δυνατόν σε ορισμένες μόνο περιπτώσεις να γίνεται διαμόρφωση των οδικών έργων, με εκβάθυνση της τάφρου, οπότε δεν θα απαιτείται η κατασκευή τοίχου.
- Η κατασκευή των έργων ανάσχεσης καταπτώσεων, συναρτάται κυρίως με το ύψος του πρανού και την κλίση αυτού και δευτερευόντως με την ποιότητα της βραχώμαζας, αφού είναι δυνατόν, μια βραχομάζα καλής ποιότητας να διαταραχθεί έντονα κατά τη διενέργεια των εκσκαφών διαμόρφωσης, ή κακής μεθοδολογίας εξόρυξη. Τότε, στην τελευταία περίπτωση, αν τυχόν δεν είχε προβλεφθεί η εκτέλεση των σχετικών εκσκαφών για την κατασκευή της τάφρου αναχαίτισης καταπτώσεων, η διαπίστωση της ανάγκης εφαρμογής της κατά την κατασκευή, όταν θα είχε ήδη διαμορφωθεί ένα πρανές μεγάλου ύψους, θα ήταν πρακτικά αδύνατη, ή εξαιρετικά δαπανηρή να πραγματοποιηθεί.
- Ο τοίχος αναχαίτισης θα πρέπει να υπολογίζεται για να αναλάβει φορτία καταπτώσεων μέχρι το πλήρες ύψος του και με γωνία υλικών καταπτώσεων πίσω από αυτόν ίση προς τη γωνία φυσικού πρανού. Για την περίπτωση κατακερματισμού του πετρώματος σε βαθμό τέτοιο που να παρουσιάζεται πιθανότητα κατάπτωσης μεγάλων όγκων πετρώματος, τότε θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η δυναμική ενέργεια από την πρόσκρουση στον τοίχο αναχαίτισης και είτε να γίνεται κατάλληλη δομική διαμόρφωση αυτού με κατάλληλη μεγάλη παραμορφωσιμότητα, ώστε να απορροφά την ενέργεια πρόσκρουσης, είτε να μην κατασκευάζεται τοίχος αναχαίτισης και να γίνεται κατάλληλη εκβάθυνση της τάφρου.
- Σημειώνεται ότι η τάφρος αναχαίτισης καταπτώσεων λειτουργεί και σαν έργο συλλογής και απαγωγής των όμβριων υδάτων από τις εξωτερικές λεκάνες και γι' αυτό θα πρέπει να γίνεται κατάλληλη διαμόρφωση έργων απαγωγής των όμβριων.

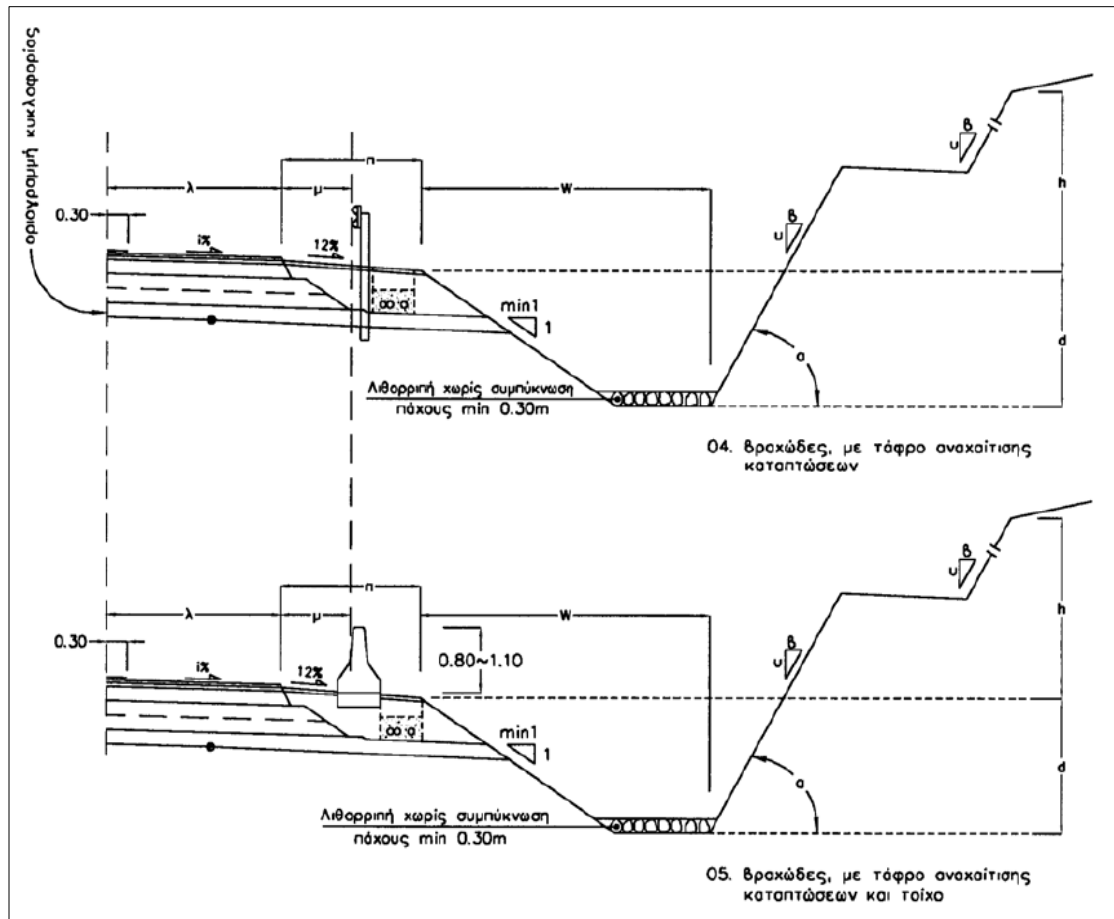
3.8.2 Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων (ΟΜΟΕ)

Ο ΟΜΟΕ – Δ, δίνει έναν πίνακα για τις διαστάσεις της τάφρου ανάσχεσης και 2 διατομές.

Πίνακας (3.2) Διαστάσεις τάφρου ανάσχεσης καταπτώσεων βραχωδών ορυγμάτων (ΟΜΟΕ – Δ)

Κλίση πρανούς ορύγματος (α)°	Ύψος ορύγματος h (m)	Πλάτος τάφρου ανάσχεσης W (m)	Βάθος τάφρου ανάσχεσης d (m)
1	2	3	4
$\geq 5,7:1$ (80-90) °	5-10	3	1
	10-20	5	1,5
	>20	6,5	1,5
3,7:1 (75)°	5-10	3	1
	10-20	5	1,5
	20-35	6,5	2 (*)
	>35	8	2 (*)
2:1 (65)°	5-10	3	1,5
	10-20	5	2
	20-35	6,5	2 (*)
	>35	8	3 (*)
1,4:1 (55)°	0-10	3	1
	10-20	5	1,5
	>35	5	2 (*)
1:1 (45)°	0-10	3	1
	10-20	3	1,5
	>20	5	2 (*)

(*) Επιτρέπεται η μείωση του βάθους της τάφρου σε 1,5 m εφόσον κατασκευαστεί τοιχίο με ελάχιστο ύψος που θα συμπληρώνει το απαιτούμενο βάθος d.



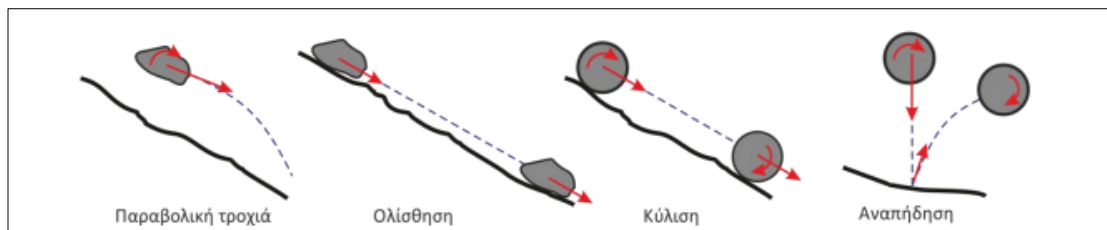
Εικόνα (3.19) Τυπικές διατομές τάφρου ανάσχεσης, με μεταλλικό στηθαίο και με στηθαίο NJ (ΟΜΟΕ-Δ)

Πέρα από τους παραπάνω πίνακες κρίνεται σκόπιμο πολλές φορές η ανάλυση με την χρήση λογισμικού για την καλύτερη τεχνικοοικονομική κατασκευή. Όταν δεν μπορεί να γίνει η κατασκευή τάφρου για κάποιους λόγους, χρησιμοποιούνται άλλες μέθοδοι για την προστασία από τις καταπτώσεις, όπως είναι τα αγκύρια, τα πλέγματα και οι μεταλλικοί φράχτες.

Κεφάλαιο 4

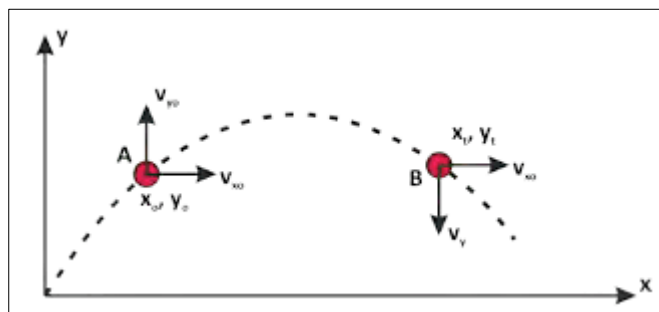
4.1 Ανάλυση φαινομένου – Εξισώσεις κίνησης

Οι καταπτώσεις βράχων συμβαίνουν όταν αποκόλλεται ένα τμήμα από ένα πρανές, όπου με την δύναμη της βαρύτητας μετατοπίζεται προς τα κάτω μέχρι να ισορροπήσει σε ένα νέο σημείο. Η τροχιά που διαγράφει το τμήμα πριν φτάσει στην τελική θέση είναι ανάλογη της κλίσης του πρανού, της ταχύτητας κίνησης του τμήματος, των παραμέτρων αναπήδησης και του ύψους του πρανού. Η συνολική κίνηση περιλαμβάνει ολισθήσεις των τεμαχίων, κυλίσεις και αναπήδησεις. Μετά από την αναπήδηση το τμήμα διαγράφει παραβολική τροχιά μέχρι τελικώς να ισορροπήσει σε μία νέα θέση η οποία μπορεί να είναι σε κάποιο σημείο του πρανού ή στον πόδα του.

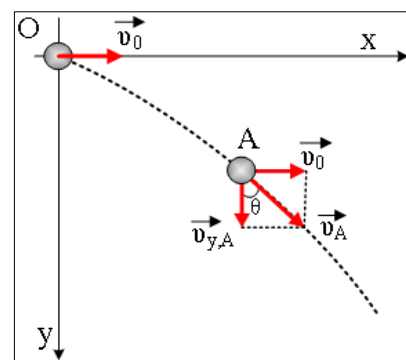


Εικόνα (4.1) Είδη κίνησης τεμαχίου πάνω στο πρανές μετά την αποκόλλησή του (Αστερίου, 2016)

4.1.1 Παραβολική τροχιά



Εικόνα (4.3) Παραβολική κίνηση (Αστερίου, 2016)



Εικόνα (4.2) Παραβολική κίνηση (physiclessons.blogspot.com)

Η παραβολική κίνηση είναι η κίνηση που διαγράφει το τμήμα μετά την αναπήδησή του και γενικώς όταν βρίσκεται στον αέρα. Θεωρώντας ως αντιπροσωπευτικό σημείο το κέντρο βάρους του τεμαχίου, αναλύεται η τροχιά με βάση τις εξισώσεις κίνησης σε δύο διαστάσεις.

$$X = X_0 + V_{x0}t \quad (\text{Εξ. 4.1})$$

$$Y = Y_0 + V_{y0}t + \frac{1}{2}gt^2 \quad (\text{Εξ. 4.2})$$

Όπου:

- X, Y : Η θέση που θα βρίσκεται το τεμάχος μετά την αποκόλληση, οποιαδήποτε χρονική στιγμή (t).
- X_0, Y_0 : Η αρχική θέση του τεμάχους, όπου συμβαίνει η αποκόλληση.
- V_{x0}, V_{y0} : Η αρχική οριζόντια και κατακόρυφη ταχύτητα αντίστοιχα που αποκολλάται το τεμάχος.
- g : Η δύναμη της βαρύτητας $9,81 \text{ m*s}^{-1}$

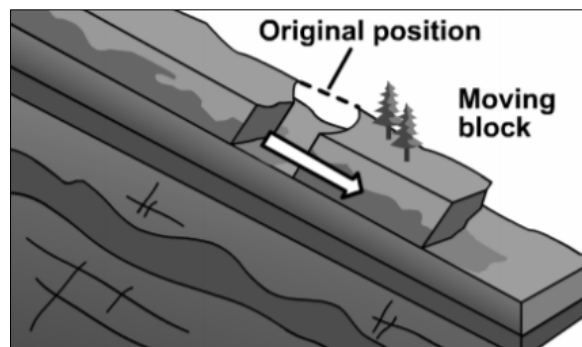
Η κίνηση κατά τον άξονα X είναι ευθύγραμμη ομαλή κίνηση, ενώ στον άξονα Y είναι ευθύγραμμη ομαλά επιταχυνόμενη κίνηση. Κατά την επιταχυνόμενη κίνηση στον κατακόρυφο άξονα μπορεί να οριστεί η ταχύτητα του τεμάχους οποιαδήποτε χρονική στιγμή από την παρακάτω σχέση.

$$V_Y = V_{y0} + at \quad (\text{Εξ. 4.3})$$

Αντίστοιχα για τον οριζόντιο άξονα που η κίνηση είναι ευθύγραμμη ομαλή η ταχύτητα οποιαδήποτε χρονική στιγμή θα είναι ίση με την αρχική ταχύτητα.

$$V_x = V_{x0} \quad (\text{Εξ. 4.4})$$

4.1.2 Ολίσθηση



Εικόνα (4.4) Ολίσθηση τεμάχους (researchgate.net)

Η ολίσθηση είναι είδος κίνησης κατά το οποίο ένα τεμάχος μετά την αποκόλλησή του βρίσκεται σε επαφή με το πρηνές και ολισθαίνει πάνω του. Η ολίσθηση συμβαίνει κυρίως σε πρηνή με ήπιες έως μεσαίες κλίσεις και σε τεμάχη με μεγαλύτερη την επιφάνεια που είναι σε επαφή με το πρηνές σε σχέση με το ύψος του. Τεμάχη σφαιρικά και ακανόνιστου σχήματος ολισθαίνουν σε πρηνή με αρκετά ήπιες κλίσεις. Η δύναμη που αναπτύσσεται στο τεμάχος εξαιτίας της τριβής εξαρτάται από την κλίση του πρηνούς του συντελεστή τριβής και της μάζας του τεμάχους. Είναι δύναμη που αντιστέκεται στην κίνηση μειώνοντας έτσι την ταχύτητα του.

$$F_{friction} = \mu mg \cos(\theta) \tag{Εξ. 4.5}$$

Όπου:

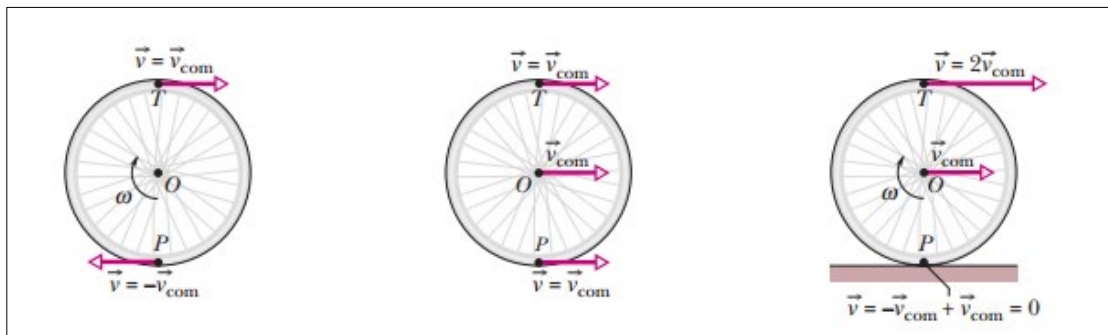
μ : Συντελεστής τριβής που εξαρτάται από τα υλικά του πρανού και του τεμάχου.

m : Μάζα του τεμάχου.

θ : Γωνία πρανού.

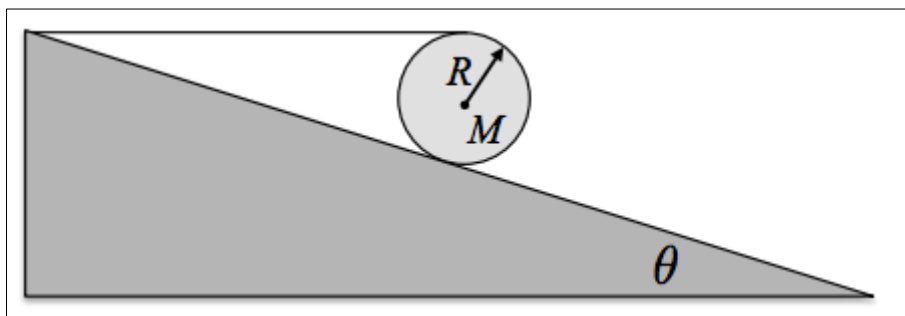
4.1.3 Κύλιση

Η κύλιση είναι είδος κίνησης κατά το οποίο ένα τέμαχος περιστρέφεται γύρω από έναν σταθερό άξονα και ταυτόχρονα πραγματοποιείται και μεταφορική κίνησή του.



Εικόνα (4.5) Περιστροφική κίνηση, μεταφορική κίνηση και συνδυασμός τους, κύλιση (physics.stackexchange.com)

Στα πρανή, η κύλιση πραγματοποιείται σε κεκλιμένο επίπεδο, επομένως λόγω της δύναμης της βαρύτητας η κύλιση θα είναι επιταχυνόμενη.



Εικόνα (4.6) Κύλιση σε κεκλιμένο επίπεδο (physics.stackexchange.com)

Όπως στην ευθύγραμμη κίνηση, έτσι και στην περιστροφική μπορούν να οριστούν οι βασικές εξισώσεις περιστροφικής κίνησης σε δύο διαστάσεις. Θεωρώντας το τέμαχος σαν ένα κυκλικό σώμα, ορίζονται οι παρακάτω εξισώσεις.

$$\omega = \omega_0 + at \tag{Εξ. 4.6}$$

$$\theta = \theta_0 + \omega_0 t + \frac{1}{2} at^2 \tag{Εξ. 4.7}$$

Όπου:

- ω, θ : Η γωνιακή ταχύτητα και η γωνιακή συντεταγμένη σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή (t).
- ω_0, θ_0 : Η αρχική γωνιακή ταχύτητα και η αρχική γωνιακή συντεταγμένη ελάχιστα πριν την αποκόλληση του τεμάχους.
- α : Η επιτάχυνση

Η κύλιση που συμβαίνει σε ένα τέμαχος στα πρανή είναι πιο περίπλοκη κυρίως λόγω του ακανόνιστου σχήματος των τεμαχών, της πολύ έντονης τραχύτητας του πρανούς και τυχόν εξογκωμάτων, η ανωμαλιών στην επιφάνεια του πρανούς, που μπορούν να ανακατευθύνουν, να μειώσουν, ή να διακόψουν την κίνηση. Η κύλιση δεν είναι σταθερή και εξαρτάται από τα παραπάνω. Επίσης, στις καταπτώσεις συναντάμε συνδυασμό των παραπάνω κινήσεων.

Αντίστοιχα με την ολίσθηση, έτσι και στην κύλιση μπορεί να αναπτυχθεί δύναμη, η δύναμη κύλισης η οποία είναι παρόμοια με την δύναμη ολίσθησης αλλά με την αλλαγή του συντελεστή τριβής μ , στον συντελεστή μ' . Ο συντελεστής μ' , συσχετίζεται με τον μ ως εξής.

$$\mu' = \mu_0 + k \frac{d'}{d} \quad (\text{Εξ.4.8})$$

Όπου:

- μ_0 : Συντελεστής τριβής πρανούς για δυναμικές φορτίσεις που κυμαίνεται από 0,37 – 0,67.
- k : Σταθερά, με τιμές που κυμαίνονται από 0,17 – 0,26.
- d' : Το μήκος επαφής του τεμάχους με το πρανές
- d : Η διάμετρος του τεμάχους

Παρακάτω, δίνεται ένας πίνακας με τον συντελεστή μ' κύλισης – ολίσθησης για διάφορα υλικά πρανών που προέκυψαν από ανάδρομες αναλύσεις καταπτώσεων βράχων.

Πίνακας (4.1) Τιμές συντελεστή κύλισης - ολίσθησης (Αστερίου 2016)

Χαρακτηριστικά πρανούς	Συντελεστής κύλισης – ολίσθησης μ'
Ασβεστολιθικό πρανές	0,4
Κορήματα και συμπακνωμένο έδαφος	0,55
Κορήματα και έδαφος χαλαρό	0,75
Μέτρια συμπακνωμένα κορήματα με τεμάχη βράχων	0,6
Μαλακά κορήματα ελαφρώς συμπακνωμένα	0,6
Λάσπη	0,85
Τεχνητές επιχώσεις	0,6

4.1.4 Αναπήδηση

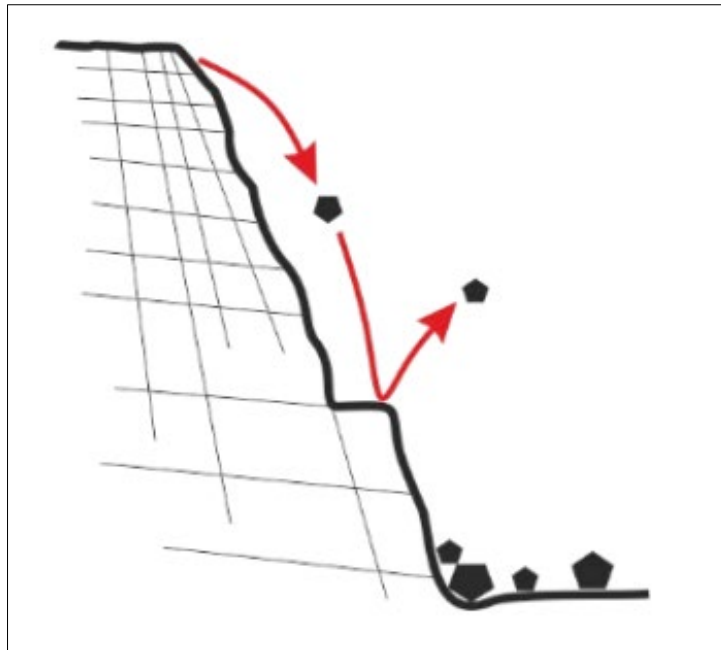
Αναπήδηση είναι το φαινόμενο κατά το οποίο ένα αντικείμενο με μια αρχική ταχύτητα, συγκρούεται με ένα ακλόνητο σώμα και μετά την σύγκρουση, επαναφέρεται ένα ποσοστό της αρχικής ταχύτητας. Είναι ένα φαινόμενο πολύ δύσκολο στην μελέτη όσον αφορά το κομμάτι των βραχοπτώσεων λόγω των πολλών παραμέτρων που το επηρεάζουν. Πολλές μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί για την εύρεση τιμών των συντελεστών αναπήδησης και γενικότερα για την ανάλυση του φαινομένου με κύριες εργασίες, την ελεγχόμενη ρίψη βράχων διάφορων μεγεθών και υλικού από πλαγιές και τις δοκιμές σε εργαστήριο όπου καταγράφεται με ειδική κάμερα όλη η κίνηση του τεμάχους.

Πίνακας (4.2) Παράμετροι που επηρεάζουν την αναπήδηση (Αστερίου, 2016)

Χαρακτηριστικά πρανούς	Χαρακτηριστικά τεμάχους	Κινηματικά χαρακτηριστικά
Αντοχή	Αντοχή	Κάθετη ταχύτητα
Ελαστικότητα	Ελαστικότητα	Γωνιακή ταχύτητα
Τραχύτητα	Μέγεθος	Γωνία πρόσκρουσης
Κλίση	Σχήμα	Προσανατολισμός

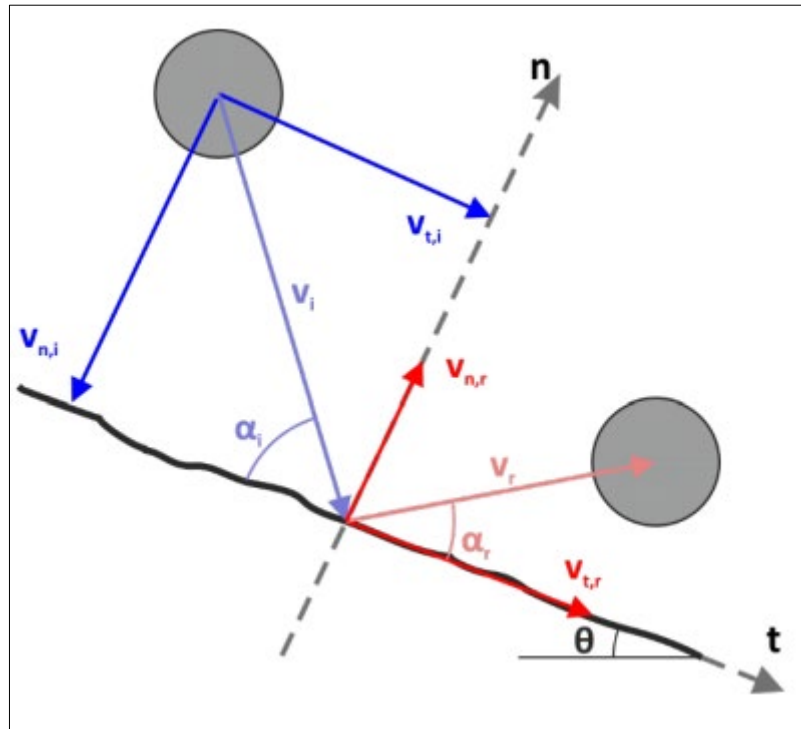
4.1.4.1 Φαινόμενο κρούσης

Η κρούση, είναι το φαινόμενο κατά το οποίο δύο σώματα συγκρούονται μεταξύ τους ασκώντας πολύ μεγάλες δυνάμεις σε ελάχιστο χρονικό διάστημα. Με βάση την διεύθυνση κίνησής τους, οι κρούσεις διακρίνονται σε, κεντρικές κατά την οποία τα διανύσματα των ταχυτήτων τους βρίσκονται πάνω στην ίδια ευθεία, στην έκκεντρη, κατά την οποία τα διανύσματα των ταχυτήτων τους δεν βρίσκονται στην ίδια ευθεία και στην πλάγια κατά την οποία τα διανύσματα των ταχυτήτων των σωμάτων έχουν τυχαίες κατευθύνσεις και η κρούση συμβαίνει λοξά. Εκτός από την διεύθυνση κίνησης, οι κρούσεις κατατάσσονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τις ελαστικές και ανελαστικές. Οι ελαστικές κρούσεις δεν υπάρχουν στην πραγματικότητα. Ονομάζονται έτσι διότι μετά την κρούση, η κινητική ενέργεια των σωμάτων παραμένει σταθερή και η αναπήδηση των σωμάτων θα είναι συνεχής. Αντίθετα στην πλαστική κρούση, τα σώματα μετά την σύγκρουσή τους, θα κολλήσουν μεταξύ τους, μηδενίζοντας την κινητική τους ενέργεια. Στην πραγματικότητα, συναντάμε κρούσεις ανάμεσα σε αυτά τα όρια, όπου λέγονται γενικότερα ανελαστικές κρούσεις.



Εικόνα (4.7) Αναπήδηση τεμαχίων (Αστερίου, 2021)

Στην περίπτωση των καταπτώσεων, τα δύο σώματα που συγκρούονται είναι το τέμαχος, το οποίο έχει την ταχύτητα, και η επιφάνεια του πρανούς που είναι ακλόνητη, άρα με μηδενική ταχύτητα.



Εικόνα (4.8) Συντελεστές αναπήδησης (Αστερίου, 2021)

Οι εξισώσεις του φαινομένου της αναπήδησης παρουσιάζονται παρακάτω. Κατά την αναπήδηση, μπορούν να προκύψουν διάφοροι συνδυασμοί που θα αποτελέσουν την τροχιά που θα πραγματοποιήσει το τέμαχος μέχρι την τελική του θέση. Η επαφή με εξογκώματα και εμπόδια και η πρόσκρουση ακανόνιστων σχημάτων τεμαχών, μπορεί να οδηγήσει σε περίεργες τροχιές. Οι εξισώσεις, χρησιμοποιούνται θεωρώντας σφαιρικού σχήματος τεμάχη και πρανές χωρίς εμπόδια και κανονικής τραχύτητας.

4.1.4.2 Συντελεστές αναπήδησης

Θεωρείται αρχικά ο κινηματικός συντελεστής αναπήδησης, που περιγραφεί τη μεταβολή στην ταχύτητα κίνησης του τεμαχους πριν και μετά την πρόσκρουση.

Ορίζεται ως ο λόγος της ταχύτητας μετά την αναπήδηση, προς την ταχύτητα πριν από την αναπήδηση.

$$V_{cor} = \frac{v_r}{v_i} \quad (\text{Εξ. 4.9})$$

Αντίστοιχα, όπως και σε κάθε διανυσματικό μέγεθος που εφαρμόζεται υπό κλίση, γίνεται διαχωρισμός των συνιστωσών σε οριζόντια και κατακόρυφη συνιστώσα. Σε αυτή την περίπτωση, ορίζονται ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης (v_{cor}) και ο εφαπτομενικός συντελεστής (v_{cor}).

$$ncor = -\frac{Vnr}{Vni} \quad (\text{Εξ. 4.10})$$

$$tcor = \frac{Vtr}{Vti} \quad (\text{Εξ. 4.11})$$

Στην περίπτωση της ελεύθερης πτώσης, μπορεί να εφαρμοστεί και ένας άλλος τύπος που συσχετίζει τις διαφορές των υψομέτρων πριν και μετά την κρούση.

$$RH = \sqrt{\frac{Hr}{Hi}} \quad (\text{Εξ. 4.12})$$

Όπου H_i το ύψος από όπου πέφτει το τέμαχος και H_r το μέγιστο ύψος που θα φτάσει μετά την αναπήδηση. Εργαστηριακά μπορεί να προσδιοριστεί εύκολα για λείες επιφάνειες και για κανονικού σχήματος ριπτόμενα αντικείμενα, με την καταγραφή από ειδική κάμερα.

Επίσης, εκφράζεται ο συντελεστής αναπήδησης με την μορφή κινητικών ενεργειών, ως ο λόγος της κινητικής ενέργειας μετά την πρόσκρουση, προς την κινητική ενέργεια πριν την κρούση.

$$Renrg = \frac{Kenrg_r}{Kenrg_i} = \frac{\frac{1}{2}mVr^2}{\frac{1}{2}mVi^2} = \frac{Vr^2}{Vi^2} \quad (\text{Εξ. 4.13})$$

Αντίστοιχα, υπολογίζεται η κινητική ενέργεια του κάθετου και εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης ως.

$$Renrg(n) = \frac{Vnr^2}{Vni^2} \quad (\text{Εξ. 4.14})$$

$$Renrg(i) = \frac{Vtr^2}{Vti^2} \quad (\text{Εξ. 4.15})$$

Τέλος, στις περισσότερες περιπτώσεις καταπτώσεων, ένα τέμαχος έχει και περιστροφική ταχύτητα, η οποία μετά από κάθε πρόσκρουση αυξάνεται. Η συνολική κινητική ενέργεια ορίζεται από την παρακάτω εξίσωση.

$$TtLnrng = \frac{\frac{1}{2}mVr^2 + \frac{1}{2}I\omega r^2}{\frac{1}{2}mVi^2 + \frac{1}{2}I\omega i^2} \quad (\text{Εξ. 4.16})$$

Όπου:

- V_i, V_r : Η αρχική ταχύτητα και η ταχύτητα μετά την αναπήδηση αντίστοιχα.
- V_{ni}, V_{nr} : Η αρχική κάθετη ταχύτητα και η τελική κάθετη ταχύτητα μετά την αναπήδηση αντίστοιχα.
- V_{ti}, V_{tr} : Η αρχική εφαπτομενική ταχύτητα και η τελική εφαπτομενική ταχύτητα μετά την αναπήδηση αντίστοιχα.
- $V_{cor}, n_{cor}, t_{cor}$: Είναι ο κινηματικός συντελεστής αναπήδησης, ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης και ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης αντίστοιχα.
- RH : Ο συντελεστής αναπήδησης ελεύθερης πτώσης.
- $Renrg, Renrg(n), Renrg(i)$: Η κινητική ενέργεια του τεμάχους κατά την διεύθυνση του, η κινητική ενέργεια του κάθετου συντελεστή αναπήδησης και η κινητική ενέργεια του εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης αντίστοιχα.
- $TtLhrg$: Η συνολική κινητική ενέργεια του τεμάχους λόγω μεταφορικής και περιστροφικής κίνησης.
- m : Η μάζα του τεμάχους, με την παραδοχή πως δεν υπάρχει απώλεια μάζας μετά την πρόσκρουση.
- I : Η ροπή αδράνειας του τεμάχους ως προς το κέντρο βάρους του.
- ω_i, ω_r : Η αρχική γωνιακή ταχύτητα και η τελική γωνιακή ταχύτητα μετά την αναπήδηση αντίστοιχα.

4.1.4.3 Τιμές Συντελεστών αναπήδησης

Οι συντελεστές αναπήδησης εξαρτώνται από τα υλικά του τεμάχους και του εδάφους πρόσκρουσης. Για την επιλογή και την μελέτη τους, πραγματοποιούνται διάφορες μέθοδοι όπως, οι εργαστηριακές ρίψεις τεμαχών, όπου σε μικρογραφία, παρατηρείται όλη η κίνηση που θα πραγματοποιήσει το τέμαχος και καταγράφεται με κάμερα, οι ρίψεις βράχων στο πεδίο, είτε σε πρηνή λατομείου είτε σε κανονικά πρηνή, ρίπτονται ελεγχόμενα τεμάχη μεγαλύτερου μεγέθους που δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα εργαστήρια, καταγράφοντας όλη την κίνηση, και οι ανάδρομες αναλύσεις, όπου μετά από ένα συμβάν κατάπτωσης, μελετάται η τροχιά του με βάση την απόσταση που κατέληξε και την θέση αποκόλλησης. Παρακάτω, δίνεται ένας πίνακας υλικών με τυπικές τιμές των συντελεστών αναπήδησης και των ερευνητών που τα υπολόγισαν.

Πίνακας (4.3) Τιμές συντελεστών αναπήδησης από την βιβλιογραφία

Τύπος Υλικών - Παρατηρήσεις	ncor	tcor	Μελετητής - Έτος
Συμπαγής βράχος	0,8 – 0,9	0,65 – 0,75	Piteau and Clayton 1977
Κορήματα με μεγάλα τεμάχια βράχου	0,5 – 0,8	0,45 – 0,65	
Συμπαγή κορήματα με μικρά τεμάχια βράχου	0,4 – 0,5	0,35 – 0,45	
Πρανή με φυτοκάλυψη	0,2 – 0,4	0,2 – 0,3	Wu 1985 Δοκιμές πεδίου
Βράχος σε επιφάνεια βράχου ή ξύλινη επιφάνεια	0,2 – 0,8	0,5 – 0,75	
Βράχος	0,95	-	
Χαλίκια στρώσης 35cm	0,55	-	Heierli 1985 Δοκιμές πεδίου
Χαλίκια στρώσης 70cm	0,45	-	
Κορήματα	0,45	-	
Άσφαλτος	0,4	0,95	Hoek 1987 Εμπειρία σε έργα καταπτώσεων
Βραχώδη πρανή	0,35	0,85	
Σκληρός βράχος	0,53	0,99	
Έδαφος με φυτοκάλυψη	0,3	0,82	
Κορήματα	0,32	0,82	
Κορήματα με βλάστηση	0,32	0,8	
Δολομιτικός ασβεστόλιθος	0,05 – 0,35	0,5 - 1	
Κορήματα	0	0,24	Urciuoli 1988 Δοκιμές πεδίου
Σκληρή επιφάνεια βράχου	0,37 – 0,42	0,87 – 0,92	Pfeiffer and Bowen 1989 Ανάδρομες αναλύσεις
Κροκάλες με λίγη βλάστηση ή έδαφος	0,33 – 0,37	0,83 – 0,87	
Κορήματα με λίγη βλάστηση	0,3 – 0,33	0,83 – 0,87	
Κορήματα με βλάστηση	0,3 – 0,33	0,8 – 0,83	
Μαλακό έδαφος με λίγη βλάστηση	0,28 – 0,32	0,8 – 0,83	
Έδαφος με βλάστηση	0,28 – 0,32	0,78 – 0,82	
Βράχος	0,5	0,95	

Βράχος με ογκόλιθους	0,35	0,85	Giani 1992 Δοκιμές πεδίου
Κορήματα	0,3	0,7	
Έδαφος με βλάστηση	0,25	0,55	
Χαλαζίτης	0,45	0,45	Azzoni et al. 1992 Δοκιμές πεδίου
Αποσαθρωμένος χαλαζίτης	0,3	0,66	
Ασβεστόλιθος	0,62	0,66	
Κορήματα	0,8	1,22	
Μικρά τεμάχη σε βράχο	0,9	0,9	Evans and Hungr 1988 Δοκιμές πεδίου
Μεγάλα τεμάχη σε κορήματα	0,7	0,8	
Δολομίτης	0,2	0,53	Budetta and Santo 1994 Ανάδρομες αναλύσεις
Πρανές ασβεστόλιθου	0,315	0,712	Robotham et al. 1995 Δοκιμές πεδίου
Τεμάχη ασβεστόλιθου με μερική φυτοκάλυψη	0,303	0,613	
Κορήματα με φυτοκάλυψη	0,251	0,489	
Ασβεστόλιθος	0,17 – 0,43	0,45 – 0,88	Gerber 1995
Επιφάνεια βράχου	0,197	0,91	Chau et al. 1998 Δοκιμές εργαστηρίου
Επιφάνεια εδάφους	0,29	0,567	
Επιφάνεια εκτοξευόμενου σκυροδέματος	0,263	0,737	
Τέμαχος 220kg σε σκληρή επιφάνεια	0,1 – 0,35	-	Kamijo et al. 2000 Δοκιμές ελεύθερης πτώσης
Τέμαχος 800kg σε σκληρή επιφάνεια	0,1		
Λεία και στρωσιγενής επιφάνεια	0,6 – 1	0,9 – 1	Jones et al. 2000 Ανάδρομες αναλύσεις με λογισμικό
Βράχοι και ογκόλιθοι	0,15 – 0,3	0,75 – 0,95	
Κορήματα και πλαγιές εδάφους	0,12 – 0,2	0,65 – 0,95	
Πλαγιές με χαλαρό έδαφος	0,1 – 0,2	0,5 – 0,8	

Ελαφρόπετρα με γωνία πρόσπτωσης 25°	0,15	0,2 – 0,8	Cagnoli and Manga 2003 Δοκιμές εργαστηρίου
Ελαφρόπετρα με γωνία πρόσπτωσης 80°	0,8	0,6 – 0,95	
Οφιόλιθος κλίσης 27,5°	0,48	0,79	Giani et al. 2004 Δοκιμές πεδίου
Αποσαθρωμένος γρανίτης κλίσης 36°	0,25	0,47	
Πρανές κλίσης 38° με φυτοκάλυψη	0,77	0,36	Dorren et al. 2005 Δοκιμές πεδίου
Πρανές κλίσης 38° χωρίς φυτοκάλυψη	0,7	0,26	
Ανδεσίτης	0,46	0,71	Topal et al. 2006 Ανάδρομες αναλύσεις
Έδαφος και κορήματα	0,6 – 2,77	0,69 – 0,86	Paronuzzi 2009 Ανάδρομες αναλύσεις
Τσιμέντο	0,36 – 1,36	0,78 – 0,86	
Χάλικες	0,95	0,79	
Τεμάχη σκυροδέματος σε στρώσεις άμμου	0,01 – 0,257	0,07 – 1	Labieuse and Heidenreich 2009 Δοκιμές εργαστηρίου
Ασβεστόλιθος	0,3 – 0,7	0,6 – 0,95	Saroglou et al. 2010 Ανάδρομες αναλύσεις
Μάρμαρο Πεντέλης	0,34 – 0,52	0,7 – 0,88	Asteriou 2011 Δοκιμές εργαστηρίου
Ασβεστόλιθος	0,22 – 0,52	0,77 – 0,97	
Σχιστόλιθος	0,24 – 0,56	0,56 – 0,88	
Χαλαζιακός ψαμμίτης	0,38 – 0,62	0,72 – 0,98	
Μάργα	0,14 – 0,58	0,61 – 0,99	
Αλκαλικός βασάλτης	1,06	0,74	Spadari et al. 2012 Ανάδρομες αναλύσεις
Χαλαζιακός ψαμμίτης	1,15	0,73	
Ψαμμίτης	1,18	0,78	
Σφαιρικά δοκίμια από ασβεστόλιθο	0,46	0,83	Saroglou et al. 2012 Ανάδρομες αναλύσεις
Ψαμμίτης	0,61 – 1,14	0,4 – 0,83	

Ιλυόλιθος	0,59 – 0,93	0,52 – 0,83	Giacomini et al. 2012 Δοκιμές πεδίου
Κορήματα	0,11 – 0,22	0,4 – 0,8	
Γαϊάνθρακες	0,41	0,64	
Μάρμαρο 1	0,52	0,49	Asteriou et al. 2013 Δοκιμές εργαστηρίου
Μάρμαρο 2	0,64	0,62	
Ψαμμίτης	0,66	0,66	
Κρυσταλλικός ασβεστόλιθος	0,52	0,51	
Ασβεστόλιθος	0,5	0,47	
Σχιστόλιθος	0,38	0,34	
Πράσινος σχιστόλιθος	0,51	0,47	
Μάργα	0,36	0,33	
Ένεμα SikaDur	0,56	0,54	
Ένεμα SikaGrout	0,49	0,47	
Πολυεστέρας	0,59	0,56	
Έδαφος με βλάστηση	0,25	0,55	
Βασάλτης	0,35	0,85	
Ασβεστόλιθος	0,47 – 0,51	0,85 – 0,92	Sabatakakis et el 2015
Ασβεστόλιθος με εδαφική επικάλυψη	0,3 – 0,32	0,7 – 0,72	

4.1.4.4 Παράγοντες που επηρεάζουν τους συντελεστές αναπήδησης

Ο παραπάνω πίνακας δίνει τυπικές τιμές συντελεστών αναπήδησης για διάφορα υλικά, που προέκυψαν από έρευνες. Πολλοί από τους μελετητές, ασχολήθηκαν πιο λεπτομερώς και με ειδικές διατάξεις και αλλαγές στα χαρακτηριστικά των τεμαχών και των επιφανειών πρόσκρουσης.

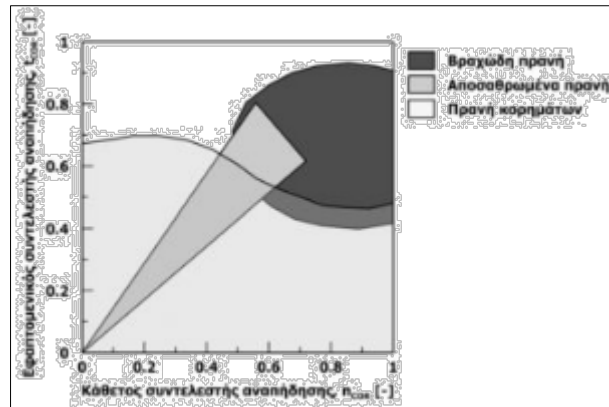
Για τα πρηνή, πρωταρχικό ρόλο στην τροχιά ενός τεμάχου έχει η κλίση του όπου μετά από κάθε πρόσκρουση αυξάνεται σημαντικά η περιστροφική ταχύτητα και η μετατόπιση του τεμάχου. Σε ειδικότερες περιπτώσεις, για βαθύτερη ανάλυση, γίνεται έλεγχος της τραχύτητας του πρηνούς και η ύπαρξη εξογκωμάτων και βράχων που λειτουργούν σαν εμπόδια των τεμαχών που οδηγήθηκαν σε κίνηση λόγω της αστοχίας τους. Επίσης στην άλλη περίπτωση, ένα πρηνές μπορεί να έχει εσοχές που δημιουργήθηκαν είτε από ζώα, είτε σαν κρατήρες από παλαιότερη κατάπτωση, είτε από την αστοχία παλαιού τεμάχου, όπου στο σημείο που ισορροπούσε δημιουργήθηκε κενό. Τέλος, σημαντικό ρόλο, έχει η φυτοκάλυψη και το είδος της.

Χλωρή βλάστηση, μειώνει σημαντικά τους συντελεστές αναπήδησης ενώ μεγάλα δέντρα και ξηρή βλάστηση λειτουργούν σαν εμπόδια ή σαν αποσβεστήρες της κινητικής ενέργειας του τεμάχους. Όλα τα παραπάνω, εκτός από την μεγάλη δυσκολία στον έλεγχο και την εφαρμογή στα προβλήματα των καταπτώσεων, λειτουργούν ευνοϊκά και υπέρ της ασφαλείας και για αυτό δεν λαμβάνονται υπόψη, παρά μόνο η τραχύτητα του πρανούς. Άλλος σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τους συντελεστές, είναι το είδος του υλικού που αποτελείται το πρανές, των μηχανικών ιδιοτήτων τους και της κατάστασης των ασυνεχειών και της αποσάθρωσης.

Για τα τεμάχη, ισχύουν οι μηχανικές ιδιότητες και η κατάσταση της αποσάθρωσης, όπως και στα τοιχώματα του πρανούς. Επίσης, ελέγχεται και το ύψος από το οποίο ξεκίνησε η αστοχία, ώστε να εκτιμηθεί η ταχύτητα και η κινητική ενέργεια που θα αναπτύξει το τέμαχος. Τέλος σημαντικός παράγοντας αποτελεί ο όγκος και το σχήμα των τεμαχών. Μεγάλοι όγκοι βράχων, αναπτύσσουν μεγαλύτερη κινητική ενέργεια και είναι σχεδόν αδύνατο να σταματήσουν σε κάποια ενδιάμεση θέση ή σε κάποιο προστατευτικό μέτρο χωρίς να προκαλέσει ζημιές. Αντίστοιχα, περίπλοκα σχήματα είναι αδύνατο να προσομοιωθούν και επίσης λειτουργούν υπέρ της ασφαλείας λόγω των έντονων γωνιών τους μη επιτρέποντας την κύλιση. Για αυτόν τον λόγο, όλες σχεδόν οι πειραματικές εργαστηριακές δοκιμές, πραγματοποιούνται με δοκίμια με ομαλές γωνίες και συγκεκριμένη γεωμετρία.

4.2 Εμπειρικές συσχετίσεις μεταξύ των ιδιοτήτων τεμαχών και των συντελεστών αναπήδησης

Οι μελετητές προσπαθώντας να αναλύσουν και να περιγράψουν καλύτερα το φαινόμενο των καταπτώσεων και των παραμέτρων που το καθορίζει, πρόσθεσαν και επιπλέον στοιχεία στην πειραματική τους διερεύνηση. Αυτά τα στοιχεία περιλαμβάνουν όλες τις ιδιότητες των τεμαχών και των υλικών των επιφανειών των πρανών που συμβάλουν στον τρόπο μετακίνησης. Ο Fornaro et al, το 1990, έφτιαξε ένα εμπειρικό διάγραμμα, κάθετου και εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης με βάση τα δεδομένα που είχε μέχρι τότε από μετρήσεις πεδίου εργαστηριακές δοκιμές και ανάδρομες αναλύσεις. Το διάγραμμα είναι φτιαγμένο με 3 κατηγορίες υλικών της επιφάνειας του πρανούς και αποτελείται από βραχώδη πρανή, αποσαθρωμένα πρανή και πρανή κορημάτων. Ωστόσο, οι επιφάνειες του διαγράμματος έχουν πολύ μεγάλο εύρος τιμών.



Εικόνα (4.9) Διάγραμμα κάθετου και εφαπτομενικού συντελεστή αναπήδησης Fornaro (Αστερίου, 2016)

Ο Wu το 1985 μελέτησε τη επίδραση της κλίσης της επιφάνειας στους συντελεστές αναπήδησης. Πραγματοποίησε εργαστηριακές δοκιμές για διάφορες κλίσεις επιφάνειας και διαφορετικού μεγέθους δοκίμια. Παρατήρησε πως οι συντελεστές αναπήδησης παρουσιάζουν γραμμική συσχέτιση με την γωνία πρόσκρουσης. Με βάση την μελέτη αυτή προτείνονται οι δύο παρακάτω εμπειρικές εξισώσεις και τον προσδιορισμό των συντελεστών αναπήδησης.

$$n_{cor} = -0,013a_i + 0,995 \tag{Εξ. 4.17}$$

$$t_{cor} = 0,0028a_i + 0,535 \tag{Εξ. 4.18}$$

Όπου το a_i η γωνία πρόσκρουσης που λειτουργεί σαν συμπληρωματική γωνία με την γωνία της επιφάνειας.

Ο Peng το 2000 μελετώντας τις μέχρι τότε μετρήσεις, ανέφερε πως ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης, μεγαλώνει όσο η σκληρότητα του τεμάχους και της επιφάνειας πρόσκρουσης αυξάνεται. Η σκληρότητα, εκτιμάται με την χρήση της σφύρας Schmidt. Η προτεινόμενη εξίσωση περιλαμβάνει την σκληρότητα του τεμάχους, την σκληρότητα της επιφάνειας και την κλίση της. Παρακάτω διατυπώνεται η εξίσωση.

$$n_{cor} = -0,110 + 0,00919s_1 + 0,00392s_2 + 0,00358A \tag{Εξ. 4.19}$$

Όπου s_1 , s_2 η σκληρότητα κατά Schmidt της επιφάνειας πρόσκρουσης και των τεμαχών αντίστοιχα και A η κλίση της επιφάνειας.

Οι Ushiro et al το 2000 μέσω δοκιμών σε επιφάνειες από βράχο και σκυρόδεμα, μελέτησαν την επίδραση της ταχύτητας κατά την πρόσκρουση στις προαναφερόμενες επιφάνειες. Οι εξισώσεις, παρήχθησαν με βάση την κάθετη ταχύτητα πρόσκρουσης και διατυπώνονται ως εξής.

$$n_{cor} = 0,8478e^{-0,0842}(-V_n) \quad (\text{Εξ. 4.20})$$

$$n_{cor} = 2,506e^{-0,1053}(-V_n) \quad (\text{Εξ. 4.21})$$

Η πρώτη εξίσωση, αφορά επιφάνεια από σκυρόδεμα και η δεύτερη σε βραχώδη επιφάνεια. Η V_n , είναι η κάθετη ταχύτητα πρόσκρουσης. Οι παραπάνω εξισώσεις δεν είναι πολύ αξιόπιστες κυρίως γιατί μπορούν να δώσουν συντελεστές αναπήδησης πολύ μεγαλύτερους από την μονάδα.

Οι Richards et al το 2001, μετά από δοκιμές ελεύθερης πτώσης διαφορετικών υλικών, συσχέτισε την σκληρότητα κατά Schmidt με την κλίση της επιφάνειας του πρανούς με την παρακάτω εξίσωση.

$$n_{cor} = \frac{-110+9s_1+4s_2+4A}{1000} \quad (\text{Εξ. 4.22})$$

Επίσης, διατυπώθηκε και η παρακάτω εξίσωση για ακανόνιστου σχήματος τεμάχους.

$$n_{cor} = \frac{-145+4s_1+4s_2+2A}{1000} \quad (\text{Εξ. 4.23})$$

Όπου s_1 , s_2 η σκληρότητα κατά Schmidt της επιφάνειας πρόσκρουσης και των τεμαχών αντίστοιχα και A η κλίση της επιφάνειας.

Πολλές ακόμα δοκιμές έχουν πραγματοποιηθεί από αρκετούς μελετητές και έχουν θεσπιστεί εμπειρικές εξισώσεις με βάση τα δεδομένου που εξάγονται. Οι εξισώσεις, έχουν πολύ καλή προσέγγιση και είναι αξιόπιστες για τον προσδιορισμό του συντελεστή αναπήδησης

4.3 Ειδικές περιπτώσεις πρόσκρουσης

Κατά την αστοχία ενός τεμάχους από πρανές, το τέμαχος ακολουθεί μια τροχιά μέχρι να καταλήξει σε νέα θέση. Η ολική κίνησή του, περιλαμβάνει συνδυασμό κύλισης, ολίσθησης, αναπήδησης και συνδυασμό τους. Τα παραπάνω, αναλύονται με βάση τους συντελεστές που έχουν προαναφερθεί, θεωρώντας ότι το τέμαχος δεν μπορεί να σπάσει, αλλά ούτε να δημιουργηθεί κρατήρας στην επιφάνεια της πρόσκρουσης. Σε αυτό το κεφάλαιο, θα γίνει μια εισαγωγή για τις δύο αυτές ειδικές περιπτώσεις στα φαινόμενα των καταπτώσεων.

4.3.1 Θραύση τεμάχου

Η θραύση ενός τεμάχου, προκαλείται όταν μετά την αποκόλλησή του από το πρανές, προσκρούει στην επιφάνεια του πρανούς με αποτέλεσμα τον κερματισμό του τεμάχου σε λίγα ή πολλά κομμάτια και την απότομη και μεγάλη μείωση ή και μηδενισμό της κινητικής του ενέργειας. Σε όσο λιγότερα κομμάτια θραύεται το τεμάχος, τόσο μικρότερη θα είναι και η απώλεια κινητικής ενέργειας. Τα θραύσματα, ανάλογα κι με την ταχύτητα πρόσκρουσης του τεμάχου εκτοξεύονται προς διάφορες κατευθύνσεις. Το φαινόμενο της θραύσης είναι πολύ δύσκολο στην μελέτη λόγω των ακανόνιστων σχημάτων. Έχει γίνει μελέτη και εκτίμηση εξισώσεων που δίνουν παραμέτρους θραύσης με βάση τα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά των τεμαχών.

Ο Stronge, το 2004, όρισε μια εξίσωση που δίνει την ταχύτητα πέρα από την οποία δημιουργούνται πλαστικές παραμορφώσεις. Όσο μεγαλύτερη ταχύτητα τόσο μεγαλύτερες οι παραμορφώσεις που θα αναπτυχθούν. Η εξίσωση ορίζεται ως εξής.

$$V_{br} = \sqrt{\frac{3}{5} \left(\frac{3\pi}{4}\right)^4 \left(\frac{2,2(1-\nu^2)\sigma_{br}}{E}\right)} 1,1 \frac{\sigma_{br}}{\rho} \quad (\text{Εξ. 4.24})$$

Όπου το V_{br} είναι η ταχύτητα μόνιμης παραμόρφωσης, ν είναι ο λόγος Poisson του τεμάχου, E είναι το μέτρο ελαστικότητας, σ_{br} είναι η τάση διαρροής που μπορεί να θεωρηθεί ίση με την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη σσι, και ρ είναι η πυκνότητα του τεμάχου.



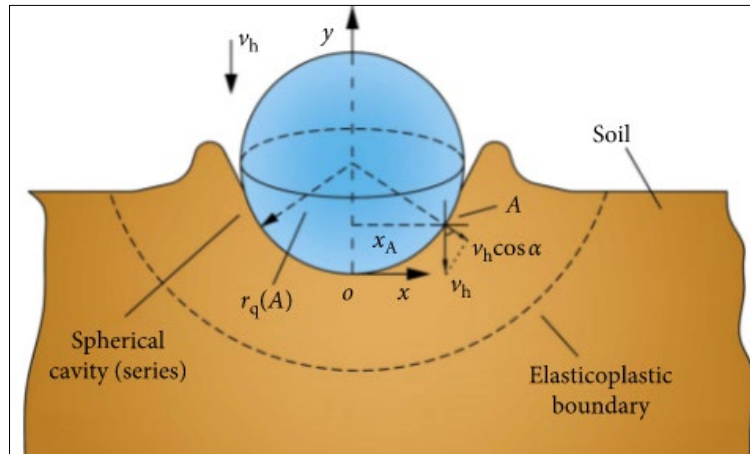
Εικόνα (4.10) Θραυσμένο τεμάχος σε δύο κύρια κομμάτια (Μαλακάσα)
(Προσωπικό αρχείο)



Εικόνα (4.11) Θραύση τεμάχους σε τέσσερα στάδια. (α) Κατάπτωση (β) Πρόσκρουση με επιφάνεια (γ) θραύση τεμάχους σε κομμάτια (δ) εκτόξευση θραυόμενων τεμαχίων (Πήλιο Ευβοίας) (Προσωπικό αρχείο)

4.3.2 Δημιουργία κρατήρα στην επιφάνεια

Η δημιουργία κρατήρα στην επιφάνεια πρόσκρουσης, είναι η δεύτερη ειδική περίπτωση, κατά την οποία ένα τέμαχος που προσκρούει στην επιφάνεια, εισχωρεί μέσα σε αυτή και το τέμαχος χάνει όλη την κινητική του ενέργεια. Συμβαίνει κυρίως σε περιπτώσεις όπου η επιφάνεια, αποτελείται από χαλαρά εδαφικά υλικά με υψηλό ποσοστό κενών, σε κορεσμένα εδάφη και σε εδάφη μικρής φέρουσας ικανότητας. Σε άλλες σπανιότερες περιπτώσεις, κρατήρας μπορεί να δημιουργηθεί, όταν το τέμαχος έχει μεγάλη σκληρότητα, η οποία να είναι μεγαλύτερη από της επιφάνειας πρόσκρουσης. Συνδυάζοντας μεγάλη μάζα και μεγάλη ταχύτητα πρόσκρουσης του τεμάχους, αυξάνονται οι πιθανότητες για δημιουργία κρατήρα. Μελετητές, έχουν ασχοληθεί με το φαινόμενο με την παραδοχή σφαιρικού τεμάχους για απλοποίηση του φυσικού φαινομένου και ευκολότερη εξαγωγή εξισώσεων. Υπάρχουν εμπειρικές εξισώσεις που υπολογίζουν την δύναμη πρόσκρουσης και το βάθος εισχώρησης, αξιοποιώντας τις ιδιότητες των υλικών.



Εικόνα (4.12) Κρατήρας από σφαιρικό δοκίμιο (hindawi.com)

Ο Hertz το 1985 με βάση την ελαστική θεωρία, εκτίμησε την μέγιστη δύναμη πρόσκρουσης και το μέγιστο βάθος εισχώρησης από τις παρακάτω εξισώσεις.

$$F = \frac{32\sqrt{3}}{27} E\sqrt{R} \left[\frac{45\sqrt{3}MV_0^2}{128R^{0,5}E} \right]^{\frac{3}{5}} \quad (\text{Εξ. 4.25})$$

$$L = \left[\frac{45\sqrt{3}MV_0^2}{128R^{0,5}E} \right]^{\frac{2}{5}} \quad (\text{Εξ. 4.26})$$

Όπου F είναι η δύναμη πρόσκρουσης, E είναι το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους, R είναι η ακτίνα του τεμάχου, M είναι η μάζα του τεμάχου, V₀ είναι η αρχική ταχύτητα του τεμάχου και L είναι το βάθος εισχώρησης του τεμάχου.

Το 1996, ο Ελβετός μελετητής Labiouse, δημιούργησε μια εμπειρική εξίσωση για την δύναμη πρόσκρουσης με βάση πειράματα καταπτώσεων. Η εξίσωση έχει την παρακάτω μορφή.

$$F = 1,765(D)^{\frac{2}{5}}(R)^{\frac{1}{5}}(QH)^{\frac{3}{5}} \quad (\text{Εξ. 4.27})$$

Όπου D είναι ο συντελεστής παραμόρφωσης του εδάφους, Q είναι η ποιότητα του τεμάχου που εξαρτάται από τις μηχανικές ιδιότητες και H είναι το ύψος από το οποίο αστοχεί το τέμαχος

Το 2000, η ένωση αυτοκινητοδρόμων της Ιαπωνίας βασιζόμενη σε πειράματα καταπτώσεων και στην ελαστική θεωρία του Hertz, θέσπισαν την παρακάτω εμπειρική εξίσωση για την δύναμη πρόσκρουσης.

$$F = 2,108(Mg)^{\frac{2}{3}}(\lambda)^{\frac{2}{5}}(H)^{\frac{3}{5}} \quad (\text{Εξ. 4.28})$$

$$\lambda = \frac{vE}{(1+v(1-2v))} \quad (\text{Εξ. 4.29})$$

Όπου g είναι η δύναμη της βαρύτητας $9,81\text{m/s}^2$, λ είναι σταθερά και v είναι ο λόγος Poisson του εδάφους.

Το 2005, ο Αυστραλός μελετητής Richler πρότεινε τις παρακάτω θεωρητικές και εμπειρικές εξισώσεις, βασισμένες σε δοκιμές καταπτώσεων στο πεδίο.

$$F = \frac{MV_0^2}{L} \quad (\text{Εξ. 4.30})$$

$$L1 = D \sqrt{\frac{103500H}{R_c + 19180H}} \quad (\text{Εξ. 4.31})$$

$$L2 = D \left\{ 1,518 \ln \left[\frac{1 + 19182,39 \left(\frac{H}{R_c} \right)}{1,414} \right] + 1,257 \right\} \quad (\text{Εξ. 4.32})$$

Όπου D είναι η διάμετρος του τεμάχους και R_c είναι η αντίσταση εισχώρησης της επιφάνειας. Η εξίσωση $L1$, ισχύει όταν $\frac{L1}{D} \leq 1,257$ ενώ η εξίσωση $L2$, ισχύει όταν $\frac{L2}{D} \geq 1,257$.

Τέλος, δίνεται ο τύπος της διάρκειας της κρούσης από τους Argaei et al το 2010 από την εξίσωση.

$$t = 2,94 \left(\frac{1,25\sqrt{2}\pi\rho(1-v^2)}{E} \right)^{0,4} \frac{R}{2V^{0,2}} \quad (\text{Εξ. 4.33})$$

Κεφάλαιο 5

5.1 Λογισμικό Rocfall

Το λογισμικό Rocfall της εταιρίας Rocscience αναλύει την τροχιά κατά τη διάρκεια μιας κατάπτωσης. Το τμήμα θεωρείται σαν υλικό σημείο, εξάγοντας χρήσιμα συμπεράσματα και αποτελέσματα για την συνολική κίνηση, τις ενδιάμεσες αναπηδήσεις και την τελική θέση του τμήματος. Χρησιμοποιείται στην περίπτωση επικίνδυνων πρανών που μπορούν να συμβούν καταπτώσεις βράχων. Εύχρηστο και πολύ αξιόπιστο, είναι ένα εργαλείο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την διαστασιολόγηση μέτρων αντιμετώπισης.

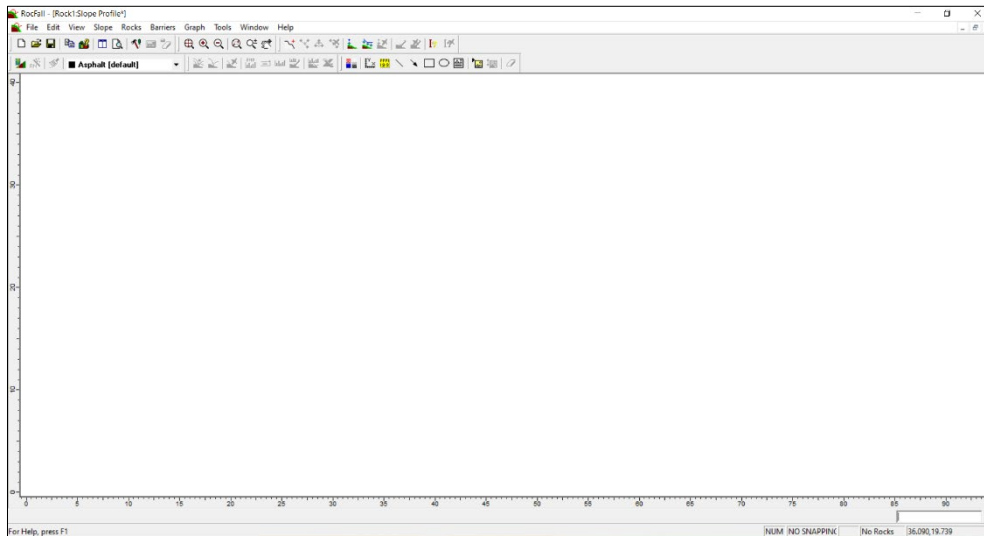


Εικόνα 5.1) Λογότυπο RocFall και τροχιές τεμαχών (geoengineer.org)

5.2 Στοιχεία λογισμικού

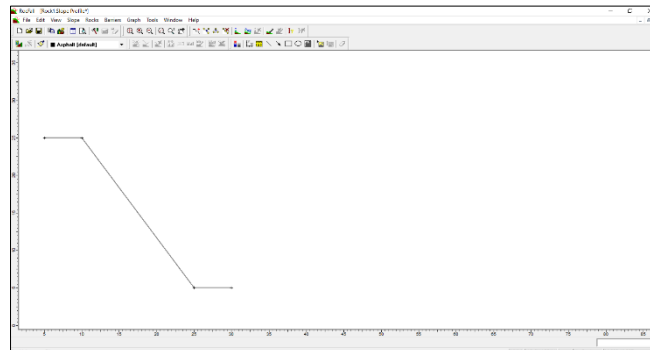
Η ανάλυση των τροχιών των τεμαχών γίνεται με την χρήση των εξισώσεων κίνησης και κατάλληλης επιλογής των συντελεστών αναπήδησης. Ως στατιστικό πρόγραμμα, έχει την δυνατότητα επιλογής τυπικής απόκλισης αν τα εισαγόμενα νούμερα ενέχουν αβεβαιότητα. Αξιοποιείται μαζί με άλλα προγράμματα, όπως το Excel και το AutoCAD, ενώ τα παραγόμενα στοιχεία των αναλύσεων αποθηκεύονται ως εικόνες. Έχει την δυνατότητα δημιουργίας πολλών διαγραμμάτων που αξιοποιούνται για τον προσδιορισμό των απαιτούμενων μέτρων προστασίας. Τα διαγράμματα που παράγονται απεικονίζουν την κίνηση των τεμαχών και περιλαμβάνουν την κινητική ενέργεια του τμήματος, την διαγραφόμενη τροχιά και τις αναπηδήσεις, την οριζόντια απόσταση που διανύει το τμήμα μέχρι την θέση όπου σταματάει η κίνηση και άλλα.

5.3 Επιλογές ανάλυσης

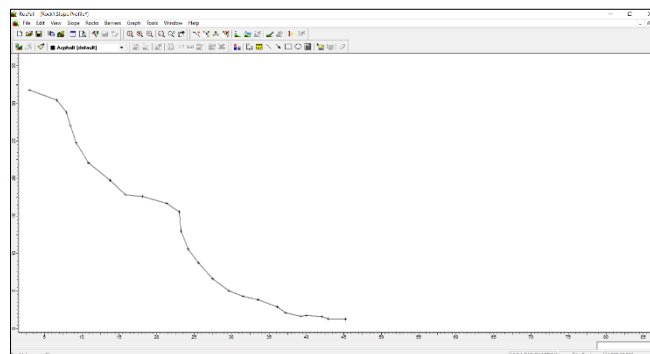


Εικόνα (5.2) Περιβάλλον εργασίας Rocfall

Η πρώτη επιλογή που απαιτείται να γίνει πριν ξεκινήσει η διαδικασία ελέγχου και εξαγωγής των αποτελεσμάτων, είναι η αποτύπωση της διατομής του πρανού στο πρόγραμμα. Η εισαγωγή της γεωμετρίας του πρανού μπορεί να γίνει ελεύθερα, με το ποντίκι, με βάση τις συντεταγμένες (Εικόνα (5.3)) ή και με την βοήθεια σχεδιαστικών προγραμμάτων, όπως το AutoCAD.

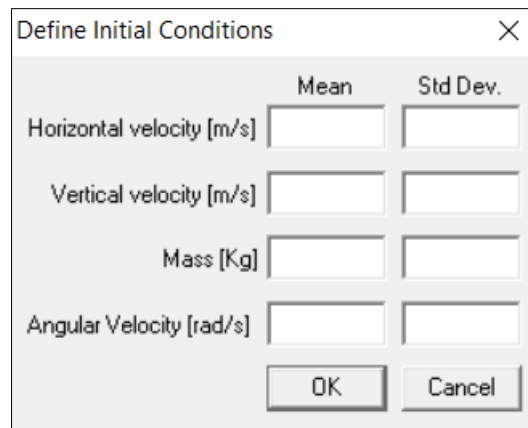


Εικόνα (5.3) Διατομή πρανού σχεδιασμένο με χρήση συντεταγμένων



Εικόνα (5.4) Διατομή πρανού σχεδιασμένο ελεύθερα

Μετά την επιλογή και σύνθεση της διατομής του πρανούς, ορίζονται στο πρόγραμμα οι αρχικές συνθήκες του τεμάχους και η αρχική του θέση.



	Mean	Std Dev.
Horizontal velocity [m/s]	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Vertical velocity [m/s]	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Mass [Kg]	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Angular Velocity [rad/s]	<input type="text"/>	<input type="text"/>

OK Cancel

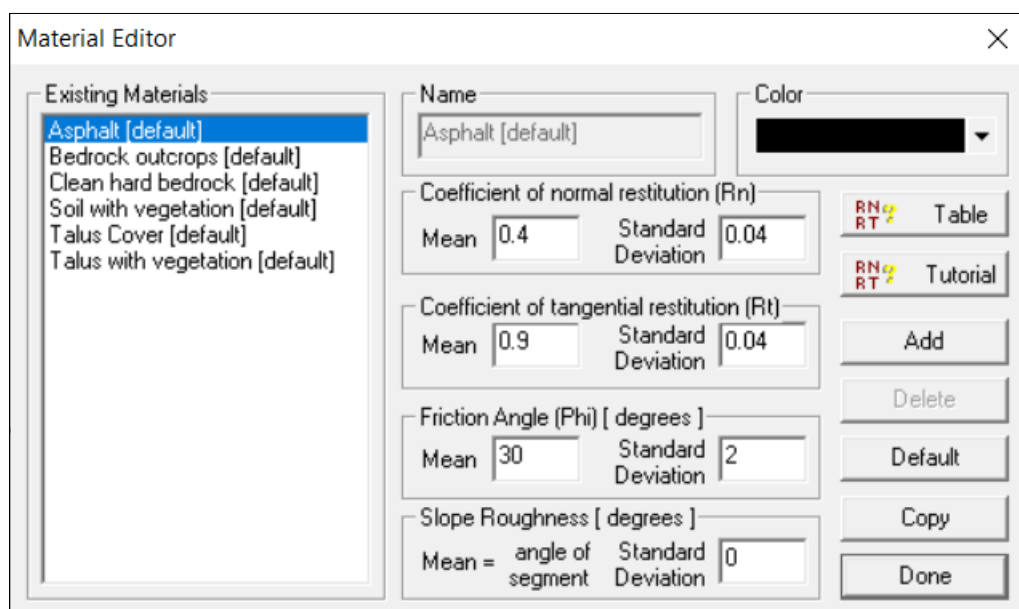
Εικόνα (5.5) Επιλογή αρχικών συνθηκών

Οι αρχικές συνθήκες περιλαμβάνουν την οριζόντια, κατακόρυφη και περιστροφική ταχύτητα του τεμάχους, καθώς και την μάζα του. Υπάρχει η δυνατότητα επιλογής τυπικής απόκλισης για την συνεκτίμηση της αβεβαιότητας στα δεδομένα. Στην πραγματικότητα η κατακόρυφη αρχική ταχύτητα είναι ίση με 0, ενώ σημαντική επίδραση έχει η αρχική περιστροφική ταχύτητα, η οποία δεν είναι μεγάλη, αλλά υφίσταται κυρίως σε τεμάχια που βρίσκονται σε οριακή ισορροπία. Η οριζόντια αρχική ταχύτητα είναι πάντα διάφορη του 0 και κυμαίνεται από λίγα εκατοστά το δευτερόλεπτο, για μια απλή αστοχία, έως και περίπου 1 μέτρο το δευτερόλεπτο, στην περίπτωση ισχυρού κραδασμού εξαιτίας σεισμικής δόνησης. Τέλος η μάζα μπορεί να εκτιμηθεί από το ειδικό βάρος του υλικού του τεμάχους.

Μετά την εισαγωγή των αρχικών συνθηκών και της γεωμετρίας του πρανούς, γίνεται η καταχώρηση δεδομένων για τα υλικά του πρανούς και λοιπών επιφανειών που μπορεί το τεμάχος να έρθει σε επαφή, όπως είναι το οδόστρωμα. Το Rocfall, διαθέτει πίνακα επιλογής κάποιων βασικών υλικών με τις παραμέτρους του.

Πίνακας (5.1) Τύποι υλικού και συντελεστές τους με βάση το Rocfall

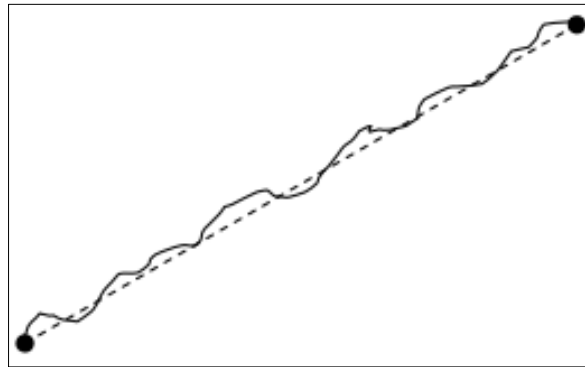
Τύπος Υλικού	Κάθετος συντελεστής αναπήδησης n_{cor}	Εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης t_{cor}
Άσφαλτος	$0,4 \pm 0,04$	$0,9 \pm 0,04$
Προεξοχές βράχων	$0,35 \pm 0,04$	$0,85 \pm 0,04$
Σκληρός βράχος	$0,53 \pm 0,04$	$0,99 \pm 0,04$
Έδαφος με βλάστηση	$0,3 \pm 0,04$	$0,8 \pm 0,04$
Κορήματα	$0,32 \pm 0,04$	$0,82 \pm 0,04$
Κορήματα με βλάστηση	$0,32 \pm 0,04$	$0,8 \pm 0,04$



Εικόνα (5.6) Παράθυρο επιλογής υλικού και συντελεστών

Εκτός από τα υλικά που δίνονται από το λογισμικό, μπορεί ο χρήστης να εισάγει επιπλέον υλικά και τιμές από άλλες πηγές. Πέρα από τα δύο βασικά μεγέθη, του συντελεστή κάθετης και εφαπτομενικής αναπήδησης, δίνεται η επιλογή εισαγωγής γωνίας τριβής του πρανούς, που είναι η μέγιστη γωνία που μπορεί παραμείνει ακίνητο ένα τέμαχος στην επιφάνεια του πρανούς. Μετά την υπέρβαση αυτής της γωνίας, το τέμαχος αρχίζει να ολισθαίνει. Η βασική τιμή που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα είναι οι 30 μοίρες, με μια τυπική απόκλιση της τάξης των ± 2 μοιρών.

Τέλος δίνεται η δυνατότητα επιλογής και της τραχύτητας του πρανού. Από τα δεδομένα του λογισμικού, χρησιμοποιούνται μικρές κλίσεις για την τραχύτητα της τάξης των 1,2,3 μοιρών με την μέγιστη που έχει χρησιμοποιηθεί να είναι 5 μοίρες. Η τραχύτητα δείχνει κατά πόσο μεταβάλλεται η επιφάνεια του πρανού λόγω των εξογκωμάτων και των κοιλωμάτων σε σχέση με ένα οριζόντιο επίπεδο.



Εικόνα (5.7) Τραχύτητα επιφάνειας πρανού

Εικόνα (5.8) Ρυθμίσεις και τελικές επιλογές εξειδικευμένων επιλογών

Οι τελικές ρυθμίσεις πριν την προσομοίωση της κίνησης των τεμαχών, φαίνονται στην Εικόνα (5.8) και περιλαμβάνουν πρόσθετες ρυθμίσεις. Πρώτα, τον αριθμό των τεμαχών που θα πραγματοποιήσουν την κίνηση. Το Rocfall όντας στατιστικό – πιθανοτικό πρόγραμμα, όσα περισσότερα τεμάχια αναλύσει, τόσο και πιο αξιόπιστα τα στατιστικά δεδομένα που θα εξαχθούν. Τα τεμάχια μπορούν να λάβουν τιμές από 1 έως 10000 τεμάχια.

Στην συνέχεια επιλέγεται η ελάχιστη ταχύτητα κίνησης η οποία δείχνει τι ταχύτητα πρέπει να φτάσουν τα τεμάχια για να σταματήσουν την κίνησή τους. Από το πρόγραμμα χρησιμοποιείται η τιμή 0,1 m/s.

Δίπλα από τις επιλογές των τεμαχίων επιλέγονται παράμετροι για την γωνία τριβής του πρανούς. Εκτός από την βασική επιλογή, που χρησιμοποιείται στο παράθυρο με τα υλικά και αντιστοιχεί σε 30 μοίρες από το πρόγραμμα, γίνεται ο υπολογισμός του και με βάση δύο άλλες περιπτώσεις.

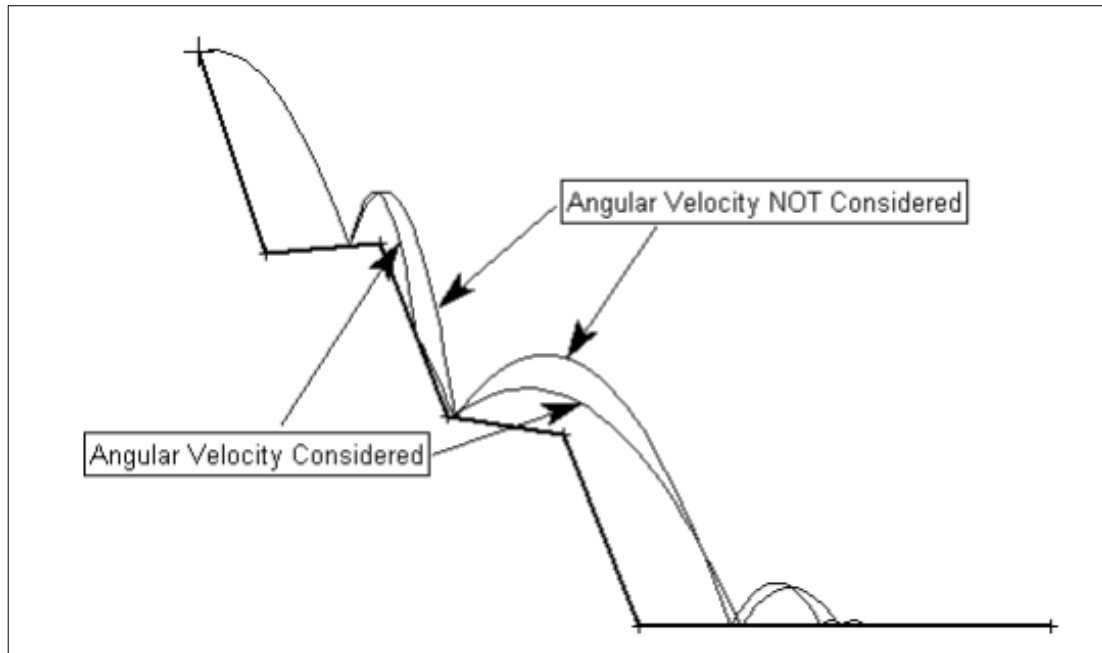
- Υπολογισμός της γωνία τριβής με βάση τον εφαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης, με χρήση της παρακάτω εξίσωσης.

$$\varphi = \frac{1-tcor}{tcor} \quad (\text{Εξ.5.1})$$

- Ορισμός της γωνίας τριβής στο 0, όπου σε αυτή την περίπτωση και με την παραδοχή του Rocfall κυκλικού σχήματος των τεμαχίων, θα πραγματοποιείται μόνο κύλιση χωρίς καθόλου τριβές. Αυτή η επιλογή αποτελεί την δυσμενέστερη αφού μπορεί να δώσει υπερβολικά μεγάλες τελικές αποστάσεις ηρεμίας τεμαχίων που δεν συνδέονται με την πραγματικότητα.

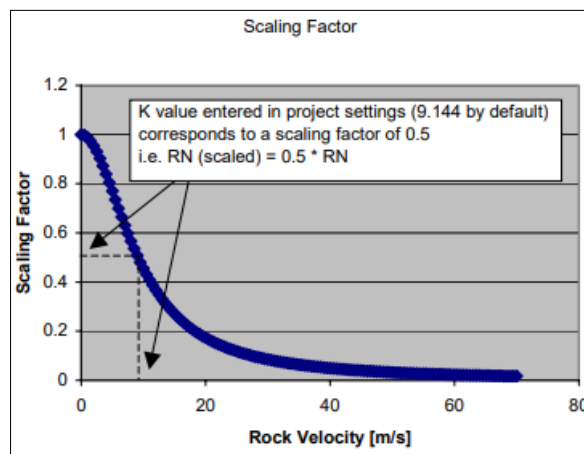
Ο αριθμός οριζόντιων αποστάσεων για ανάλυση καθορίζει πόσες τομές θα γίνουν κατά τον οριζόντιο άξονα, όπου σε κάθε τομή γίνεται ανάλυση της κατάστασης που θα βρίσκεται το κάθε τέμαχος. Στην κάθε τομή φαίνεται η κίνηση του τεμάχους αριθμητικά, όπως το ύψος αναπήδησης η ταχύτητα κ.α. Κυμαίνεται από 2 έως 1000 τομές. Όσες περισσότερες, τόσο μεγαλύτερη λεπτομέρεια θα έχουν τα διαγράμματα και τα αποτελέσματα που θα εξαχθούν.

Πολύ σημαντική παράμετρος για ανάλυση των καταπτώσεων είναι η επιλογή συνυπολογισμού της περιστροφικής ταχύτητας. Σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις καταπτώσεων συνδυάζεται και η περιστροφική κίνηση, ενώ η επιλογή της στο πρόγραμμα μεταβάλλει τα αποτελέσματα.



Εικόνα (5.9) Τροχιά με και χωρίς συνυπολογισμό περιστροφικής ταχύτητας

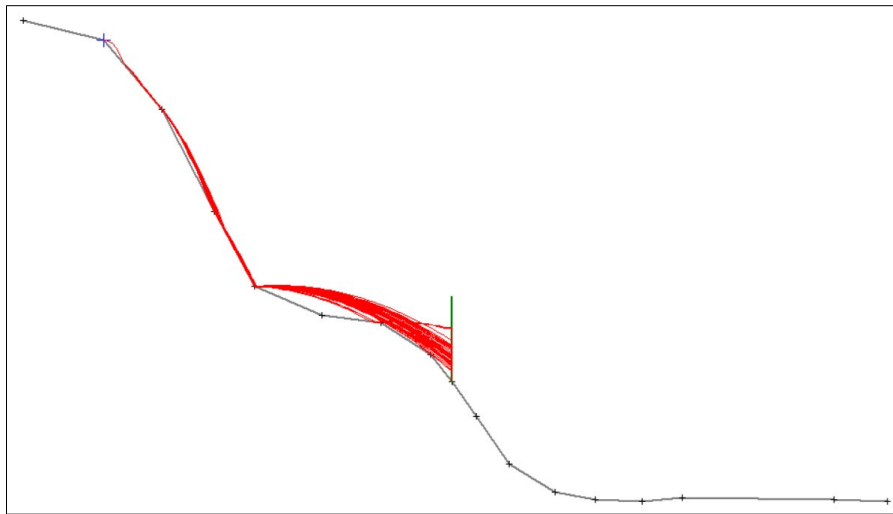
Στην περίπτωση που η σφοδρότητα της κρούσης είναι έντονη λόγω μεγάλης ταχύτητας ή μάζας, αναμένεται μεγαλύτερη απώλεια ενέργειας. Έτσι, το πρόγραμμα, δίνει δύο εξισώσεις που υπολογίζει τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης με μία παράμετρο διόρθωσης. Στην μία περίπτωση συνδυάζεται ο συντελεστής αναπήδησης με βάση την ταχύτητα, και στην δεύτερη περίπτωση συνδυάζεται με βάση την μάζα, όπου στις εξισώσεις V_{rock} είναι η ταχύτητα του τεμάχους λίγο πριν την αναπήδησή του με την επιφάνεια του πρανούς και M_{rock} η μάζα του τεμάχους. C και K είναι οι συντελεστές που επιλέγονται για την διόρθωση.



Εικόνα (5.10) Διάγραμμα επιλογής συντελεστή διόρθωσης με ταχύτητα τεμάχους

Με αντίστοιχο τρόπο, υπολογίζεται και ο συντελεστής C . Δεν γίνεται περαιτέρω ανάλυση καθώς δεν χρησιμοποιείται πολύ συχνά. Οι τελευταίες επιλογές, αφορούν στην επιλογή, της τυχαίας επιλογής των τεμαχών και τροχιών τους και στην επιλογή μην τυχειότητας που σημαίνει πως σε κάθε ανάλυση με τις ίδιες παραμέτρους θα παρουσιάζονται τα ίδια αποτελέσματα σε αντίθεση με την τυχαία που τα δεδομένα θα αλλάζουν μετά από κάθε επανάληψη.

Το Rocfall, έχει την δυνατότητα επιλογής και τοποθέτησης φράχτη ανάσχεσης. Ο φράχτης μπορεί να τοποθετηθεί σε οποιοδήποτε σημείο και είναι το μοναδικό μέτρο αντιμετώπισης καταπτώσεων που υπάρχει ως προεπιλογή.



Εικόνα (5.11) Τυπικό παράδειγμα πρανούς με φράχτη ανάσχεσης

Τέλος, μετά την εισαγωγή των δεδομένων του προβλήματος μπορούν να εξαχθούν εικόνες και διαγράμματα από τις αναλύσεις. Τα διαγράμματα που εξάγονται συνδυάζονται με το excel, το οποίο συλλέγει τα δεδομένα. Τα εξαγόμενα διαγράμματα είναι: το ύψος αναπήδησης που έχουν τα τεμάχια σε κάθε διατομή, η ολική κινητική ενέργεια, η μεταφορική κινητική ενέργεια, η περιστροφική κινητική ενέργεια, η μεταφορική και η περιστροφική ταχύτητα, ενώ το σημαντικότερο από όλα για τον έλεγχο της νέας θέσης ισορροπίας μετά την αστοχία, είναι το γράφημα της τροχιάς όπου φαίνεται το τελικό σημείο της κίνησης.

Κεφάλαιο 6

6.1 Αναλύσεις του Rocfall

Το κεφάλαιο 6 αφορά στις αναλύσεις που έγιναν με το λογισμικό Rocfall, για την διαστασιολόγηση τάφρων ανάσχεσης καταπτώσεων. Η συνολική μελέτη, παραμετροποιήθηκε ώστε να υπάρχουν αρκετά δεδομένα που να ανταποκρίνονται σε πραγματικές συνθήκες. Για αυτή την παραμετρική ανάλυση επιλέχθηκαν και τα παρακάτω δεδομένα και πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις στο Rocfall.

Πίνακας (6.1) Βασικές παράμετροι σχεδιασμού και ανάλυσης για τις τάφρους ανάσχεσης καταπτώσεων

Ύψος πρανούς	Κλίση πρανούς	Συντελεστής n_{cor}	Συντελεστής t_{cor}	Αρχική ταχύτητα
12 m	90° 80° 70° 60° 50° 40°	0,45±0,05 0,35±0,05 0,25±0,05	0,9	1 (m/s)
8 m	90° 80° 70° 60° 50° 40°	0,45±0,05 0,35±0,05 0,25±0,05	0,9	1 (m/s)
4 m	90° 80° 70° 60° 50° 40°	0,45±0,05 0,35±0,05 0,25±0,05	0,9	1 (m/s)

6.2 Επιλογές δεδομένων

Για το ύψος πρανούς επιλέχθηκαν 3 διαφορετικές τιμές. Επειδή η ανάλυση έγινε για πρανή που απαντώνται σε σύνηθες οδικό δίκτυο, η επιλογή των 12 μέτρων ως μέγιστη είναι ικανοποιητική καθώς οι κανονισμοί πλέον σπάνια επιτρέπουν πρανές ορύγματος μεγαλύτερο των 12 μέτρων χωρίς την κατασκευή αναβαθμών.

Για την κλίση των πρανών επιλέχθηκαν γωνίες από 40 έως 90°, με την ανάλυση να γίνεται ανά 10 μοίρες.

Ο συντελεστής κάθετης αναπήδησης επιλέχθηκε με τιμές 0,45, 0,35 και 0,25 διότι μεγαλύτερες τιμές, αν και συναντώνται στη βιβλιογραφία, δεν θεωρούνται αντιπροσωπευτικές και αποδίδουν πολύ μεγάλα ύψη αναπήδησης και σημαντικές αποστάσεις κίνησης. Προσδίδοντάς τυπική απόκλιση $\pm 0,05$ στον συντελεστή κάθετης αναπήδησης, το συνολικό εύρος τιμών ήταν από 0,20 – 0,50, που αποτελεί ένα εύρος αρκετά ικανοποιητικό για παραμετρική ανάλυση. Για τον εφαπτομενικό συντελεστή αναπήδησης επιλέχθηκε η τιμή 0,90. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης δεν παρουσιάζει σημαντική μεταβλητότητα και η παραπάνω τιμή είναι αντιπροσωπευτική για τα εδαφικά και βραχώδη υλικά. Εκτός από τις βασικές αυτές παραμέτρους ορίστηκαν τα ακόλουθα:

Στις αρχικές συνθήκες επιλέχθηκε οριζόντια ταχύτητα εκτόξευσης 1 m/s, που αντιστοιχεί στην περίπτωση ισχυρής σεισμικής δόνησης.

Η μάζα των τεμαχών ορίστηκε τυπικά ως 10kg, χωρίς να επηρεάζει περαιτέρω τα αποτελέσματα καθώς με το μοντέλο σημειακής μάζας που χρησιμοποιεί το λογισμικό δε επηρεάζει τη διαγραφόμενη τροχιά.

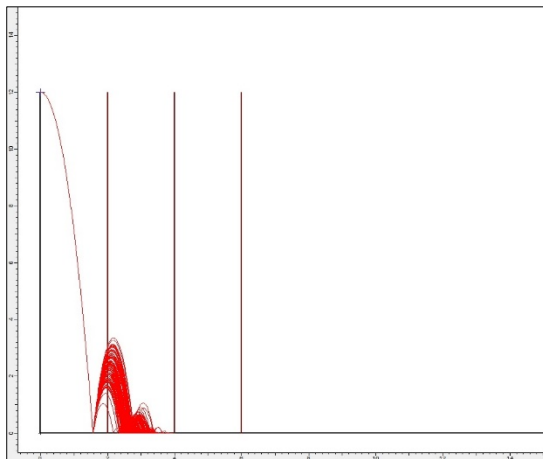
Η αρχική κατακόρυφη και η περιστροφική ταχύτητα θεωρήθηκαν μηδενικές, με την παραδοχή ότι το τέμαχος βρίσκεται σε ηρεμία στο πρανές και ολισθαίνει εξαιτίας σεισμικής δράσης. Η αρχική θέση των τεμαχών ορίστηκε στην κορυφή του πρανούς, που αποτελεί τη δυσμενέστερη παραδοχή.

Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν 100 τεμάχια, όπου μετά την πρώτη αναπήδηση λόγω της τυπικής απόκλισης του συντελεστή κάθετης αναπήδησης ακολουθούν διαφορετικές τροχιές, λαμβάνοντας υπόψη και την επίδραση της περιστροφικής ταχύτητας. Η γωνία τριβής στην επιφάνεια του πρανούς θεωρήθηκε ίση με 30°. Η τραχύτητα της επιφάνειας του πρανούς θεωρήθηκε ίση με 0.

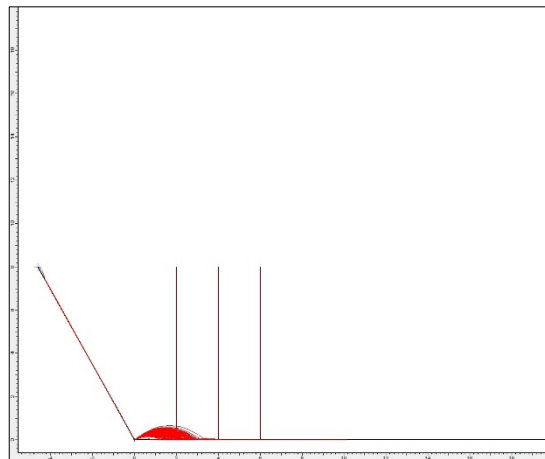
Για το πρώτο μέρος της ανάλυσης επιλέχθηκε οριζόντια τάφρος για τον έλεγχο της μέγιστης απόστασης και ύψους αναπήδησης. Στο δεύτερο μέρος της ανάλυσης, επιλέχθηκε η μελέτη τάφρων με κλίση. Εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις, με κλίση 1:3 (18,4°) και 1:6 (9,5°).

6.3 Εξαγωγή αποτελεσμάτων

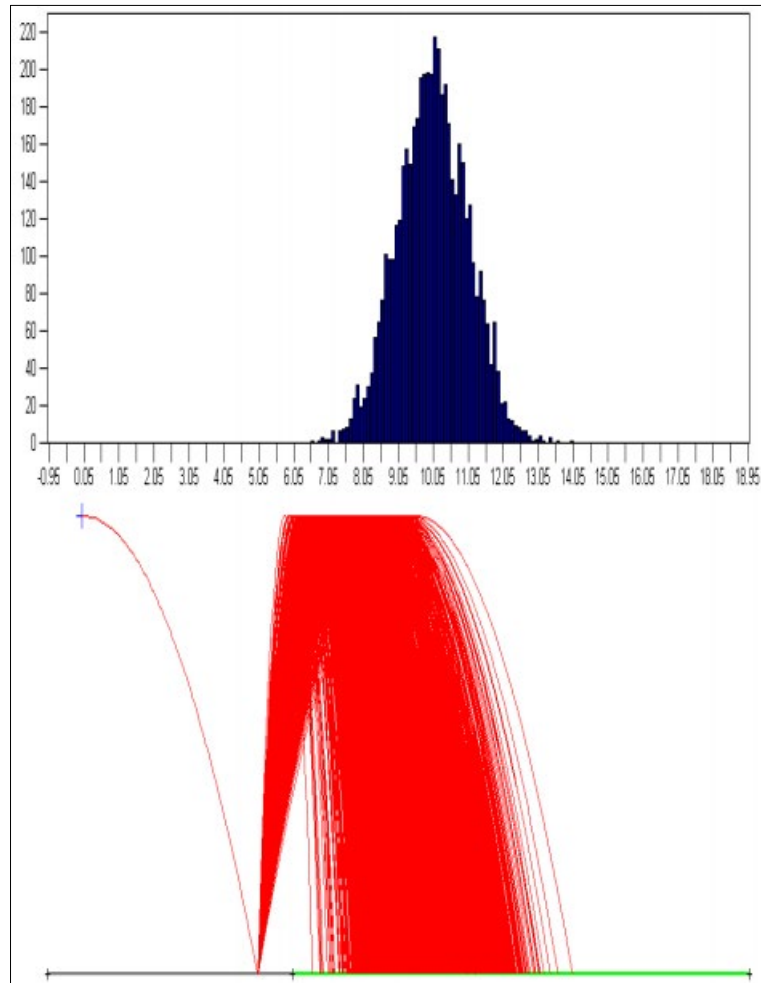
Μετά την επιλογή των δεδομένων ακολουθεί η ανάλυση. Στην ανάλυση απελευθερώνονται τεμάχια από την θέση ορισμού έναρξης της κίνησης με την αρχική ταχύτητα που επιλέχθηκε και τις υπόλοιπες παραμέτρους. Λόγω της τυπικής απόκλισης στον συντελεστή κάθετης αναπήδησης, κάθε τεμάχιο θα πραγματοποιήσει την δική του τροχιά μέχρι να καταλήξει στο τελικό σημείο. Το διάγραμμα τελικής θέσης τεμαχίου, ακολουθεί την κανονική κατανομή, με την πλειοψηφία των τεμαχίων, να καταλήγουν στο μέσο. Στις Εικόνες (6.1) και (6.2), επιλέχθηκαν τυχαία δύο εξαγόμενες εικόνες από την διαδικασία των αναλύσεων, για να φανεί η συνολική μορφή των τροχιών των τεμαχίων.



Εικόνα (6.1) 90/12/0.45 Ανάλυση



Εικόνα(6.2) 60/8/0.25 Ανάλυση



Εικόνα (6.3) Ανάλυση τροχιών πολλών τεμαχών και διάγραμμα Αριθμού τεμαχών – Απόσταση ηρεμίας, Ακολουθεί την κανονική κατανομή

6.4 Ανάλυση αποτελεσμάτων

Από τα αποτελέσματα που παράγει το Rocfall έγινε χρήση του ύψους αναπήδησης και του τελικού σημείου της κίνησης, τα οποία επηρεάζουν τη διαστασιολόγηση των τάφρων ανάσχεσης. Όπως έχει προαναφερθεί και στο Κεφάλαιο 3, για έναν συνδυασμό κόστους/συγκράτησης τεμαχών, απαιτείται η επιλογή ποσοστού συγκράτησης. Στην περίπτωση ύπαρξης τάφρου σε δρόμο επαρχιακό περιορισμένης χρήσης δεν συμφέρει η διαστασιολόγηση τάφρου για συγκράτηση όλων των τεμαχών διότι το κόστος θα είναι πολύ μεγάλο, χωρίς να υπάρχει πρακτικά κάποιο όφελος. Στην περίπτωση σημαντικών επαρχιακών δρόμων, όπου η κυκλοφορία είναι μεγάλη το ποσοστό συγκράτησης μπορεί να φτάσει την τάξη του 95% και άνω. Για την προκειμένη ανάλυση μελετήθηκαν τα P50, P95 και P100, δηλαδή η οριζόντια απόσταση που έφτασε το 50%, το 95% και το 100% των τεμαχών. Αντίστοιχα, για τα ύψη αναπήδησης μετρήθηκαν τα ύψη που θα έχουν τα τεμάχια σε 1,2,3,4 και 5 μέτρα οριζόντια προς την πλευρά του δρόμου με αρχικό σημείο μέτρησης τον πόδα του πρανούς. Όλα τα παραπάνω προσδιορίστηκαν για τις τρεις περιπτώσεις τάφρου, οριζόντια, κλίσης 1:3 και 1:6, ώστε να προκύψουν αποστάσεις και αναπηδήσεις για την διαστασιολόγηση των τάφρων ανάσχεσης.

6.4.1 Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων εξάχθηκαν από το πρόγραμμα σε μορφή excel. Ύστερα από διαμόρφωση και επεξεργασία, καταρτίστηκαν πίνακες για τις περιπτώσεις ανάλυσης που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 6.4.

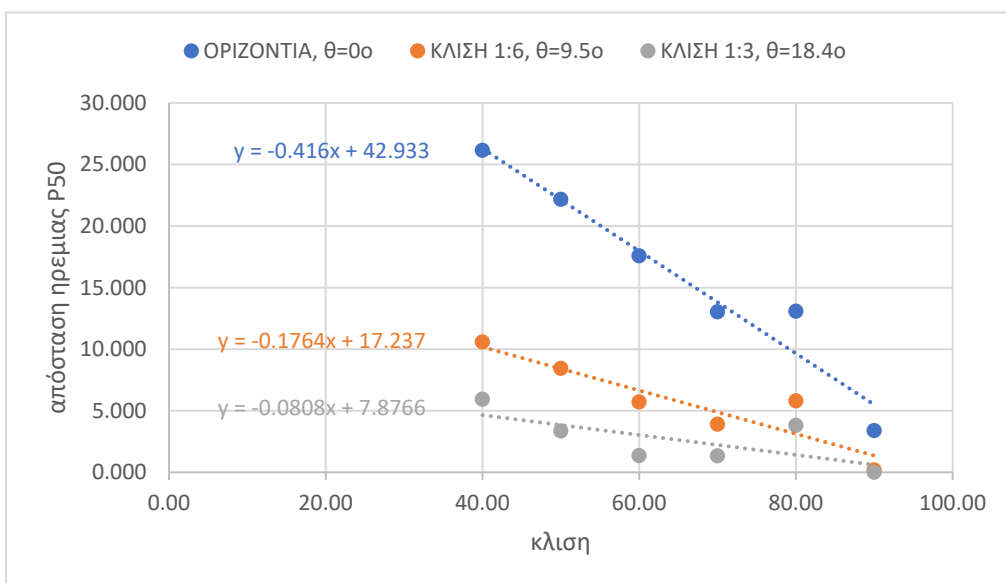
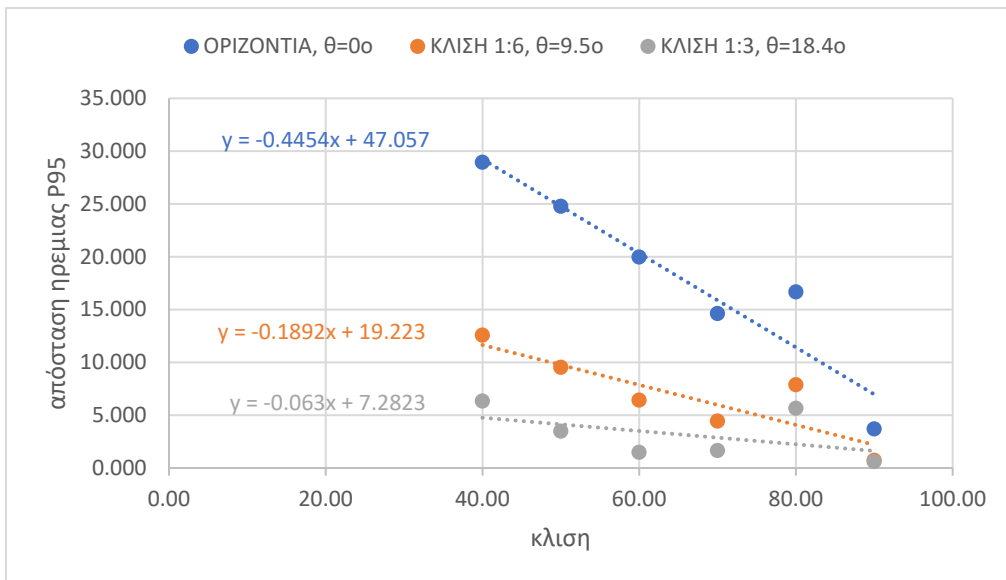
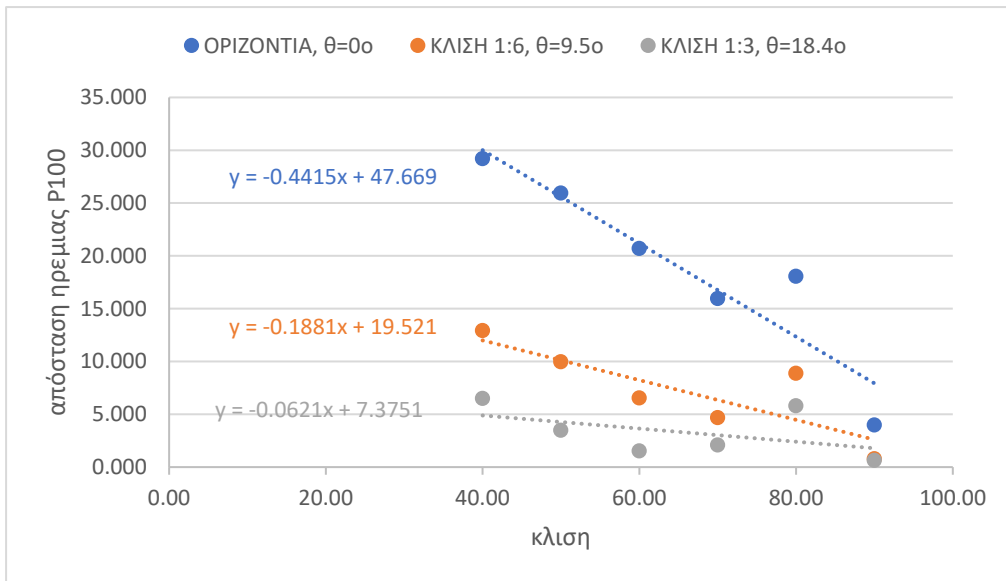
6.4.1.1 Αποτελέσματα αναλύσεων σε ύψος πρανούς 12 μέτρα με συντελεστή κάθετης αναπήδησης 0,45

ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ, $\theta=0^\circ$								
Κλίση Μοίρες	Απόσταση ηρεμίας			Μέγιστο ύψος αναπήδησης				
	P ₅₀	P ₉₅	P ₁₀₀	H _{I=1m}	H _{I=2m}	H _{I=3m}	H _{I=4m}	H _{I=5m}
90	3,377	3,693	3,973	6,902	1,638	0,765	0,127	0,000
80	13,078	16,661	18,051	1,426	2,330	2,711	2,569	1,905
70	13,020	14,606	15,950	1,341	2,262	2,683	2,611	2,080
60	17,572	19,959	20,698	1,005	1,731	2,130	2,245	2,052
50	22,160	24,769	25,944	0,789	1,399	1,797	2,008	2,031
40	26,140	28,938	29,196	0,532	0,928	1,184	1,298	1,270

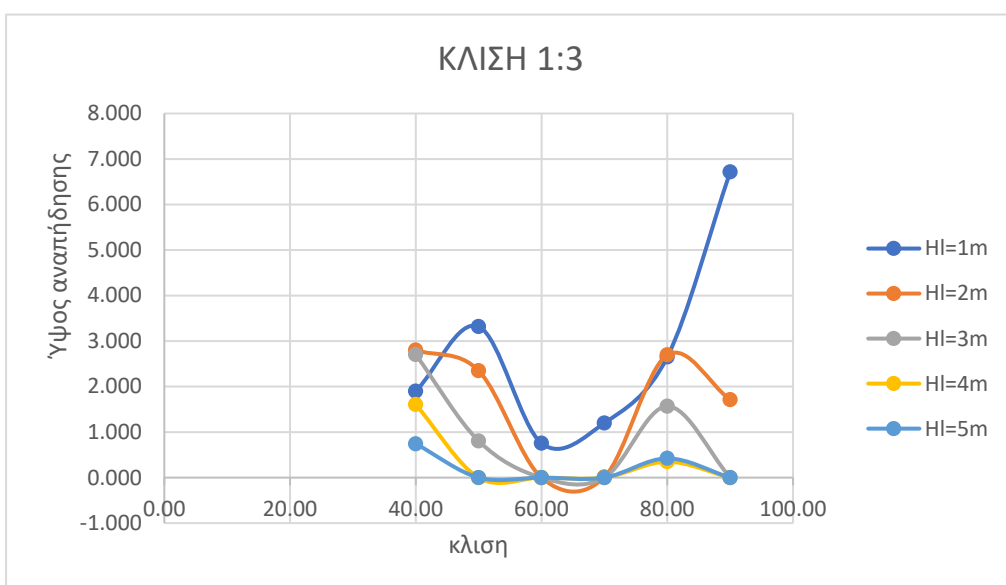
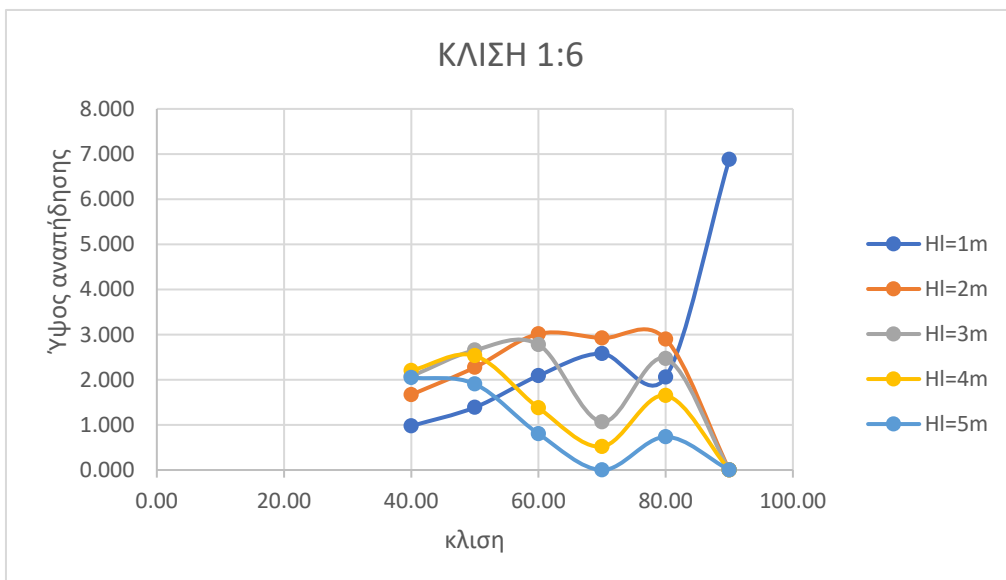
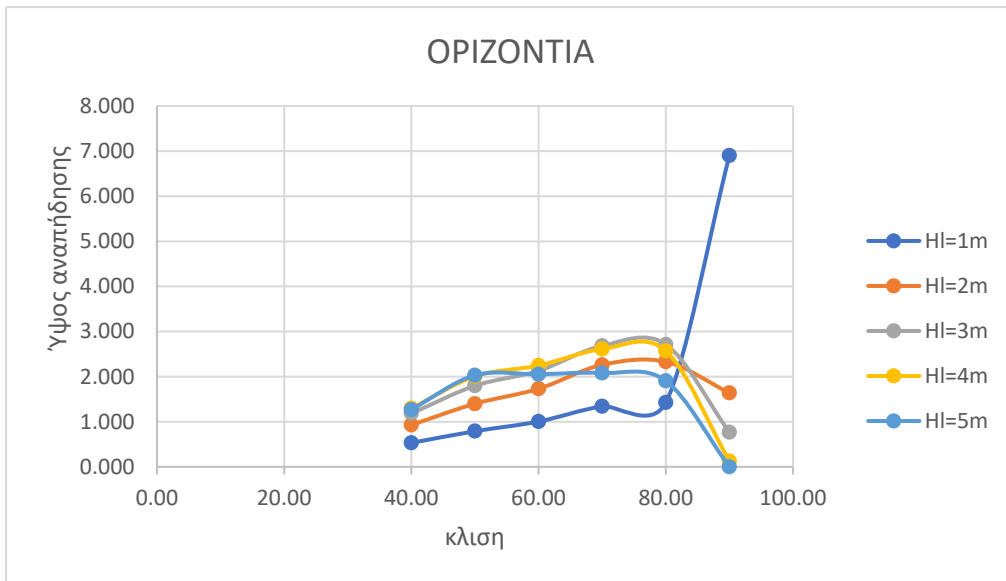
ΚΛΙΣΗ 1:6, $\theta=9.5^\circ$								
Κλίση Μοίρες	Απόσταση ηρεμίας			Μέγιστο ύψος αναπήδησης				
	P ₅₀	P ₉₅	P ₁₀₀	H _{I=1m}	H _{I=2m}	H _{I=3m}	H _{I=4m}	H _{I=5m}
90	0,175	0,719	0,788	6,882	0,000	0,000	0,000	0,000
80	5,802	7,867	8,876	2,057	2,899	2,468	1,651	0,733
70	3,901	4,434	4,677	2,581	2,925	1,066	0,519	0,000
60	5,707	6,408	6,546	2,089	3,015	2,778	1,378	0,802
50	8,433	9,528	9,967	1,388	2,273	2,655	2,532	1,905
40	10,587	12,575	12,925	0,975	1,668	2,077	2,204	2,048

ΚΛΙΣΗ 1:3, $\theta=18.4^\circ$								
Κλίση Μοίρες	Απόσταση ηρεμίας			Μέγιστο ύψος αναπήδησης				
	P ₅₀	P ₉₅	P ₁₀₀	H _{I=1m}	H _{I=2m}	H _{I=3m}	H _{I=4m}	H _{I=5m}
90	0,000	0,588	0,636	6,715	1,711	0,000	0,000	0,000
80	3,814	5,638	5,805	2,649	2,695	1,568	0,349	0,422
70	1,321	1,635	2,087	1,199	0,012	0,000	0,000	0,000
60	1,355	1,481	1,531	0,754	0,000	0,000	0,000	0,000
50	3,355	3,468	3,480	3,320	2,347	0,805	0,000	0,000
40	5,921	6,328	6,490	1,896	2,800	2,702	1,605	0,742

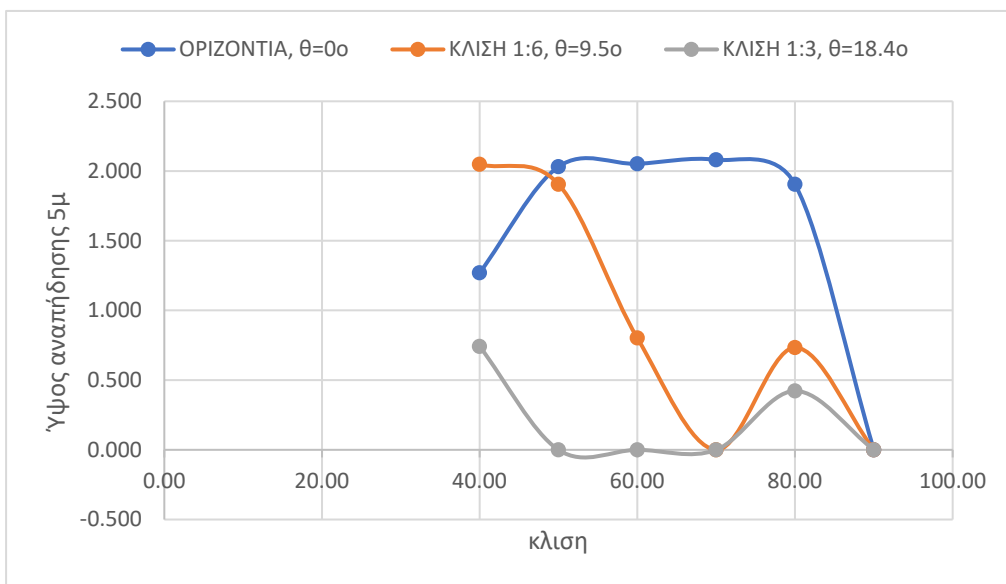
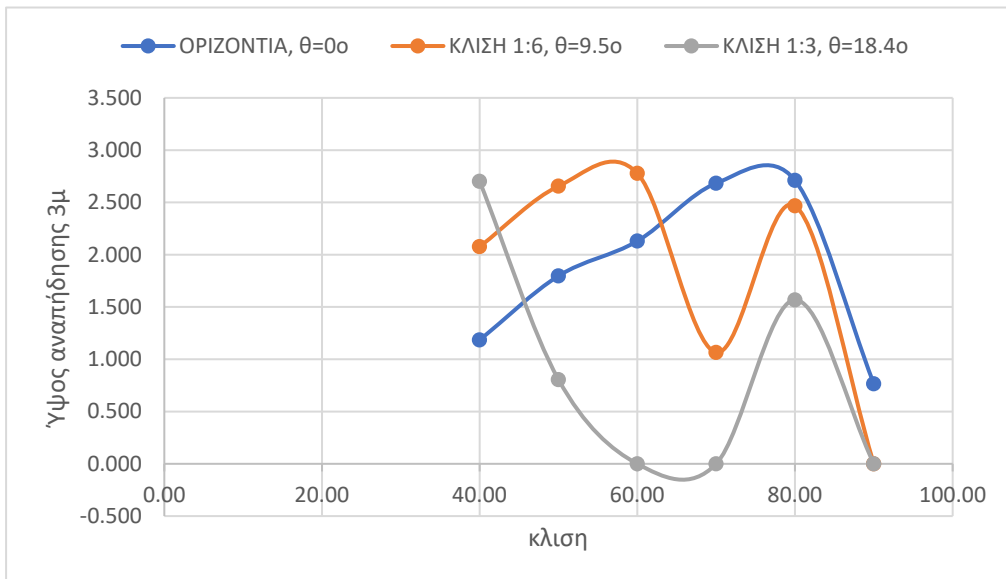
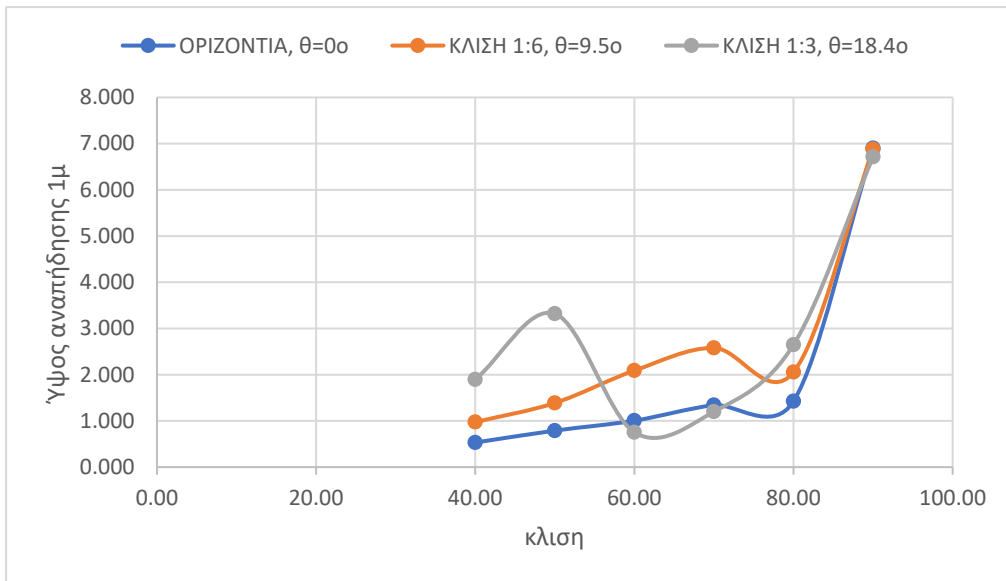
Πίνακας (6.2) Αποτελέσματα αναλύσεων σε ύψος πρανούς 12 μέτρα με συντελεστή κάθετης αναπήδησης 0,45



Διαγράμματα (6.1),(6.2),(6.3) Διαγράμματα απόστασης ηρεμίας συναρτήσει κλίσης πρανούς για P100, P95 και P50.



Διαγράμματα (6.4),(6.5),(6.6) Διαγράμματα ύψους αναπήδησης συναρτήσεσι κλίσεσι πρανούσι για οριζόντιες αποστάσεις από τον πόδα του πρανούσι 1,2,3,4 και 5 μέτρα.



Διαγράμματα (6.7),(6.8),(6.9) Διαγράμματα ύψους αναπήδησης σε 1,3 και 5 μέτρα οριζόντιας απόστασης από τον πόδα του πρανούς συναρτήσει της κλίσης πρανούς

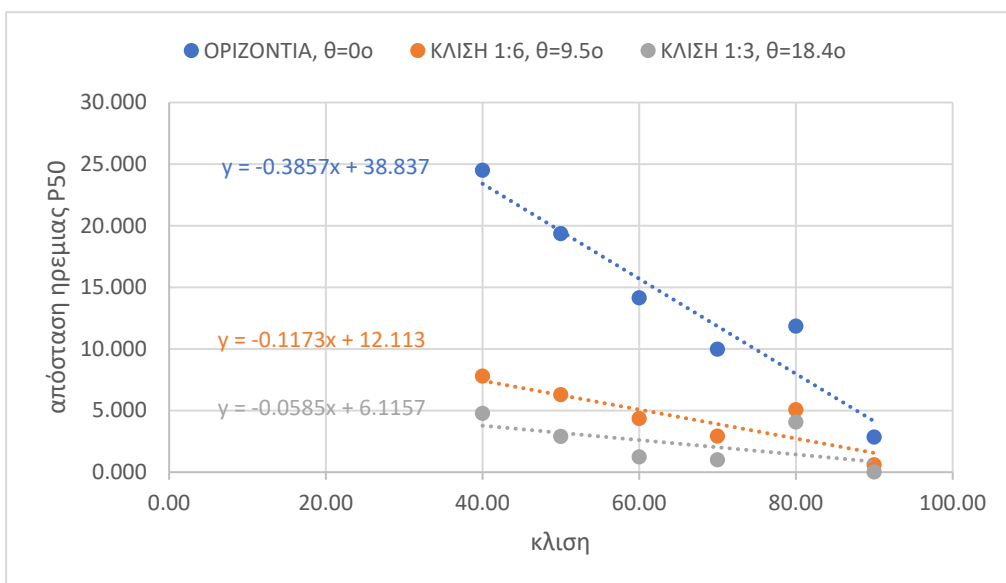
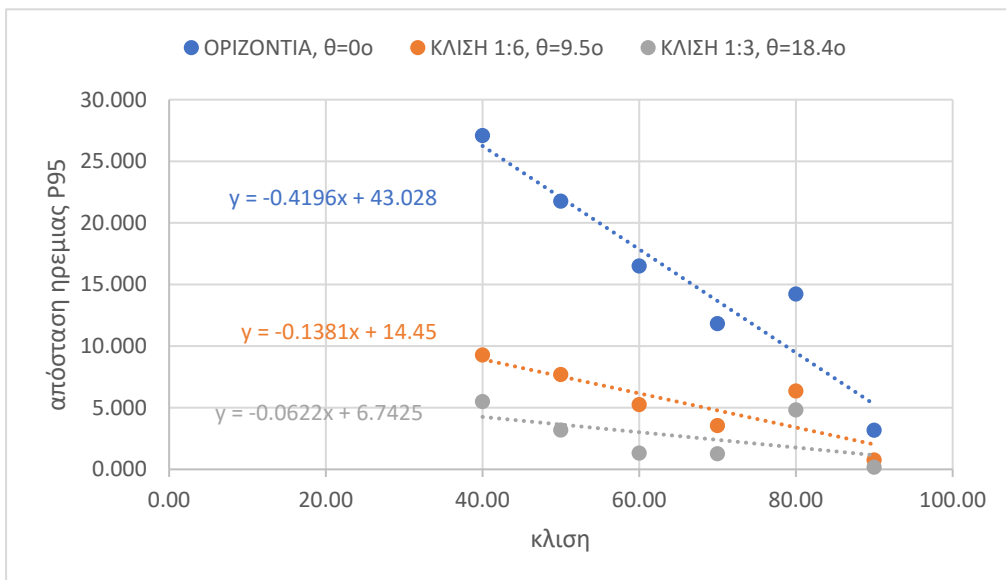
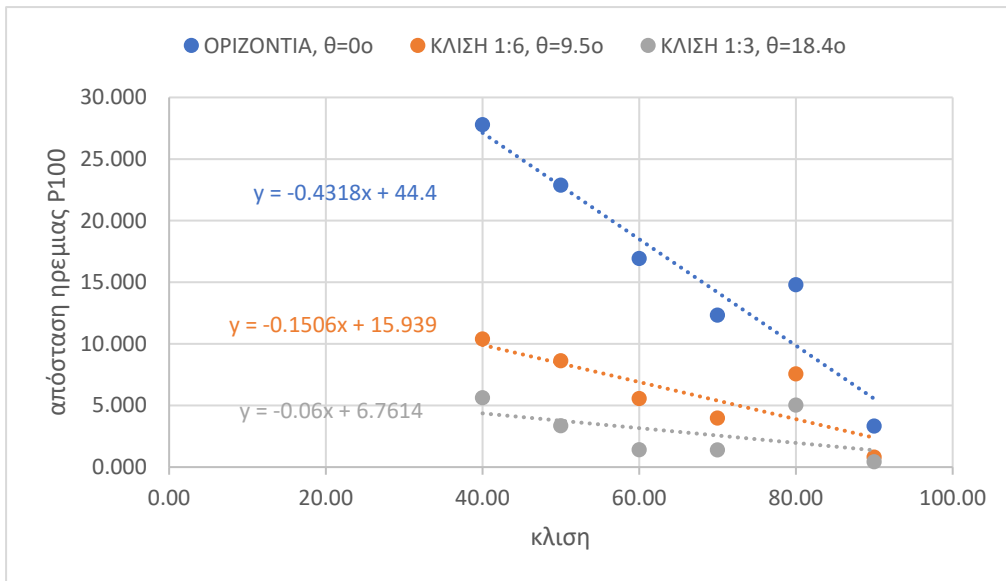
6.4.1.2 Αποτελέσματα αναλύσεων σε ύψος πρανού 12 μέτρα με συντελεστή κάθετης αναπήδησης 0,35

ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ, $\theta=0^\circ$								
Κλίση	Απόσταση ηρεμίας			Μέγιστο ύψος αναπήδησης				
Μοίρες	P ₅₀	P ₉₅	P ₁₀₀	H _{I=1m}	H _{I=2m}	H _{I=3m}	H _{I=4m}	H _{I=5m}
90	2,831	3,169	3,325	6,902	1,202	0,240	0,000	0,000
80	11,834	14,218	14,793	1,030	1,502	1,418	0,976	0,382
70	9,966	11,816	12,317	1,074	1,629	1,673	1,174	0,399
60	14,128	16,491	16,922	0,839	1,367	1,597	1,490	1,080
50	19,344	21,755	22,872	0,643	1,094	1,349	1,398	1,256
40	24,491	27,082	27,780	0,416	0,695	0,828	0,818	0,662

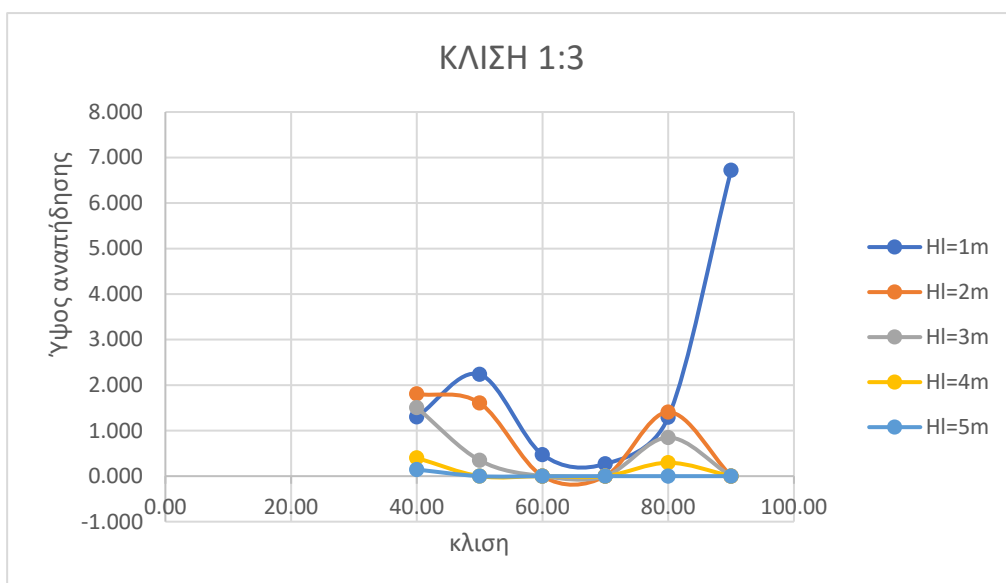
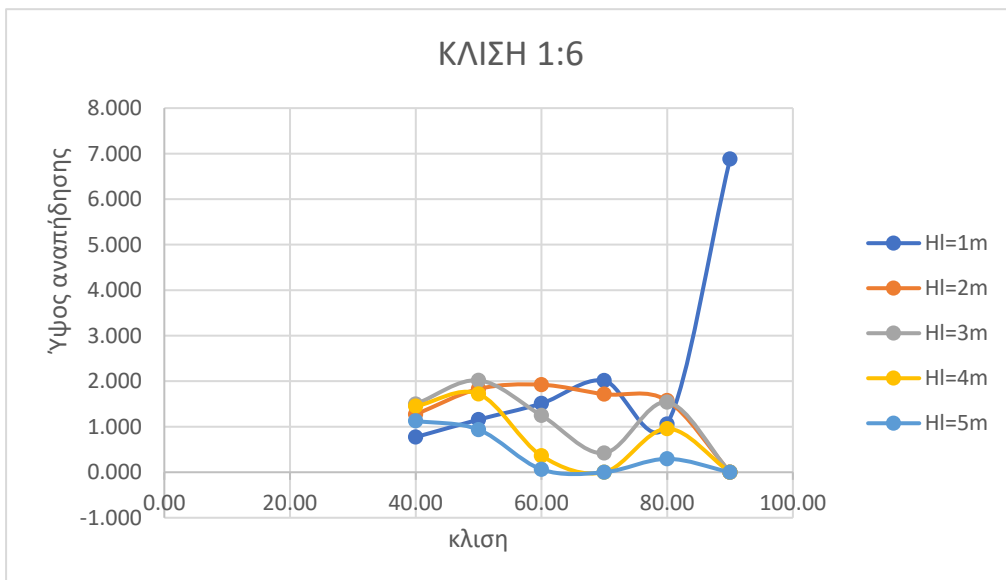
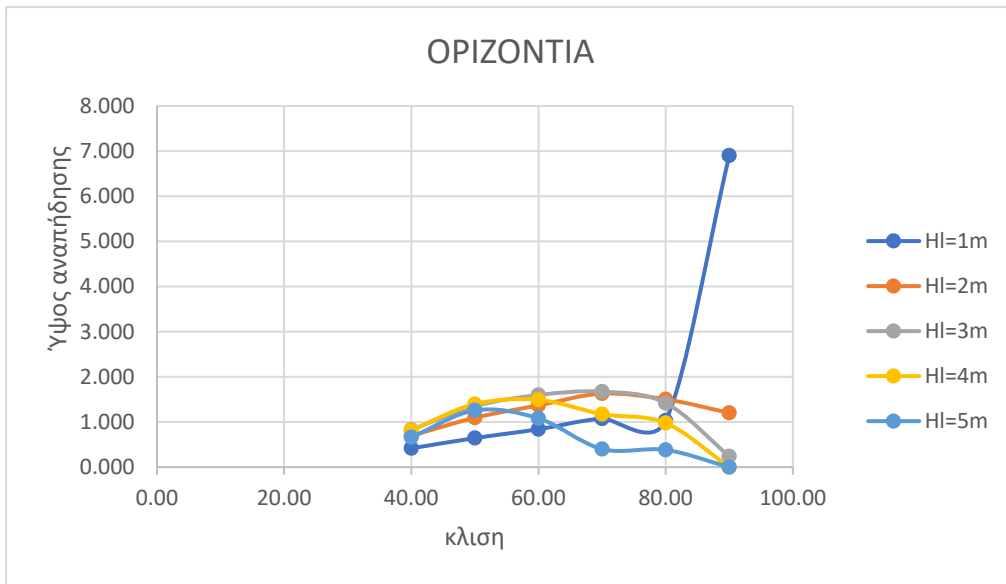
ΚΛΙΣΗ 1:6, $\theta=9.5^\circ$								
Κλίση	Απόσταση ηρεμίας			Μέγιστο ύψος αναπήδησης				
Μοίρες	P ₅₀	P ₉₅	P ₁₀₀	H _{I=1m}	H _{I=2m}	H _{I=3m}	H _{I=4m}	H _{I=5m}
90	0,592	0,747	0,802	6,882	0,000	0,000	0,000	0,000
80	5,049	6,345	7,556	1,058	1,573	1,539	0,957	0,294
70	2,909	3,536	3,967	2,013	1,714	0,422	0,000	0,000
60	4,344	5,242	5,560	1,511	1,923	1,247	0,361	0,063
50	6,272	7,688	8,621	1,157	1,830	2,018	1,719	0,936
40	7,779	9,269	10,388	0,772	1,272	1,498	1,450	1,129

ΚΛΙΣΗ 1:3, $\theta=18.4^\circ$								
Κλίση	Απόσταση ηρεμίας			Μέγιστο ύψος αναπήδησης				
Μοίρες	P ₅₀	P ₉₅	P ₁₀₀	H _{I=1m}	H _{I=2m}	H _{I=3m}	H _{I=4m}	H _{I=5m}
90	0,000	0,165	0,422	6,720	0,000	0,000	0,000	0,000
80	4,051	4,818	5,016	1,295	1,407	0,849	0,294	0,000
70	0,984	1,253	1,378	0,270	0,000	0,000	0,000	0,000
60	1,219	1,309	1,399	0,472	0,000	0,000	0,000	0,000
50	2,880	3,182	3,346	2,236	1,606	0,348	0,000	0,000
40	4,750	5,486	5,618	1,302	1,806	1,504	0,400	0,145

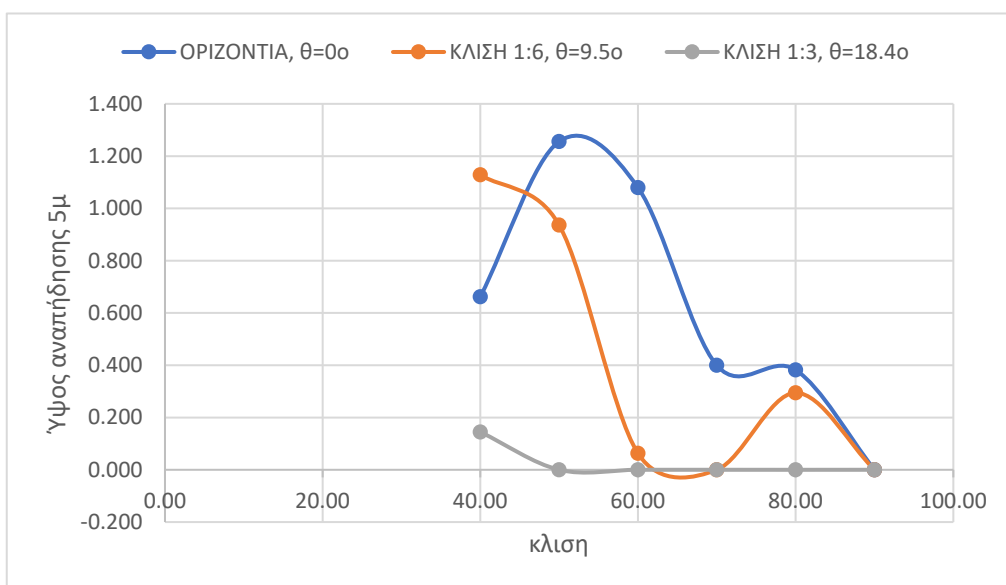
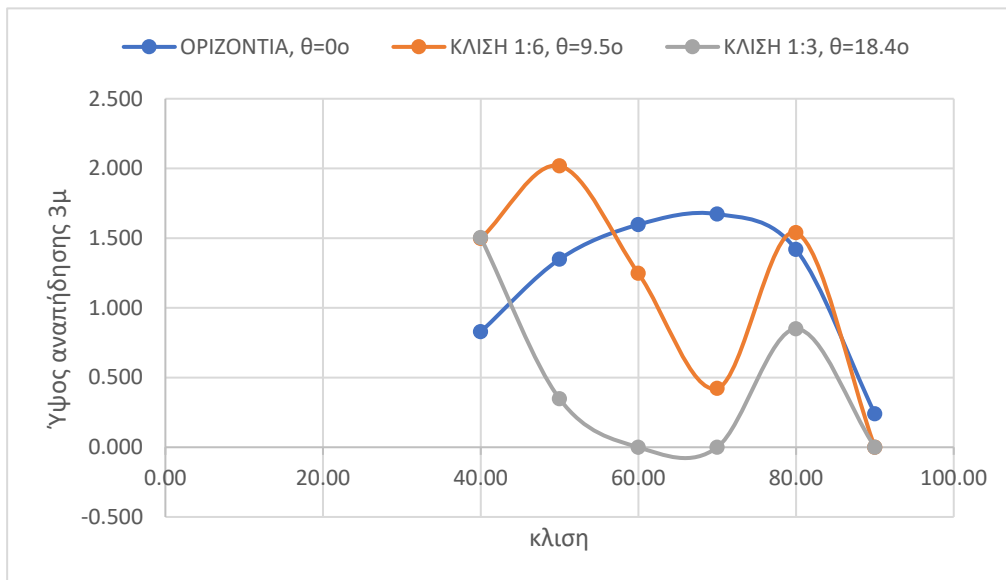
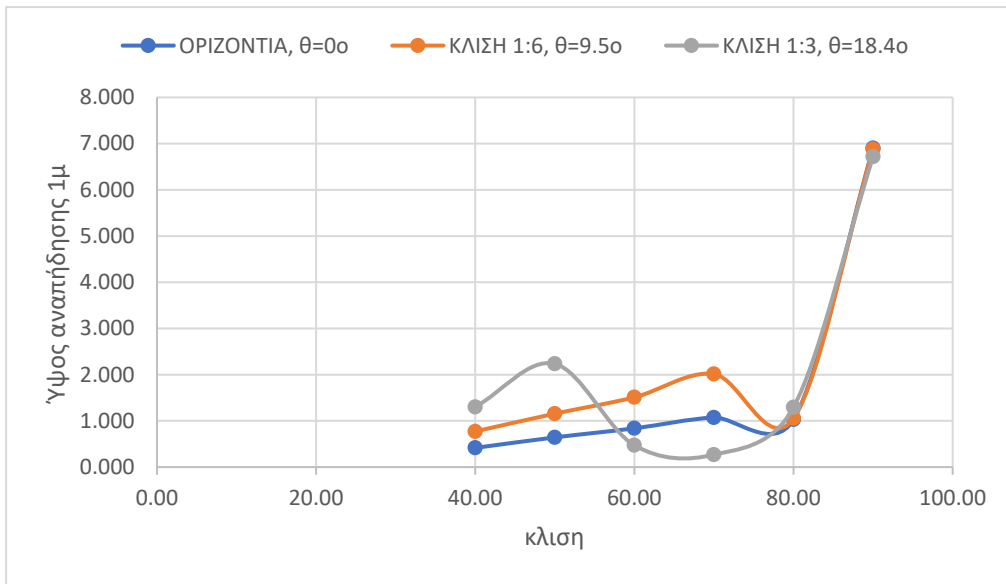
Πίνακας (6.3) Αποτελέσματα αναλύσεων σε ύψος πρανού 12 μέτρα με συντελεστή κάθετης αναπήδησης 0,35



Διαγράμματα (6.10),(6.11),(6.12) Διαγράμματα απόστασης ηρεμίας συναρτήσει κλίσης πρανούς για P100, P95 και P50.



Διαγράμματα (6.13),(6.14),(6.15) Διαγράμματα ύψους αναπήδησης συναρτήσει κλίσης πρανούς για οριζόντιες αποστάσεις από τον πόδα του πρανούς 1,2,3,4 και 5 μέτρα.



Διαγράμματα (6.16),(6.17),(6.18) Διαγράμματα ύψους αναπήδησης σε 1,3 και 5 μέτρα οριζόντιας απόστασης από τον πόδα του πρανούς συναρτήσει της κλίσης πρανούς

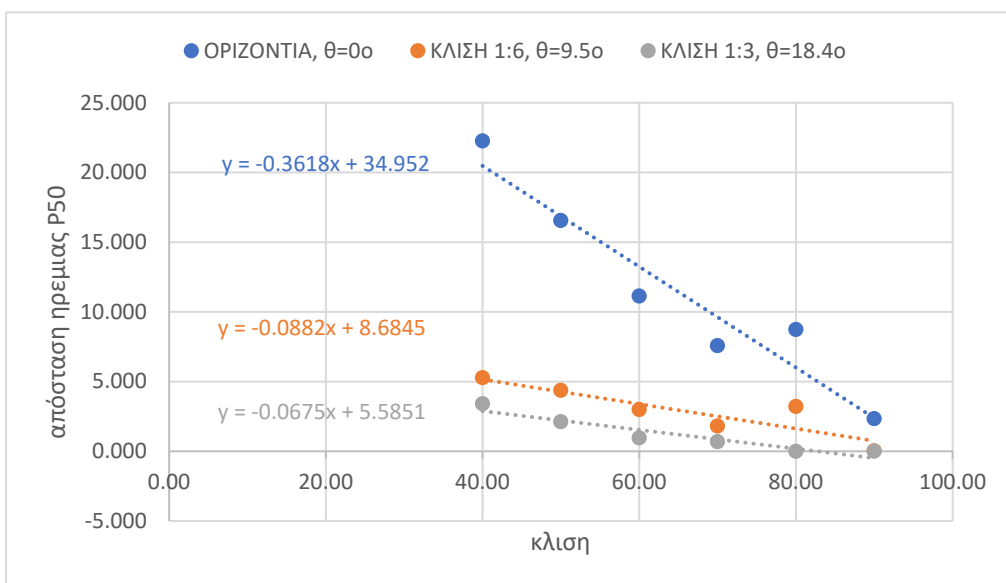
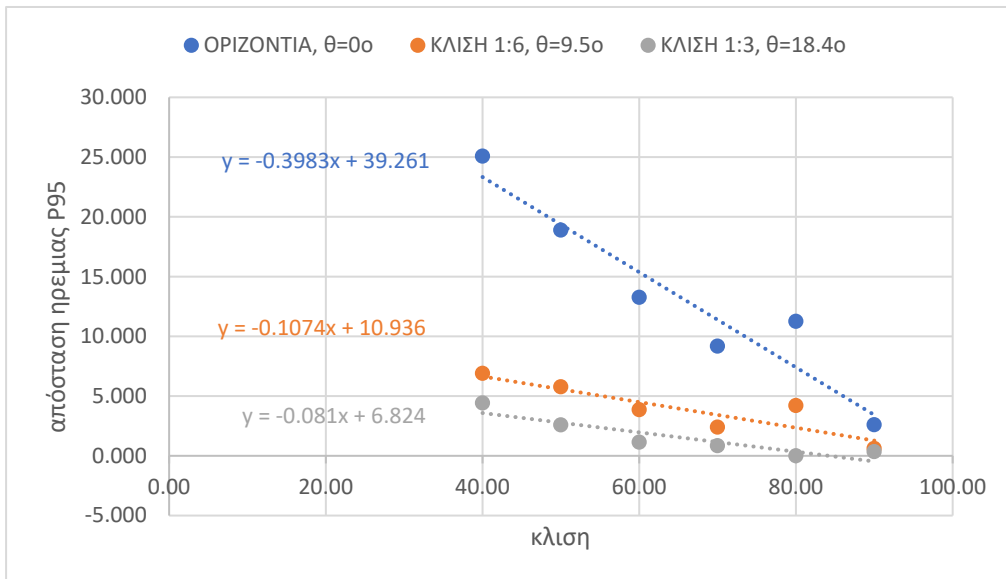
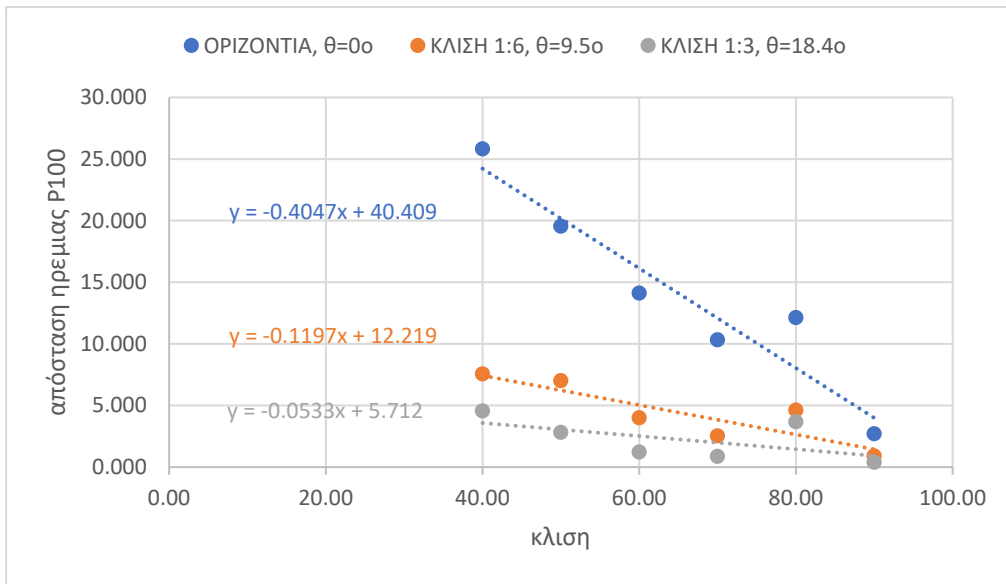
6.4.1.3 Αποτελέσματα αναλύσεων σε ύψος πρανούς 12 μέτρα με συντελεστή κάθετης αναπήδησης 0,25

ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ, $\theta=0^\circ$								
Κλίση Μοίρες	Απόσταση ηρεμίας			Μέγιστο ύψος αναπήδησης				
	P ₅₀	P ₉₅	P ₁₀₀	H _{I=1m}	H _{I=2m}	H _{I=3m}	H _{I=4m}	H _{I=5m}
90	2,336	2,597	2,698	6,902	0,224	0,000	0,000	0,000
80	8,728	11,249	12,128	0,612	0,822	0,633	0,144	0,022
70	7,577	9,179	10,317	0,969	1,407	1,292	0,585	0,081
60	11,138	13,265	14,119	0,637	0,941	0,911	0,533	0,100
50	16,554	18,882	19,541	0,469	0,735	0,782	0,628	0,243
40	22,257	25,077	25,819	0,350	0,543	0,589	0,490	0,247

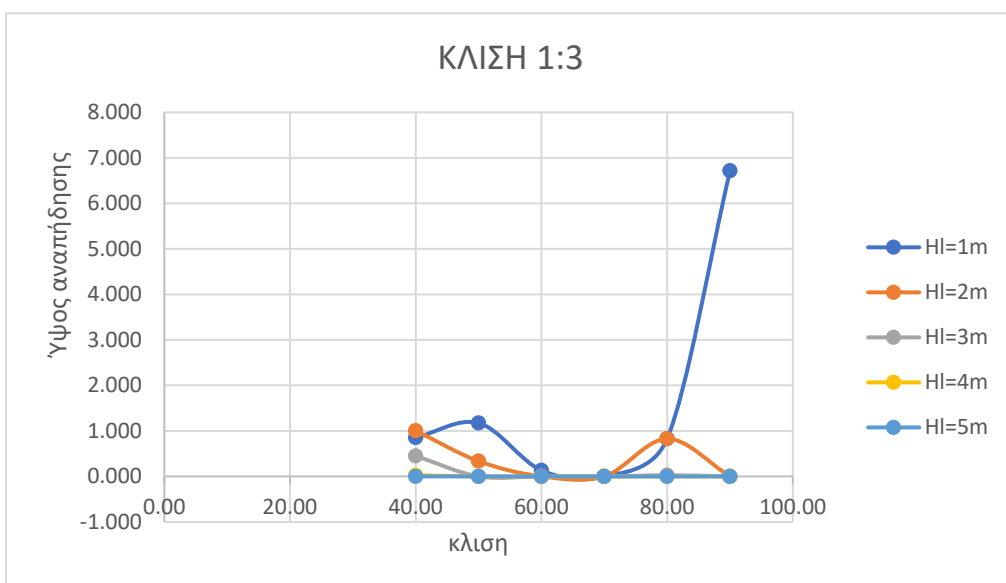
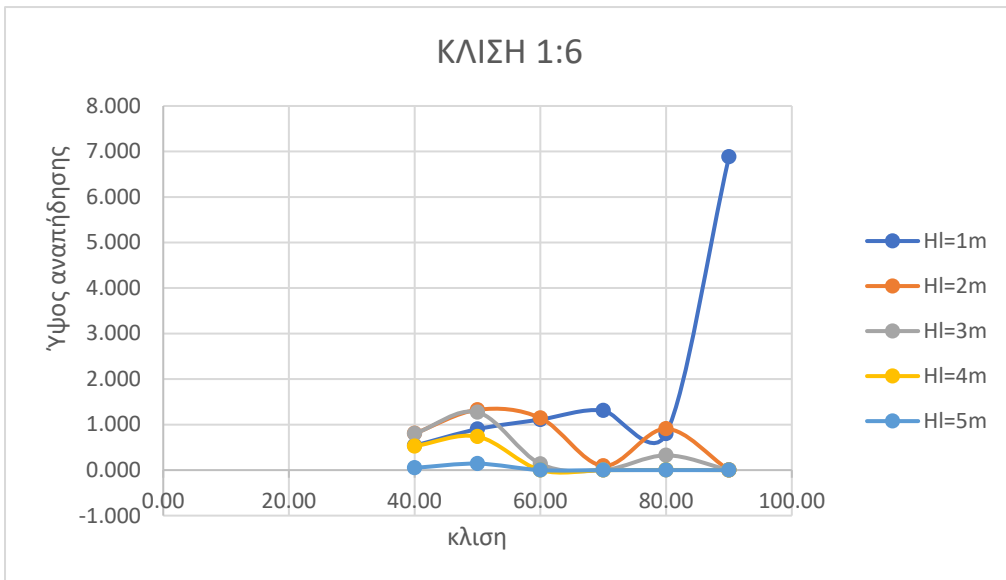
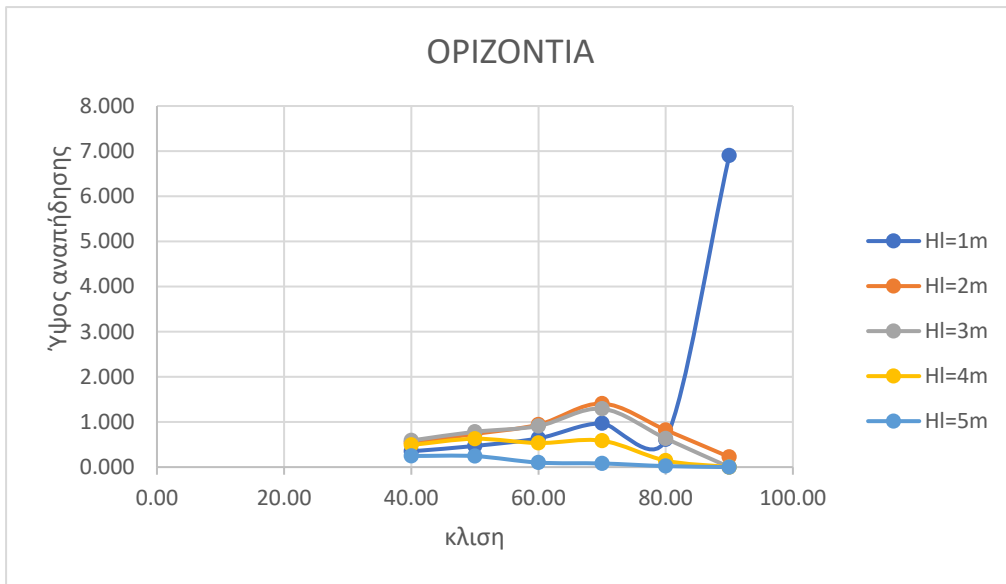
ΚΛΙΣΗ 1:6, $\theta=9.5^\circ$								
Κλίση Μοίρες	Απόσταση ηρεμίας			Μέγιστο ύψος αναπήδησης				
	P ₅₀	P ₉₅	P ₁₀₀	H _{I=1m}	H _{I=2m}	H _{I=3m}	H _{I=4m}	H _{I=5m}
90	0,033	0,612	0,908	6,882	0,000	0,000	0,000	0,000
80	3,213	4,205	4,615	0,799	0,907	0,324	0,003	0,000
70	1,809	2,402	2,525	1,311	0,093	0,000	0,000	0,000
60	2,987	3,859	4,002	1,111	1,145	0,136	0,000	0,000
50	4,368	5,773	7,009	0,901	1,324	1,271	0,737	0,142
40	5,282	6,895	7,558	0,538	0,806	0,802	0,527	0,050

ΚΛΙΣΗ 1:3, $\theta=18.4^\circ$								
Κλίση Μοίρες	Απόσταση ηρεμίας			Μέγιστο ύψος αναπήδησης				
	P ₅₀	P ₉₅	P ₁₀₀	H _{I=1m}	H _{I=2m}	H _{I=3m}	H _{I=4m}	H _{I=5m}
90	0,011	0,352	0,378	6,715	0,000	0,000	0,000	0,000
80	0,000	0,000	3,675	0,827	0,827	0,026	0,000	0,000
70	0,680	0,847	0,869	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
60	0,958	1,130	1,211	0,132	0,000	0,000	0,000	0,000
50	2,122	2,589	2,810	1,173	0,335	0,000	0,000	0,000
40	3,409	4,416	4,557	0,851	1,003	0,449	0,024	0,000

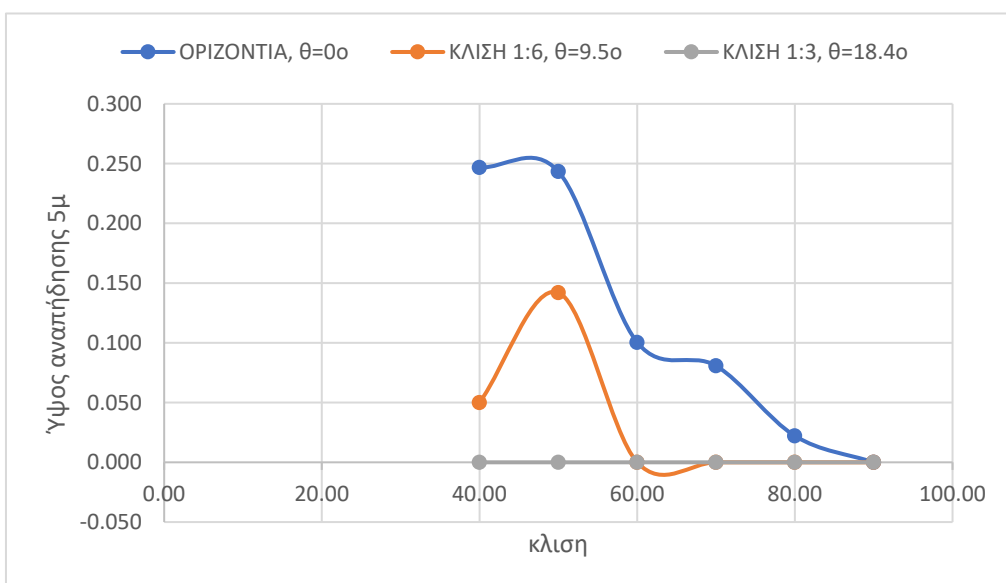
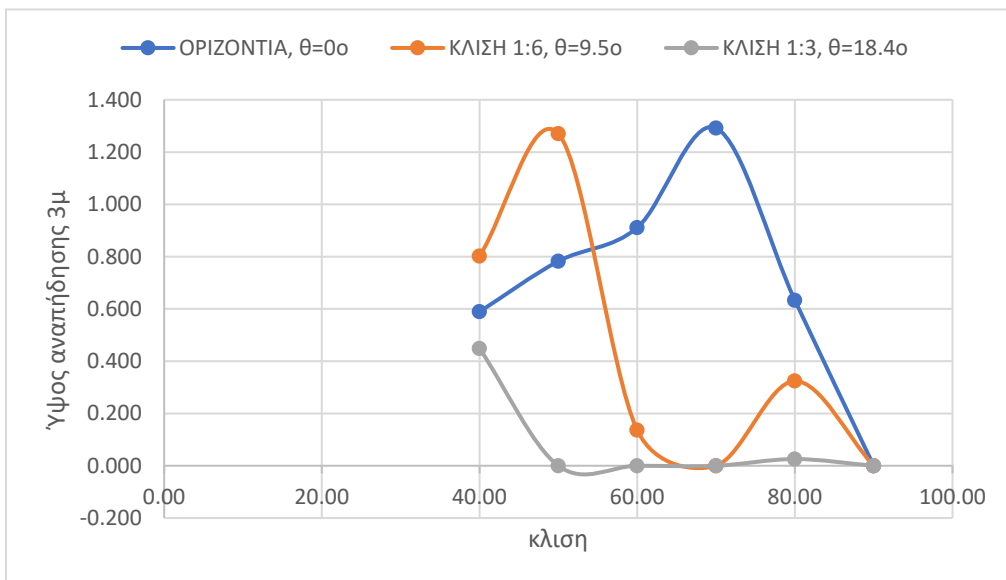
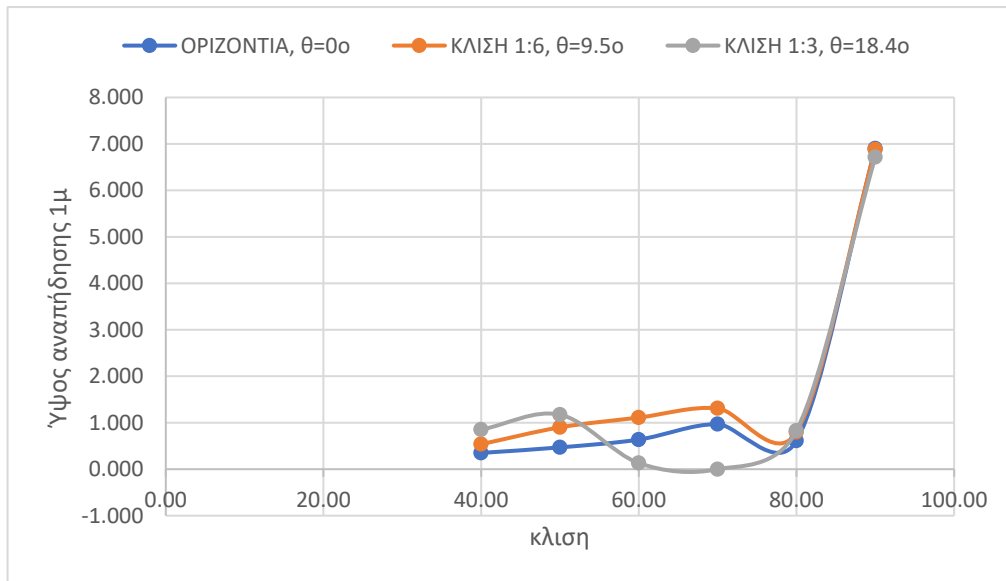
Πίνακας (6.4) Αποτελέσματα αναλύσεων σε ύψος πρανούς 12 μέτρα με συντελεστή κάθετης αναπήδησης 0,25



Διαγράμματα (6.19),(6.20),(6.21) Διαγράμματα απόστασης ηρεμίας συναρτήσει κλίσης πρανούς για P100, P95 και P50.



Διαγράμματα (6.22),(6.23),(6.24) Διαγράμματα ύψους αναπήδησης συναρτήσει κλίσης πρανούς για οριζόντιες αποστάσεις από τον πόδα του πρανούς 1,2,3,4 και 5 μέτρα.



Διαγράμματα (6.25),(6.26),(6.27) Διαγράμματα ύψους αναπήδησης σε 1,3 και 5 μέτρα οριζόντιας απόστασης από τον πόδα του πρανούς συναρτήσει της κλίσης πρανούς

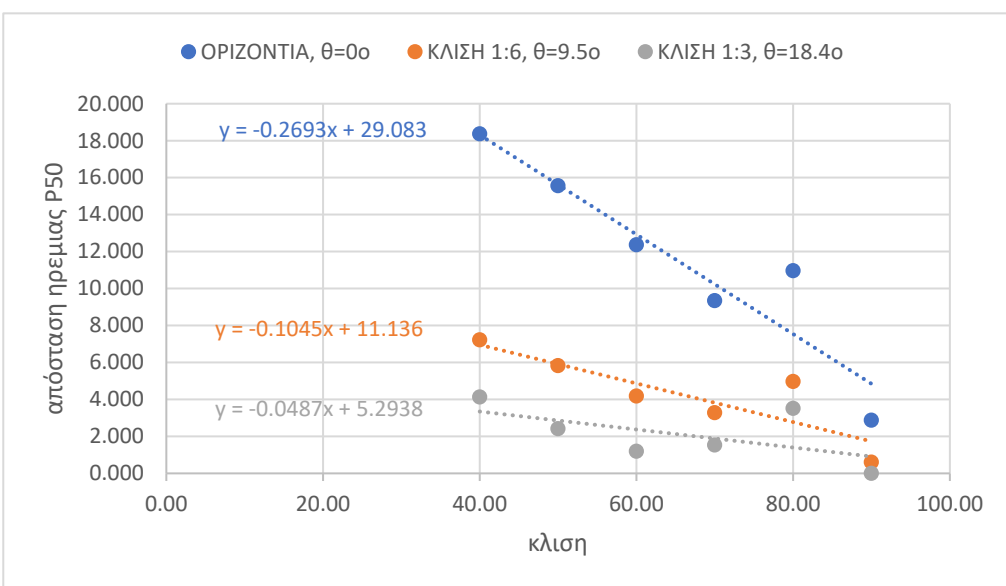
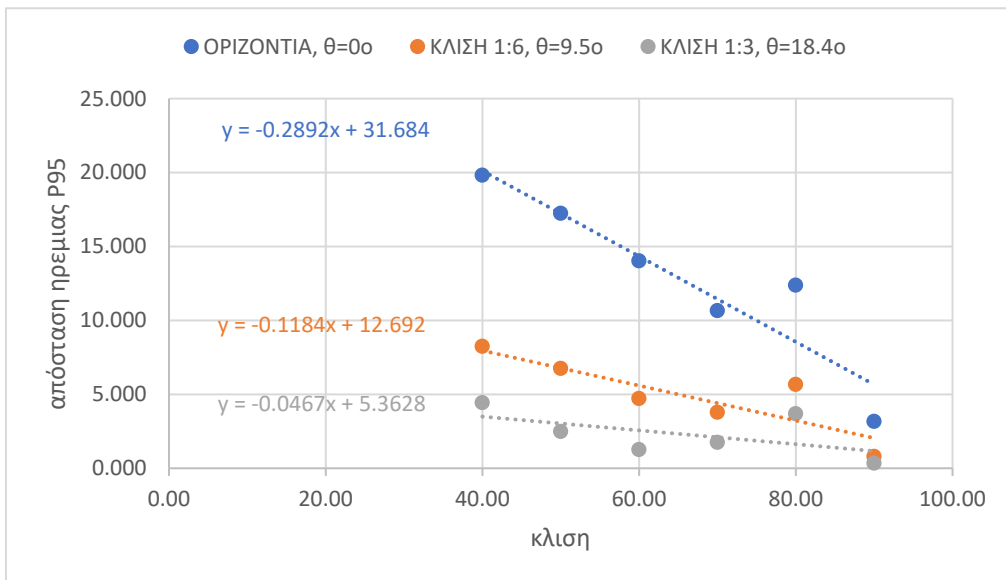
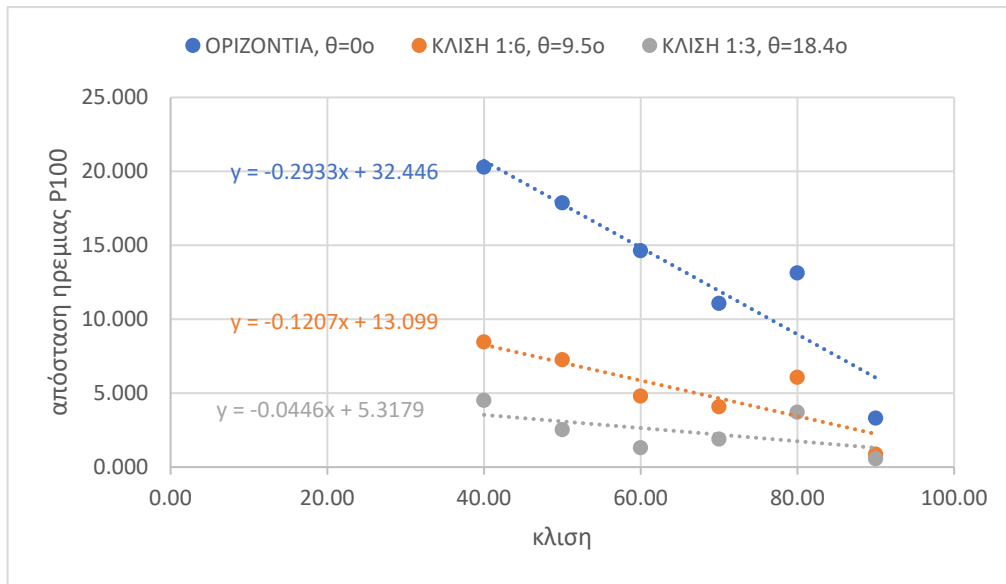
6.4.1.4 Αποτελέσματα αναλύσεων σε ύψος πρανούς 8 μέτρα με συντελεστή κάθετης αναπήδησης 0,45

ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ, $\theta=0^\circ$								
Κλίση	Απόσταση ηρεμίας			Μέγιστο ύψος αναπήδησης				
Μοίρες	P ₅₀	P ₉₅	P ₁₀₀	H _{I=1m}	H _{I=2m}	H _{I=3m}	H _{I=4m}	H _{I=5m}
90	2,874	3,173	3,306	3,004	2,254	0,074	0,000	0,000
80	10,962	12,383	13,127	0,965	1,480	1,525	1,024	0,293
70	9,345	10,657	11,070	1,014	1,405	1,199	0,423	0,418
60	12,366	14,029	14,628	0,976	1,545	1,694	1,423	0,737
50	15,555	17,248	17,865	0,704	1,136	1,287	1,157	0,738
40	18,366	19,824	20,284	0,507	0,818	0,914	0,807	0,484

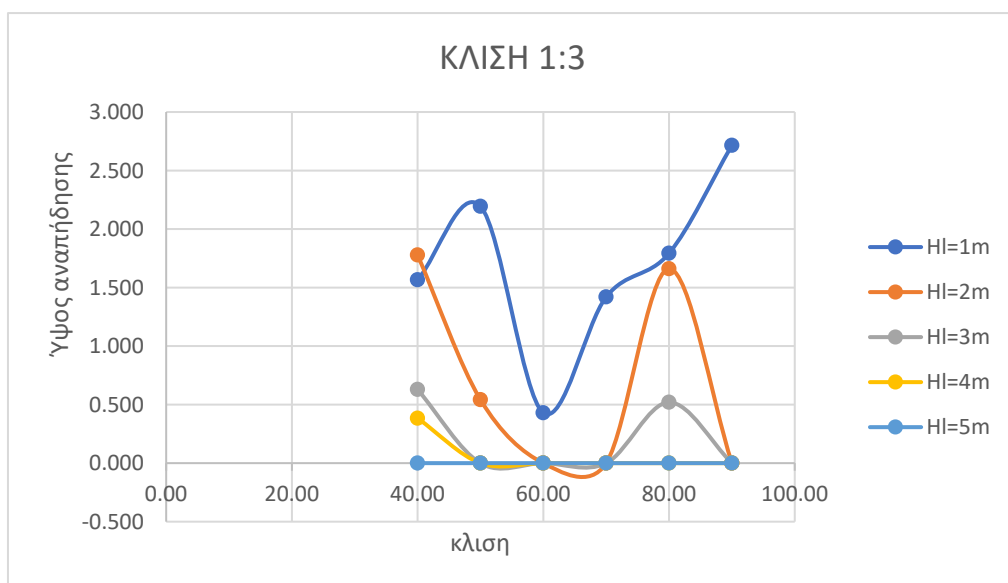
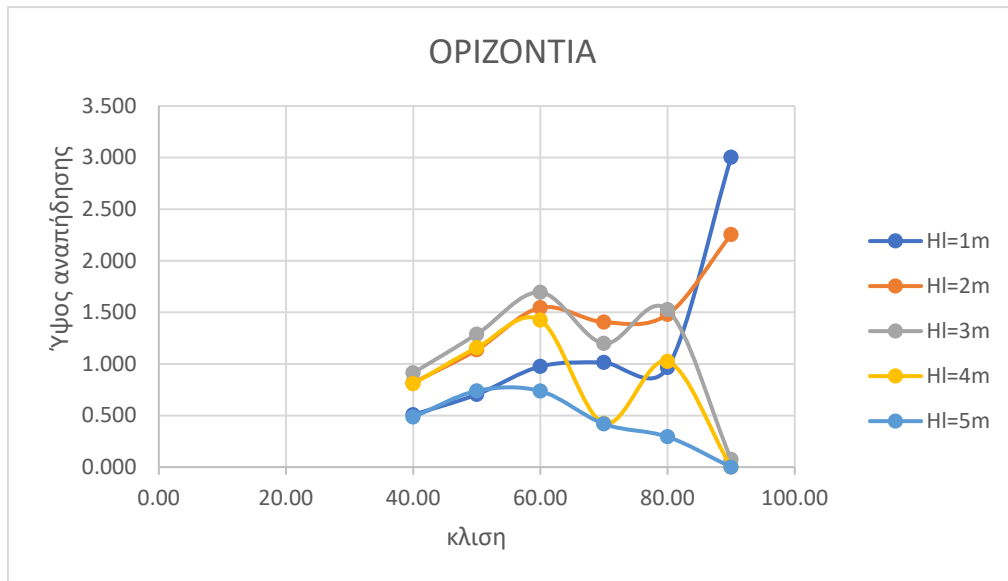
ΚΛΙΣΗ 1:6, $\theta=9.5^\circ$								
Κλίση	Απόσταση ηρεμίας			Μέγιστο ύψος αναπήδησης				
Μοίρες	P ₅₀	P ₉₅	P ₁₀₀	H _{I=1m}	H _{I=2m}	H _{I=3m}	H _{I=4m}	H _{I=5m}
90	0,599	0,803	0,875	2,882	0,000	0,000	0,000	0,000
80	4,963	5,668	6,064	1,367	1,847	1,332	0,389	0,170
70	3,278	3,787	4,077	1,838	1,408	0,510	0,009	0,000
60	4,178	4,722	4,799	1,966	2,298	0,992	0,416	0,000
50	5,825	6,756	7,260	1,225	1,745	1,556	0,660	0,556
40	7,217	8,250	8,459	0,829	1,257	1,283	0,906	0,302

ΚΛΙΣΗ 1:3, $\theta=18.4^\circ$								
Κλίση	Απόσταση ηρεμίας			Μέγιστο ύψος αναπήδησης				
Μοίρες	P ₅₀	P ₉₅	P ₁₀₀	H _{I=1m}	H _{I=2m}	H _{I=3m}	H _{I=4m}	H _{I=5m}
90	0,000	0,348	0,561	2,715	0,000	0,000	0,000	0,000
80	3,509	3,688	3,711	1,793	1,661	0,520	0,000	0,000
70	1,530	1,753	1,891	1,420	0,000	0,000	0,000	0,000
60	1,194	1,265	1,307	0,430	0,000	0,000	0,000	0,000
50	2,417	2,487	2,533	2,194	0,542	0,000	0,000	0,000
40	4,130	4,433	4,507	1,566	1,778	0,629	0,384	0,000

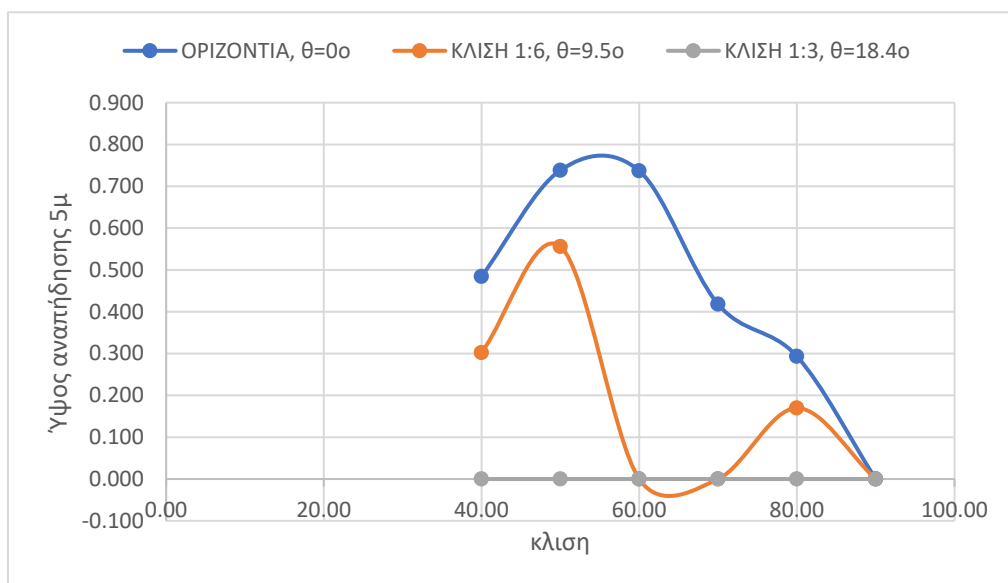
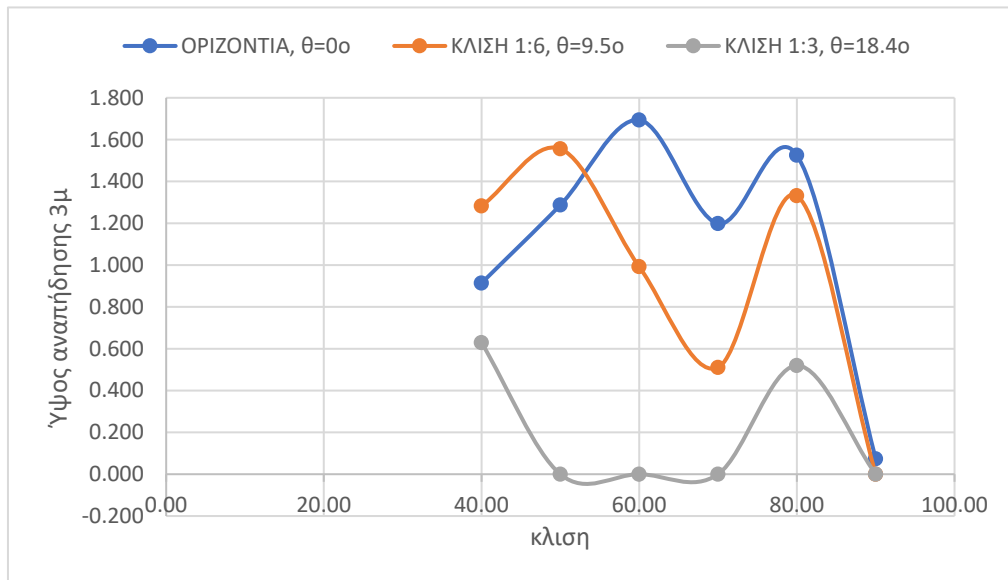
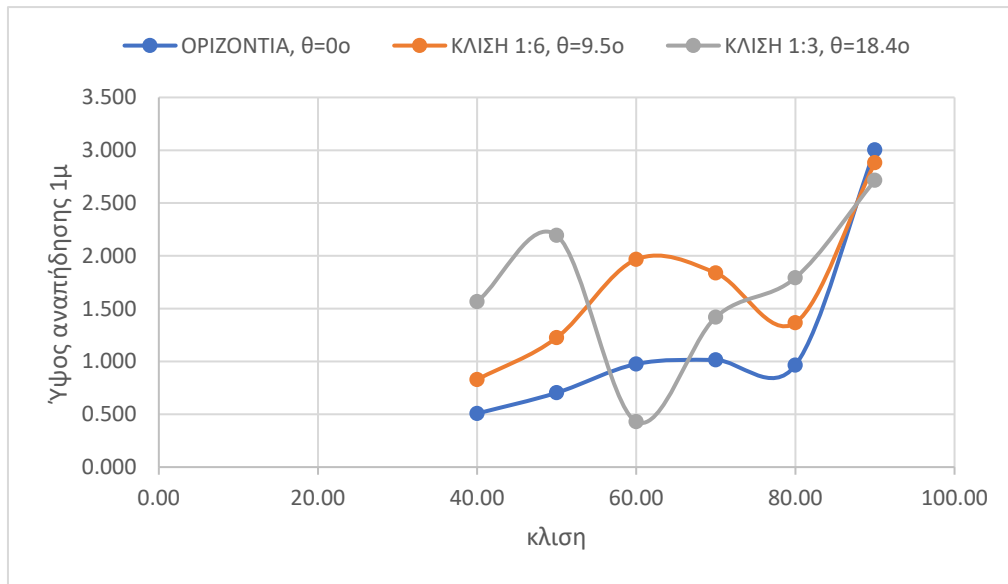
Πίνακας (6.5) Αποτελέσματα αναλύσεων σε ύψος πρανούς 8 μέτρα με συντελεστή κάθετης αναπήδησης 0,45



Διαγράμματα (6.28),(6.29),(6.30) Διαγράμματα απόστασης ηρεμίας συναρτήσει κλίσης πρανούς για P100, P95 και P50.



Διαγράμματα (6.31),(6.32),(6.33) Διαγράμματα ύψους αναπήδησης συναρτήσει κλίσης πρανούς για οριζόντιες αποστάσεις από τον πόδα του πρανούς 1,2,3,4 και 5 μέτρα.



Διαγράμματα (6.34),(6.35),(6.36) Διαγράμματα ύψους αναπήδησης σε 1,3 και 5 μέτρα οριζόντιας απόστασης από τον πόδα του πρανούς συναρτήσει της κλίσης πρανούς

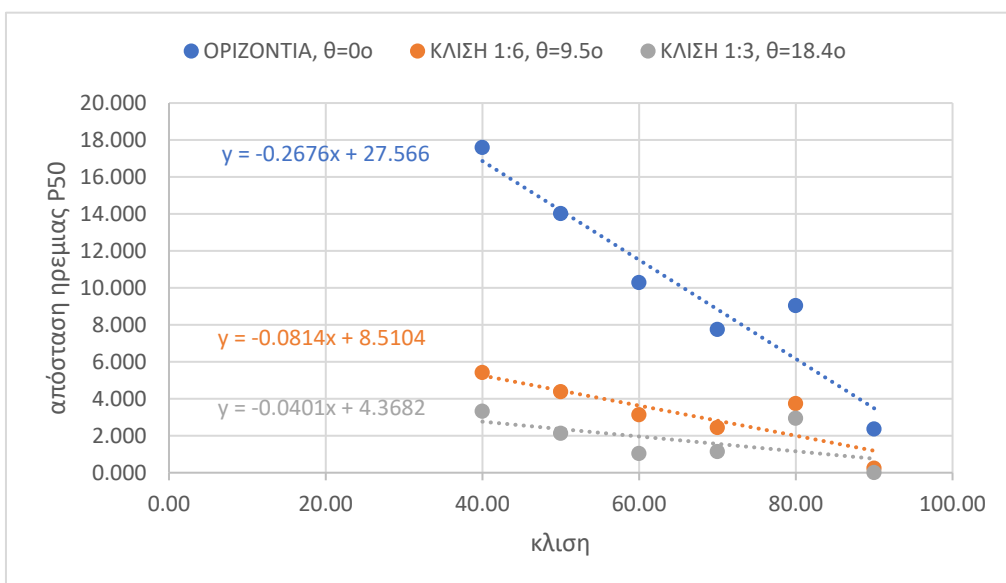
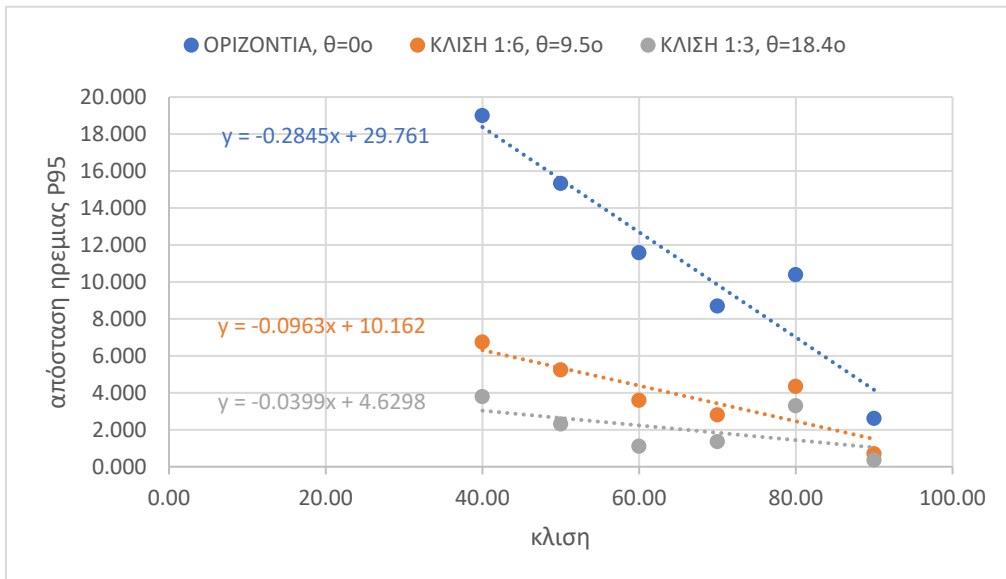
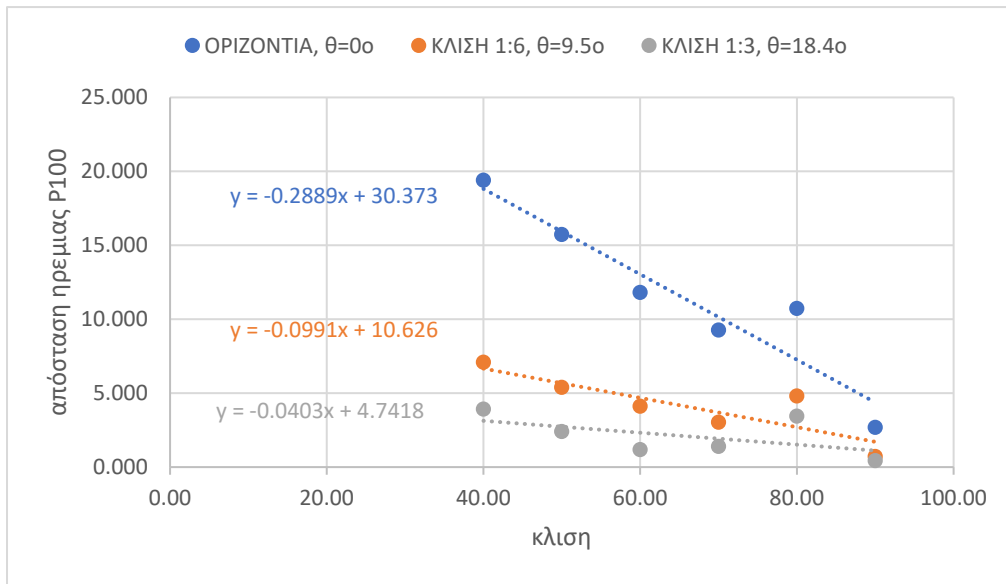
6.4.1.5 Αποτελέσματα αναλύσεων σε ύψος πρανούς 8 μέτρα με συντελεστή κάθετης αναπήδησης 0,35

ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ, $\theta=0^\circ$								
Κλίση Μοίρες	Απόσταση ηρεμίας			Μέγιστο ύψος αναπήδησης				
	P ₅₀	P ₉₅	P ₁₀₀	H _{I=1m}	H _{I=2m}	H _{I=3m}	H _{I=4m}	H _{I=5m}
90	2,360	2,619	2,680	3,049	1,082	0,000	0,000	0,000
80	9,033	10,392	10,719	0,745	1,018	0,786	0,243	0,152
70	7,749	8,699	9,260	0,950	1,233	0,835	0,233	0,042
60	10,283	11,578	11,801	0,822	1,217	1,174	0,692	0,183
50	14,017	15,326	15,723	0,527	0,781	0,745	0,409	0,128
40	17,594	18,998	19,391	0,414	0,619	0,618	0,407	0,127

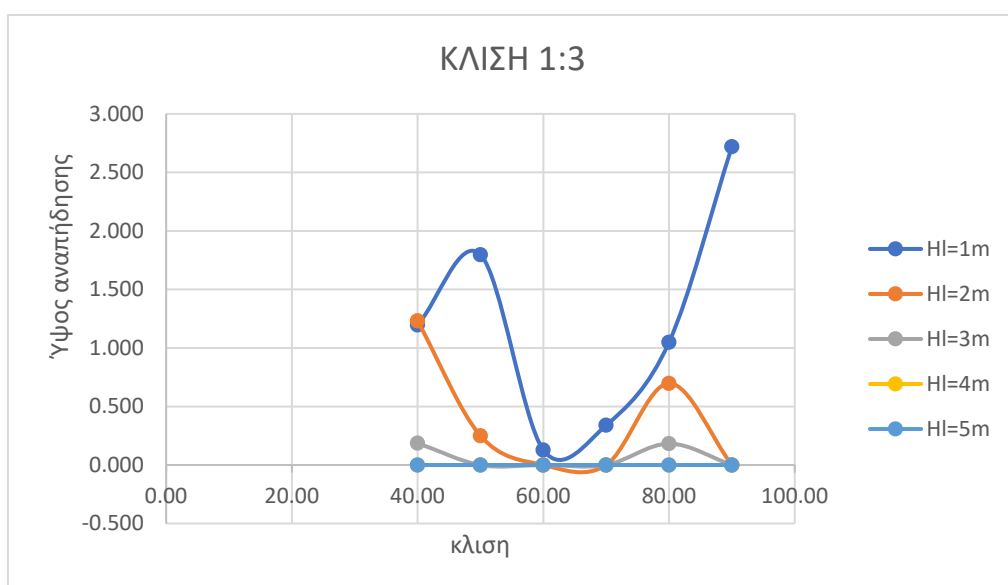
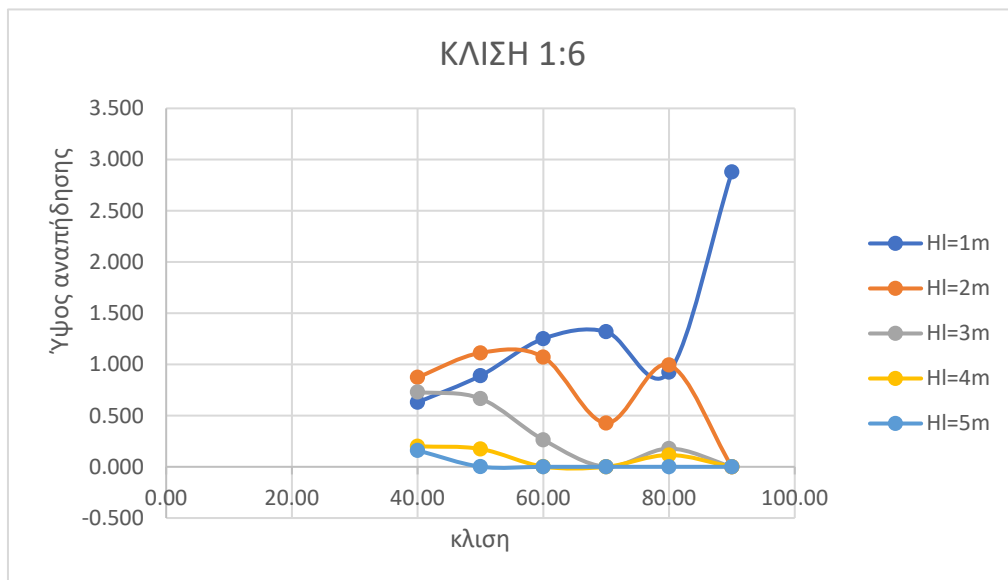
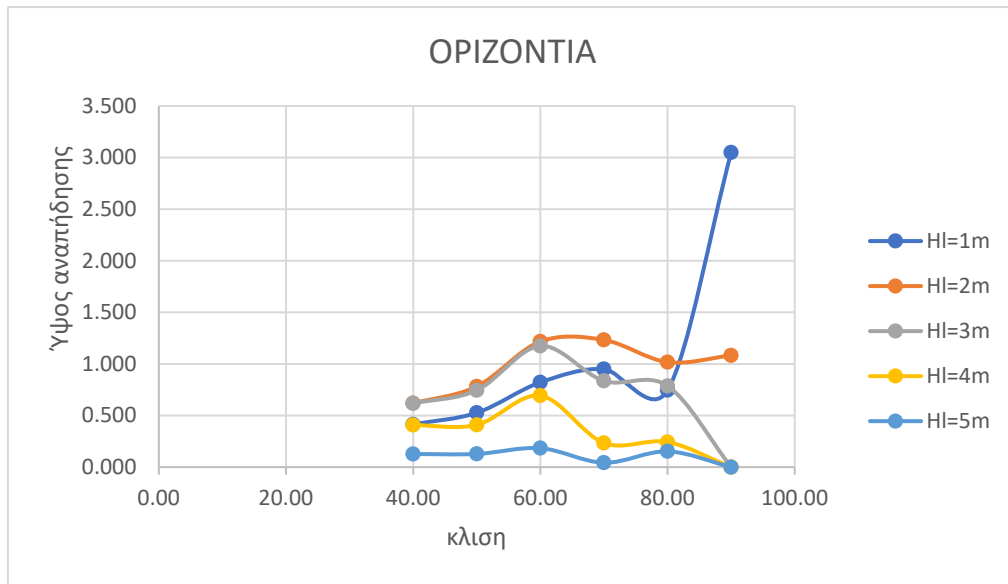
ΚΛΙΣΗ 1:6, $\theta=9.5^\circ$								
Κλίση Μοίρες	Απόσταση ηρεμίας			Μέγιστο ύψος αναπήδησης				
	P ₅₀	P ₉₅	P ₁₀₀	H _{I=1m}	H _{I=2m}	H _{I=3m}	H _{I=4m}	H _{I=5m}
90	0,241	0,698	0,715	2,880	0,000	0,000	0,000	0,000
80	3,734	4,346	4,804	0,925	0,995	0,179	0,115	0,000
70	2,438	2,804	3,025	1,319	0,427	0,000	0,000	0,000
60	3,127	3,599	4,106	1,251	1,071	0,264	0,002	0,000
50	4,373	5,237	5,386	0,890	1,113	0,667	0,175	0,002
40	5,416	6,743	7,084	0,630	0,874	0,731	0,200	0,160

ΚΛΙΣΗ 1:3, $\theta=18.4^\circ$								
Κλίση Μοίρες	Απόσταση ηρεμίας			Μέγιστο ύψος αναπήδησης				
	P ₅₀	P ₉₅	P ₁₀₀	H _{I=1m}	H _{I=2m}	H _{I=3m}	H _{I=4m}	H _{I=5m}
90	0,000	0,361	0,431	2,720	0,000	0,000	0,000	0,000
80	2,939	3,297	3,433	1,049	0,697	0,182	0,000	0,000
70	1,142	1,359	1,394	0,340	0,000	0,000	0,000	0,000
60	1,036	1,112	1,174	0,129	0,000	0,000	0,000	0,000
50	2,125	2,311	2,401	1,797	0,250	0,000	0,000	0,000
40	3,318	3,792	3,913	1,197	1,232	0,187	0,000	0,000

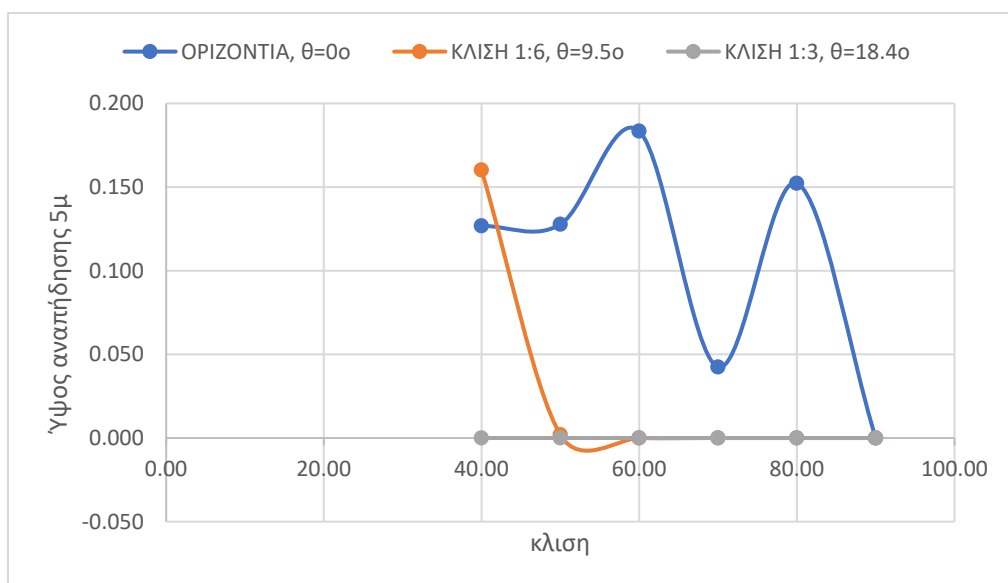
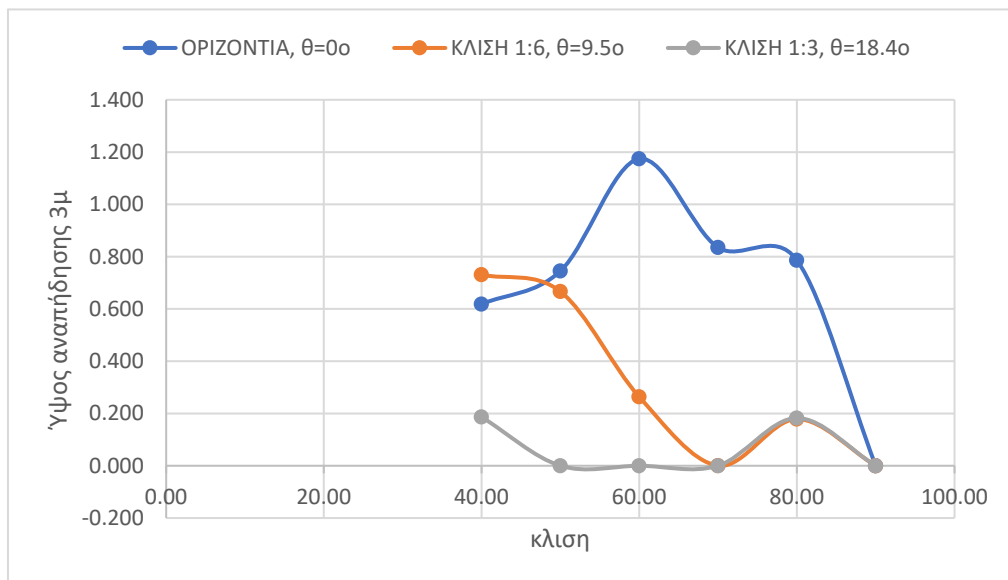
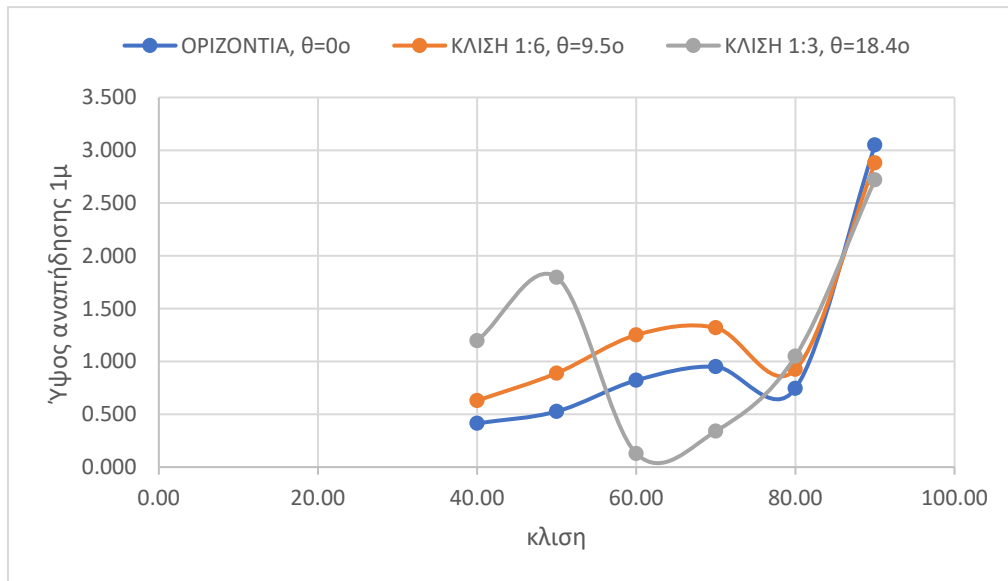
Πίνακας (6.6) Αποτελέσματα αναλύσεων σε ύψος πρανούς 8 μέτρα με συντελεστή κάθετης αναπήδησης 0,35



Διαγράμματα (6.37),(6.38),(6.39) Διαγράμματα απόστασης ηρεμίας συναρτήσει κλίσης πρανούς για P100, P95 και P50.



Διαγράμματα (6.40),(6.41),(6.42) Διαγράμματα ύψους αναπήδησης συναρτήσει κλίσης πρανούς για οριζόντιες αποστάσεις από τον πόδα του πρανούς 1,2,3,4 και 5 μέτρα.



Διαγράμματα (6.43),(6.44),(6.45) Διαγράμματα ύψους αναπήδησης σε 1,3 και 5 μέτρα οριζόντιας απόστασης από τον πόδα του πρηνούς συναρτήσει της κλίσης πρηνούς

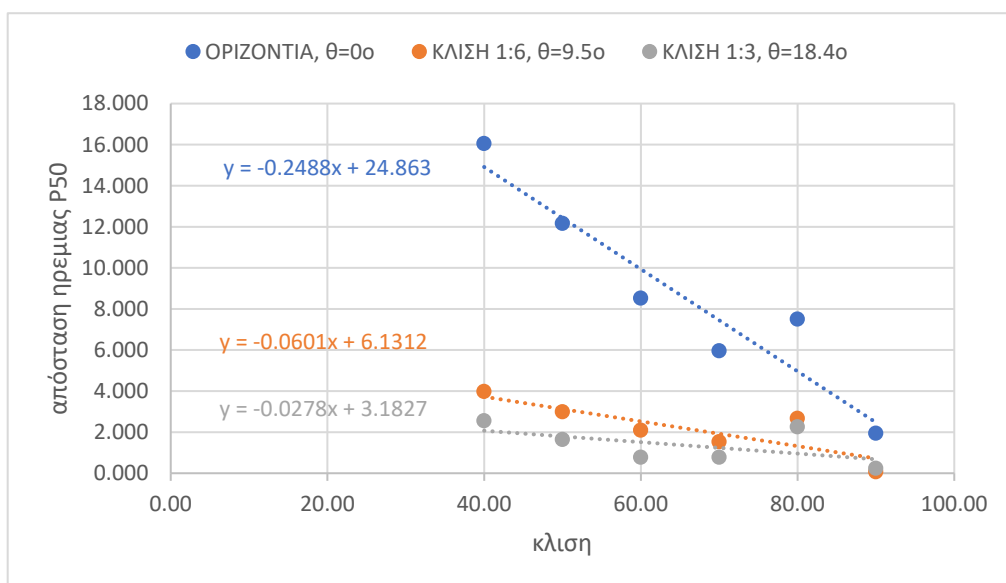
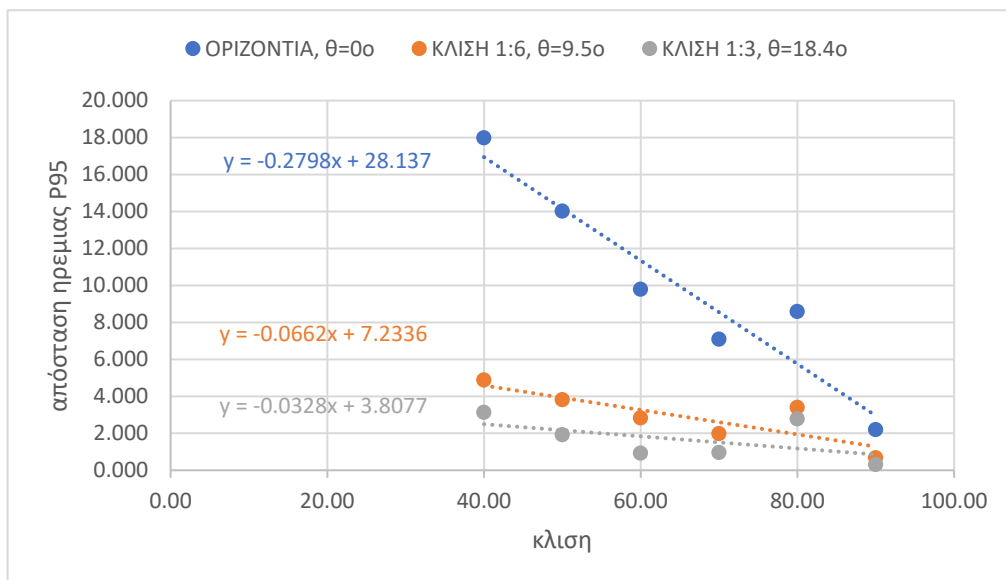
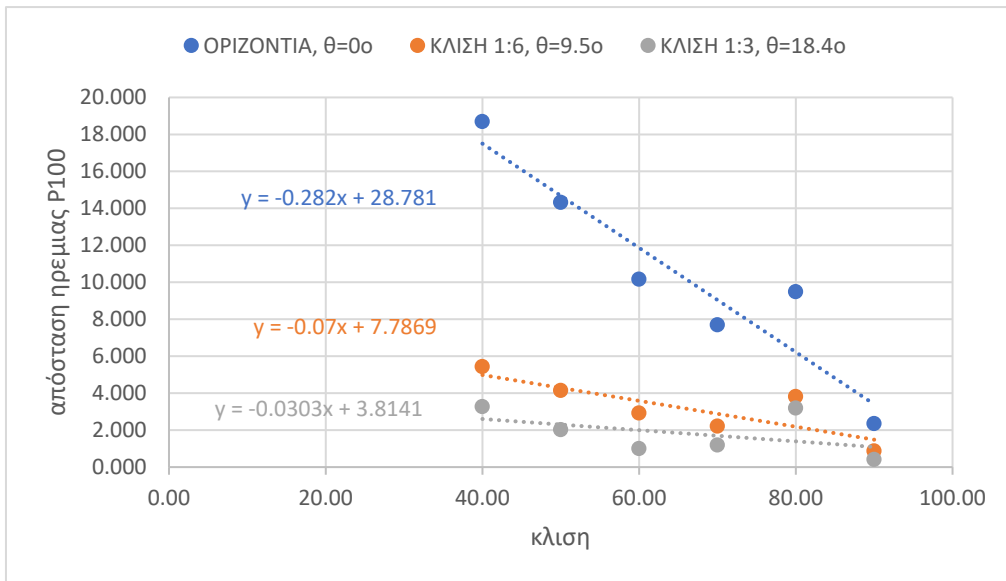
6.4.1.6 Αποτελέσματα αναλύσεων σε ύψος πρανούς 8 μέτρα με συντελεστή κάθετης αναπήδησης 0,25

ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ, $\theta=0^\circ$								
Κλίση Μοίρες	Απόσταση ηρεμίας			Μέγιστο ύψος αναπήδησης				
	P ₅₀	P ₉₅	P ₁₀₀	H _{I=1m}	H _{I=2m}	H _{I=3m}	H _{I=4m}	H _{I=5m}
90	1,950	2,197	2,348	2,902	0,589	0,000	0,000	0,000
80	7,504	8,593	9,490	0,615	0,692	0,235	0,013	0,000
70	5,958	7,089	7,691	0,665	0,594	0,094	0,007	0,000
60	8,523	9,796	10,161	0,535	0,619	0,238	0,027	0,000
50	12,167	14,021	14,320	0,404	0,520	0,337	0,028	0,002
40	16,054	17,988	18,696	0,293	0,370	0,237	0,029	0,000

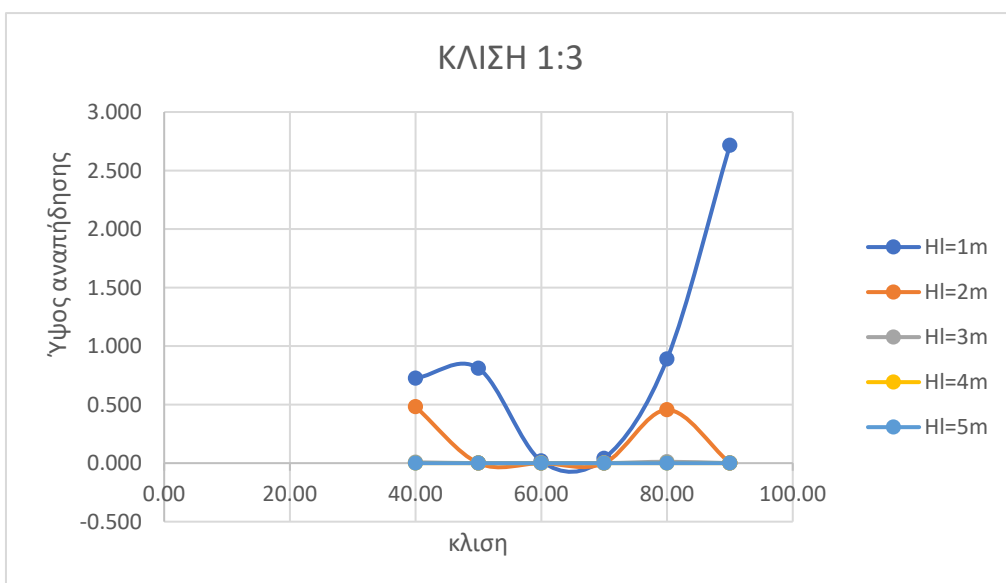
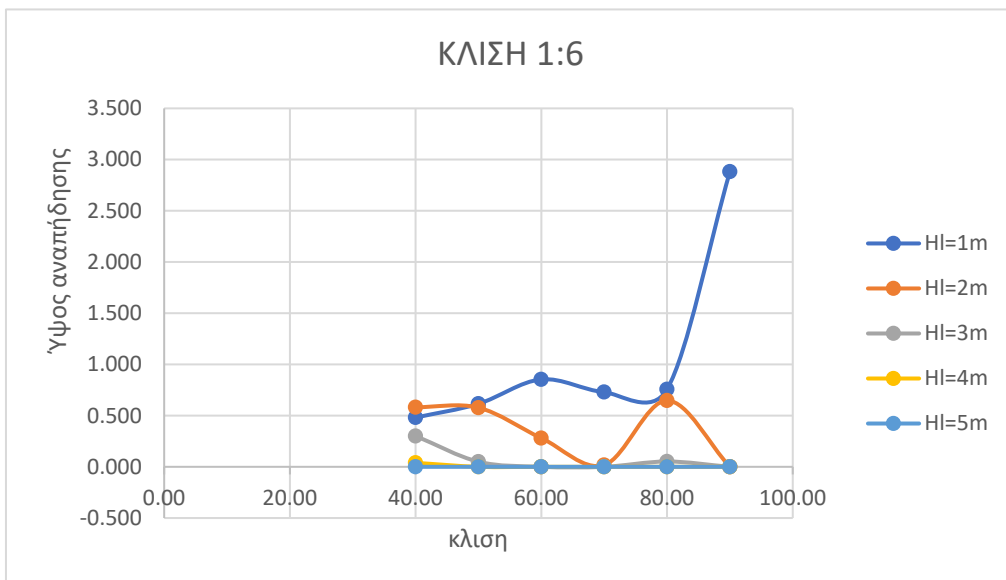
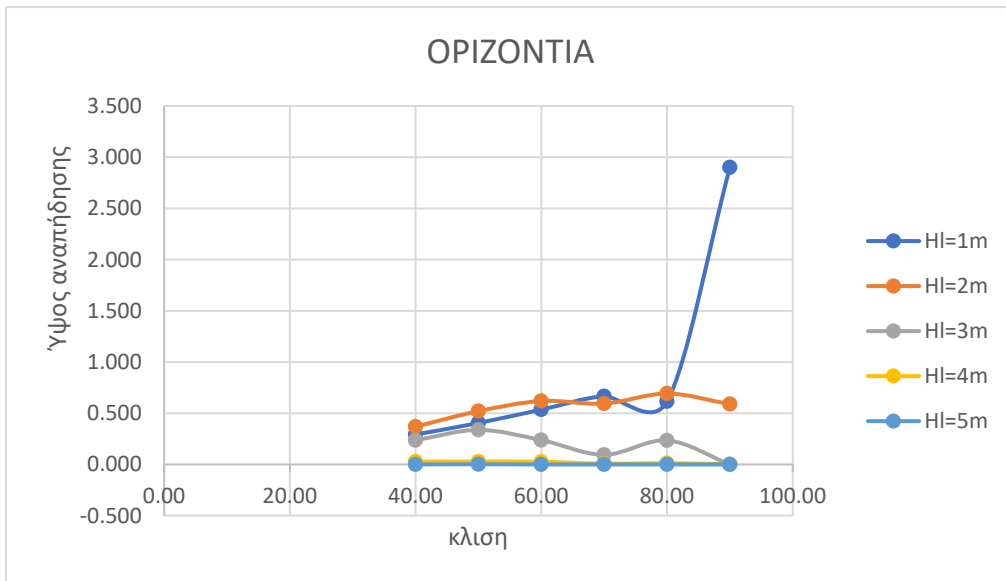
ΚΛΙΣΗ 1:6, $\theta=9.5^\circ$								
Κλίση Μοίρες	Απόσταση ηρεμίας			Μέγιστο ύψος αναπήδησης				
	P ₅₀	P ₉₅	P ₁₀₀	H _{I=1m}	H _{I=2m}	H _{I=3m}	H _{I=4m}	H _{I=5m}
90	0,068	0,675	0,868	2,882	0,000	0,000	0,000	0,000
80	2,674	3,399	3,818	0,756	0,648	0,052	0,000	0,000
70	1,534	1,986	2,218	0,730	0,017	0,000	0,000	0,000
60	2,092	2,828	2,926	0,854	0,281	0,000	0,000	0,000
50	2,989	3,821	4,146	0,616	0,578	0,050	0,000	0,000
40	3,977	4,885	5,432	0,481	0,582	0,301	0,039	0,000

ΚΛΙΣΗ 1:3, $\theta=18.4^\circ$								
Κλίση Μοίρες	Απόσταση ηρεμίας			Μέγιστο ύψος αναπήδησης				
	P ₅₀	P ₉₅	P ₁₀₀	H _{I=1m}	H _{I=2m}	H _{I=3m}	H _{I=4m}	H _{I=5m}
90	0,242	0,314	0,408	2,715	0,000	0,000	0,000	0,000
80	2,255	2,778	3,195	0,889	0,455	0,012	0,000	0,000
70	0,778	0,965	1,189	0,040	0,000	0,000	0,000	0,000
60	0,781	0,925	0,997	0,017	0,000	0,000	0,000	0,000
50	1,640	1,925	2,025	0,810	0,000	0,000	0,000	0,000
40	2,556	3,132	3,267	0,724	0,482	0,007	0,000	0,000

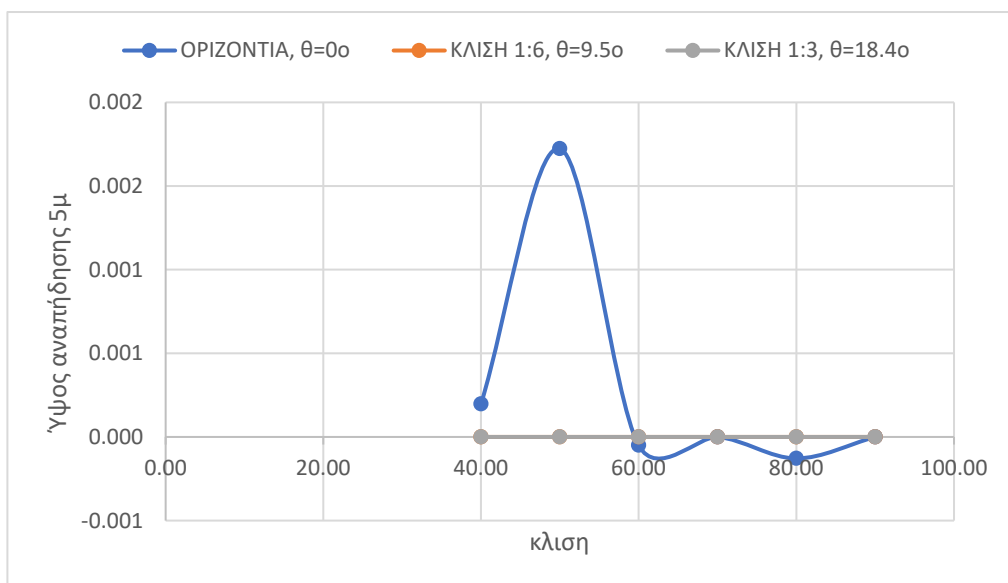
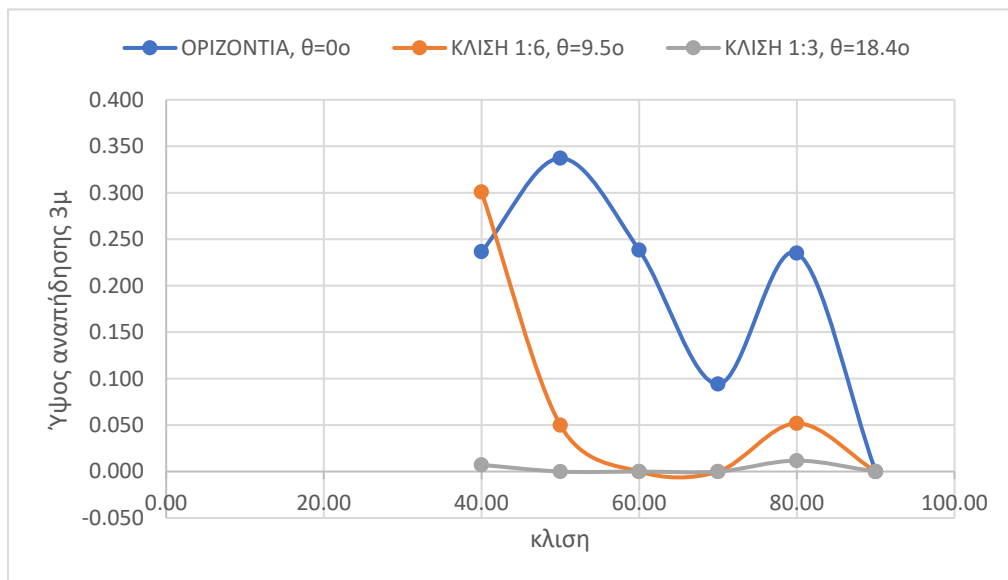
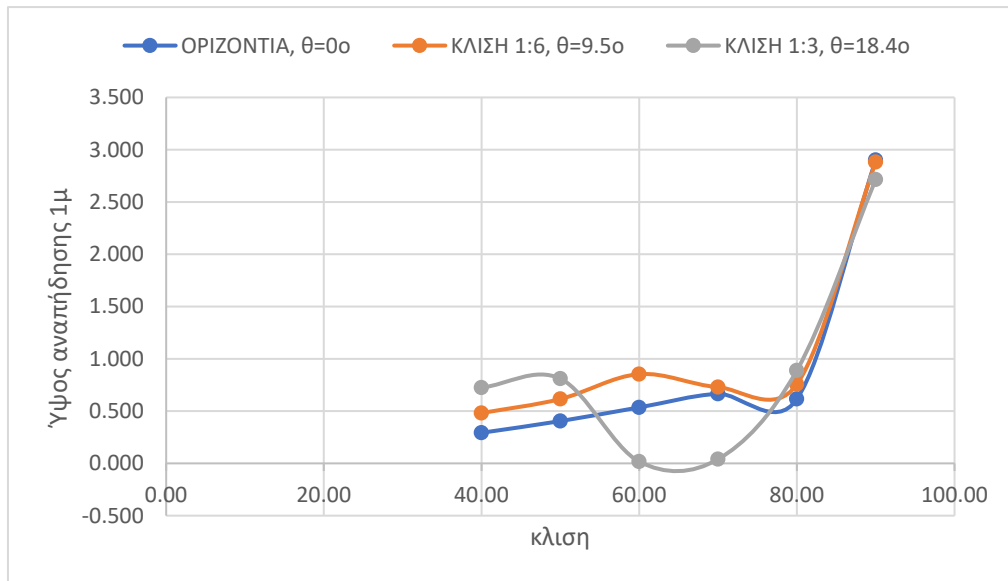
Πίνακας (6.7) Αποτελέσματα αναλύσεων σε ύψος πρανούς 8 μέτρα με συντελεστή κάθετης αναπήδησης 0,25



Διαγράμματα (6.46),(6.47),(6.48) Διαγράμματα απόστασης ηρεμίας συναρτήσει κλίσης πρανούς για P100, P95 και P50.



Διαγράμματα (6.49),(6.50),(6.51) Διαγράμματα ύψους αναπήδησης συναρτήσεσι κλίσεσι πρανούς για οριζόντιες αποστάσεις από τον πόδα του πρανούς 1,2,3,4 και 5 μέτρα.



Διαγράμματα (6.52),(6.53),(6.54) Διαγράμματα ύψους αναπήδησης σε 1,3 και 5 μέτρα οριζόντιας απόστασης από τον πόδα του πρανούς συναρτήσει της κλίσης πρανούς

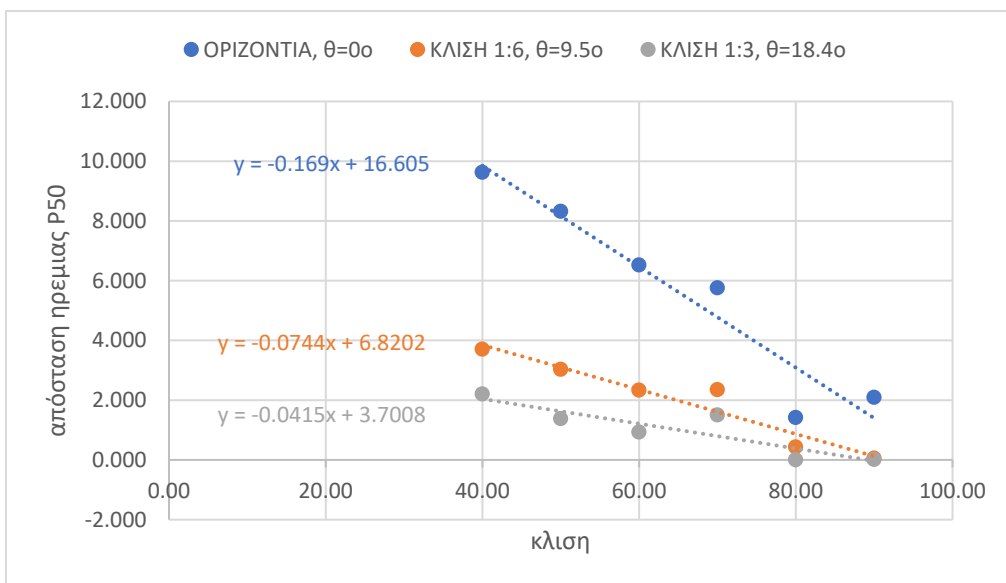
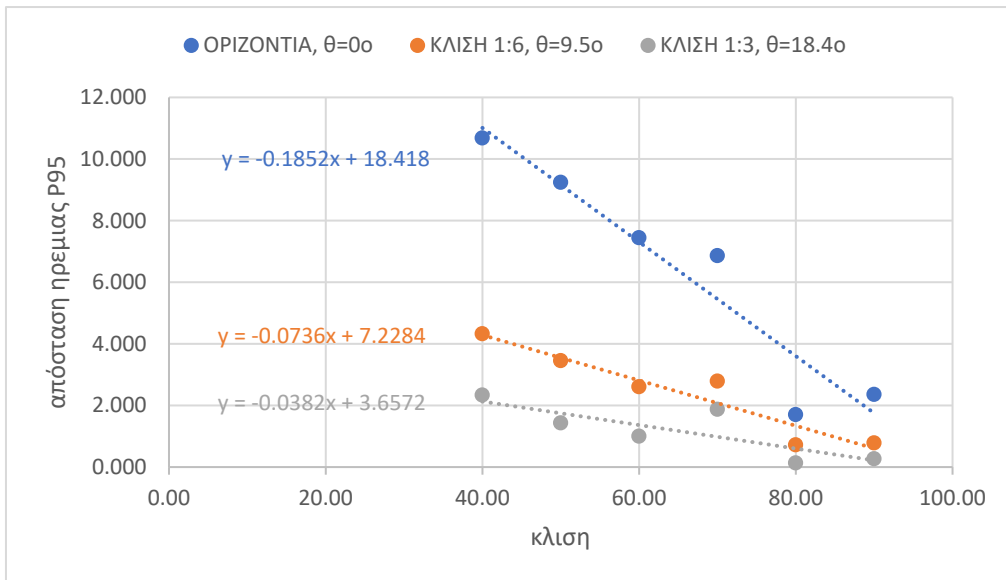
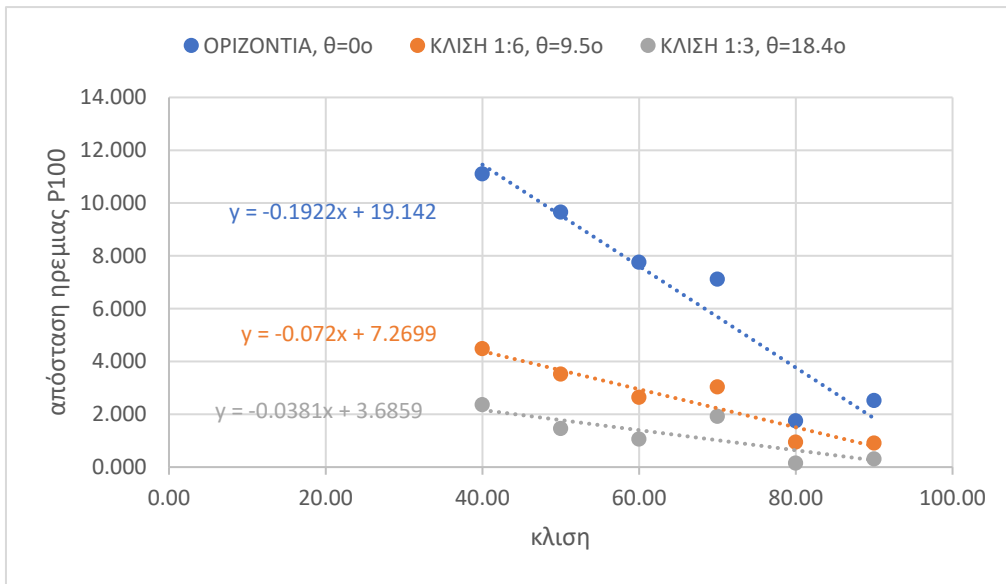
6.4.1.7 Αποτελέσματα αναλύσεων σε ύψος πρανούς 4 μέτρα με συντελεστή κάθετης αναπήδησης 0,45

ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ, $\theta=0^\circ$								
Κλίση Μοίρες	Απόσταση ηρεμίας			Μέγιστο ύψος αναπήδησης				
	P ₅₀	P ₉₅	P ₁₀₀	H _{I=1m}	H _{I=2m}	H _{I=3m}	H _{I=4m}	H _{I=5m}
90	2,091	2,355	2,517	0,810	0,257	0,000	0,000	0,000
80	1,419	1,702	1,751	0,340	0,000	0,000	0,000	0,000
70	5,755	6,862	7,116	0,563	0,356	0,137	0,003	0,000
60	6,523	7,442	7,756	0,629	0,507	0,197	0,037	0,001
50	8,318	9,239	9,655	0,541	0,555	0,182	0,092	0,010
40	9,627	10,681	11,101	0,408	0,426	0,093	0,077	0,019

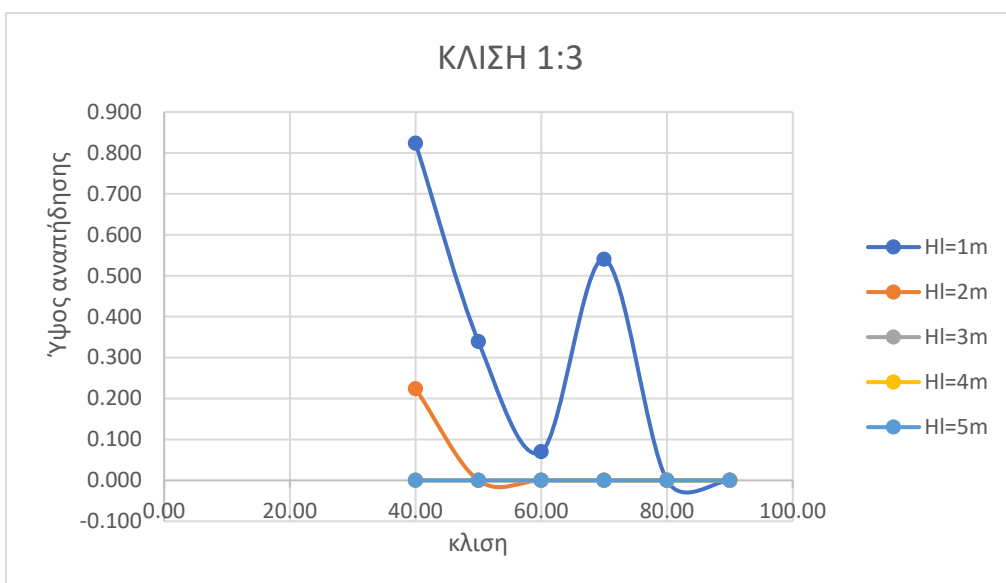
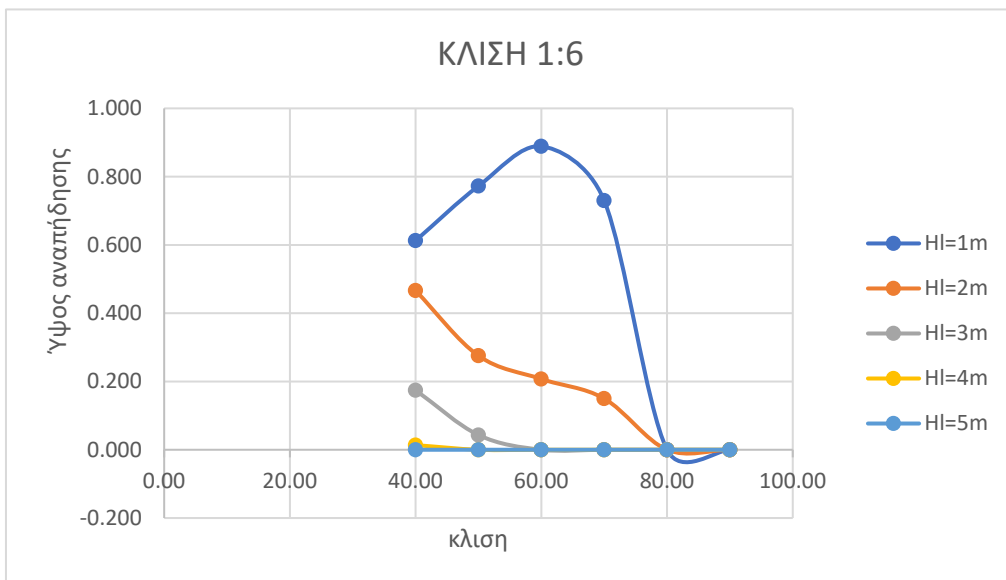
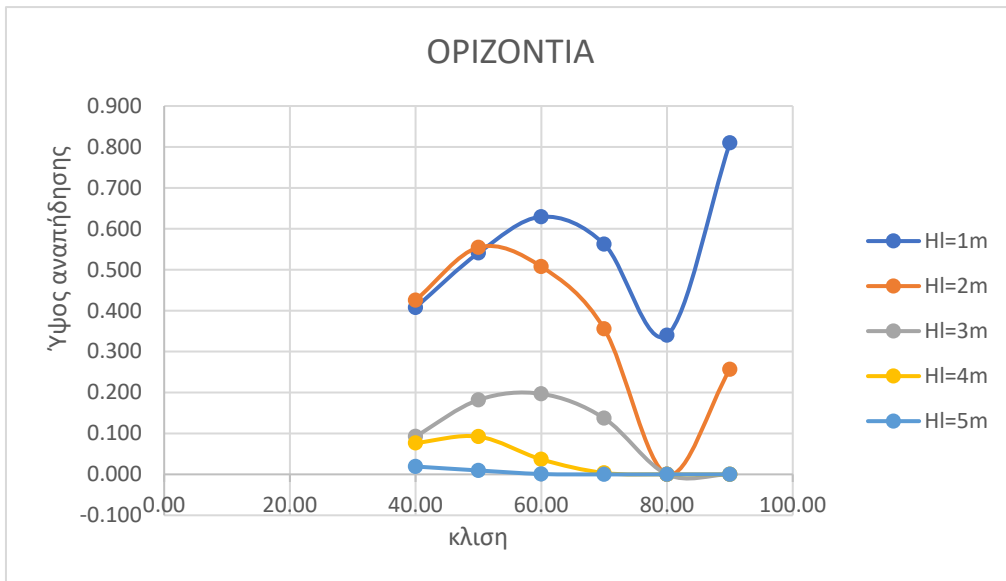
ΚΛΙΣΗ 1:6, $\theta=9.5^\circ$								
Κλίση Μοίρες	Απόσταση ηρεμίας			Μέγιστο ύψος αναπήδησης				
	P ₅₀	P ₉₅	P ₁₀₀	H _{I=1m}	H _{I=2m}	H _{I=3m}	H _{I=4m}	H _{I=5m}
90	0,056	0,779	0,905	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
80	0,430	0,717	0,945	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
70	2,350	2,789	3,032	0,730	0,150	0,000	0,000	0,000
60	2,332	2,605	2,641	0,889	0,207	0,000	0,000	0,000
50	3,030	3,455	3,519	0,773	0,275	0,043	0,000	0,000
40	3,707	4,325	4,481	0,613	0,466	0,174	0,014	0,000

ΚΛΙΣΗ 1:3, $\theta=18.4^\circ$								
Κλίση Μοίρες	Απόσταση ηρεμίας			Μέγιστο ύψος αναπήδησης				
	P ₅₀	P ₉₅	P ₁₀₀	H _{I=1m}	H _{I=2m}	H _{I=3m}	H _{I=4m}	H _{I=5m}
90	0,013	0,266	0,305	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
80	0,000	0,134	0,150	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
70	1,505	1,870	1,920	0,540	0,000	0,000	0,000	0,000
60	0,927	1,002	1,058	0,070	0,000	0,000	0,000	0,000
50	1,378	1,430	1,458	0,339	0,000	0,000	0,000	0,000
40	2,205	2,337	2,361	0,823	0,224	0,000	0,000	0,000

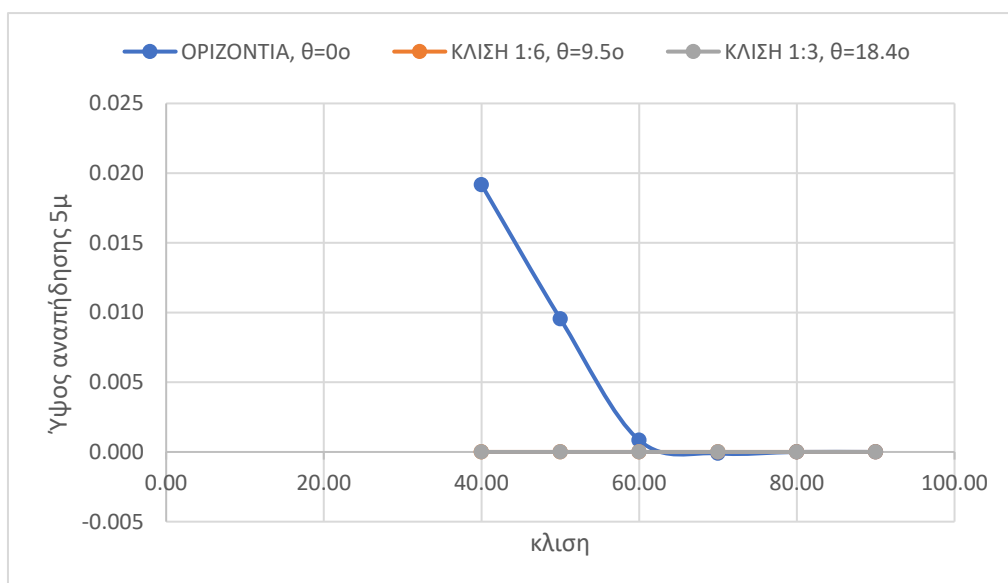
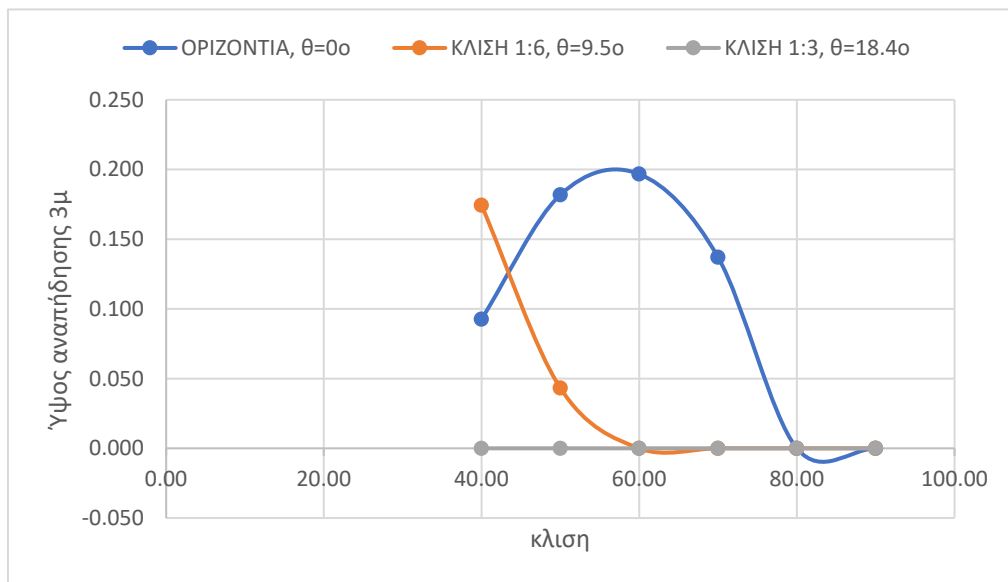
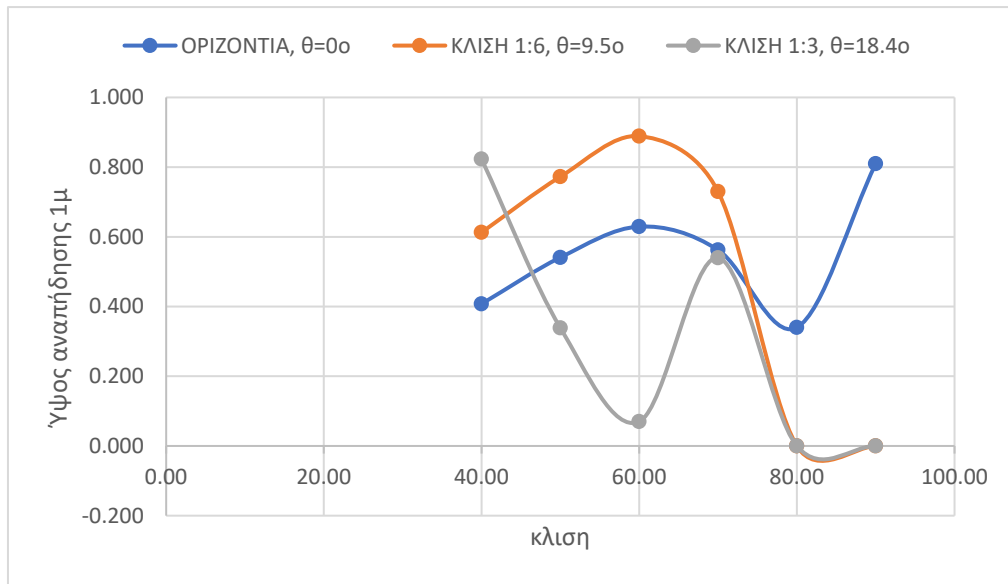
Πίνακας (6.8) Αποτελέσματα αναλύσεων σε ύψος πρανούς 4 μέτρα με συντελεστή κάθετης αναπήδησης 0,45



Διαγράμματα (6.55),(6.56),(6.57) Διαγράμματα απόστασης ηρεμίας συναρτήσει κλίσης πρανούς για P100, P95 και P50.



Διαγράμματα (6.58),(6.59),(6.60) Διαγράμματα ύψους αναπήδησης συναρτήσει κλίσης πρανούς για οριζόντιες αποστάσεις από τον πόδα του πρανούς 1,2,3,4 και 5 μέτρα.



Διαγράμματα (6.61),(6.62),(6.63) Διαγράμματα ύψους αναπήδησης σε 1,3 και 5 μέτρα οριζόντιας απόστασης από τον πόδα του πρανούς συναρτήσει της κλίσης πρανούς

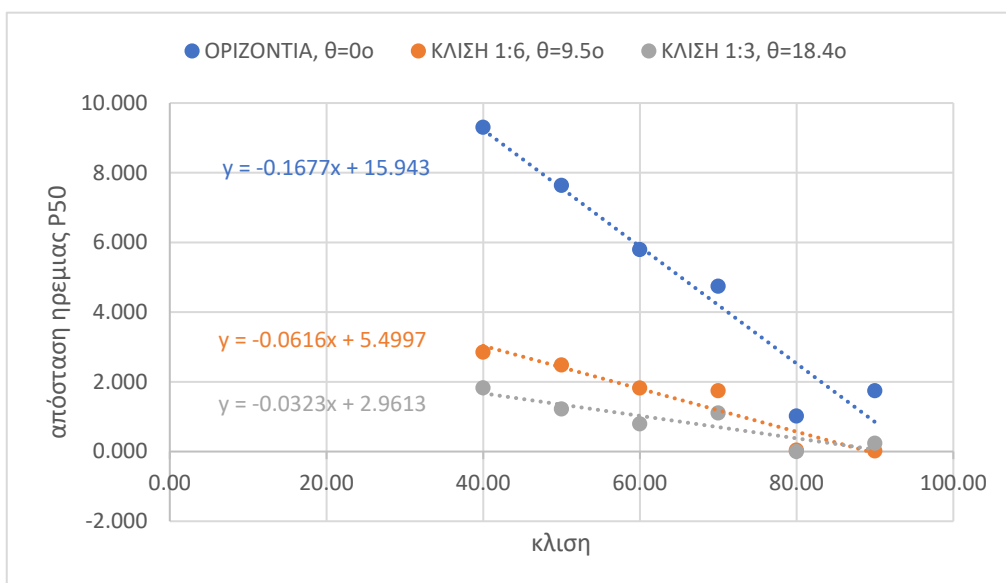
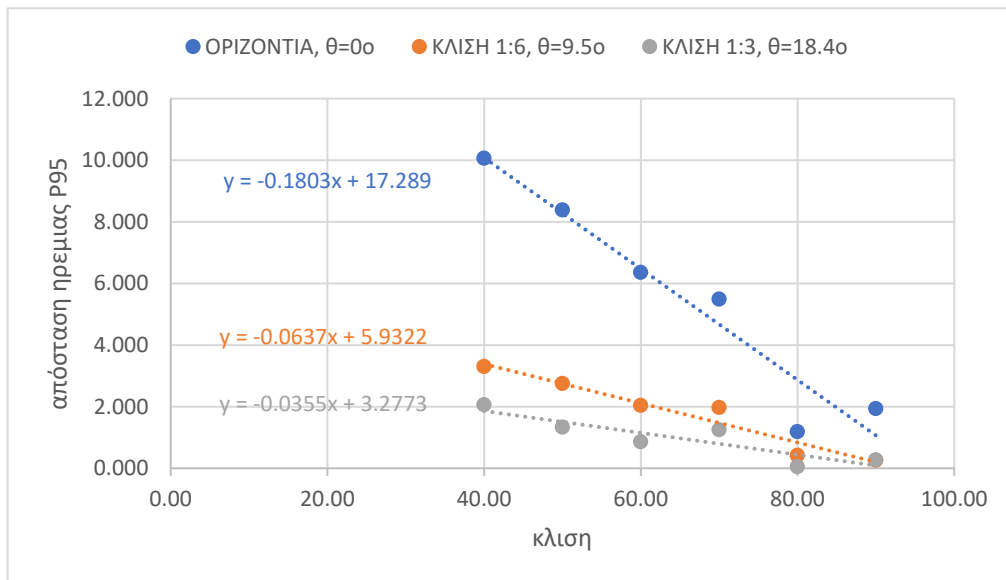
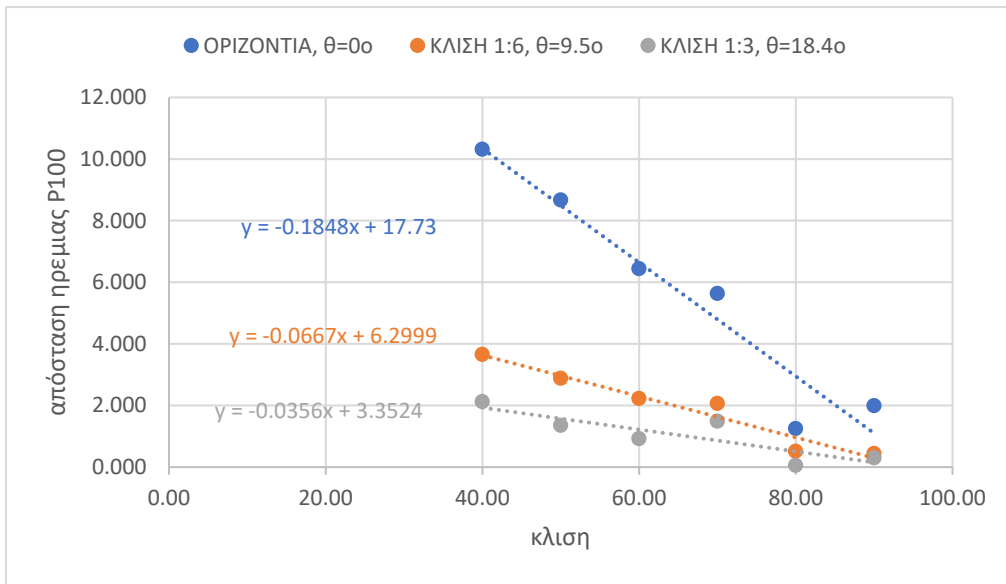
6.4.1.8 Αποτελέσματα αναλύσεων σε ύψος πρανούς 4 μέτρα με συντελεστή κάθετης αναπήδησης 0,35

ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ, $\theta=0^\circ$								
Κλίση Μοίρες	Απόσταση ηρεμίας			Μέγιστο ύψος αναπήδησης				
	P ₅₀	P ₉₅	P ₁₀₀	H _{I=1m}	H _{I=2m}	H _{I=3m}	H _{I=4m}	H _{I=5m}
90	1,745	1,939	1,995	0,340	0,000	0,000	0,000	0,000
80	1,017	1,188	1,250	0,040	0,000	0,000	0,000	0,000
70	4,744	5,494	5,634	0,474	0,073	0,001	0,000	0,000
60	5,796	6,358	6,439	0,455	0,127	0,014	0,000	0,000
50	7,635	8,385	8,671	0,458	0,390	0,071	0,001	0,000
40	9,305	10,067	10,318	0,254	0,117	0,019	0,000	0,000

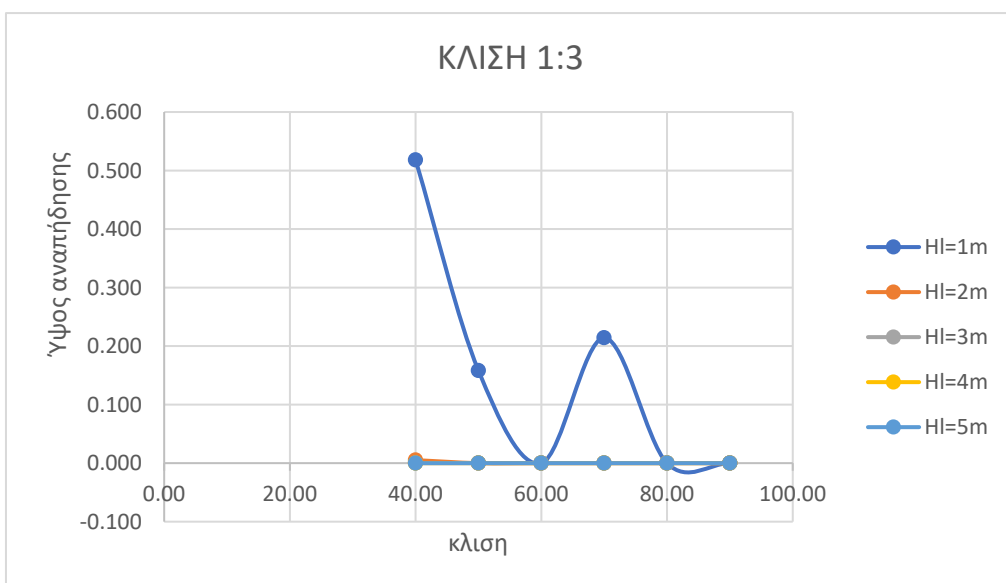
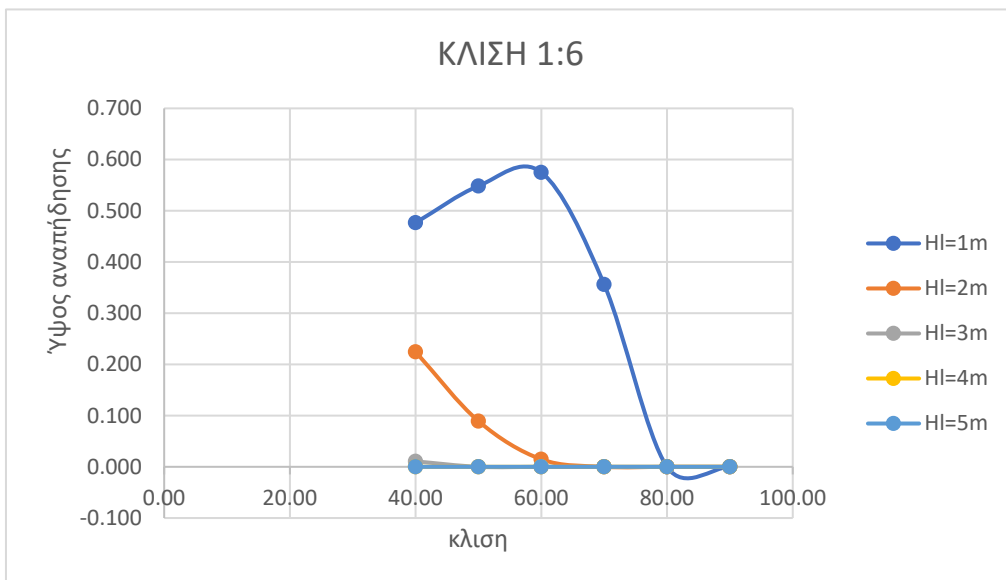
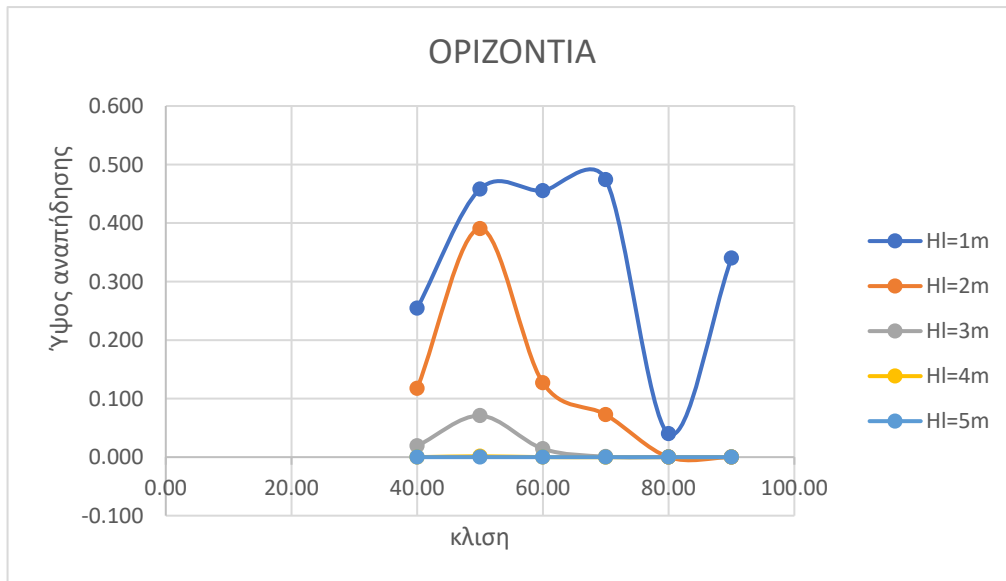
ΚΛΙΣΗ 1:6, $\theta=9.5^\circ$								
Κλίση Μοίρες	Απόσταση ηρεμίας			Μέγιστο ύψος αναπήδησης				
	P ₅₀	P ₉₅	P ₁₀₀	H _{I=1m}	H _{I=2m}	H _{I=3m}	H _{I=4m}	H _{I=5m}
90	0,018	0,258	0,438	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
80	0,041	0,420	0,514	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
70	1,742	1,973	2,067	0,356	0,000	0,000	0,000	0,000
60	1,820	2,040	2,225	0,575	0,015	0,000	0,000	0,000
50	2,482	2,753	2,881	0,548	0,089	0,000	0,000	0,000
40	2,853	3,304	3,657	0,477	0,224	0,011	0,000	0,000

ΚΛΙΣΗ 1:3, $\theta=18.4^\circ$								
Κλίση Μοίρες	Απόσταση ηρεμίας			Μέγιστο ύψος αναπήδησης				
	P ₅₀	P ₉₅	P ₁₀₀	H _{I=1m}	H _{I=2m}	H _{I=3m}	H _{I=4m}	H _{I=5m}
90	0,236	0,272	0,301	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
80	0,000	0,051	0,053	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
70	1,106	1,253	1,489	0,214	0,000	0,000	0,000	0,000
60	0,792	0,862	0,925	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
50	1,220	1,337	1,352	0,158	0,000	0,000	0,000	0,000
40	1,826	2,061	2,124	0,518	0,005	0,000	0,000	0,000

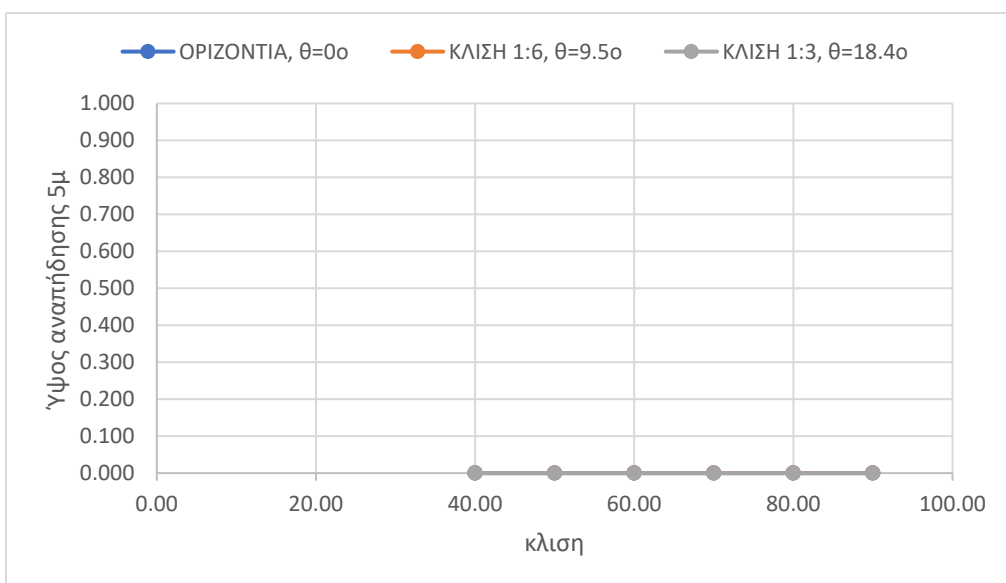
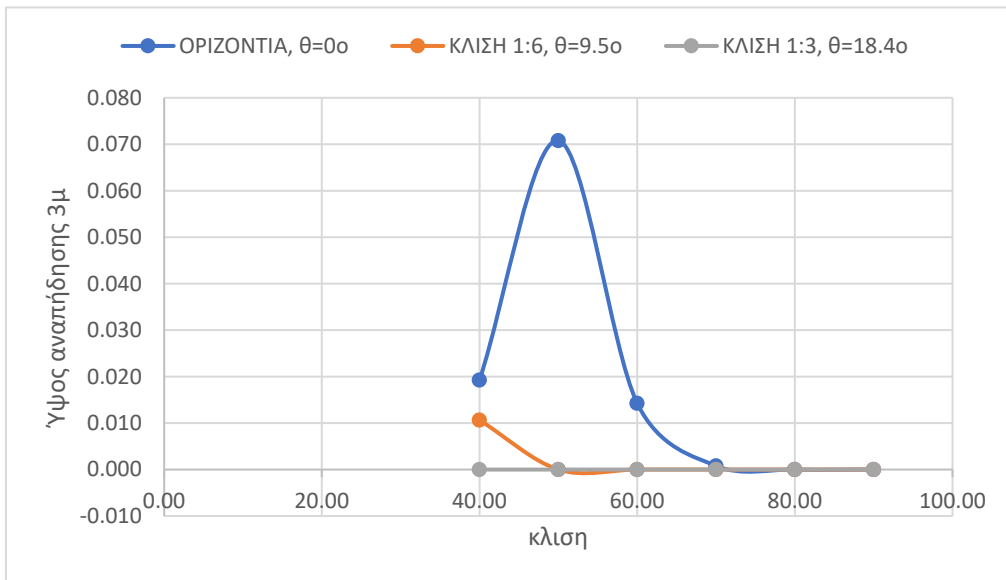
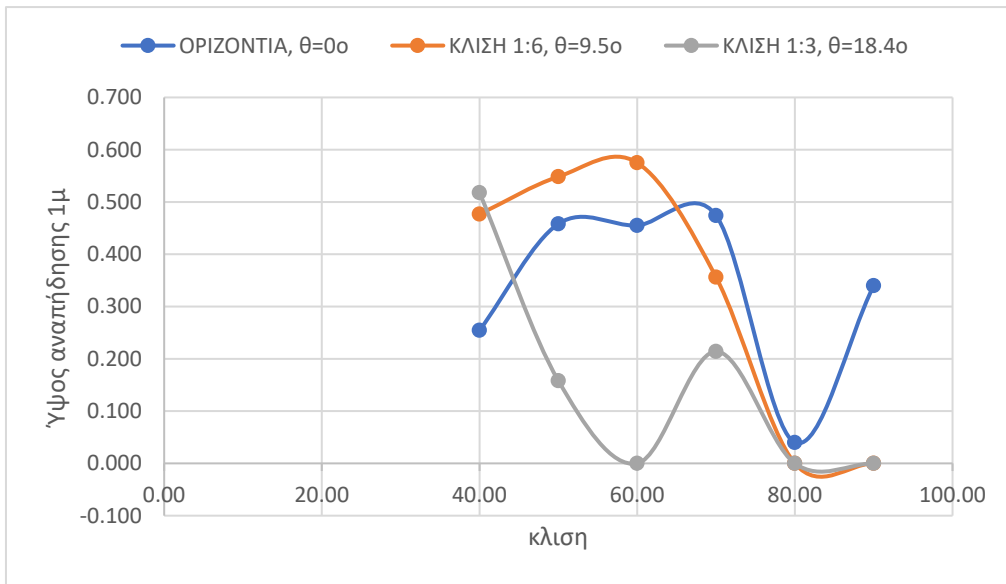
Πίνακας (6.9) Αποτελέσματα αναλύσεων σε ύψος πρανούς 4 μέτρα με συντελεστή κάθετης αναπήδησης 0,35



Διαγράμματα (6.64),(6.65),(6.66) Διαγράμματα απόστασης ηρεμίας συναρτήσει κλίσης πρανούς για P100, P95 και P50.



Διαγράμματα (6.67),(6.68),(6.69) Διαγράμματα ύψους αναπήδησης συναρτήσει κλίσης πρανούς για οριζόντιες αποστάσεις από τον πόδα του πρανούς 1,2,3,4 και 5 μέτρα.



Διαγράμματα (6.70),(6.71),(6.72) Διαγράμματα ύψους αναπήδησης σε 1,3 και 5 μέτρα οριζόντιας απόστασης από τον πόδα του πρανούς συναρτήσει της κλίσης πρανούς

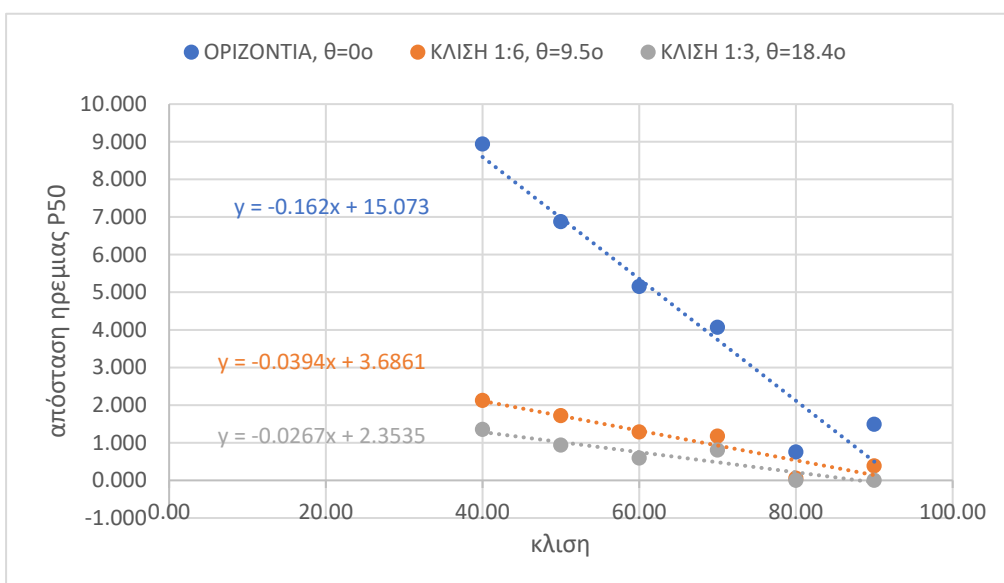
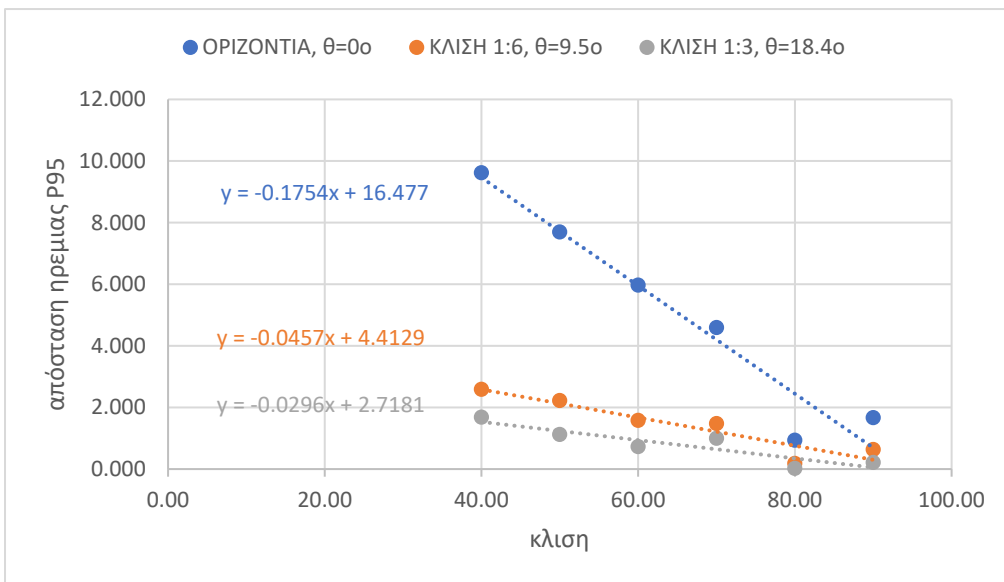
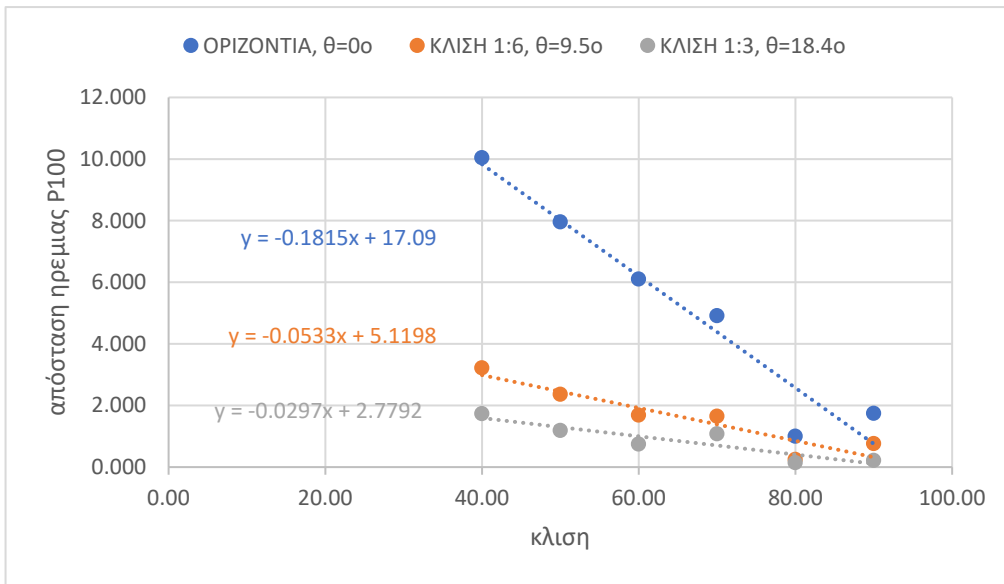
6.4.1.9 Αποτελέσματα αναλύσεων σε ύψος πρανούς 4 μέτρα με συντελεστή κάθετης αναπήδησης 0,25

ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ, $\theta=0^\circ$								
Κλίση	Απόσταση ηρεμίας			Μέγιστο ύψος αναπήδησης				
Μοίρες	P ₅₀	P ₉₅	P ₁₀₀	H _{I=1m}	H _{I=2m}	H _{I=3m}	H _{I=4m}	H _{I=5m}
90	1,490	1,668	1,746	0,267	0,000	0,000	0,000	0,000
80	0,752	0,931	1,000	0,006	0,000	0,000	0,000	0,000
70	4,069	4,592	4,915	0,217	0,000	0,000	0,000	0,000
60	5,152	5,965	6,102	0,312	0,035	0,000	0,000	0,000
50	6,875	7,691	7,957	0,237	0,037	0,000	0,000	0,000
40	8,938	9,614	10,039	0,167	0,037	0,000	0,000	0,000

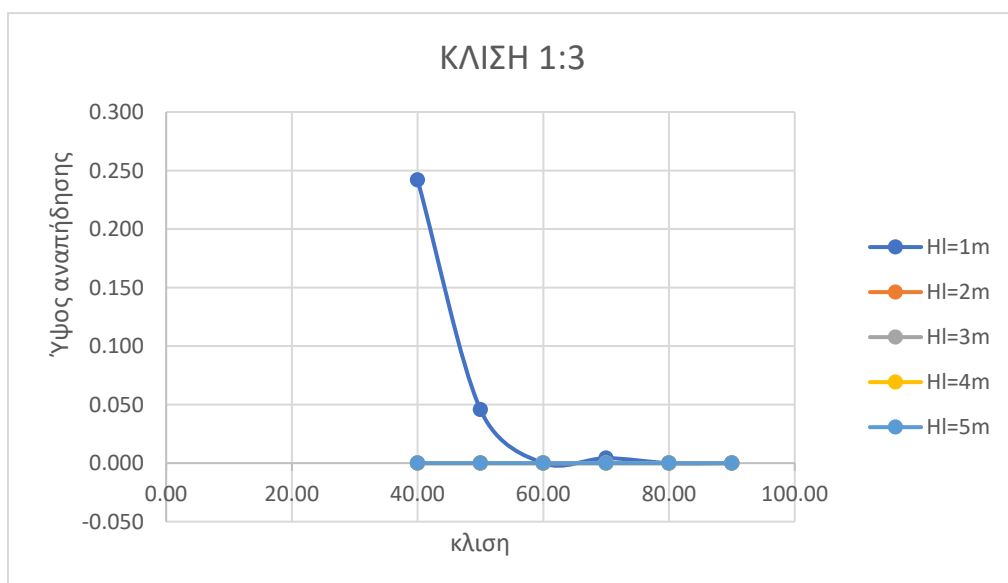
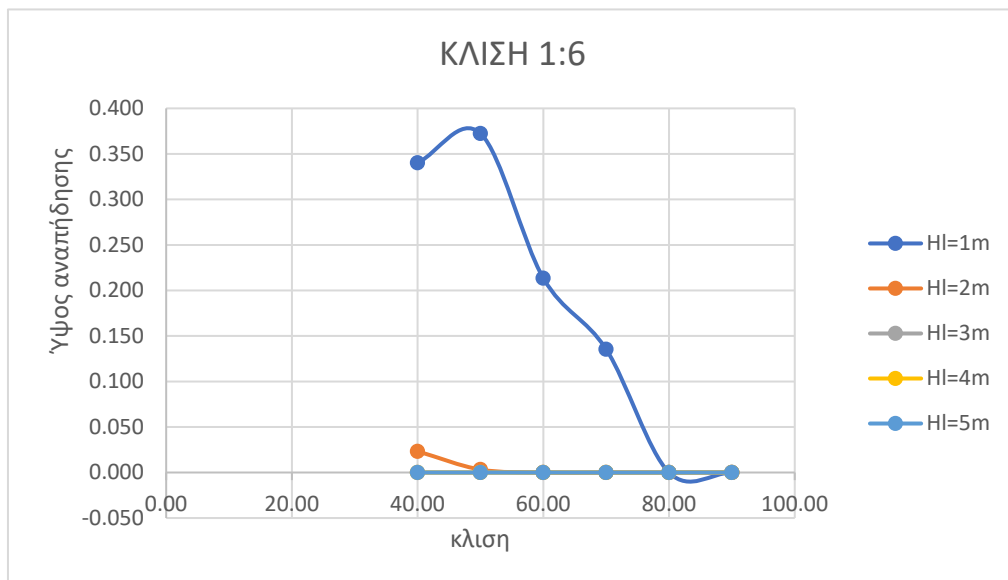
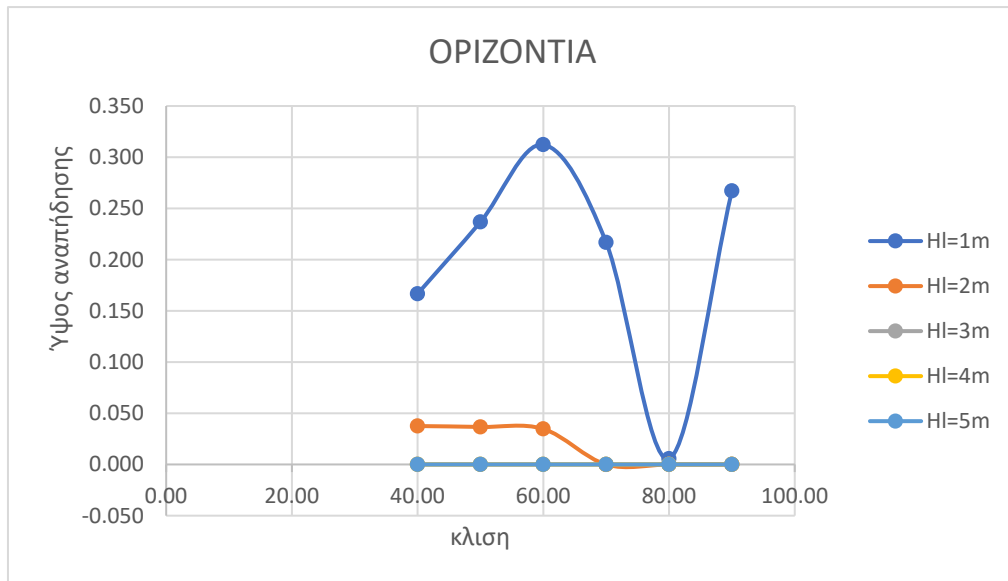
ΚΛΙΣΗ 1:6, $\theta=9.5^\circ$								
Κλίση	Απόσταση ηρεμίας			Μέγιστο ύψος αναπήδησης				
Μοίρες	P ₅₀	P ₉₅	P ₁₀₀	H _{I=1m}	H _{I=2m}	H _{I=3m}	H _{I=4m}	H _{I=5m}
90	0,383	0,629	0,761	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
80	0,057	0,180	0,245	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
70	1,177	1,472	1,652	0,135	0,000	0,000	0,000	0,000
60	1,285	1,578	1,686	0,213	0,000	0,000	0,000	0,000
50	1,718	2,219	2,360	0,372	0,003	0,000	0,000	0,000
40	2,124	2,583	3,218	0,340	0,023	0,000	0,000	0,000

ΚΛΙΣΗ 1:3, $\theta=18.4^\circ$								
Κλίση	Απόσταση ηρεμίας			Μέγιστο ύψος αναπήδησης				
Μοίρες	P ₅₀	P ₉₅	P ₁₀₀	H _{I=1m}	H _{I=2m}	H _{I=3m}	H _{I=4m}	H _{I=5m}
90	0,000	0,210	0,219	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
80	0,000	0,020	0,142	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
70	0,806	0,997	1,079	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000
60	0,594	0,722	0,746	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
50	0,938	1,117	1,188	0,046	0,000	0,000	0,000	0,000
40	1,352	1,682	1,733	0,242	0,000	0,000	0,000	0,000

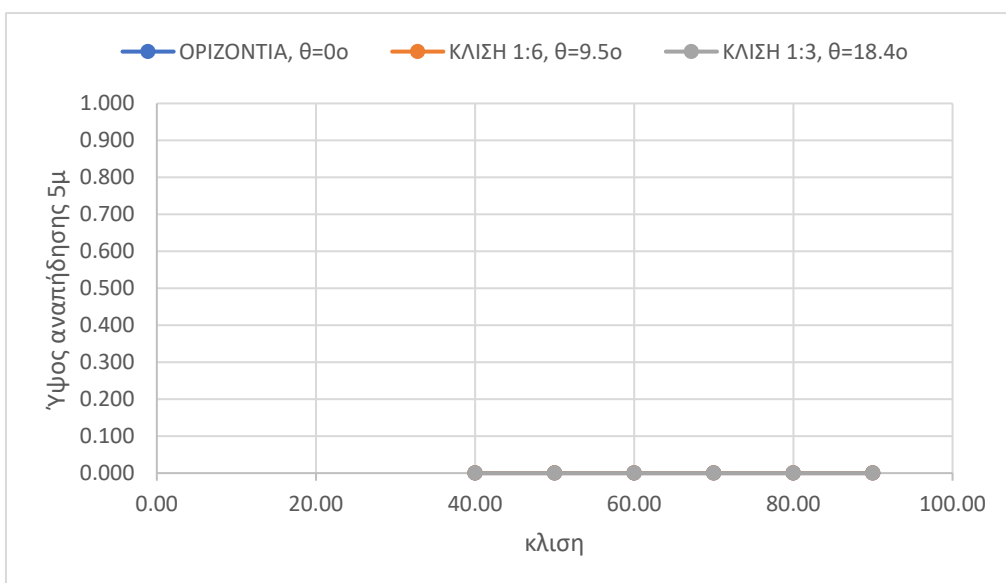
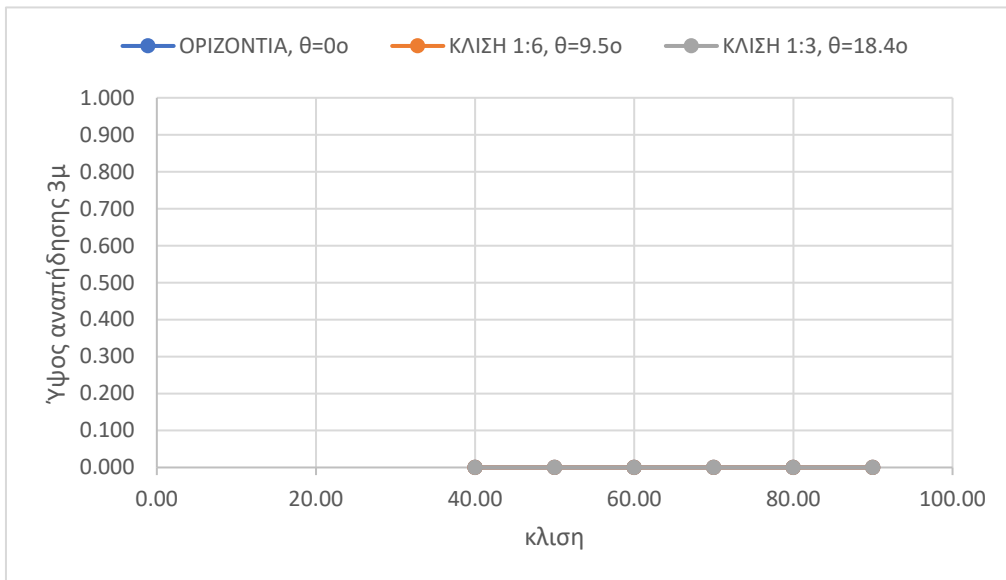
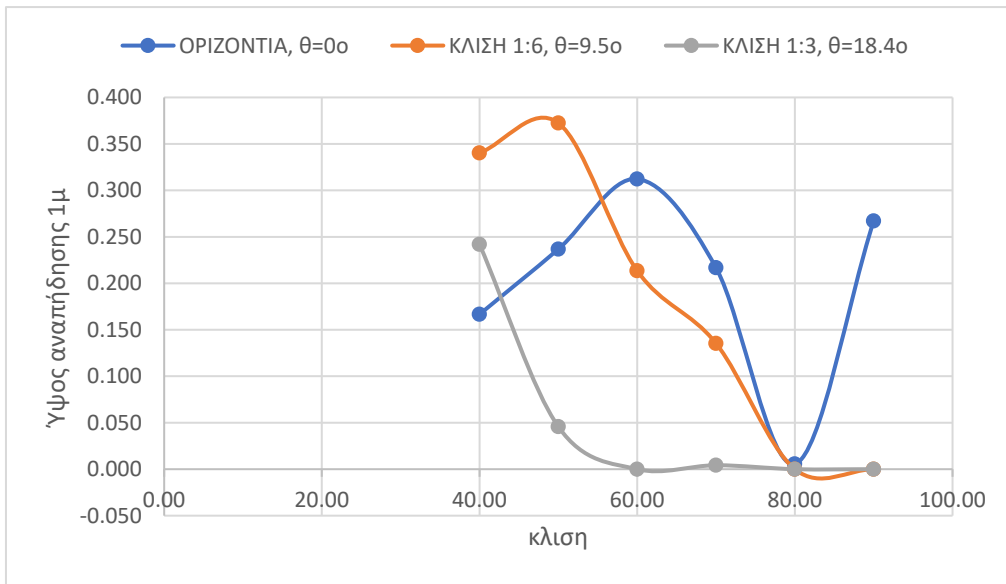
Πίνακας (6.10) Αποτελέσματα αναλύσεων σε ύψος πρανούς 4 μέτρα με συντελεστή κάθετης αναπήδησης 0,25



Διαγράμματα (6.73),(6.74),(6.75) Διαγράμματα απόστασης ηρεμίας συναρτήσεσι κλίσης πρανούς για P100, P95 και P50.



Διαγράμματα (6.76),(6.77),(6.78) Διαγράμματα ύψους αναπήδησης συναρτήσει κλίσης πρανούς για οριζόντιες αποστάσεις από τον πόδα του πρανούς 1,2,3,4 και 5 μέτρα.

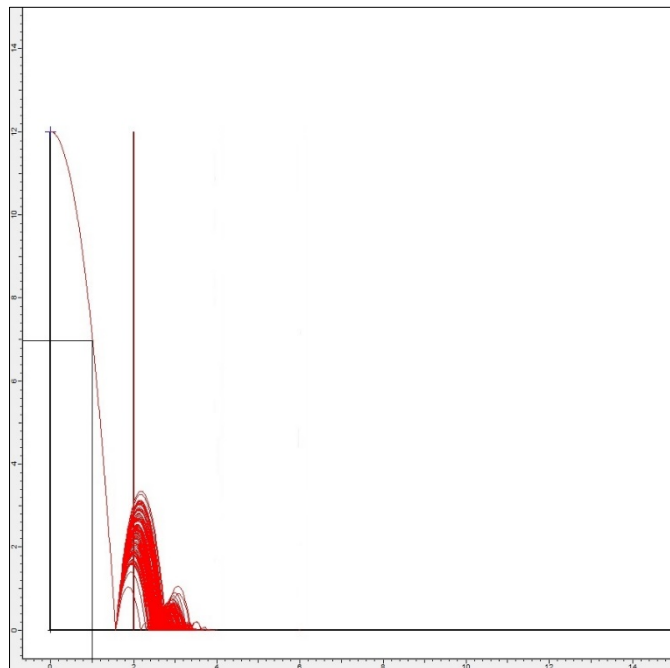


Διαγράμματα (6.79),(6.80),(6.81) Διαγράμματα ύψους αναπήδησης σε 1,3 και 5 μέτρα οριζόντιας απόστασης από τον πόδα του πρανούς συναρτήσει της κλίσης πρανούς

6.5 Συμπεράσματα

- Ο πίνακας του ΟΜΟΕ δίνει μέγιστο πλάτος και βάθος τάφρου ίσο με 8 και 3 μέτρα αντίστοιχα για ύψος πρανούς μεγαλύτερο των 35 μέτρων. Ο κανονισμός μελετών ερευνών δίνει μέγιστο πλάτος τάφρου ίσο με 7,5 μέτρα για πρανές ύψους μεγαλύτερο των 30 μέτρων. Το διάγραμμα Ritchie δίνει μέγιστο πλάτος και βάθος τάφρου, ίσο με 7,6 και 2,4 μέτρα αντίστοιχα για πρανές ύψους 40 μέτρων.
- Για ύψη πρανούς μέχρι 12 μέτρα που αποτελεί παραδοχή των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν, τα χαρακτηριστικά των τάφρων που προκύπτουν είναι τα εξής:
- Ο ΟΜΟΕ δίνει πλάτος τάφρου ίσο με 5 μέτρα και βάθος τάφρου ίσο με 2 μέτρα, για διάφορες κλίσεις πρανούς.
- Ο κανονισμός μελετών ερευνών δίνει για ύψος πρανούς 12 μέτρα, 5 μέτρα πλάτος τάφρου.
- Το διάγραμμα Ritchie για 12 μέτρα ύψος πρανούς, δίνει πλάτος ίσο με 4,57 μέτρα και βάθος 1,83 μέτρα.
- Με βάση τους κανονισμούς, αλλά και το διάγραμμα Ritchie, συνδέοντάς τα με τις αναλύσεις, υπάρχουν περιπτώσεις στην ανάλυση όπου δεν επαρκεί η τάφρος για την συγκράτηση των τεμαχών. Αυτό παρατηρείται πολύ έντονα στις αναλύσεις με συντελεστή αναπήδησης 0,45, με τις μέγιστες τιμές να παρουσιάζονται στις αναλύσεις 40/12/0.45 και 50/12/0.45, όπου στην περίπτωση της τάφρου 1:6, σε απόσταση από τον πόδα του πρανούς 5 μέτρα, το ύψος αναπήδησης αγγίζει τα 2 μέτρα, ενώ για την τάφρο 1:3 η αναπήδηση για την ίδια περίπτωση, φτάνει τα 0,7 μέτρα. Για τις ίδιες αναλύσεις, παρατηρούνται οι μέγιστες τιμές και στις αποστάσεις ηρεμίας.
- Από τις αναλύσεις, προκύπτει ότι η μέγιστη οριζόντια απόσταση που έφτασε ένα τέμαχος είναι τα 29,2 μέτρα για την ανάλυση 40/12/0.45 με οριζόντια τάφρο, ενώ για την ίδια ανάλυση παρατηρούνται οι μέγιστες τιμές οριζόντιας μετατόπισης και για τις δύο περιπτώσεις των τάφρων με κλίση όπου οι τιμές είναι 12,9 μέτρα για κλίση τάφρου 1:6, και 6,49 μέτρα για κλίση τάφρου 1:3. Από την παραπάνω ανάλυση, συμπεραίνουμε ότι για ύψος πρανούς 12 μέτρα και κλίση 40 μοίρες, το μήκος της επιφάνειας του πρανούς είναι μεγάλο και με δεδομένο ότι το τέμαχος ξεκινά την κίνησή του από την κορυφή, τότε έχει να διανύσει πολύ μεγάλη απόσταση πριν φτάσει στον πόδα του πρανούς, άρα θα έχει αποκτήσει πολύ μεγάλες περιστροφική και μεταφορική ταχύτητα με αποτέλεσμα να ισορροπήσει σε μεγάλη απόσταση από τον πόδα και ίση με 29,2 μέτρα που βρέθηκαν στην ανάλυση.
- Για τις αναλύσεις των 90 μοιρών κλίσης πρανούς και για ύψη 8 και 12 μέτρα, από τα διαγράμματα, παρατηρούνται ύψη αναπήδησης που είναι πολύ μεγάλα, σε απόσταση 1 μέτρου από οριζόντια από τον πόδα του πρανούς. Αυτό οφείλεται, στο γεγονός πως στις 90 μοίρες, το τέμαχος που αστοχεί,

εκτοξεύεται οριζόντια, χωρίς να έρθει σε επαφή με το πρανές και να αναπηδήσει. Αυτό παρατηρείται στα διαγράμματα των υψών αναπήδησης και κυρίως σε αυτό του 1 μέτρου οριζόντιας απόστασης. Αυτό μας δείχνει ότι, σε αυτή την περίπτωση, για 1 μέτρο οριζόντιας απόστασης, το ύψος αναπήδησης που θα έχει το τέμαχος σε εκείνο το σημείο, θα είναι ίσο με το ύψος που θα βρίσκεται χωρίς αναπήδηση. Αυτή η περίπτωση, παρατηρείται μόνο στις 90 μοίρες όπου ουσιαστικά δεν έρχεται σε επαφή με το πρανές το τέμαχος όπως συμβαίνει στις υπόλοιπες γωνίες πρανούς. Θεωρώντας και αυτή την περίπτωση, το μέγιστο ύψος αναπήδησης ή μέγιστο ύψος τεμάχους, είναι τα 6,9 μέτρα, για την περίπτωση ανάλυσης 90/12/0.45.



Εικόνα (6.4) Ανάλυση 90/12/0.45. Ύψος αναπήδησης σε 1 μέτρο οριζόντιας μετακίνησης από τον πόδα του πρανούς

- Εξαιρώντας την παραπάνω περίπτωση, το μέγιστο ύψος αναπήδησης που καταγράφεται, είναι τα 3,3 μέτρα για την περίπτωση ανάλυσης 50/12/0.45 και για κλίση τάφρου 1:3. Επίσης, από τα διαγράμματα, παρατηρείται ότι στις περιπτώσεις κλίσης πρανών 40 50 και 60 μοίρες, υπάρχει μεγαλύτερο ύψος αναπήδησης στις επικλινείς τάφρους. Αυτό πιθανόν συμβαίνει, επειδή το τέμαχος μετά την αστοχία του, έρχεται άμεσα σε επαφή με το πρανές και λόγω της κλίσης, το τέμαχος περιστρέφεται επιταχυνόμενα μέχρι τον πόδα του πρανούς, όπου έχει αναπτύξει την μέγιστη περιστροφική ταχύτητα. Στην περίπτωση των επικλινών τάφρων, το τέμαχος όταν έρθει σε επαφή με την επιφάνεια της τάφρου, θα δαπανήσει όλη την περιστροφική ταχύτητα που είχε, και με την βοήθεια της κλίσης της τάφρου θα φτάσει σε αρκετά μεγάλο ύψος, περιορίζοντας όμως κατά πολύ την οριζόντια μετακίνησή του.

Αντίθετα, στην περίπτωση οριζόντιας τάφρου το ύψος αναπήδησης δεν είναι μεγάλο, αλλά η οριζόντια απόσταση θα αυξανόταν σημαντικά.

- Στον πίνακα (6.11), δίνονται οι μέγιστες τιμές για κάθε περίπτωση ανάλυσης και για τις κλίσεις της τάφρου.

Πίνακας (6.11) Μέγιστες τιμές ανάλυσης

P50	P95	P100	H1	H2	H3	H4	H5
ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ, $\theta=0^\circ$							
26,14m	28,94m	29,2m	6,90m	2,33m	2,71m	2,61m	2,08m
ΚΛΙΣΗ 1:6, $\theta=9.5^\circ$							
10,59m	12,58m	12,93m	6,88m	3,02m	2,78m	2,53m	2,05m
ΚΛΙΣΗ 1:3, $\theta=18.4^\circ$							
5,92m	6,33m	6,49m	6,72m	2,8m	2,7m	1,61m	0,74m

- Παρατηρώντας τους παραπάνω πίνακες και έχοντας διάφορες τιμές διαστάσεων τάφρων από τους κανονισμούς, συμπεραίνουμε πως η τάφρος από μόνη της δεν έχει μεγάλη αποτελεσματικότητα. Τα 8 μέτρα μέγιστο πλάτος που δίνει ο ΟΜΟΕ, απαιτούν σημαντικό εύρος κατάληψης και πολύ μεγάλα κόστη εκσκαφών, στην περίπτωση που σχεδιάζεται παράλληλα με την χάραξη της οδοποιίας. Σε ελάχιστες περιπτώσεις, όπου είναι διαθέσιμος μεγαλύτερος χώρος για κατάληψη, χωρίς να απαιτούνται πολλές εκσκαφές μπορεί να κατασκευαστεί μεγάλη τάφρος. Στις περιπτώσεις υφιστάμενων δρόμων, είναι ανώφελο και να κατασκευαστεί τάφρος, διότι θα έπρεπε να γίνουν μεγάλες εκσκαφές στα πρανή και ανατινάξεις οι οποίες θα αύξαναν πολύ το κόστος χωρίς να υπάρχει όφελος. Σε αυτή την περίπτωση, μπορεί να διανοιχθεί μια μικρή τάφρος που θα λειτουργεί ταυτόχρονα και σαν τάφρος απορροής όμβριων, για την απόθεση τεμαχών και για πρωταρχικό μέτρο θα επιλεγόταν κάποιο άλλο, όπου για υφιστάμενους δρόμους, αυτό που χρησιμοποιείται περισσότερο είναι το μεταλλικό πλέγμα κουρτίνα, από το οποίο τα προϊόντα καταπτώσεων θα πέφτουν ελεγχόμενα στην μικρή τάφρο.

- Η τάφρος ανάσχεσης καταπτώσεων δεν χρησιμοποιείται σχεδόν ποτέ μόνη της σαν μέτρο αντιμετώπισης των καταπτώσεων. Λόγω της τυχαιότητας των αναπηδήσεων ή στην περίπτωση που ένα τέμαχος συγκρουστεί με μικρό εμπόδιο ή έχοντας ακανόνιστο σχήμα αναπηδήσει ανεξέλεγκτα, θα αλλάξει πολύ σημαντικά η τροχιά, όποτε μια τάφρος στον πόδα από μόνη της αν δεν είναι μεγάλη, δεν θα είναι επαρκής. Στις περιπτώσεις μεγάλων υψών πρανών (με γωνίες από 70 έως 90 μοίρες) αποτελεσματικότερο μέτρο θα ήταν η τοποθέτηση μεταλλικού πλέγματος κουρτίνας που δεν θα επιτρέπει αναπηδήσεις και το τέμαχος θα κολλήσει στην επιφάνεια του πρανούς μέχρι τελικά να καταλήξει στην τάφρο. Για κλίσεις από 40 έως 70 μοίρες, η επιλογή τοποθέτησης δύσκαμπτου φράχτη από σκυρόδεμα ή μεταλλικού δύσκαμπτου μετά την τάφρο, θα εμπόδιζε οποιαδήποτε κύλιση μπορούσε να κάνει ένα τέμαχος ώστε να βγει από την τάφρο και ταυτόχρονα, θα εμπόδιζε τα τεμάχη από το να αναπηδήσουν εκτός της τάφρου. Πολύ σημαντική επίδραση θα είχε στις αναπηδήσεις εντός της τάφρου, η επιλογή να φτιαχτεί ανεπένδυτη διότι αυτό θα μείωνε τους συντελεστές αναπήδησης.

Κεφάλαιο 7

7.1 Σύνοψη

Οι καταπτώσεις βράχων αποτελούν και θα συνεχίσουν να αποτελούν, ένα περίπλοκο φαινόμενο όσον αφορά την ανάλυση και δημιουργία φυσικού προσομοιώματος, λόγω του ακανόνιστου σχήματος των τεμαχίων, της τυχαίας επιφάνειας πρόσκρουσης και των χαρακτηριστικών τους. Η χρήση λογισμικών, οι ανάδρομες αναλύσεις και οι εργαστηριακές δοκιμές, έχουν απασχολήσει πολλούς μελετητές για την επέκταση του φαινομένου των καταπτώσεων και κατολισθήσεων. Γίνονται συχνά πολλές παραδοχές για την εκτίμηση των χαρακτηριστικών των υλικών με αποτέλεσμα παραδοχή στην παραδοχή να απομακρυνόμαστε όλο και περισσότερο από την ακριβή επίλυση του φαινομένου. Παρόλη την δυσκολία ανάλυσης του φαινομένου, έχει επιτευχθεί ο περιορισμός στο ελάχιστο των επιπτώσεων των καταπτώσεων, δημιουργώντας και σχεδιάζοντας μέτρα ανάσχεσης. Στον σχεδιασμό και την ανάλυση των τάφρων ανάσχεσης καταπτώσεων βασίστηκε η παρούσα εργασία, όπου με παραμετρική επιλογή δεδομένων αναλύθηκαν 162 διαφορετικές περιπτώσεις κλίσης πρανούς και τάφρων, ύψους πρανούς και συντελεστή αναπήδησης. Ήταν μια προσπάθεια με την βοήθεια του λογισμικού, για την καταγραφή τροχιών, αναλύσεων και διαμόρφωση των αποτελεσμάτων ώστε να αποτελούν ένα μικρό εύχρηστο κομμάτι γύρω από τις καταπτώσεις και τις τάφρους ανάσχεσης. Γνωρίζοντας το πεδίο που μελετάται, είναι επόμενο να γίνει επιτυχής τοποθέτηση μέτρων για την προστασία των χρηστών και των κατασκευών.

7.2 Προτάσεις για μελλοντική αξιοποίηση της ανάλυσης

Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε, καλύπτει ένα μεγάλο μέρος των περιπτώσεων των καταπτώσεων, καθώς εξετάζονται 6 διαφορετικές κλίσεις πρανών με 3 διαφορετικές περιπτώσεις τάφρων, οριζόντια, κλίση 1:6 και κλίση 1:3, ένα μεγάλο εύρος τιμών συντελεστών κάθετης αναπήδησης από 0,2 – 0,5. Με γνώμονα την παραμετρική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε, παρατίθενται οι παρακάτω προτάσεις για μελλοντική επέκταση της παραμετρικής ανάλυσης.

- Πραγματοποίηση της παραμετρικής ανάλυσης σε τρισδιάστατο λογισμικό για την μελέτη της επίδρασης και του πλάτους του πρανού στην συνολική κίνηση και στην πλευρική εκτροπή της τροχιάς.
- Η επιλογή περισσότερων αρχικών ταχυτήτων ή η επιλογή τυπικής απόκλισης σε αυτή ώστε να γίνουν ακόμα περισσότερα τα δεδομένα, όπως θα μπορούσε συνδυαστικά με αυτό, να αυξηθούν τα τεμάχια που αναλύονται από 100 σε περισσότερα.
- Το Rocfall, δίνει την δυνατότητα τοποθέτησης φράχτη στην ανάλυση του. Θα μπορούσε να γίνει συνδυασμός των δύο μέτρων αντιμετώπισης, καθώς οι τάφροι από μόνες τους δεν τοποθετούνται. Όπως αναλύθηκε στην εργασία, η μέγιστη απόσταση ηρεμίας και μέγιστο ύψος αναπήδησης, έτσι μπορεί να γίνει και επιλογή και διαστασιολόγηση φράχτη όχι μόνο για την προστασία από την υπερπήδηση των τεμαχών, αλλά και στην περίπτωση μεγάλων τεμαχών με μεγάλο βάρος, όπου πλέον απασχολεί και η κινητική ενέργεια του τεμαχούς. Σύμφωνα με τα παραπάνω, μπορεί να γίνει και δομικός έλεγχος του τοίχου για το μέγεθος της ενέργεια που μπορεί να απορροφήσει από ένα τέμαχος όπως φαίνεται και στην Εικόνα (2.47).
- Πιο σύνθετες αναλύσεις, όπως η επιλογή γωνίας τραχύτητας και η διαμόρφωση τω επιφανειών με διαφορετικά υλικά για αποτελέσματα πιο κοντά στην πραγματικότητα. Σε αυτή την περίπτωση λαμβάνονται γενικά ευμενείς επιλογές.
- Ανάλυση με περισσότερα και μεγαλύτερα ύψη από 12 μέτρα πρανών που ήταν το μέγιστο στην παρούσα ανάλυση, καθώς πολλά πρανή στον Ελλαδικό χώρο έχουν ύψος αρκετά μεγάλο.
- Ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα υπήρχε στην ανάλυση όπου τα πρανή θα διαμορφώνονταν με διαβαθμίσεις, με ενδιάμεσες τάφρους ή μικρούς φράχτες για την μείωση της κινητικής ενέργειας ή απλά για την ισορροπία των τεμαχών στους αναβαθμούς.
- Τυχαία αποτύπωση του πρανού όπως στην Εικόνα (5.3) ή εισαγωγή της διατομής του μέσω άλλων προγραμμάτων, που φαίνεται ένα πραγματικό πρανές με λεπτομέρειες.
- Συνδυασμός των παραπάνω για την διαστασιολόγηση τάφρων ανάσχεσης και φράχτη.

Κλείνοντας την παρούσα εργασία, παραθέτονται μερικές ακόμα εικόνες που τραβήχτηκαν κατά την διάρκεια συγγραφής αλλά και πριν, δείχνοντας την ενασχόληση με το θέμα ακόμα και στο κομμάτι των εικόνων.



Εικόνα (7.1) Αστοχία μικρού τοίχου από κατάπτωση (ΕΟ Χαλκίδας – Αιδηψού) (Προσωπικό αρχείο)



Εικόνα (7.2) Συνδυασμός κατάπτωσης με αστοχία βραχώμαζας. Μη επαρκής τοίχος (ΕΟ Χαλκίδας – Αιδηψού) (Προσωπικό αρχείο)



Εικόνα (7.3) Τέμαχος που αστόχησε (ΕΟ Χαλκίδας – Αιδηψού) (Προσωπικό αρχείο)



Εικόνα (7.4) Μεταλλικό πλέγμα και αγκύριο που αστόχησε (Μαλακάσα) (Προσωπικό αρχείο)



Εικόνα (7.5) Τάφρος ανάσχεσης καταπτώσεων με υποστήριξη από δύσκαμπτο φράχτη (Χαλκίδα) (Προσωπικό αρχείο)



Εικόνα (7.6) Μεταλλικό Δίκτυ γεμάτο με προϊόντα καταπτώσεων (ΕΟ Χαλκίδας – Αιδηψού) (Προσωπικό αρχείο)



Εικόνα (7.7) Πολλαπλά μέτρα προστασίας. Φράχτης σκυροδέματος, μεταλλικοί φράχτες, και τάφρος. (ΕΟ Χαλκίδας – Αιδηψού) (Προσωπικό αρχείο)



Εικόνα (7.8) Θραύση τεμάχους σε πέντε στάδια. (α) Κατάπτωση (β) Πρόσκρουση με επιφάνεια (γ) θραύση τεμάχους σε κομμάτια (δ,ε) εκτόξευση θραυόμενων τεμαχίων (Πήλιο Ευβοίας) (Προσωπικό αρχείο)



Εικόνα (7.9) Μεταλλικό δίκτυο αγκυρωμένο σε φράχτη σκυροδέματος (Αυτοκινητόδρομος Α11 Σχηματαρίου – Χαλκίδας) (Προσωπικό αρχείο)



Εικόνα (7.10) Πολλαπλά μέτρα προστασίας (ΕΟ Χαλκίδας – Αιδηψού) (Προσωπικό αρχείο)

Βιβλιογραφία

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

- ARIZONA GEOLOGICAL SURVEY, 2021. *Landslides & Debris Flows*, Arizona: s.n.
- Asteriou, P., Saroglou, H. & Tsiambaos, G., 2013. *Rockfalls: Influence of Rock Hardness on the Trajectory of Falling rock Blocks* *Bulletin of the Geological Society of Greece*. s.l.:s.n.
- Badger, T., John, D. & Schellenberg, K., 2012. PROTECTION. In: *ROCKFALL: CHARACTERIZATION AND CONTROL*. s.l.:s.n., pp. 494-523.
- BEER, F., JOHNSTON, R. & CORNWELL, P., 2017. ΔΥΝΑΜΙΚΗ Διανυσματική Μηχανική. 9η Έκδοση επιμ. s.l.:Εκδόσεις Τζιόλα.
- Cruden, D. & Varnes, D., 1996. *LANDSLIDE TYPES AND PROCESSES*. s.l.:s.n.
- GEOBRUGG, 2021. *Safety is our nature*. s.l.:s.n.
- geotech, 2021. *slope protection*. s.l.:s.n.
- Hyun Kim, D., Gratchev, I., Berends, J. & Balasubramaniam, A., 2015. *Calibration of restitution coefficients using rockfall simulations based on 3D photogrammetry model: a case study*. s.l.:s.n.
- MACCAFERRI, 2021. *Rock fall Protection*. s.l.:s.n.
- Ministry of Business, Innovation & Employment (MBIE), New Zealand Geotechnical Society, NZ Transport Agency, 2016. *Rockfall: Design considerations for passive protection structures*. s.l.:s.n.
- Mulyono, A. et al., 2018. *The Hydromechanics of Vegetation for Slope Stabilization*. s.l.:IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.
- Novotny, J., 2013. *VARNES LANDSLIDE CLASSIFICATION 1978*. Prague: s.n.
- ONEGeologykids, n.d. *Slides*, s.l.: s.n.
- Physics Stack Exchange, 2013-2014. *Physics Stack Exchange*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://physics.stackexchange.com>
[Πρόσβαση Μάρτιος 2021].
- Pierson, Lawrence; Gullixson, Fred; Chassie, Ronald; Oregon Department of Transportation, 2001. *ROCKFALL CATCHMENT AREA DESIGN GUIDE Final Report (Metric Edition)*. Oregon: s.n.
- Pierson, L. & Van Vickle, R., 1993. *Rockfall Hazard Rating System Participant's Manual*. s.l.:U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration.
- Rocscience, 2021. *Verification*. s.l.:s.n.
- Sala, Z., Hutchinson, J. & Harrap, R., 2019. *Simulation of Fragmental Rockfalls Detected Using Terrestrial Laser Scans from Rock Slopes in South-Central British Columbia, Canada*. s.l.:s.n.
- Saroglou, H., 2019. *GIS-Based Rockfall Susceptibility Zoning in Greece*. Athens: s.n.

STATE OF NEW YORK DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, 2015. *GEOTECHNICAL DESIGN PROCEDURE: GEOTECHNICAL DESIGN PROCEDURE FOR PREPARING ROCK SLOPE RECOMMENDATIONS*. New York: s.n.

Transportation Research Board, 2018. *Managing Highway Rock Slope Scaling*. Washington D.C.: s.n.

U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, 2011. *Context Sensitive Rock Slope Design Solutions*. Washington: s.n.

USGS, 2018. *Ο υδρολογικός κύκλος, The Water Cycle, Greek*, s.l.: s.n.

Van Nieuwkoop, J., 2017. *Experimental and numerical modelling of tsunami waves generated by landslides*. s.l.:s.n.

Wikipedia, 2020. *Persistence (discontinuity)*, s.l.: s.n.

Xing , W., Yongxu , X. & Tianyue, Z., 2018. *Theoretical Analysis of Rockfall Impacts on the Soil Cushion Layer of Protective Structures*. Shaanxi: s.n.

Ελληνική Βιβλιογραφία

Αστερίου, Π., 2016. *Διερεύνηση των Γεωτεχνικών Παραμέτρων που Ελέγχουν τις Καταπτώσεις Βράχων*, Αθήνα: s.n.

Αστερίου, Π., 2020. *Βραχομηχανική - Σήραγγες*. Αθήνα: s.n.

Αστερίου, Π., 2021. *Ορύγματα - Επιχώματα*. Αθήνα: s.n.

Βασιλοπούλου , Ι. Ε., 2015. *Διερεύνηση της επίδρασης των χαρακτηριστικών πρόσκρουσης στις καταπτώσεις βράχων*, Αθήνα: s.n.

Δούτσος, Θ., 2014. *Γεωλογία: Αρχές και Εφαρμογές*. 2η Έκδοση επιμ. Αθήνα: Εκδόσεις Liberal Books.

Κανονισμός Μελετών Ερευνών ΚΜΕ, 1996. *ΟΔΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΕΧΝΙΚΑΙ ΜΕΛΕΤΑΙ Ε.Ε.* s.l.:s.n.

Κούκης , Γ. & Σαμπατακάκης, Ν., 2019. *Τεχνική Γεωλογία*. 2η Έκδοση επιμ. Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου.

Κωστόπουλος, Σ., 2008. *ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ Ανάλυση των Αρχών Σχεδιασμού & Κατασκευής II*. 1η Έκδοση επιμ. s.l.:Εκδόσεις Ίων.

Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας, χ.χ. *Σεισμοί και Ελλαδικός Χώρος*, s.l.: s.n.

ΠΑΤΡΙΔΟΓΝΩΣΙΑ, 2016 - 2021. *Βροχοπτώσεις: Το ύψος βροχής στην Ελλάδα*, s.l.: s.n.

Πελλής, Σ., 2012. *Physic Lessons Η βιβλιοθήκη της φυσικής*. [Ηλεκτρονικό]

Available at:

<http://physiclessons.blogspot.com/search?q=%CE%BF%CF%81%CE%B9%CE%B6%CF%8C%CE%BD%CF%84%CE%B9%CE%B1+%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CE%AE>

[Πρόσβαση Μάρτιος 2021].

Σοιλεμέζογλου, Γ. κ. σ., 2001. *Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων Διατομές (ΟΜΟΕ-Δ)*. s.l.:ΥΠΕΧΩΔΕ.

ΦΕΚ, 2003. Τροποποίηση διατάξεων του "Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού ΕΑΚ-2000" λόγω αναθεώρησης του Χάρτη Σεισμικής Επικινδυνότητας. *ΕΦΗΜΕΡΙΣ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ ΤΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑΣ*, Issue 2, p. 15968.

Παράρτημα
Αναλύσεις Rocfall

