



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΕΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗΣ

Διπλωματική Εργασία

Τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική αξιολόγηση για την
ανάλυση ευστάθειας πρανούς έναντι βραχοκαταπτώσεων σε
τριδιάστατο περιβάλλον στην περιοχή Βαλαώρα
Ευρυτανίας



Θωμάς Θωμαΐδης

Επιβλέπων Καθηγητής: Βασίλης Μαρίνος

Αθήνα 2023

Ευχαριστίες

Με την κατάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας που εκπονήθηκε στον τομέα Γεωτεχνικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της εργασίας Βασίλη Μαρίνο για την ανάθεση της εργασίας, την χρήσιμη καθοδήγηση και την φιλοξενία που έδειξε κατά την επίσκεψη στην θέση του έργου.

Οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Υπ. Δρ. Θεμιστοκλή Χατζηθεοδοσίου για την σημαντική του βοήθεια στην χρήση των προγραμμάτων Rocfall3, Metashape και CloudCompare, αλλά και για τις γνώσεις που μου μετέδωσε σχετικά με τρισδιάστατες μοντελοποιήσεις.

Επίσης θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στον Δρ. Ιωάννη Φαρμάκη, ο οποίος μου έδωσε την ιδέα και το έναυσμα να ανάγω τις αναλύσεις μου σε τρισδιάστατα μοντέλα.

Είμαι ευγνώμον που γνώρισα τον Δρ. Παύλο Αστερίου και θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για τις συμβουλές που μου έδωσε για την ανάλυση στο 3D μοντέλο. Η πρόσβαση μου στην διδακτορική του διατριβή ήταν καθοριστική στην δικιά μου κατανόηση του φαινομένου των βραχοκαταπτώσεων.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Αν. Καθηγητές ΕΜΠ Αχιλλέα Παπαδημητρίου και Νίκο Γερόλυμο για την συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή.

Τέλος, δεν θα μπορούσα να μην εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στους συμφοιτητές μου και στους φίλους για την όμορφη εμπειρία των προπτυχιακών μου σπουδών. Και πάνω από όλα οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου, η οποία είναι πάντα στο πλευρό μου.

Περίληψη

Η περιοχή της Ευρυτανίας είναι από τις πιο ορεινές περιοχές της Ελλάδας. Η ευρύτερη περιοχή χαρακτηρίζεται ως ορεινή με έντονο ανάγλυφο με μεγάλες υψομετρικές διαφορές. Λόγω του έντονου ανάγλυφου σημειώνονται αρκετά συχνά κατολισθητικά φαινόμενα και βραχοκαταπτώσεις που αποτελούν κίνδυνο για τους κατοίκους αλλά και καταστροφικές για τα έργα υποδομών.

Η θέση της έρευνας βρίσκεται κοντά στην τεχνητή λίμνη Κρεμαστών και απέχει 1.9km από τον οικισμό Βαλαώρα. Η συγκεκριμένη θέση αφορά πρηνές οδοποιίας μήκους 500m και μέγιστου ύψους 103m. Το εύρος των βραχοκαταπτώσεων που έχουν καταγραφεί κυμαίνεται από μεσαίου έως και μεγάλου μεγέθους τεμάχων που συχνά καταλήγουν στο κατάστρωμα της οδοποιίας.

Ως προς την γεωλογική δομή της περιοχής, κατά την τεχνική επίσκεψη σε πρώτη αυτοψία διακρίνονται δύο κύριοι φλυσχικοί σχηματισμοί. Ο 1^{ος} αποτελείται κυρίως από ψαμμιτικούς πάγκους και υπέρκειται του 2^{ου} που αποτελείται κυρίως από ιλυολιθικές ενστρώσεις. Ο βασικός μηχανισμός αστοχίας προκαλείται από την υποσκαφή των ψαμμιτικών πάγκων λόγω διάβρωσης και από την διεύρυνση των ασυνεχειών τους.

Η τεχνικογεωλογική και η γεωτεχνική αξιολόγηση της θέσης έρευνας πραγματοποιήθηκε αξιοποιώντας τα δεδομένα που προέκυψαν από τις επιτόπου αλλά και τις εργαστηριακές δοκιμές συσχετίζοντας τα με εμπειρικά νομογραφήματα και εξισώσεις.

Μέσω των γεωαναφερμένων φωτογραφιών που λήφθηκαν κατά την τεχνική επίσκεψη δομήθηκε με μέθοδο φωτογραμμετρίας SfM το τρισδιάστατο μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για τις αναλύσεις καταπτώσεων. Παράλληλα, μέσω του πυκνού νέφους σημείων που δημιουργήθηκε ήταν δυνατό να μετρηθούν οι προσανατολισμοί ασυνεχειών σε δύσβατες περιοχές.

Σύμφωνα με τις κινηματικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν εντοπίστηκαν οι κρίσιμοι μηχανισμοί αστοχίας και έγιναν αναλύσεις ευστάθειας για στατικές και σεισμικές συνθήκες. Όπου κρίθηκε απαραίτητο προτάθηκε κάναβος αγκυριών εξασφαλίζοντας την ευστάθεια των τεμαχών.

Κρίσιμο σημείο στην παρούσα διπλωματική ήταν ο προσδιορισμός των συντελεστών αναπήδησης του τρισδιάστατου μοντέλου. Για την εκτίμηση τους πραγματοποιήθηκε ανάστροφη ανάλυση με βάση τα δεδομένα καταπτώσεων τα οποία είχαν καταγραφεί μέσω διαχρονικής παρακολούθησης. Έφθονο βαθμονομήθηκαν οι συντελεστές αναπήδησης πραγματοποιήθηκαν οι αναλύσεις καταπτώσεων στο πρόγραμμα Rocfall3 της εταιρίας Rocscience.

Τέλος, βάσει των αποτελεσμάτων της ανάλυσης καταπτώσεων και των αναλύσεων ευστάθειας προτάθηκαν και ενδεχόμενα μέτρα προστασίας της οδού σε όλο το μήκος της ριψοκίνδυνης περιοχής.

Abstract

The region of Evrytania is one of the most mountainous regions of Greece. The region is characterized by its mountainous rough terrain with big altitude differences. There are a lot of landslides and rockfall events due to its rough terrain, which they pose a threat to the local population and the region's infrastructure.

The location of the study is near the artificial lake Kremaston and it's 1.9km away from the Valaora community. This study is about a 500m long slope alongside an existing road with maximum height of 103m. These rockfall events range from medium to large blocks which they occasionally reach the existing road.

During the technical visit, they were distinguished two main flysch formations at first sight. The first one is mainly consisted by sandstone blocks and it's top of the second one which is mainly consisted by siltstone layers. The major failure mechanism is attributed to υποκαρή of the sandstone blocks due to erosion and to the enlargement of the Joints.

The geotechnical evaluation of the slope was done utilizing the results of the on-site tests and the laboratory tests. Empirical nomograms and functions were used to correlate the test results with geotechnical parameters.

The 3D mesh model for the rockfall analysis was constructed by processing georeferenced photographs from UAV with photogrammetric method SfM. Moreover, the dense point cloud was used for measuring Joint directions and lengths in difficult to walk areas.

With the help of the kinematic analyses, the critical failure mechanisms were found, and stability analyses were done for static and seismic loads. A mesh of anchors was suggested for critical failure mechanisms.

An important part of this thesis was the calculation of the bounce coefficients of the 3D mesh. To determine them, a back analysis was conducted using monitoring data of previous rockfalls which were detected by comparing point clouds of different dates. The bounce coefficients were calibrated according to the given rockfall data and then rockfall analysis was done in Rocfall3 by Rocscience.

Finally, possible protective measures of the existing road were suggested according to the rockfall and stability analyses.

Πίνακας Περιεχομένων

Πίνακας Περιεχομένων	7
1. Εισαγωγή.....	15
1.1 Περιγραφή του προβλήματος	15
1.2 Αντικείμενο σκοπός.....	16
1.3 Δομή της εργασίας.....	17
1.4 Διαθέσιμα στοιχεία.....	17
1.5 Μεθοδολογία	18
2. Θεωρητικό Υπόβαθρο.....	18
2.1 Βραχόμαζα.....	19
2.2 Ασυνέχειες.....	19
2.2.1 Προσανατολισμός.....	19
2.2.1.1 Στερεογραφική προβολή.....	19
2.2.2 Συστήματα Ασυνεχειών και απόσταση επανάληψης.....	20
2.2.3 Εμμονή επιπέδων.....	20
2.2.4 Τραχύτητα.....	21
2.2.5 Άνοιγμα (εύρος) τοιχωμάτων	23
2.2.6 Διατμητική αντοχή ασυνεχειών	24
2.2.6.1 Δοκιμή άμεσης διάτμησης.....	24
2.2.6.2 Κριτήριο του Patton	26
2.2.6.3 Κριτήριο Barton - Bandis (1976).....	27
2.2.7 Αντοχή τοιχωμάτων ασυνεχειών	28
2.3 Κριτήριο αστοχίας της Βραχόμαζας.....	29
2.3.1 Μέτρο ελαστικότητας της Βραχομάζας.....	32
2.3.2 Μηχανικές παράμετροι άρρηκτου βράχου	33
2.3.2.1 Μέτρο ελαστικότητας του άρρηκτου βράχου	33
2.3.2.2 Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη άρρηκτου βράχου.....	34
2.3.3 Ταξινομήσεις Βραχόμαζας – Σύστημα Ταξινόμησης GSI.....	36
2.4 Ασθενής ετερογενής βραχόμαζες - Φλύσχη.....	38
2.5 Ευστάθεια Βραχώδων πρανών.....	40
2.5.1 Μηχανισμοί αστοχίας βραχώδων πρανών	40
2.5.1.1 Ολίσθηση σε καμπύλη επιφάνεια.....	41
2.5.1.2 Επίπεδη ολίσθηση τεμάχους πετρώματος.....	43

2.5.1.3 Σφηγοειδής Ολίσθηση.....	46
2.5.1.4 Ανατροπή παρακατακόρυφων δομών.....	48
2.6 Κατολισθήσεις.....	49
2.6.1 Καταπτώσεις (ή κατακρημνίσεις).....	49
2.6.1.1 Αναπήδηση.....	50
2.6.1.2 Εκτροπή	54
2.6.2 Ανατροπή.....	54
2.6.3 Ολίσθηση.....	55
2.6.4 Εξάπλωση	55
2.6.5 Ροές.....	55
2.6.6 Σύνθετες	56
2.7 Μέτρα αντιστήριξης.....	56
2.7.1 Παθητικά μέτρα αντιστήριξης.....	56
2.7.2 Αποστράγγιση	57
2.7.3 Τοίχος αντιστήριξης	58
2.7.4 Αγκύρια	58
2.7.4.1 Κατηγοροποίηση Αγκυρίων.....	59
2.7.4.2 Μηχανισμοί Αστοχίας – Αντοχή Αγκυρίου	61
3. Βασικές αρχές εναέριας φωτογραμμετρίας – Ψηφιακά εργαλεία έρευνας.....	66
3.1 Ορισμός Φωτογραμμετρίας – Μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων.....	67
3.2 Φωτογραμμετρία SfM (Structure-from-Motion).....	69
3.3 Εναέρια τρισδιάστατη φωτογραμμετρική αποτύπωση.....	73
3.4 Παρακολούθηση με εναέρια φωτογραμμετρία.....	76
3.5 Κατασκευή ψηφιακών όψεων βάθους.....	77
3.6 Ογκομετρήσεις τεμαχών βράχου από επεξεργασία τρισδιάστατων δεδομένων .	78
3.7 Τρισδιάστατα ομοιώματα επιφανείας (mesh models) ως είσοδοι σε αριθμητικές προσομοιώσεις βραχοκαταπτώσεων.....	79
4. Γεωλογικές Συνθήκες της θέσης έρευνας.....	82
4.1 Τοποθεσία και τοπογραφία της περιοχής	82
4.2 Γεωτεκτονική εξέλιξη περιοχής.....	84
4.3 Τεκτονική δομή	87
4.4 Γεωλογική Αξιολόγηση της θέσης έρευνας.....	88
4.5 Μηχανισμοί αστοχίας.....	92
4.6 Σεισμικότητα.....	94

5. Τεχνικογεωλογική – Γεωτεχνική Αξιολόγηση	97
5.1 Παράμετροι άρρηκτου βράχου	97
5.1.1 Δοκιμή σημειακής φόρτισης – Προσδιορισμός UCS ψαμμίτη	97
5.1.2 Εκτίμηση UCS ιλυολίθου από κρουσιομετρήσεις χρήση σφύρας Schmidt	101
5.1.3 Εκτίμηση m_i	102
5.1.4 Εκτίμηση E_i	103
5.2 Παράμετροι ασυνεχειών.....	104
5.2.1 Εκτίμηση JCS ασυνεχειών	104
5.2.2 Εκτίμηση JRC.....	107
5.2.3 Υπολογισμός φυσικής γωνίας τριβής και συνοχής ασυνεχειών	107
5.3 Παράμετροι Βραχόμαζας.....	110
5.3.1 Βαθμονόμηση της βραχόμαζας με το σύστημα GSI	110
6. Αναλύσεις Ευστάθειας.....	120
6.1 Μικροτεκτονική ανάλυση ασυνεχειών.....	120
6.2 Κινηματικές αναλύσεις.....	121
6.3 Ανάλυση ευστάθειας σφηνοειδών και επίπεδων ολισθήσεων.....	127
6.4 Αποτελέσματα αναλύσεων ευστάθειας.....	127
7. Τρισδιάστατες τροχιακές αναλύσεις βραχοκαταπτώσεων.....	131
7.1 Καταγραφή καταπτώμενων όγκων και προτεινόμενοι όγκοι για τις αναλύσεις	131
7.1.1 Μεθοδολογία	131
7.1.2 Κατανομή όγκων – Μέγιστος όγκος ανάλυσης	133
7.2 Τρισδιάστατη προσομοίωση βραχοκαταπτώσεων	143
7.2.1 Αξιολόγηση του τρισδιάστατου μοντέλου μέσω ανάστροφης ανάλυσης (back analysis) – Βαθμονόμηση συντελεστών αναπήδησης.....	144
7.2.3 Τροχιακή ανάλυση βραχοκαταπτώσεων.....	151
7.2.4 Αποτελέσματα τροχιακών αναλύσεων	152
8. Προτεινόμενα μέτρα	157
9. Συμπεράσματα.....	163
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	166
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ
ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ	169
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ ΔΟΚΙΜΩΝ	173
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ	ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ ...
	200

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ	ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ .. 205
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε	ΤΡΟΧΙΑΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ
ΚΑΤΑΠΤΩΣΕΩΝ	215

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1. χαρακτηρισμός των αποστάσεων μεταξύ των ασυνεχειών (Barton – Bandis, 1978).....	20
Πίνακας 2. Χαρακτηρισμός εμμονής (ISRM, 1978)	20
Πίνακας 3. Περιγραφή του ανοίγματος ασυνεχειών (ISRM, 1978).....	23
Πίνακας 4. Εύρος τιμής σταθεράς m_i (Hoek & Marinos, 2000)	32
Πίνακας 5. Εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού του μέτρου ελαστικότητας (E_m)	33
Πίνακας 6. εύρος τιμών για τον λόγο MR σύμφωνα με τις δημοσιεύσεις των Deere (1968) και των Palmstrom & Singh (2001)	34
Πίνακας 7. Αναλογίες των σ_{ci} , m_i και E_i των λιθολογικών μελών για την εκτίμηση της ζυγισμένης τιμής των αντίστοιχων παραμέτρων του άρρηκτου φλύσχη ανάλογα με τον τύπο της βραχόμαζας (Μαρίνος Β. 2007).....	39
Πίνακας 8. Χαρακτηριστικών τιμών UCS και E_i (Marinos & Tsiambaos, 2010)	40
Πίνακας 9. κατάταξης κατολισθήσεων κατά Varnes (1978)	49
Πίνακας 10. Παράμετροι αναπήδησης (Labieuse and Heidenreich, 2009).....	50
Πίνακας 11. Συντελεστής σχήματος, C_s (Αστερίου, 2016).....	53
Πίνακας 12. προτεινόμενες τιμές τ_w για βράχους και εδάφη. ΡΤΓ (1996).	65
Πίνακας 13. Στοιχεία σάρωσης υπό γωνία – Βαλαώρα (14 Νοεμβρίου 2022).	75
Πίνακας 14. Χαρακτηριστικά σεισμών με $M > 5$ του τελευταίου αιώνα. (gein.noa.gr) ..	95
Πίνακας 15. Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών	99
Πίνακας 16. Τιμές σ_{ci} για τα τεμάχια ψαμμίτη που πραγματοποιήθηκε PLT	100
Πίνακας 17. Υπολογισμός UCS και E μέσω του αριθμού κρούσεων με την σφύρα Schmidt. (Gaudie, 2006)	101
Πίνακας 18. Πίνακας εκτίμησης m_i για διάφορους τύπους πετρώματος	103
Πίνακας 19. Δοκιμών σφύρας Schmidt: διακλάσεις ψαμμίτη	105
Πίνακας 20. τιμές R για στρώση Ιλυολίθου	105
Πίνακας 21. τιμές R για διακλάσεις ιλυολίθου	106
Πίνακας 22. τιμές R για διάτμηση ιλυολίθου	106
Πίνακας 23. Εκτίμηση τραχύτητας ασυνεχειών ψαμμίτη JRC.....	107
Πίνακας 24. Υπολογισμός φυσικής γωνίας τριβής στρώσης ψαμμίτη	108
Πίνακας 25. Υπολογισμός φυσικής γωνίας για τις ασυνέχειες Ιλυολίθου.....	109
Πίνακας 26. Βασική γωνία τριβής για διάφορα ιζηματογενή πετρώματα	110
Πίνακας 27. Αναλογίες των σ_{ci} , m_i και E_i των λιθολογικών μελών για την εκτίμηση της ζυγισμένης τιμής των αντίστοιχων παραμέτρων του άρρηκτου φλύσχη ανάλογα με τον τύπο της βραχόμαζας (Μαρίνος Β. 2007).....	118
Πίνακας 28. Τιμές UCS_i , E_i , m_i για άρρηκτο βράχο	118
Πίνακας 29. Παράμετροι άρρηκτου βράχου και βραχόμαζας	119
Πίνακας 30. Αποτελέσματα αναλύσεων ευστάθειας	129

Πίνακας 31. Ιδιότητες αγκυρίου.....	129
Πίνακας 32. Τιμές παραμέτρων υλικών στο Rocfall 3	144
Πίνακας 33. Χαρακτηριστικά τεμάχων που εντοπίστηκαν μέσω του change detection	145
Πίνακας 34. Προτεινόμενες τιμές για τους συντελεστές αναπήδησης και της γωνίας ϕ	148
Πίνακας 35. Συχνότητα τελικής θέσης των τεμάχων ανά πηγή.....	149
Πίνακας 36. Βαθμονομημένες τιμές για τους συντελεστές αναπήδησης και της γωνίας	150

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1. απεικόνιση των γεωμετρικών στοιχείων που ορίζονται για την τραχύτητα σε μια επιφάνεια ασυνέχειας	21
Σχήμα 2. νομογράφημα εκτίμησης του δείκτη τραχύτητας ασυνεχειών JRC (Barton – Bandis, 1978)	22
Σχήμα 3. μορφές της τραχύτητας ασυνεχειών με την διακύμανση τιμών JRC (Barton 1987).....	23
Σχήμα 4. Διαγράμματα α) διατμητικής μετατόπισης – διατμητικής τάσης β) ορθή τάση – διατμητική αντοχή	25
Σχήμα 5. Απεικόνιση ενός διατμητικού κιβωτίου για δοκιμή άμεσης διάτμησης (Νομικός 2015).....	26
Σχήμα 6. Διάγραμμα διατμητικών – ορθών τάσεων για το Κριτήριο Patton (Νομικός 2015).....	27
Σχήμα 7. διάγραμμα διατμητικών – ορθών τάσεων για δοκιμή διάτμησης για 4 περιπτώσεις ασυνέχειας	28
Σχήμα 8. διάγραμμα εκτίμησης JCS (ISRM 1978).....	29
Σχήμα 9. Διάγραμμα εκτίμησης αντοχής βραχόμαζας με βάση το GSI και το m_i	31
Σχήμα 10. Αποδεκτές (αριστερά) και μη-αποδεκτή (δεξιά) επιφάνεια θραύσης (Νομικός 2015).....	35
Σχήμα 11. Δείκτης Γεωλογικής Αντοχής GSI (Hoek & Marinos 2000)	37
Σχήμα 12. Διάγραμμα GSI σε ετερογενής βραχόμαζα (Hoek & Marinos, 2007)	38
Σχήμα 13. Αστοχία ως ισότροπο μέσο (αριστερά). Αστοχία κατά μήκος συγκεκριμένων ασυνεχειών (Νομικός 2015).....	41
Σχήμα 14. Μέθοδος λωρίδων για Ολίσθηση σε καμπύλη επιφάνεια (Νομικός 2015) ...	42
Σχήμα 15. τριδιάστατη απεικόνιση επίπεδης ολίσθησης (Νομικός 2015)	44
Σχήμα 16. ανάλυση δυνάμεων ενός σώματος σε κεκλιμένη επιφάνεια (Νομικός 2015).....	44
Σχήμα 17. ανάλυση δυνάμεων σώματος σε κεκλιμένη επιφάνεια με εξωτερική δύναμη T (Νομικός 2015).....	45
Σχήμα 18. Απεικόνιση γεωμετρίας σφηνοειδούς ολίσθησης (Νομικός 2015)	46
Σχήμα 19. Ανάλυση ευστάθειας σφηνοειδούς ολίσθησης για τομή κάθετη (α) και για τομή οριζόντια/ άνοψη (β) (Νομικός 2015).....	47
Σχήμα 20. Γεωμετρικό μοντέλο για την ανάλυση οριακής ισορροπίας (Νομικός 2015)	48
Σχήμα 21. απεικόνιση των ειδών καταπτώσεων (Ritchie 1963).....	50

Σχήμα 22. Νομογράφημα εκτίμησης διορθωτικού συντελεστή γωνίας πρόσκρουσης (Αστερίου, 2016).....	53
Σχήμα 23. Είδη ανατροπών Goodman & Bray (1976).....	54
Σχήμα 24. Περιστροφική ολίσθηση (Varnes, 1978).....	55
Σχήμα 25. Εξάπλωση (Varnes, 1978).....	55
Σχήμα 26. Ροή (Varnes, 1978).....	56
Σχήμα 27. Μέτρα αντιμετώπισης βραχοπτώσεων (Hoek, 2000).....	57
Σχήμα 28. Τοίχος βαρύτητας – Καταστάσεις αστοχίας.....	58
Σχήμα 29. Τμήματα αγκυρίου.....	59
Σχήμα 30. Τύποι Αγκυρίων.....	61
Σχήμα 31. Τομή βολβού ενέματος α) για προσωρινά αγκύρια, b) μόνιμα αγκύρια.....	61
Σχήμα 32. γεωμετρία πρίσματος με μονή αγκύρωση υπό γωνία γ	62
Σχήμα 33. Τάσεις στον βολβό το ενέματος.....	63
Σχήμα 34. Διάγραμμα συντελεστή φέρουσας ικανότητας $N_q-\phi$	64
Σχήμα 35. Σχηματική αναπαράσταση λήψης αεροφωτογραφιών. Με διακεκομμένη γραμμή φαίνεται η πορεία του drone και με τις χρωματιστές γραμμές παρουσιάζονται οι λήψεις.....	67
Σχήμα 36. Σχηματική αναπαράσταση φωτογραμμετρίας SfM, λήψη φωτογραφιών με μεγάλη επικάλυψη από πολλαπλές θέσεις (Westoby et al., 2012).....	69
Σχήμα 37. Ροή εργασιών της μεθόδου Structure – from – Motion. (Geomorphology, 2012).....	72
Σχήμα 38. Εξοπλισμός εναέριας φωτογραμμετρικής αποτύπωσης. Αριστερά το ΣμηΕΑ Phantom 4 RTK και δεξιά ο σταθμός D-RTK 2 GNSS.....	73
Σχήμα 39. Εντοπισμός κοινών σημείων σε ζεύγος αλληλοεπικαλυπτόμενων φωτογραφιών (Η διαδικασία πραγματοποιείται αυτόματα από το λογισμικό).....	74
Σχήμα 40. Αραιό νέφος σημείων (Sparse point) cloud και το σχέδιο πτήσης, εναέριας φωτογραμμετρίας υπό γωνία, που σχεδιάστηκε στην περιοχή της έρευνας, πάνω στο οποίο αποτυπώνονται οι θέσεις των 342 φωτογραφιών που ελήφθησαν.....	75
Σχήμα 41. Πυκνό νέφος σημείων (Dense Point Cloud) της θέσης έρευνας.....	75
Σχήμα 42. Τρισδιάστατη ψηφιακή αποτύπωση του πρανούς στην θέση έρευνας.....	77
Σχήμα 43. Τεμάχος όγκου 6.29 m^3 πεσμένο στην παρειά του πρανούς. Αριστερά: Νέφος σημείων τρισδιάστατου τεμάχους. Δεξιά: τρισδιάστατο μοντέλο επιφανείας τεμάχους.....	79
Σχήμα 44. Ταξινόμηση νέφους σημείων. Κατηγοριοποίηση βλάστησης – βραχώμαζας στην θέση έρευνας.....	80
Σχήμα 45. Το τελικό τρισδιάστατο ομοίωμα επιφανείας που προκρίθηκε για την τροχιακή ανάλυση των φαινομένων βραχοκατάπτωσης.....	81
Σχήμα 46. (a) Αεροφωτογραφία (Google maps) της θέσης έρευνας, (b) Νομός Ευρυτανίας.....	82
Σχήμα 47. Μορφολογία περιοχής έρευνας. Τμήμα τοπογραφικού χάρτη Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού (ΓΥΣ) της ευρύτερης περιοχής, κλίμακας 1:50000.....	83
Σχήμα 48. (a) Αναλυτική τοπογραφία της θέσης έρευνας, (b) & (c) ψηφιακές όψεις βάθους.....	83
Σχήμα 49. Όψη της θέσης έρευνας από αεροφωτογραφία (UAV).....	84
Σχήμα 50. Χάρτης Δυτικής Ελλάδας με τις Γεωτεκτονικές ζώνες. (P. Faupl, A. Pavlopoulos & G. Migiros, 1997).....	85

Σχήμα 51. Απόσπασμα από το γεωλογικό χάρτη Ι.Γ.Μ.Ε., φύλλο ΡΑΠΤΟΠΟΥΛΟ (1:50000).....	86
Σχήμα 52. Σχηματική λιθοστρωματογραφική στήλη της ζώνης Γαβρόβου – Τρίπολης. 1: σερικιτικοί σχιστόλιθοι, 2: φυλλίτες, 3 χαλαζίτες, 4 ασβεστολιθικές ενστρώσεις, 5: δολομίτες, 6: μαύροι ασβεστόλιθοι, 7: λατυποπαγείς ασβεστόλιθοι, 8: βωξιτική εμφάνιση, 9: φλύσχης.....	87
Σχήμα 53. Χάρτης της κεντρικής Ελλάδας με ρήγματα που έχουν εντοπιστεί στην ευρύτερη περιοχή της μελέτης.....	88
Σχήμα 54. Γενική γεωλογική αξιολόγηση της θέσης έρευνας.....	89
Σχήμα 55. Ενότητα 1, φλύσχης που επικρατούν ψαμμιτικές ενστρώσεις (ΒΑ τμήμα)	89
Σχήμα 56. Ενότητα Ι, φλύσχης που επικρατούν ψαμμιτικές ενστρώσεις στην Νότια περιοχή σε υψηλό υψόμετρο.....	90
Σχήμα 57. Ενότητα ΙΙ, φλύσχης που επικρατούν κυρίως ιλυολιθικές ενστρώσεις, μέτρια έως έντονα διαταραγμένος.....	90
Σχήμα 58. Μιογάγγεια στην θέση έρευνας.....	91
Σχήμα 59. Κορήματα ερυθρού χρώματος.....	91
Σχήμα 60. Καταπτώμενα ψαμμιτικά τεμάχια στην ΒΑ περιοχή.....	92
Σχήμα 61. Ψαμμιτικά τεμάχια που έχουν εντοπιστεί σε μιογάγγειες.....	93
Σχήμα 62. Αποτύπωμα σφηνοειδούς ολίσθησης στην ενότητα ΙΙ.....	94
Σχήμα 63. Σεισμική δραστηριότητα εντός ακτίνας 50km από την θέση έρευνας. (gein.noa.gr).....	94
Σχήμα 64. Χάρτης Σεισμικής Επικινδυνότητας Ελλάδας (ΕΑΚ 2003).....	96
Σχήμα 65. Δοκίμια εργαστηριακών δοκιμών από την θέση έρευνας.....	98
Σχήμα 66. Νομογράφημα συσχέτισης $I_{s(50)}$ με σ_c Tsiambaos & Sabatakis (2008).....	100
Σχήμα 67. Ιστογράμμα των κρούσεων από τις δοκιμές Schmidt σε Ιλυόλιθο.....	102
Σχήμα 68. Υπολογισμός του JCS των ασυνεχειών μέσω του νομογραφήματος SHV – σ_c	107
Σχήμα 69. Διάγραμμα Ορθών – Διατμητικών Τάσεων.....	109
Σχήμα 70. Φλύσχης τύπου ΙΙΙ.....	111
Σχήμα 71. Φλύσχης τύπου VIII.....	112
Σχήμα 72. Φλύσχης τύπου VII.....	113
Σχήμα 73. Φλύσχης τύπου VI.....	114
Σχήμα 74. Υπολογισμός GSI των ΤΕ της θέσης έρευνας.....	115
Σχήμα 75. Τεχνικογεωλογικός χάρτης θέσης έρευνας.....	116
Σχήμα 76. Μέτρηση μήκος ασυνεχειών μέσω του προγράμματος CloudCompare.....	120
Σχήμα 77. Κύρια επίπεδα ασυνεχειών στον Φλύσχη ΤΕ1 στην Βορειοανατολική περιοχή.....	121
Σχήμα 78. Κινηματική ανάλυση για σφηνοειδή ολίσθηση στον Φλύσχη ΤΕ1 στην βορειοανατολική περιοχή.....	122
Σχήμα 79. Κινηματική ανάλυση για επίπεδη ολίσθηση στον Φλύσχη ΤΕ1 στην βορειοανατολική περιοχή.....	122
Σχήμα 80. Κινηματική ανάλυση για ανατροπή στον Φλύσχη ΤΕ1 στην βορειοανατολική περιοχή.....	123
Σχήμα 81. Επίπεδα ασυνεχειών J1 και J2 στο τμήμα που εκτιμήθηκε η μέγιστη βραχοκατάπτωση.....	124

Σχήμα 82. Κινηματική ανάλυση για σφηνοειδής ολίσθηση στον Φλύσχη TE2 στην βόρεια περιοχή	125
Σχήμα 83. Κινηματική ανάλυση για επίπεδη ολίσθηση στον Φλύσχη TE4 στην βόρεια περιοχή.....	126
Σχήμα 84. Κινηματική ανάλυση για σφηνοειδής ολίσθηση στον Φλύσχη TE4 στην βόρεια περιοχή	127
Σχήμα 85 Διατομή Χ.Θ. 0+120. Ενδεικτικά γραφικά αποτελέσματα ανάλυσης για τον συνδυασμό της διάκλασης J1 και Στρώσης. Στατικές συνθήκες με υδατική φόρτιση 50-ετίας και χρήση των προτεινόμενων αγκυριών.	130
Σχήμα 86. Τρισδιάστατη ψηφιακή όψη βάθους του συνολικού πρανούς	132
Σχήμα 87. Τρισδιάστατη ψηφιακή όψη βάθους των ψαμμιτικών πάγκων κοντά στη στέψη του πρανούς.....	132
Σχήμα 88. Ογκομετρική κατανομή τεμάχων πεσμένων στην παρειά του πρανούς, στα ερείσματα και επί του οδοστρώματος.	133
Σχήμα 89. Τέμαχος όγκου 6.29 m ³ πεσμένο στην παρειά του πρανούς. Αριστερά: Νέφος σημείων τρισδιάστατου αντικειμένου βραχοκατάπτωσης. Δεξιά: τρισδιάστατο μοντέλο πλέγματος (mesh model) αντικειμένου βραχοκατάπτωσης για ακριβείς υπολογισμούς όγκου και σχήματος.....	134
Σχήμα 90. Τμήμα Βραχώμαζας που εκτιμάται πως είχε αστοχήσει σταδιακά.....	135
Σχήμα 91. Επικρεμάμενο τέμαχος όγκου 8 m ³ στην περιοχή ακριβώς πάνω από την επαφή του ψαμμίτη με τον ιλυόλιθο.	136
Σχήμα 92. Ογκομετρική κατανομή επικρεμάμενων τεμάχων και τεμάχων από αυλακώσεις	136
Σχήμα 93. Γεωμετρία τεμάχους 26m ³ το οποίο απουσιάζει.	137
Σχήμα 94. Φωτογραφική αποτύπωση της θέσης όπου προέκυψε το μέγιστο μέγεθος τεμάχους ψαμμίτη της τάξης των 26 m ³ βάση της γεωμετρίας των αυλακώσεων από κατάπτωση.	138
Σχήμα 95. Ανίχνευση μεταβολών για τη χρονική περίοδο Οκτωβρίου 2021 – Μαΐου 2023. Οι μεταβολές αποτυπώνονται, με ψυχρά χρώματα (μπλε), απώλεια υλικού, και με θερμότερα χρώματα (κίτρινα), προσθήκη υλικού.	139
Σχήμα 96. Ογκομετρική κατανομή τεμαχών από αναλύσεις ανίχνευσης μεταβολών (change detection).....	140
Σχήμα 97. Ανίχνευση μεταβολών στο βορειοανατολικό τμήμα του πρανούς για τη χρονική περίοδο Οκτωβρίου 2021 – Μαΐου 2023. Οι μεταβολές αποτυπώνονται, με ψυχρά χρώματα (μπλε), απώλεια υλικού, και με θερμότερα χρώματα (κίτρινα), προσθήκη υλικού.....	141
Σχήμα 98. Ανίχνευση μεταβολών στο κεντρικό και ανάντη τμήμα του πρανούς για τη χρονική περίοδο Οκτωβρίου 2021 – Μαΐου 2023. Οι μεταβολές αποτυπώνονται, με ψυχρά χρώματα (μπλε), απώλεια υλικού	142
Σχήμα 99. Ανίχνευση μεταβολών στο νοτιοδυτικό τμήμα του πρανούς για τη χρονική περίοδο Οκτωβρίου 2021 – Μαΐου 2023. Οι μεταβολές αποτυπώνονται, με ψυχρά χρώματα (μπλε), απώλεια υλικού, και με θερμότερα χρώματα (κίτρινα), προσθήκη υλικού	142
Σχήμα 100. Συνολική ογκομετρική κατανομή των τεμαχών της θέσης έρευνας.	143

Σχήμα 101. Διαχωρισμός των υλικών στο 3D mesh: α) πορτοκαλί: ψαμμίτης (TE1), β) κίτρινο: ιλυόλιθος (TE2), γ) σκούρο γκρι: άσφαλτος.....	144
Σχήμα 102 Τεμάχη κατάντη της οδού Βόρειο τμήμα (X.Θ. +080.00 με X.Θ. +160.00)	146
Σχήμα 103. Τεμάχη κατάντη του πρανούς, Νότια περιοχή (X.Θ. +365.00 με X.Θ. +410.00).....	147
Σχήμα 104. Τεμάχη κατάντη του πρανούς X.Θ. +16.00 με X.Θ. +230.00	147
Σχήμα 105. Θέσεις τεμάχων στο 3D μοντέλο στο λογισμικό του Rocfall 3.....	148
Σχήμα 106. Τροχιές αναστροφής ανάλυσης.....	150
Σχήμα 107. Αποτελέσματα αναστροφής ανάλυσης με βαθμονομημένες τιμές αναπήδησης.....	151
Σχήμα 108. Τέμαχος 1m ³ το οποίο εντοπίστηκε από την ανάλυση ανίχνευσης μεταβολών στο κεντρικό και ανάντη τμήμα του πρανούς.....	152
Σχήμα 109. Κάτοψη των αναλύσεων για τεμάχη φλύσχη TE1.....	153
Σχήμα 110. Όψη των αναλύσεων για τεμάχη φλύσχη TE1 στην Βόρεια περιοχή	153
Σχήμα 111 Τροχιές αναπήδησης που καταλήγουν στην οδοποιία.....	154
Σχήμα 112. Κάτοψη αναλύσεων για φλύσχη τύπου TE1 στη νότια περιοχή	154
Σχήμα 113. Όψη αναλύσεων για φλύσχη τύπου TE1 στη νότια περιοχή	155
Σχήμα 114. Διάγραμμα Μέγιστης κινητικής ενέργειας κατά μήκος της οδού στην ΒΑ περιοχή.....	156
Σχήμα 115. Διάγραμμα Μέγιστης κινητικής ενέργειας κατά μήκος της οδού στην Νότια περιοχή	156
Σχήμα 116. Γενική οριζοντιογραφία θέσης έρευνας.....	157
Σχήμα 117. Τυπική διατομή σκεπάστρου (Τομή ΒΒ').	158
Σχήμα 118. Τυπική διατομή μεταξύ X.Θ. +080.00 με +180.00 (Τομή ΑΑ')	159
Σχήμα 119. Τυπική διατομή από X.Θ. +180.00 έως και X.Θ. +440.00 (Τομή ΕΕ')	160
Σχήμα 120. Τυπική Διατομή πριν την X.Θ. +040.00 (Τομή ΔΔ').....	161
Σχήμα 121. Τυπική Διατομή μεταξύ X.Θ. +040.00 και X.Θ. +080.00.....	162

1. Εισαγωγή

1.1 Περιγραφή του προβλήματος

Ο νομός της Ευρυτανίας είναι από τις πιο ορεινές περιοχές της Ελλάδας με έντονα φαινόμενα κατολισθήσεων και καταπτώσεων λόγω του έντονου ορεινού

ανάγλυφου, οι οποίες αποτελούν κίνδυνο στον ντόπιο πληθυσμό αλλά επίσης προκαλούν ζημιές στις υποδομές.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά πρανές μήκους 500m στην Βαλαώρα κοντά στην τεχνητή λίμνη Κρεμαστών. Παράλληλα στο πρανές διέρχεται οδός η οποία συνδέει την Βαλαώρα με το Καρπενήσι. Ανάντη της διερχόμενης οδού το πρανές έχει μέγιστο ύψος 103m ενώ κατάντη της οδού συναντάται κρημνός. Η βραχώμαζα του πρανούς είναι φλύσχης με εναλλαγές ψαμμίτη και ιλυολίθου. Στο βορειοανατολικό τμήμα επικρατεί μέτρια διαταραγμένος φλύσχης με μεγαλύτερα ποσοστά ψαμμιτικών πάγκων ενώ νοτιότερα υπεριοχύει κατά τόπους πιο έντονα διαταραγμένος φλύσχης με μεγαλύτερα ποσοστά ιλυολιθικών πάγκων.

Στην βορειοανατολική περιοχή που επικρατούν οι ψαμμιτικοί πάγκοι έχουν καταγραφεί αποκολλήσεις και καταπτώσεις τεμάχων με μέγιστο όγκο 6.3m^3 από διάφορα ύψη. Τα συγκεκριμένα τεμάχια λόγω έλλειψης μέτρων προστασίας καταλήγουν πολύ συχνά στην υφιστάμενη οδό θέτοντας την περιοχή σε μεγάλο κίνδυνο.

Παράλληλα οι διαβρώσεις και οι ρηχές ολισθήσεις του πρανούς εντείνουν το πρόβλημα. Τα εξής φαινόμενα έχουν παρατηρηθεί επί του επιφανειακού μανδύα υλικών που έχουν μεταφερθεί και απορριφθεί στο πρανές από παλιότερες καταπτώσεις ή και από την εποχή διάνοιξης της οδού και έχουν ως αποτέλεσμα την τοπική υποσκαφή και ολίσθηση των ακραίων τμημάτων του καταστρώματος της οδού.

1.2 Αντικείμενο σκοπός

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στην τρισδιάστατη ανάλυση ευστάθειας πρανών έναντι βραχοκαταπτώσεων με σύνθετη γεωμετρία ως μία προτεινόμενη μέθοδος ανάλυσης με ακριβέστερα αποτελέσματα. Παράλληλα στόχος της διπλωματικής είναι να προταθεί τεχνική λύση στο πρόβλημα των καταπτώσεων της θέσης έρευνας.

Πιο συγκεκριμένα, στόχοι της παρούσας διπλωματικής είναι 1) να γίνει η τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική αξιολόγηση της περιοχής έρευνας 2) η λήψη τρισδιάστατων στοιχείων γεωμετρίας του πρανούς χρησιμοποιώντας σύγχρονα εναέρια μέσα όπως τα Συστήματα μη Επανδρωμένων Αεροχημάτων (ΣμηΕΑ) ή αλλιώς UAV (Unmanned Aerial Vehicles) 3) η εκτέλεση εξειδικευμένων αναλύσεων ευστάθειας και βραχοκαταπτώσεων σε τρισδιάστατο περιβάλλον 4) να προταθούν επαρκή μέτρα προστασίας της οδοποιίας, και τέλος 5) μελλοντικές προτάσεις έρευνας.

1.3 Δομή της εργασίας

Η εργασία έχει την εξής μορφή:

- 1) Εισαγωγή στη τεχνικογεωλογική περιγραφή της θέσης έρευνας και τα προβλήματα που υπάρχουν.
- 2) Θεωρητικό Υπόβαθρο: σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται οι θεωρητικές γνώσεις που θα χρειαστούν για την ανάλυση ευστάθειας στη θέση έρευνας.
- 3) Βασικές αρχές εναέριας φωτογραμμετρίας – Ψηφιακά εργαλεία έρευνας: σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο σχετικά με την δόμηση του τριοδιάστατου μοντέλου, ενώ παράλληλα περιγράφεται η διαδικασία κατασκευής του μοντέλου της θέσης έρευνας.
- 4) Γεωλογικές συνθήκες της θέσης έρευνας: σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται η Γεωλογία, η τοπογραφία, η τεκτονική και η σεισμικότητα της περιοχής.
- 5) Τεχνικογεωλογική – Γεωτεχνική Αξιολόγηση: σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται η τεχνικογεωλογική αποτύπωση της θέσης έρευνας και εκτιμώνται τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των ασυνεχειών, του άρρηκτου βράχου αλλά και της βραχώμαζας αξιοποιώντας τις διαθέσιμες εργαστηριακές και επιτόπου δοκιμές που έχουν πραγματοποιηθεί.
- 6) Αναλύσεις Ευστάθειας: στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται η μικροτεκτονική ανάλυση, οι κινηματικές αναλύσεις και οι αναλύσεις ευστάθειας που έχουν πραγματοποιηθεί.
- 7) Τριοδιάστατες τροχιακές αναλύσεις βραχοκαταπτώσεων: σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται οι κατανομές των όγκων και πως προέκυψαν. Στην συνέχεια, πραγματοποιείται ανάδρομη ανάλυση για την βαθμονόμηση των συντελεστών αναπήδησης και τέλος πραγματοποιούνται οι αναλύσεις καταπτώσεων.
- 8) Προτεινόμενα μέτρα: σε αυτό το κεφάλαιο προτάσσονται πιθανά μέτρα προστασίας της οδού σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν μέσω των αναλύσεων ευστάθειας και καταπτώσεων.
- 9) Συμπεράσματα: στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα διπλωματική εργασία.

1.4 Διαθέσιμα στοιχεία

Τα διαθέσιμα στοιχεία για την εκπόνηση της διπλωματικής είναι:

- 1) Τοπογραφικός χάρτης/ χάραξη οδοποιίας
- 2) Συλλογή γεωαναφερμένων φωτογραφιών που λήφθηκαν κατά την τεχνική επίσκεψη
- 3) Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών: άμεση διάτμηση, σημειακή φόρτιση, Brazilian test, δοκιμή ανθεκτικότητας σε χαλάρωση.
- 4) Επιτόπου δοκιμές: κρούσεις με σφύρα Schmidt

- 5) Μετρήσεις προσανατολισμού ασυνεχειών με πυξίδα
- 6) Γεωμετρία τεμάχων (όγκος και σχήμα) από καταπτώσεις που έχουν καταγραφεί μέσω διαχρονικής παρακολούθησης και αφορούν τον εντοπισμό θέσης και γεωμετρίας μετακινήσεων επιφάνειας χρησιμοποιώντας σύγχρονες τεχνολογίες τηλεπισκόπησης όπου η φωτογραμμετρία UAV

1.5 Μεθοδολογία

Στην διπλωματική εργασία ακολουθείται μια πορεία που ξεκινά με την τεχνική επίσκεψη στην περιοχή έρευνας όπου και έγινε επιτόπου αυτοψία για την τεχνικογεωλογική θεώρηση αλλά και για την κατανόηση του μηχανισμού αστοχίας. Στην συνέχεια, πραγματοποιείται η τεχνικογεωλογική και η γεωτεχνική αξιολόγηση της περιοχής με βάση εργαστηριακών και επιτόπου δοκιμών, προσδιορίζονται τα χαρακτηριστικά των άρρηκτων βράχων, των ασυνεχειών και των βραχομαζών. Σύμφωνα με την διαχρονική παρακολούθηση που εφαρμόστηκε παράλληλα με την συγγραφή της εν λόγω διατριβής, από την ερευνητική ομάδα του τομέα γεωτεχνικής του Εθνικού Μετσόβιο Πολυτεχνείου, ήταν δυνατός ο προσδιορισμός του μέγιστου καταπτώμενου όγκου, ο οποίος στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση τροχιακών βραχοκαταπτώσιων αναλύσεων. Έπειτα, σύμφωνα με τις διευθύνσεις των ασυνεχειών πραγματοποιούνται κινηματικές αναλύσεις σε περιοχές που κρίθηκαν σημαντικότερες και γίνεται η ανάλυση ευστάθειας για στατικές και σεισμικές συνθήκες, ενώ παράλληλα προτάσσεται και κánaβος αγκυρίων για τις περιπτώσεις που δεν τηρείται ο απαραίτητος συντελεστής ασφαλείας. Στην συνέχεια, μέσω των γεωαναφερμένων φωτογραφιών δομείται το τρισδιάστατο μοντέλο. Οι συντελεστές αναπήδησης, προσδιορίζονται με ανάστροφη ανάλυση (back analysis) σύμφωνα με τα δεδομένα καταπτώσεων από την διαχρονική παρακολούθηση. Εφόσον έχουν βαθμονομηθεί οι συντελεστές αναπήδησης πραγματοποιείται η ανάλυση ευστάθειας για βραχοκαταπτώσεις στο τρισδιάστατο μοντέλο. Τέλος, βάσει των αποτελεσμάτων των αναλύσεων ευστάθειας προτάσσονται και αντίστοιχα μέτρα για την προστασία της οδού.

2. Θεωρητικό Υπόβαθρο

Στο αυτό το κεφάλαιο διατυπώνονται τα θεωρητικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται για την πραγματοποίηση της διπλωματικής εργασίας. Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι:

- Η κατανόηση των θεωρητικών γνώσεων για την πραγματοποίηση της έρευνας.

2.1 Βραχόμαζα

Βραχόμαζα ονομάζεται το πέτρωμα στη φυσική του θέση που συμπεριλαμβάνει και τις ασυνέχειες του, ενώ ως άρρηκτο πέτρωμα ορίζεται ο νοητός πυρήνας που θα είχαμε σε περίπτωση γεώτρησης, ο οποίος θα είναι απαλλαγμένος από τις ασυνέχειες της βραχόμαζας. Η βραχόμαζα ουσιαστικά αποτελεί ένα σύνολο άρρηκτων πετρωμάτων οι οποίοι διαχωρίζονται από τις ασυνέχειες.

2.2 Ασυνέχειες

Ως ασυνέχεια ορίζεται μια φυσική διακοπή της συνέχειας της γεώμαζας, η οποία σηματοδοτεί διαφοροποίηση στις καταστατικές ιδιότητες και κατ' επέκτασιν στις μηχανικές της παραμέτρους (Κωστόπουλος 2014). Ο ορισμός αυτός είναι γενικός και περιλαμβάνει χαρακτηριστικά όπως επίπεδα στρώσης, ρωγματώσεις, ρήγματα, ασυμφωνίες, επίπεδα σχισμού, σχιστότητα. Η κατάλληλη περιγραφή και αξιολόγηση των χαρακτηριστικών των ασυνεχειών είναι σημαντική για τον καθορισμό της ποιότητας της βραχόμαζας, χωρίς φυσικά να αποτελεί τον μοναδικό παράγοντα.

2.2.1 Προσανατολισμός

Ο προσανατολισμός των επιπέδων των ασυνεχειών καθορίζεται από την κλίση των επιπέδων και την διεύθυνση της κλίσης. Γωνία κλίσεως ορίζεται η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της οριζόντιας και της γραμμής μέγιστης κλίσης του επιπέδου της, ενώ διεύθυνση κλίσης είναι η δεξιόστροφη γωνία της οριζόντιας προβολής του διανύσματος κλίσης ως προς τον γεωγραφικό βορρά. Γνωρίζοντας τον προσανατολισμό των ασυνεχειών και τις επιφάνειες εκκοκφής προσδιορίζονται οι πιθανές μορφές αστοχιών σε πρηνή.

2.2.1.1 Στερεογραφική προβολή

Οι μέθοδοι των στερεογραφικών προβολών χρησιμοποιούνται για να προσδιοριστούν ο προσανατολισμός των ευθειών και επιπέδων στο χώρο. Στην τεχνική Γεωλογία, πιο συγκεκριμένα, αξιοποιούνται για την στατιστική επεξεργασία του προσανατολισμού των επιπέδων ασυνεχειών, εύρεση του προσανατολισμού της τομής δύο ασυνεχειών, προσανατολισμό των στρωμάτων κ.α. Μέσω των στερεογραφημάτων μπορεί να προσδιοριστούν οι πιθανοί μηχανισμοί αστοχίας του πρηνούς. (Μπαντής, 2008)

Οι κυριότερες που χρησιμοποιούνται είναι:

- η προβολή των ίσων επιφανειών (Προβολή Lambert ή αλλιώς δίκτυο Schmidt)
- η στερεογραφική προβολή (προβολή του Wolf)

2.2.2 Συστήματα Ασυνεχειών και απόσταση επανάληψης

Διακλάσεις και άλλα επίπεδα ασυνεχειών (στρώσεις, σχιστότητα κ.α.) τα οποία έχουν συγκεκριμένο προσανατολισμό προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση απαρτίζουν ένα σύστημα ασυνεχειών. Τα συστήματα ασυνεχειών διακρίνονται σε κύρια και δευτερεύοντα, όπου ως κύρια θεωρούνται τα συστήματα που έχουν μεγαλύτερη στατιστική εκπροσώπηση έναντι των υπολοίπων. Τα συστήματα ασυνεχειών καθορίζουν το βαθμό ρωγμάτωσης της βραχώμαζας, τις κύριες κατευθύνσεις ανισotropίας και το μέγεθος και σχήμα των άρρηκτων τεμαχίων. Επιπλέον, η απόσταση επανάληψης των ασυνεχειών δηλαδή η πυκνότητα των ασυνεχειών καθορίζει το μέγεθος των άρρηκτων τεμαχίων, την υδροπερατότητα, την παραμορφωσιμότητα και τον μηχανισμό αστοχίας της βραχώμαζας. Στον Πίνακα 1 φαίνεται χαρακτηρισμός των αποστάσεων μεταξύ των ασυνεχειών

Πίνακας 1. χαρακτηρισμός των αποστάσεων μεταξύ των ασυνεχειών (Barton – Bandis, 1978)

Περιγραφή	Απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών (mm)
Εξαιρετικά αραιή	>6000
Πολύ αραιή	2000-6000
Αραιή	600-2000
Μέτρια-αραιή	200-600
Πυκνή	60-200
Πολύ πυκνή	20-60
Εξαιρετικά πυκνή	<20

2.2.3 Εμμόνη επιπέδων

Η εμμόνη αναφέρεται στο μήκος μίας επίπεδης ασυνέχειας χωρίς να διακοπεί από άρρηκτο υλικό ή από άλλη ασυνέχεια. Συνιστά μια πολύ σημαντική παράμετρο για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής, αλλά πρακτικά είναι αρκετά δύσκολο να εκτιμηθεί με ακρίβεια. Στον Πίνακα 2 φαίνεται ο χαρακτηρισμός της εμμόνης με βάση το μήκος μια ασυνέχειας.

Πίνακας 2. Χαρακτηρισμός εμμόνης (ISRM, 1978)

Χαρακτηρισμός εμμόνης	Μήκος (m)
Πολύ μικρή	<1
Μικρή	1-3

Μέση	3-10
Μεγάλη	10-20
Πολύ μεγάλη	>20

2.2.4 Τραχύτητα

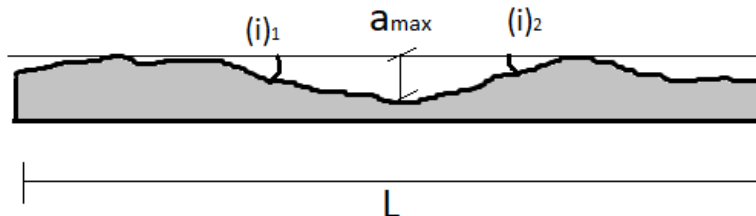
Η τραχύτητα της επιφάνειας αναφέρεται στις αποκλίσεις της πραγματικής επιφάνειας από την ιδανική της μορφή, δηλαδή μία ευθεία. Χαρακτηρίζεται από 2 συνιστώσες: τη μακροσκοπική ανεπιπεδότητα (κυματισμό) και τη μικροσκοπική αδρότητα (ασπερίτες). Η μακροσκοπική ανεπιπεδότητα αναφέρεται στον κυματισμό των τοιχωμάτων υπό μεγάλη κλίμακα ενώ η μικροσκοπική αδρότητα αναφέρεται σε τοπικές εξάρσεις και βυθίσεις της επιφάνειας σε μικρή κλίμακα.

Η τραχύτητα του κυματισμού προσδιορίζεται ως μέση τιμή (i):

$$i = \arctan \frac{2a}{L}$$

a : η μέγιστη απόσταση μεταξύ των σημείων στήριξης της ράβδου αναφοράς, που αντιστοιχούν στο L .

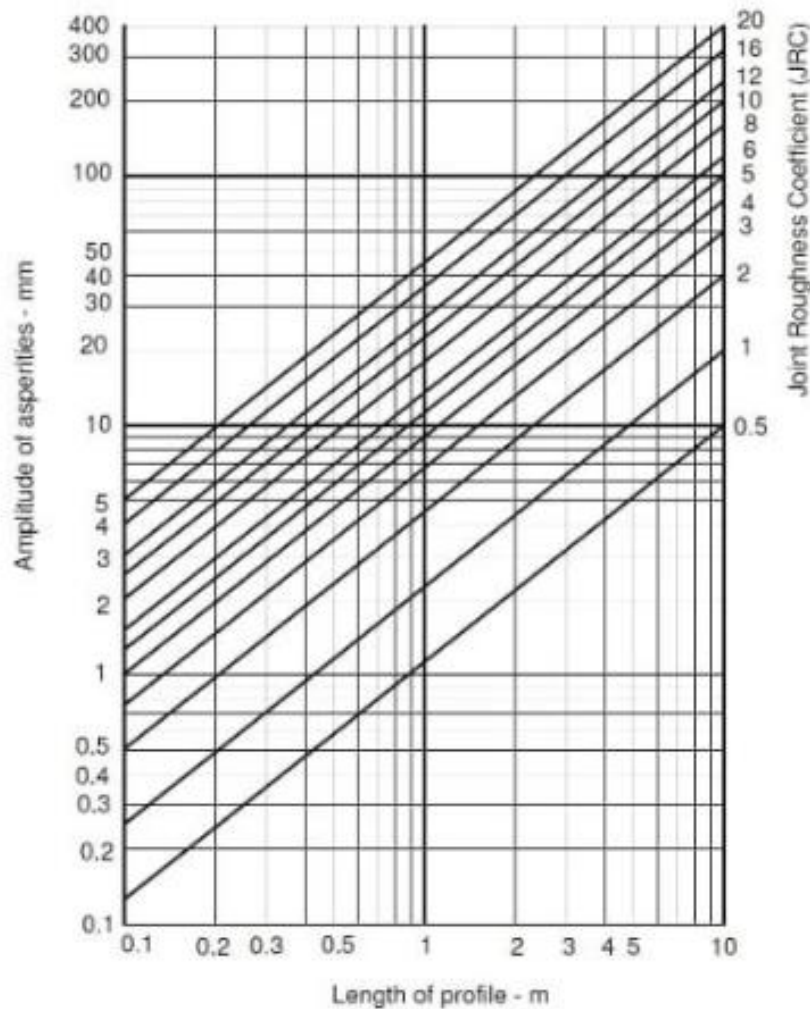
L : το μήκος «κύματος»



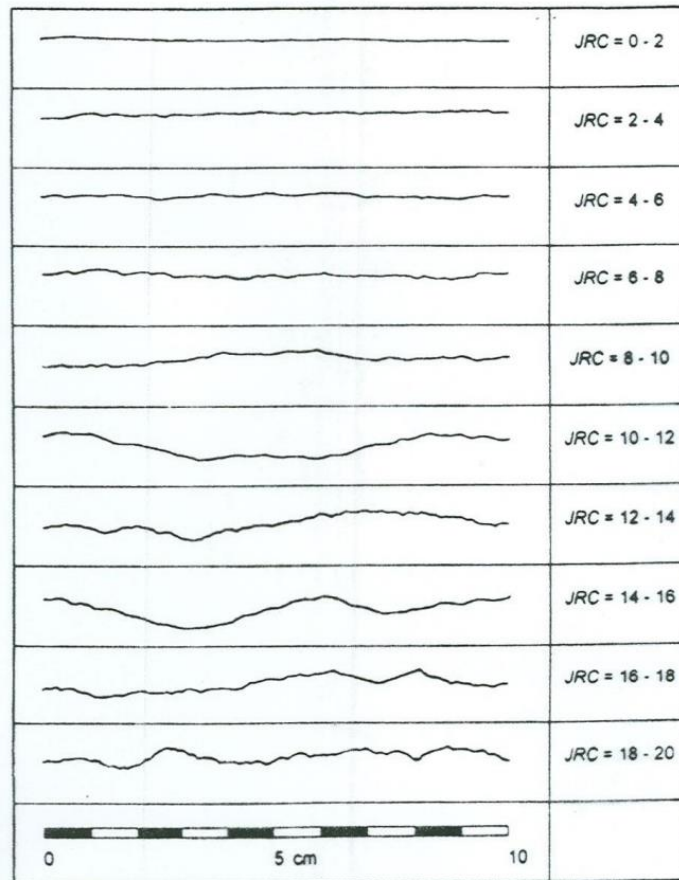
Σχήμα 1. απεικόνιση των γεωμετρικών στοιχείων που ορίζονται για την τραχύτητα σε μια επιφάνεια ασυνέχειας

Η τραχύτητα της μικροσκοπικής αδρότητας ποσοτικοποιείται σύμφωνα με τον συντελεστή τραχύτητας JRC. Το JRC αποτελεί μια εμπειρική σταθερά που δείχνει κατά προσέγγιση τον λόγο του μήκους (L) μιας ασυνέχειας προς το μέσο ύψος του ανάγλυφου της επιφάνειας. Η διακύμανση των τιμών του JRC είναι από 0 για ιδεατά λείες επιφάνειες έως 20 δηλαδή για πολύ τραχείες. (Μπαντής).

Το JRC μπορεί να υπολογιστεί με το νομογράφημα στο Σχήμα 2 γνωρίζοντας το ανάγλυφο της ασυνέχειας (a) για ορισμένο μήκος (L). Επιπλέον στο Σχήμα 3 παρουσιάζονται μορφές της τραχύτητας ασυνεχειών μαζί με την διακύμανση τιμών JRC που τους αναλογεί.



Σχήμα 2. νομογράφημα εκτίμησης του δείκτη τραχύτητας ασυνεχειών JRC (Barton – Bandis, 1978)



Σχήμα 3. μορφές της τραχύτητας ασυνεχειών με την διακύμανση τιμών JRC (Barton 1987)

2.2.5 Άνοιγμα (εύρος) τοιχωμάτων

Εκφράζει την κάθετη απόσταση μεταξύ των τοιχωμάτων ασυνεχειών. Η διαπλάτυνση του εύρους προκαλείται από διατμητικές και εφελκυστικές παραμορφώσεις, έπλυση υλικού πληρώσεως και διάλυση του πετρώματος. Στον Πίνακα 3 γίνεται η περιγραφή των ανοιγμάτων με βάση την μεταξύ τους απόσταση.

Πίνακας 3. Περιγραφή του ανοίγματος ασυνεχειών (ISRM, 1978)

Άνοιγμα (mm)	Περιγραφή
<0.1	Κλειστό
0.1-0.5	Μερικώς κλειστό
0.5-2.5	Ανοικτό
2.5-10	Ευρύ
10-100	Πολύ ευρύ

2.2.6 Διατμητική αντοχή ασυνεχειών

Η διατμητική αντοχή ασυνέχειας προκαλείται κατά κύρια βάση από την αντίσταση τριβής σε μετακίνηση, η οποία οφείλεται σε 2 παράγοντες: την αλληλεπίδραση των 2 διατμημένων επιφανειών ασυνέχειας και την συνεισφορά του υλικού πλήρωσης της ασυνέχειας.

Ο προσδιορισμός της διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών γίνεται με εκτέλεση δοκιμών διάτμησης. Για να εκπληρωθούν οι στόχοι του σχεδιασμού γεωτεχνικών έργων απαιτούνται επιτόπου δοκιμές διάτμησης σε μεγάλα δοκίμια ασυνεχειών. Ωστόσο πολλές φορές κάτι τέτοιο δεν είναι επιτεύξιμο λόγω υψηλού κόστους ή και λόγω αδυναμίας εκτέλεσης δοκιμών σε αντιπροσωπευτικά δοκίμια. Επομένως η εκτέλεση εργαστηριακών δοκιμών άμεσης διάτμησης σε μικρά δοκίμια πετρώματος αποτελεί μια συνηθισμένη πρακτική. (Νομικός 2015).

Εκτός από εκτέλεση άμεσης διάτμησης σε εργαστηριακά δοκίμια έχουν συνταχθεί και εμπειρικά κριτήρια διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών. Τα κυριότερα είναι το διγραμμικό κριτήριο του Patton (1966), το κριτήριο Ladanyi & Archambault (1969) και το κριτήριο Barton-Bandis (1976).

2.2.6.1 Δοκιμή άμεσης διάτμησης

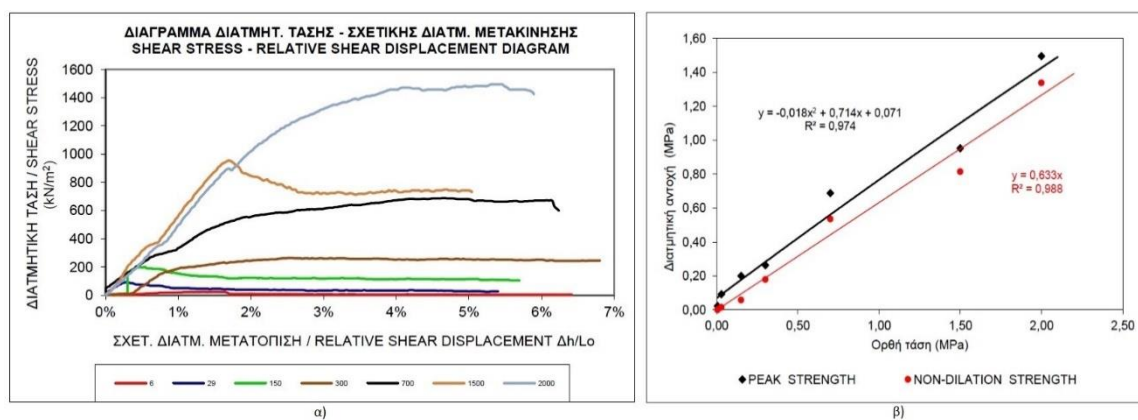
Η δοκιμή άμεσης διάτμησης πραγματοποιείται υπό ορθή κάθετη τάση στην επιφάνεια ασυνέχειας με σταθερή τιμή και υπό ελεγχόμενη μετατόπιση κάθετα στην επιφάνεια της ασυνέχειας. Η συσκευή άμεσης διάτμησης αποτελείται από ένα διατμητικό κιβώτιο (shear box) στο οποίο στερεώνεται το δοκίμιο με την ασυνέχεια και από κατάλληλες διατάξεις εφαρμογής της ορθής και της διατμητικής δύναμης με τον επιθυμητό ρυθμό. Η συσκευή πρέπει να δίνει την δυνατότητα ελεύθερης σχετικής διατμητικής ολίσθησης των δύο εκατέρωθεν της ασυνέχειας του δοκιμίου και πρέπει το διατμητικό φορτίο να ασκείται στο κέντρο βάρους της επιφάνειας διάτμησης. Τέλος, η τριβή περιμετρικά της συσκευής πρέπει να ελαχιστοποιηθεί είτε μέσω κυλίστρων ή άλλων παρόμοιων διατάξεων. (Νομικός 2015)

Για την εκτέλεση της δοκιμής άμεσης διάτμησης ακολουθείται η τυποποιημένη μέθοδος της ISRM (Muralha et al., 2014) η οποία περιλαμβάνει τις απαιτήσεις και τις εργαστηριακές διαδικασίες για την εκτέλεση της δοκιμής είτε με σταθερή ορθή τάση είτε με σταθερή ορθή δυστροπία στην επιφάνεια ασυνέχειας.

Η διατμητική αντοχή μίας ασυνέχειας προσδιορίζεται είτε με πολλαπλές δοκιμές σε διαφορετικά δοκίμια από το ίδιο δείγμα ασυνέχειας, είτε με δοκιμή πολλαπλών σταδίων σε ένα δοκίμιο. Ο αριθμός των δοκιμών που πρέπει να πραγματοποιηθούν είναι τουλάχιστον τρεις και κατά προτίμηση πέντε.

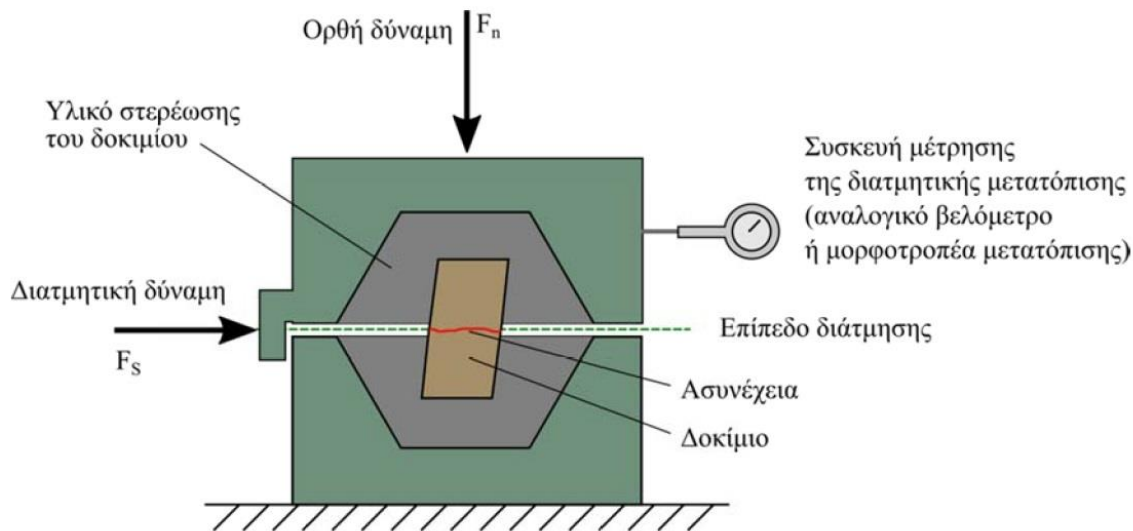
Τα αποτελέσματα της δοκιμής δίνονται σε διαγράμματα σχετικής διατμητικής ολίσθησης – διατμητικής τάσης για τις διάφορες τιμές της ορθής τάσης και σε διάγραμμα της κορυφαίας και της παραμένουσας διατμητικής τάσης ως προς την ορθή τάση. Μέσω του τελευταίου διαγράμματος προσδιορίζονται ο παράμετροι αντοχής της. Σύμφωνα με την ISRM (Murhalla 2014), το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb επαρκεί για την περιγραφή των αποτελεσμάτων δοκιμών διάτμησης ασυνεχειών.

Στο Σχήμα 4 δίνονται τα διαγράμματα α) διατμητικής μετατόπισης – διατμητικής τάσης β) ορθή τάση – διατμητική αντοχή από δοκιμή άμεσης διάτμησης σε δείγμα από την τοποθεσία του έργου της παρούσας μελέτης.



Σχήμα 4. Διαγράμματα α) διατμητικής μετατόπισης – διατμητικής τάσης β) ορθή τάση – διατμητική αντοχή

Στο Σχήμα 5 απεικονίζεται ένα τυπικό διατμητικό κιβώτιο για δοκιμή άμεσης διάτμησης.



Σχήμα 5. Απεικόνιση ενός διατμητικού κιβωτίου για δοκιμή άμεσης διάτμησης (Νορμικός 2015)

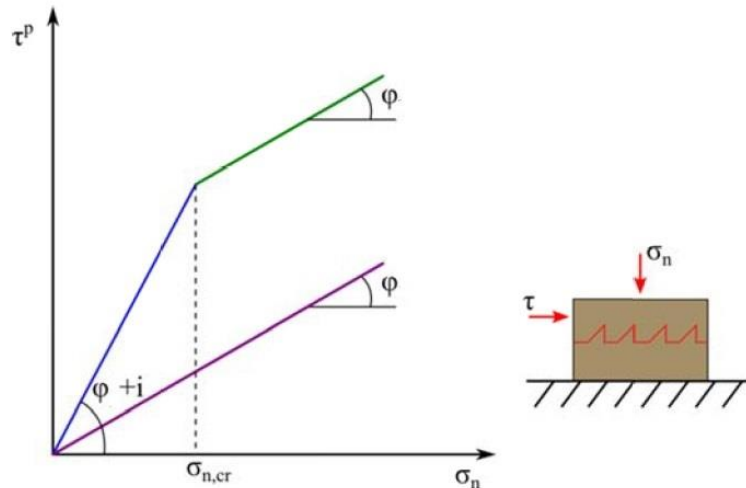
2.2.6.2 Κριτήριο του Patton

Το κριτήριο του Patton συσχετίζει την τραχύτητα με τη διατμητική αντοχή των ασυνεχειών και προέκυψε από εργαστηριακές δοκιμές άμεσης διάτμησης σε δοκίμια γύψου με τεχνητές ασυνέχειες. Για διάφορες τιμές των γωνιών κλίσης των τεχνητών ασυνεχειών (οδοντώσεων) και για διάφορες τιμές ορθών τάσεων, προσδιόρισε τις περιβάλλουσες μέγιστης και παραμένουσας αντοχής για κάθε πιθανή γεωμετρία. Για την περίπτωση που υπάρχουν οδοντώσεις με γωνία i παρατηρήθηκε ότι σε χαμηλές τάσεις υπάρχει ολίσθηση στις κεκλιμένες επιφάνειες των οδοντώσεων και η περιβάλλουσα μέγιστης αντοχής είναι ευθεία με γωνία κλίσης $\varphi_b + i$, προτείνοντας την παρακάτω σχέση :

$$\tau = \sigma_n \tan (\varphi_b + i)$$

Στα ίδια δοκίμια με την αύξηση της ορθής τάσης μετά από μία κρίσιμη τιμή $\sigma_{n,cr}$ η περιβάλλουσα παραμένουσας αντοχής δίνεται από ευθεία γωνίας κλίσης φ_r (Σχήμα 6) σύμφωνα με την παρακάτω σχέση

$$\tau_r = \sigma_n \tan \varphi_r$$



Σχήμα 6. Διάγραμμα διατμητικών – ορθών τάσεων για το Κριτήριο Patton (Νομικός 2015)

Η κλίση όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6 αλλάζει απότομα επειδή ο τρόπος αστοχίας της ασυνέχειας των οδοντώσεων μεταβάλλεται. Όταν η ορθή τάση είναι μικρότερη από $\sigma_{n,cr}$ η αντίσταση τριβής κατά μήκος των κεκλιμένων επιφανειών των τεχνητών ασυνεχειών συνεισφέρει στην διατμητική αντοχή, ενώ όταν είναι μεγαλύτερη από $\sigma_{n,cr}$ η συνεισφορά αυτή απαλείφεται.

2.2.6.3 Κριτήριο Barton - Bandis (1976)

Το μη – γραμμικό κριτήριο του Bandis (1976) προσδιορίζει την μέγιστη διατμητική αντοχή των ασυνεχειών του πετρώματος συσχετίζοντας την με την επίδραση της τραχύτητας της επιφάνειας της ασυνέχειας και με την μεταβολή της ορθής τάσης. Η μαθηματική έκφραση του κριτηρίου για μη αποσαθρωμένες επιφάνειες ασυνεχειών έχει ως εξής:

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan \left(JRC \cdot \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_b \right)$$

τ : μέγιστη διατμητική αντοχή

σ_n : ενεργός ορθή τάση

JRC: Συντελεστής τραχύτητας ασυνεχειών

JCS: Αντοχή των τοιχωμάτων σε μονοαξονική θλίψη

ϕ_b : βασική γωνία τριβής για λείες μη αποσαθρωμένες επιφάνειες

Η Γενική μορφή του κριτηρίου που καλύπτει και αποσαθρωμένες αλλά και μη αποσαθρωμένες επιφάνειες ασυνεχειών διατυπώνεται ως εξής:

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan \left(JRC \cdot \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \varphi_r \right)$$

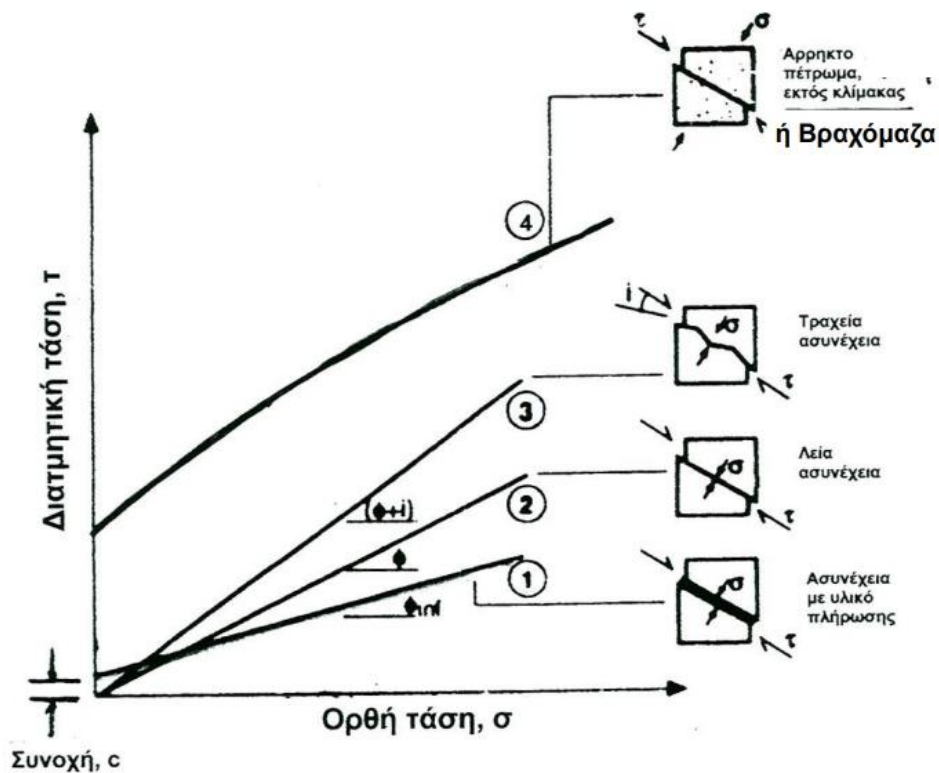
Όπου φ_r η παραμένουσα γωνία τριβής, μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με την εμπειρική σχέση (Barton & Choubey 1977):

$$\varphi_r = (\varphi_b - 20^\circ) + 20^\circ \cdot \left(\frac{r}{R} \right)$$

R: η τιμή της αναπήδησης για κρουσιομέτρηση σε τεχνητές, ξηρές και μη αποσαθρωμένες επιφάνειες πετρώματος.

r: η τιμή της αναπήδησης για κρουσιομέτρηση σε υγρές επιφάνειες ασυνεχειών

Στο Σχήμα 7 φαίνεται το διάγραμμα διατμητικών – ορθών τάσεων για δοκιμή διάτμησης για 4 περιπτώσεις ασυνέχειας.



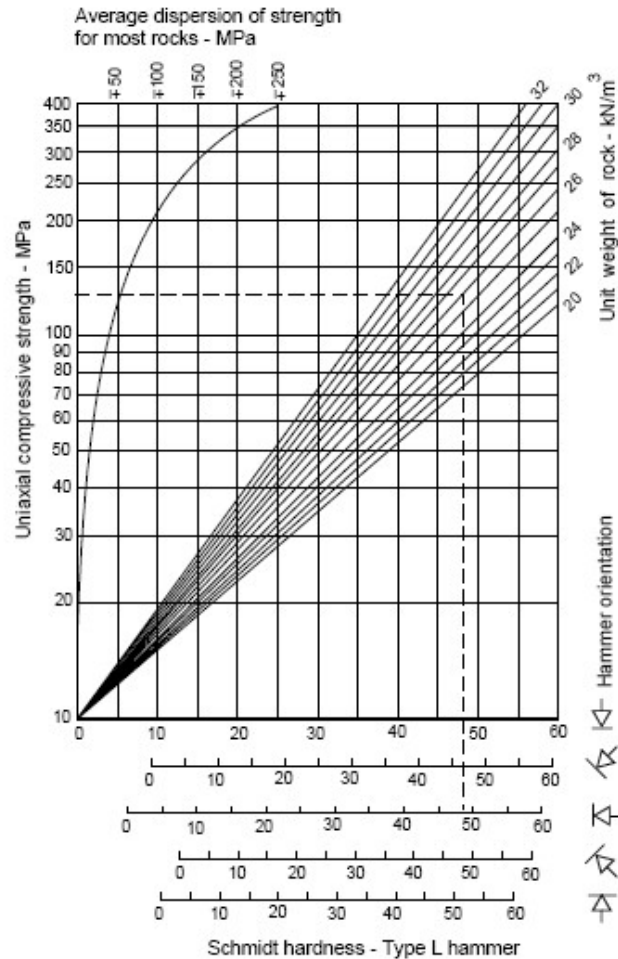
Σχήμα 7. διάγραμμα διατμητικών – ορθών τάσεων για δοκιμή διάτμησης για 4 περιπτώσεις ασυνέχειας

2.2.7 Αντοχή τοιχωμάτων ασυνεχειών

Για τον υπολογισμό της αντοχής των τοιχωμάτων της ασυνέχειας σε μονοαξονική θλίψη (JCS) έχουν προταθεί μέθοδοι από την ISRM (1978). Γενικά τα τοιχώματα των ασυνεχειών είναι αποσαθρωμένα, οπότε η αντοχή τους σε μονοαξονική θλίψη (JCS) θα είναι μικρότερη της αντοχής του άρρηκτου

πετρώματος (σ_{ci}). Οι δύο ποσότητες μπορεί να ισούνται σε περίπτωση που τα τοιχώματα είναι μη – αποσαθρωμένα, ωστόσο δεν είναι σύνηθες να μην υπάρχει αποσάθρωση.

Ο υπολογισμός της αντοχής JCS πραγματοποιείται κατά Deere & Miller (1966) χρησιμοποιώντας την σφύρα Schmidt σύμφωνα με το διάγραμμα του Σχήματος 8



Σχήμα 8. διάγραμμα εκτίμησης JCS (ISRM 1978)

2.3 Κριτήριο αστοχίας της Βραχώμαζας

Το κριτήριο αστοχίας των Hoek – Brown (Hoek, Carranza-Torres & Corkum, 2002)

$$\bar{\sigma}_1 = \bar{\sigma}_3 + \sigma_{ci} \cdot \left(m_b \cdot \frac{\bar{\sigma}_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

Όπου

$\bar{\sigma}_1, \bar{\sigma}_3$: μέγιστη και ελάχιστη κύρια ενεργός τάση στην αστοχία

m_b : μειωμένη τιμή του συντελεστή υλικού m (Hoek & Brown 1980)

σ_{ci} : αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου πετρώματος

s, a : σταθερές της βραχόμαζας (για άρρηκτο πέτρωμα: $s=1, a=0.5$)

$$m_b = m \cdot \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) \text{ για } GSI > 25$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \text{ για } GSI > 25$$

$$a = 0.5 + \frac{\left(e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}}\right)}{6}$$

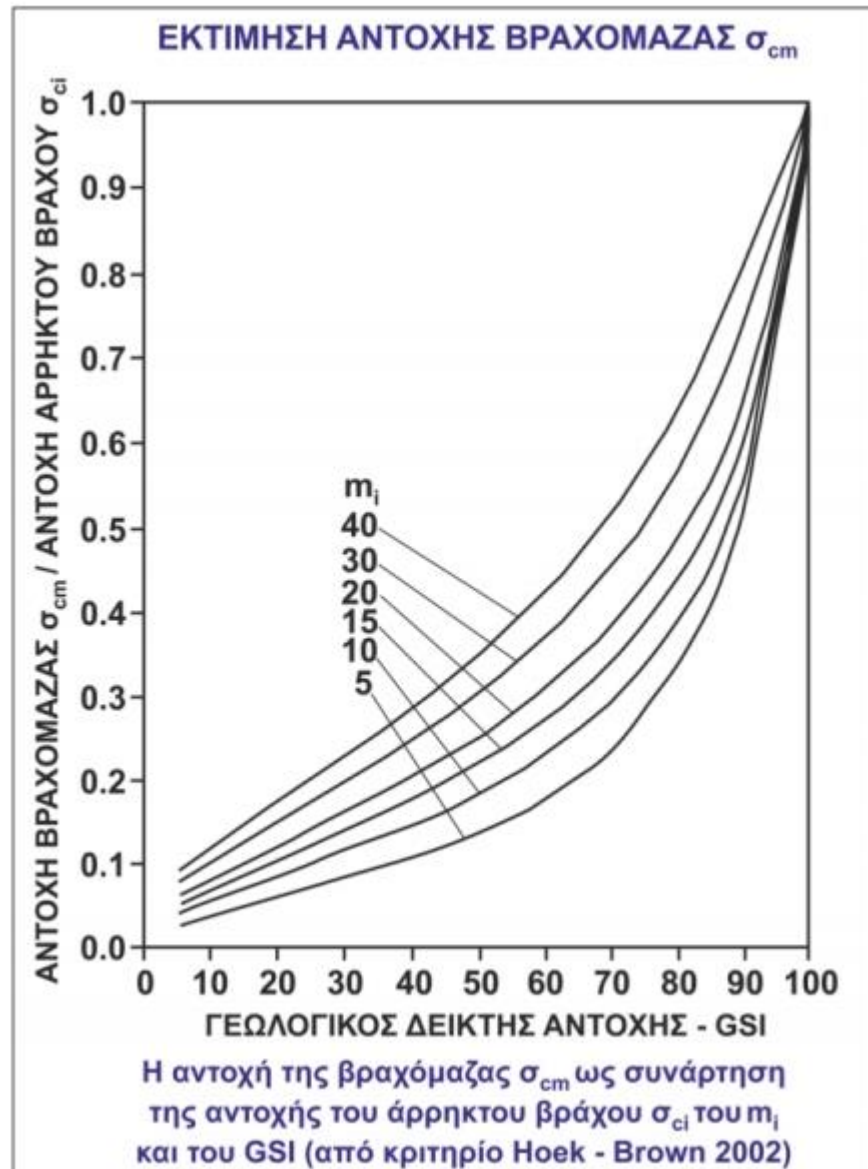
D: συντελεστής που προκύπτει από τον βαθμό διατάραξης (degree of disturbance) την οποία έχει υποστεί η βραχόμαζα από βλάβες εξαιτίας ανατινάξεων και τασικής χαλάρωσης, κυμαίνεται από 0 (αδιατάρακτη) έως 1 (πολύ διαταραγμένη)

Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη της βραχόμαζας θα προκύψει εάν $\bar{\sigma}_3 = 0$ και η αντοχή σε διαξονικό εφελκυσμό θα προκύψει αν $\bar{\sigma}_1 = \bar{\sigma}_3 = \sigma_t$. Επομένως:

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} \cdot s^a$$

$$\sigma_t = s \cdot s^a$$

Ωστόσο, ο υπολογισμός του σ_{cm} με αυτό τον τρόπο είναι αρκετά συντηρητικός εφόσον δεν λαμβάνει υπόψη την σταθερά m_b . Για την εκτίμηση του προτιμάται το διάγραμμα του Σχήματος 9, όπου προκύπτει από το Κριτήριο Hoek – Brown (2002).



Σχήμα 9. Διάγραμμα εκτίμησης αντοχής βραχόμαζας με βάση το GSI και το m_i

Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται τα τυπικά εύρη τιμών για την εμπειρική σταθερά m_i , η οποία εξαρτάται από την ορυκτολογική σύσταση και από το μέγεθος, το σχήμα και τη διάταξη των κρυστάλλων ή των κόκκων του πετρώματος (Hoek 1992, Marinos & Hoek 2000).

Πίνακας 4. Εύρος τιμής σταθεράς mi (Hoek & Marinos, 2000)

Τύπος	Ομάδα	ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑ				
		Χονδρή	Μέση	Λεπτή	Πολύ λεπτή	
ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΗ	Κλαστικό	Κροκαλοπαγή *	Ψαμμίτες 17 ± 4	Ιλυόλιθοι 7 ± 2	Αργιλόλιθοι 4 ± 2	
		Λατυποπαγή *		Γραουβάκες (18 ± 3)	Αργ.σχιστόλιθοι (6 ± 2) Μάργες (7 ± 2)	
	Μη κλαστικό	Ανθρακικά	Κρυσταλλικοί Ασβεστόλιθοι (12 ± 3)	Σπαρτικοί Ασβεστόλιθοι (10 ± 2)	Μικρικοί Ασβεστόλιθοι (9 ± 2)	Δολομίτες (9 ± 3)
		Εβαπορίτες		Γύψος 8 ± 2	Ανυδρίτης 12 ± 2	
	Οργανικά				Κρητίν 7 ± 2	
ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΜΕΝΑ	Μη πτυχωμένα	Μάρμαρο 9 ± 3	Κερατόλιθοι (19 ± 4) Μεταψαμμίτες (19 ± 3)	Χαλαζίτες 20 ± 3		
	Ελαφρά πτυχωμένα	Μιγματίτες (29 ± 3)	Αμφιβολίτες 26 ± 6	Γνεύσιοι 28 ± 5		
	Πτυχωμένα**		Σχιστόλιθοι 12 ± 3	Φυλλίτες (7 ± 3)	Σχίστες 7 ± 4	
Τύπος	Ομάδα	ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑ				
		Χονδρή	Μέση	Λεπτή	Πολύ λεπτή	
ΠΥΡΙΓΕΝΗ	Πλουτώνια	Ανοικτό- χρωμα	Γρανίτης 32 ± 3	Διορίτης 25 ± 5		
		Σκοτεινό- χρωμα	Γάββρος 27 ± 3	Νορίτης 20 ± 5	Δολερίτης (16 ± 5)	
	Υποαβυσσικά	Πορφύρης (20 ± 5)		Διαβάσης (15 ± 5)	Περιδοίτης (25 ± 5)	
	Ηφαιστειακά	Λάβα		Ρυόλιθος (25 ± 5) Ανδεσίτης 25 ± 5	Δακίτης (25 ± 3) Βασάλτης (25 ± 5)	
		Πυροκλαστικά	Κροκαλοπαγή (19 ± 3)	Ηφ.Λατυποπαγή (19 ± 5)	Τόφφοι (13 ± 5)	

2.3.1 Μέτρο ελαστικότητας της Βραχομάζας

Για τον προσδιορισμό της ελαστικότητας της βραχομάζας έχουν προταθεί αρκετές εμπειρικές σχέσεις οι οποίες συσχετίζουν το μέτρο ελαστικότητας (E_m) με διάφορες παραμέτρους όπως η βαθμονόμηση της βραχομάζας (RMR, GSI), η μονοαξονική θλίψη σε άρρηκτο βράχο (σ_{ci}), το μέτρο ελαστικότητας του (E_i) και

τον βαθμό διαταραχής (D). Στον πίνακα 5 παρουσιάζονται αναλυτικότερα τέτοιες εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού E_m .

Πίνακας 5. Εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού του μέτρου ελαστικότητας (E_m)

Βιβλιογραφία	Σχέσεις υπολογισμού
Hoek et al. (2002)	$E_m(GPa) = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}(MPa)}{100}} \cdot 10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)}$ για $\sigma_{ci} \leq 100MPa$
	$E_m(GPa) = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \cdot 10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)}$ για $\sigma_{ci} > 100MPa$
Hoek & Diederichs (2006)	$E_m(GPa) = E_i \left(0.02 + \frac{1 - D/2}{1 + e^{((60+15D-GSI)/11)}}\right)$

όπου:

E_i : το μέτρο Ελαστικότητας του άρρηκτου βράχου

σ_{ci} : η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη άρρηκτου βράχου

D: συντελεστής διαταραχής της βραχώμαζας

GSI: τιμές του γεωλογικού δείκτη βαθμονόμησης της βραχώμαζας για GSI

2.3.2 Μηχανικές παράμετροι άρρηκτου βράχου

2.3.2.1 Μέτρο ελαστικότητας του άρρηκτου βράχου

Το μέτρο ελαστικότητας του άρρηκτου βράχου μπορεί να προσδιοριστεί από δοκιμή μονοαξονικής θλίψης (UCS) σε δοκίμια άρρηκτου βράχου. Όμως σε περιπτώσεις που δεν είναι εφικτή η δοκιμή UCS, η τιμή του μέτρου ελαστικότητας του άρρηκτου βράχου (E_i) μπορεί να προσεγγιστεί με την εξής σχέση (Deere 1968):

$$E_i = MR \cdot \sigma_{ci}$$

Στον Πίνακα 6 δίνεται εύρος τιμών για το Modulus Ratio (MR) που προέκυψαν από εργαστηριακές δοκιμές μονοαξονικής θλίψης σύμφωνα με τους Deere (1968) και Palmstrom & Singh (2001)

Πίνακας 6. εύρος τιμών για τον λόγο MR σύμφωνα με τις δημοσιεύσεις των Deere (1968) και των Palmstrom & Singh (2001)

Rock type	Class	Group	Texture			
			Coarse	Medium	Fine	Very fine
Sedimentary	Clastic		Conglomerates 300-400 Breccias 230-350	Sandstones 200-350	Siltstones 350-400 Greywackes 350	Claystones 200-300 Shales 150-250 ^a Marls 150-200
	Non-clastic	Carbonates	Crystalline limestones 400-600	Sparitic limestones 600-800	Micritic Limestones 800-1000	Dolomites 350-500
		Evaporites		Gypsum (350) ^b	Anhydrite (350) ^b	
		Organic				Chalk 1000+
Metamorphic	Non-foliated		Marble 700-1000	Hornfels 400-700 Metasandstone 200-300	Quartzites 300-450	
	Slightly foliated		Migmatite 350-400	Amphibolites 400-500	Gneiss 300-750 ^a	
	Foliated ^a			Schists 250-1100 ^a	Phyllites/Mica Schist 300-800 ^a	Slates 400-600 ^a
Igneous	Plutonic	Light	Granite ^c 300-550 Granodiorite ^c 400-450	Diorite ^c 300-350		
		Dark	Gabbro 400-500 Norite 350-400	Dolerite 300-400		
	Hypabyssal			Porphyries (400) ^b	Diabase 300-350	Peridotite 250-300
	Volcanic	Lava		Rhyolite 300-500 Andesite 300-500	Dacite 350-450 Basalt 250-450	
		Pyroclastic	Agglomerate 400-600	Volcanic breccia (500) ^b	Tuff 200-400	

2.3.2.2 Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη άρρηκτου βράχου

Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη άρρηκτου βράχου μπορεί να εκτιμηθεί άμεσα από δοκιμή μονοαξονικής θλίψης (UCS) σε δοκίμια άρρηκτου βράχου και έμμεσα με την δοκιμή σημειακής φόρτισης και με την χρήση σφυριού του Schmidt-L. Η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης δεν είναι εφικτό να πραγματοποιείται πολλές φορές λόγω κόστους αλλά και δυσκολίας στην λήψη αντιπροσωπευτικών δοκιμίων.

Στην δοκιμή σημειακής φόρτισης δοκίμια πετρώματος φορτίζονται από ένα ζεύγος κώνων από χάλυβα μέχρι το σημείο θραύσης του πετρώματος. Ο δείκτης σημειακής φόρτισης I_s υπολογίζεται:

$$I_s = \frac{P}{D_e^2}$$

όπου:

P: το φορτίο θραύσης

D_e : η ισοδύναμη διάμετρος του δοκιμίου, όπου $D_e = D$ για διαμετρική δοκιμή και $D_e = (4WD/\pi)^{0.5}$ για αξονική δοκιμή σε κυλινδρικό δοκίμιο και για δοκιμή σε πρισματικό ή ακανόνιστης μορφή δοκίμιο, σε αυτές τις περιπτώσεις το W είναι το πλάτος της διατομής του δοκιμίου στο αναμενόμενο επίπεδο θραύσης και το D εκφράζει την απόσταση των ακμών της φόρτισης πριν τη φόρτιση. (Νομικός 2015).

Για να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα των δοκιμών για διάφορες διαμέτρους υπολογίζεται διορθωμένος δείκτης αντοχής σημειακής φόρτισης $I_{s(50)}$ για την περίπτωση που θα είχαμε δοκίμιο με διάμετρο 50mm. Η τιμή για το $I_{s(50)}$ υπολογίζεται ως εξής:

$$I_{s(50)} = F \cdot I_s$$

$$F = (D_e/50)^{0.45} \text{ (συντελεστής διόρθωσης)}$$

Η μέση τιμή του δείκτη $I_{s(50)}$ υπολογίζεται ως η μέση τιμή 10 ή περισσότερων δοκιμών, απορρίπτοντας τις 2 μεγαλύτερες και τις 2 μικρότερες τιμές.



Σχήμα 10. Αποδεκτές (αριστερά) και μη-αποδεκτή (δεξιά) επιφάνεια θραύσης (Νομικός 2015)







2.3.3 Ταξινομήσεις Βραχώμαζας – Σύστημα Ταξινόμησης GSI

Τα διάφορα συστήματα ταξινομήσεων που υπάρχουν στοχεύουν στην διαχώριση της βραχώμαζας σε κατηγορίες ποιότητας με κοινά μηχανικά χαρακτηριστικά. Η κατηγοριοποίηση αυτή καθιστά εφικτή την συσχέτιση των χαρακτηριστικών διαφορετικών περιοχών που έχουν παρόμοιες γεωτεχνικές συνθήκες. Αυτό συμβαίνει ειδικά για την εκτίμηση της αντοχής της βραχώμαζας, όπου είναι αντιοικονομικό και αρκετά δύσκολο να εκτελεστούν επιτόπου δοκιμές.

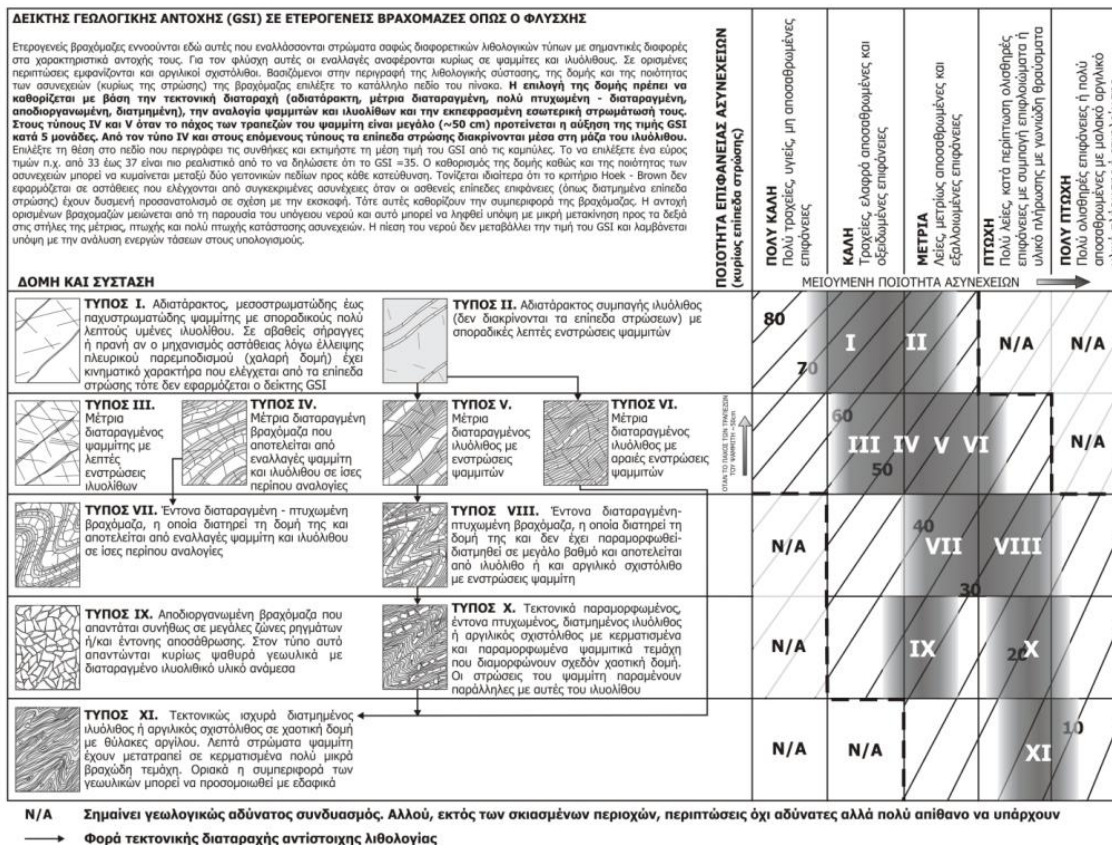
Υφίστανται αρκετά συστήματα ταξινόμησης της βραχώμαζας, από τα πιο ευρέως διαδεδομένα είναι το GSI, RMR και το Q. Οι δύο τελευταίες αφορούν κυρίως διάνοιξη σηράγγων.

Ο Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής (Geological Strength Index, GSI) είναι ένας ποσοτικός δείκτης χαρακτηρισμού της ποιότητας μίας βραχομάζας. Ο δείκτης GSI διατυπώθηκε αρχικά από τους Hoek, Wood and Shah (1992) για σκληρά ρωγματοωμένα πετρώματα αλλά στην συνέχεια συμπεριλήφθηκαν και οι ασθενείς βραχώμαζες από τους Hoek, Marinos and Benissi (1998) και Marinos & Hoek (2000). Για να προσδιοριστεί ο δείκτης γίνεται οπτική παρακολούθηση, ώστε να γίνουν αντιληπτές η δομή και η κατάσταση ασυνεχειών της βραχώμαζας. Η βραχώμαζα, στην συνέχεια, βαθμονομείται συσχετίζοντας την πραγματική βραχώμαζα με τις τυπικές περιγραφές που διατυπώνονται για την δομή και για την ποιότητα των ασυνεχειών.

Ο Δείκτης του GSI πέρα από την γεωτεχνική βαθμονόμηση αριθμητικά συμβολίζει την απομείωση των σταθερών του υλικού. Ο Δείκτης είναι αρκετά σημαντικός για την επίλυση του κριτηρίου Hoek – Brown και συνεισφέρει στην εκτίμηση των παραμέτρων της βραχώμαζας. Στο Σχήμα 11 φαίνεται το διάγραμμα GSI για ομογενές πέτρωμα, ενώ στο σχήμα 12 παρουσιάζεται το διάγραμμα GSI για φλύσχη (ετερογενές πέτρωμα).

ΔΕΙΚΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ (GSI) (E. Hoek, Π. Μαρίνος, 2000) Βασίζομενοι στην περιγραφή της λιθολογικής σύστασης, της δομής και της ποιότητας των ασυνεχειών της βραχώδους εκτιμήστε τη μέση τιμή του GSI από τις καρπύλες. Το να επιλέξετε ένα εύρος τιμών από 33 έως 37 είναι πιο ρεαλιστικό από το να δηλώσετε ότι το GSI = 35. Ο καθορισμός της δομής καθώς και της ποιότητας των ασυνεχειών μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ δύο γειτονικών πεδίων. Τονίζεται ιδιαίτερα ότι το κριτήριο Hoek - Brown δεν εφαρμόζεται σε αστάθεις που ελέγχονται από συγκεκριμένες ασυνέχειες όταν οι ασθενείς επίπεδες επιφάνειες (όπως διατηρημένα επίπεδα στρώσης) έχουν δυσμενή προσανατολισμό σε σχέση με την εκσκαφή. Τότε αυτές καθορίζουν την συμπεριφορά της βραχώδους. Η αντοχή ορισμένων βραχώδων μειώνεται από την παρουσία του υπόγειου νερού και αυτό μπορεί να ληφθεί υπόψη με μικρή μετακίνηση προς τα δεξιά στις στήλες της μέτριας, πτωχής και πολύ πτωχής κατάστασης ασυνεχειών. Η πίεση του νερού δεν μεταβάλλει την τιμή του GSI και λαμβάνεται υπόψη με την ανάλυση ενεργών τάσεων στους υπολογισμούς.		ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ →				
		ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ Πολύ τραχιές, υγείες, μη αποσπασθείσες επιφάνειες	ΚΑΛΗ Τραχιές, ελαφρά αποσπασθείσες και οξείδωμένες επιφάνειες	ΜΕΤΡΙΑ Λείες, μετρίου αποσπασθείσες και εξαλλοιωμένες επιφάνειες	ΠΤΩΧΗ Πολύ λείες, κατά περίπτωση ολισθηρές επιφάνειες με σημαντική επιφλοώματα ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη θραύσματα	ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ Πολύ ολισθηρές επιφάνειες ή πολύ αποσπασθείσες με μαλακό οργανικό υλικό πλήρωσης ή επιφλοώματα
 ΑΡΡΗΚΤΗ Άρρηκτα βραχώδη τεμάχια ή άστρωτος βράχος με λίγες ασυνέχειες σε μεγάλη απόσταση	90 80				N/A	N/A
 ΤΕΜΑΧΩΔΗΣ/ ΑΔΙΑΤΑΡΑΚΤΗ-ΣΤΡΩΜΑΤΩΔΗΣ Αδιατάρακτη βραχώδης με πολύ καλό αλληλοκλειδίωμα που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από τρεις ορθογώνια τεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών.	70 60					
 ΠΟΛΥ ΤΕΜΑΧΩΔΗΣ Μερικώς διαταραγμένη βραχώδης με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια (blocks) που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών.	50					
 ΔΙΑΤΑΡΑΓΜΕΝΗ-ΣΤΡΩΜΑΤΩΔΗΣ/ ΠΤΥΧΩΜΕΝΗ Πτυχωμένη με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Εμμονή στρώσης ή σχιστότητας.	40 30					
 ΑΠΟΔΙΟΡΓΑΝΩΜΕΝΗ Ισχυρά κερματισμένη βραχώδης με πτωχό αλληλοκλειδίωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιώδων και αποστραγγυλωμένων τεμαχίων.	20					
 ΦΥΛΛΩΔΗΣ/ ΔΙΑΤΜΗΜΕΝΗ Φυλλώδης ή σχιστοποιημένη και τεκτονικώς διατηρημένη ασθενής βραχώδης. Η φύλλωση επικρατεί έναντι οποιαδήποτε άλλης οικογένειας ασυνεχειών εμποδίζοντας την δημιουργία γωνιώδων τεμαχίων (η κλίμακα σε αυτό το εικονίδιο δεν συγκρίνεται με αυτή των άλλων εικονιδίων).	N/A N/A				10	20

Σχήμα 11. Δείκτης Γεωλογικής Αντοχής GSI (Hoek & Marinos 2000)



Σχήμα 12. Διάγραμμα GSI σε ετερογενής βραχώμαζα (Hoek & Marinos, 2007)

2.4 Ασθενής ετερογενής βραχώμαζες - Φλύσχης

Ο Φλύσχης χαρακτηρίζεται από έντονη ετερογένεια αποτελούμενος από ιζηματογενή πετρώματα χαμηλής έως και γενικά υψηλής αντοχής. Στον σχηματισμό αυτό διακρίνονται εναλλαγές ψαμμιτών, ιλυολίθων, μαργών και αργιλικών σχιστολιθών, ενώ σπανιότερα εμφανίζονται στρώσεις κροκαλοπαγών και αβεστολιθών, με πάχη που κυμαίνονται από εκατοστά έως μέτρα. Το συνολικό πάχος του φλύσχη συνήθως είναι αρκετά μεγάλο, κυμαίνεται από εκατοντάδες μέτρα έως μερικά χιλιάδες, ωστόσο μερικές φορές λόγω διαβρώσεων και επωθήσεων το στρώμα φλύσχη είναι αρκετά μικρότερο. Στον σχηματισμό μπορεί να συναντώνται ανάστροφα ρήγματα.

Γεωτεχνικά ο φλύσχης χαρακτηρίζεται από:

- A) ετερογένεια μεταξύ ασθενών και ισχυρών στρώσεων
- B) παρουσία αργίλου

Γ) τεκτονική καταπόνηση και διατμητικές ασυνέχειες

Δ) Η διαπερατότητα του είναι χαμηλή λόγω της παρουσίας αργίλου

Στον παρακάτω Πίνακα 7 παρουσιάζεται ένας τρόπος εκτίμησης των τιμών σ_{ci} , m_i , E_i του φλύσχη σύμφωνα με τους τύπους ετερογενούς βραχώμαζας όπου προσδιορίστηκαν αναλυτικά στο διάγραμμα GSI σε ετερογενή βραχώμαζα Σχήμα 12

Πίνακας 7. Αναλογίες των σ_{ci} , m_i και E_i των λιθολογικών μελών για την εκτίμηση της ζυγισμένης τιμής των αντίστοιχων παραμέτρων του άρρηκτου φλύσχη ανάλογα με τον τύπο της βραχώμαζας (Μαρίνος Β. 2007).

Τύπος Φλύσχη	Αναλογίες των σ_{ci} , m_i και E_i των λιθολογικών μελών για την εκτίμηση της ζυγισμένης τιμής των αντίστοιχων παραμέτρων του άρρηκτου φλύσχη ανάλογα με τον τύπο της βραχώμαζας
I, III	Χρησιμοποιείστε τις τιμές για ψαμμιτικούς πάγκους
II, VI	Χρησιμοποιείστε τις τιμές για Ιλυολιθικούς πάγκους
IV	Λεπτά στρώματα: Μειώστε την τιμή του ψαμμίτη κατά 10% και χρησιμοποιείστε την πλήρη τιμή του ιλυόλιθου Παχιά στρώματα: Χρησιμοποιείστε ισοδύναμα τις τιμές του ψαμμιτικού και ιλυολιθικού πάγκου
V, VII, VIII	Μειώστε τις ψαμμιτικές τιμές κατά 20% και χρησιμοποιείστε την πλήρη τιμή του ιλυόλιθου
IX	Χρησιμοποιείστε τις πλήρεις τιμές των εμπλεκόμενων γεωυλικών
X	Μειώστε τις ψαμμιτικές τιμές κατά 30% και χρησιμοποιείστε την πλήρη τιμή του ιλυόλιθου
XI	Χρησιμοποιείστε την πλήρη τιμή του ιλυόλιθου ή αργιλικού σχιστόλιθου
Σημείωση: Η τελική ζυγισμένη τιμή πρέπει να λαμβάνει προφανώς υπ' όψη και τα ποσοστά συμμετοχής των δύο μελών στη σύσταση της βραχώμαζας και όχι να προκύπτει από τον μέσο όρο. Σε περίπτωση που η υπολογιζόμενη τιμή βρεθεί από αυτή του ασθενέστερου υλικού, χρησιμοποιείστε την τελευταία.	

Ο ψαμμίτης μπορεί να έχει κίτρινο, φαιό ή κόκκινο χρώμα ανάλογα με το υλικό σύνδεσης των κόκκων. Πιθανά υλικά σύνδεσης είναι η άργιλος, ασβεστίτης, οξειδία του σιδήρου και πυριτικά υλικά. Αποτελείται κατά κύρια βάση από

χαλαζία με μικρότερη ποσότητα άστριου και μαγνητίτη. Διάμετρος υλικού 0.6 – 2mm (άμμος).

Ο ιλυόλιθος ορυκτολογικά παρόμοιο με τον ψαμμίτη, όμως το 50% των κόκκων είναι μεταξύ του κλάσματος αργίλου (0.002mm) και λεπτής άμμου (0.6mm).

Η ύπαρξη νερού στα πλαστικά μέλη του σχηματισμού ταπεινώνει σημαντικά τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους. Στις ιλυολιθικές στρώσεις η αποσάθρωση είναι έντονη όταν υπάρχει μηχανισμός σχιστότητας – σχάσης, ωστόσο σε βάθος η αποσάθρωση δεν θα συνεχίσει εκτός αν ο σχηματισμός έχει διαταραχθεί έντονα και συνεισφέρουν ψαμμιτικά στρώματα.

Στον παρακάτω Πίνακα 8 παρουσιάζονται τιμές σ_{ci} και E_i για ψαμμίτη και ιλυόλιθο σε φλύσχη που προέκυψαν μέσω δοκιμών σε δείγματα άρρηκτου βράχου.

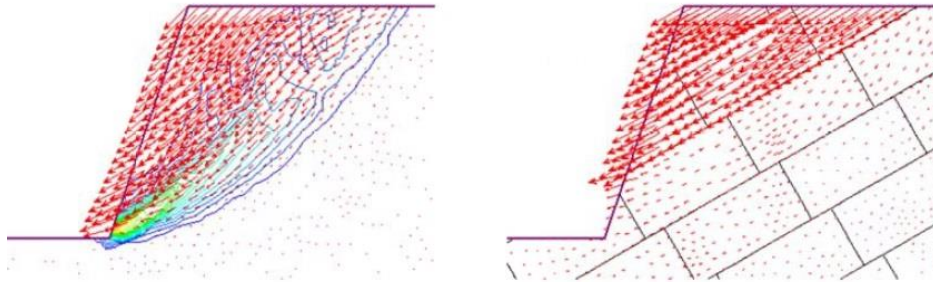
Πίνακας 8. Χαρακτηριστικών τιμών UCS και E_i (Marinos & Tsiambaos, 2010)

Χαρακτηριστικά	Τιμές	
	Ψαμμίτης	Ιλυόλιθος
UCS (MPa)	10-119	2-62.0
Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)	2000-56000	690-17000

2.5 Ευστάθεια Βραχώδων πρανών

2.5.1 Μηχανισμοί αστοχίας βραχώδων πρανών

Η μορφή της αστοχίας σε βραχώδη πρανή εξαρτάται σε μεγάλο ποσοστό με την ύπαρξη και την μηχανική συμπεριφορά των ασυνεχειών της βραχώμαζας. Στην περίπτωση που η βραχώμαζα είναι πτωχής ποιότητας και κατακερματισμένη η βραχώμαζα έχει συμπεριφορά ισότροπου μέσου και αντιμετωπίζεται ως ένα συνεχές μέσο. Όταν η βραχώμαζα αποτελείται από λίγα συστήματα ασυνεχειών τότε πρέπει να εξεταστούν πιθανοί μηχανισμοί ολισθησης μεμονωμένων τεμάχων. Στο Σχήμα 13 φαίνονται οι δύο προαναφερθέντες μηχανισμοί αστοχίας.



Σχήμα 13. Αστοχία ως ισότροπο μέσο (αριστερά). Αστοχία κατά μήκος συγκεκριμένων ασυνεχειών (Νομικός 2015)

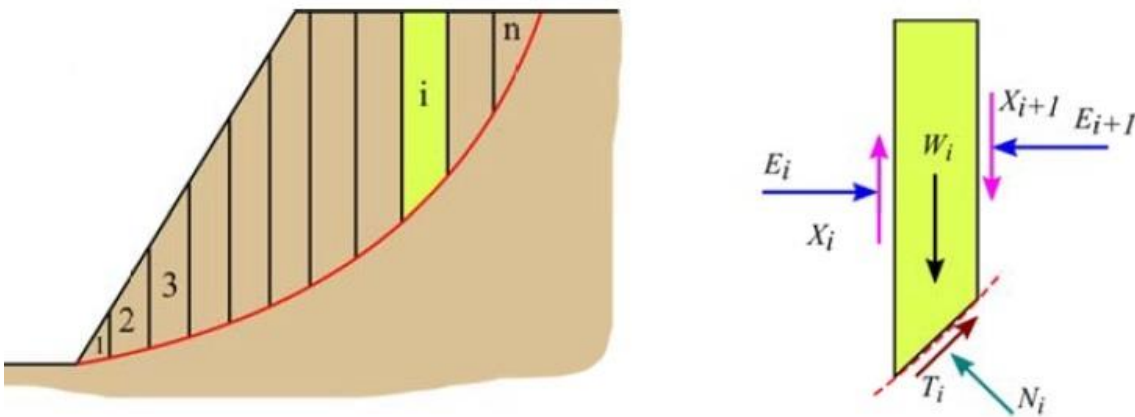
Υπάρχουν τέσσερις βασικοί μηχανισμοί αστοχίας των βραχώδων πρηνών:

- Ολίσθηση σε καμπύλη επιφάνεια
- Επίπεδη ολίσθηση τεμάχους πετρώματος
- Σφηνοειδής ολίσθηση
- Ανατροπή παρακατακόρυφων δομών

2.5.1.1 Ολίσθηση σε καμπύλη επιφάνεια

Σε κατακερματισμένα ή αποσαθρωμένα πετρώματα, γενικά πετρώματα με χαοτική δομή όπου οι ασυνέχειες είναι πολύ πυκνές και τυχαίου προσανατολισμού, η επιφάνεια αστοχίας (καμπυλόγραμμου σχήματος) αναπτύσσεται στην επιφάνεια με την ελάχιστη διατμητική αντίσταση εντός του πρηνούς.

Για την εκτίμηση του συντελεστή ασφαλείας η βραχόμαζα πάνω από την επιφάνεια αστοχίας χωρίζεται σε νοητές κατακόρυφες λωρίδες. Οι δρώσες δυνάμεις σε κάθε λωρίδα σε ξηρές συνθήκες είναι: το Βάρος της λωρίδας (W_i), οι οριζόντιες και οι διατμητικές στις πλευρές της λωρίδας (E_i και X_i , η ορθή και η διατμητική στην βάση (N_i και T_i). Εάν υπάρχει υπόγειο νερό στο πρηνές τότε συνυπολογίζονται οι συνιστάμενες δυνάμεις που προκύπτουν από τις υδροστατικές πιέσεις στην βάση κάθε λωρίδας. (Νομικός 2015)



Σχήμα 14. Μέθοδος λωρίδων για Ολίσθηση σε καμπύλη επιφάνεια (Νομικός 2015)

Σύμφωνα με το Κριτήριο Mohr – Coulomb, ο συντελεστής ασφαλείας ισούται με:

$$F = (C_m + \sigma_n \tan \varphi_m) / \tau \quad (1)$$

Όπου C_m είναι συνοχή της βραχώμαζας, φ_m η γωνία τριβής της βραχώμαζας

Η Διατμητική και ορθή δύναμη της βάσης της λωρίδας με:

$$T_i = \tau \Delta l_i \quad (2)$$

$$N_i = \sigma_n \Delta l_i \quad (3)$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (1) προκύπτει:

$$F = (C_m \Delta l_i + N_i \tan \varphi_m) / T_i \quad (4)$$

$$T_i = (C_m \Delta l_i + N_i \tan \varphi_m) / F \quad (5)$$

Οι άγνωστοι θα είναι:

- Οι (n) ορθές δυνάμεις N στις βάσεις των λωρίδων
- Οι (n-1) οριζόντιες δυνάμεις E_i στις πλευρές των λωρίδων
- Οι (n-1) διατμητικές δυνάμεις X_i στις πλευρές των λωρίδων
- Ο συντελεστής Ασφαλείας (F) που επιτρέπει τον υπολογισμό διατμητικών δυνάμεων T_i

Οι διαθέσιμες εξισώσεις θα είναι:

- Οι (2n) εξισώσεις ισορροπίας δυνάμεων των δύο αξόνων για κάθε λωρίδα
- Η εξίσωση ισορροπίας ροπών ως προς το κέντρο O του κύκλου ολίσθησης.

Επομένως το πλήθος των αγνώστων δυνάμεων, που ισούται με $3n-1$ υπερτερεί τον αριθμό διαθέσιμων εξισώσεων ισορροπίας $2n+1$. Οπότε ο υπολογισμός των λωρίδων είναι αδύνατος. Εφόσον η επίλυση της μεθόδου λωρίδων είναι στατικά αόριστη, οι γνωστές μέθοδοι των λωρίδων υπολογίστηκαν με διάφορες παραδοχές που υιοθετήθηκαν για να καταστεί το πρόβλημα στατικά ορισμένο. (Νομικός 2015)

Οι παραδοχές που λαμβάνονται στην μέθοδο απλοποιημένη Bishop είναι οι εξής:

- Κυκλική επιφάνεια ολίσθησης
- Οριζόντιες δυνάμεις στις πλευρές των λωρίδων
- Διατμητικές δυνάμεις στις πλευρές των λωρίδων αγνοούνται

Οι παραδοχές στην μέθοδο Janbu είναι οι εξής:

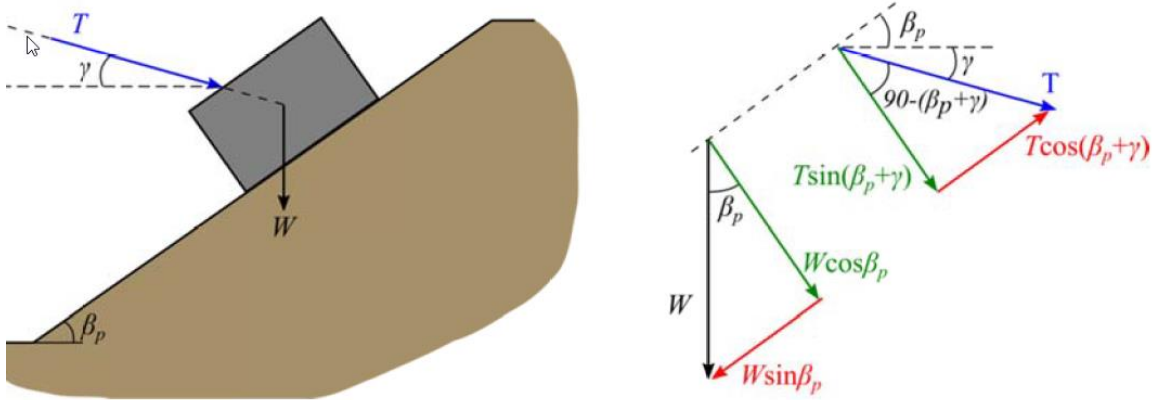
- Οριζόντιες δυνάμεις στις πλευρές των λωρίδων οι οποίες έχουν ίδια τιμή σε κάθε λωρίδα
- Διατμητικές δυνάμεις στις πλευρές των λωρίδων αγνοούνται

2.5.1.2 Επίπεδη ολίσθηση τεμάχους πετρώματος

Η γεωμετρία του πρανούς και ο προσανατολισμός των ασυνεχειών σχηματίζουν πρισματικά τεμάχη τα οποία υπό κατάλληλες συνθήκες είναι ικανά να ολισθήσουν προς τον κενό χώρο λόγω βαρύτητας.

Για να ολισθήσει ένα τεμάχος πάνω σε μία επίπεδη επιφάνεια σε πρανές πρέπει να πληρούνται οι εξής συνθήκες:

- Η φορά κλίσης του πρανούς να είναι σχεδόν παράλληλη με την φορά κλίσης ασυνέχειας με μέγιστη απόκλιση $\pm 20^\circ$
- Η κλίση της ασυνέχειας να είναι μικρότερη από την κλίση του πρανούς
- Η κλίση της ασυνέχειας να είναι μεγαλύτερη από τη γωνία τριβής
- Να υπάρχουν πλευρικές επιφάνειες που να μην εμποδίζουν το τεμάχος του πετρώματος



Σχήμα 17. ανάλυση δυνάμεων σωμάτος σε κεκλιμένη επιφάνεια με εξωτερική δύναμη T (Νομικός 2015)

Ο Συντελεστής ασφαλείας έναντι ολίσθησης του πρανούς με εξωτερική δύναμη T υπολογίζεται:

$$FS_{\alpha\pi} = \frac{W \cdot \cos\beta_p + T \cdot \sin(\beta_p + \gamma)}{W \cdot \sin\beta_p - T \cdot \cos(\beta_p + \gamma)} \tan\varphi \quad (7)$$

Ενώ σε περίπτωση που υπάρχει και συνοχή στην βραχώμαζα, ο συντελεστής ασφαλείας υπολογίζεται:

$$FS_{\alpha\pi} = \frac{C \cdot A + [W \cdot \cos\beta_p + T \cdot \sin(\beta_p + \gamma)] \tan\varphi}{W \cdot \sin\beta_p - T \cdot \cos(\beta_p + \gamma)} \quad (8)$$

Πέρα από την εξωτερική δύναμη T στο σύστημα μπορεί να ασκούνται και άλλες δυνάμεις όπως υδροστατικές δυνάμεις ή και η συνισταμένη της οριζόντιας και κατακόρυφης συνιστώσας της σεισμικής δράσης (για ψευδοστατική ανάλυση). Σε τέτοιες περιπτώσεις εφόσον όλες οι δυνάμεις μπορούν να αναλυθούν στην διεύθυνση της T και του βάρους, τότε εφαρμόζουμε τις εξισώσεις (7) και (8) για τροποποιημένα T και W .

Σε περίπτωση που το επίπεδο ολίσθησης θεωρείται τραχύ, χρησιμοποιείται μη γραμμικό κριτήριο διατμητικής αντοχής Barton – Bandis. Ο συντελεστής ασφαλείας για μηδενική συνοχή θα προκύπτει ως εξής:

$$F = \frac{\tau_{\alpha\nu}}{\tau} = \frac{\sigma_n \tan(\varphi_r + JRC_n \log \frac{JCS_n}{\sigma_n})}{\tau} \quad (9)$$

Εφόσον η ενεργός γωνία τριβής βασίζεται στην ορθή τάση, κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης θα μεταβάλλεται. Οπότε μπορεί να ληφθούν δύο παραδοχές:

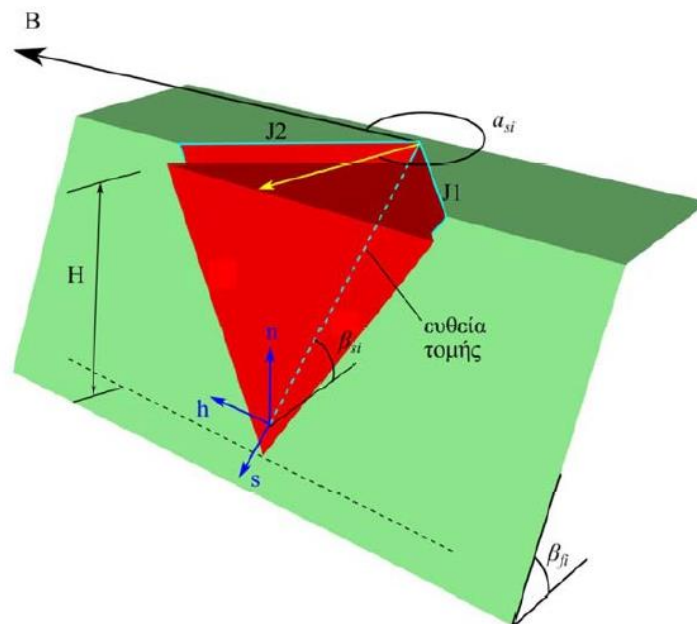
1. Η ορθή τάση είναι κατανομημένη ομοιόμορφα και έχει τιμή ίση με την μέση ορθή τάση στο επίπεδο διάτμησης. (Nilsen 1999)
2. Η ορθή τάση να είναι ίση με την μέγιστη ορθή τάση (Wyllie & Mah 2004)

2.5.1.3 Σφηνοειδής Ολίσθηση

Η σφηνοειδής ολίσθηση σε βραχώδη πρηνή αποτελεί συνηθισμένο μηχανισμό αστοχίας. Αποτελεί την ολίσθηση πρισματικών τεμαχών προς το μέτωπο του πρηνούς. Η μορφή των τεμαχών έχουν σφηνοειδή μορφή η οποία σχηματίζεται από την τομή των ασυνεχειών με το άνω μέρος και με το μέτωπο του πρηνούς.

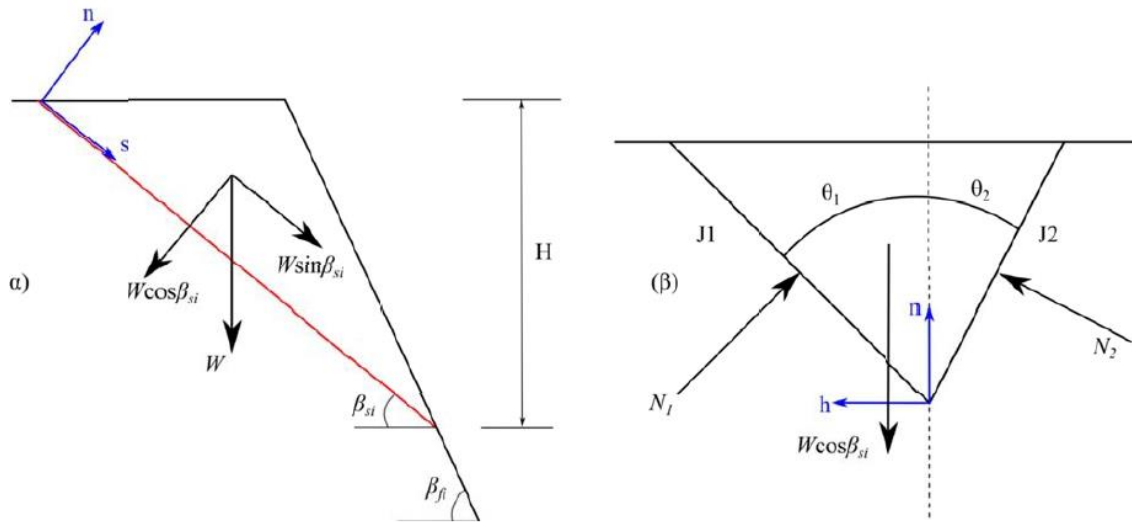
Για να γίνει εφικτή η σφηνοειδής ολίσθηση ενός τεμαχούς πρέπει να πληρούνται οι εξής συνθήκες:

- Αρχικά πρέπει να τέμνονται δύο επίπεδα ασυνεχειών.
- Η κλίση της ευθείας της τομής των ασυνεχειών β_{si} πρέπει να είναι πιο μικρή από την κλίση της επιφάνειας του πρηνούς β_{fi} .
- Η κλίση της ευθείας της τομής των ασυνεχειών β_{si} πρέπει να είναι πιο μεγάλη από την γωνία τριβής φ .
- Η διεύθυνση κλίσης της ευθείας τομής των ασυνεχειών πρέπει να είναι μεταξύ των διευθύνσεων κλίσης των δύο ασυνεχειών.



Σχήμα 18. Απεικόνιση γεωμετρίας σφηνοειδούς ολίσθησης (Νομικός 2015)

Ο υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας σύμφωνα με την μεθοδολογία των Kovari & Fritz (1975, 1984) γίνεται λαμβάνοντας ξηρές συνθήκες, ίση γωνία τριβής για τις δύο ασυνέχειες και ανάπτυξη διατμητικής αντίστασης στα επίπεδα ασυνεχειών. Στο σχήμα 19 φαίνεται η ανάλυση ευστάθειας για κάθετη τομή.



Σχήμα 19. Ανάλυση ευστάθειας σφηνοειδούς ολίσθησης για τομή κάθετη (α) και για τομή οριζόντια/ άνοψη (β) (Νομικός 2015)

Από την Ισορροπία δυνάμεων για τον οριζόντιο άξονα h προκύπτει:

$$N_1 \cos \theta_1 = N_2 \cos \theta_2 \quad (10)$$

Από την Ισορροπία δυνάμεων για τον οριζόντιο άξονα n προκύπτει:

$$N_1 \sin \theta_1 + N_2 \sin \theta_2 = W \cos \beta_{si} \quad (11)$$

Από τις εξισώσεις (10) και (11) προκύπτει

$$N_1 + N_2 = \frac{\cos \theta_1 + \cos \theta_2}{\sin (\theta_1 + \theta_2)} W \cos \beta_{si} \quad (12)$$

Συντελεστής ασφαλείας υπολογίζεται:

$$F = \frac{\tau_{av}}{\tau} = \frac{\sigma_n \tan \varphi}{\tau} = \frac{(N_1 + N_2) \tan \varphi}{W \sin \beta_{si}} W \cos \beta_{si} = \frac{\cos \theta_1 + \cos \theta_2}{\sin (\theta_1 + \theta_2)} \frac{W \cos \beta_{si} \tan \varphi}{W \sin \beta_{si}} \quad (13)$$

2.5.1.4 Ανατροπή παρακατακόρυφων δομών

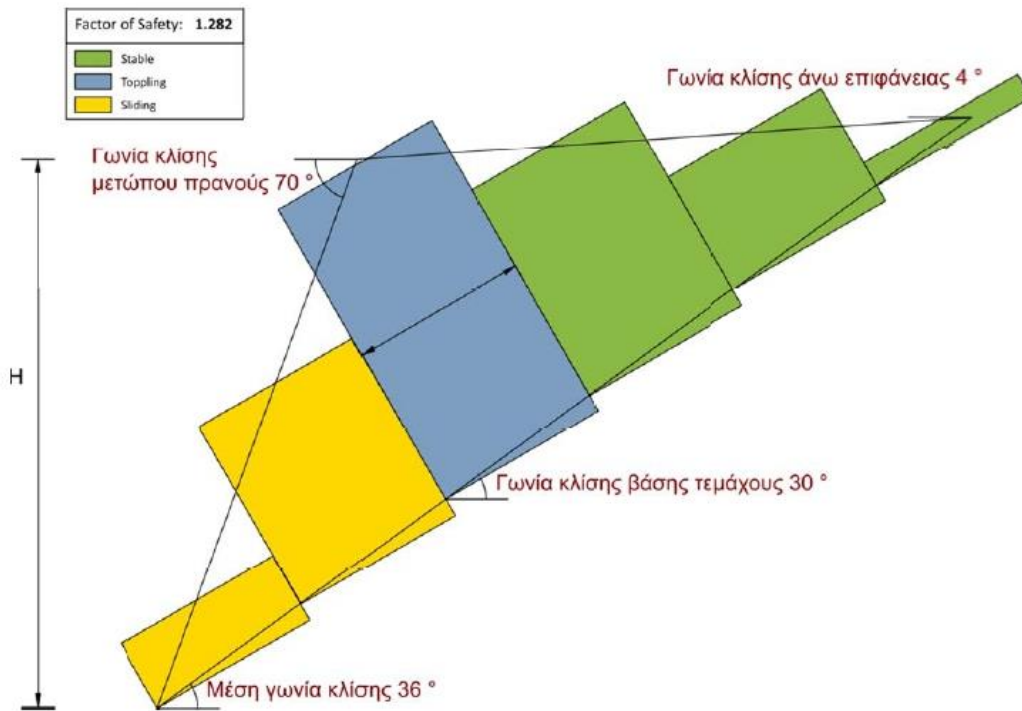
Ο μηχανισμός της ανατροπής αποτελεί περιστροφή στρώσεων ή rock blocks γύρω από τον άξονα που βρίσκεται χαμηλότερα από το κέντρο βάρους. Ξεκινώντας από τον πόδα του πρηνούς αριθμούνται τα τεμάχια έτσι ώστε το χαμηλότερο τεμάχιο να είναι το νούμερο 1. Εφόσον προσδιοριστεί η γεωμετρία των τεμαχίων, διαχωρίζονται σε 3 κατηγορίες. Αρχικά στο άνω μέρος του πρηνούς βρίσκονται τα ευσταθή πρηνή. Στον πόδα βρίσκονται τα ολισθαίνοντα τεμάχια. Τέλος διαχωρίζονται τα ενδιάμεσα των προαναφερθέντων τα οποία βρίσκονται σε κίνδυνο ανατροπής.

Αναλύοντας τις δυνάμεις που ασκούνται σε όλα τα τεμάχια υπολογίζεται η απαιτούμενη δύναμη του τεμαχίου 1 ώστε να έρθει σε οριακή ισορροπία. Στην περίπτωση που βγει αρνητική, τότε το τεμάχιο θεωρείται ευσταθές, ενώ για θετική ασταθές και για μηδενική δύναμη θεωρείται οριακή αστοχία. Ο συντελεστής τριβής υπολογίζεται:

$$FS = \frac{\tan\varphi_{available}}{\tan\varphi_{required}}$$

$\varphi_{available}$: η διαθέσιμη γωνία τριβής

$\varphi_{required}$: η απαιτούμενη γωνία τριβής ώστε το τεμάχιο 1 να είναι οριακά ευσταθές.



Σχήμα 20. Γεωμετρικό μοντέλο για την ανάλυση οριακής ισορροπίας (Νομικός 2015)

2.6 Κατολισθήσεις

Ως κατολισθήση ορίζεται κάθε μετακίνηση εδαφικού ή βραχώδους υλικού μίας κλιτύος υπό την επίδραση δυνάμεων βαρύτητας και οφείλεται σε φυσικά ή τεχνητά αίτια. Η κατολισθήση ουσιαστικά είναι το αποτέλεσμα της αναζήτησης μίας νέας κατάστασης ισορροπίας του εδάφους.

Ανά τα έτη έχουν συνταχθεί πολλοί τρόποι κατάταξης των κατολισθήσεων, η πιο διαδεδομένη από αυτές είναι του Varnes (1978) όπου σύμφωνα με αυτή την κατάταξη διακρίνονται 2 όροι. Ο πρώτος όρος αφορά το είδος του εδαφικού υλικού (βράχος, κορήματα και έδαφος). Ο δεύτερος όρος αφορά το είδος της μετακίνησης (κατάπτωση, ανατροπή, περιστροφική ολίσθηση, επίπεδη ολίσθηση, εξάπλωση, ροή και σύνθετη). Συνολικά όπως φαίνεται και στο Πίνακα 9 η κατάταξη αυτή διακρίνει 29 διαφορετικά είδη κατολισθήσεων.

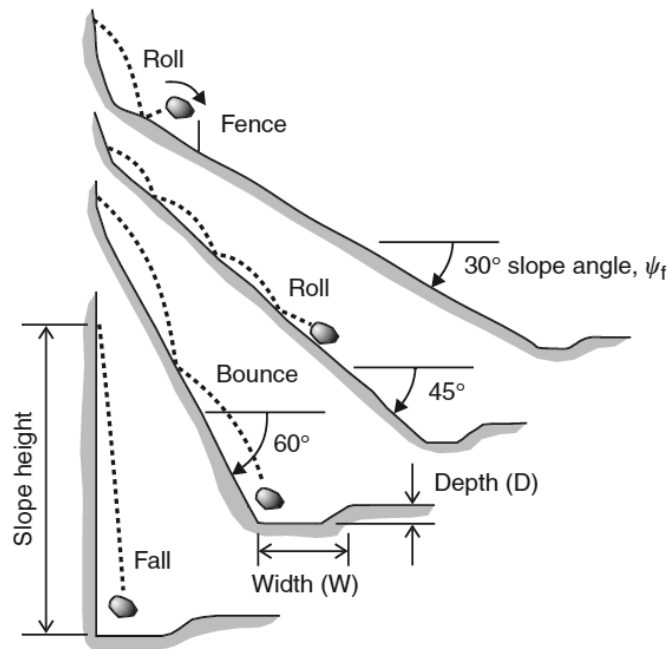
Πίνακας 9. κατάταξης κατολισθήσεων κατά Varnes (1978)

Movement type	Rock	Debris	Earth
Fall	1. Rock fall	8. Debris fall	18. Earth flow
Topple	2. Rock Topple	9. Debris Topple	19. Earth Topple
Rotational sliding	3. Rock slumb	10. Debris slumb	20. Earth slumb
Translational sliding	4. Block slide	11. Debris slide	21. Earth slide
Lateral spreading	5. Rock spread	-	22. Earth Spread
Flow	6. Rock Creep	12. Talus flow	23. Dry Sand flow
		13. Debris flow	24. Wet Sand flow
		14. Debris avalanche	25. Quick clay flow
		15. Solifluction	26. Earth flow
		16. Soil creep	27. Rapid Earth flow
			28. Loess flow
Complex	7. Rock slide-debris avalanche	17. Cambering, valley bulging	29. Earth slumb-earth flow

2.6.1 Καταπτώσεις (ή κατακρημνίσεις)

Η απότομη απόσπαση ενός τεμάχους βράχου ή εδάφους κατά μήκος μίας επιφάνειας χωρίς να προηγηθεί διατμητική μετατόπιση. Σε περίπτωση πρηνούς με κλίση άνω των 75° η κίνηση του τεμάχους περιλαμβάνει ελεύθερη πτώση. Για

μικρότερη κλίση ο όγκος προσκρούει και αναπηδά. Για κλίση πρανούς μικρότερη των 45° τα προσπίπτοντα τεμάχια παρουσιάζουν κύλιση.



Σχήμα 21. απεικόνιση των ειδών καταπτώσεων (Ritchie 1963)

Η τροχιά που διανύει το βραχοτέμαχος στο τρισδιάστατο χώρο περιγράφεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$x(t) = x_0 + V_x \cdot t \quad (14)$$

$$y(t) = y_0 + V_y \cdot t \quad (15)$$

$$z(t) = z_0 + 0.5 \cdot g \cdot t^2 \quad (16) \quad \text{όπου } g = -9.81 \text{ m/s}^2$$

2.6.1.1 Αναπήδηση

Η αναπήδηση ενός τεμάχου είναι ένα φαινόμενο το οποίο εξαρτάται από πληθώρα παραγόντων, οι οποίοι επηρεάζουν σημαντικά την τροχιά. Οι παράμετροι έχουν κατηγοριοποιηθεί από τους Labiouse and Heidenreich (2009) και παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 10.

Πίνακας 10. Παράμετροι αναπήδησης (Labiouse and Heidenreich, 2009)

Χαρακτηριστικά Πρανούς	Χαρακτηριστικά τεμάχου	Κινηματικά Χαρακτηριστικά
Αντοχή	Αντοχή	Μεταθετική ταχύτητα
Ελαστικότητα	Ελαστικότητα	Γωνιακή ταχύτητα
Τραχύτητα	Μέγεθος	Γωνία πρόσκρουσης
Κλίση	Σχήμα	Προσανατολισμός

Για να προσομοιωθεί η αναπήδηση και σε επέκταση η τροχιά που διανύει ένα τέμαχος χρησιμοποιούνται οι συντελεστές αναπήδησης. Ο κινηματικός συντελεστής αναπήδησης ορίζεται ως:

$$v_{COR} = \frac{v_r}{v_i} \quad (17)$$

Όπου:

v_i η ταχύτητα του τεμάχους πριν την κρούση

v_r η ταχύτητα του τεμάχους μετά την κρούση

Ο κινητικός συντελεστής αναπήδησης διαχωρίζεται σε κάθετο και εφαπτομενικό. Κάθετα στην διεύθυνση του πρανούς η απώλεια ενέργειας και κίνησης οφείλεται στην παραμόρφωση των σωμάτων και στην διάδοση των ελαστικών κυμάτων. Εφαπτομενικά η απώλεια κίνησης οφείλεται στην τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ του πρανούς και του τεμάχους.

$$n_{COR} = -\frac{v_{n,r}}{v_{n,i}} \quad (18)$$

$$t_{COR} = \frac{v_{t,r}}{v_{t,i}} \quad (19)$$

Ο προσδιορισμός των συντελεστών αναπήδησης είναι σημαντικά κρίσιμος, εφόσον οι συντελεστές αναπήδησης καθορίζουν την ταχύτητα, την κινητική ενέργεια και το ύψος κίνησης του τεμάχους. Στις παραμέτρους αυτές γίνεται η εκτίμηση της επικινδυνότητας της περιοχής και αντίστοιχα επηρεάζονται και τα μέτρα που θα προταθούν.

Για την εξέταση του φαινομένου χρησιμοποιούνται οι εξής μέθοδοι:

- I. ανάδρομες αναλύσεις πραγματικών καταπτώσεων: εφόσον έχουν καταγραφεί καταπτώσεις, εκτιμώνται οι τροχιές που διένυσαν τα τεμάχη συλλέγοντας στοιχεία επί τόπου. Τα στοιχεία αυτά μπορεί να είναι αρχική και τελική θέση του τεμάχους, ίχνη από τις κρούσεις στο πρανές, σε βλάστηση ή σε κτίσματα και το μέγεθος, πλήθος και το σχήμα των τεμάχων. Αυτά τα στοιχεία χρησιμοποιούνται για να ανακατασκευαστεί η τροχιά, με την οποία μπορεί να προσδιοριστούν οι συντελεστές αναπήδησης μαζί με άλλα στοιχεία. Με αυτό τον τρόπο γίνεται η ορθή βαθμονόμηση του μοντέλου στο λογισμικό ανάλυσης. Το κύριο μειονέκτημα της ανάδρομης ανάλυσης είναι κυρίως πως υστερεί στατιστικά.
- II. επιτόπου δοκιμές: Κατά την δοκιμή το τέμαχος αφήνεται από την κορυφή του πρανούς και η τροχιά του καταγράφεται από φωτομηχανές. Έπειτα

γίνεται η ανάλυση των καταγεγραμμένων στιγμιότυπων, όπου και προσδιορίζονται η ταχύτητα του τεμάχους, το ύψος κίνησης και οι συντελεστές αναπήδησης. Τα αποτελέσματα τους θεωρούνται ως τα πιο αντιπροσωπευτικά της θέσης που μελετάται. Όμως, οι επιτόπου δοκιμές είναι ακριβές, χρονοβόρες και επικίνδυνες.

Οι συντελεστές αναπήδησης σύμφωνα με τον Π. Αστερίου (2016) εξαρτώνται από:

- Την σκληρότητα του υλικού που εκτιμάται με την βοήθεια της σφύρας Schmidt. Σε σκληρότερα πετρώματα οι συντελεστές αναπήδησης είναι μεγαλύτεροι, ενώ σε περίπτωση κρούσης ανόμοιων υλικών τότε η σκληρότητα της επιφάνειας του πρανούς είναι σημαντικότερη από την σκληρότητα του προσπίπτοντος τεμάχους.
- Την ορμή του τεμάχους, εφόσον επηρεάζει την έκταση των παραμορφώσεων και την απώλεια της ενέργειας. Επομένως αλλαγές στην μάζα ή στην ταχύτητα του προσπίπτοντος τεμάχους επηρεάζουν σημαντικά τους συντελεστές αναπήδησης.
- Το σχήμα του τεμάχους. Σε σφαιρικά τεμάχη η τροχιά μετά την κρούση αποκλίνει ελάχιστα από την κατακόρυφο, ενώ σε γωνιώδη τεμάχη η τροχιά μετά την κρούση καθορίζεται από την γεωμετρία της επαφής με το πρανές και μπορεί να αποκτήσει οποιαδήποτε γωνία σε σχέση με την κατακόρυφο. Ωστόσο, σε τροχιά σχεδόν κατακόρυφη, τότε η αναπήδηση προσεγγιστικά είναι κοντά με αυτή των σφαιρικών τεμάχων, ενώ στα υπόλοιπα ενδεχόμενα η αναπήδηση είναι μικρότερη.
- Την γωνία πρόσκρουσης. Όσο αφορά τα γωνιώδη τεμάχη, όσο μικρότερη είναι η γωνία πρόσκρουσης τόσο μεγαλύτερη είναι η διακύμανση της ταχύτητας και της γωνίας αναπήδησης.

$$n_{COR}^{max} = C_s C_{a_i} C_{rh} n_{COR} \quad (20)$$

Όπου:

n_{COR}^{max} μέγιστη τιμή κάθετου συντελεστή αναπήδησης

C_s διορθωτικός συντελεστής σχήματος τεμάχους (Πίνακας 11)

C_{a_i} διορθωτικός συντελεστής γωνίας πρόσκρουσης (Σχέση)

C_{rh} διορθωτικός συντελεστής σχετικής σκληρότητας (Σχέση)

n_{COR} κάθετος συντελεστής για σφαιρικά τεμάχη

Πίνακας 11. Συντελεστής σχήματος, C_s (Αστερίου, 2016)

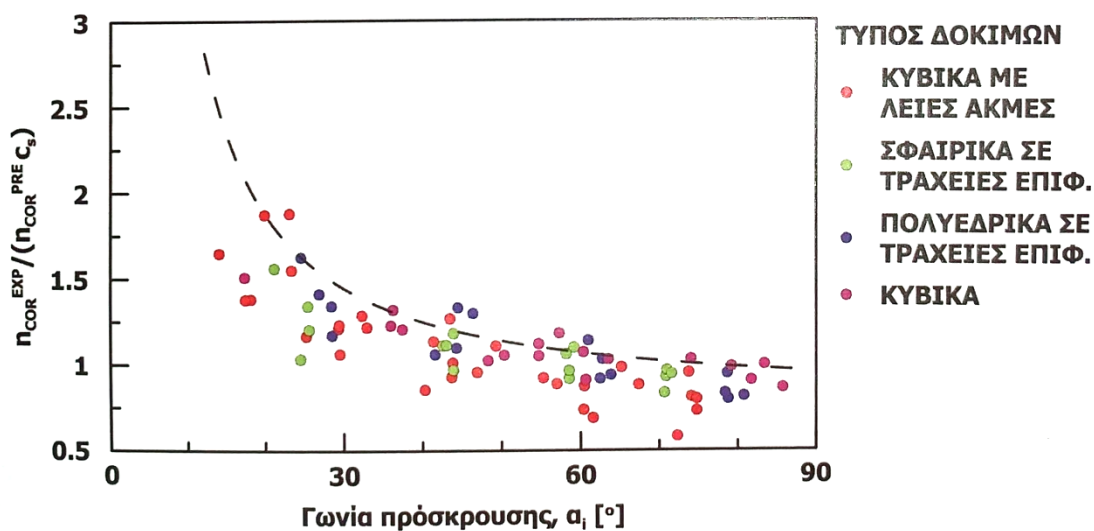
Σχήμα Τεμάχους	Συντελεστής Σχήματος
σφαιρικό	1
στρογγυλεμένο	1
πολυεδρικό	0.9
κυβικό	0.65

$$1/C_{rh} = \frac{R_s + R_b}{2R_b} \quad (21)$$

Όπου:

R_s τιμή σκληρότητας της επιφάνειας πρόσκρουσης

R_b τιμή σκληρότητας του προσπίπτοντος τεμάχους



Σχήμα 22. Νομογράφημα εκτίμησης διορθωτικού συντελεστή γωνίας πρόσκρουσης (Αστερίου, 2016)

$$C_{a_i} = n_{COR}^{EXP} / n_{COR}^{PRE} \quad (22)$$

$$n_{COR} = (0.027R - 1.536)M_{n,i}^{0.244} + 1 \quad (23)$$

Όπου:

R τιμή σκληρότητας του τεμάχους

$M_{n,i}$ Ορμή πρόσκρουσης (kgm/s)

2.6.1.2 Εκτροπή

Εκτροπή είναι η διεδρη γωνία που σχηματίζεται μεταξύ των κατακόρυφων επιπέδων που περιέχουν την τροχιά πριν και μετά την κρούση. Αλλιώς, χρησιμοποιείται η πλευρική διασπορά, που ορίζεται ως ο λόγος της απόστασης μεταξύ των δύο ακραίων τροχιών προς το μήκος της τροχιάς και εκφράζεται ως ποσοστό. (Azzoni & De Freitas, 1995)

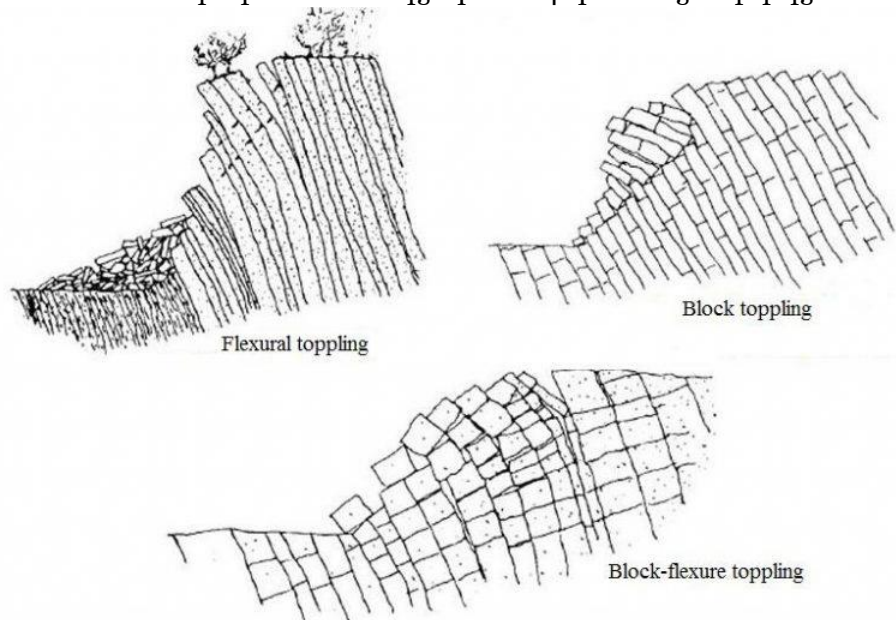
2.6.2 Ανατροπή

Μηχανισμός κατάντη περιστροφής όγκου εδάφους ή βράχου γύρω από σημείο ή άξονα που υπόκειται χαμηλότερα του κέντρου βάρους του μετακινούμενου τεμαχίου. Οι Goodman και Bray (1976) διέκριναν 3 ειδών ανατροπών: α) καμπτική ανατροπή (flexural toppling), β) ανατροπή τεμαχίων (block toppling), γ) ανατροπή με κάμψη των μπλοκ (block-flexure toppling).

καμπτική ανατροπή: συνεχή στρώματα πετρωμάτων όπου κάμπτονται και βυθίζονται απότομα και αντίρροπα προς το πρηνές. Κατά την κάμψη των στρωμάτων οι διεπιφάνειες ολισθαίνουν και η επιφάνεια του πρηνούς αποκτά βαθμιδωτή μορφή.

ανατροπή τεμαχίων: ανατροπή εγκάρσιων ρωγματωμένων παρακατακόρυφων τεμαχίων (blocks)

ανατροπή με κάμψη των μπλοκ: ψευδοσυνεχής κάμψη παρακατακόρυφων στρωμάτων με πολλαπλές εγκάρσιες ασυνέχειες. Η ολίσθηση των εγκάρσιων ασυνεχειών δίνει αυτή την εικόνα της προαναφερθείσας κάμψης.



Σχήμα 23. Είδη ανατροπών Goodman & Bray (1976)

2.6.3 Ολίσθηση

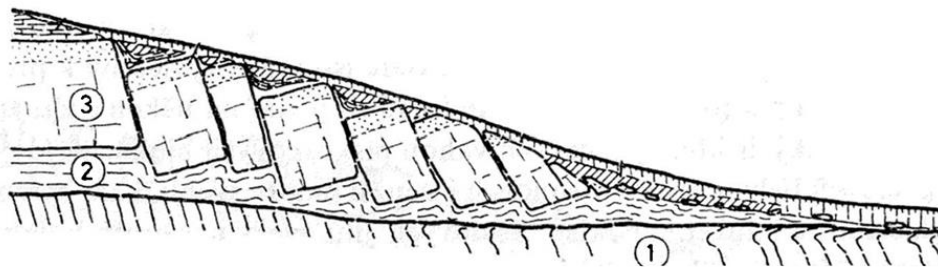
Σε εδάφη ή και σε βράχους η μορφή αστοχίας εκδηλώνεται σε επιφάνειες όπου η διατμητική αντοχή είναι η ελάχιστη. Οι ολισθήσεις συμβαίνουν σε καμπύλες ή επίπεδες επιφάνειες και χαρακτηρίζονται αντίστοιχα ως περιστροφικές ολισθήσεις ή επίπεδες ολισθήσεις. Για την εκδήλωση περιστροφικής ολίσθησης σε βράχο γενικά θα πρέπει να κυριαρχούν πολλές και πυκνές και τυχαίου προσανατολισμού ασυνέχειες δηλαδή να είναι πολύ κερματισμένος και διαταραγμένος.



Σχήμα 24. Περιστροφική ολίσθηση (Varnes, 1978)

2.6.4 Εξάπλωση

Εκφράζεται ως η πλευρική εξάπλωση μίας πλαγιάς συνεκτικών εδαφών ή βράχου σε υποκείμενα μη-συνεκτικά και πιο αδύναμα εδάφη (αμμώδη εδάφη). Προκαλείται συνήθως από ρευστοποίηση, ερπυστικές παραμορφώσεις και ροές των υποκείμενων εδαφών.

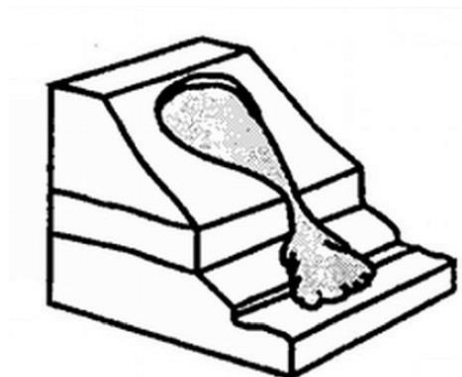


Σχήμα 25. Εξάπλωση (Varnes, 1978)

2.6.5 Ροές

Αποτελούν μετακινήσεις εδαφικών ή βραχωδών υλικών, οι οποίες μάζες συχνά έχουν κορεστεί ενώ σε περίπτωση κορημάτων ενεργούν δυνάμεις διήθησης νερού. Οι εδαφοροές συνήθως γίνονται σε επιφανειακές στρώσεις, για αυτό

ευθύνονται οι ραγδαίες μεταβολές της υγρασίας και οι πιέσεις πόρων κατά την διάρκεια βροχοπτώσεων μεγάλης έντασης.



Σχήμα 26. Ροή (Varnes, 1978)

2.6.6 Σύνθετες

Οι κατολισθήσεις συνήθως αποτελούν ένα συνδυασμό των προαναφερθέντων μετακινήσεων οι οποίες εμφανίζονται σε διάφορα στάδια μιας κατολισθήσεως ή και σε τμήματα της μετακινούμενης μάζας. Γενικά ως σύνθετες περιγράφονται οι κατολισθήσεις στις οποίες διαφορετικού είδους μετακινήσεις πραγματοποιούνται σε διαφορετικές περιοχές της μάζας.

2.7 Μέτρα αντιστήριξης

Για την αντιμετώπιση των φαινομένων κατολισθήσεων σε πρανή υπάρχουν διάφορες μέθοδοι οι οποίες διακρίνονται σε:

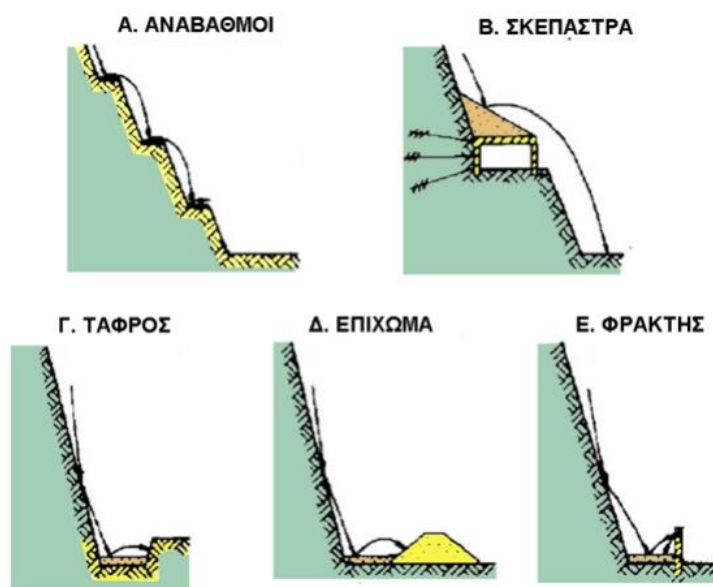
1. Παθητικά μέτρα αντιστήριξης που έχουν ως σκοπό να εμποδίσουν τυχόν ολισθήσεις τεμαχών να καταστρέψουν τεχνικά έργα.
2. Ενεργητικά μέτρα αντιστήριξης που έχουν στόχο είτε να απομειώσουν τις δρώσες δυνάμεις που συνεισφέρουν στην ολίσθηση είτε να ενισχύσουν τις δυνάμεις που αντιστέκονται στην ολίσθηση.
3. Βελτίωση της ποιότητας βραχώμαζας.

2.7.1 Παθητικά μέτρα αντιστήριξης

Τα παθητικά μέτρα αντιστήριξης συνδράμουν σχεδόν αποκλειστικά στην αντιμετώπιση των βραχοπτώσεων. Είναι τα οικονομικότερα μέτρα σε σύγκριση με τα υπόλοιπα και μερικά από αυτά αποτελούν:

- Η κατασκευή τάφρων για την εμπόδιση τεμαχών βραχοπτώσεων
- Τοποθέτηση βραχοπαγίδων

- Κατασκευή τοίχων ή επιχωμάτων που εμποδίζουν τεμάχη βραχοπτώσεων να προσπίψουν και να καταστρέψουν τεχνικά έργα
- Εκκοπή αναβαθμών επάνω στο πρανές, έτσι ώστε να απομειωθούν οι δυνάμεις που προκαλούν την αστοχία.
- Μεταλλικά πλέγματα
- Καθαιρέσεις τεμαχών βράχου που μπορεί να προκαλέσουν καταστροφές



Σχήμα 27. Μέτρα αντιμετώπισης βραχοπτώσεων (Hoek, 2000)

2.7.2 Αποστράγγιση

Με την αποστράγγιση επιτυγχάνεται η αύξηση της αντοχής των υλικών, η οποία συμβαίνει λόγω της μείωσης των υδατικών πιέσεων. Η μείωση των υδατικών πιέσεων φέρει ως αποτέλεσμα την αύξηση των ενεργών τάσεων, άρα και την αύξηση της διατμητικής αστοχίας. Διακρίνονται σε δύο τύπους: έργα επιφανειακής και υπόγειας αποστράγγισης.

Τα έργα επιφανειακής αποστράγγισης στοχεύουν στην απομάκρυνση των επιφανειακών υδάτων και την παρεμπόδιση της διήθησης νερού, οι οποίες προκαλούν διάβρωση στην επιφάνεια. Για την πλήρη απομάκρυνση των επιφανειακών υδάτων κατασκευάζονται επιφανειακοί αγωγοί και σφραγίζονται οι υπάρχουσες ρωγμές.

Τα έργα υπόγειας αποστράγγισης (φρέατα, στοές αποστράγγισης) έχουν ως στόχο την ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα καθώς και στην εκτόνωση των υδροστατικών πιέσεων και την αύξηση των ενεργών τάσεων.

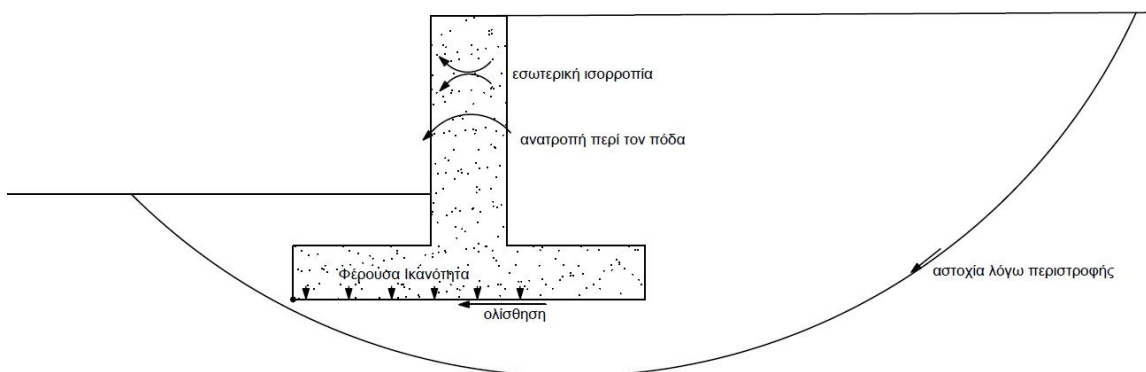
2.7.3 Τοίχος αντιστήριξης

Οι τοίχοι αντιστήριξης αποτελούν ένα από τα βασικότερα έργα αντιστήριξης πρανούς. Αποτελεί βασικό μέτρο αντιστήριξης για εδάφη και για κατακερματισμένους ή αποσαθρωμένους βράχους, δηλαδή βράχους με συμπεριφορά μη – συνεκτικού εδάφους.

Οι τοίχοι αντιστήριξης σχεδιάζονται οριακά για τις εξής καταστάσεις αστοχίας:

- Ανατροπή περί τον πόδα.
- Ολίσθηση.
- Απώλειας ολικής Ευστάθειας .
- Αστοχίας φέρουσας ικανότητας κάτω από τον τοίχο.
- Αστοχία των δομικών μελών σε κάμψη και διάτμηση.
- Πολύ μεγάλες παραμορφώσεις του τοίχου ή του εδάφους που μπορούν να φέρουν γειτονικές κατασκευές σε κατάσταση αστοχίας.

Στο Σχήμα 28 παρουσιάζονται περιεκτικά οι παραπάνω καταστάσεις αστοχίας ενός τοίχου αντιστήριξης.

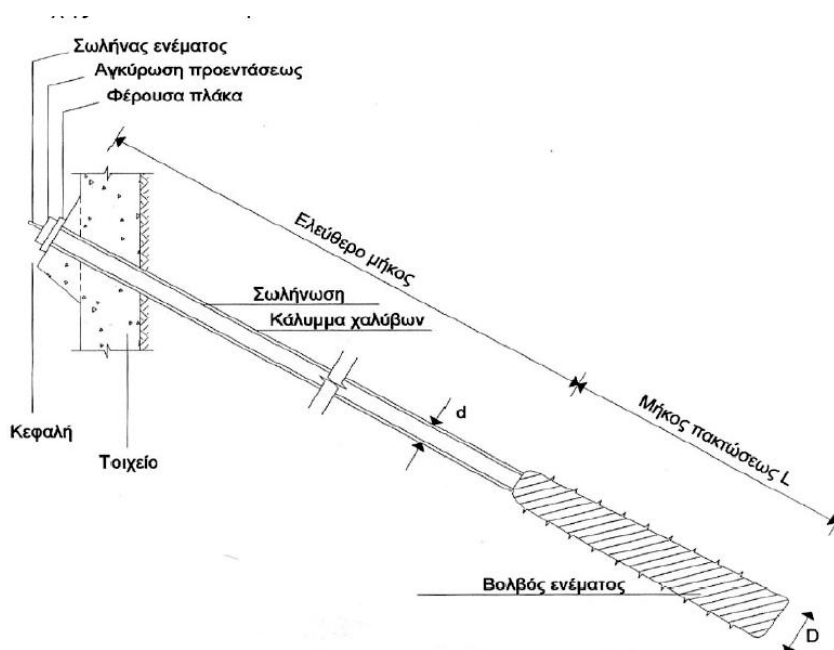


Σχήμα 28. Τοίχος βαρύτητας – Καταστάσεις αστοχίας

2.7.4 Αγκύρια

Τα αγκύρια χρησιμοποιούνται σε βραχώδη πρανή για να επιτευχθεί η βελτίωση της ευστάθειας και της σύνδεσης του γεωλικού με την υπόλοιπη κατασκευή. Τα αγκύρια είναι στοιχεία που δέχονται μόνο αξονικά φορτία και ο μόνος τρόπος για να αναπτυχθεί και να μεταβεί η εφελκυστική φόρτιση τους είναι η εφελκυστική παραμόρφωση μέσω της σχετικής απομάκρυνσης των άκρων τους.

Η εφελκυστική παραμόρφωση για τα παθητικά αγκύρια επιλέγεται να επιβληθεί κατά την εκοκαφή του έργου, ενώ η εφελκυστική παραμόρφωση για τα προεντεταμένα (ενεργητικά) αγκύρια επιβάλλεται εκ των προτέρων με ελεγχόμενο τρόπο. Σε περιπτώσεις που έχουμε ανεκτές παραμορφώσεις χρησιμοποιούνται παθητικά αγκύρια. Ειδικά, προτιμώνται τα προεντεταμένα αγκύρια. Τα τρία βασικά τμήματα ενός αγκυρίου είναι: η κεφαλή (αγκύρωση προέντασης), το ελεύθερο τμήμα (τένοντας ή εντατήρας) και το πακτωμένο τμήμα. Στο σχήμα 29 απεικονίζεται αναλυτικά ένα αγκύριο με τα επιμέρους τμήματα του.



Σχήμα 29. Τμήματα αγκυρίου

2.7.4.1 Κατηγοροποίηση Αγκυρίων

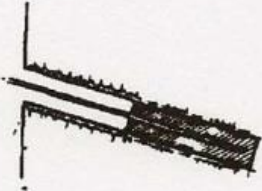

Τα αγκύρια κατηγοροποιούνται με βάση το χρόνο ζωής σχεδιασμού και ανάλογα με την μέθοδο κατασκευής τους. Σύμφωνα με την διάρκεια ζωής τους κατά EN 1997, οι προεντεταμένες αγκυρώσεις διακρίνονται σε προσωρινές αγκυρώσεις με διάρκεια ζωής έως 2 έτη και σε μόνιμες αγκυρώσεις με διάρκεια ζωής μεγαλύτερη των 2 ετών. Σύμφωνα με τον τρόπο κατασκευής τους τα αγκύρια διαχωρίζονται σε τέσσερις κύριους τύπους αγκυριών (τύπος A, B, C, D), όπου διαφέρουν στο σχήμα του πακτωμένου τμήματος. Για την παρούσα μελέτη οι τύποι C και D θα αγνοηθούν, διότι αφορούν εδαφικά πρανή.

Ο Τύπος A επιλέγεται κυρίως σε βράχους. Το ένεμα εισάγεται χωρίς πίεση από το άκρο του αγκυρίου προς την κεφαλή. Το διάτρημα θεωρείται λείο με αποτέλεσμα η διάμετρος του πακτωμένου τμήματος να ισούται με την διάμετρο του διατρήματος εκτός αν στην θέση αυτή υπάρχουν ρήγματα, έγκοιλα ή πορώδη

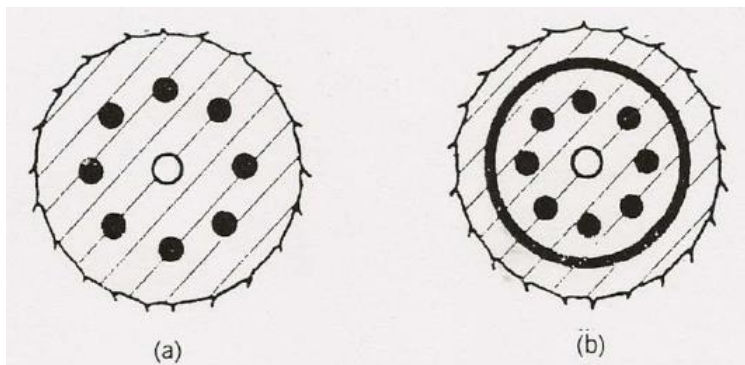
μέσα. Η διατμητική αντοχή προκύπτει από την αναπτυσσόμενη πλευρική τριβή μεταξύ εδάφους και ενέματος.

Ο Τύπος Β χρησιμοποιείται κυρίως σε μαλακούς, ρωγματομένους ή αποσαθρωμένους βράχους ή ημίβραχους με συμπεριφορά μη συνεκτικού εδάφους. Το ένεμα εισάγεται με μικρή πίεση (έως 1MPa) για να διευκολυνθεί η διείσδυση του στο εσωτερικό του γεωυλικού με αποτέλεσμα το πακτωμένο τμήμα να έχει μεγαλύτερη διάμετρο από του διατρήματος. Η διατμητική αντοχή του συγκριτικά με του τύπου Α είναι μεγαλύτερη και προκύπτει κατά κύρια βάση από την πλευρική τριβή αλλά και από την παθητική αντίσταση των παθητικών ωθήσεων που αναπτύσσονται στο άνω άκρο του πακτωμένου τμήματος.

Στο σχήμα 30 φαίνονται οι Τύποι Α και Β προεντεταμένων αγκυρίων, ενώ στο σχήμα 31 απεικονίζεται η τομή στην περιοχή του βολβού ενέματος για α) προσωρινά αγκύρια, b) για μόνιμα αγκύρια.

Τύπος	Χαρακτηριστικά
A	 <p>Λείο διάτρημα Σταθερή διάμετρος Ένεμα χωρίς πίεση</p>
B	 <p>Ένεμα με ελαφρά πίεση ($p < 1 \text{MPa}$)</p>

Σχήμα 30. Τύποι Αγκυρίων



Σχήμα 31. Τομή βολβού ενέματος α) για προσωρινά αγκύρια, β) μόνιμα αγκύρια

2.7.4.2 Μηχανισμοί Αστοχίας – Αντοχή Αγκυρίου

Ο υπολογισμός του Συντελεστή Ασφαλείας Πρανούς με αγκυρώσεις γίνεται όπως διατυπώθηκε στο κεφάλαιο 2.5.1 εξίσωση (8) όπου ως εξωτερική δύναμη T

θεωρείται η δύναμη του αγκυρίου και γ η κλίση του. Η δύναμη του αγκυρίου υπολογίζεται ως εξής:

$$T = \frac{(FS_{\alpha\pi} - FS_{\nu\pi})W \sin \beta_p}{FS_{\alpha\pi} \cdot \cos(\beta_p + \gamma) + \sin(\beta_p + \gamma) \tan \varphi} \quad (24)$$

Όπου:

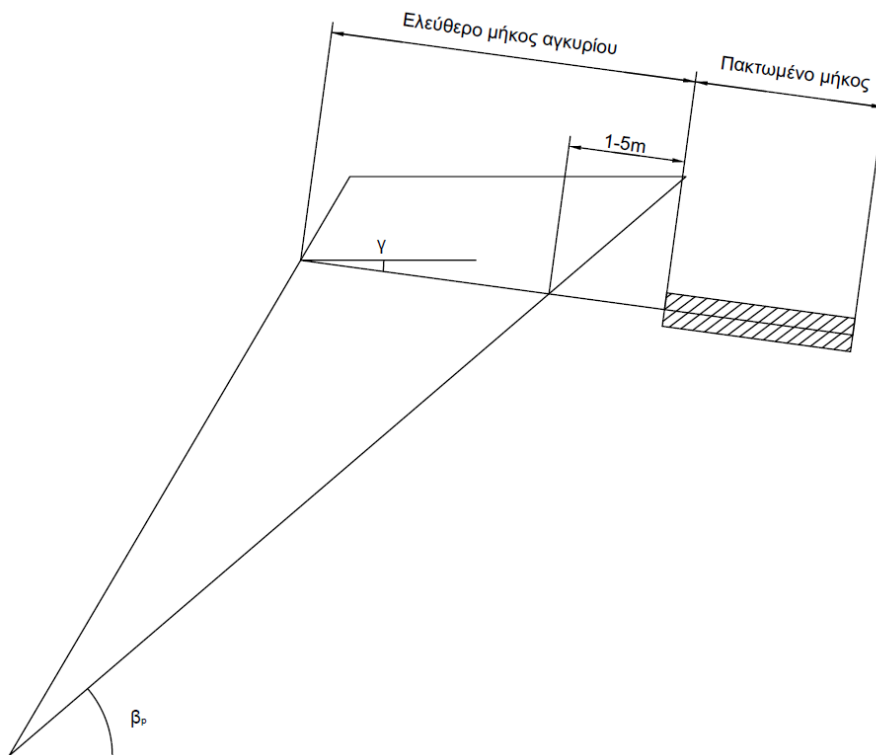
$FS_{\alpha\pi}$: απαιτούμενος συντελεστής ασφαλείας, όπως ορίζεται από την εξίσωση (8)

$FS_{\nu\pi}$: ο υπάρχων συντελεστής ασφαλείας χωρίς αγκύρωση όπως ορίζεται από την εξίσωση (6)

γ : γωνία αγκυρίου

β_p : γωνία επιπέδου αστοχίας

Το ελεύθερο μήκος αγκυρίου θεωρείται πως είναι η απόσταση από την κεφαλή του αγκυρίου έως την επιφάνεια αστοχίας συν 1 με 5 μέτρα που προστίθενται για λόγους ασφαλείας. Το πακτωμένο μήκος βρίσκεται εκτός της επιφάνειας αστοχίας. Στο σχήμα 32 φαίνεται η γεωμετρία πρίσματος με μονή αγκύρωση υπό γωνία γ .



Σχήμα 32. γεωμετρία πρίσματος με μονή αγκύρωση υπό γωνία γ

Όσο αφορά την εσωτερική ισορροπία των αγκυρώσεων οι επιμέρους πιθανοί μηχανισμοί αστοχίας είναι οι εξής: α) αστοχία του τένοντα (δηλαδή διαρροή του χάλυβα), β) αστοχία στην διεπιφάνεια τένοντα – ενέματος, γ) αστοχία στην διεπιφάνεια ενέματος – εδάφους, δ) ρωγμάτωση ενέματος.

Για την διαρροή του χάλυβα το χαρακτηριστικό φορτίο του τένοντα δίνεται ως εξής:

$$T_k = R_k = A_s \cdot f_{yk} \quad (25)$$

Όπου f_{yk} χαρακτηριστική τάση διαρροής του χάλυβα

A_s διατομή του τένοντα

Η αστοχία στην διεπιφάνεια τένοντα – ενέματος στην πράξη αντιμετωπίζεται με απλά κατασκευαστικά μέτρα ώστε να αποφευχθεί κάποιος ειδικός έλεγχος. Οι κανονισμοί καθορίζουν ελάχιστες τιμές για το μήκος της πάκτωσης, 3 μέτρα για συνήθεις εργοταξιακές συνθήκες.

Αστοχία από την ρωγμάτωση του ενέματος συμβαίνει σπάνια εφόσον η αντοχή του ενέματος επαρκεί για να παραλάβει τις τάσεις.

Γενικά η φέρουσα ικανότητα του αγκυρίου προκύπτει κυρίως από τον έλεγχο αστοχίας στην διεπιφάνεια εδάφους – ενέματος. Για την επάρκεια του αγκυρίου πρέπει η δύναμη που δέχεται να είναι μικρότερη από το άθροισμα των οριακών δυνάμεων που αναπτύσσονται εξαιτίας της πλευρική τριβής και των παθητικών ωθήσεων. Στο σχήμα 33 απεικονίζεται ένα αγκύριο με τις τάσεις που δέχεται το ένεμα



Σχήμα 33. Τάσεις στον βολβό το ενέματος.

Το οριακό φορτίο εξόλκευσης (φέρουσα ικανότητα αγκυρίου) δίνεται:

$$T_f = \pi D L \tau_w + \pi \frac{D^2 - d^2}{4} q_{op} \quad (26)$$

Όπου: $q_{op} = \sigma'_{vo} (N_q / 1.4)$

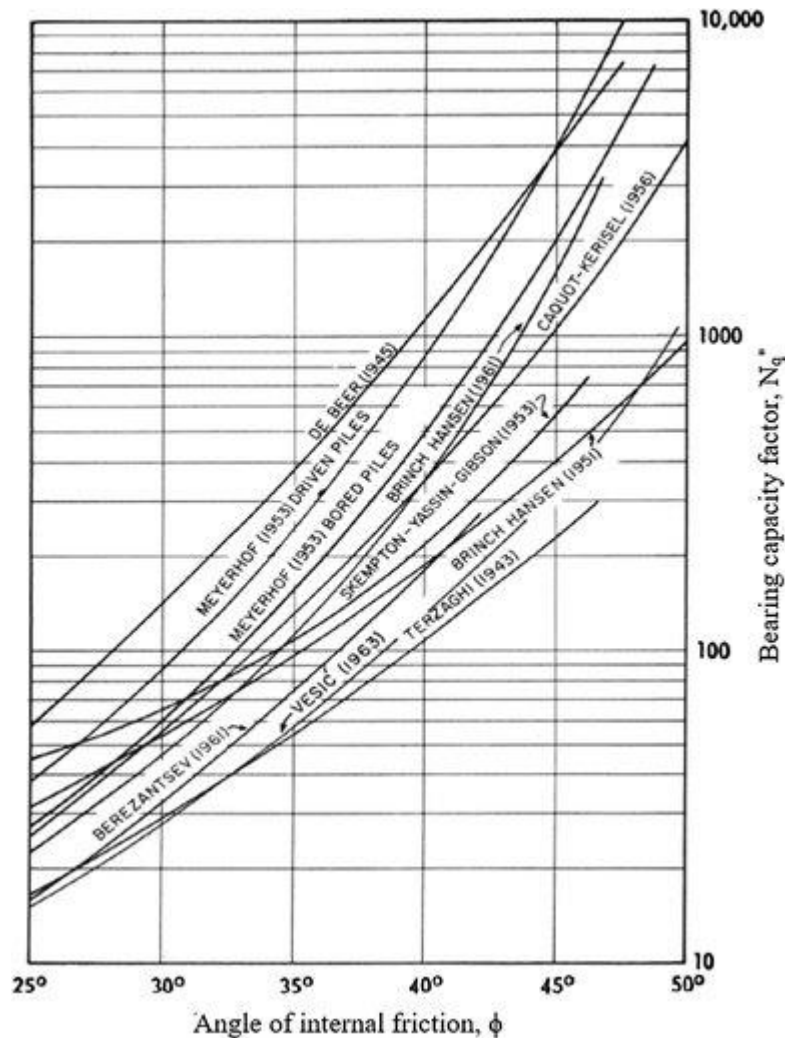
N_q = συντελεστής φέρουσας ικανότητας για αγκύρια μπορεί να προσδιοριστεί με διάφορες εμπειρικές μεθόδους που παρουσιάζονται περιεκτικά στο διάγραμμα στο σχήμα 34.

τ_w = οριακή τάση συνάφειας κατά την διεπιφάνεια του ενέματος με το έδαφος ή τον βράχο.

Για αγκυρώσεις τύπου Α το $q_{op}=0$ οπότε η αντοχή σε εξόλκευση απλοποιείται σε:

$$T_f = \pi DL\tau_w \quad (27)$$

Οι τιμές του τ_w κυμαίνονται από 0.3 έως 6MPa και σχετίζονται κυρίως με τον τύπο του πετρώματος, τον βαθμό αποσάθρωσης ή εξαλλοίωσης.



Σχήμα 34 Διάγραμμα συντελεστή φέρουσας ικανότητας $N_q-\phi$

Στον πίνακα 12 παρουσιάζονται προτεινόμενες τιμές τ_w για διάφορα είδη βράχων και εδαφών. ΡΤΙ (1996).

Πίνακας 12. προτεινόμενες τιμές τ_w για βράχους και εδάφη. ΡΤΙ (1996).

Rock type	Average ultimate bond stress (MPa)	Anchor type	Average ultimate bond stress (MPa)	Anchor type	Average ultimate bond stress (MPa)
Granite and basalt	1.7 - 3.1	Gravity-grouted anchors (straight shaft)	0.03 - 0.07	Gravity-grouted anchors (straight shaft)	0.07 - 0.14
Dolomitic limestone	1.4 - 2.1	Pressure-grouted anchors (straight shaft)		Pressure-grouted anchors (straight shaft)	
Soft limestone	1.0 - 1.4	<ul style="list-style-type: none"> • Soft silty clay 	0.03 - 0.07	<ul style="list-style-type: none"> • Fine-med. sand, med. dense – dense 	0.08 - 0.38
Slates and hard shales	0.8 - 1.4	<ul style="list-style-type: none"> • Silty clay 	0.03 - 0.07	<ul style="list-style-type: none"> • Med.–coarse sand (w/gravel), med. dense 	0.11 - 0.66
Soft shales	0.2 - 0.8	<ul style="list-style-type: none"> • Stiff clay, med. to high plasticity 	0.03 - 0.10	<ul style="list-style-type: none"> • Med.–coarse sand (w/gravel), dense - very dense 	0.25 - 0.97
Sandstones	0.8 - 1.7	<ul style="list-style-type: none"> • Very stiff clay, med. to high plasticity 	0.07 - 0.17	<ul style="list-style-type: none"> • Silty sands 	0.17 - 0.41
Weathered Sandstones	0.7 - 0.8	<ul style="list-style-type: none"> • Stiff clay, med. plasticity 	0.10 - 0.25	<ul style="list-style-type: none"> • Dense glacial till 	0.30 - 0.52
Chalk	0.2 - 1.1	<ul style="list-style-type: none"> • Very stiff clay, med. plasticity 	0.14 - 0.35	<ul style="list-style-type: none"> • Sandy gravel, med. dense-dense 	0.21 - 1.38
Weathered Marl	0.15 - 0.25	<ul style="list-style-type: none"> • Very stiff sandy silt, med. plasticity 	0.28 - 0.38	<ul style="list-style-type: none"> • Sandy gravel, dense-very dense 	0.28 - 1.38
Concrete	1.4 - 2.8				

3. Βασικές αρχές εναέριας φωτογραμμετρίας – Ψηφιακά εργαλεία έρευνας

Οι κατολισθήσεις αποτελούν φαινόμενα που επιφέρουν αλλαγές στο φυσικό περιβάλλον, έχοντας ταυτόχρονα ευρείς περιβαλλοντικούς, οικονομικούς και κοινωνικούς αντίκτυπους (Glenn et al., 2006). Παρόλο που η κατανόηση των διεργασιών που προκαλούν αυτά τα φαινόμενα είναι περιορισμένη, η επιστήμη της Τηλεπισκόπησης προσφέρει νέες προσεγγίσεις για την μελέτη τους. Μέσω αυτής, λαμβάνονται δεδομένα από απόσταση, επιτρέποντας την παρακολούθηση κινήσεων της γης και την ανίχνευση περιοχών που είναι ευάλωτες σε κατολισθήσεις (Henry et al., 2002).

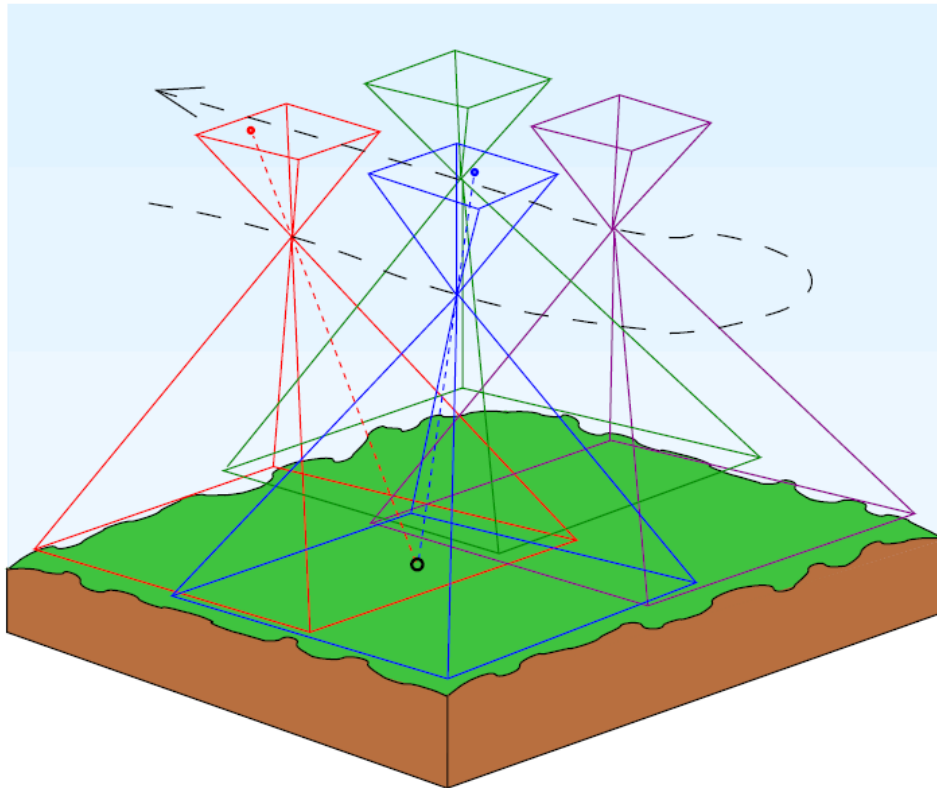
Τα τελευταία χρόνια καινοτόμα όργανα – πλατφόρμες έχουν εισαχθεί στο χώρο των αποτυπώσεων τα οποία είναι σε θέση να μετρήσουν και να ανακατασκευάσουν τον τρισδιάστατο χώρο και τα αντικείμενα των διάφορων μορφών και μεγεθών με έναν γρήγορο και οικονομικό τρόπο.

Τα UAV, γνωστά και ως Συστήματα Μη Επανδρωμένων Αεροχημάτων (ΣμηΕΑ) ή αλλιώς drone, περιλαμβάνουν ένα σύστημα αεροσκάφους που ελέγχεται από έναν χειριστή στο έδαφος και είναι σε θέση να εκτελούν πτήσεις σε στενή επαφή με ένα αντικείμενο μελέτης, παρέχοντας την δυνατότητα λήψης αεροφωτογραφιών (βλ.σχημα 36), υψηλής χωρικής ανάλυσης, από πολλαπλές γωνίες (Remondino et al., 2011). Επιπλέον, η δυνατότητα κατασκευής τρισδιάστατων (3D) ομοιωμάτων εδάφους υψηλής ανάλυσης, χρήση λογισμικών ανοιχτού κώδικα, από εφαρμογές φωτογραμμετρίας SfM, είναι ένα πολύτιμο εργαλείο οπτικοποίησης και ταυτόχρονα ένα ιδανικό εργαλείο για τη χαρτογράφηση και παρακολούθηση των δυναμικών χαρακτηριστικών της γήινης επιφάνειας.

Κύρια πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι:

1. Είναι ταχύτερη και αξιόπιστη μέθοδος αποτύπωσης.
2. Συνδυάζει την ακρίβεια της τοπογραφικής αποτύπωσης και την βέλτιστη ερμηνεία στον γεωτεχνικό χαρακτηρισμό.
3. Παρέχουν μεταβλητή ανάλυση στο έδαφος ανάλογα με την απαιτούμενη ακρίβεια του τελικού προϊόντος.
4. Παρέχει συνολική αποτύπωση του 3D περιβάλλοντος.

Στην παρούσα διατριβή και στο πλαίσιο της πλήρους, και αποδοτικής για γεωτεχνικούς σκοπούς, αποτύπωσης πραγματοποιήθηκαν πολλαπλές πτήσεις για τη λήψη φωτογραφιών με διαφορετικά χαρακτηριστικά τοπικά ανά περιοχή, λαμβανομένων των γεωμετρικών χαρακτηριστικών, αλλά και πληροφοριών των μετέπειτα αναγκών ανάλυσης.



Σχήμα 35. Σχηματική αναπαράσταση λήψης αεροφωτογραφιών. Με διακεκομμένη γραμμή φαίνεται η πορεία του drone και με τις χρωματιστές γραμμές παρουσιάζονται οι λήψεις.

3.1 Ορισμός Φωτογραμμετρίας – Μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων

Με τον όρο Φωτογραμμετρία ορίζεται η τεχνική απόκτησης αξιόπιστων μετρητικών πληροφοριών του σχήματος, της διάστασης και της θέσης οποιουδήποτε αντικειμένου στο χώρο και στο περιβάλλον, μέσω διαδικασιών καταγραφής και μέτρησης δύο ή περισσότερων φωτογραφιών λαμβανομένων υπό διαφορετικές γωνίες (ISPRS, 2015).

Η φωτογραμμετρία ως γενική ιδέα είναι η διαδικασία απεικόνισης ενός 3D αντικειμένου μέσω φωτογραφιών. Κύριος σκοπός της είναι για κάθε αντικείμενο που προβάλλεται σε τουλάχιστον 2 διαφορετικές φωτογραφίες να υπολογίζονται οι συντεταγμένες του τρισδιάστατου αντικειμένου. Κάθε επιφανειακό σημείο (object point) παρουσιάζεται σε τουλάχιστον 2 φωτογραφίες. Αν είναι γνωστό ή γίνεται να ανακατασκευαστούν όλοι οι γεωμετρικοί παράμετροι κατά την φωτογράφιση, γίνεται εφικτός ο υπολογισμός των 3 διαστάσεων (x,y,z) ενός σημείου του αντικειμένου.

Βασική μέθοδος υπολογισμού στην φωτογραμμετρία αποτελεί η θεωρία ελαχίστων τετραγώνων, με την οποία καθορίζονται και εκτιμώνται οι συνιστώσες ενός αγνώστου διανύσματος \vec{x} εάν είναι γνωστές οι συνιστώσες των διανυσμάτων των παρατηρήσεων \vec{l} . Εφόσον οι παρατηρήσεις είναι περισσότερες από τους αγνώστους τότε:

$$\vec{l} = \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ \vdots \\ l_n \end{bmatrix} \quad \vec{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_m \end{bmatrix} \quad \text{με } n > m$$

Η αβεβαιότητα του διανύσματος των παρατηρήσεων \vec{l} εκφράζεται από τον πίνακα διακύμανσης:

$$\text{Var}\{\vec{l}\} = \Sigma = \Sigma_{ii} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_n^2 \end{bmatrix} \quad \text{όπου } \sigma \text{ είναι η τυπική απόκλιση.}$$

Η γενική μορφή των εξισώσεων παρατηρήσεων είναι η εξής:

$$\vec{l} + \vec{v} = F(\hat{x})$$

Όπου \vec{l} είναι το διάνυσμα των παρατηρήσεων

\vec{v} είναι το διάνυσμα του υπολοίπου (residuals): η διαφορά μεταξύ των τιμών πραγματικών παρατηρήσεων \vec{l} και των θεωρητικών παρατηρήσεων $\hat{l} = F(\hat{x})$.

\hat{x} είναι το διάνυσμα εκτιμήσεων που προέκυψαν με την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων.

Το διάνυσμα \vec{v} υποδεικνύει ουσιαστικά το πόσο καλή είναι η λύση: όσο πιο μικρές είναι οι τιμές του v τόσο καλύτερη είναι.

Η λύση της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων ορίζεται ως το ελάχιστο άθροισμα των τιμών v .

$$\sum_{i=0}^n v_i^2 = \min$$

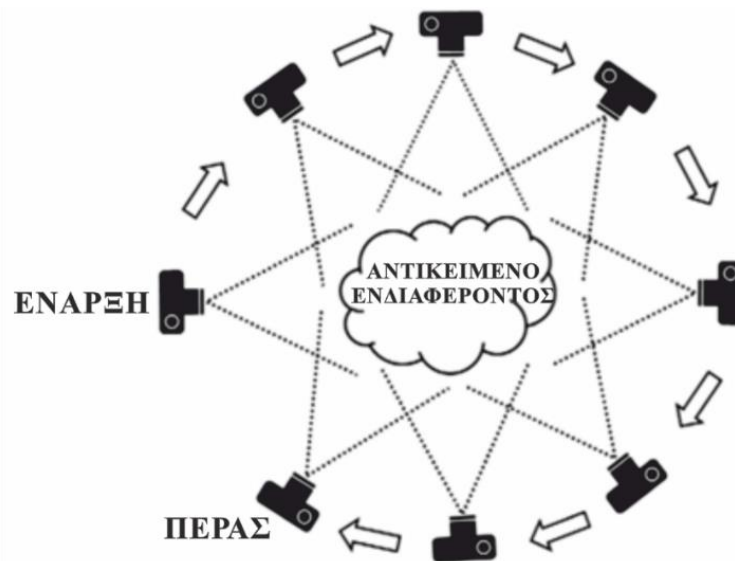
Το διάνυσμα της τιμής \vec{x} μπορεί να περιλαμβάνει:

- Τις συντεταγμένες και γωνίες προσανατολισμού της κάμερας
- Τις συντεταγμένες των tie points.
- Τις συντεταγμένες άλλων αγνωστων σημείων που εμφανίζονται σε τουλάχιστον δύο φωτογραφίες.

3.2 Φωτογραμμετρία SfM (Structure-from-Motion)

Στην παρούσα διατριβή, οι αποκτώμενες με προκαθορισμένο τρόπο φωτογραφίες της περιοχής αξιοποιήθηκαν, εφαρμόζοντας την τεχνολογία Δομή – από – Κίνηση, γνωστή στην διεθνή βιβλιογραφία και ως Structure – from – Motion (SfM), για την τρισδιάστατη ανακατασκευή (Westoby et al., 2012).

Η φωτογραμμετρία SfM χρησιμοποιεί προηγμένους αλγόριθμους υπολογιστικής όρασης (Computer Vision) για την υλοποίηση και τον επιταχυντικό ρυθμό της ψηφιακής φωτογραμμετρικής ροής εργασιών. Βασίζεται στην κίνηση του οπτικού αισθητήρα (στην εν λόγω περίπτωση της φωτογραφικής μηχανής) μεταξύ των λήψεων, για να εξαγάγει πληροφορίες τρισδιάστατης δομής από αλληλοκαλυπτόμενες φωτογραφίες (βλ.σχήμα 36).



Σχήμα 36. Σχηματική αναπαράσταση φωτογραμμετρίας SfM, λήψη φωτογραφιών με μεγάλη επικάλυψη από πολλαπλές θέσεις (Westoby et al., 2012)

Για την κατανόηση της φωτογραμμετρίας SfM είναι εύλογο να προσδιοριστούν κάποιοι βασικοί όροι:

- **Λωρίδα (strip):** όλες οι «αλληλοεπικαλυπτόμενες» (overlapped) φωτογραφίες που λήφθηκαν η μία μετά την άλλη εντός μίας γραμμής πτήσης.
- **Στερεογραφικό Μοντέλο (stereo model, image pair):** δύο γειτονικές φωτογραφίες εντός μίας λωρίδας.
- **Block:** όλες οι φωτογραφίες από όλες τις λωρίδες.
- **Σημεία σύνδεσης (Tie points):** ο όρος "tie points" αναφέρεται σε σημεία που εμφανίζονται σε δύο ή περισσότερες φωτογραφίες και χρησιμοποιούνται για τον συντονισμό των φωτογραφιών μεταξύ τους κατά τη διαδικασία της ανακατασκευής ενός αντικειμένου.

- **Κοινά σημεία (Keypoints):** Ο όρος "keypoints" σε περιβάλλοντα όπως η υπολογιστική όραση και η φωτογραμμετρία αναφέρεται σε σημεία ενδιαφέροντος ή ξεχωριστά χαρακτηριστικά σε μια εικόνα που μπορούν να αναγνωριστούν και να αντιστοιχηθούν σε άλλες εικόνες. Αυτά τα σημεία χρησιμοποιούνται για διάφορες εφαρμογές, όπως η αναγνώριση εικόνων, η στερεοσκοπική ανάλυση ή η ανακατασκευή 3D μοντέλων. Τα σημεία αυτά από τον αλγόριθμο είναι σημαντικά. Συνήθως παρουσιάζουν μεγάλες αντιθέσεις ή έχουν κάποια ιδιαιτερότητα.
- **Αεροτριγωνισμός ή φωτοτριγωνισμός:** είναι η διαδικασία προσαρμογής των κοινών σημείων σε ένα block φωτογραφιών, συμπεριλαμβάνοντας τα tie points από την περιοχή, με σκοπό να δημιουργηθεί το τριδιάστατο μοντέλο της περιοχής. Η ανάπτυξη του Τριγωνισμού αντιγράφων και οι αλγόριθμοι εξαγωγής εικόνων εδάφους έχουν ενισχύσει ριζικά την ποιότητα των δεδομένων εδάφους που μπορούν να προκύψουν από επικαλύψεις στερεοζευγών (Chandler, 1999; Lane et al, 2000).

Η μέθοδος SfM διαφέρει σημαντικά από μια συμβατική μέθοδο φωτογραμμετρίας επειδή η γεωμετρία της περιοχής, η τοποθεσία της κάμερας και ο προσανατολισμός προσδιορίζονται αυτόματα χωρίς να χρειαστούν σημεία αναφοράς με γνωστές συντεταγμένες (π.χ. GCPs). Αντί αυτού οι συνιστώσες αυτές προσδιορίζονται ταυτόχρονα χρησιμοποιώντας μία επαναληπτική διαδικασία προσαρμογής, η οποία βασίζεται σε πηγή δεδομένων που εξάγεται αυτόματα από ένα σετ «αλληλοκαλυπτόμενων» (overlapped) φωτογραφιών. (Snavely, 2008). Τα κοινά χαρακτηριστικά των φωτογραφιών αυτών εντοπίζονται από φωτογραφία σε φωτογραφία κάνοντας αρχικές εκτιμήσεις όσο αφορά την τοποθεσία της κάμερας και τις συντεταγμένες των σημείων, όπου με την σειρά τους προσδιορίζονται με μεγαλύτερη ακρίβεια με χρήση μη γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων.

Το βασικότερο πρόβλημα της SfM είναι ο προσδιορισμός των συντεταγμένων κοινών σημείων σε πολλαπλές φωτογραφίες που έχουν ληφθεί από διαφορετικές γωνίες. Αρχικά πρέπει να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά σε κάθε φωτογραφία που θα χρησιμοποιηθούν για την συσχέτιση μεταξύ άλλων φωτογραφιών. Αυτή η διαδικασία επιτυγχάνεται μέσω του αλγορίθμου Scale Invariant Feature Transform (SIFT) (Snavely 2008).

Ο αλγόριθμος Sift προσδιορίζει χαρακτηριστικά σε κάθε φωτογραφία τα οποία είναι ανεξάρτητα από την κλιμάκωση και την περιστροφή της κάθε φωτογραφίας. Τα keypoints εκτιμώνται σε κάθε φωτογραφία, και στην συνέχεια δημιουργείται μια περιγραφή των χαρακτηριστικών η οποία είναι σε μεγάλο βαθμό ανεξάρτητη του φωτισμού και του προσανατολισμού. Το πλήθος των keypoints σε μία εικόνα εξαρτάται κυρίως στην ποιότητα και την ανάλυση της φωτογραφίας. Οπότε για

ένα point cloud (νέφος σημείων) με μεγαλύτερη ανάλυση είναι συνετό να μειωθεί η απόσταση μεταξύ κάμερας και πρανούς.

Εφόσον έχουν προσδιοριστεί τα keypoints και η περιγραφή των σημείων, πρέπει να εκτιμηθούν οι θέσεις της κάμερας μέσω του συστήματος Bundler (Snavely et al., 2008) ώστε να δημιουργηθεί το sparse point cloud (αραιό νέφος σημείων). Τα keypoints πολλαπλών φωτογραφιών αντιστοιχίζονται χρησιμοποιώντας 2 αλγόριθμους, την Random Sample Consensus (1987) και την approximate nearest neighbor (Arya et al., 1998) και δημιουργούνται «πορείες» που ενώνουν συγκεκριμένα keypoints.

Η θέση και ο προσανατολισμός της κάμερας ανακατασκευάζονται χρησιμοποιώντας μετασχηματισμό ομοιότητας, παράλληλα η ελαχιστοποίηση του σφάλματος εξασφαλίζεται χρησιμοποιώντας μία μη γραμμική λύση ελαχίστων τετραγώνων (Szeliski and Kang, 1994; Nocedal and Wright, 1999). Γίνεται τριγωνισμός για την εκτίμηση των 3 συντεταγμένων των σημείων και σταδιακά ανακατασκευάζεται η γεωμετρία της περιοχής βασισμένη σε ένα σχετικό σύστημα συντεταγμένων.

Για να δημιουργηθεί ένα πιο πυκνό νέφος σημείων χρησιμοποιούνται οι αλγόριθμοι, Clustering View for Multi-view Stereo (CMVS) και Patch-based Multi-View Stereo (PMVS2). Οι ίδιες θέσεις της κάμερας που λήφθηκαν για την δημιουργία του sparse point cloud χρησιμοποιούνται και εδώ. Ο αλγόριθμος CMVS αποσυνθέτει τις «αλληλοκαλυπτόμενες» φωτογραφίες σε υποσύνολα, ενώ ο αλγόριθμος PMVS2 χρησιμοποιείται για να ανακατασκευάσει τα τριδιάστατα δεδομένα από τα υποσύνολα. (Furukawa and Ponce, 2007)

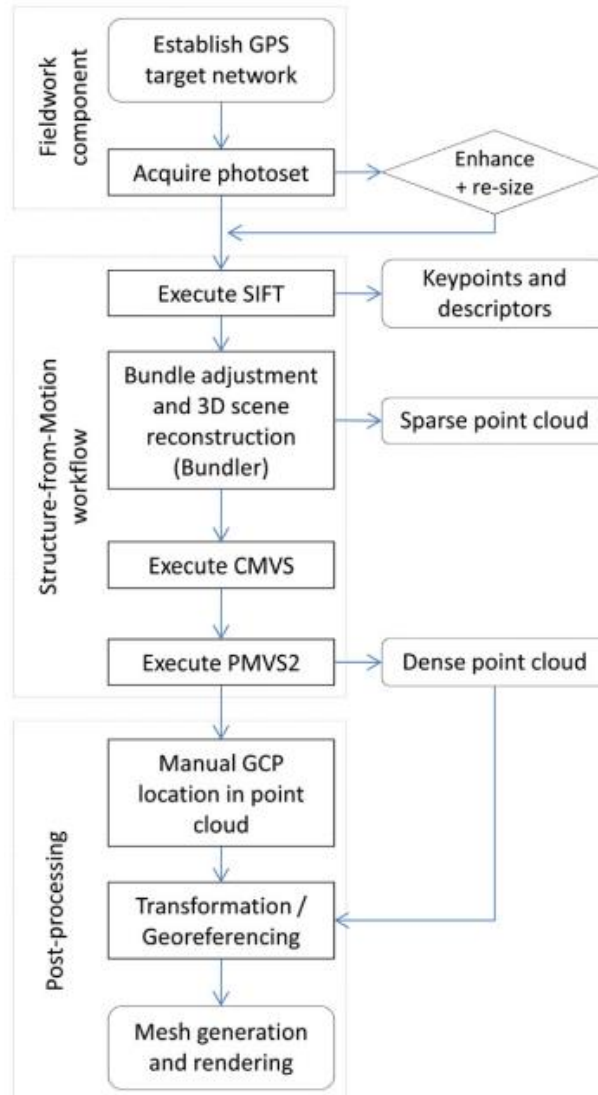
Τελικό αποτέλεσμα είναι η κατασκευή τριδιάστατων νεφών σημείων, ή αλλιώς point clouds, στα οποία είναι δυνατό να φαίνεται η τοποθεσία, η λεπτομερής επιφανειακή γεωμετρία και ο προσανατολισμός. Μέσω κατάλληλης επεξεργασίας των point clouds μπορούν να εξαχθούν ψηφιακά μοντέλα επιφανείας (DSM), ορθοφωτογραφίες (orthomosaics), τριδιάστατα ομοιώματα επιφανείας (mesh models) καθώς και η υφή (texture) της επιφανείας.

Συνοπτικά, η τριδιάστατη ανακατασκευή ενός αντικειμένου ή χώρου, μέσω της φωτογραμμετρίας SfM, περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

- **Αναγνώριση Χαρακτηριστικών:** Αρχικά, τα χαρακτηριστικά σημεία αναγνωρίζονται σε όλες τις φωτογραφίες, και αυτά συνήθως είναι σημεία με ιδιαίτερο ενδιαφέρον όπως γωνίες, χρωματικές μεταβάσεις ή άλλα συγκεκριμένα σχήματα.
- **Σύνδεση Χαρακτηριστικών:** Στη συνέχεια, αναγνωρίζονται τα ίδια χαρακτηριστικά σημεία σε πολλαπλές φωτογραφίες και τα συνδέει μεταξύ τους.

- **Υπολογισμός Κίνησης:** Ο αλγόριθμος υπολογίζει την κίνηση του οπτικού αισθητήρα μεταξύ των διαδοχικών λήψεων, χρησιμοποιώντας τις πληροφορίες από τα συνδεδεμένα χαρακτηριστικά σημεία.
- **Δημιουργία Τρισδιάστατου Μοντέλου:** Με βάση τις πληροφορίες κίνησης και τη θέση των χαρακτηριστικών σημείων, το SfM υπολογίζει τη θέση κάθε σημείου στον τρισδιάστατο χώρο και δημιουργεί ένα τρισδιάστατο μοντέλο της σκηνής.

Στο σχήμα 37 παρουσιάζεται μια τυπική ροή εργασιών της μεθόδου SfM.



Σχήμα 37. Ροή εργασιών της μεθόδου Structure – from – Motion. (Geomorphology, 2012)

3.3 Εναέρια τρισδιάστατη φωτογραμμετρική αποτύπωση

Κατά την επίσκεψη στην θέση έρευνας στο πλαίσιο της επιτόπου αυτοψίας, εκτελέστηκε παράλληλα και φωτογραμμετρική αποτύπωση της περιοχής.

Η εναέρια φωτογραμμετρική αποτύπωση επιτελέστηκε στις 14 Νοεμβρίου του 2022. Για την υλοποίηση της, χρησιμοποιήθηκε το ΣμηΕΑ Phantom 4 RTK της εταιρείας DJI (Εικόνα 87). Το συγκεκριμένο ΣμηΕΑ φέρει οπτικό αισθητήρα ανάλυσης 20 Megapixel, με οπτικό πεδίο 84° επί ρομποτικής βάσης με δυνατότητα περιστροφής σε τρεις άξονες (yaw, pitch, raw). Λόγω της μεγάλης ανάλυσης, το Phantom 4 RTK μπορεί να επιτύχει χωρική ανάλυση στο έδαφος (GSD) της τάξης των 2,74 cm από τα 100 m υψόμετρο πτήσης. Επιπλέον, με την τεχνολογία RTK (Real-Time Kinematic) και τη δυνατότητα άμεσης ασύρματης επικοινωνίας με τον σταθμό D-RTK 2 GNSS Mobile Station, προσφέρει σε πραγματικό χρόνο χωρικά ακριβή συλλογή δεδομένων με επίπεδο σφάλματος στο 1,00 cm.



Σχήμα 38. Εξοπλισμός εναέριας φωτογραμμετρικής αποτύπωσης. Αριστερά το ΣμηΕΑ Phantom 4 RTK και δεξιά ο σταθμός D-RTK 2 GNSS.

Πιο αναλυτικά, για τη λήψη οπτικών δεδομένων υψηλής ανάλυσης πραγματοποιήθηκαν χειροκίνητες πτήσεις (μετωπικές και υπό γωνία) οι οποίες σχεδιάστηκαν με επικάλυψη μεταξύ των φωτογραφιών σε ποσοστό της τάξης του 85% τόσο κατά πλάτος, όσο και κατά μήκος. Παράλληλα, εκτός από χειροκίνητες πτήσεις πραγματοποιήθηκαν και λήψεις βίντεο στα ανώτερα υψομετρικά τμήματα του πρανού, προκειμένου να αποτυπωθεί με την μέγιστη δυνατή ακρίβεια ελαχιστοποιώντας την πιθανότητα εμφάνισης σφαλμάτων κατά την μετέπειτα επεξεργασία του τρισδιάστατου ομοιώματος.

Η περιοχή της κατολίθησης αποτυπώθηκε φωτογραμμετρικά, με ένα σύνολο 342 αλληλοεπικαλυπτόμενων φωτογραφιών υψηλής ανάλυσης, με διάταξη

πτήσης υπό γωνία, με τελική διακριτική ικανότητα 1,70 cm/pix, με ένα αποδεκτό σφάλμα ανακατασκευής (χωρίς την χρήση φωτοσταθερών σημείων αναφοράς GCPs) της τάξης του 1,20 cm. Η βαθμονόμηση των φωτογραφιών επιτεύχθηκε με την χρήση του σταθμού D-RTK 2 GNSS Mobile Station ο οποίος παρείχε στο ΣμηΕΑ ακριβείς συντεταγμένες τοποθεσίας και διορθώσεις της θέσης του σε πραγματικό χρόνο. Οι αποκτηθείσες με προκαθορισμένο τρόπο φωτογραφίες αξιοποιήθηκαν με χρήση της τεχνολογίας Structure from Motion (SfM) για την τρισδιάστατη ανακατασκευή. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε στο εξειδικευμένο φωτογραμμετρικό λογισμικό Agisoft Metashape Professional και περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

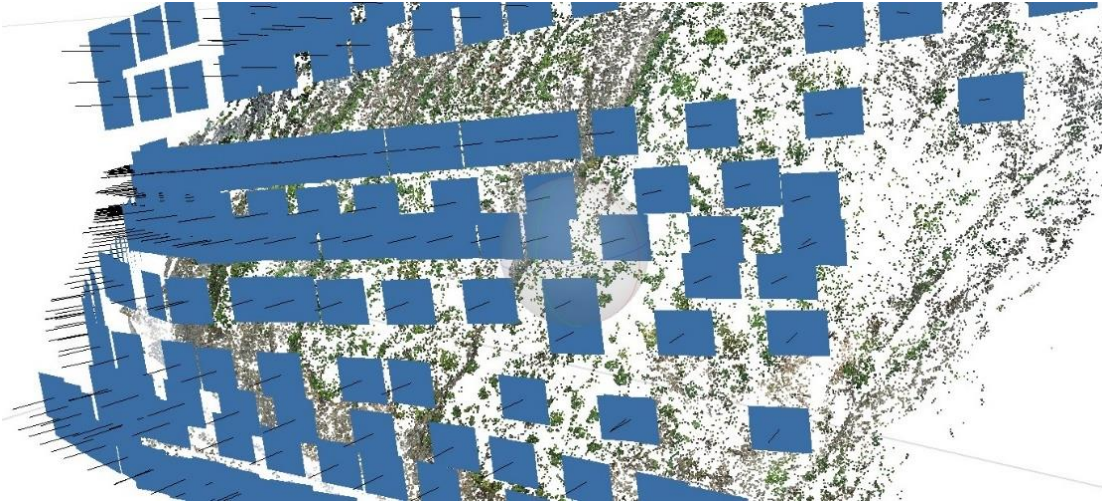
1. Εντοπισμός κοινών σημείων στις φωτογραφίες (key points) (βλ. Σχήμα 39).
2. Υπολογισμός αραιού νέφους σημείων (sparse cloud) με βάση την τρισδιάστατη θέση των κοινών σημείων (βλ. Σχήμα 40).
3. Υπολογισμός πυκνού νέφους σημείων (dense cloud), συνήθως δύο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο από το αραιό, με βάση επιμέρους ομάδες αλληλεπικαλυπτομένων φωτογραφιών (βλ. Σχήμα 41).
4. Κατασκευή τρισδιάστατου ομοιώματος επιφανείας (mesh model) (βλ. Σχήμα 45).

Το σύνολο της περιοχής ανακατασκευάστηκε μέσω ενός νέφους σημείων, συνολικής έκτασης 0.055 km², αποτελούμενο από ~110 εκατομμύρια τοπογραφικά σημεία με ΧΥ συντεταγμένες στο Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς του 1987 (ΕΓΣΑ87) και Ζ απόλυτο υψόμετρο.

Λεπτομερή στοιχεία του τελικού ενιαίου επιγείου τρισδιάστατου ομοιώματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 13.



Σχήμα 39. Εντοπισμός κοινών σημείων σε ζεύγος αλληλοεπικαλυπτόμενων φωτογραφιών (Η διαδικασία πραγματοποιείται αυτόματα από το λογισμικό)



Σχήμα 40. Αραιό νέφος σημείων (*Sparse point*) cloud και το σχέδιο πτήσης, εναέριας φωτογραμμετρίας υπό γωνία, που σχεδιάστηκε στην περιοχή της έρευνας, πάνω στο οποίο αποτυπώνονται οι θέσεις των 342 φωτογραφιών που ελήφθησαν



Σχήμα 41. Πυκνό νέφος σημείων (*Dense Point Cloud*) της θέσης έρευνας

Πίνακας 13. Στοιχεία σάρωσης υπό γωνία – Βαλαώρα (14 Νοεμβρίου 2022).

Όνομα Σάρωσης	Βαλαώρα Νοέμβριος 2022
Ημερομηνία λήψης	14-11-2022
Έκταση αποτύπωσης	0,055 km ²
Αριθμός φωτογραφιών	342
Reprojection error	1,20 cm
Συνολικός αριθμός σημείων 3D νέφους	109.011.934 [points]
Διακριτική ικανότητα	1,70 cm
Σύστημα συντεταγμένων	ΕΓΣΑ 87

3.4 Παρακολούθηση με εναέρια φωτογραμμετρία

Για την διαχρονική παρακολούθηση κατολισθητικών φαινομένων απαιτείται τακτική λεπτομερής τοπογραφική αποτύπωση και δεδομένα εδάφους υψηλής ακρίβειας. Τα point clouds, που προκύπτουν από φωτογραμμετρικές μεθόδους, μπορούν να περιγράψουν λεπτομερώς την μορφολογία μιας περιοχής. Τα κατολισθητικά φαινόμενα διαφέρουν σημαντικά από τα υπόλοιπα γεωγραφικά χαρακτηριστικά, τόσο στο χρόνο όσο και στο χώρο. Διαθέτοντας μια σειρά διαχρονικών δεδομένων, μετακινήσεων, μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα για την κίνηση και την ταχύτητα των κατολισθητικών ζωνών, τα οποία είναι καθοριστικά για τον κίνδυνο κατολίωσης. Η σύγκριση αυτών των δεδομένων είναι μια διαδεδομένη τεχνική που βοηθά στην ανίχνευση αλλαγών στην γεωμορφολογία.

Η ανάλυση των δεδομένων που συλλέγονται από τα UAV είναι ένας σημαντικός τρόπος για την εξαγωγή πρωτογενών προϊόντων και την αξιολόγηση των αλλαγών στην επιφάνεια της υπό έρευνας περιοχής. Ωστόσο, για να διασφαλιστεί η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, είναι αναγκαίο να πραγματοποιηθεί έλεγχος και αξιολόγηση των εξαγόμενων δεδομένων.

Επί της διαδικασίας, για την εκτέλεση τριοδιάστατων αναλύσεων ανίχνευσης μεταβολών (Change Detection) μια τυπική ροή εργασιών περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα:

1. **Επιλογή μοντέλου αναφοράς (reference scan):** Το αρχικό νέφος σημείων λειτουργεί ως πρότυπο, βάση του οποίου θα συγκριθούν τα επόμενα νέφη σημείων.
2. **Γεωταύτιση (geotagging):** Αποτελεί μια διαδικασία που αφορά την απομείωση της γεωγραφικής απόστασης που υπάρχει μεταξύ των δύο εξεταζόμενων point clouds και καθιστά τη σύγκριση των δύο νεφών δυνατή.
3. **Διαχρονική ανάλυση:** Η σύγκριση των νεφών σημείων που έχουν ληφθεί σε διάφορες χρονικές περιόδους για την εξέταση της εξέλιξης των μετακινήσεων.
4. **Ανάλυση κινηματικών χαρακτηριστικών:** Καταγραφή, ανάλυση και επιμέτρηση των μετακινήσεων.
5. **Αξιολόγηση και υπέρθεση αποτελεσμάτων:** Συγκρίνονται οι αλλαγές που παρατηρούνται από τη μία σάρωση στην επόμενη.
6. **Σύνδεση με άλλου παράγοντες:** Εξέταση των παραγόντων που μπορεί να επηρεάσουν τις μετακινήσεις, όπως λιθολογία, ανάγλυφο κλπ.

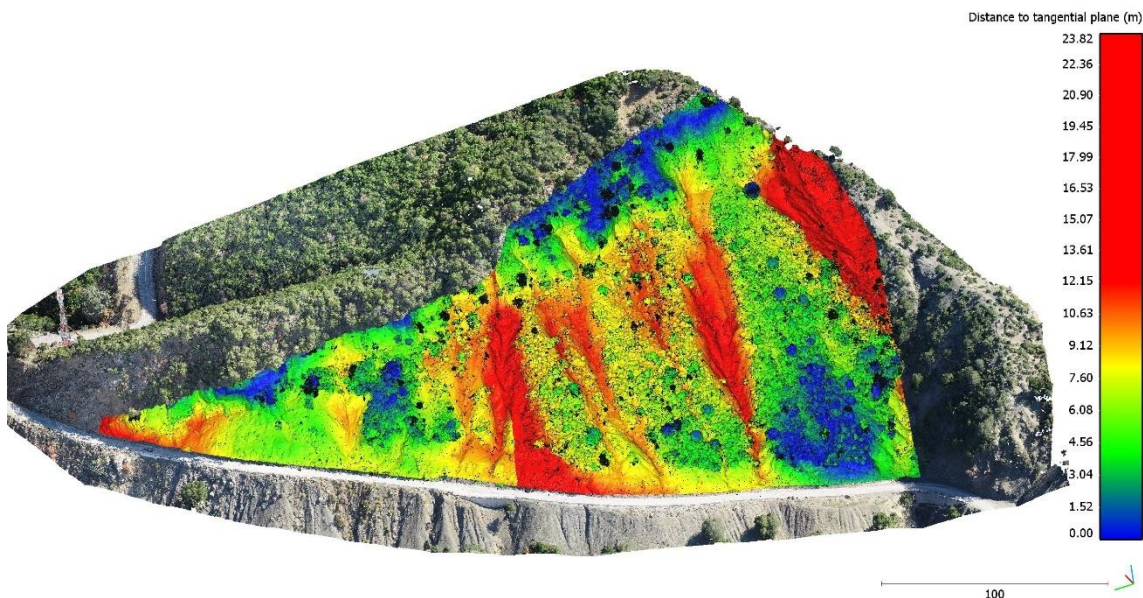
Στην παρούσα διπλωματική, για την ενίσχυση των συμπερασμάτων και τον καθορισμό του βραχοκαταπτωτικού δυναμικού της περιοχής έρευνας, πραγματοποιήθηκαν εξειδικευμένες αναλύσεις εντοπισμού θέσης και γεωμετρίας μετακινήσεων, χρησιμοποιώντας την τεχνολογία φωτογραμμετρίας

SfM, με γεωχωρική ανάλυση της επιφάνειας. Σε επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα από την ανάλυση ανίχνευσης μεταβολών (Change detection) σε τριοδιάστατο επίπεδο στην περιοχή, για τη χρονική περίοδο από τον Οκτώβριο του 2021 έως τον Νοέμβριο του 2023. Η εν λόγω ανάλυση επιτεύχθηκε μέσω της εφαρμογής του αλγορίθμου Multiscale Model to Model Cloud Comparison, (M3C2) που δημιουργήθηκε από τους Lague et al. (2013) και διατίθεται ελεύθερα ως πρόσθετο εργαλείο στο λογισμικό ανοικτού κώδικα CloudCompare.

3.5 Κατασκευή ψηφιακών όψεων βάθους

Για τον εντοπισμό περιοχών αυξημένης επικινδυνότητας αξιοποιήθηκαν τα αποτελέσματα της τριοδιάστατης αποτύπωσης του πρανούς με μεθόδους εναέριας φωτογραμμετρίας σε συνδυασμό με τις επί τόπου παρατηρήσεις στο πλαίσιο των επισκέψεων.

Στην κατωτέρω εικόνα παρατίθεται η τριοδιάστατη αποτύπωση του πρανούς με μεθόδους εναέριας φωτογραμμετρίας.



Σχήμα 42. Τριοδιάστατη ψηφιακή αποτύπωση του πρανούς στην θέση έρευνας

Πρόκειται για μία ψηφιακή αποτύπωση του πρανούς με βάση την απόσταση της επιφάνειας του πρανούς από ένα ιδεατό επίπεδο αναφοράς. Η κλίμακα (από το μπλε χρώμα στο κόκκινο χρώμα) υποδηλώνει την απόσταση της επιφάνειας του πρανούς από το πρανές αναφοράς. Οι αποστάσεις αυτές αποτυπώνονται συγκριτικά με τέτοιο τρόπο ώστε να φαίνονται σαφώς οι περιοχές των εξάρσεων του πρανούς - επικρεμάμενα τεμάχια (μπλε χρώμα) και των υβωμάτων του πρανούς – υποσκαφές (κόκκινο χρώμα).

Αυτές οι ψηφιακές αποτυπώσεις αξιοποιήθηκαν στο πλαίσιο της τεχνικογεωλογικής χαρτογράφησης της περιοχής και στην αναγνώριση παλαιότερων αστοχιών επί του πρανούς.

3.6 Ογκομετρήσεις τεμαχών βράχου από επεξεργασία τρισδιάστατων δεδομένων

Η ογκομέτρηση τεμαχών από βραχοκαταπτώσεις αποτελεί σημαντικό μέρος της αξιολόγησης της επικινδυνότητας μιας περιοχής και είναι απαραίτητη για τον σχεδιασμό αποτελεσματικών μέτρων αποκατάστασης, συγκράτησης και την λήψη κατάλληλων μέτρων ασφαλείας.

Σε τρισδιάστατα νέφη σημείων (point clouds) είναι εύκολο να εντοπιστούν περιοχές βραχοκαταπτώσεων και να επιμετρηθούν με πολύ μεγάλη ακρίβεια όγκοι από επιφανή τεμάχια.

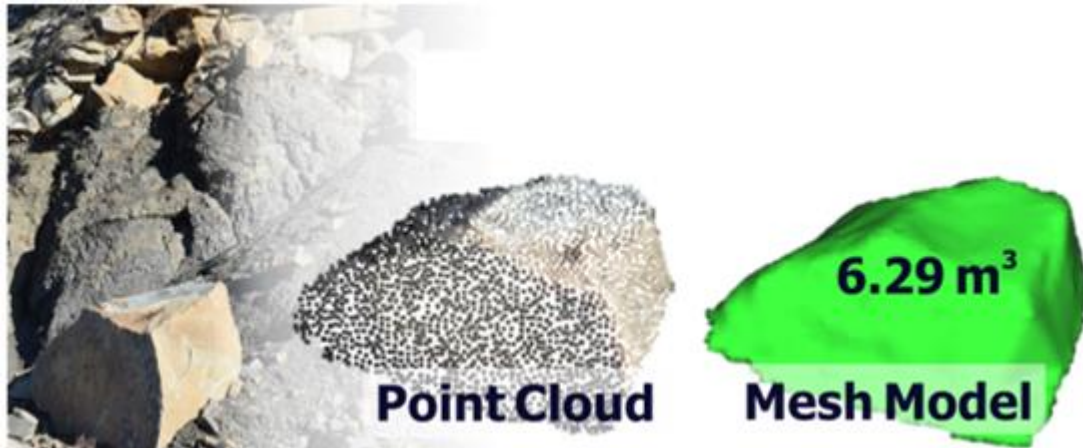
Μελετώντας τα μοτίβα και τους όγκους των βραχοκαταπτώσεων είναι εφικτός ο προσδιορισμός της σχέσης συχνότητας - μεγέθους τέτοιων γεγονότων, η κατανόηση του κινδύνου που εγκυμονούν και κατ' επέκταση ο ορισμός του δυναμικού της περιοχής, βάση του οποίου γίνεται η λήψη αποφάσεων και η εφαρμογή αποτελεσματικών στρατηγικών μετριασμού του κινδύνου.

Στην παρούσα διατριβή, επί των τρισδιάστατων νεφών σημείων εντοπίστηκαν και ογκομετρήθηκαν:

1. Τεμάχια πεσμένα στην παρειά του πρανούς, στα ερείσματα και επί του οδοστρώματος της οδού.
2. Επικρεμάμενα τεμάχια και αυλακώσεις από καταπτώσεις, επί του πρανούς.
3. Τεμάχια που προέκυψαν από αναλύσεις ανίχνευσης μεταβολών (change detection) από την σύγκριση νεφών σημείων διαφορετικών χρονικών περιόδων (2021-10 με 2023-11).

Στη συνέχεια ακολούθησε στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων, έχοντας ως βασικό στόχο την εύρεση του βραχοκαταπτωτικού δυναμικού της περιοχής, για την βέλτιστη προσομοίωση του φαινομένου, και κατ' επέκταση τη διαστασιολόγηση και τον σχεδιασμό των μέτρων αποκατάστασης.

Επισημαίνεται πως για τον υπολογισμό του όγκου κάθε τρισδιάστατου αντικειμένου βραχοκατάπτωσης που εξήχθη, ήταν αναγκαία η ανακατασκευή της επιφανείας του αντικειμένου (mesh model), η οποία επιτεύχθηκε με χρήση του αλγορίθμου Poisson Surface Reconstruction που αναπτύχθηκε από τους Kazhdan και Bolitho et al. (2006) και διατίθεται ελεύθερα ως πρόσθετο εργαλείο στο λογισμικό ανοικτού κώδικα CloudCompare.



Σχήμα 43. Τεμάχος όγκου 6.29 m^3 πεσμένο στην παρειά του πρανούς. Αριστερά: Νέφος σημείων τριδιάστατου τεμάχους. Δεξιά: τριδιάστατο μοντέλο επιφανείας τεμάχους

3.7 Τριδιάστατα ομοιώματα επιφανείας (mesh models) ως είσοδοι σε αριθμητικές προσομοιώσεις βραχοκαταπτώσεων

Η ανάλυση τριδιάστατων συνόλων άνοιξε νέους ορίζοντες στην παρακολούθηση και την αξιολόγηση των κινδύνων από φαινόμενα βραχοκαταπτώσεων. Καθώς τα πυκνά νέφη σημείων που παράγονται με τις συγκεκριμένες τεχνικές χαρακτηρίζονται από υψηλής ακρίβειας και χωρικής ανάλυσης γεωμετρική πληροφορία, ακόμη και περιοχών όπου δεν υπάρχει πρόσβαση για συμβατικές μετρήσεις, αξιοποιούνται με στόχο την πληρέστερη απόκτηση γεωμετρικών μετρήσεων στις επιμέρους θέσεις. Η εφαρμογή της συγκεκριμένης τεχνολογίας επιφέρει το όφελος της σημαντικής μείωσης του απαιτούμενου χρόνου παραμονής του ερευνητή στο πεδίο υπό το καθεστώς έκθεσης στον υφιστάμενο κίνδυνο.

Παράλληλα, τα τριδιάστατα ομοιώματα επιφανείας (mesh models), ως παράγωγα της φωτογραμμετρίας SfM, όταν χρησιμοποιούνται ως είσοδοι σε αριθμητικές προσομοιώσεις, προσφέρουν σημαντικές δυνατότητες, όπως:

Λεπτομερής Απεικόνιση: Τα mesh models επιτρέπουν την υψηλής ανάλυσης απεικόνιση των βραχώδων δομών, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα για την λεπτομερή ανάλυση των χαρακτηριστικών τους (π.χ μικροτεκτονική ανάλυση ασυνεχειών, ογκομετρήσεις τεμαχών).

Πρόβλεψη βραχοκαταπτωτικών γεγονότων: Τα mesh models, όταν χρησιμοποιούνται σε αριθμητικές προσομοιώσεις, μπορούν να βοηθήσουν στην πρόβλεψη των πιθανών τροχιών βραχοκαταπτώσεων, ή/και στην ανάλυση των

συντελεστών αναπήδησης της βραχώμαζας υπό συγκεκριμένες συνθήκες (ανάδρομη ανάλυση).

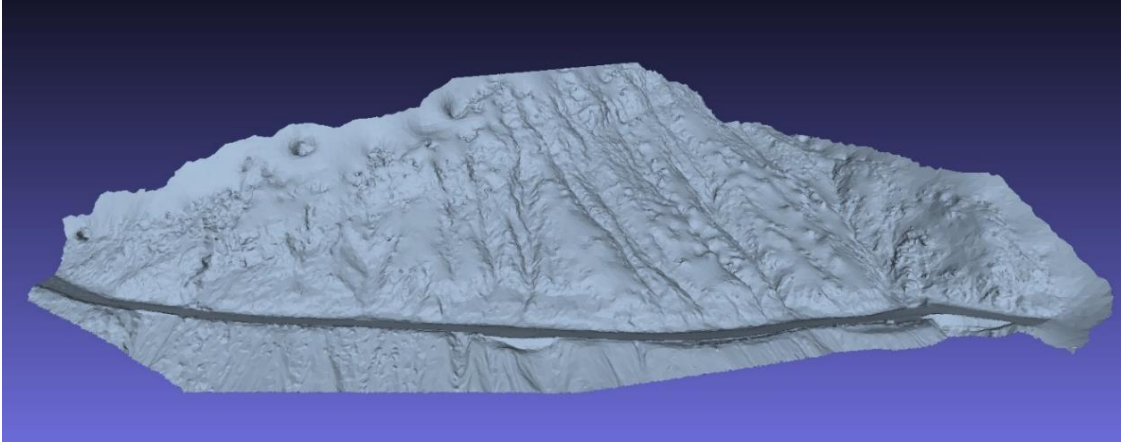
Επικοινωνία και Κατανόηση: Η οπτική αναπαράσταση των βραχοκαταπτώσεων μέσω των mesh models καθιστά πιο εύκολη την επικοινωνία των αποτελεσμάτων σε ειδικούς, αλλά και στο ευρύτερο κοινό.

Στην παρούσα διατριβή, πριν από την κατασκευή του ομοιώματος επιφάνειας (mesh model), για την εφαρμογή τροχιακής ανάλυσης σε τρισδιάστατο περιβάλλον, ήταν αναγκαία η προ επεξεργασία του point cloud και η απομάκρυνση της πυκνής βλάστησης, καθώς δημιουργούσε τραχείες επιφάνειες, οι οποίες ενδέχεται να επηρεάσουν τα αποτελέσματα και την αξιοπιστία της ανάλυσης (βλ. Σχήμα 44).



Σχήμα 44. Ταξινόμηση νέφους σημείων. Κατηγοριοποίηση βλάστησης – βραχώμαζας στην θέση έρευνας

Η ανακατασκευή του τρισδιάστατου ομοιώματος επιφάνειας (mesh model) προέκυψε από το αρχικό πυκνό νέφος σημείων και επιτεύχθηκε χρήση του λογισμικού Agisoft Metashape Professional. Το τελικό τρισδιάστατο ομοίωμα επιφάνειας που προκρίθηκε για την τροχιακή ανάλυση, αποτελείται από ένα σύνολο 75.000 επιφανειών μια τιμή αρκετά απομειωμένη σε σχέση με την μέγιστη δυνατότητα ανάλυσης, που όμως ήταν αναγκαία εξαιτίας του περιορισμού της υπολογιστικής ισχύος του προγράμματος ανάλυσης (βλ. Σχήμα 45).



Σχήμα 45. Το τελικό τρισδιάστατο ομοίωμα επιφάνειας που προκρίθηκε για την τροχιακή ανάλυση των φαινομένων βραχοκατάπτωσης

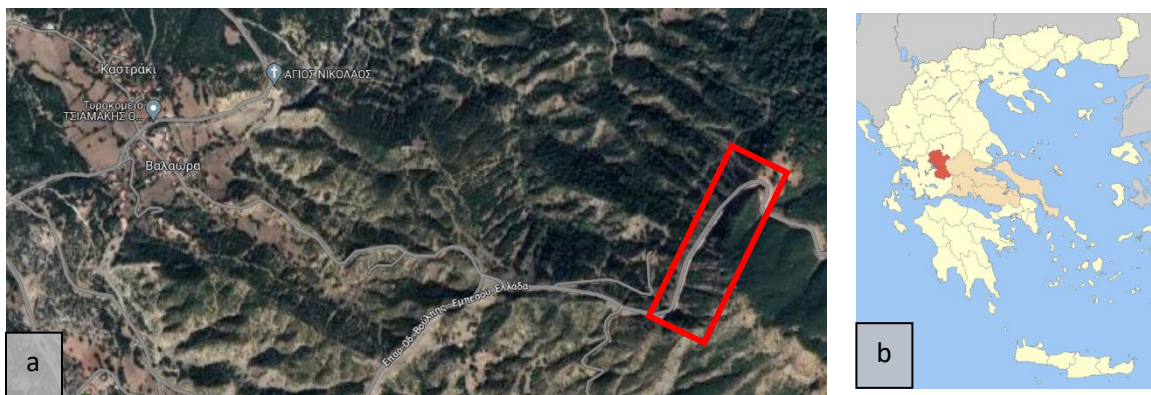
4. Γεωλογικές Συνθήκες της θέσης έρευνας

Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι:

- Η κατανόηση των γεωλογικών συνθηκών που κυριαρχούν στην περιοχή της έρευνας.
- Ο προσδιορισμός των μηχανισμών αστοχίας των κατολισθητικών φαινομένων που έχουν εκδηλωθεί.

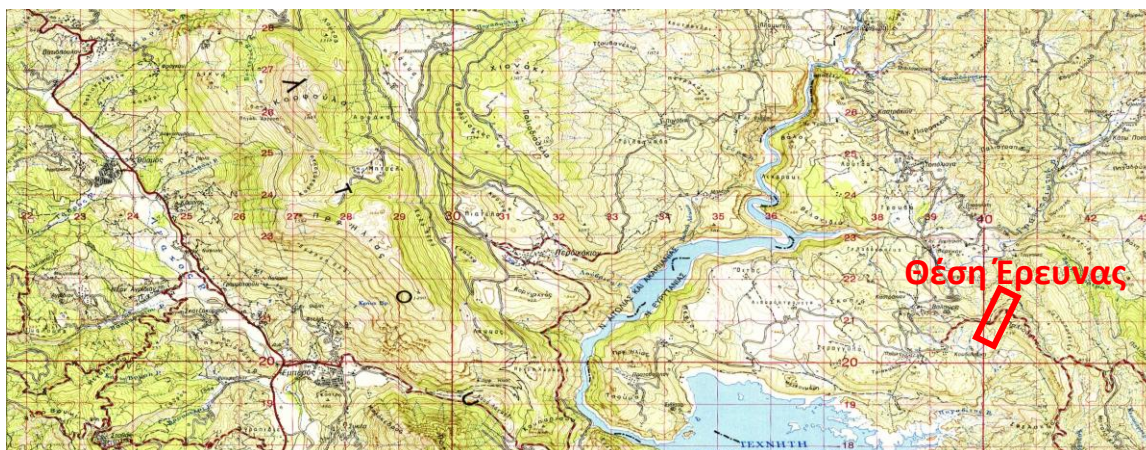
4.1 Τοποθεσία και τοπογραφία της περιοχής

Η τοποθεσία της θέσης έρευνας βρίσκεται στην περιοχή της Ευρυτανίας κοντά στα Βαλαώρα (1.9km από τον ομώνυμο οικισμό Βαλαώρα). Στην περιοχή αυτή έχουν καταγραφεί φαινόμενα βραχοκαταπτώσεων επί επαρχιακής οδού μήκους 500m, η οποία συνδέει τα Βαλαώρα με το Καρπενήσι.



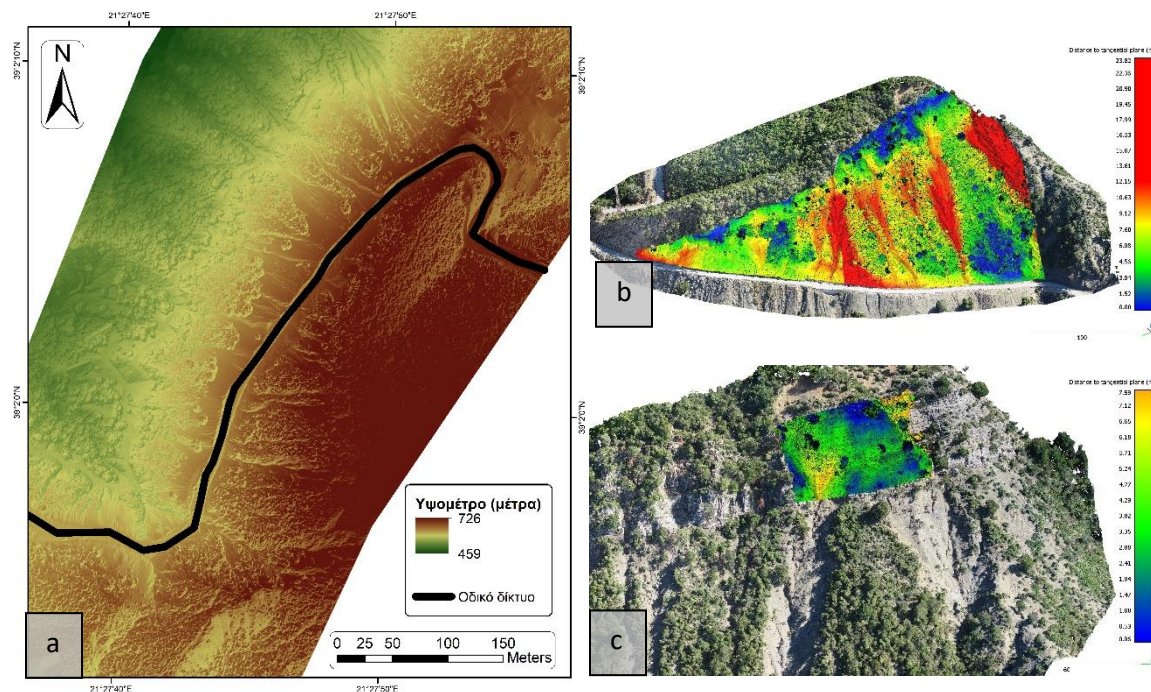
Σχήμα 46. (a) Αεροφωτογραφία (Google maps) της θέσης έρευνας, (b) Νομός Ευρυτανίας.

Αναλυτικότερα η περιοχή της έρευνας ανήκει στην οροσειρά της νότιας Πίνδου. Η ευρύτερη περιοχή συνολικά χαρακτηρίζεται ως αρκετά ορεινή με έντονο ορεινό ανάγλυφο με μεγάλες υψομετρικές διαφορές, έντονες μορφολογικές κλίσεις και υψόμετρα από 300 έως 1400m. Η τοπογραφία της περιοχής αποτελείται κυρίως από απότομα πρηνή και κοιλάδες. Τα πρηνή διακόπτονται συχνά από μιογάγγειες. Βόρεια της θέσης έρευνας συναντάται παραπόταμος του Αχελώου, ο οποίος απορρέει στην τεχνητή λίμνη Κρεμαστών (βλ. σχήμα 47).



Σχήμα 47. Μορφολογία περιοχής έρευνας. Τμήμα τοπογραφικού χάρτη Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού (ΓΥΣ) της ευρύτερης περιοχής, κλίμακας 1:50000.

Όσον αφορά την θέση της έρευνας ανάντη της διερχόμενης οδού υφίστανται πρανές μήκους 500m και μέγιστου ύψους 110m, ενώ κατόντη του δρόμου υπάρχει πλαγιά η οποία καταλήγει σε παραπόταμο του Αχελώου. Το ανάντη πρανές ειδικά στην Β – Α περιοχή είναι αρκετά απότομο με κλίσεις έως και 82°, ενώ νοτιότερα παρατηρούνται αρκετές μιογαγγείες.



Σχήμα 48. (a) Αναλυτική τοπογραφία της θέσης έρευνας, (b) & (c) ψηφιακές όψεις βάθους



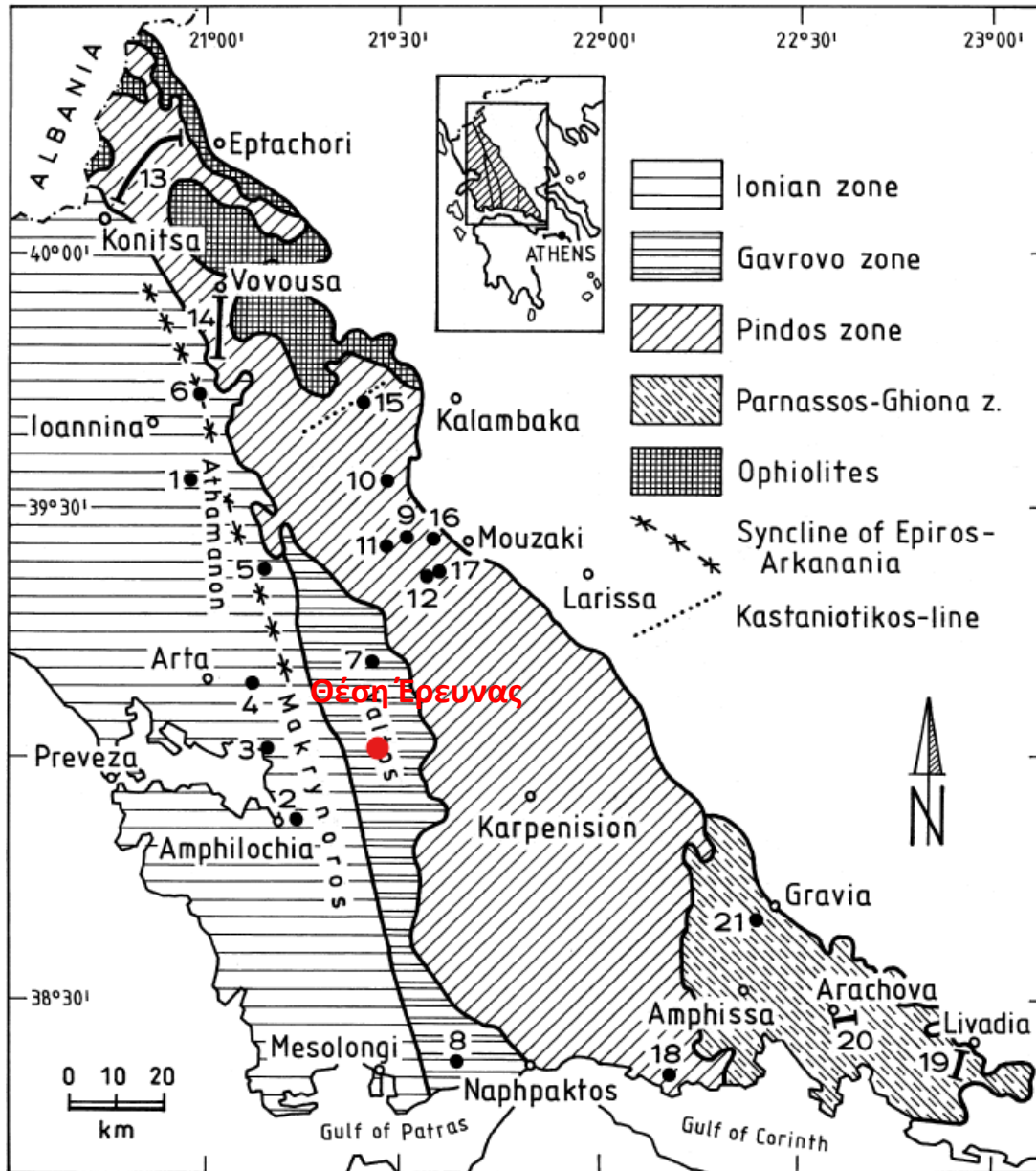
Σχήμα 49. Όψη της θέσης έρευνας από αεροφωτογραφία (UAV).

4.2 Γεωτεκτονική εξέλιξη περιοχής

Στην περιοχή συναντάται Φλύσχη της ζώνης Γαβρόβου (Σχήμα 50) όπου αποτελείται από ιζηματογενή πετρώματα με εναλλαγές μεταξύ ψαμμιτών, πηλιτών, ιλυόλιθων.

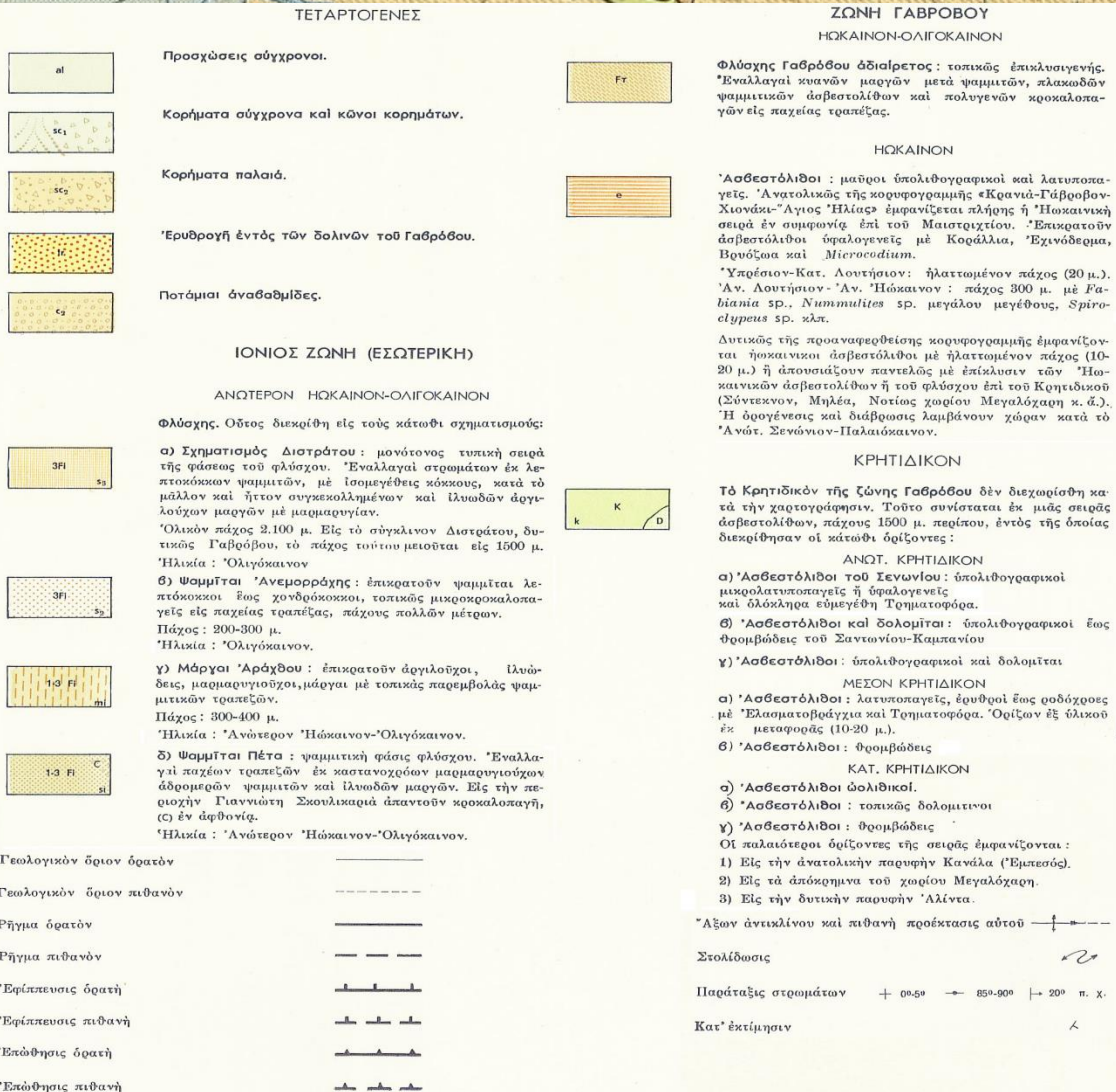
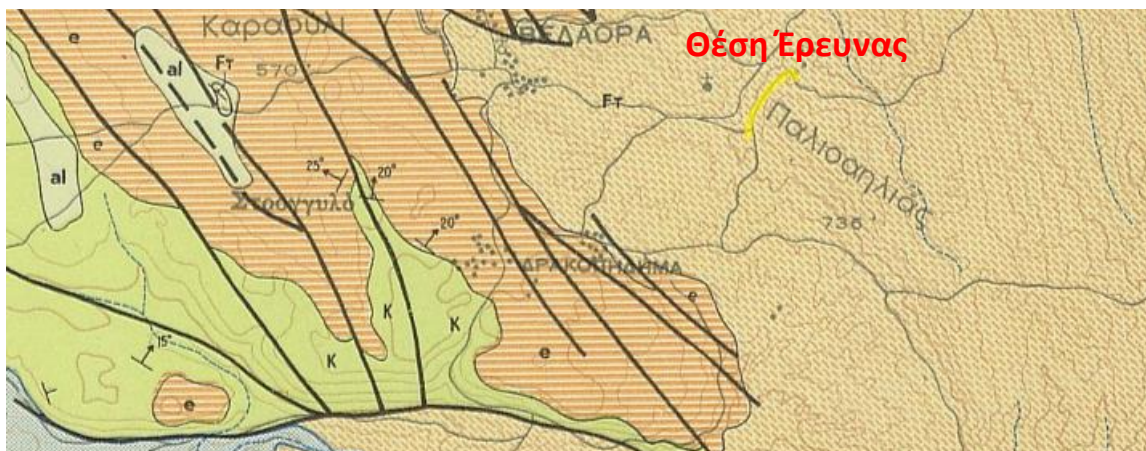
Η ζώνη Γαβρόβου συναντάται δυτικά της ζώνης Πίνδου και προεκτείνεται με διεύθυνση Βόρεια Βορειοδυτική με Νότια Νοτιοδυτική από την Ήπειρο προς την Πελοπόννησο. Στις γεωγραφικές περιφέρειες της Στερεάς Ελλάδας και της Ηπείρου η ζώνη κατέχει λωρίδα μήκους 250km και πλάτους 10km κατά μέσο όρο, με μέγιστο πλάτος τα 20km. (Μ. Μαντουράκης, 2010)

Κατά τους αλπικούς χρόνους, από το Τριαδικό έως το Ολιγόκαινο συναντάται συνεχή νηριτική ιζηματογέννηση που απέθεσε μια σειρά ανθρακικών πετρωμάτων συνολικού πάχους 1800m, χωρίς παρεμβολές αργιλικών ή πυριτικών ενστρώσεων. Η ιζηματογέννηση άρχισε το Άνω Τριαδικό με δολομίτες και συνεχίστηκε ασταμάτητα έως το Άνω Ηώκαινο αποκλειστικά με ασβεστόλιθους. Κατά το μέσο Ηώκαινο υπάρχει διακοπή της ιζηματογέννησης λόγω μερικών βωξιτικών εμφανίσεων. Από το άνω Ηώκαινο ξεκίνησε η απόθεση του φλύσχη, όπου και έληξε στο τέλος του Ολιγόκαινου με την πτύχωση και την οριστική ανάδυση της ζώνης. Ο φλύσχη της ζώνης Γαβρόβου είναι μαργαϊκός – ψαμμιτικός αλλά με πολλές ενστρώσεις κροκαλοπαγών. (Μ. Μαντουράκης, 2010)

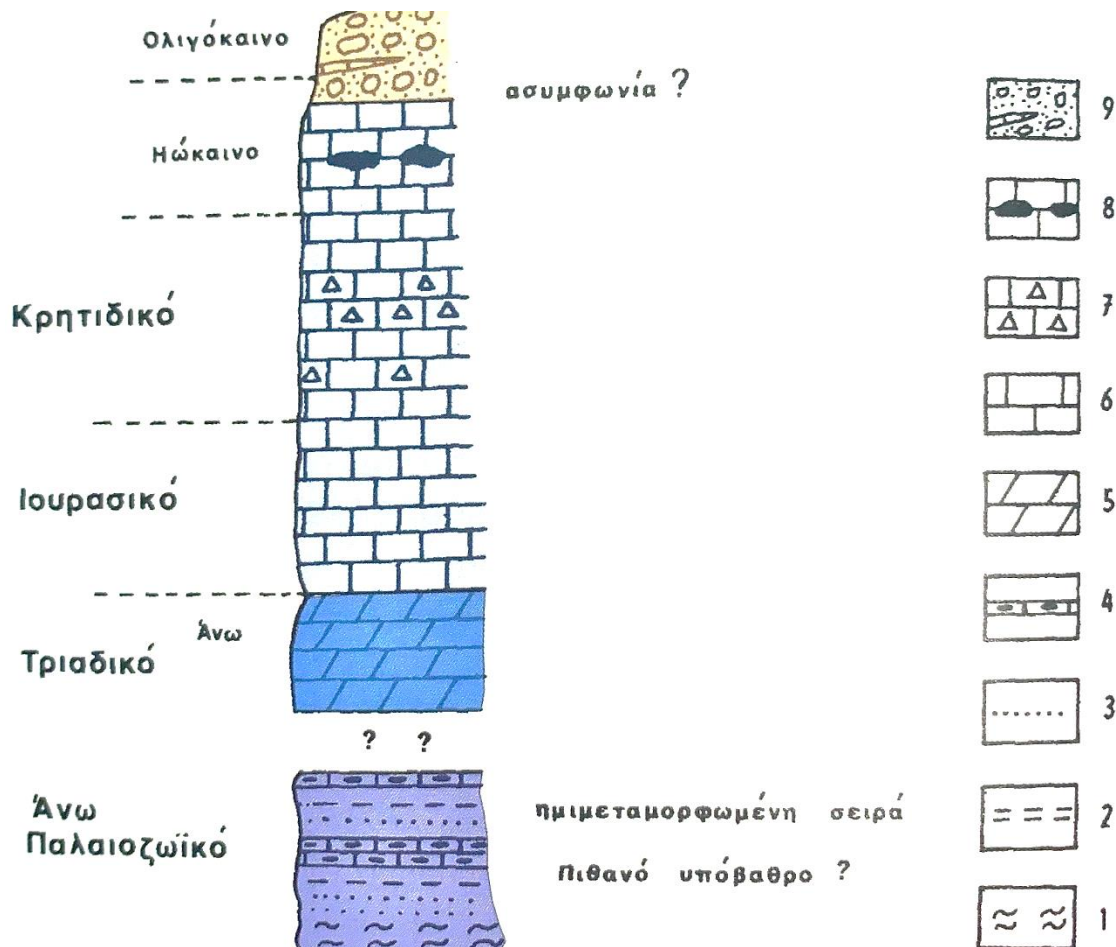


Σχήμα 50. Χάρτης Δυτικής Ελλάδας με τις Γεωτεκτονικές ζώνες. (P. Faupl, A. Pavlopoulos & G. Migiros, 1997)

Σύμφωνα με τον γεωλογικό χάρτη του ΙΓΜΕ, φύλλο Ραπτόπουλο και την διαθέσιμη σχετική βιβλιογραφία, η ευρύτερη περιοχή δομείται εντός κυρίως φλυσικών σχηματισμών.



Σχήμα 51. Απόσπασμα από το γεωλογικό χάρτη I.G.M.E., φύλλο ΡΑΠΤΟΠΟΥΛΟ (1:50000)



Σχήμα 52. Σχηματική λιθοστρωματογραφική στήλη της ζώνης Γαβρόβου – Τρίπολης. 1: σερικιτικοί σχιστόλιθοι, 2: φυλλίτες, 3 χαλαζίτες, 4 αβεστολιθικές ενστρώσεις, 5: δολομίτες, 6: μαύροι αβεστολίθοι, 7: λατυποπαγείς αβεστολίθοι, 8: βωξιτική εμφάνιση, 9: φλύσχης.

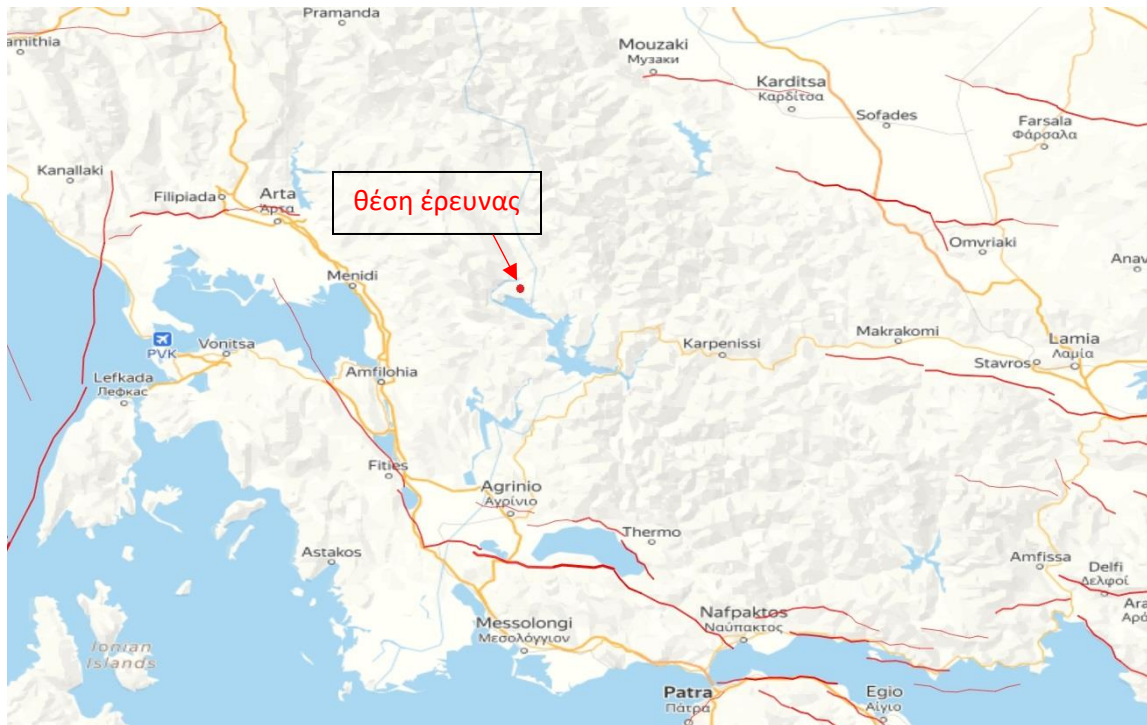
4.3 Τεκτονική δομή

Η ζώνη Γαβρόβου θεωρείται ως μία σχετικά αυτόχθονη ή παρά-αυτόχθονη γεωτεκτονική ζώνη πάνω στην οποία έχει επωθηθεί σε μεγάλη κλίμακα το αλλόχθονο τεκτονικό κάλυμμα της ζώνης Πίνδου. Η ίδια η ζώνη Γαβρόβου εμφανίζεται επωθημένη πάνω στην Ιόνιο ζώνη ή πάνω στη σειρά plattenalk. Η επώθηση της ζώνης Πίνδου στη ζώνη Γαβρόβου φαίνεται σε όλο το μήκος της επαφής των δύο ζωνών. (Μ. Μαντουράκης, 2010)

Οι στρώσεις της ζώνης Γαβρόβου είναι πτυχωμένες σε ανοιχτές πτυχές (μεγάλης καμπυλότητας) με άξονες γενικής διεύθυνσης Β – Ν. Αποτελούν κυρίως συγκλινικές και αντικλινικές μορφές μεγάλης κλίμακας που σχηματίστηκαν κυρίως κατά την τελική φάση πτυχώσεων ως αποτέλεσμα μιας συμπιεστικής

τεκτονικής που έλαβε χώρα στο Τελικό Ολιγόκαινο – Κάτω Μειόκαινο. (Μ. Μαντουράκης, 2010)

Όπως διακρίνεται από το σχήμα 53 δεν απαντώνται σημαντικά ρήγματα στην περιοχή της έρευνας.

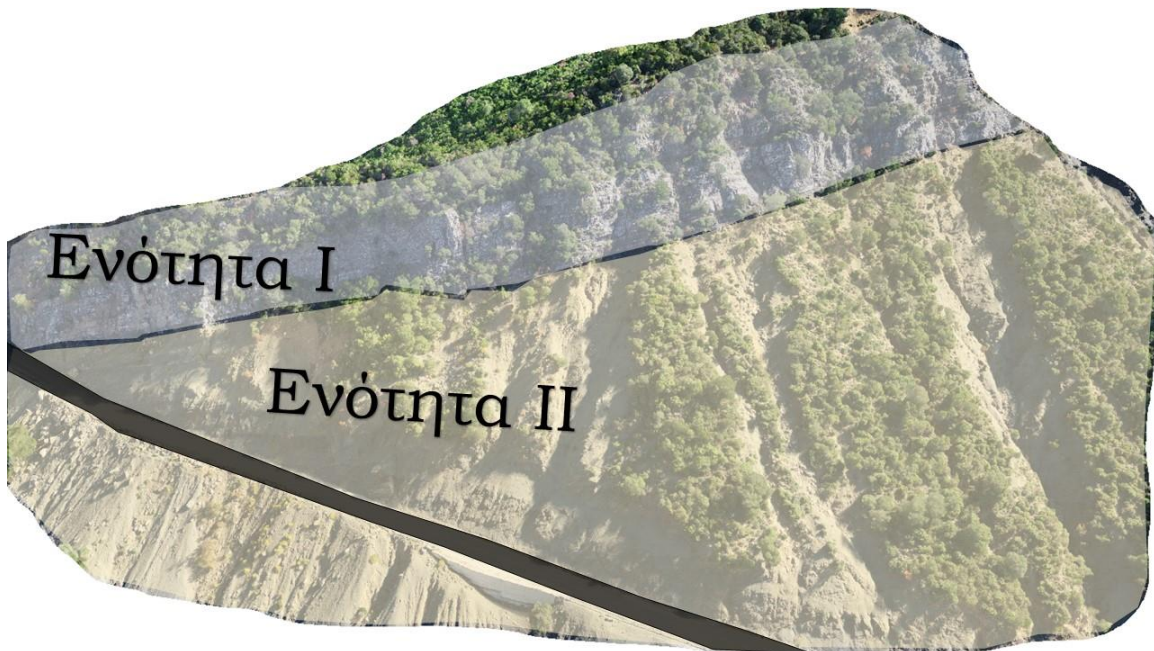


Σχήμα 53. Χάρτης της κεντρικής Ελλάδας με ρήγματα που έχουν εντοπιστεί στην ευρύτερη περιοχή της μελέτης.

4.4 Γεωλογική Αξιολόγηση της θέσης έρευνας

Κατά την επίσκεψη στην θέση έρευνας παρατηρείται σε πρώτη αυτοψία πως κυριαρχούν δύο τύποι φλύσχη, ο ένας αποτελείται κυρίως από ψαμμιτικές ενστρώσεις μέτρια διαταραγμένες (βλ. σχήμα 55 και σχήμα 56), ενώ στον άλλον τύπο επικρατούν ενστρώσεις ιλυολίθου μέτρια έως έντονα διαταραγμένες. Όπως φαίνεται και από το σχήμα 54 ο φλύσχη που επικρατούν οι ψαμμιτικοί πάγκοι υπέρκεινται του φλύσχη που επικρατούν ιλυολιθικές ενστρώσεις.

Επιπλέον στην θέση έρευνας υπάρχουν μιογάγγειες σύστασης παλαιών κορημάτων (βλ. σχήμα 58) και ερυθρά κορήματα διάφορων γεωυλικών (βλ. σχήμα 59), όπου διακόπτουν την ενότητα II κατά τόπους.



Σχήμα 54. Γενική γεωλογική αξιολόγηση της θέσης έρευνας



Σχήμα 55. Ενότητα 1, φλύσσης που επικρατούν ψαμμιτικές ενστρώσεις (ΒΑ τμήμα)



Σχήμα 56. Ενότητα I, φλύσξης που επικρατούν ψαμμιτικές ενοστρώσεις στην Νότια περιοχή σε υψηλό υψόμετρο



Σχήμα 57. Ενότητα II, φλύσξης που επικρατούν κυρίως ιλυολιθικές ενοστρώσεις, μέτρια έως έντονα διαταραγμένος



Σχήμα 58. Μιογάγγεια στην θέση έρευνας



Σχήμα 59. Κορήματα ερυθρού χρώματος

4.5 Μηχανισμοί αστοχίας

Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως στην θέση έρευνας και πιο σημαντικά στην ΒΑ περιοχή της όπου κυριαρχούν οι ψαμμιτικοί πάγκοι έχουν σημειωθεί αρκετές βραχοκαταπτώσεις μεσαίων έως και μεγάλων όγκων. Κατά την τεχνική επίσκεψη τα καταπτώμενα τεμάχια ήταν ορατά περί της οδοποιίας όπου κι είχαν απομακρυνθεί από τοπικές αρχές.

Η εκδήλωση του φαινομένου αυτού οφείλεται στην υποσκαφή των ψαμμιτικών όγκων εξαιτίας της διαβρώσής τους. Η υποσκαφή τους προκαλεί εφελκυστικές ρωγμές και διευρύνει το άνοιγμα των ασυνεχειών. Στις διευρημένες ασυνέχειες το νερό ασκεί πλήρη υδροστατική πίεση στο τέμαχος, όπου και το οδηγεί σε αστοχία. Επιπλέον μετά από περιόδους παγετού, η παρουσία νερού εντός των ασυνεχειών διευρύνει τις ασυνέχειες.



Σχήμα 60. Καταπτώμενα ψαμμιτικά τεμάχια στην ΒΑ περιοχή

Πρόβλημα καταπτώσεων ψαμμιτικών τεμαχών εντοπίζονται και νοτιότερα προερχόμενα από υψηλότερα ύψη, τα οποία όμως ακολουθούν τροχιές κατά μήκος των μιογαγγειών όπου και σπάνε σε μικρότερα τεμάχια. Τα καταπτώμενα

τεμάχη αυτά φτάνουν με μικρότερη ταχύτητα και μικρότερο όγκο στην οδό άρα και με μικρότερη κινητική ενέργεια. Οπότε γενικά θεωρούνται μικρού κινδύνου.



Σχήμα 61. Ψαμμικά τεμάχη που έχουν εντοπιστεί σε μιογάγγειες

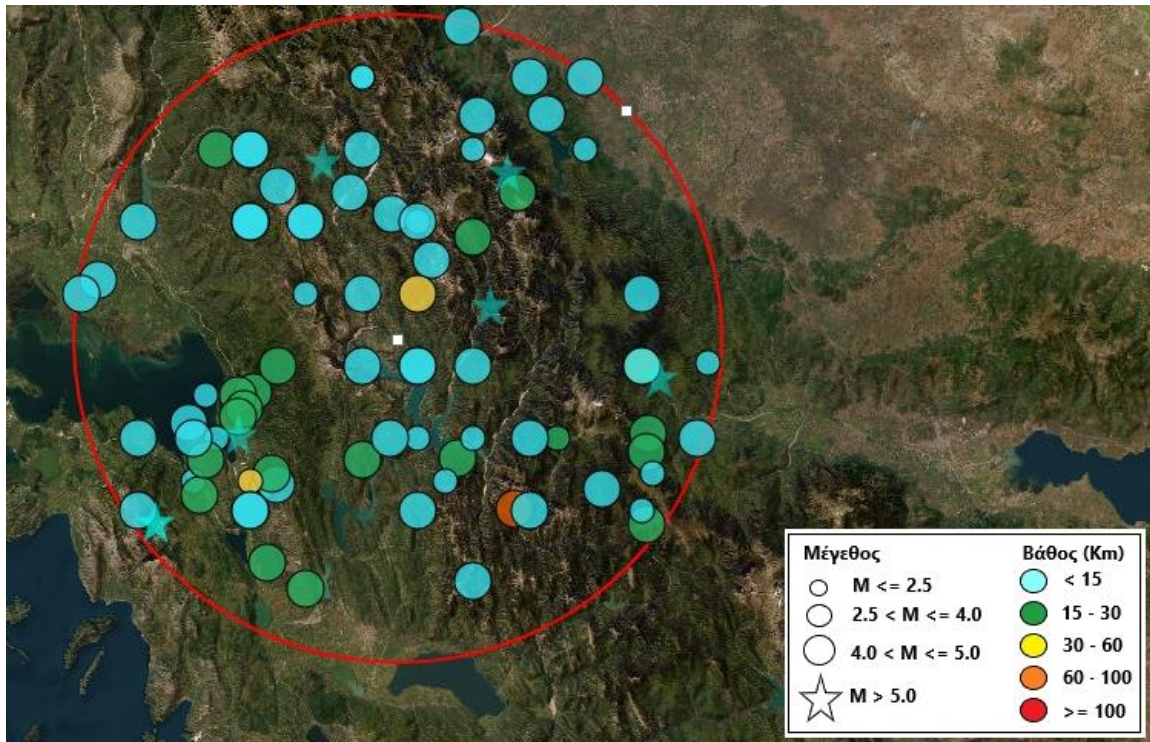
Στον φλύσχη που επικρατούν ιλυολιθικές ενστρώσεις έχουν σημειωθεί καταπτώσεις και σφηνοειδείς ολισθήσεις που εκδηλώνονται σε μεγάλη έκταση, ωστόσο όταν αστοχούν «εδαφοποιούνται» και δεν καταλήγουν στο κατάστρωμα της οδού ή στην περίπτωση που φτάνουν δεν αποτελούν κίνδυνο.



Σχήμα 62. Αποτύπωμα σφηνοειδούς ολίσθησης στην ενότητα II

4.6 Σεισμικότητα

Στο χάρτη του σχήματος 63 παρουσιάζεται η σεισμική δραστηριότητα που έχει καταγραφεί τα τελευταία 100 χρόνια σε ακτίνα 50km από την θέση έρευνας για μέγεθος σεισμού μεγαλύτερο από 4. Γενικά η περιοχή χαρακτηρίζεται από μέση σεισμική δραστηριότητα.



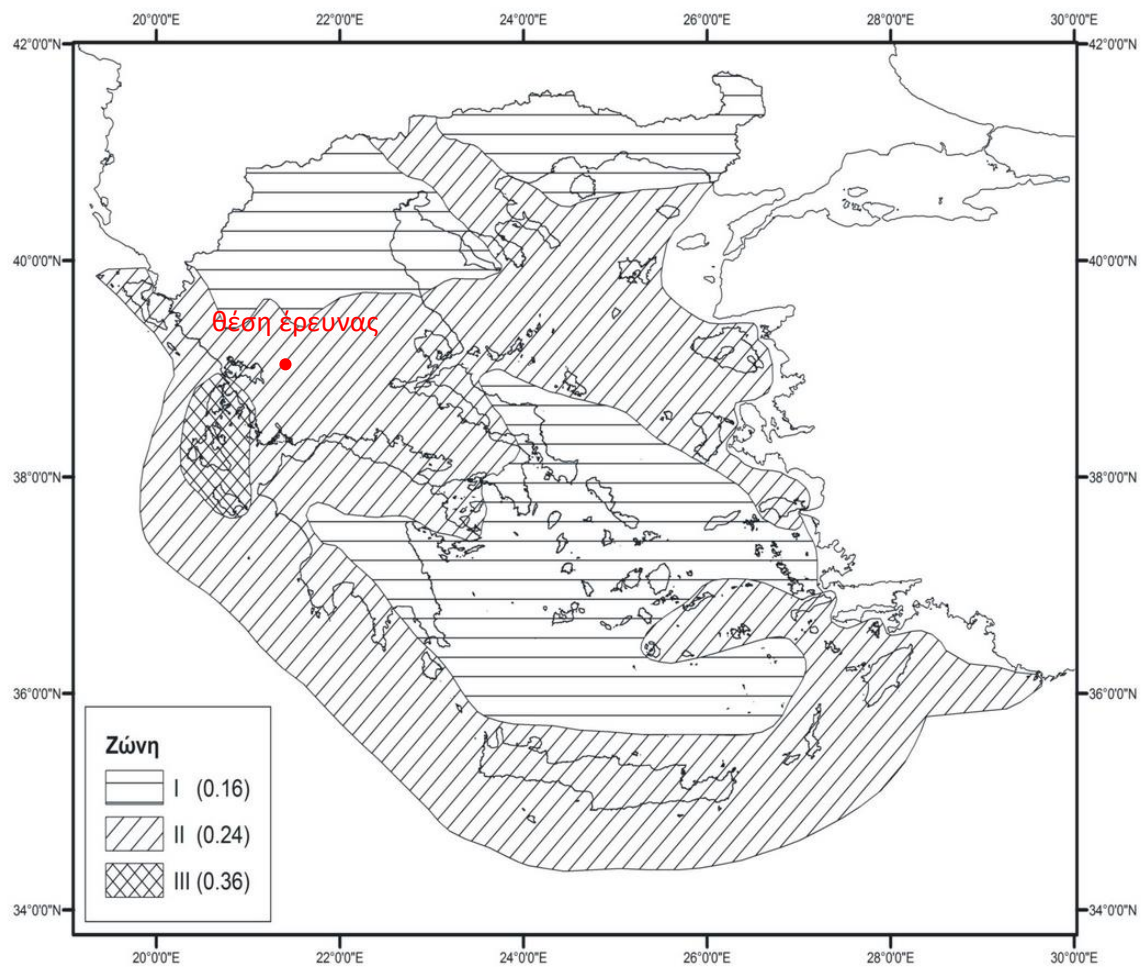
Σχήμα 63. Σεισμική δραστηριότητα εντός ακτίνας 50km από την θέση έρευνας. (gein.noa.gr)

Στον Πίνακα 14 παρατίθενται τα χαρακτηριστικά των σεισμών κλίμακας μεγαλύτερης από 5 στην περιοχή του τελευταίου αιώνα.

Πίνακας 14. Χαρακτηριστικά σεισμών με $M > 5$ του τελευταίου αιώνα. (gein.noa.gr)

Origin Time (GMT)	Latitude	Longitude	Depth (km)	Magnitude (ML)	Location
29/10/1966 2:39	38.8	21	10	6	27.3 km SE of Preveza
5/2/1966 2:01	39.1	21.6	10	5.9	35.3 km NNW of Karpenision
4/5/1966 6:36	39.3	21.3	10	5.5	31.2 km ENE of Arta
24/10/2014 23:43	38.92	21.15	12	5.2	30.3 km SSE of Arta
5/2/1966 2:57	39	21.9	10	5.2	26.5 km NNE of Karpenision
31/8/2018 7:12	39.2857	21.6307	10	5	26.6 km WSW of Karditsa
27/5/1981 18:12	38.8	21	10	5	27.3 km SE of Preveza

Σύμφωνα με τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (ΕΑΚ – 2000) όπως αυτός τροποποιήθηκε λόγω αναθεώρησης του Χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας με την απόφαση του ΥΠΕΧΩΔΕ Δ17α/115/9/ΦΝ275/2003, η περιοχή της Ευρυτανίας υπάγεται στην ζώνη II με $a_g=0.24g$. (Σχήμα 64)



Σχήμα 64. Χάρτης Σεισμικής Επικινδυνότητας Ελλάδας (ΕΑΚ 2003)

5. Τεχνικογεωλογική – Γεωτεχνική Αξιολόγηση

Σε αυτό το κεφάλαιο κύριος στόχος είναι ο προσδιορισμός των παραμέτρων αντοχής των άρρηκτων βράχων και βραχομαζών και η ταξινόμηση τους. Πιο συγκεκριμένα πρέπει να προσδιοριστούν:

- τα χαρακτηριστικά του άρρηκτου βράχου (ψαμμίτη και ιλυολίθου)
- τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών
- τα χαρακτηριστικά των βραχομαζών

5.1 Παράμετροι άρρηκτου βράχου

Για την γεωτεχνική αξιολόγηση του άρρηκτου πετρώματος της θέσης έρευνας πραγματοποιήθηκαν:

- Δοκιμή σημειακής φόρτισης
- Επί τόπου δοκιμές κρουσιομέτρησης με την σφύρα Schmidt
- Συσχέτιση εμπειρικών μεθόδων με τα αποτελέσματα των παραπάνω δοκιμών για την εύρεση των παραμέτρων άρρηκτου βράχου (UCS, E_i , m_i), που είναι απαραίτητες για την εφαρμογή του κριτηρίου Hoek & Brown (2002) και την ποσοτική εκτίμηση της διατμητικής αντοχής της βραχώμαζας

5.1.1 Δοκιμή σημειακής φόρτισης – Προσδιορισμός UCS ψαμμίτη

Στα πλαίσια της γεωτεχνικής αξιολόγησης συλλέχθηκαν 6 τεμάχια ψαμμίτη στα οποία εκτελέστηκε δοκιμή σημειακής φόρτισης σύμφωνα με την προτεινόμενη μέθοδο ISRM (1985).



Σχήμα 65. Δοκίμια εργαστηριακών δοκιμών από την θέση έρευνας.

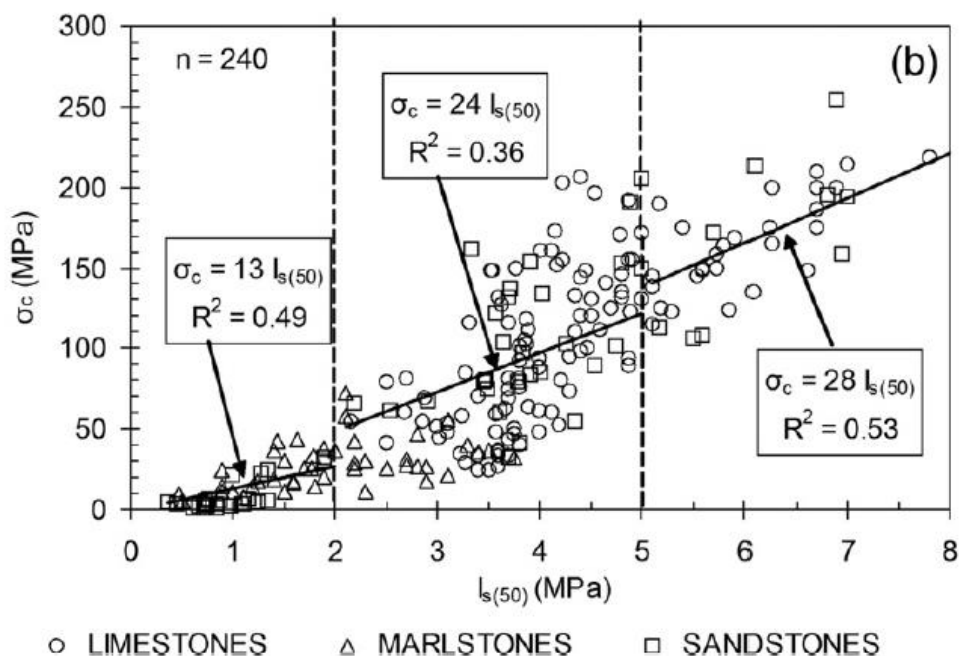
Στον πίνακα 15 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών PLT, αναλυτικότερα τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο παράρτημα Β. Στο τέμαχος Α εκτελέστηκαν PLT (point load test) σε κυλινδρικά δοκίμια ενώ στα Β, Γ, Ε, ΣΤ εκτελέστηκαν PLT σε δοκίμια με ακανόνιστη μορφή. Από τις δοκιμές PLT υπολογίστηκε ο δείκτης σημειακής φόρτισης I_{s50} .

Πίνακας 15. Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών

Δοκίμιο	W ₁ (mm)	W ₂ (mm)	W (mm)	L (mm)	D (mm)	L/D (>1)	W/D (>0.3 and <1)	De ² (mm ²)	P (N)	I _s (MPa)	F	I _{s50} (MPa)
Θ5-A-PL1	-	-	49	-	50.64	-	0.97	3159.37	10120	3.20	1.05	3.38
Θ5-A-PL2	-	-	51.84	-	50.68	-	1.02	3345.12	10410	3.11	1.07	3.32
Θ5-A-PL3	-	-	36.2	-	50.65	-	0.71	2334.52	8980	3.85	0.98	3.79
Θ5-A-PL4	-	-	39.5	-	50.61	-	0.78	2545.33	8310	3.26	1.00	3.28
Θ5-A-PL5	-	-	46.2	-	50.77	-	0.91	2986.48	11170	3.74	1.04	3.89
Θ5-A-PL6	-	-	43.9	-	50.65	-	0.87	2831.09	9800	3.46	1.03	3.56
Θ5-B-PL1	65.1	72.2	68.65	74.2	40	1.86	0.58	3496.32	15700	4.49	1.08	4.84
Θ5-B-PL2	64	75.1	69.55	83.7	53	1.58	0.76	4693.35	11000	2.34	1.15	2.70
Θ5-Γ-PL1	85.1	68.3	76.7	94.4	51	1.85	0.66	4980.53	1070	0.21	1.17	<i>0.25</i>
Θ5-E-PL1	51.2	47.1	49.15	62.3	25	2.49	0.51	1564.49	600	0.38	0.90	<i>0.35</i>
Θ5-E-PL2	52.2	32	42.1	61.4	41	1.50	0.97	2197.74	1100	0.50	0.97	<i>0.49</i>
Θ5-E-PL3	45.2	40.1	42.65	72	38	1.89	0.89	2063.54	1300	0.63	0.96	<i>0.60</i>
Θ5-E-PL4	45	40	42.5	58.6	40	1.47	0.94	2164.51	1400	0.65	0.97	<i>0.63</i>
Θ5-E-PL5	50	51.9	50.95	79.8	42	1.90	0.82	2724.61	1600	0.59	1.02	<i>0.60</i>
Θ5-E-PL6	59	30	44.5	80	31	2.58	0.70	1756.43	1000	0.57	0.92	<i>0.53</i>
Θ5-ΣΤ-PL1	89.1	88.2	88.65	82.2	40	2.06	0.45	4514.91	7700	1.71	1.14	1.95
Θ5-ΣΤ-PL2	87	80.2	83.6	96.2	42	2.29	0.50	4470.60	7900	1.77	1.14	2.01
Θ5-ΣΤ-PL3	90.1	86.2	88.15	103.2	61	1.69	0.69	6846.40	11500	1.68	1.25	2.11

Οι τιμές των δοκιμών από τα τεμάχια Γ και Ε απορρίφθηκαν, διότι θεωρήθηκαν πολύ μικρές για ψαμμίτη. Ενδεχομένως αυτές οι τιμές προέκυψαν αρκετά μικρές λόγω ύπαρξης ασυνεχειών ιλυολίθου στα τεμάχια.

Μέσω του νομογραφήματος Tsiambaos & Sabatakis (2008) (Σχήμα 66) συσχετίζονται οι τιμές του I_{s50} με το σ_c όπου για τιμές $I_{s50} < 2$ $\sigma_c = 13 \cdot I_{s50}$ και για τιμές $2 < I_{s50} < 5$ $\sigma_c = 24 \cdot I_{s50}$.



Σχήμα 66. Νομογράφημα συσχέτισης $I_{s(50)}$ με σ_c Tsiambaos & Sabatakis (2008)

Πίνακας 16. Τιμές σ_{ci} για τα τεμάχια ψαμμίτη που πραγματοποιήθηκε PLT

Δοκίμιο	I_{050}	σ_{ci}
Θ5-A-PL1	3.38	81.12
Θ5-A-PL2	3.32	79.68
Θ5-A-PL3	3.79	90.96
Θ5-A-PL4	3.28	78.72
Θ5-A-PL5	3.89	93.36
Θ5-A-PL6	3.56	85.44
Θ5-B-PL1	4.84	116.16
Θ5-B-PL2	2.7	64.8
Θ5-ΣΤ-PL1	1.95	25.35
Θ5-ΣΤ-PL2	2.01	48.24
Θ5-ΣΤ-PL3	2.11	50.64

Η τιμή UCS προκύπτει υπολογίζοντας το μέσο όρο των τιμών του Πίνακα 16 απορρίπτοντας την 1^η μεγαλύτερη και την 1^η μικρότερη τιμή.

$UCS_{\Psi\alpha\mu\mu\acute{\iota}\tau\eta} = 74.5 \text{ MPa}$.

5.1.2 Εκτίμηση UCS ιλυολίθου από κρουσιομετρήσεις χρήση σφύρας Schmidt

Στην θέση έρευνας πραγματοποιήθηκαν επί τόπου δοκιμές με την Σφύρα Schmidt για τον προσδιορισμό της τιμής JCS. Αναλυτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στο παράρτημα Β.

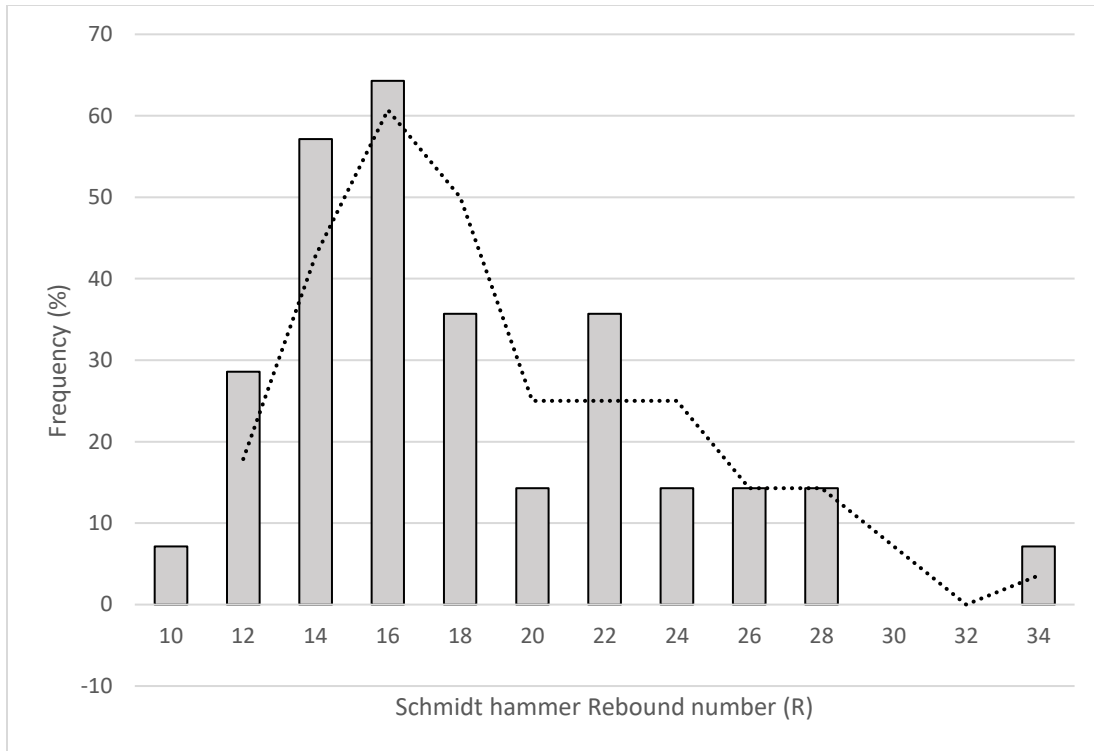
Για τον υπολογισμό της UCS του ιλυολίθου χρησιμοποιήθηκε η εμπειρική σχέση του Singh et al. (1983) $UCS=2R$, η οποία αφορά λιθολογία ιλυολίθου και ψαμμίτη. Στον πίνακα 17 παρουσιάζονται σχέσεις που συσχετίζουν την UCS και το E με τον αριθμό κρούσεων με την σφύρα Schmidt.

Πίνακας 17. Υπολογισμός UCS και E μέσω του αριθμού κρούσεων με την σφύρα Schmidt. (Gaudie, 2006)

Equation	R ²	Reseacher	Lithology
UCS			
$UCS = 6.9 \times 10^{(0.0087\gamma R + 0.16)}$	0.94	Deere and Miller (1966)	varied
$UCS = 6.9 \times 10^{(1.348\gamma R - 1.325)}$	-	Aufmuth (1973)	varied
$UCS = 0.447\exp(0.045(R + 3.5) + \gamma)$	-	Kidybinski (1980)	Coal, Shale, mudstone
$UCS = 2R$	0.72	Singh et al. (1983)	Sandstone, siltstone
$UCS = 0.4RLM - 3.6$	0.94	Sheorey et al. (1984)	Coal
$UCS = 0.994R - 0.383$	0.70	Haramy and De Marco (1985)	Coal
$UCS = 702R - 1104$	0.77	O'Rourke (1989)	Sandstone
$UCS = 2.208e^{0.067R}$	0.96	Katz et al. (2000)	Limestone, sandstone
$UCS = \exp(0.818 + 0.059R)$	0.98	Yilmaz and Sendir (2002)	Gypsum
$UCS = 2.75R - 36.83$	-	Dincer et al (2004)	Andesite, basalts, tuffs
$UCS = 2.22R - 47.67$	-	Aggistalls et al (1996)	Gabbros, basalts
E			
$E = 6.95\gamma^2 R - 1.14 \times 10^6$	0.88	Deere and Miller (1966)	Varied
$E = 6.9 \times 10^{(1.06 \log(\gamma R) + 1.86)}$	-	Aufmuth (1973)	varied
$E = 0.00013R^{3.09074}$	0.99	Katz et al. (2000)	Syenite, granite
$E = \exp(1.146 + 0.054R)$	0.91	Yimaz and Sendir (2002)	gypsum

UCS = Uniaxial compressive strength (MPa), E = Young's modulus (MPa), R = Schmidt hammer rebound number, γ = rock density (gr/cm³) (Yasar&Erdogan (2004)

Παρακάτω παρουσιάζεται η στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων από 41 δοκιμές σφύρας Schmidt σε λιθολογία Ιλυολίθου. Για βαθμό εμπιστοσύνης 95% το πλήθος των χτύπων (R) κυμαίνεται μεταξύ 16 και 20. Στο σχήμα 67 φαίνεται πως η μεγαλύτερη συγκέντρωση είναι στο πλήθος 16 χτύπων. Επομένως σύμφωνα με Singh et al. (1983) $UCS=32MPa$.



Σχήμα 67. Ιστόγραμμα των κρούσεων από τις δοκιμές Schmidt σε Ιλυόλιθο

5.1.3 Εκτίμηση m_i

Σύμφωνα με τον πίνακα 18 εκτιμήθηκε η τιμή του m_i 17 για ψαμμίτη και 7 για ιλυόλιθο.

Πίνακας 18. Πίνακας εκτίμησης E_i για διάφορους τύπους πετρώματος

Τύπος	Ομάδα	ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑ				
		Χονδρή	Μέση	Λεπτή	Πολύ λεπτή	
ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΗ	Κλασσικό	Κροκαλοπαγή *	Ψαμμίτες 17 ± 4	Ιλυόλιθοι 7 ± 2	Αργιόλιθοι 4 ± 2	
		Λατυποπαγή *		Γραουβάκες (18 ± 3)	Αργ. σχιστόλιθοι (6 ± 2) Μάργες (7 ± 2)	
	Μη κλασσικό	Ανθρακικά	Κρυσταλλικοί Ασβεστόλιθοι (12 ± 3)	Σπαρπηκοί Ασβεστόλιθοι (10 ± 2)	Μικρπηκοί Ασβεστόλιθοι (9 ± 2)	Δολομίτες (9 ± 3)
		Εβαπορίτες		Γύψος 8 ± 2	Ανυδρίτης 12 ± 2	
	Οργανικά				Κρητίν 7 ± 2	
ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΜΕΝΑ	Μη πτυχωμένα	Μάρμαρο 9 ± 3	Κερατόλιθοι (19 ± 4) Μεταψαμμίτες (19 ± 3)	Χαλαζίτες 20 ± 3		
	Ελαφρά πτυχωμένα	Μιγματίτες (29 ± 3)	Αμφιβολίτες 26 ± 6	Γνεύσοι 28 ± 5		
	Πτυχωμένα**		Σχιστόλιθοι 12 ± 3	Φυλλίτες (7 ± 3)	Σχίστες 7 ± 4	
Τύπος	Ομάδα	ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑ				
		Χονδρή	Μέση	Λεπτή	Πολύ λεπτή	
ΠΥΡΙΤΕΝΗ	Πλουτώνια	Ανοικτό- χρωμα	Γρανίτης 32 ± 3	Διορίτης 25 ± 5		
		Σκοτεινό- χρωμα	Γάββρος 27 ± 3 Νορίτης 20 ± 5	Δολερίτης (16 ± 5)		
	Υποαβυσσικά	Πορφύρης (20 ± 5)		Διαβάσης (15 ± 5)	Περιδοίτης (25 ± 5)	
	Ηφαιστειακά	Λάβα		Ρυόλιθος (25 ± 5) Ανδεσίτης 25 ± 5	Δακίτης (25 ± 3) Βασάλτης (25 ± 5)	
		Πυροκλαστικά	Κροκαλοπαγή (19 ± 3)	Ηφ.Λατυποπαγή (19 ± 5)	Τόφφοι (13 ± 5)	

5.1.4 Εκτίμηση E_i

Για τον προσδιορισμό της E_i του ψαμμίτη και του Ιλυόλιθου πρέπει να προσδιοριστεί πρώτα η τιμή MR. Σύμφωνα με τους Marinou & Tsiambaos (2010) η προτεινόμενη τιμή MR για Ψαμμίτη και Ιλυόλιθο σε φλύσχη είναι 140 και 245 αντίστοιχα.

Επιλέγονται οι τιμές που προτάθηκαν από τους Marinou & Tsiambaos (2010), επειδή διευκρινίζουν ότι τα άρρηκτα πετρώματα του Ψαμμίτη και του Ιλυόλιθου προέρχονται από Φλύσχη και παράλληλα οι δοκιμές που εκτελέστηκαν για τον προσδιορισμό του MR από τους Marinou & Tsiambaos έγιναν σε ελληνικά πετρώματα. Επομένως η τιμή E_i μπορεί να προσεγγιστεί με την εξής σχέση (Deere 1968):

$$E_i = MR \cdot \sigma_{ci}$$

$$E_i = 10.47 \text{ GPa (Ψαμμίτης)}$$

$$E_i = 7.84 \text{ GPa (Ιλυόλιθος)}$$

5.2 Παράμετροι ασυνεχειών

Για τον σκοπό της ανάλυσης ευστάθειας των βραχοτεμάχων απαιτείται ο υπολογισμός της διατμητικής αντοχής των επιφανειών των ασυνεχειών του ψαμμίτη και του ιλυολίθου. Για τον υπολογισμό χρησιμοποιήθηκε το εμπειρικό κριτήριο αστοχίας Barton & Bandis (1990):

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan (JRC \cdot \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \varphi_b)$$

όπου:

φ_b : η βασική γωνία τριβής της επιφάνειας αστοχίας

JRC: ο συντελεστής τραχύτητας της επιφάνειας

JCS: η μονοαξονική αντοχή της επιφάνειας της ασυνέχειας [Barton, 1973, 1976].

Για αυτό το λόγο, στο πλαίσιο των εργασιών υπαίθρου λήφθηκαν δείγματα άρρηκτου βράχου και πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακές δοκιμές άμεσης διάτμησης. Αυτές οι δοκιμές είχαν σκοπό τον προσδιορισμό της διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών τους, δηλαδή τον υπολογισμό της συνοχής και της γωνίας τριβής των ασυνεχειών.

Επιπλέον, στα πλαίσια των εργασιών στο πεδίο, διενεργήθηκαν μετρήσεις της αντοχής των τοιχωμάτων των ασυνεχειών, χρησιμοποιώντας σφύρα Schmidt τύπου "L".

Επιπρόσθετα, με βάση τα προφίλ τραχύτητας που μετρήθηκαν στις επιφάνειες του ψαμμίτη εκτιμήθηκε η τιμή JRC. Επιλύοντας το κριτήριο αστοχίας Barton & Bandis (1990) με τις παραπάνω παραμέτρους υπολογίστηκε η γωνία τριβής των ασυνεχειών.

Τα αποτελέσματα παρατίθενται στα παρακάτω κεφάλαια.

5.2.1 Εκτίμηση JCS ασυνεχειών

Στον πίνακα 19 παρουσιάζονται οι τιμές της δοκιμής σφύρας Schmidt για τις διακλάσεις ψαμμίτη.

Πίνακας 19. Δοκιμών σφύρας Schmidt: διακλάσεις ψαμμίτη

ΚΩΔΙΚΟΣ	ΜΕΤΡΗΣΗ	ΑΣΥΝΕΧΕΙΑ	ΛΙΘΟΛΟΓΙΑ
SP1	26	ΔΙΑΚΛΑΣΗ	ΨΑΜΜΙΤΗΣ
SP6	33		ΨΑΜΜΙΤΗΣ
SP6	40		ΨΑΜΜΙΤΗΣ
SP6	36		ΨΑΜΜΙΤΗΣ
SP6	24		ΨΑΜΜΙΤΗΣ
SP6	34		ΨΑΜΜΙΤΗΣ
SP6	40		ΨΑΜΜΙΤΗΣ
SP6	45		ΨΑΜΜΙΤΗΣ
SP6	47		ΨΑΜΜΙΤΗΣ
M.O.	36.1		

Για την εκτίμηση της τιμής JCS υπολογίζεται ο M.O. των μετρήσεων της σκληρότητας και μέσω του νομογραφήματος SHV - σ_c (βλ σχήμα 68) για $\gamma=25\text{kN/m}^3$ (βλέπε παράρτημα Β) εκτιμάται η τιμή του JCS=68MPa.

Στον πίνακα 20 παρουσιάζονται οι τιμές της δοκιμής σφύρας Schmidt για τις ενστρώσεις ιλυολίθου.

Πίνακας 20. τιμές R για στρώση Ιλυολίθου

ΚΩΔΙΚΟΣ	ΜΕΤΡΗΣΗ	ΑΣΥΝΕΧΕΙΑ	ΛΙΘΟΛΟΓΙΑ
SP2	13	ΣΤΡΩΣΗ	ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ
SP3	12	ΣΤΡΩΣΗ	ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ
SP3	16	ΣΤΡΩΣΗ	ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ
M.O.	13.7		

Για την εκτίμηση της τιμής JCS υπολογίζεται ο M.O. των μετρήσεων της σκληρότητας και μέσω του νομογραφήματος SHV - σ_c (βλ σχήμα 68) για $\gamma=23\text{kN/m}^3$ εκτιμάται η τιμή του JCS=20MPa.

Στον πίνακα 21 παρουσιάζονται οι τιμές της δοκιμής σφύρας Schmidt για τις διακλάσεις ιλυολίθου.

Πίνακας 21. τιμές R για διακλάσεις ιλυολίθου

ΚΩΔΙΚΟΣ	ΜΕΤΡΗΣΗ	ΑΣΥΝΕΧΕΙΑ	ΛΙΘΟΛΟΓΙΑ
SP1	15	ΔΙΑΚΛΑΣΗ	ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ
SP1	18	ΔΙΑΚΛΑΣΗ	ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ
SP1	28	ΔΙΑΚΛΑΣΗ	ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ
SP1	38	ΔΙΑΚΛΑΣΗ	ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ
SP1	20	ΔΙΑΚΛΑΣΗ	ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ
SP1	21	ΔΙΑΚΛΑΣΗ	ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ
SP1	21	ΔΙΑΚΛΑΣΗ	ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ
SP2	16	ΔΙΑΚΛΑΣΗ	ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ
SP2	14	ΔΙΑΚΛΑΣΗ	ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ
SP2	17	ΔΙΑΚΛΑΣΗ	ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ
SP2	12	ΔΙΑΚΛΑΣΗ	ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ
SP2	15	ΔΙΑΚΛΑΣΗ	ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ
SP4	17	ΔΙΑΚΛΑΣΗ	ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ
SP4	28	ΔΙΑΚΛΑΣΗ	ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ
SP4	13	ΔΙΑΚΛΑΣΗ	ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ
SP4	22	ΔΙΑΚΛΑΣΗ	ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ
SP4	24	ΔΙΑΚΛΑΣΗ	ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ
SP4	18	ΔΙΑΚΛΑΣΗ	ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ
M.O.	22.6		

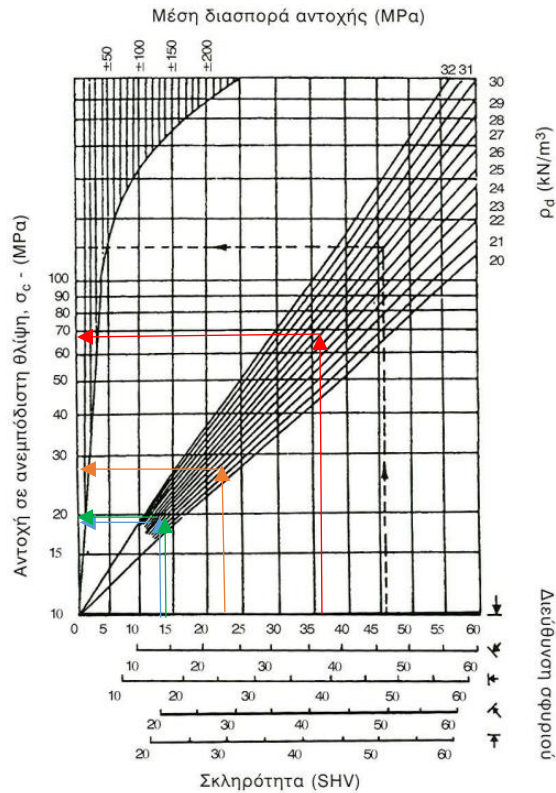
Για την εκτίμηση της τιμής JCS απορρίπτονται οι μικρότερες τιμές R και υπολογίζεται ο M.O. των μετρήσεων της σκληρότητας των 12 μεγαλύτερων τιμών και μέσω του νομογραφήματος SHV - σ_c (βλ σχήμα 68) για $\gamma=23\text{kN/m}^3$ εκτιμάται η τιμή του JCS=28MPa.

Στον πίνακα 22 παρουσιάζονται οι τιμές της δοκιμής σφύρας Schmidt για τις διάτμηση ιλυολίθου.

Πίνακας 22. τιμές R για διάτμηση ιλυολίθου

ΚΩΔΙΚΟΣ	ΜΕΤΡΗΣΗ	ΑΣΥΝΕΧΕΙΑ	ΛΙΘΟΛΟΓΙΑ
SP3	13	ΔΙΑΤΜΗΣΗ	ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ
SP3	14		ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ
M.O.	13.5		

Για την εκτίμηση της τιμής JCS υπολογίζεται ο M.O. των μετρήσεων της σκληρότητας και μέσω του νομογραφήματος SHV - σ_c (βλ σχήμα 68) για $\gamma=23\text{kN/m}^3$ εκτιμάται η τιμή του JCS=19MPa.



Σχήμα 68. Υπολογισμός του JCS των ασυνεχειών μέσω του νομογραφήματος SHV – σc.

5.2.2 Εκτίμηση JRC

Η εκτίμηση της τραχύτητας των ασυνεχειών ψαμμίτη έγινε σύμφωνα με τα αποτελέσματα των δοκιμών άμεσης διάτμησης (παράρτημα Β) συγκρίνοντας τα προφίλ των τεσσάρων δοκιμών με τα τυπικά προφίλ του Σχήματος 3 και υπολογίζοντας τον Μ.Ο. των τιμών αυτών. Στον πίνακα 23 παρουσιάζονται οι τιμές JRC που εκτιμήθηκαν.

Πίνακας 23. Εκτίμηση τραχύτητας ασυνεχειών ψαμμίτη JRC

SV1	SV2	SV3	SV4
3	8	3	4
Μ.Ο. : 4.5			

5.2.3 Υπολογισμός φυσικής γωνίας τριβής και συνοχής ασυνεχειών

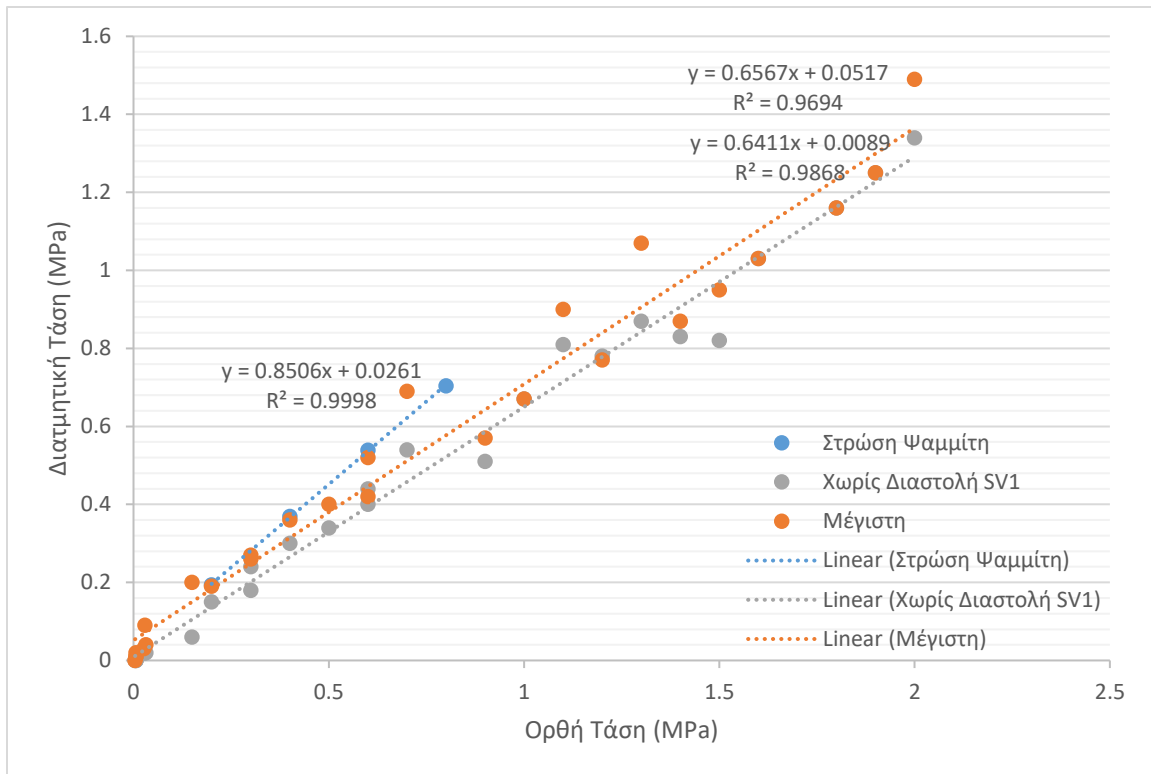
Από τις εργαστηριακές δοκιμές απλής διάτμησης που πραγματοποιήθηκαν υπολογίστηκε η βασική γωνία τριβής των ασυνεχειών ψαμμίτη και η συνοχή τους. Στον πίνακα 24 παρουσιάζονται οι εργαστηριακές τιμές όλων των δοκιμών

(SV1, SV2, SV3, SV4) και οι τιμές από το κριτήριο Barton. Οι τιμές για την διατμητική αντοχή χωρίς διαστολή αφορούν την βασική γωνία τριβής, ενώ οι τιμές για την μέγιστη αφορούν την φυσική γωνία τριβής. Η γωνία τριβής υπολογίζεται γραφικά μέσω του διαγράμματος $\sigma - \tau$ από την εφαπτομένη.

Στο σχήμα 69 παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις $\sigma - \tau$ των εργαστηριακών δοκιμών (συνολικά) και η γραφική παράσταση της στρώσης Ψαμμίτη.

Πίνακας 24. Υπολογισμός φυσικής γωνίας τριβής στρώσης ψαμμίτη

	Εργαστήριο			Barton-Bandis	
	ΟΡΘΗ ΤΑΣΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ	ΧΩΡΙΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗ	Ορθή Τάση	τ (Μρα)
SV1	0.006	0.02	0	0.2	0.193561
	0.029	0.09	0.02	0.4	0.369214
	0.15	0.2	0.06	0.6	0.538645
	0.3	0.26	0.18	0.8	0.70414
	0.7	0.69	0.54		
	1.5	0.95	0.82		
	2	1.49	1.34		
SV3	0.006	0.01	0		
	0.027	0.03	0.02		
	0.3	0.27	0.24		
	0.5	0.4	0.34		
	1	0.67	0.67		
	1.2	0.77	0.78		
	1.8	1.16	1.16		
SV4	0.004	0	0		
	0.032	0.04	0.02		
	0.6	0.42	0.4		
	0.9	0.57	0.51		
	1.4	0.87	0.83		
	1.6	1.03	1.03		
	1.9	1.25	1.25		
SV2	0.006	0.01	0		
	1.3	1.07	0.87		
	1.1	0.9	0.81		
	0.6	0.52	0.44		
	0.4	0.36	0.3		
	0.2	0.19	0.15		
Αποτελέσματα		Βασική γωνία	Φυσική γωνία		
		32.66	33.3		40.38
		Συνοχή			
		0	51.7		26.1



Σχήμα 69. Διάγραμμα Ορθών – Διατμητικών Τάσεων.

Για τον υπολογισμό της φυσικής γωνίας του Ιλυολίθου όπου δεν διατίθενται στοιχεία θα προσδιοριστεί η βασική γωνία μέσω βιβλιογραφικών αναφορών. Στον πίνακα 25 παρουσιάζονται τιμές για την βασική γωνία για διάφορα ιζηματογενή πετρώματα. Για την παρούσα μελέτη θεωρείται πως υπάρχει υγρασία και σύμφωνα με τον Coulson (1972), $\phi_b=28^\circ$.

Στον πίνακα 25 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του Barton για $\phi_b=28^\circ$ όπου προκύπτει $\phi=31.6^\circ$

Πίνακας 25. Υπολογισμός φυσικής γωνίας για τις ασυνέχειες Ιλυολίθου.

Ορθή Τάση	Barton Στρώση Ιλυολίθου (JCS=20)	Barton διάκλαση Ιλυολίθου (JCS=22.6)	Barton διάτμηση Ιλυολίθου (JCS=19)
0.2	0.135	0.136	0.135
0.4	0.261	0.262	0.260
0.6	0.383	0.385	0.382
0.8	0.504	0.507	0.502
Φυσική Γωνία ($^\circ$)	31.56	31.72	31.5

Πίνακας 26. Βασική γωνία τριβής για διάφορα ιζηματογενή πετρώματα

Rock type	Moisture condition	Basic friction angle ϕ_b	Reference
A. Sedimentary Rocks			
Sandstone	Dry	26—35	Patton, 1966
Sandstone	Wet	25—33	Patton, 1966
Sandstone	Wet	29	Ripley & Lee, 1962
Sandstone	Dry	31—33	Krsmanović, 1967
Sandstone	Dry	32—34	Coulson, 1972
Sandstone	Wet	31—34	Coulson, 1972
Sandstone	Wet	33	Richards, 1975
Shale	Wet	27	Ripley & Lee, 1962
Siltstone	Wet	31	Ripley & Lee, 1962
Siltstone	Dry	31—33	Coulson, 1972
Siltstone	Wet	27—31	Coulson, 1972
Conglomerate	Dry	35	Krsmanović, 1967
Chalk	Wet	30	Hutchinson, 1972
Limestone	Dry	31—37	Coulson, 1972
Limestone	Wet	27—35	Coulson, 1972

5.3 Παράμετροι Βραχώμαζας

5.3.1 Βαθμονόμηση της βραχώμαζας με το σύστημα GSI

Στην θέση έρευνας σύμφωνα με το σύστημα GSI διακρίνονται οι εξής τεχνικογεωλογικές ενότητες:

ΤΕ1: Φλύσχης τύπου III, Μέτρια διαταραγμένος ψαμμίτης με λεπτές ενστρώσεις ιλυολιθών. Υπέρκειται των υπολοίπων τεχνικογεωλογικών ενοντήτων. Τιμή GSI = 50 – 55



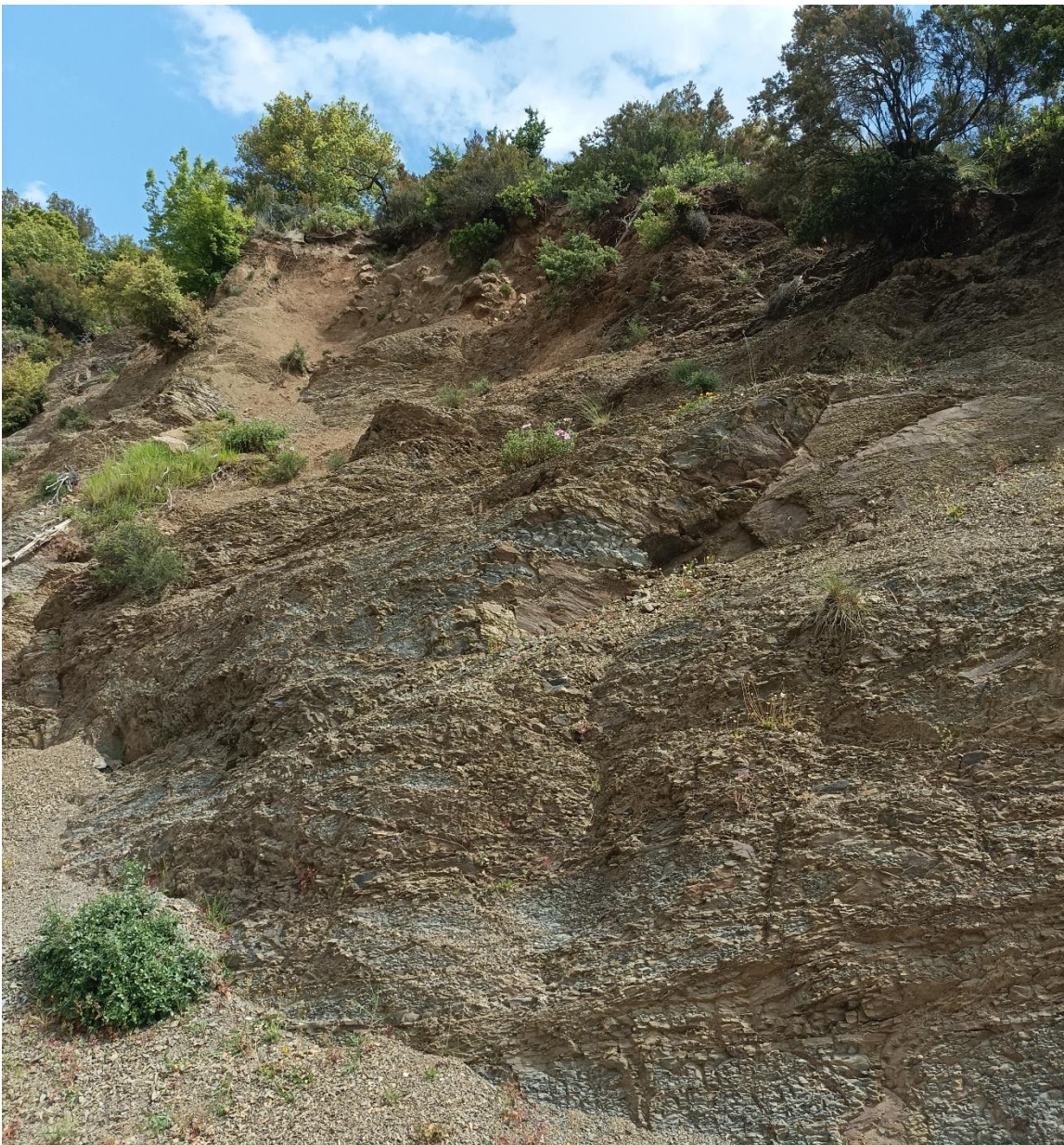
Σχήμα 70. Φλύσξης τύπου III

ΤΕ2: Φλύσξης τύπου VIII, Έντονα διαταραγμένη – πτυχωμένη βραχώμαζα, η οποία διατηρεί τη δομή της και δεν έχει παραμορφωθεί – διατηρηθεί σε μεγάλο βαθμό και αποτελείται από ιλυόλιθο με ενστρώσεις ψαμμίτη. Τιμή GSI = 25 – 30



Σχήμα 71. Φλύσξης τύπου VIII

ΤΕ4: Φλύσξης τύπου VII, Έντονα διαταραγμένη – πτυχωμένη βραχώμαζα, η οποία διατηρεί τη δομή της και αποτελείται από εναλλαγές ψαμμίτη και ιλυολίθου σε ίσες περίπου αναλογίες. Τιμή GSI = 30 – 35.



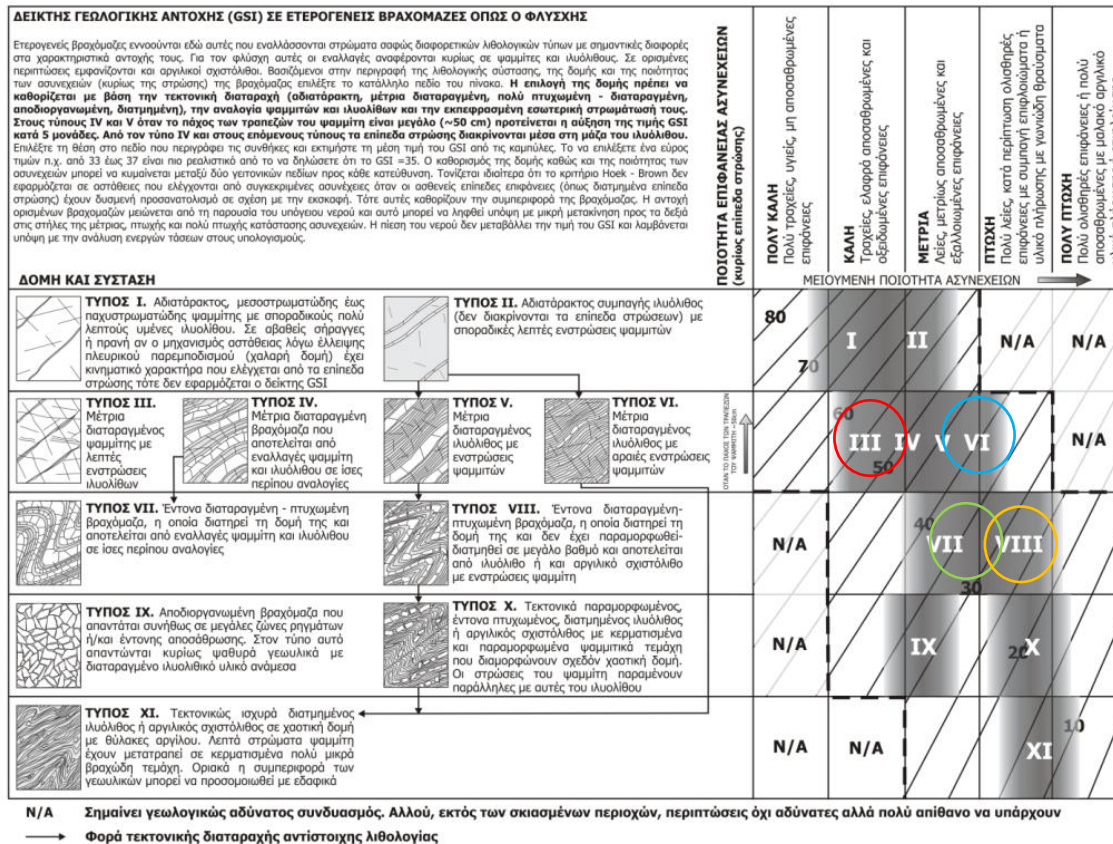
Σχήμα 72. Φλύσξης τύπου VII

ΤΕ3: Φλύσξης τύπου VI, Μέτρια διαταραγμένος ιλυόλιθος με λεπτές ενστρώσεις ψαμμιτών. Τιμή GSI = 35 – 40.

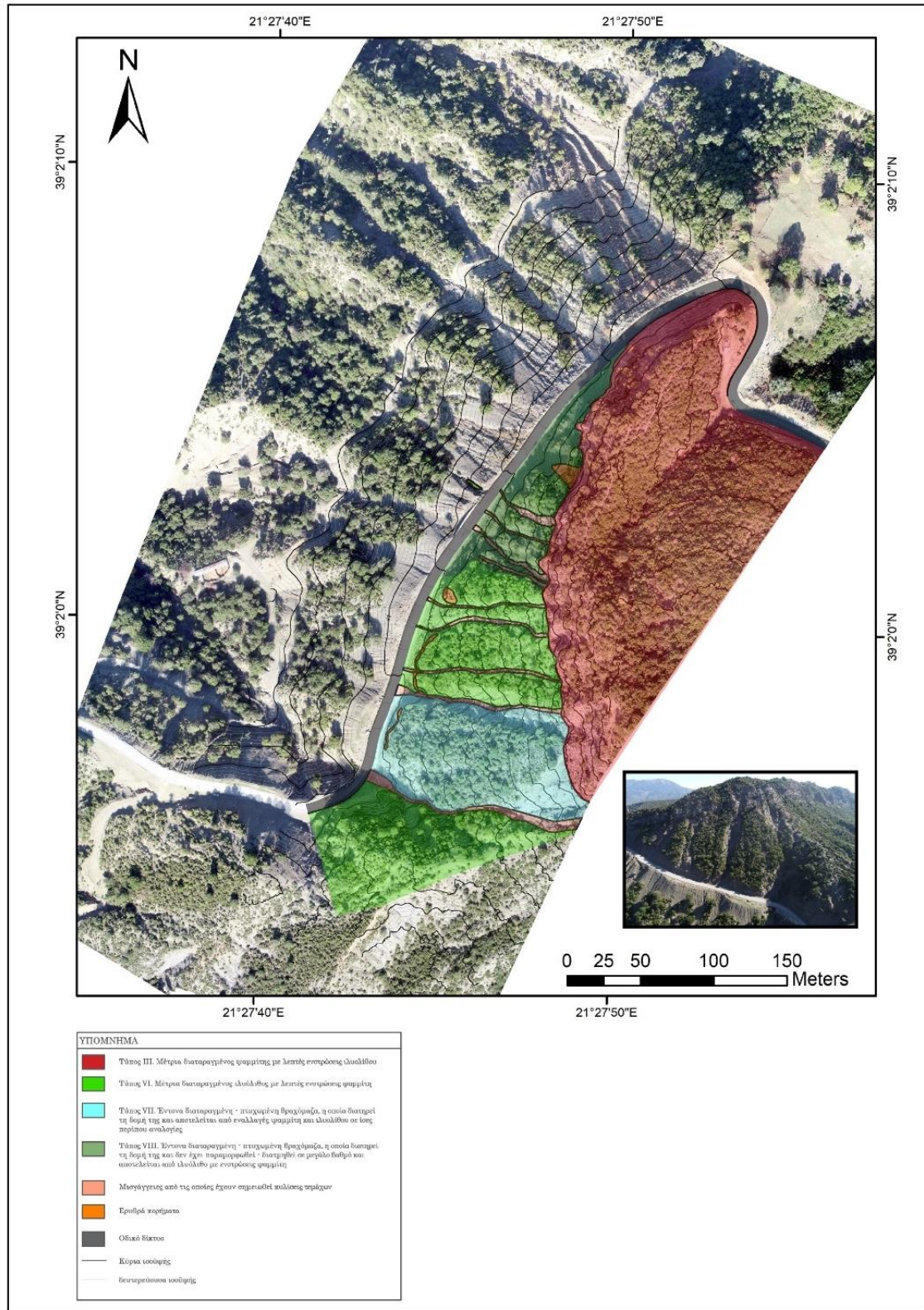


Σχήμα 73. Φλύοξης τύπου VI

Στο σχήμα 74 παρουσιάζεται αναλυτικά ο τρόπος εκτίμησης της τιμής GSI των ΤΕ της θέσης έρευνας.



Σχήμα 74. Υπολογισμός GSI των ΤΕ της θέσης έρευνας



Σχήμα 75. Τεχνικογεωλογικός χάρτης θέσης έρευνας

Οι διαφορετικοί τύποι φλύσχη που χαρτογραφήθηκαν στο πεδίο, διαφέρουν αρκετά σε ποσοστά λιθολογίας (ψαμμίτης – ιλυόλιθος) αλλά και σε βαθμό κερματισμού και διάβρωσης. Σύμφωνα με το σύστημα GSI για ετερογενείς βραχώμαζες (B. Μαρίνος, 2007) οι παράμετροι άρρηκτου βράχου σ_{ci} , m_i και E_i για κάθε τύπο φλύσχη απομειώθηκαν σύμφωνα με τον Πίνακα 27.

Ως προς το ποσοστό συμμετοχής των λιθολογικών μελών των τεχνικογεωλογικών ενοτήτων που χαρτογραφήθηκαν:

- Για την TE1 (φλύσξης τύπου III) θεωρήθηκε ως ποσοστό Ιλυόλιθου – Ψαμμίτη 10% και 90% αντίστοιχα.
- Για την TE2 (φλύσξης τύπου VIII) θεωρήθηκε ως ποσοστό Ιλυόλιθου – Ψαμμίτη 90% και 10% αντίστοιχα.
- Για την TE3 (φλύσξης τύπου VI) θεωρήθηκε ως ποσοστό Ιλυόλιθου – Ψαμμίτη 80% και 20% αντίστοιχα.
- Για την TE4 (φλύσξης τύπου VII) θεωρήθηκε ως ποσοστό Ιλυόλιθου – Ψαμμίτη 50% και 50%.

Ενώ οι τελικές ζυγισμένες τιμές των παραμέτρων αυτών παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 27.

Πίνακας 27. Αναλογίες των σ_{ci} , m_i και E_i των λιθολογικών μελών για την εκτίμηση της ζυγισμένης τιμής των αντίστοιχων παραμέτρων του άρρηκτου φλύσχη ανάλογα με τον τύπο της βραχόμαζας (Μαρίνος Β. 2007)

Τύπος Φλύσχη	Αναλογίες των σ_{ci} , m_i και E_i των λιθολογικών μελών για την εκτίμηση της ζυγισμένης τιμής των αντίστοιχων παραμέτρων του άρρηκτου φλύσχη ανάλογα με τον τύπο της βραχόμαζας
I, III	Χρησιμοποιείστε τις τιμές για ψαμμιτικούς πάγκους
II, VI	Χρησιμοποιείστε τις τιμές για Ιλιολιθικούς πάγκους
IV	Λεπτά στρώματα: Μειώστε την τιμή του ψαμμίτη κατά 10% και χρησιμοποιείστε την πλήρη τιμή του ιλυόλιθου Παχιά στρώματα: Χρησιμοποιείστε ισοδύναμα τις τιμές του ψαμμιτικού και ιλυολιθικού πάγκου
V, VII, VIII	Μειώστε τις ψαμμιτικές τιμές κατά 20% και χρησιμοποιείστε την πλήρη τιμή του ιλυόλιθου
IX	Χρησιμοποιείστε τις πλήρεις τιμές των εμπλεκόμενων γεωυλικών
X	Μειώστε τις ψαμμιτικές τιμές κατά 30% και χρησιμοποιείστε την πλήρη τιμή του ιλυόλιθου
XI	Χρησιμοποιείστε την πλήρη τιμή του ιλυόλιθου ή αργιλικού σχιστόλιθου
Σημείωση: Η τελική ζυγισμένη τιμή πρέπει να λαμβάνει προφανώς υπ' όψη και τα ποσοστά συμμετοχής των δύο μελών στη σύσταση της βραχόμαζας και όχι να προκύπτει από τον μέσο όρο. Σε περίπτωση που η υπολογιζόμενη τιμή βρεθεί από αυτή του ασθενέστερου υλικού, χρησιμοποιείστε την τελευταία.	

Πίνακας 28. Τιμές UCS_i , E_i , m_i για άρρηκτο βράχο

Παράμετροι	TE1 (90 %Ψαμμίτης), 10% Ιλυόλιθος	TE2 (10% Ψαμμίτης, 90% Ιλυόλιθος)	TE3 (20% Ψαμμίτης, 80% Ιλυόλιθος)	TE4 (50% Ψαμμίτης, 50% Ιλυόλιθος)
UCS_i (Mpa)	70.25	34.76	40.5	45.8
E_i (Gpa)	10.206	7.89	8.37	8.11
m_i	16	7.66	9	10.3

Με την βοήθεια του προγράμματος RSDData της εταιρείας Rocscience έγινε ο προσδιορισμός των παραμέτρων βραχόμαζας για τις τέσσερις τεχνικογεωλογικές ενότητες φλύσχη. Η ανάλυση έγινε με βάση το κριτήριο αστοχίας Hoek – Brown (2002) και με εφαρμογή ύψους πρανούς 50 και 100 μέτρων, υπολογίστηκαν οι

τιμές της συνοχής και της γωνίας τριβής. Το μέτρο Ελαστικότητας της βραχώμαζας υπολογίστηκε με το γενικευμένο κριτήριο Hoek & Diederichs (2006). Στον πίνακα 29 παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των εν λόγω αναλύσεων.

Πίνακας 29. Παράμετροι άρρηκτου βράχου και βραχώμαζας

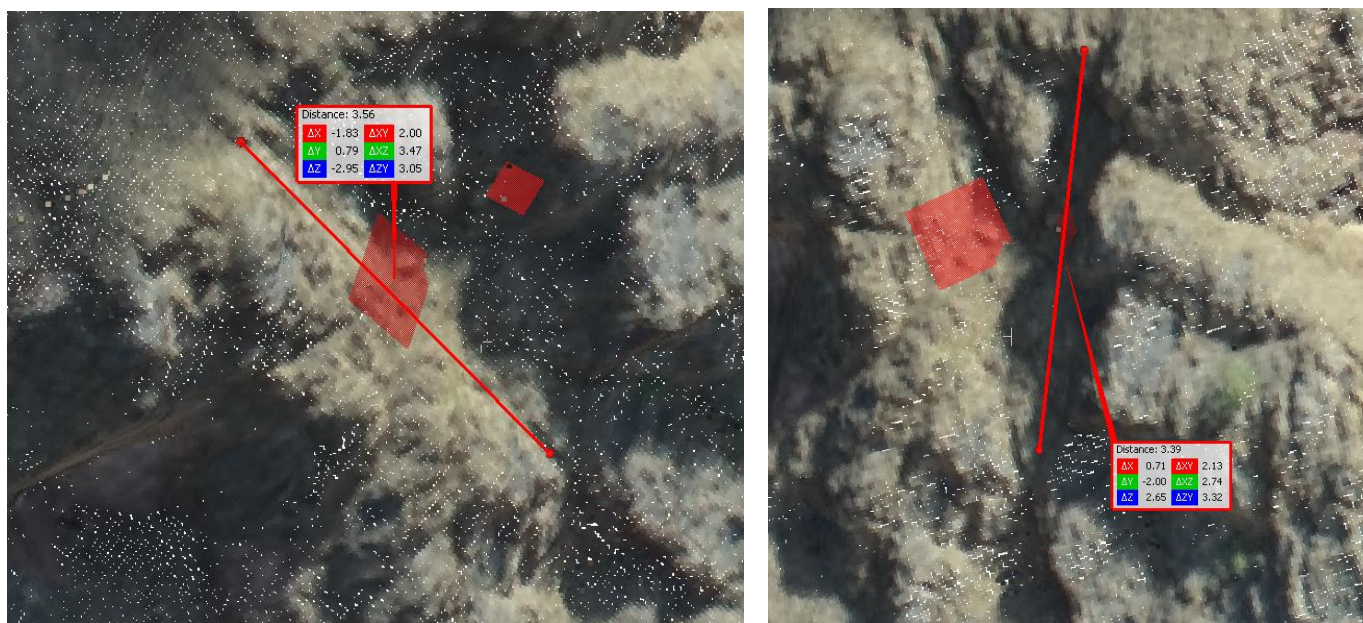
Βαθμονόμηση Βραχώμαζας	TE1-Τύπος III	TE2-Τύπος VIII	TE3-Τύπος VI	TE4-Τύπος VII
Περιγραφή	Φλύσσης: Μέτρια διαταραγμένος ψαμμίτης με λεπτές ενστρώσεις ιλυολίθων	Έντονα διαταραγμένη – πτυχωμένη βραχώμαζα, η οποία διατηρεί τη δομή της και δεν έχει παραμορφωθεί – διατηρείται σε μεγάλο βαθμό και αποτελείται από ιλυόλιθο με ενστρώσεις ψαμμίτη.	Μέτρια Διαταραγμένος ιλυόλιθος με λεπτές ενστρώσεις ψαμμιτών	Έντονα διαταραγμένη – πτυχωμένη βραχώμαζα, η οποία διατηρεί τη δομή της και αποτελείται από εναλλαγές ψαμμίτη και ιλυολίθου σε ίσες περίπου αναλογίες.
Παράμετροι άρρηκτου βράχου				
Λιθολογία	Ψαμμίτης		Ιλυόλιθος	
Ειδικό βάρος - γ (kN/m ³)	25		23	
Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη UCSi (Mpa)	74.5		32	
Ei (Gra)	10.47		7.84	
MR	140		245	
m _i	17		7	
ϕ b (degrees)	32.7		28	
ϕ ασυνεχειών (degrees)	40.38		31.5	
Συνοχή φυσικών ασυνεχειών c (kPa)	26.1		0	
JCS (Mpa)	68		20 (στρώση) - 22.6 (διακλαση) - 19 (διάτμηση)	
JRC	4.5		4.5	
Παράμετροι άρρηκτου φλύσχη	Άρρηκτος Φλύσσης (90% Ψαμμίτης, 10% Ιλυόλιθος)	Άρρηκτος Φλύσσης (10% Ψαμμίτης, 90% Ιλυόλιθος)	Άρρηκτος Φλύσσης (20% Ψαμμίτης, 80% Ιλυόλιθος)	Άρρηκτος Φλύσσης (50% Ψαμμίτης, 50% Ιλυόλιθος)
Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη UCSi (Mpa)	70.25	34.76	40.5	45.8
Ei (Gra)	10.20544	7.89	8.37	8.11
GSI	50-55	25-30	35-40	30-35
m _i	16	7.66	9	10.3
Παράμετροι βραχώμαζας	Βραχώμαζα Τύπος III	Βραχώμαζα Τύπος VIII	Βραχώμαζα Τύπος VI	Βραχώμαζα Τύπος VII
σ_{cm} (Mpa)	5.19	0.519	1.109	0.904
γωνία τριβής βραχώμαζας ϕ	57.46	4.65	4.41	4.64
συνοχή βραχώμαζας c (kPa)	839	11925	24114	24989
ύψος πρσανούς (m)	50.00	50	100	100
E _m (Gra)	3.71	0.549	1.087.9	0.777

6. Αναλύσεις Ευστάθειας

6.1 Μικροτεκτονική ανάλυση ασυνεχειών

Όπως έχει αναλυθεί και σε προηγούμενα κεφάλαια η ευστάθεια του βραχώδους πρανούς εξαρτάται αρκετά από το σύστημα ασυνεχειών που συναντώνται επί του πρανούς. Επομένως κατά την τεχνική επίσκεψη στην θέση έρευνας πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις του προσανατολισμού των ασυνεχειών προς όλο το μήκος του πρανούς.

Η συλλογή των τεκτονικών στοιχείων κατά την υπαίθρια έρευνα έγινε, σε βραχώδεις εμφανίσεις του υποβάθρου. Για κάθε μία περιοχή λήφθηκαν με τη χρήση γεωλογικής πυξίδας συμβατικές μετρήσεις των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των τεκτονικών ασυνεχειών στην βάση των εξεταζόμενων πρανών, ενώ για τα ανώτερα δυσπρόσιτα τμήματα των πρανών εξήχθησαν στοιχεία προσανατολισμού των ασυνεχειών από ψηφιακές μετρήσεις επί του τρισδιάστατου νέφους σημείων (βλ. σχήμα 76).

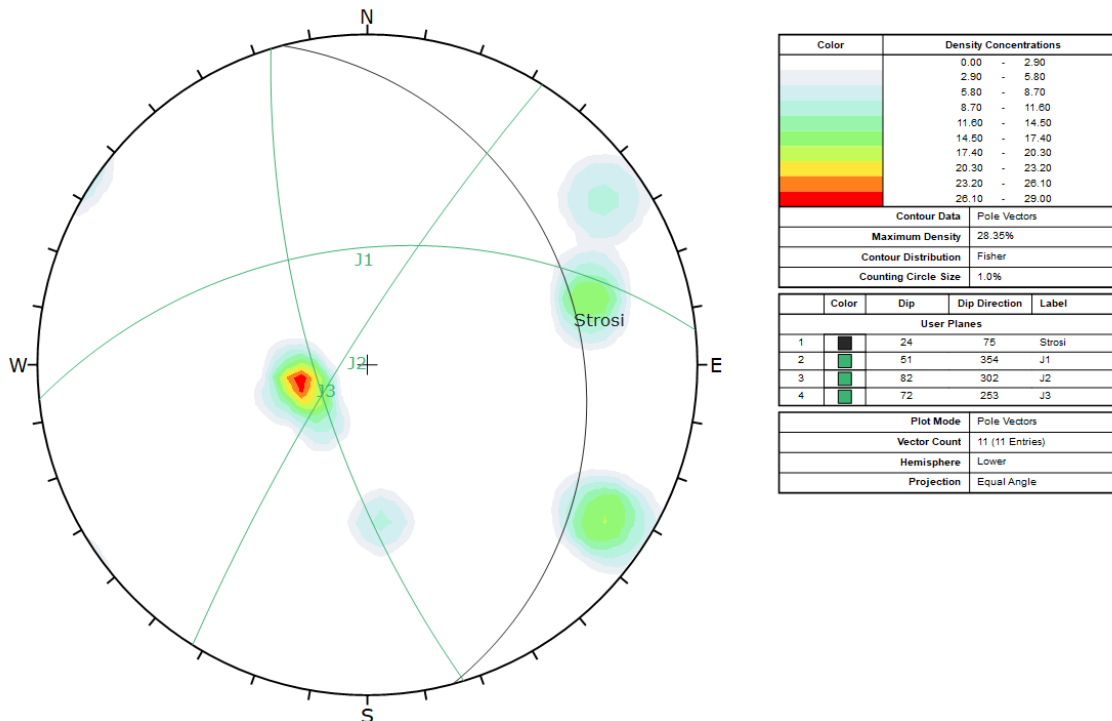


Σχήμα 76. Μέτρηση μήκος ασυνεχειών μέσω του προγράμματος CloudCompare

Παρακάτω παρουσιάζεται τα αποτελέσματα μίας τυπικής στατιστικής επεξεργασίας για το πρανές στην ΒΑ περιοχή. Οι υπόλοιποι υπολογισμοί παρουσιάζονται αναλυτικότερα στο παράρτημα Γ.

Η στατιστική επεξεργασία στον Φλύσχη ΤΕ1 στην ΒΑ περιοχή αποκαλύπτει την ύπαρξη τριών (3) συστημάτων οικογενειών διακλάσεων (J1: 51°/354°, J2:

82°/302°, J3: 72°/253°). Επιπλέον, διακρίνεται μια επιφάνεια στρώσης με προσανατολισμό 24°/075°.



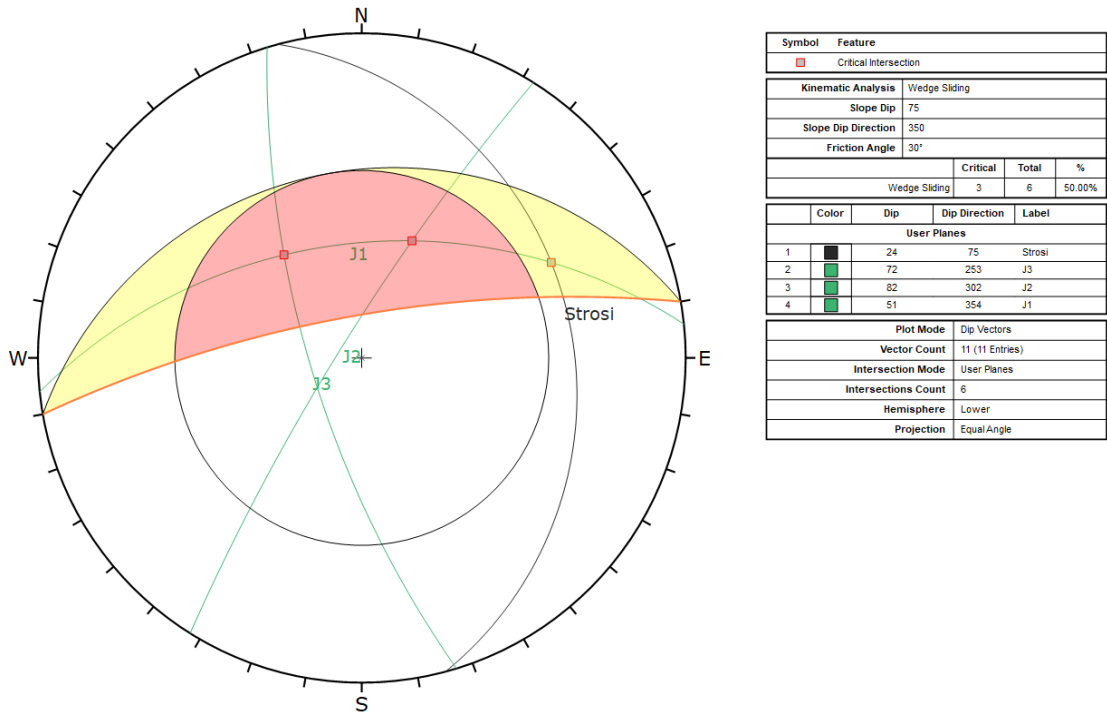
Σχήμα 77. Κύρια επίπεδα ασυνεχιών στον Φλύσχη TE1 στην Βορειοανατολική περιοχή

6.2 Κινηματικές αναλύσεις

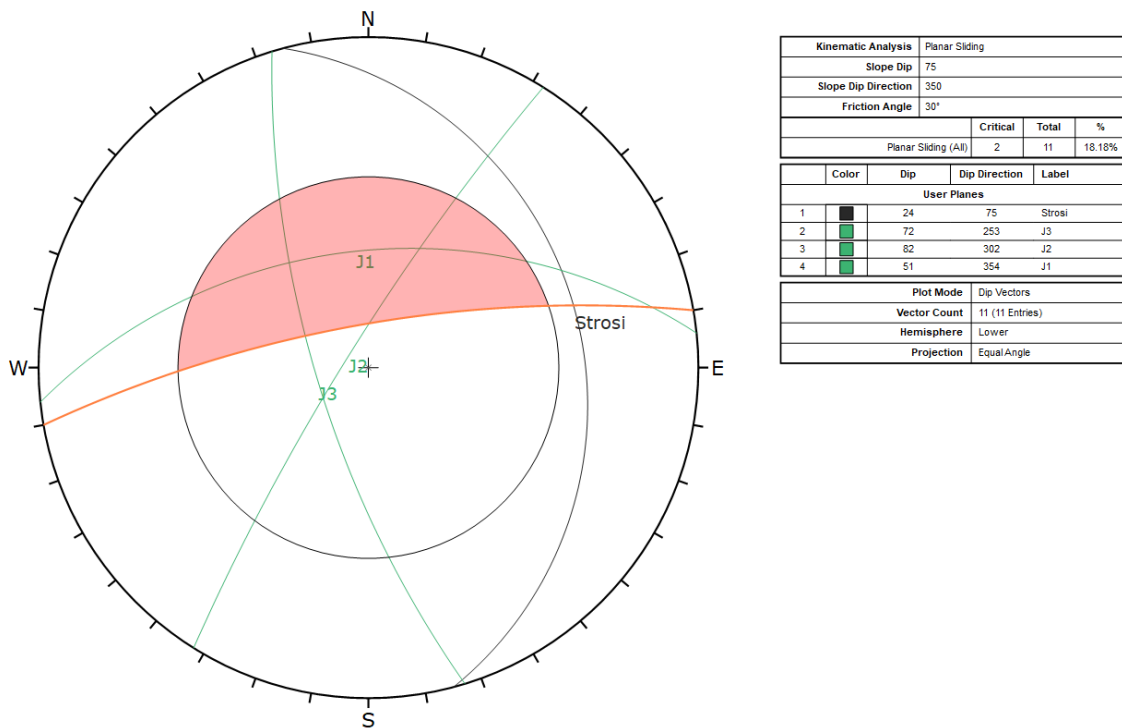
Η κινηματική ανάλυση των συστημάτων ασυνεχιών έγινε μέσω του προγράμματος Dips της Rocscience. Μέσω της στατιστικής επεξεργασίας των μετρήσεων του πεδίου έγινε εκτίμηση των κύριων συστημάτων ασυνεχιών. Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε η κινηματική ανάλυση των πρυνών. Παρακάτω παρουσιάζονται τα στερεογραφήματα με τα κύρια επίπεδα ασυνεχιών και οι κινηματικές αναλύσεις των πρυνών.

Για τον Φλύσχη TE1 της ΒΑ περιοχής συνοπτικά εκτιμήθηκαν μέσω των κινηματικών αναλύσεων:

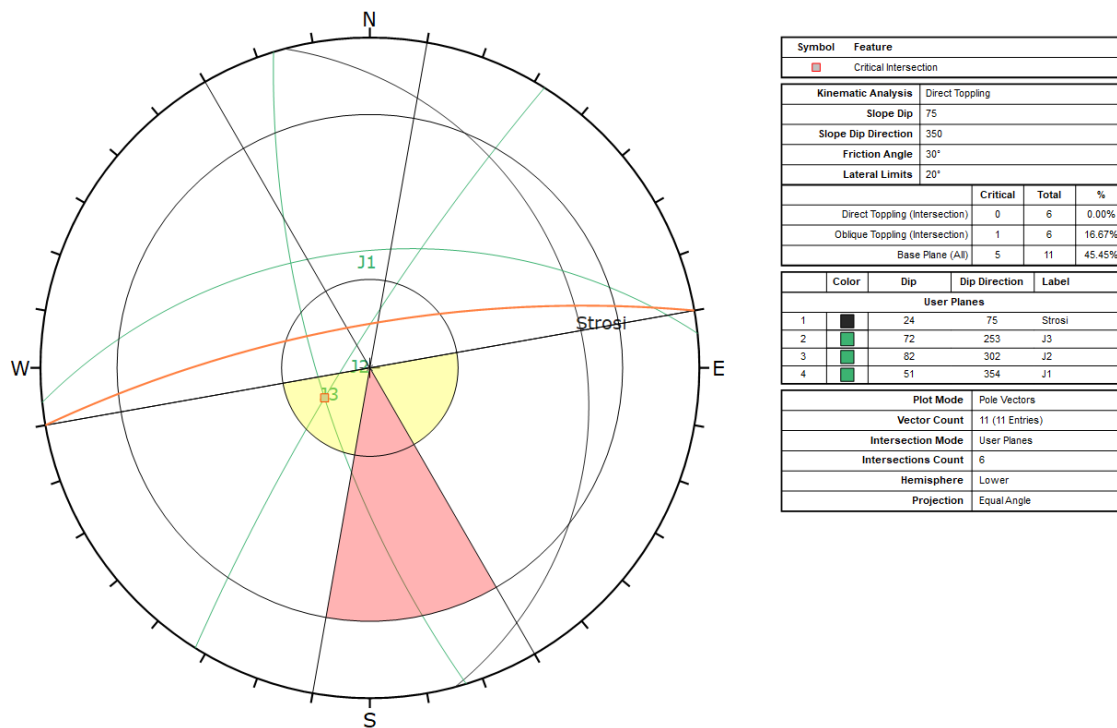
- Α) Δύο πιθανές σφηνοειδής ολισθήσεις ασυνεχιών
- Β) Μία επίπεδη ολισθηση επί της J1 ασυνέχειας
- Γ) Μία ανατροπή σφήνας



Σχήμα 78. Κινηματική ανάλυση για σφηνοειδή ολίσθηση στον Φλύοχη TE1 στην βορειοανατολική περιοχή



Σχήμα 79. Κινηματική ανάλυση για επίπεδη ολίσθηση στον Φλύοχη TE1 στην βορειοανατολική περιοχή



Σχήμα 80. Κινηματική ανάλυση για ανατροπή στον Φλύοχη TE1 στην βορειοανατολική περιοχή

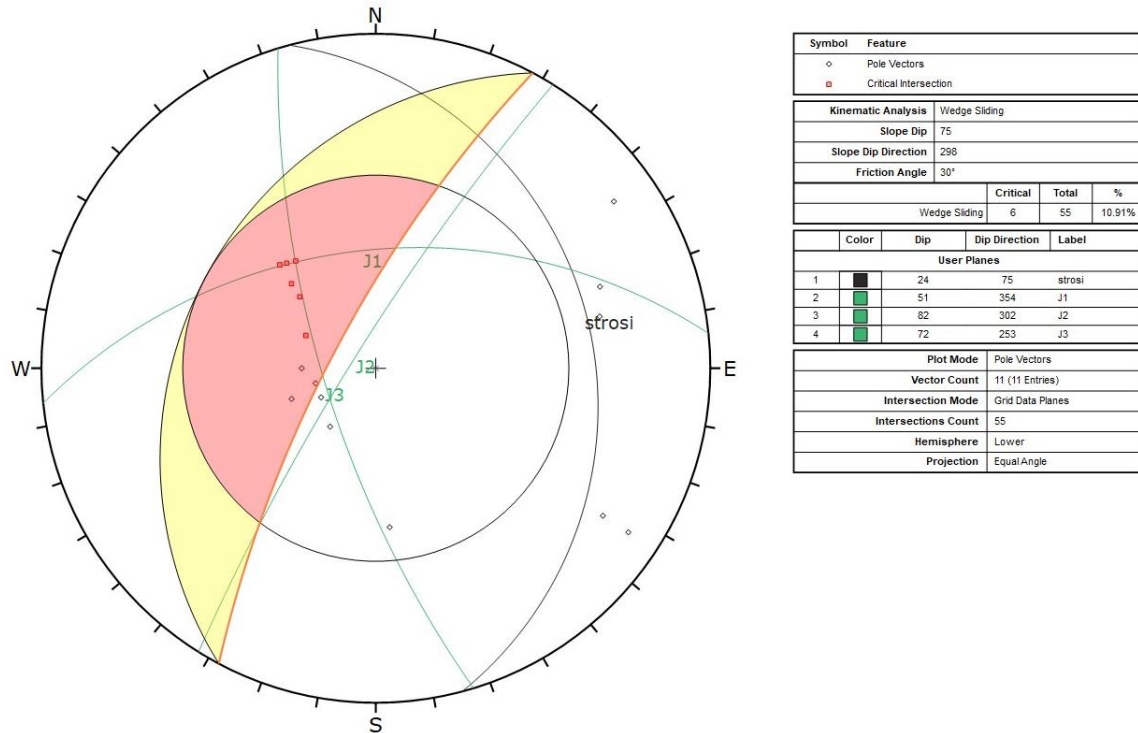
Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως το μέγιστο τέμαχος που καταγράφηκε 6.3m^3 αστόχησε με ανατροπή της σφήνας των τεμνόμενων ασυνεχειών J1 και J2 (βλ. σχήμα 81)



Σχήμα 81. Επίπεδα ασυνεχειών J1 και J2 στο τμήμα που εκτιμήθηκε η μέγιστη βραχοκατάπτωση

Για τον Φλύσχη TE2 της βόρειας περιοχής περιληπτικά εκτιμήθηκαν μέσω των κινηματικών αναλύσεων:

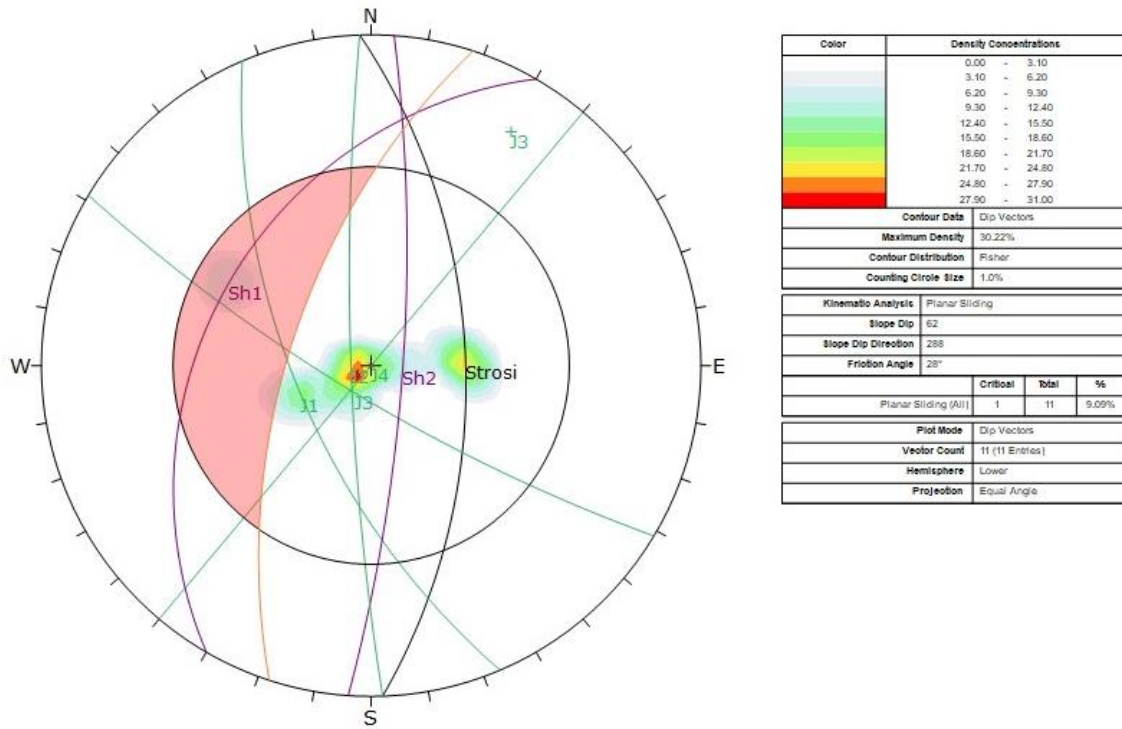
A) Μία πιθανή σφηνοειδής ολίσθηση ασυνεχειών



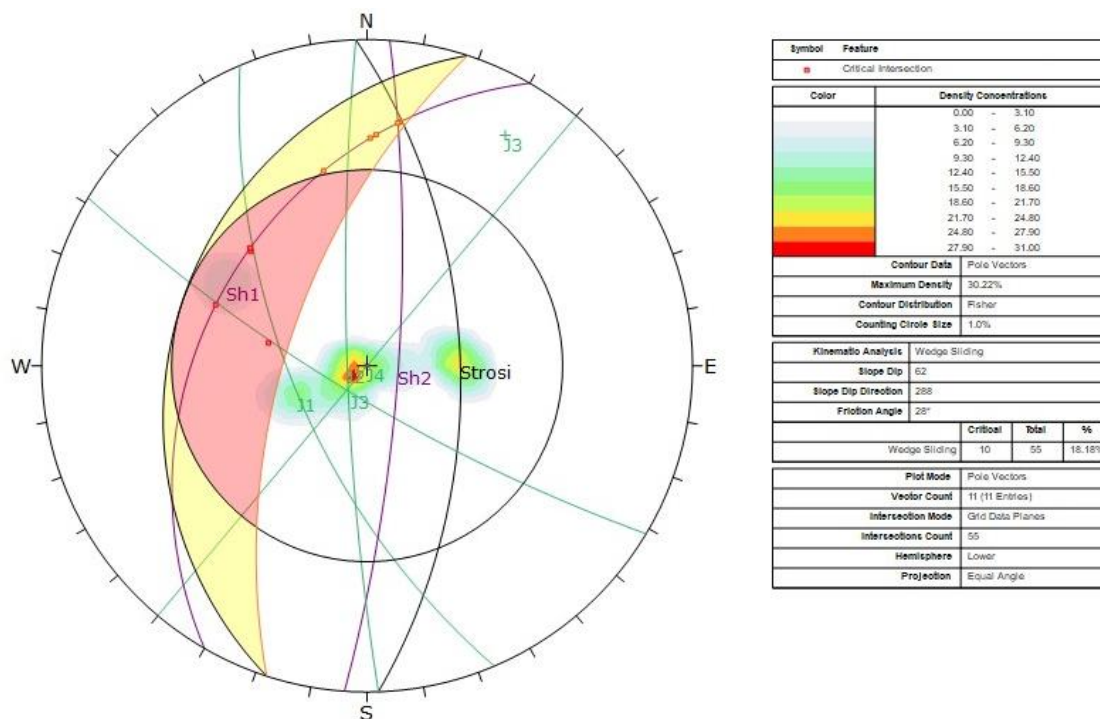
Σχήμα 82. Κινηματική ανάλυση για σφηνοειδής ολίσθηση στον Φλύσχη TE2 στην βόρεια περιοχή

Για τον Φλύσχη TE4 της βόρειας περιοχής περιληπτικά εκτιμήθηκαν μέσω των κινηματικών αναλύσεων:

- A) Δύο σφηνοειδείς ολισθήσεις ασυνεχειών
- B) Μία επίπεδη ολίσθηση



Σχήμα 83. Κινηματική ανάλυση για επίπεδη ολίσθηση στον Φλύσχη TE4 στην βόρεια περιοχή



Σχήμα 84. Κινηματική ανάλυση για σφηνοειδής ολίσθηση στον Φλύοχη ΤΕ4 στην βόρεια περιοχή

6.3 Ανάλυση ευστάθειας σφηνοειδών και επίπεδων ολισθήσεων

Η εκτίμηση της ευστάθειας των σφηνών πραγματοποιήθηκε μέσω του προγράμματος swedge της Rocscience. Για την ανάλυση ευστάθειας εξετάστηκαν 2 συνδυασμοί φορτίσεων:

- 1) Στατικές συνθήκες με υδατική φόρτιση 50-ετίας με πλήρωση ασυνεχειών με νερό σε ποσοστό 50%
- 2) Σεισμικές συνθήκες με υδατική φόρτιση 50-ετίας με πλήρωση ασυνεχειών με νερό σε ποσοστό 25%

Όσο αφορά τις σεισμικές φορτίσεις σύμφωνα με τον EC8.5, οι σεισμικές επιταχύνσεις σχεδιασμού για ευστάθεια πρηνών υποδιπλασιάζονται. Επομένως:

$$a_h = 0.5a_g = 0.12g$$

$$a_v = 0.5a_h = 0.06g$$

6.4 Αποτελέσματα αναλύσεων ευστάθειας

Για στατικές συνθήκες με υδατική φόρτιση θεωρήθηκαν αποδεκτοί συντελεστές ασφαλείας άνω του 1.3, ενώ για τις σεισμικές φορτίσεις θεωρήθηκαν αποδεκτοί συντελεστές άνω του 1.

Η ευστάθεια των σφηνών σε ΤΕ1 υπολογίστηκαν για όγκο 9m^3 ενώ για τις σφηνοειδείς ολισθήσεις σε ΤΕ2, ΤΕ3 και ΤΕ4 υπολογίστηκαν μέσω του προγράμματος Cloudcompare τα μήκη των ασυνεχειών (βλ. σχήμα 76).

Οι επίπεδες ολισθήσεις αγνοήθηκαν στην ανάλυση, επειδή τα πρίσματα που δημιουργούνταν ήταν πολύ μικρά.

Στην περιοχή +000.00 έως +040.00 δεν βρέθηκε κίνδυνος ανισότροπων ολισθήσεων. Στην περιοχή +040.00 έως και +160.00 κρίσιμες διευθύνσεις πρανών κρίθηκαν στη Χ.Θ. +115.00 ($75^\circ/298^\circ$), στη Χ.Θ. +110.00 ($82^\circ/302^\circ$) και στα Χ.Θ. (75/350). Για την αντιστήριξη των βραχοσφηνών προτείνονται παθητικά αγκύρια μήκους 4m διατεταγμένα σε κάναβο 2x2 και τοποθετημένα με κλίση 15° . Τα διατρήματα των αγκυριών χρειάζεται να γεμίσουν πλήρως με ένεμα ώστε να εξασφαλίζεται η πλήρης φέρουσα ικανότητα. Στον πίνακα 30 παρουσιάζονται οι αναλύσεις ευστάθειας σφηνών, ενώ στον πίνακα 31 παρουσιάζονται οι ιδιότητες των προτεινόμενων αγκυριών.

Για τις ολισθήσεις των ΤΕ4, ΤΕ3 και ΤΕ2 που βγαίνουν με συντελεστή ασφαλείας μικρότερο της μονάδας δεν προτάθηκαν μέτρα, διότι κρίθηκε πως 1^{ov} το γεωυλικό δεν καταλήγει στην οδοποιία και 2^{ov} κατά την αστοχία θα διαλυθεί λόγω ιλυολιθικής λιθολογίας.

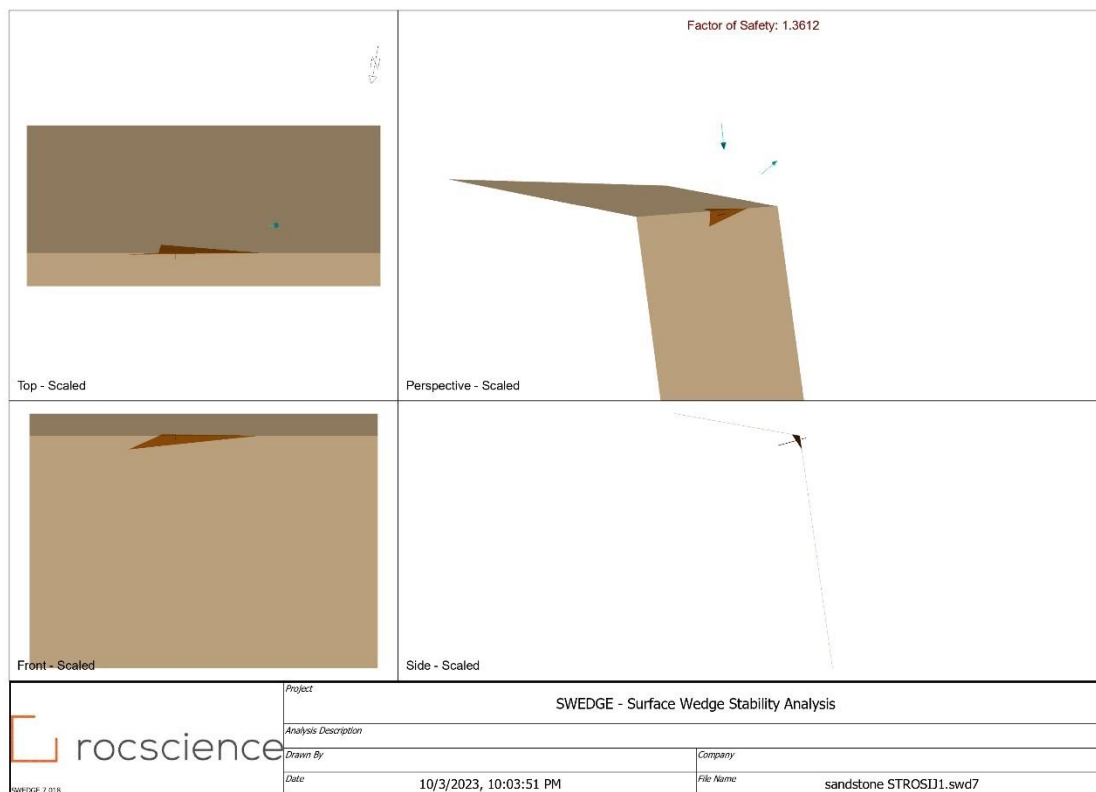
Πίνακας 30. Αποτελέσματα αναλύσεων ευστάθειας.

Αουνέχεια	Φόρτιση	Απαιτούμενος Σ.Α.	Χωρίς αγκύρια	Αγκύριο	Παρατηρήσεις
B Φλύσξης TE2 J1 J3 75°/298° Χ.Θ. +115.00	Στατικές	-	0.8815	-	Δεν καταλήγει στην οδοποιία
	Σεισμικές	-	0.9673	-	
B Φλύσξης TE1 J1J2 82°/302° Χ.Θ. +110.00	Στατικές	1.3	0.7721	1.3813	-
	Σεισμικές	1.0	0.8523	1.5188	
B Φλύσξης TE1 J1J3 82°/302° Χ.Θ. +110.00	Στατικές	-	1.1154	1.6954	Δεν καταλήγει στην οδοποιία
	Σεισμικές	-	1.2443	-	
B Φλύσξης TE1 Στρώση J1 75°/350° Χ.Θ. +120.00	Στατικές	1.3	0.7606	1.3612	-
	Σεισμικές	1.0	0.8526	1.499	
B Φλύσξης TE1 J1J3 75°/350° Χ.Θ. +120.00	Στατικές	1.3	1.1654	1.7802	-
	Σεισμικές	1.0	1.2474	-	
N Φλύσξης TE4 J1 J3	Στατικές	-	0.9211	-	Δεν καταλήγει στην οδοποιία
	Σεισμικές	-	0.8392	-	
N Φλύσξης TE4 Sh1 j1	Στατικές	-	0.8341	-	Δεν καταλήγει στην οδοποιία
	Σεισμικές	-	1.0426	-	

Πίνακας 31. Ιδιότητες αγκυρίου

Ιδιότητες αγκυρίου	
Μήκος αγκυρίου (m)	4
Μήκος Πάκτωσης (m)	4
Γωνία (°)	15
Εφελκυστική αντοχή (kN)	200
Φέρουσα Πλάκα (kN)	100
Συνάφεια (kN/m)	300

Παρακάτω παρουσιάζεται μια τυπική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα swedge της Rocscience.



Σχήμα 85 Διατομή Χ.Θ. 0+120. Ενδεικτικά γραφικά αποτελέσματα ανάλυσης για τον συνδυασμό της διάκλασης J1 και Στρώσης. Στατικές συνθήκες με υδατική φόρτιση 50-ετίας και χρήση των προτεινόμενων αγκυριών.

7. Τρισδιάστατες τροχιακές αναλύσεις βραχοκαταπτώσεων

7.1 Καταγραφή καταπτώμενων όγκων και προτεινόμενοι όγκοι για τις αναλύσεις

7.1.1 Μεθοδολογία

Προκειμένου να οριστούν τα βασικά και αναγκαία γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ασταθών όγκων, έγινε χρήση των εργαλείων λεπτομερούς αποτύπωσης. Τα χαρακτηριστικά των επιφανών τεμαχών όπως η θέση, ο όγκος, το σχήμα και οι επιμέρους διαστάσεις, προσδιορίστηκαν με σημαντική ακρίβεια, μέσω της ψηφιακής επεξεργασίας.

Πιο αναλυτικά επί των τρισδιάστατων νεφών σημείων εντοπίστηκαν και ογκομετρήθηκαν:

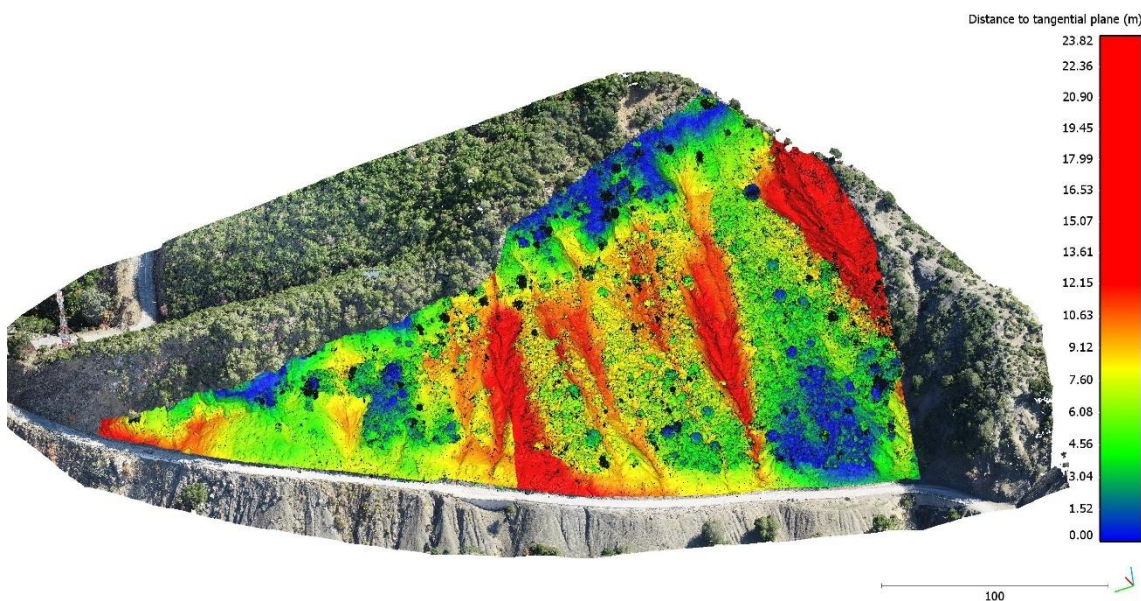
1. Τεμάχη πεσομένα στην παρεία του πρανούς, στα ερείσματα και επί του οδοστρώματος του δρόμου.
2. Επικρεμάμενα τεμάχη και αυλακώσεις από καταπτώσεις, επί του πρανούς.
3. Τεμάχη που προέκυψαν από αναλύσεις ανίχνευσης μεταβολών (change detection) από την σύγκριση νεφών σημείων διαφορετικών χρονικών περιόδων (2021-10 με 2023-11).

Επιπλέον, για τον εντοπισμό επικρεμάμενων τεμαχών αξιοποιήθηκαν τα αποτελέσματα της τρισδιάστατης αποτύπωσης του πρανούς καθώς επί αυτών αποτυπώνονται εξάρσεις και υβώματα του πρανούς.

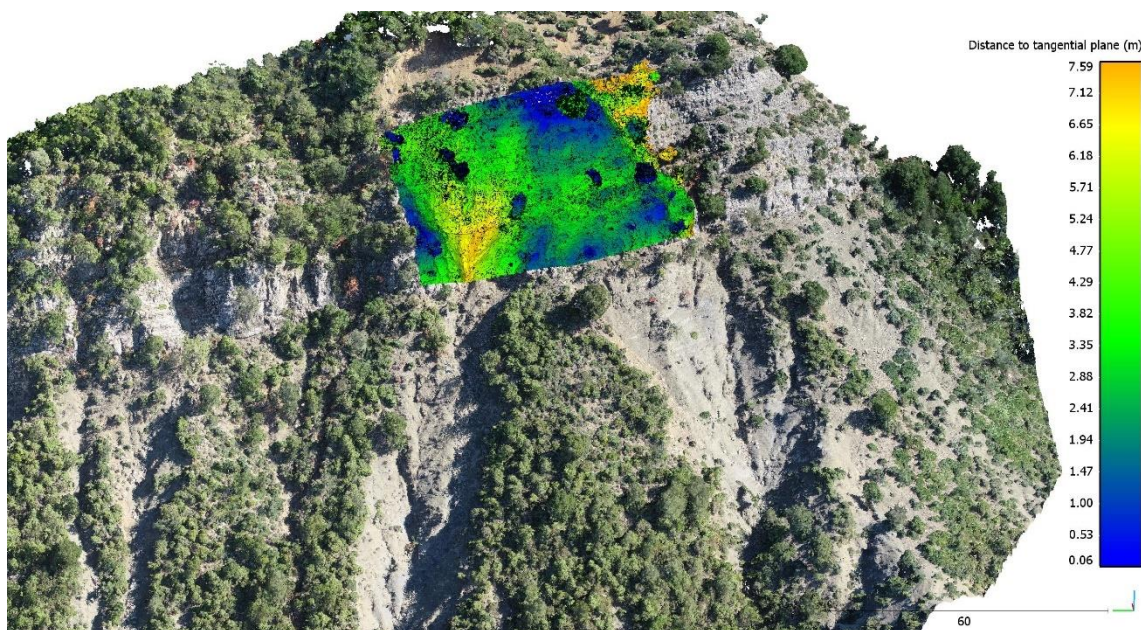
Οι εξάρσεις των πρανών υποδηλώνουν περιοχές ενδεχόμενων αστοχιών καθώς αφορούν, συνήθως, σε επικρεμάμενα τεμάχη. Από την άλλη μεριά, τα υβώματα δεν αποτελούν κατ' ανάγκη και αφ' εαυτού περιοχές ενδεχόμενων αστοχιών, αλλά συνήθως αφορούν σε προηγούμενες εκδηλωθείσες αστοχίες και δημιουργούν τις προϋποθέσεις για την εκδήλωση νέων αστοχιών περιμετρικά τους, πλευρικά και άνωθεν, καθώς δημιουργούν «ελεύθερες επιφάνειες» ήτοι, απώλεια στήριξης της βραχώμαζας με την οποία γειτνιάζουν και συνεπώς επηρεάζουν ευρύτερα την ευστάθεια του πρανούς.

Παρακάτω, παρατίθενται οι τρισδιάστατες ψηφιακές όψεις βάθους του συνολικού πρανούς αλλά και των ανώτερων ψαμμιτικών πάγκων, κοντά στη στέψη του πρανούς. Επί των όψεων, η χρωματική κλίμακα (από το μπλε χρώμα στο κόκκινο χρώμα) υποδηλώνει την απόσταση της επιφάνειας του πρανούς από

το πρανές αναφοράς. Οι αποστάσεις αυτές αποτυπώνονται συγκριτικά με τέτοιο τρόπο ώστε να φαίνονται σαφώς οι περιοχές των εξάρσεων του πρανούς - επικρεμάμενα τεμάχια (μπλε χρώμα) και των υβωμάτων του πρανούς - υποσκαφές (κόκκινο χρώμα).



Σχήμα 86. Τρισδιάστατη ψηφιακή όψη βάθους του συνολικού πρανούς

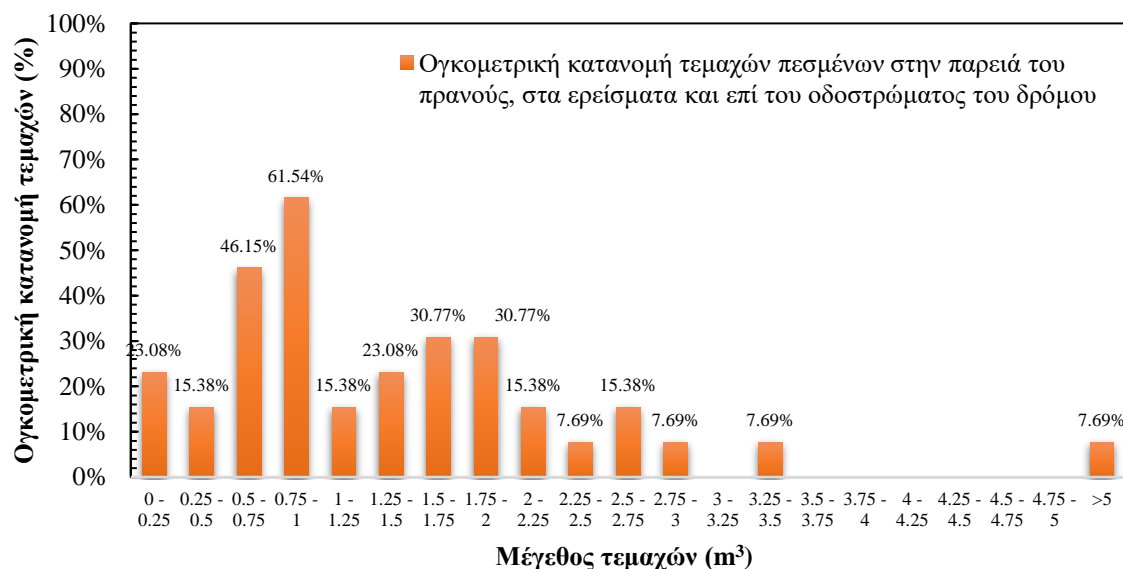


Σχήμα 87. Τρισδιάστατη ψηφιακή όψη βάθους των ψαμμιτικών πάγκων κοντά στη στέψη του πρανούς

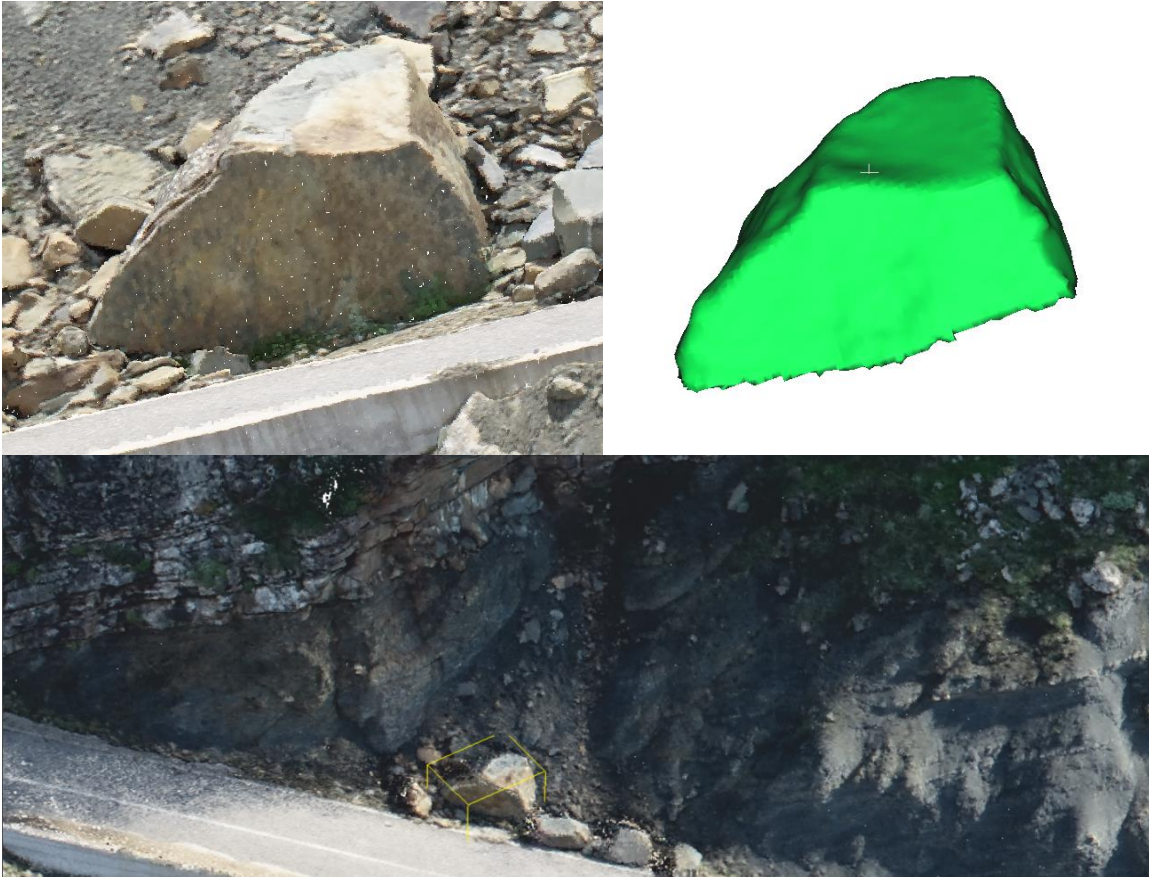
7.1.2 Κατανομή όγκων – Μέγιστος όγκος ανάλυσης

Αρχικά στην παρειά του πρανούς, στα ερείσματα και επί του οδοστρώματος του δρόμου ογκομετρήθηκαν τεμάχια από παρελθοντικά βραχοκαταπτώτικα γεγονότα.

Με βάση τις ογκομετρήσεις σε αυτά τα τεμάχια, το μέσο μέγεθος των μπλοκ υπολογίστηκε της τάξης των $1,37 \text{ m}^3$ με τυπική απόκλιση $1,13 \text{ m}^3$, ενώ τα μεγέθη τους κυμαίνονται από περίπου $0,1 \text{ m}^3$ έως $6,30 \text{ m}^3$.



Σχήμα 88. Ογκομετρική κατανομή τεμαχίων πεσμένων στην παρειά του πρανούς, στα ερείσματα και επί του οδοστρώματος.



Σχήμα 89. Τέμαχος όγκου 6.29 m³ πεσμένο στην παρειά του πρανούς. Αριστερά: Νέφος σημείων τρισδιάστατου αντικειμένου βραχοκατάπτωσης. Δεξιά: τρισδιάστατο μοντέλο πλέγματος (mesh model) αντικειμένου βραχοκατάπτωσης για ακριβείς υπολογισμούς όγκου και σχήματος

Ο μέγιστος όγκος που βρέθηκε επί της οδοποιίας και φαίνεται πως είναι τμήμα της βραχώμαζας που απουσιάζει εκτιμήθηκε 6.3m³.

Παράλληλα, προτού ξεκινήσει η διαχρονική παρακολούθηση της θέσης έρευνας είχε εκτιμηθεί βάσει μαρτυριών από τους τοπικούς φορείς πως έλειπε τέμαχος περίπου 26m^3 (βλ. Σχήμα 90), το οποίο εκτιμάται πως είχε αστοχήσει σε φάσεις τμηματικά.

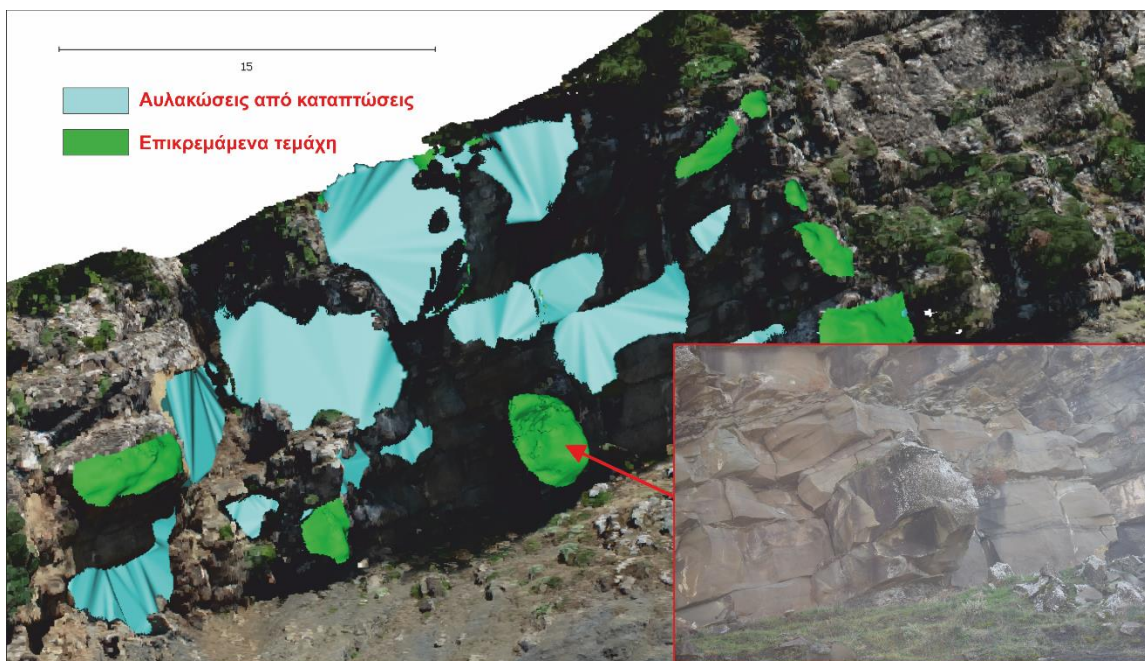


Σχήμα 90. Τμήμα Βραχώμαζας που εκτιμάται πως είχε αστοχήσει σταδιακά

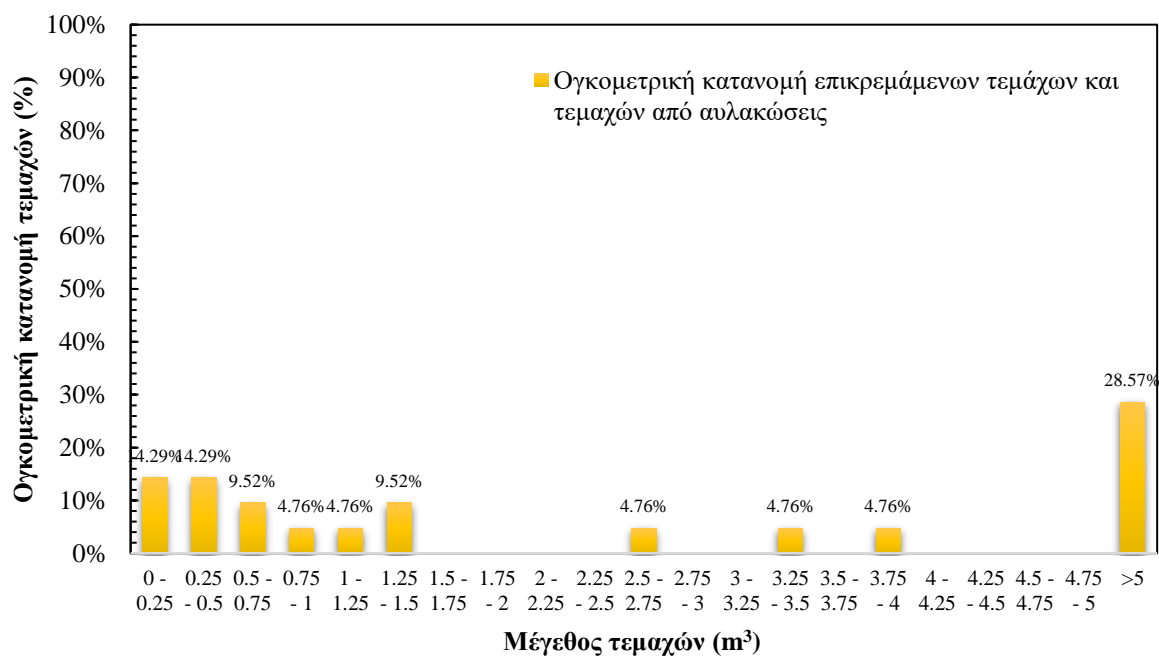
Για αυτό τον λόγο, στη συνέχεια ογκομετρήθηκαν επικρεμάμενα τεμάχη και αυλακώσεις από καταπτώσεις, επί του πρανούς.

Με βάση τις ογκομετρήσεις στις περιοχές αυτές, εκτιμήθηκε μέσο μέγεθος τεμαχών της τάξης των $4,15\text{ m}^3$ με τυπική απόκλιση $6,00\text{ m}^3$, ενώ τα μεγέθη τους κυμαίνονται από περίπου $0,1\text{ m}^3$ έως $26,00\text{ m}^3$.

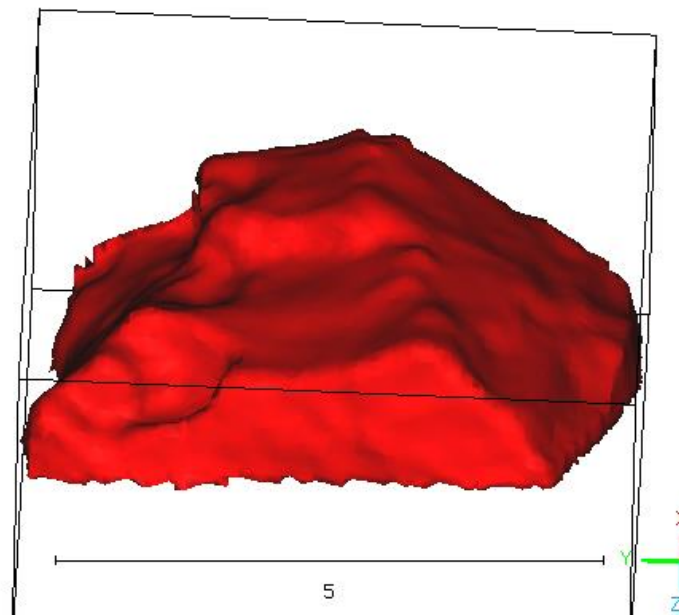
Φυσικά η μέγιστη τιμή των 26 m^3 εκτιμάται ότι έγινε τμηματικά, δίνοντας αστοχίες αρκετά μικρότερου όγκου, και δεν έλαβε χώρα ένα ενιαίο παροξυσμικό βραχοκαταπτωτικό γεγονός. Συνεπώς οι ογκομετρήσεις στις εν λόγω θέσεις είναι της τάξης των $3,11\text{ m}^3$ με τυπική απόκλιση $3,50\text{ m}^3$, ενώ τα μεγέθη τους κυμαίνονται από περίπου $0,1\text{ m}^3$ έως $\sim 10,00\text{ m}^3$.



Σχήμα 91. Επικρεμάμενο τεμάχος όγκου 8 m³ στην περιοχή ακριβώς πάνω από την επαφή του ψαμμίτη με τον λυόλιθο.



Σχήμα 92. Ογκομετρική κατανομή επικρεμάμενων τεμαχών και τεμαχών από αυλακώσεις



Σχήμα 93. Γεωμετρία τεμάχους $26m^3$ το οποίο απουσιάζει.



Σχήμα 94. Φωτογραφική αποτύπωση της θέσης όπου προέκυψε το μέγιστο μέγεθος τεμάχους ψαμμίτη της τάξης των 26 m^3 βάση της γεωμετρίας των αυλακώσεων από κατάπτωση.

Τέλος, ογκομετρήθηκαν τεμάχια που προέκυψαν από αναλύσεις ανίχνευσης μεταβολών (change detection) από την σύγκριση νεφών σημείων διαφορετικών χρονικών περιόδων (2021-10 με 2023-11).

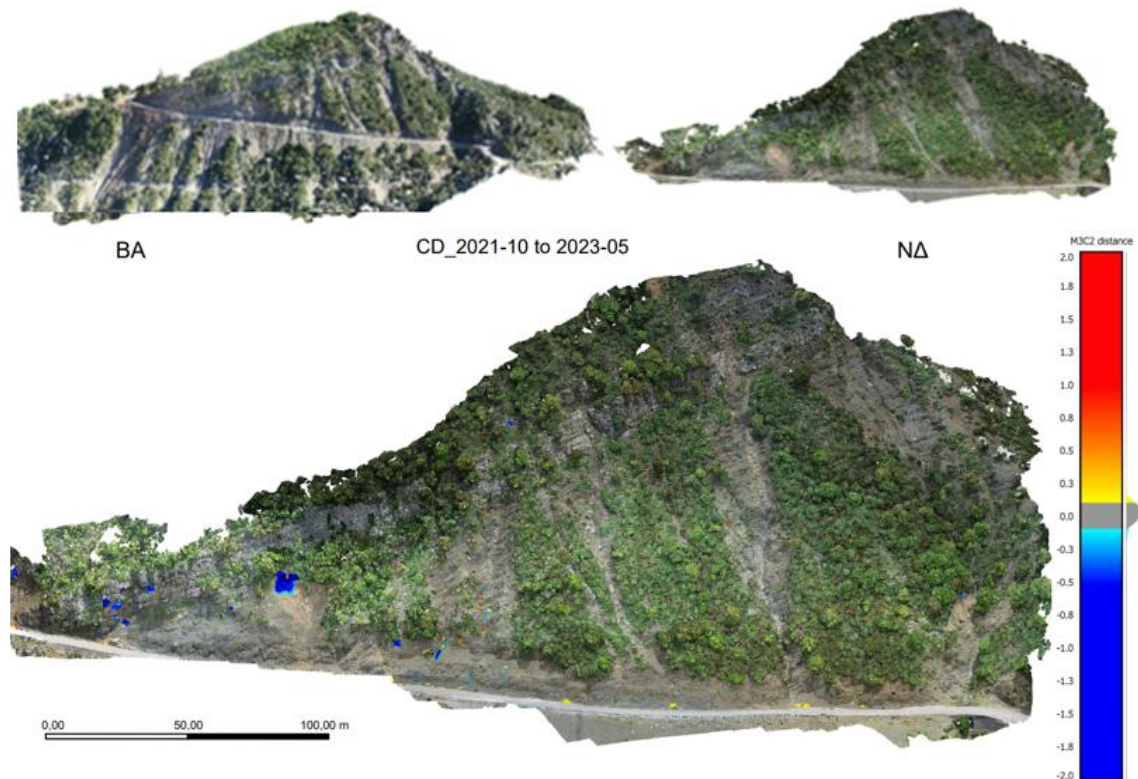
Την περίοδο του Μαΐου του 2023, στα πλαίσια της παρακολούθησης, της περιοχής έρευνας, από την ερευνητική ομάδα του Τομέα Γεωτεχνικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, με εναέριες τεχνικές φωτογραμμετρίας, εκτελέστηκε επιπλέον αεροφωτογραμμετρική έρευνα και αποτύπωση της περιοχής.

Πιο αναλυτικά, στις 26 Μαΐου του 2023 η περιοχή της κατολίθησης αποτυπώθηκε φωτογραμμετρικά, με ένα σύνολο 260 αλληλοεπικαλυπτόμενων φωτογραφιών υψηλής ανάλυσης, με διάταξη πτήσης υπό γωνία, με τελική διακριτική ικανότητα $1,12 \text{ cm/pix}$, με ένα αποδεκτό σφάλμα ανακατασκευής της τάξης του $5,00 \text{ cm}$.

Επιπλέον, στα πλαίσια της εν λόγω διατριβής, ήταν διαθέσιμο και ένα παλαιότερο point cloud της περιοχής, από αποτύπωση της τον Οκτώβριο του 2021.

Η τριοδιάστατη ανάλυση ανίχνευσης μεταβολών επιτελέστηκε για αυτά τα δυο μοντέλα (βλ. Σχήμα 95)

Για την εκτέλεση της ανάλυσης και την ανίχνευση των μεταβολών το νέφος σημείων, της περιόδου Μαΐου 2023, ευθυγραμμίστηκε με το νέφος αναφοράς του Οκτωβρίου του 2021, με ένα αποδεκτό σφάλμα ευθυγράμμισης της τάξης των 3,80 cm (εντός της ακρίβειας της μεθόδου παρακολούθησης). Οι διαχρονικές μεταβολές μεταξύ των νεφών σημείων υπολογίστηκαν μέσω του αλγορίθμου M3C2 με όριο ανίχνευσης στα 8,00 cm, για μέγιστη απόσταση μεταξύ των σημείων του τριοδιάστατου νέφους της τάξης των 3,00 cm, και με βεβαιότητα στο 95% (LoD95).



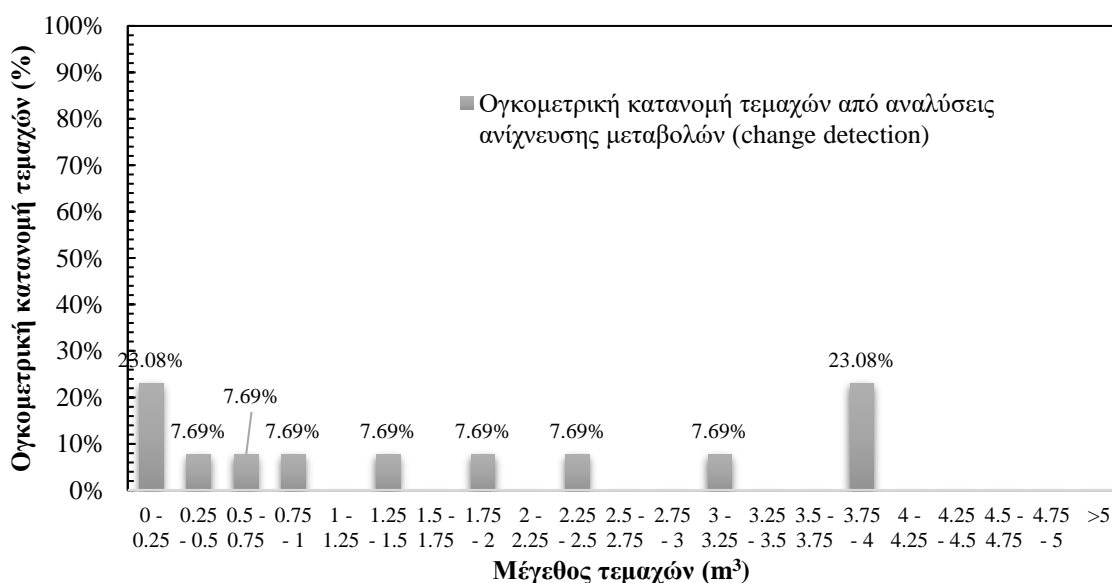
Σχήμα 95. Ανίχνευση μεταβολών για τη χρονική περίοδο Οκτωβρίου 2021 – Μαΐου 2023. Οι μεταβολές αποτυπώνονται, με ψυχρά χρώματα (μπλε), απώλεια υλικού, και με θερμότερα χρώματα (κίτρινα), προσθήκη υλικού.

Κατά τη χρονική περίοδο από τον Οκτώβριο 2021 έως τον Μάιο του 2023, η διαχρονική παρακολούθηση της εν λόγω θέσης επιβεβαίωσε τον μηχανισμό αστοχίας, όπως αναφέρεται στο κεφαλαίο 4. Ειδικότερα, στο βορειοανατολικό τμήμα του πρανούς, όπου παρατηρείται και το μεγαλύτερο πρόβλημα από τις καταπτώσεις της ψαμμιτικής βραχώμαζας, που υπέρκειται της ιλυολιθικής, σε διαφορετικά ύψη στο πρανές ανιχνεύτηκαν αρνητικές μεταβολές, οι οποίες συνδέονται με αποκολλήσεις και καταπτώσεις ψαμμιτικών ογκολίθων, μετρίου έως μεγάλου μεγέθους της τάξης έως και 4 m³.

Παρόμοιες αρνητικές μεταβολές έως και 20,00 m³ καταγράφηκαν και στις κορηματικές αποθέσεις του κεντρικού τμήματος του πρανούς, οι οποίες όμως δεν λήφθηκαν στην στατιστική επεξεργασία. Αρνητικές μεταβολές της τάξης μέχρι και του 1,00 m αποτυπώθηκαν και κατά μήκος των μισογαγγειών, όπως αναμενόταν, καθώς τα αποκολλημένα τεμάχια ψαμμίτη από τα υψηλότερα τμήματα του πρανούς ακολουθούν τροχιές ως ολισθήσεις κατά μήκος των μισογαγγειών με μικρές ταχύτητες και διαβρώνουν την εδαφοποιημένη ιλυολιθική βραχώμαζα.

Στο κεντρικό τμήμα του πρανούς, στα μεγαλύτερα υψομετρικά τμήματα, όπου επικρατούν οι ψαμμιτικοί πάγκοι, εντοπίστηκαν αστοχίες με όγκους της τάξεως των 2 m³. Στο τμήμα, όπου εντοπίζεται η ιλυολιθική βραχώμαζα, η μεγαλύτερη αστοχία σφηνοειδούς ολίσθησης, που καταγράφηκε είναι της τάξης των ~4 m³.

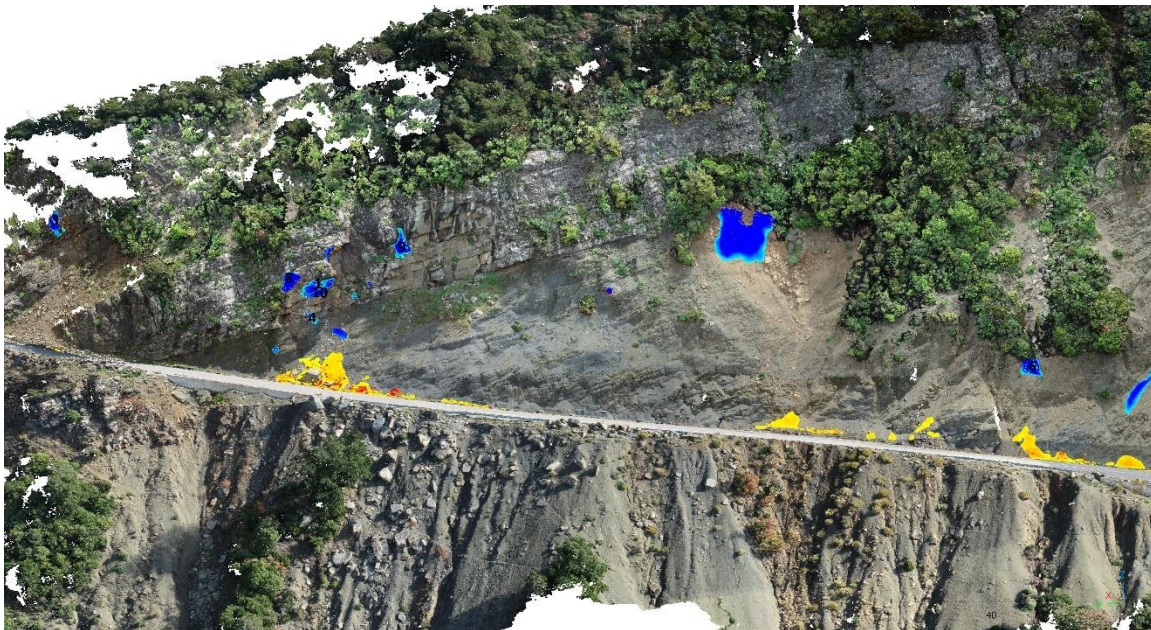
Το νοτιοδυτικό τμήμα είχε τοπικές ρηχές ολισθήσεις και διαβρώσεις κατά μήκος των μισογαγγειών.



Σχήμα 96. Ογκομετρική κατανομή τεμαχίων από αναλύσεις ανίχνευσης μεταβολών (change detection)

Τέλος, μέσω της παρακολούθησης του πρανούς, για το διάστημα αυτό, ~ 2 ετών και γνωρίζοντας, μέσω της ανίχνευσης των μεταβολών, την γεωμετρία και την αρχική θέση των τεμάχων που αποκολλήθηκαν, ήταν δυνατή η κατά προσέγγιση εκτίμηση της θέσης απόθεσης των βραχοτεμαχών. Επιπλέον, κατά την επιτόπου αυτοψία στην περιοχή κατάντη της οδού, και σε συγκεκριμένες θέσεις ήταν ορατά τεμάχη τα οποία εκτημήθηκαν πως έχουν προέλθει από καταπτώσεις και οι οποίες έχουν συμβεί πριν ξεκινήσει το πρόγραμμα της παρακολούθησης.

Επομένως μπορεί να γίνει σε αρχικό στάδιο μία αξιολόγηση των συντελεστών αναπήδησης της βραχώμαζας, με μέτρο σύγκρισης την αρχική και τελική θέση των βραχοτεμαχών που αποκολλήθηκαν.



Σχήμα 97. Ανίχνευση μεταβολών στο βορειοανατολικό τμήμα του πρανούς για τη χρονική περίοδο Οκτωβρίου 2021 – Μαΐου 2023. Οι μεταβολές αποτυπώνονται, με ψυχρά χρώματα (μπλε), απώλεια υλικού, και με θερμότερα χρώματα (κίτρινα), προσθήκη υλικού

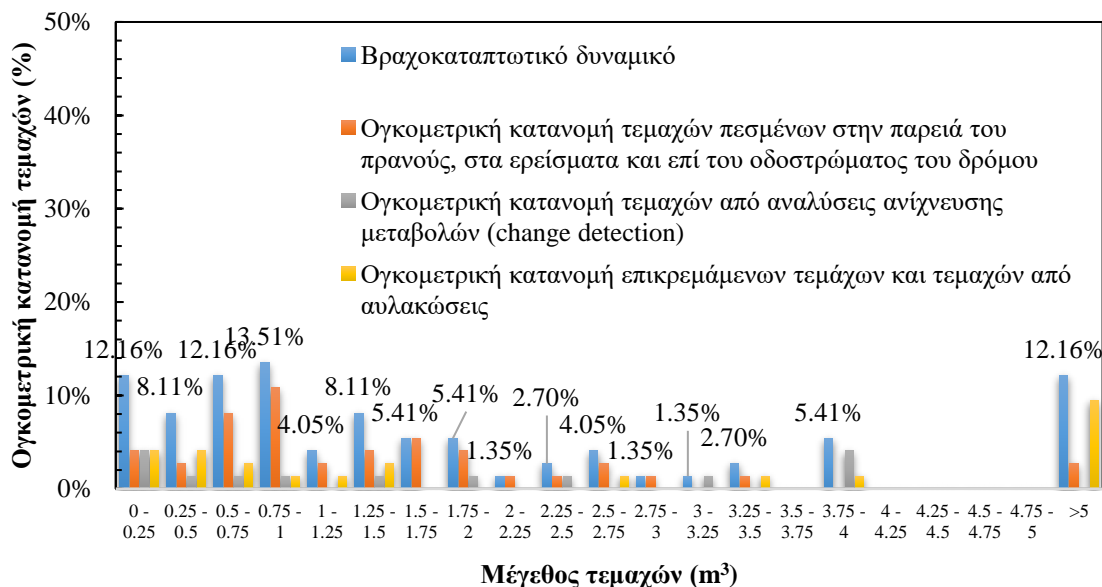


Σχήμα 98. Ανίχνευση μεταβολών στο κεντρικό και ανάντη τμήμα του πρανούς για τη χρονική περίοδο Οκτωβρίου 2021 – Μαΐου 2023. Οι μεταβολές αποτυπώνονται, με ψυχρά χρώματα (μπλε), απώλεια υλικού



Σχήμα 99. Ανίχνευση μεταβολών στο νοτιοδυτικό τμήμα του πρανούς για τη χρονική περίοδο Οκτωβρίου 2021 – Μαΐου 2023. Οι μεταβολές αποτυπώνονται, με ψυχρά χρώματα (μπλε), απώλεια υλικού, και με θερμότερα χρώματα (κίτρινα), προσθήκη υλικού

Συνοπτικά η κατανομή των όγκων που επιμετρήθηκαν παρατίθεται στο παρακάτω διάγραμμα. Από την ανάλυση προέκυψε μέγιστο μέγεθος τεμαχίου της τάξης των $V_{\max} = 6,30 \text{ m}^3$.



Σχήμα 100. Συνολική ογκομετρική κατανομή των τεμαχίων της θέσης έρευνας.

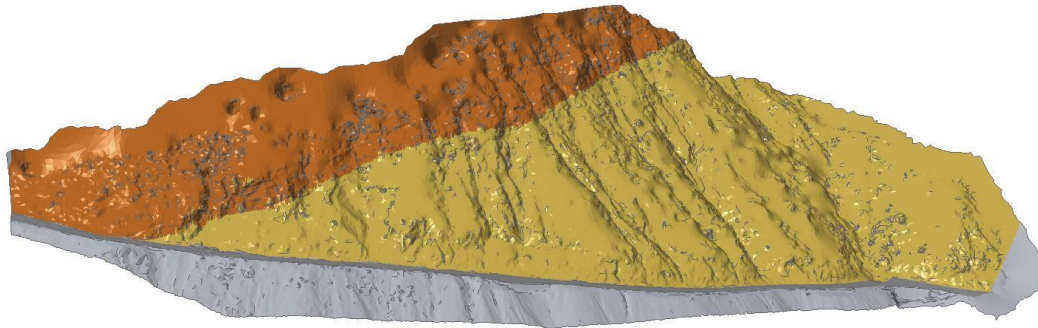
Βάσει των αποτελεσμάτων της ως άνω ανάλυσης, οι ακόλουθες τροχιακές αναλύσεις θα γίνουν σύμφωνα με τον μέγιστο όγκο που καταγράφηκε στην περιοχή αυτή, ήτοι $V_{\max} = 6,30 \text{ m}^3$.

Ο εν λόγω όγκος επιμετρήθηκε επί την παρειά του πρανούς και λαμβάνοντας υπόψη τον αρχικό μεγαλύτερο πιθανό όγκο και τις τυχόν θραύσεις που μπορεί να είχε κατά την πτώση του, και προσδίδεται επαυξητικός παράγοντας $\times 1.4$, και για αυτό τον λόγο, οι τρισδιάστατες τροχιακές αναλύσεις βραχοκαταπτώσεων εκτελέστηκαν για τεμάχιο όγκου της τάξης των $6.3 \cdot 1.4 \cong 9 \text{ m}^3$.

7.2 Τρισδιάστατη προσομοίωση βραχοκαταπτώσεων

Η ανάλυση των βραχοπτώσεων έγινε στο πρόγραμμα Rocfall3 της Rocscience για σημειακή μάζα (Lump Mass) με γωνιακή ταχύτητα. Αρχικά ορίστηκαν οι ιδιότητες των υλικών. Το πρανές διαχωρίστηκε σε 3 βασικά υλικά, άσφαλτος, ιλυόλιθος (TE2), και ψαμμίτης (TE1) σύμφωνα με το σχήμα 54. Οι συντελεστές αναπήδησης επιλέχθηκαν σύμφωνα με βιβλιογραφικές αναφορές. Πιο συγκεκριμένα, οι συντελεστές αναπήδησης και η γωνία τριβής της ασφάλτου

επιλέχθηκαν σύμφωνα με εμπειρικά δεδομένα από άλλες μελέτες που έγιναν σε περιβάλλον Rocfall. Για τον ψαμμίτη (TE1) και για τον ιλυόλιθο (TE2) έγινε βαθμονόμηση των συντελεστών αναπήδησης με βάση τις ήδη καταγεγραμμένες καταπτώσεις.



Σχήμα 101. Διαχωρισμός των υλικών στο 3D mesh: α) πορτοκαλί: ψαμμίτης (TE1), β) κίτρινο: ιλυόλιθος (TE2), γ) σκούρο γκρι: άσφαλτος

Πίνακας 32. Τιμές παραμέτρων υλικών στο Rocfall 3

Υλικά	Normal Restitution	Tangential Restitution	φ (°)	Βιβλιογραφική Αναφορά
Άσφαλτος	0.400 ± 0.040	0.900 ± 0.040	6.34	Rocfall feedback
Ψαμμίτης	0.379 ± 0.061	0.825 ± 0.083	25	Bar, Nicol, Pothitos (2016)
Ιλυόλιθος	0.440 ± 0.055	0.810 ± 0.550	26	Bar, Nicol, Pothitos (2016)

7.2.1 Αξιολόγηση του τρισδιάστατου μοντέλου μέσω ανάστροφης ανάλυσης (back analysis) – Βαθμονόμηση συντελεστών αναπήδησης

Οι συντελεστές αναπήδησης όπως εξηγήθηκε και στο κεφάλαιο 2 παίζουν καθοριστικό ρόλο στην τροχιά των καταπτώσεων και επηρεάζονται από πολλούς παράγοντες. Για την σωστή αξιολόγηση του μοντέλου, οφείλεται να βαθμονομηθούν με βάση τις καταγραφές από τα αποτελέσματα των αναλύσεων ανίχνευσης αλλαγών (change detection).

Εφόσον είναι γνωστός ο όγκος των τεμαχών και η αρχική τους θέση αλλά και η τελική τους θέση, εισάγονται στο λογισμικό του Rocfall3 οι θέσεις έναρξης των βραχοκαταπτώσεων – πηγές (seeders). Θεωρήθηκαν μηδενικές η αρχική

ταχύτητα, η γωνία βύθισης (plunge) και η οριζόντια γωνία κατεύθυνσης (trend). Από κάθε γνωστή πηγή χρησιμοποιήθηκαν 100 τεμάχια για ορθότερη στατιστική επεξεργασία. Στον πίνακα 33 παρουσιάζονται συνοπτικά οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για τις πηγές.

Πίνακας 33. Χαρακτηριστικά τεμάχων που εντοπίστηκαν μέσω του change detection

Τέμαχος/ Πηγή	Λιθολογία	Ειδικό βάρος (kg/m ³)	Μάζα (kg)	Όγκος (m ³)
1	Ψαμμίτης	2500	10000	4
2	Ψαμμίτης	2500	15000	6
3	Ψαμμίτης	2500	3000	1.2
4	Ψαμμίτης	2500	6250	2.5
5	Ψαμμίτης	2500	2500	1
6	Ιλυόλιθος	2300	9200	4
7	Κορήματα	2000	3000	1.5
8	Ψαμμίτης	2500	10000	4
9	Ψαμμίτης	2500	7500	3
10	Ψαμμίτης	2500	4500	1.8

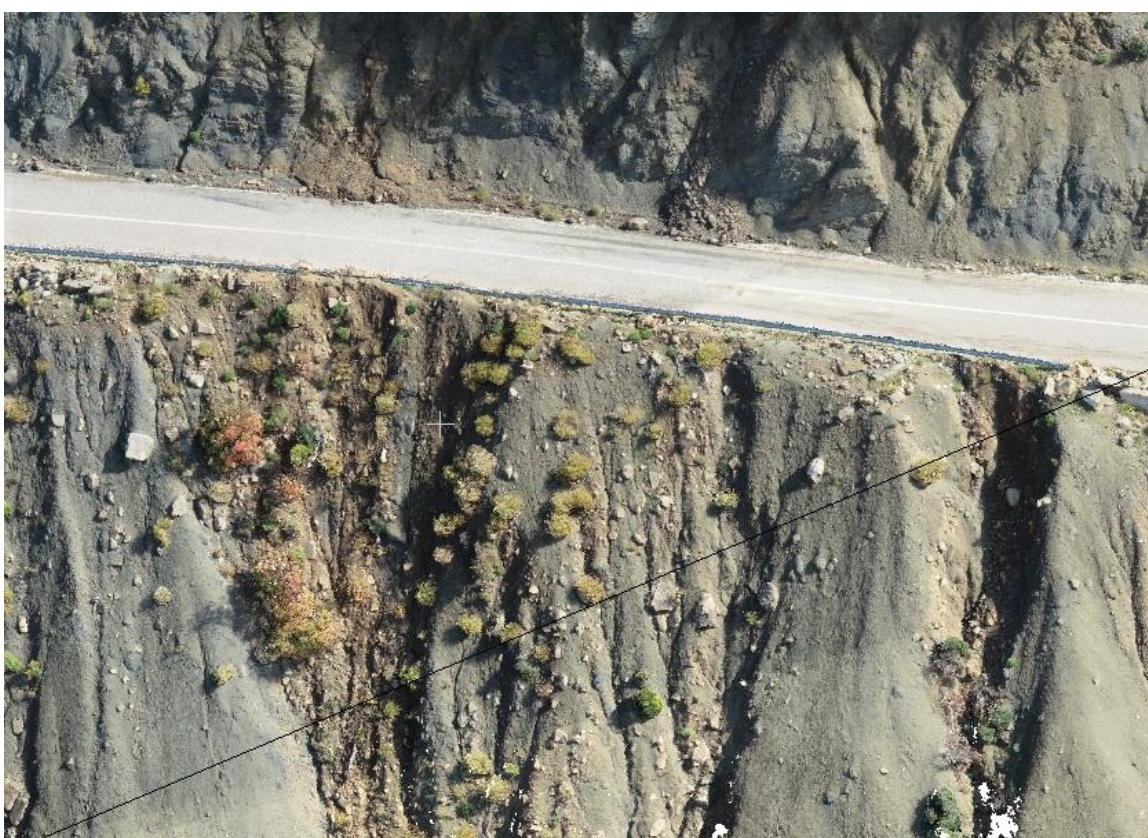
Επίσης είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι για την σωστή βαθμονόμηση λήφθηκαν υπόψη όσο δυνατό γινόταν και τα τεμάχια όπου είναι κατάντη της οδού (βλ. σχήματα 102, 103, 104). Πολλά τεμάχια από αυτά σύμφωνα με τοπική αρχή βρέθηκαν στην οδό και απομακρύνθηκαν κατάντη της οδού χωρίς να είναι γνωστό πλέον πόσα τεμάχια ήταν αυτά. Επομένως είναι θεμιτό για την σωστή βαθμονόμηση αρκετά τεμάχια από συγκεκριμένες θέσεις να καταλήγουν στην οδοποιία.



Σχήμα 102 Τεμάχη κατόντη της οδού Βόρειο τμήμα (Χ.Θ. +080.00 με Χ.Θ. +160.00)



Σχήμα 103. Τεμάχη κατόντη του πρηνούς, Νότια περιοχή (Χ.Θ. +365.00 με Χ.Θ. +410.00)



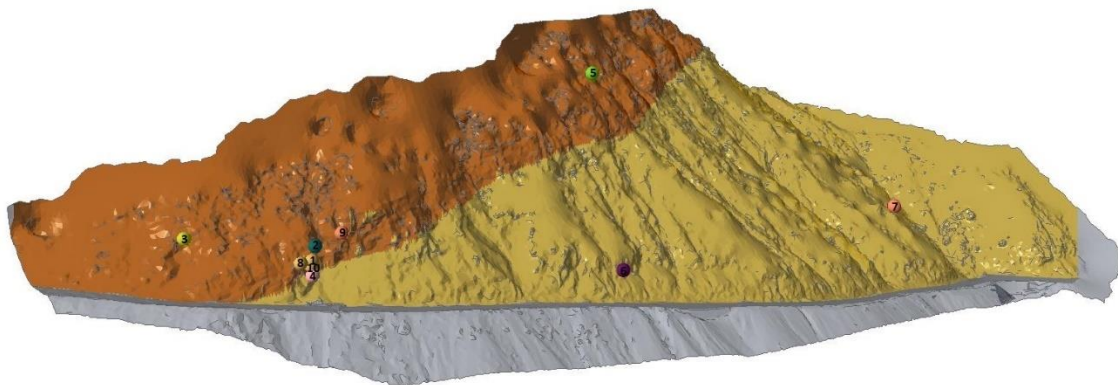
Σχήμα 104. Τεμάχη κατόντη του πρηνούς Χ.Θ. +16.00 με Χ.Θ. +230.00

Για την αρχική ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν οι προτεινόμενοι συντελεστές αναπήδησης του προγράμματος για ψαμμίτη, ιλυόλιθο και άσφαλτο. Στον πίνακα 34 παρουσιάζονται αναλυτικά οι τιμές που λήφθηκαν.

Πίνακας 34. Προτεινόμενες τιμές για τους συντελεστές αναπήδησης και της γωνίας φ

Υλικά	Κάθετος Συντελεστής	Εφαπτομενικός συντελεστής	φ (°)	Βιβλιογραφική Αναφορά
Άσφαλτος	0.400 ± 0.040	0.900 ± 0.040	6.34	Rocfall feedback
Ψαμμίτης (TE1)	0.379 ± 0.061	0.825 ± 0.083	25	Bar, Nicoll, Pothitos (2016)
Ιλυόλιθος (TE2)	0.44 ± 0.055	0.810 ± 0.550	26	Bar, Nicoll, Pothitos (2016)

Στο σχήμα 105 φαίνονται οι θέσεις των τεμαχών στο τρισδιάστατο μοντέλο στο λογισμικό του Rocfall3



Σχήμα 105. Θέσεις τεμαχών στο 3D μοντέλο στο λογισμικό του Rocfall 3

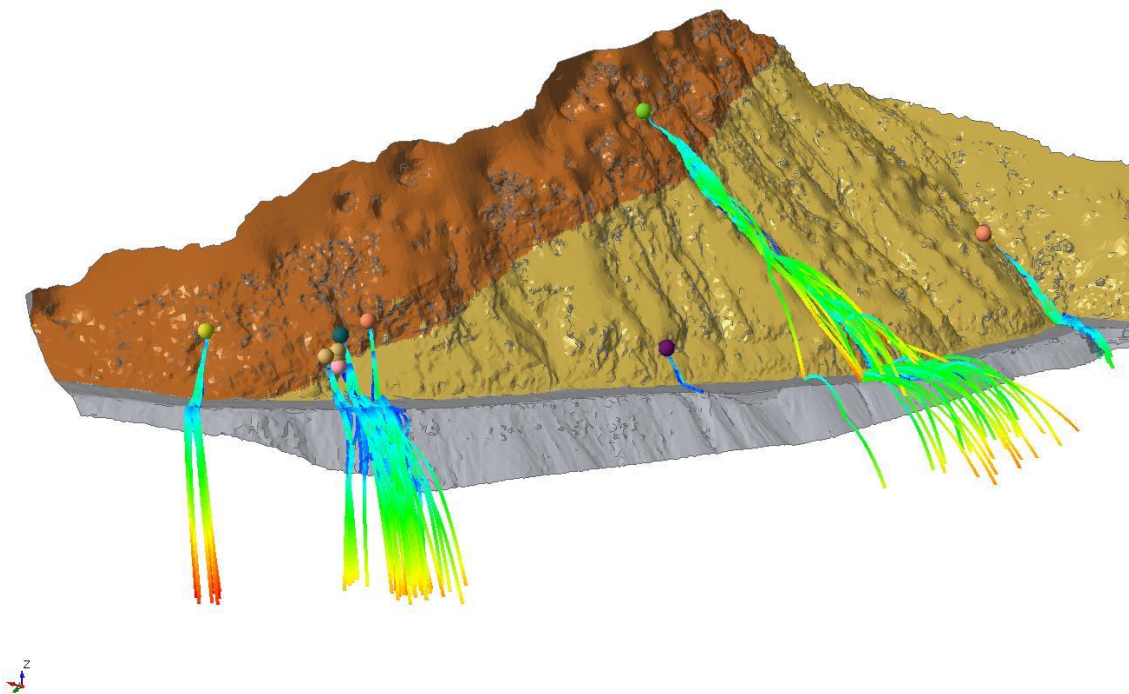
Εφόσον έχουν οριστεί και οι θέσεις των πηγών μπορεί να ξεκινήσει ο υπολογισμός των τροχιών των τεμαχών. Μετά την λήψη των αποτελεσμάτων για τις βραχοκαταπτώσεις, γίνεται στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων σε κάθε πηγή για την τοποθεσία που κατέληξαν τα τεμάχη. Όπως αναφέρθηκε και πριν σε κάθε γνωστή πηγή θεωρήθηκαν 100 τεμάχη, ώστε να αποτυπωθεί η τυπική απόκλιση που έχει θεωρηθεί. Στον πίνακα 35 παρουσιάζεται η συχνότητα των τεμαχών που κατέληγαν πριν τον δρόμο, στο δρόμο και κατάντη

του δρόμου. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης καταπτώσεων από το Rocfall3 παρουσιάζονται αναλυτικά στο παράρτημα Ε.

Πίνακας 35. Συχνότητα τελικής θέσης των τεμάχων ανά πηγή

Πηγή	Συχνότητα			Παρατηρήσεις
	Ανάντη της οδού (απόσταση ΧΥ)	Οδός	Κατάντη της οδού	
Point Seeder 1 4m3, Ψαμμίτης (TE1)	34	66	0	απόσταση τεμάχους οδού 11m
Point Seeder 2 6m3, Ψαμμίτης (TE1)	41	42	17	απόσταση τεμάχους οδού 13m
Point Seeder 3 2.5m3, Ψαμμίτης (TE1)	17	73	10	απόσταση τεμάχους οδού 13.6m
Point Seeder 4 1.2m3, Ψαμμίτης (TE1)	63	37	0	απόσταση τεμάχους οδού 9m
Point Seeder 5 1m3, Ψαμμίτης (TE1)	65	3	32	απόσταση τεμάχους οδού 96m, τα περισσότερα τεμάχη βρέθηκαν πολύ πριν της οδού.
Point Seeder 6 4m3, Ιλυόλιθος (TE2)	64	36	0	απόσταση τεμάχους οδού 9.5m
Point Seeder 7 Κορήματα	-	-	-	Μη έγκυρα αποτελέσματα, περιστροφική ολίσθηση
Point Seeder 8 4m3, Ψαμμίτης (TE1)	19	54	27	απόσταση τεμάχους οδού 6.3m
Point Seeder 9 3m3, Ψαμμίτης (TE1)	10	63	27	απόσταση τεμάχους οδού 15m
Point Seeder 10 4m3, Ψαμμίτης (TE1)	40	63	27	απόσταση τεμάχους οδού 11m

Στο σχήμα 106 παρουσιάζονται οι τροχιές από την ανάστροφη ανάλυση.



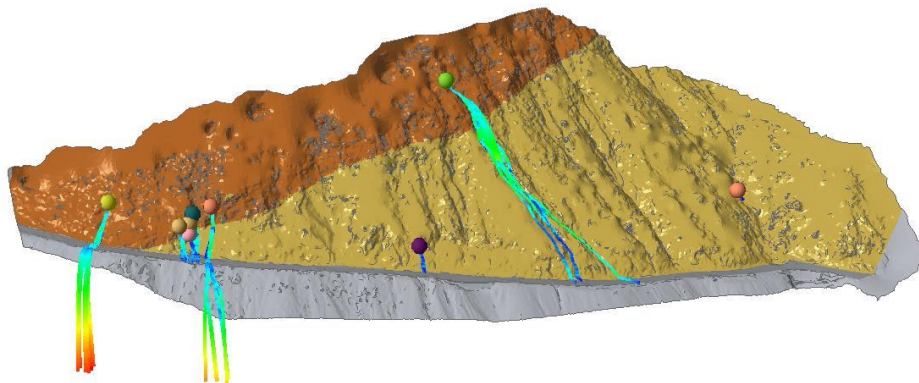
Σχήμα 106. Τροχιές ανάστροφης ανάλυσης

Τα αποτελέσματα της ανάστροφης ανάλυσης είναι λογικά όσο αφορά την ΤΕ1 (φλύσχη τύπος ΙΙΙ) σύμφωνα με τις γνωστές τελικές θέσεις των τεμαχών. Ωστόσο για την ΤΕ2 (φλύσχη τύπος VΙΙΙ) αρκετές τροχιές δεν ακολουθούν τις μιογαγγείες και δεν αποτυπώνονται ρεαλιστικές τροχιές. Οπότε οι συντελεστές αναπήδησης της ΤΕ2 απομειώθηκαν. Στον πίνακα 36 παρουσιάζονται οι καινούριες βαθμονομημένες τιμές, μετά από την βαθμονόμηση και επικύρωση του μοντέλου.

Πίνακας 36. Βαθμονομημένες τιμές για τους συντελεστές αναπήδησης και της γωνίας

Υλικά	Κάθετος Συντελεστής	Εφαπτομενικός συντελεστής	φ (°)
Άσφαλτος	0.400 ± 0.040	0.900 ± 0.040	6.34
Ψαμμίτης	0.379 ± 0.061	0.825 ± 0.083	25
Ιλυόλιθος	0.270 ± 0.055	0.710 ± 0.550	26

Παρακάτω παρουσιάζεται το αποτέλεσμα του βαθμονομημένου μοντέλου.



Σχήμα 107. Αποτελέσματα ανάστροφης ανάλυσης με βαθμονομημένες τιμές αναπήδησης

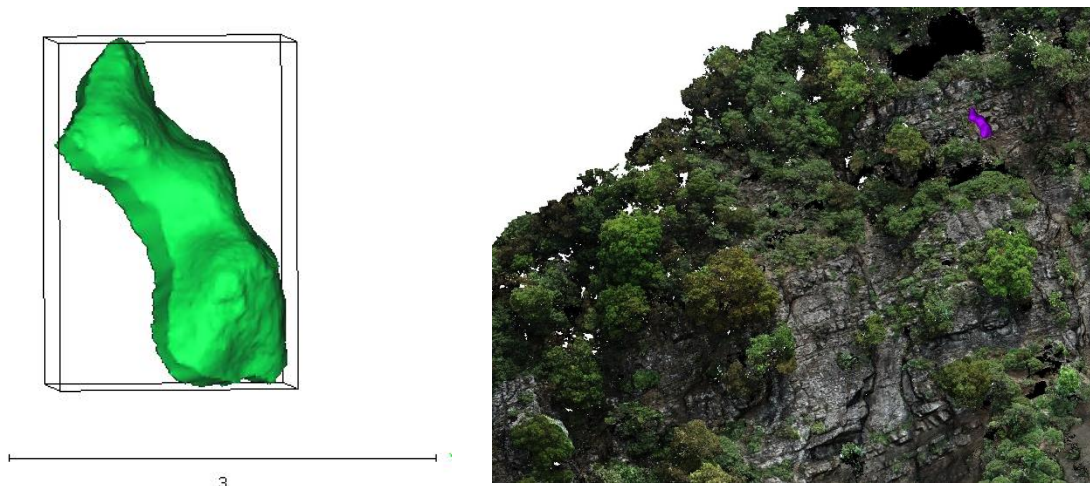
7.2.3 Τροχιακή ανάλυση βραχοκαταπτώσεων

Εφόσον αξιολογήθηκε το μοντέλο αλλά και οι προτεινόμενοι συντελεστές αναπήδησης πραγματοποιείται ανάλυση καταπτώσεων με την βοήθεια του προγράμματος Rocfall3 της Rocscience.

Στην βορειοανατολική περιοχή (Χ.Θ. +040.00 με Χ.Θ. +180.00) κατά την παρακολούθηση του πρηνούς σε διάστημα δύο ετών ανιχνεύθηκαν συνολικά 10 βραχοκαταπτώσεις, και για αυτό τον λόγο, η τροχιακή ανάλυση εκτελέστηκε για 500 τεμάχια όγκου 9m^3 . Δηλαδή μια βραχοκατάπτωση ανά 1,5 με 2 μέτρα που βάσει της βραχυπρόθεσμης διαχρονικής παρακολούθησης θα αντιστοιχούσε σε καταπτωτικά φαινόμενα 100-ετίας.

Για την νότια περιοχή όπου έχει καταγραφεί μόνο μία βραχοκατάπτωση (βλ. σχήμα 108), όγκου 1m^3 σε περίοδο δύο ετών έγινε ανάλυση με όγκο 9m^3 ανά 3 με 4 μέτρα, και για συνολικά 200 τεμάχια.

Για τις ολισθήσεις τύπου σφήνας από την ιλυολιθική βραχόμαζα (TE2, TE3 και TE4) δεν πραγματοποιήθηκαν τροχιακές αναλύσεις βραχοκαταπτώσεων. Αυτό αποφασίστηκε βάσει της φύσης του υλικού και του κερματισμού του, καθώς ήταν αναμενόμενο ότι κατά την πτώση των τεμαχών του, αυτά θα θραύονταν άμεσα και θα διασκορπίζονταν επιτόπου.



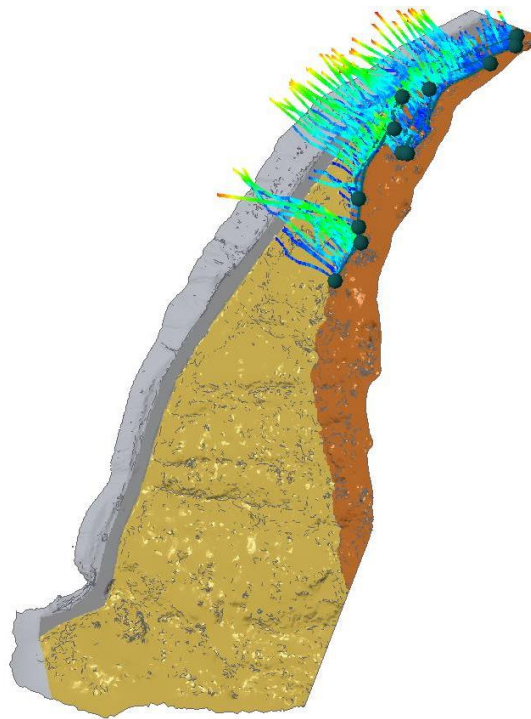
Σχήμα 108. Τέμαχος 1m^3 το οποίο εντοπίστηκε από την ανάλυση ανίχνευσης μεταβολών στο κεντρικό και ανάντη τμήμα του πρανούς

7.2.4 Αποτελέσματα τροχιακών αναλύσεων

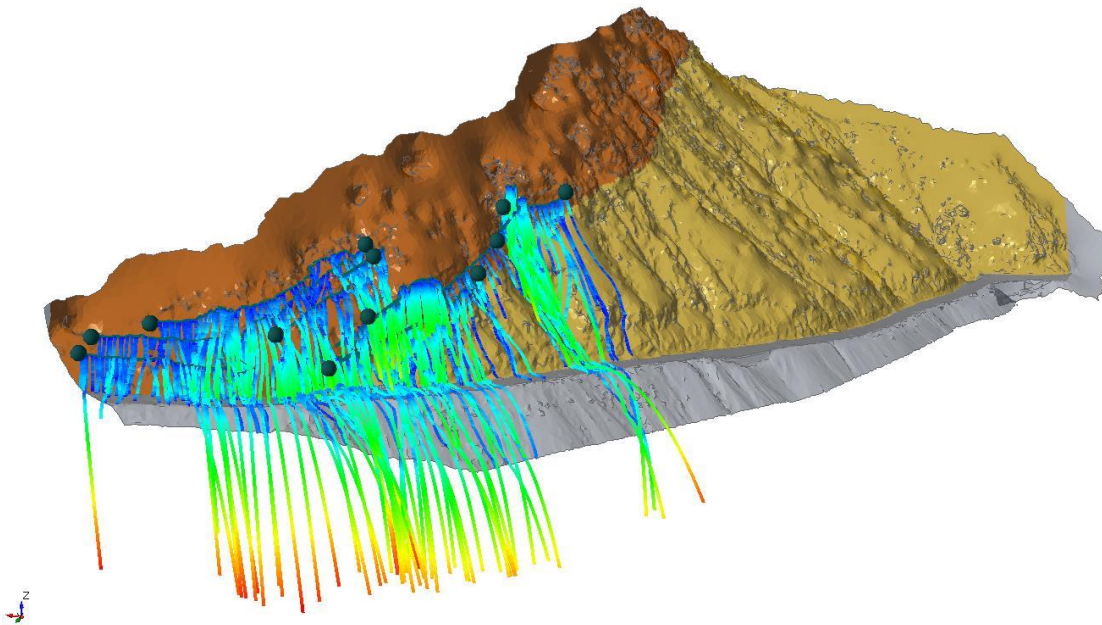
Πραγματοποιήθηκαν δύο διαφορετικές αναλύσεις για την ΤΕ1 (φλύσξης Τύπου ΙΙΙ) μια στην βορειοανατολική περιοχή όπου και έχουν εμφανιστεί οι περισσότερες καταπτώσεις και μια δεύτερη στο νότιο τμήμα της περιοχής, για κεντρικό και ανάντη τμήμα του πρανούς.

Παρατηρείται πως στην βόρεια περιοχή από Χ.Θ. +080.00 έως +180.00 υπάρχουν τεμάχη που καταλήγουν στην οδοποιία με σχεδόν κάθετη τροχιά (βλ. σχήμα 111) ενώ από Χ.Θ. +040.00 έως Χ.Θ. +080.00 οι τροχιές αν και καταλήγουν στην οδοποιία η τροχιά τους είναι πολύ πιο ομαλή. Στο νότιο τμήμα (Χ.Θ. +180.00 έως και Χ.Θ. +460.00) η πλειοψηφία των τροχιών καταλήγουν εντός των μισογαγγειών ενώ ορισμένα τεμάχη τα οποία καταλήγουν στην οδό, δεν έχουν ύψος αναπήδησης μεγαλύτερο των 2m.

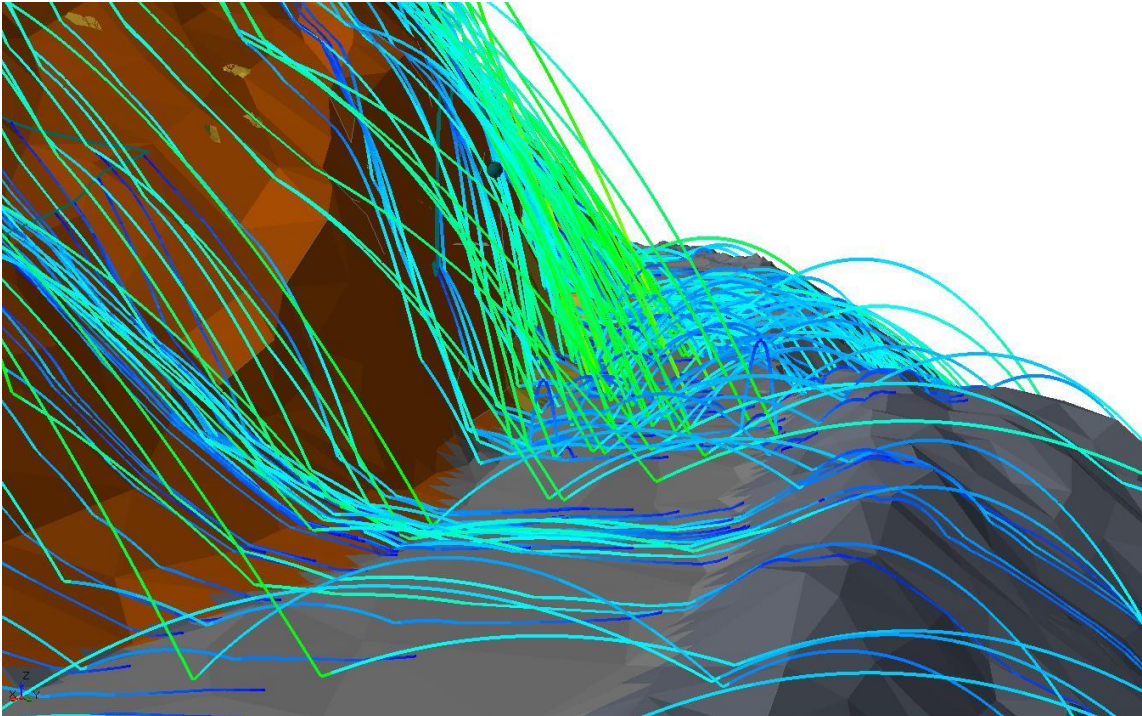
Παρακάτω παρουσιάζονται οι τροχιές των δύο αναλύσεων σε κατόψεις αλλά και σε όψεις της θέσης έρευνας.



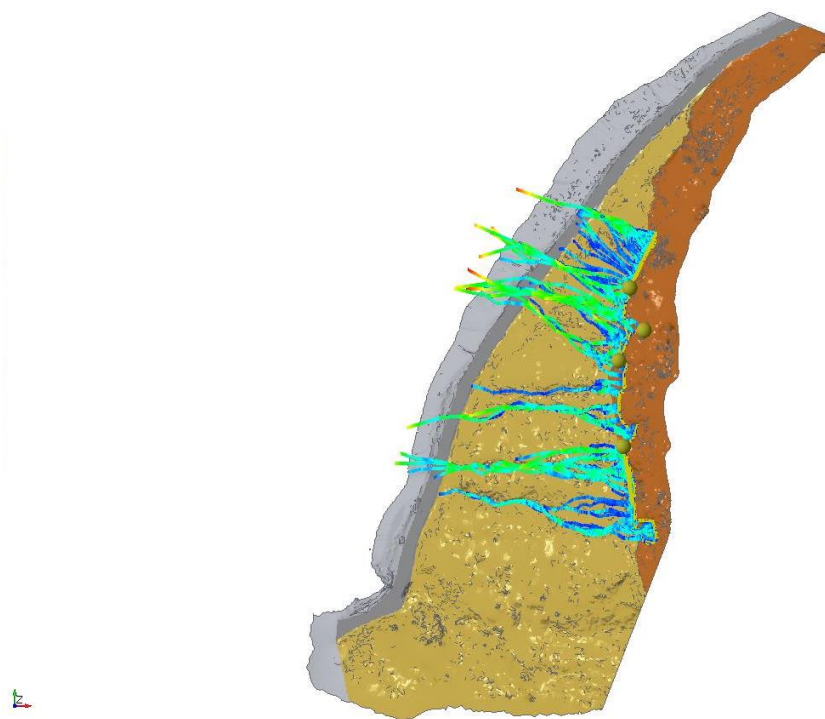
Σχήμα 109. Κάτοψη των αναλύσεων για τεμάχιο φλύσχη TE1



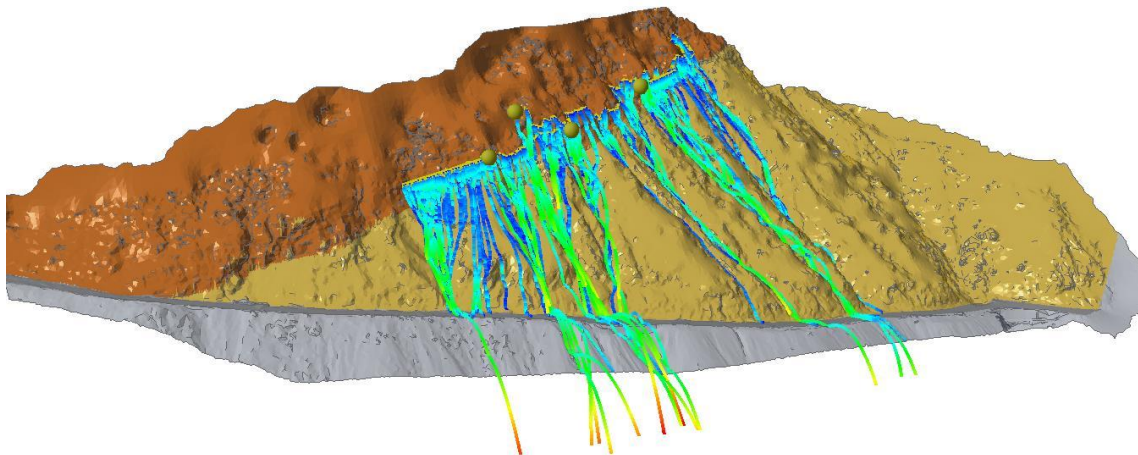
Σχήμα 110. Όψη των αναλύσεων για τεμάχιο φλύσχη TE1 στην Βόρεια περιοχή



Σχήμα 111 Τροχιές αναπήδησης που καταλήγουν στην οδοποιία



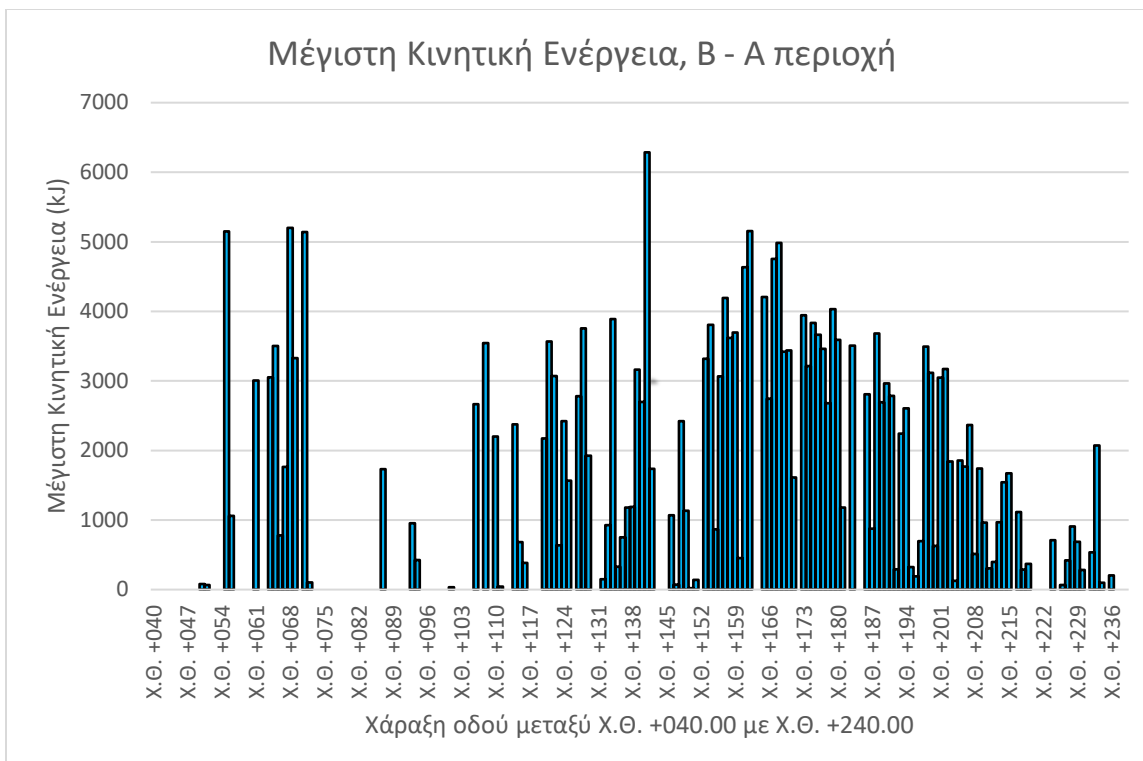
Σχήμα 112. Κάτοψη αναλύσεων για φλύσχη τύπου ΤΕ1 στη νότια περιοχή



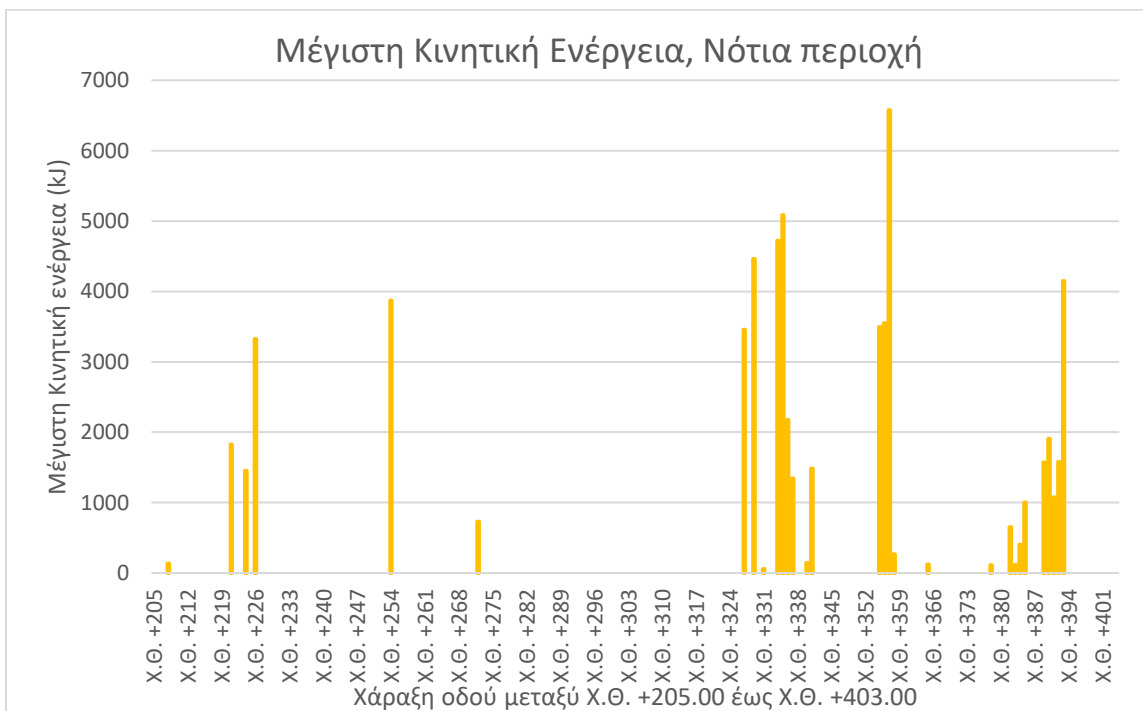
Σχήμα 113. Όψη αναλύσεων για φλύσχη τύπου TE1 στη νότια περιοχή

Από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα. Αρχικά γίνεται αντιληπτό πως υπάρχει συσχέτιση μεταξύ του συνολικού αριθμού αναπηδήσεων μίας τροχιάς με την μέγιστη κινητική ενέργεια που αποκτάει το τέμαχος. Όσο πιο πολλές αναπηδήσεις έχουν σημειωθεί τόσο μικρότερη είναι η μέγιστη κινητική ενέργεια που αποκτά το τέμαχος. Επιπλέον ο σημαντικότερος παράγοντας που επηρεάζει τον αριθμό των αναπηδήσεων είναι η γεωμετρία του πρανούς. Η διαφορά σκληρότητας ψαμμίτη (TE1) και ιλυολίθου (TE2), που εκφράστηκε στην ανάλυση ως απομείωση των συντελεστών αναπήδησης του ιλυολίθου, συνεισφέρει στην απόσβεση της κινητικής ενέργειας σε περίπτωση πρόσκρουσης τεμάχους στην TE2.

Γενικά οι τιμές των ενεργειών πρόσκρουσης στην ΒΑ περιοχή έχουν αρκετά υψηλές τιμές κατά μήκος της. Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται η μέγιστη κινητική ενέργεια που προσκρούει το τέμαχος στο κατάστρωμα της οδού. Στην ΒΑ περιοχή η μέγιστη κινητική ενέργεια που υπολογίστηκε είναι 6286kJ κατά την Χ.Θ. +138.00. Στο νότιο τμήμα η μέγιστη κινητική ενέργεια που υπολογίστηκε είναι 6574kJ κατά την Χ.Θ. +357.00, ωστόσο ένα τέτοιο τέμαχος δεν θα έφτανε ρεαλιστικά με τέτοια κινητική ενέργεια, επειδή θα είχε σπάσει σε μικρότερα τεμάχη λόγω πολλών κρούσεων.



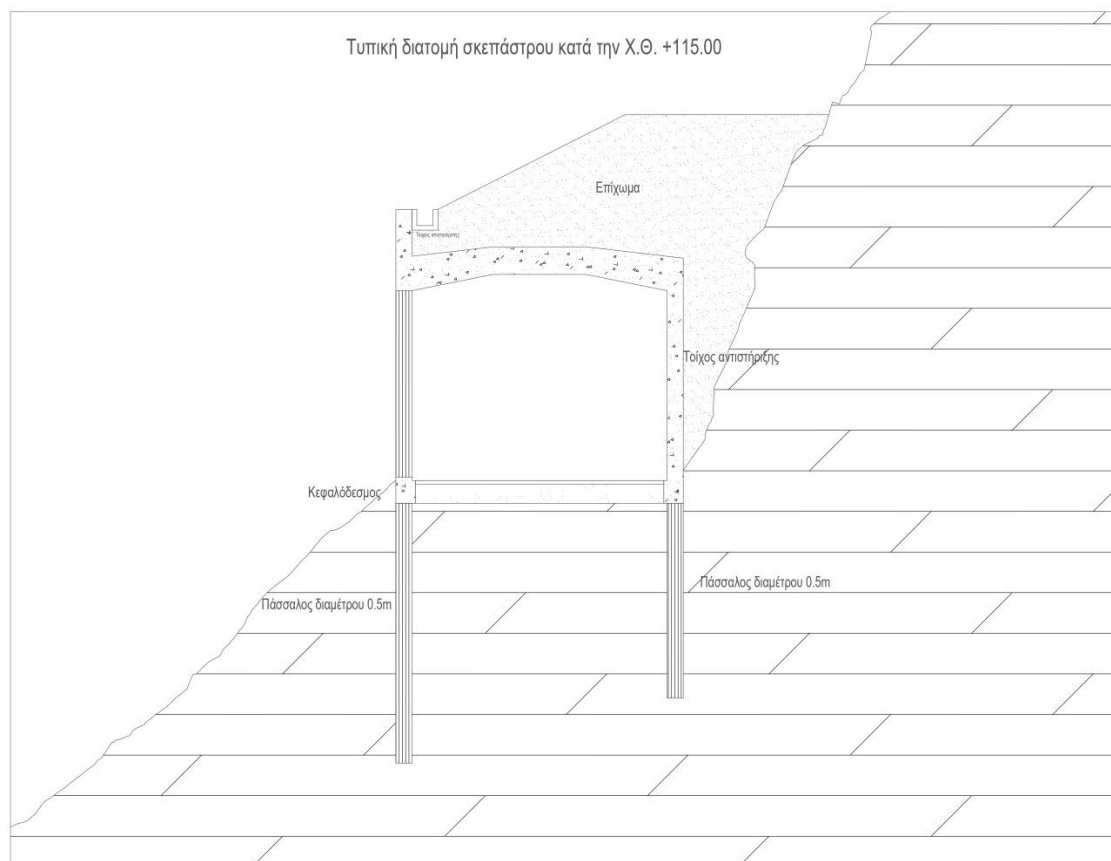
Σχήμα 114. Διάγραμμα Μέγιστης κινητικής ενέργειας κατά μήκος της οδού στην ΒΑ περιοχή



Σχήμα 115. Διάγραμμα Μέγιστης κινητικής ενέργειας κατά μήκος της οδού στην Νότια περιοχή

τροχιά, ενώ παράλληλα η γεωμετρία του πρανούς και ανάντη αλλά και κατάντη της οδού είναι αρκετά περιοριστική ώστε να κατασκευαστεί τάφος ή κάποιος φράχτης ανάσχεσης διπλά από την οδοποιία.

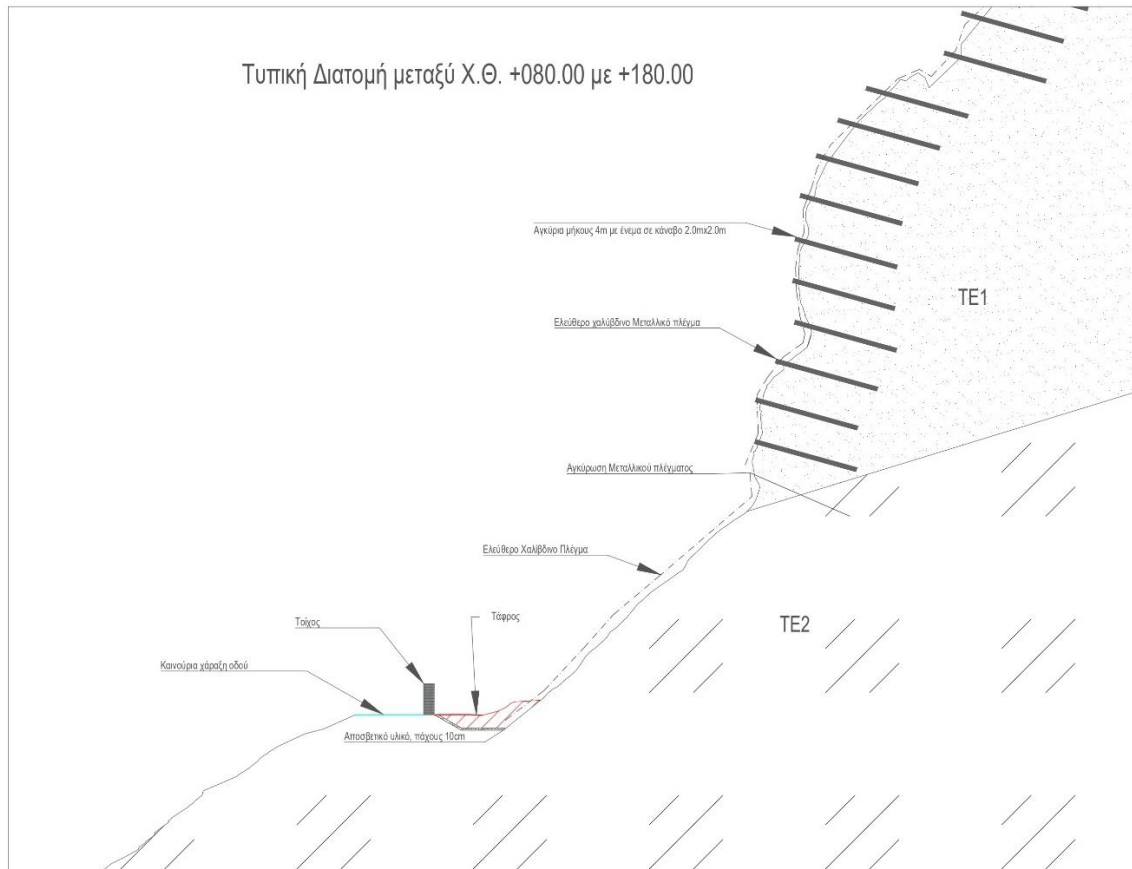
Υπάρχουν δύο διαφορετικές προτεινόμενες λύσεις για το συγκεκριμένο πρόβλημα. Η πρώτη λύση είναι η κατασκευή ενός σκέπαστρου στο τμήμα εκείνο, το οποίο επιτρέπει την βραχοκατάπτωση των τεμάχων στο άνω τμήμα του φορέα όπου και συστήνεται να τοποθετηθεί κάποιο αποσβεστικό υλικό ή επίχωμα (βλ. σχήμα 94).



Σχήμα 117. Τυπική διατομή σκέπαστρου (Τομή ΒΒ').

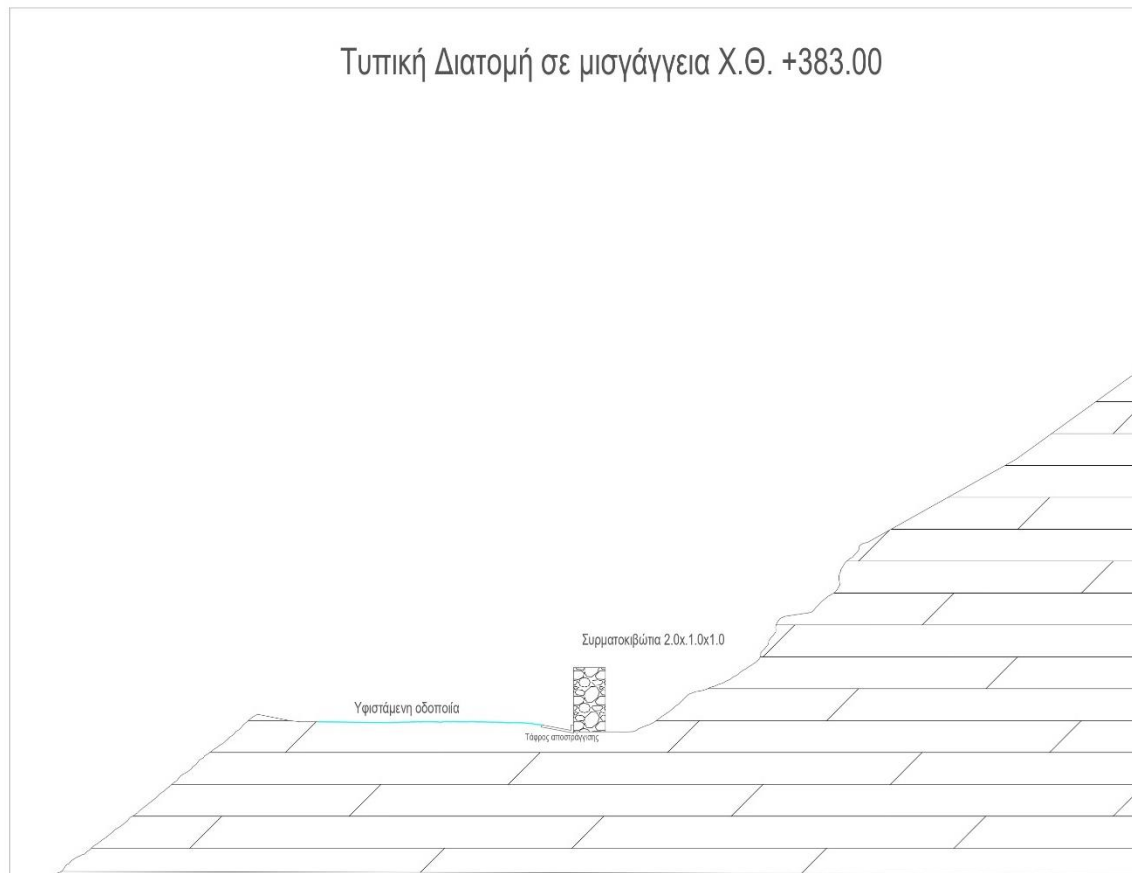
Η δεύτερη λύση για την συγκεκριμένη θέση που προτείνεται είναι η διαμόρφωση της οδοποιίας, τέτοια ώστε να δημιουργηθεί χώρος για την κατασκευή τάφρου και φράχτη τύπου Jersey ή τοιχείου. Αναλυτικότερα προτείνεται μεταξύ Χ.Θ. +080.00 και Χ.Θ. +180.00 στένωμα της οδού, από 7m σε 3.30m πλάτους μετατρέποντας την σε μονής κυκλοφορίας. Η κυκλοφορία θα ρυθμίζεται μέσω φωτεινών σηματοδοτών στην Χ.Θ. +000.00 και στην Χ.Θ. +200.00. Παράλληλα προτείνεται η τοποθέτηση αγκυριών σε κάναβο 2x2 στο τμήμα που επικρατεί η

ΤΕ1 όπως προβλέπεται από τον πίνακα 31. Επιπλέον στο τμήμα του πρानούς που υπεριοχύνει η ΤΕ1 προβλέπεται η επένδυση του πρानούς με πλήρως αγκυρωμένο γαλβανισμένο συρματοπλέγμα για την συγκράτηση μικρών καταπτώσεων. Ενώ στο τμήμα που επικρατεί η ΤΕ2 προτείνεται η επένδυση του πρανούς με πλέγμα αγκυρωμένο μόνο περιμετρικά.



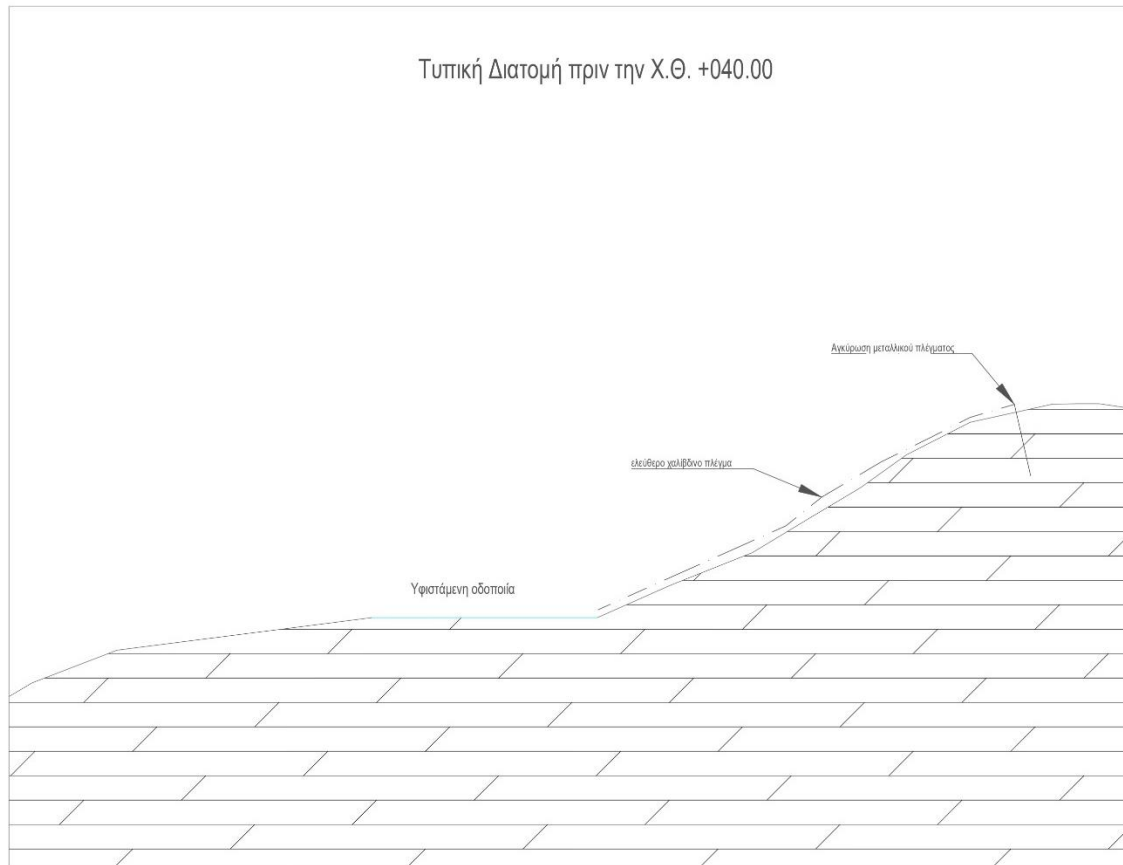
Σχήμα 118. Τυπική διατομή μεταξύ Χ.Θ. +080.00 με +180.00 (Τομή ΑΑ')

Για την περιοχή από Χ.Θ. +180.00 έως και Χ.Θ. +440.00 προτείνεται τοίχος ύψους 2 μέτρων από συρματοκιβώτια διαστάσεων 2.0m x 1.0m x 1.0m αποτελούμενο από 2 σειρές συρματοκιβωτίων και κατασκευή τάφρου αποστράγγισης για απορροή των όμβριων υδάτων με κατάληξη στον υφιστάμενο οχετό περί την Χ.Θ. +445.00.



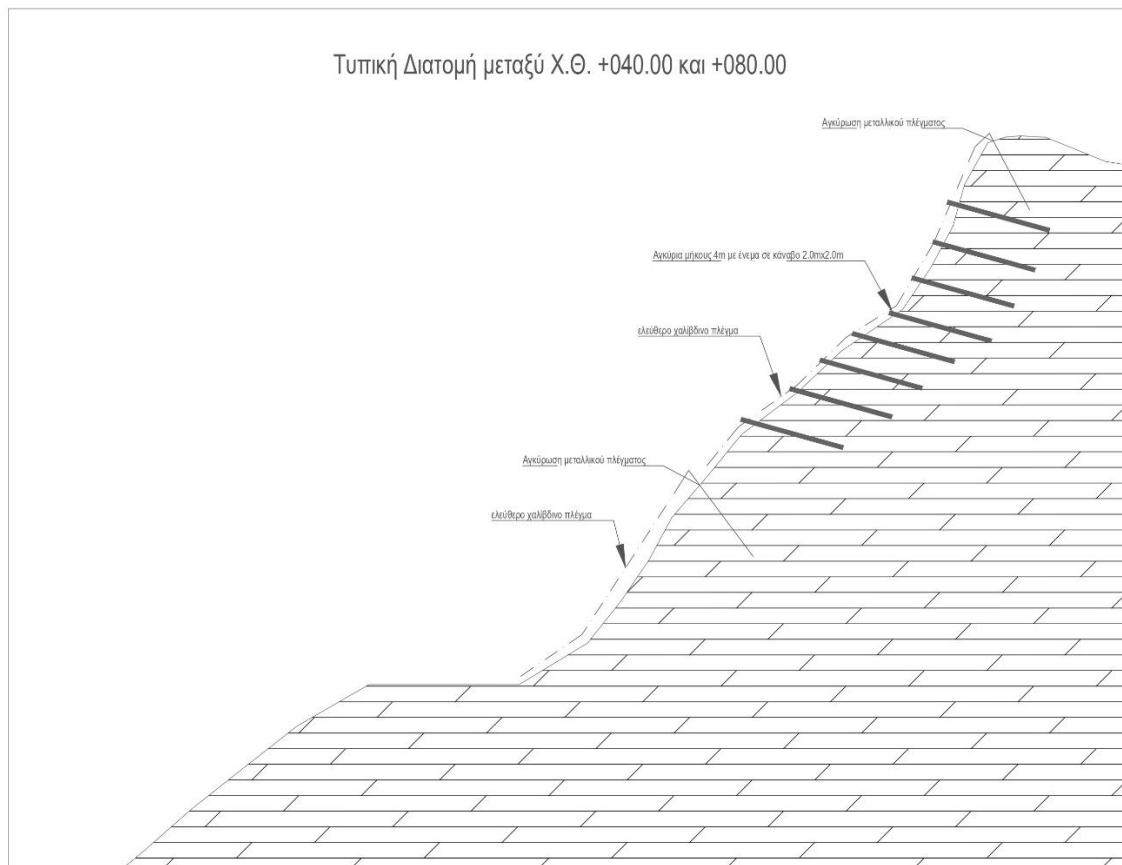
Σχήμα 119. Τυπική διατομή από Χ.Θ. +180.00 έως και Χ.Θ. +440.00 (Τομή ΕΕ')

Για την περιοχή από Χ.Θ. +000.00 έως και Χ.Θ. +040.00 προτείνεται επένδυση του πρανούς με ελεύθερο χαλύβδινο πλέγμα αγκυρωμένο περιμετρικά έτσι ώστε να οδηγούνται οι καταπτώσεις στον πόδα του πρανούς.



Σχήμα 120. Τυπική Διατομή πριν την Χ.Θ. +040.00 (Τομή ΔΔ')

Για την περιοχή από Χ.Θ. +040.00 έως και Χ.Θ. +080.00 προτείνεται επένδυση του πρανούς μέχρι τα 10 μέτρα με ελεύθερο χαλύβδινο πλέγμα αγκυρωμένο περιμετρικά έτσι ώστε να οδηγούνται οι καταπτώσεις στον πόδα του πρανούς, ενώ άνω των 10m προτείνεται πλέγμα πλήρως αγκυρωμένο γαλβανισμένο συρματόπλεγμα για την συγκράτηση μικρών καταπτώσεων με κάναβο αγκυριών 2x2 με χαρακτηριστικά αγκυριών όπως προσδιορίζονται στον πίνακα 35



Σχήμα 121. Τυπική Διατομή μεταξύ Χ.Θ. +040.00 και Χ.Θ. +080.00

9. Συμπεράσματα

Βασικός σκοπός της παρούσης διπλωματικής εργασίας ήταν η τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική αξιολόγηση αλλά και η τρισδιάστατη τροχιακή ανάλυση πρηνούς με σύνθετη γεωμετρία χρησιμοποιώντας σύγχρονα ψηφιακά εργαλεία.

Σύμφωνα με την γεωλογική διερεύνηση της περιοχής γίνεται κατανοητό πως στην ευρύτερη περιοχή της θέσης έρευνας επικρατούν αρκετή σχηματισμοί όπως φλύσχη, ασβεστόλιθοι και αλλούβια. Γενικά, η περιοχή θεωρείται ορεινή με έντονο ανάγλυφο με μεγάλες υψομετρικές διαφορές και τα πρηνή της διακόπτονται συχνά από μιογάγγειες. Τέτοιες γεωλογικές και τοπογραφικές συνθήκες συνεισφέρουν στην εκδήλωση καταπτωτικών και κατολισθητικών φαινομένων.

Μέσω της τεχνικής επίσκεψης, της τεχνικογεωλογικής αξιολόγησης και των αποτελεσμάτων των κινηματικών αναλύσεων έγινε κατανοητός ο μηχανισμός αστοχίας. Τα βραχοτεμάχια αστοχούν ανισότροπα πάνω σε υπάρχουσες ασυνέχειες. Ο μηχανισμός αυτός σε τοπικές θέσεις φαίνεται να επιβαρύνεται και από το φαινόμενο της υποσκαφής του ασθενούς μέλους της βραχώμαζας (του ιλυολίθου) με αποτέλεσμα επί του ισχυρού μέλους (ψαμμίτη) να διευρύνονται οι υπάρχουσες ασυνέχειες και να δημιουργούνται εφελκυστικές ρωγμές. Το φαινόμενο αυτό επιβαρύνεται και από υδροστατικές πιέσεις που ασκούνται στις ασυνέχειες και ωθούν τα βραχοτεμάχια σε αστοχία.

Ως προς την γεωτεχνική αξιολόγηση των γεωολικών της περιοχής, η αβεβαιότητα και οι μεγάλες διακυμάνσεις των χαρακτηριστικών του Φλύσχη (βλ. Marinou & Tsiambaos 2010) επιβεβαιώθηκαν. Πιο συγκεκριμένα οι τιμές UCS και οι κρούσεις με την σφύρα Schmidt είχαν μεγάλες διακυμάνσεις τόσο στον ψαμμίτη όσο και στον ιλυόλιθο. Επιπλέον αρκετά χρήσιμες κρίθηκαν οι εργαστηριακές δοκιμές και οι επιτόπου δοκιμές, που επιτελέστηκαν στο πλαίσιο της εργασίας, και με τις οποίες έγινε εφικτός ο προσδιορισμός των μηχανικών χαρακτηριστικών των ασυνεχειών.

Ως προς το 3D μοντέλο προσομοίωσης που κατασκευάστηκε, με τεχνικές φωτογραμμετρίας SfM, για την εκτέλεση τροχιακών αναλύσεων επί αυτού, αξίζει να σημειωθεί πως η παρουσία βλάστησης δημιουργεί επιφάνειες οι οποίες στην πραγματικότητα δεν υφίστανται και επηρεάζουν αρκετά τις τροχιές κι ιδιαίτερος την εκτροπή των τεμαχίων καθιστώντας το εν λόγω μοντέλο υπό αμφισβήτηση. Για την επίλυση του εν λόγω προβλήματος στα πλαίσια της παρούσας έρευνας η φυτοκάλυψη αφαιρέθηκε χειροκίνητα. Οι περιοχές αυτές, ανακατασκευάστηκαν κατά την διαδικασία κατασκευής του μοντέλου επιφανείας (mesh model), αυτοματοποιημένα χρήση του αλγορίθμου Poisson

Surface Reconstruction στο φωτογραμμετρικό λογισμικό Agisoft Metashape. Επί των αποτελεσμάτων των τροχιακών αναλύσεων, η παρουσία της ανακατασκευασμένης επιφάνειας, στις θέσεις της πρωταρχικής βλάστησης, δεν επηρέασε τις περιοχές που αναμένονταν βραχοκαταπτώσεις, οπότε η διαδικασία αφαίρεσης της βλάστησης δεν αλλοίωσε την αξιοπιστία του μοντέλου, αλλά αντιθέτως προέβλεψε με επιτυχία τις τροχιές των βραχοτεμαχών σύμφωνα με τις αναμενόμενες προβλέψεις. Έτσι κι αλλιώς, η φυτοκάλυψη σε ένα πρανές στην πραγματικότητα συνεισφέρει στην ανάσχεση των βραχοκαταπτωτικών φαινομένων, οπότε είναι σύνηθες τα βραχοτεμάχια να μην ακολουθούν τροχιές στις περιοχές αυτές.

Ιδιαίτερη χρήσιμη αποδείχτηκε η χρήση των τριοδιάστατων δεδομένων (νέφη σημειών) για τον προσδιορισμό των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ασυνεχειών σε δύσβατες και απρόσιτες περιοχές. Πιο συγκεκριμένα, ήταν χρήσιμο για την εκτίμηση του μήκους και του προσανατολισμού των ασυνεχειών. Επιπλέον, μέσω αυτών των τριοδιάστατων δεδομένων ήταν εφικτός ο προσδιορισμός επικρεμάμενων τεμαχών, τα οποία είναι σημαντικά για τον καθορισμό των θέσεων έναρξης των βραχοκαταπτωτικών φαινομένων – πηγές (seeders) για τις μετέπειτα τροχιακές αναλύσεις.

Η ανάλυση ανίχνευσης μεταβολών (change detection) μέσω της παρούσας εργασίας αποδεικνύεται ως μία ακριβής μέθοδος ανίχνευσης βραχοκαταπτώσεων με ένα όριο ανίχνευσης κοντά στα 8cm. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης χρησιμοποιήθηκαν επιπλέον για την ογκομέτρηση των καταγεγραμμένων αστοχιών και των θέσεων έναρξης – απόθεσης βραχοκαταπτώσεων που συντέλεσαν στην τελική αξιολόγηση της τροχιακής ανάλυσης, και της βαθμονόμησης των συντελεστών αναπήδησης.

Ως προς την τροχιακή ανάλυση, οι πιο σημαντικοί παράγοντες για τον καθορισμό των αναπήδησεων αποτέλεσαν η γεωμετρία του πρανούς και η σκληρότητα των πετρωμάτων. Η γεωμετρία του πρανούς, καθορίζει σημαντικά την γωνία πρόσκρουσης και την εκτροπή του τεμάχους. Επομένως, προτείνεται σε μελλοντική έρευνα να εξεταστεί ανάλυση επί μοντέλου προσομοίωσης αποτελούμενο από περισσότερες επιφάνειες (faces) για πιθανή ενίσχυση των αποτελεσμάτων ή αντ' αυτού προτείνεται, ειδικότερα στην ΒΑ περιοχή όπου και έχουν καταγραφεί οι περισσότερες καταπτώσεις να γίνει ξεχωριστή τροχιακή ανάλυση βραχοκαταπτώσεων για όσο δυνατόν περισσότερες επιφάνειες.

Τα αποτελέσματα των τροχιακών αναλύσεων συμβαδίζουν με τα παρατηρούμενα φαινόμενα επί την τοποθεσία του πρανούς. Πιο αναλυτικά, στην ΒΑ περιοχή προκύπτουν τροχιές αναπήδησεων σχεδόν κατακόρυφες με το πρανές με μεγάλες ενέργειες πρόσκρουσης με μέγιστη τιμή 6504kJ.

Στην παρούσα διπλωματική οι τροχιακές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με την μέθοδο σημειακής μάζας (lump mass). Θα ήταν ενδιαφέρον σε μια μελλοντική έρευνα να πραγματοποιηθούν οι ίδιες αναλύσεις καταπτώσεων για μέθοδο απαραμόρφωτου σώματος (rigid body) όπου αποτελεί επιλογή του προγράμματος Rocfall3 της Rocscience. Στην συγκεκριμένη μέθοδο ο χρήστης μπορεί να εισάγει προσεγγιστικά τα σχήματα των καταπτώμενων τεμαχών στο τρισδιάστατο μοντέλο. Εφόσον η γεωμετρία πρόσκρουσης του τεμάχους με το πρανές είναι από τους πιο σημαντικούς παράγοντες στο καθορισμό της αναπήδησης, θα ήταν χρήσιμο να γίνει μία σύγκριση μεταξύ ανάλυσης για σημειακή μάζα και ανάλυσης για απαραμόρφωτο σώμα.

Για την ορθότερη διεξαγωγή των παρακολουθήσεων στην θέση έρευνας, συστήνεται η συχνότερη παρακολούθηση του πρανούς για καλύτερη κατανόηση του φαινομένου των καταπτώσεων. Επιπλέον μέσω των νέων καταπτώσεων που θα καταγραφούν θα υπάρχει πρόσβαση σε περαιτέρω δεδομένα για καλύτερη μελέτη της τροχιακής ανάλυσης του πρανούς. Παράλληλα, προτείνεται η τοποθέτηση κλισιομέτρων στο κατάντη πρανές για το οποίο δεν είναι γνώστη η κινηματική του συμπεριφορά. Οι πληροφορίες που θα ληφθούν μέσω των κλισιομέτρων θα είναι χρήσιμες στην πρόταση μέτρων προστασίας της οδού.

Τέλος, προτείνεται σε πιθανή μελλοντική γεωτεχνική έρευνα στην περιοχή να εξεταστούν οι δύο προτεινόμενες λύσεις για την κρίσιμη περιοχή (μεταξύ X.Θ. +080.00 και +180.00). Αρχικά ένα είναι κατασκευαστικά υλοποιήσιμες, στη συνέχεια πως μπορεί να επηρεάσουν την λειτουργικότητα της οδοποιίας και τέλος να συγκριθούν ως προς τον προϋπολογισμό τους.

Εν κατακλείδι, η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε κατά την παρούσα διατριβή φαίνεται εκ του αποτελέσματος να αποτελεί μία αποτελεσματική λύση για την κατανόηση και προσομοίωση του φαινομένου των βραχοκαταπτώσεων σε ετερογενείς βραχώμαζες όπως ο φλύσχης, για αυτό θα ήταν εύλογο έρευνες με αντίστοιχο τεχνικογεωλογικό – γεωτεχνικό πλαίσιο να ακολουθήσουν παρόμοια ερευνητική στοχοθεσία.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Cheng Y, Liu SC. Power caverns of the Mingtan Pumped Storage Project, Taiwan. In: Hudson JA, editor. Comprehensive rock engineering, vol. 5; 1990. p. 111–32.

Palmstrom A, Singh R. The deformation modulus of rock masses: comparisons between in situ tests and indirect estimates. *Tunnelling Underground Space Technol* 2001;16:115–31.

Hoek, E., Diederichs, M.S., 2006. Empirical estimation of rock mass modulus. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43, pp. 203-215.

Hoek, E., Carranza-Torres, C., Corkum, B., 2002. Hoek - Brown failure criterion - 2002 edition. In: Bawden H.R.W., Curran, J., Telesnicki, M. (eds). *Proceedings of NARMS-TAC 2002*, Toronto, pp. 267-273.

Marinos, & Tsiambaos (2010). STRENGTH AND DEFORMABILITY OF SPECIFIC SEDIMENTARY AND OPHIOLITHIC ROCKS. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 43, 1259-1266.

Bieniawski ZT (1989). *Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil and Petroleum Engineering*. Wiley, 251pp.

Νομικός, Π. (2015). *Εισαγωγή στη μηχανική των πετρωμάτων* [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλυπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. <https://hdl.handle.net/11419/3983>

Κωστόπουλος Σ.Δ. (2014). *Σήραγγες*. Εκδόσεις Ίων

Σ. Κ. Μπαντής. (2008) *Τεχνική Γεωλογία*

Varnes DJ (1978) Slope movement types and processes. In: Schuster RL, Krizek RJ (eds) *Landslides analysis and control*, special report 176 : Transportation research board, National Academy of Sciences, Washington, DC., pp. 11-33

P. Marinos & E. Hoek (2000) Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch.

E. Hoek & E.T. Brown (1997) *Practical Estimates of rock mass strength*

G. Barnes *Εδαφομηχανική Αρχές και Εφαρμογές* (2014) Εκδόσεις Κλειδάριθμος

PTI (1996). Recommendations for Prestressed Rock and Soil Anchors, 3rd ed. Post-Tensioning Institute, Phoenix, Arizona.

Γεωδυναμικό Ινστιτούτο gein.noa.gr

Rock Characterization Testing and Monitoring (1978) – ISRM Suggested Methods.

N. Sabatakakis, G. Koukis, G. Tsiambaos, S. Papanakli (2008) Index properties and strength variation controlled by microstructure for sedimentary rocks.

N. Barton and V. Choubey (1977). The Shear strength of Rock Joints in Theory and Practice

Γεωλογία και γεωτεκτονική εξέλιξη στον Ελλαδικό χώρο (Μ. Μαντουράκης, 2010)

Digital Aerial Mapping A Hands-On Course (Martin Vermeer, Getachew Tesfaye Ayehu, 2021)

Digital Photogrammetry A Practical Course (Wilfried Linder, 2009)

Παύλος Ι. Αστερίου. Διερεύνηση των Γεωτεχνικών Παραμέτρων που Ελέγχουν τις Καταπτώσεις Βράχων, 2016

M.J. Westoby, J. Brasington, N.F. Glasser, M.J. Hambrey, J.M. Reynolds (2012). ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications

Bar N, Nicoll, S. Pothitos, “F. “‘Rock fall trajectory field testing’,” model simulations and considerations for steep slope design in hard rock.”” APSSIM. 2016

P. Faupl, A. Pavlopoulos, G. Migiros “On the provenance of flysch deposits in the External Hellenides of mainland Greece: results from heavy mineral studies” (1997)

M. Westoby ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications 2012

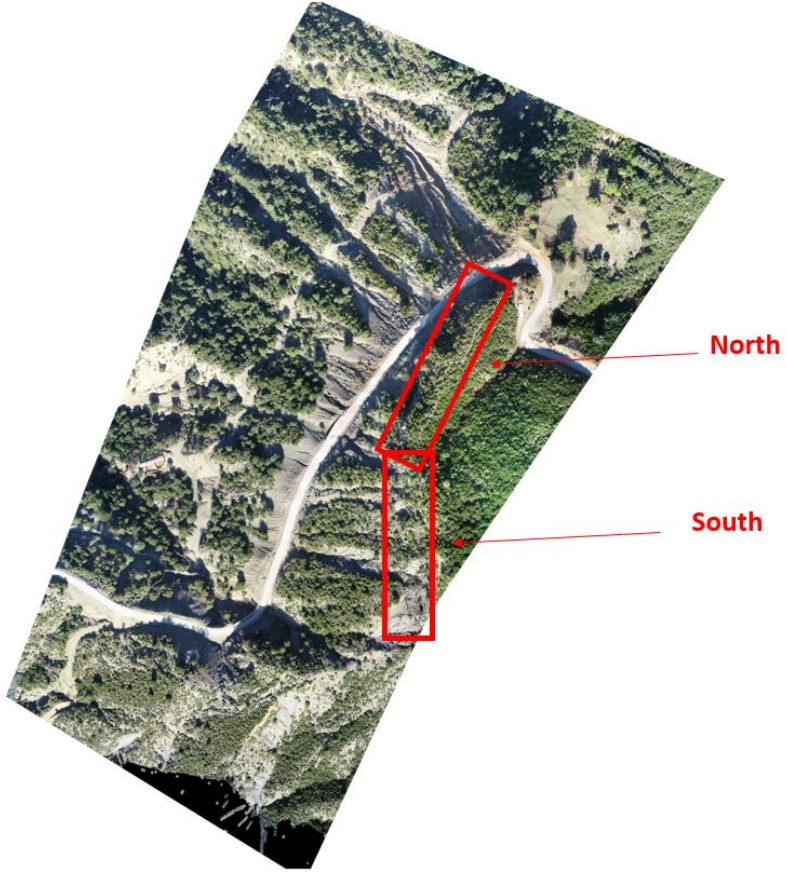
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ

Θέση	Κωδικός	Κλίση (°)	Φορά μέγιστης κλίσης (°)	Τύπος ασυνέχειας	Λιθολογία
Βαλσώρα	SP1	89	241	Διάκλαση	Ιλυόλιθος
	SP1	89	244	Διάκλαση	Ιλυόλιθος
	SP1	80	16	Διάκλαση	Ιλυόλιθος
	SP1	76	200	Διάκλαση	Ιλυόλιθος
	SP1	85	202	Διάκλαση	Ιλυόλιθος
	SP1	65	271	Διάκλαση	Ιλυόλιθος
	SP1	85	344	Διάκλαση	Ιλυόλιθος
	SP1	86	42	Διάκλαση	Ιλυόλιθος
	SP1	24	32	Στρώση	Ιλυόλιθος
	SP1	15	34	Στρώση	Ιλυόλιθος
	SP1	81	30	Στρώση	Ψαμμίτης
	1η μισογάγγεια	24	57	Στρώση	Ιλυόλιθος
	1η μισογάγγεια	71	236	Διάκλαση	Ιλυόλιθος
	SP2	50	236	Διάκλαση	Ιλυόλιθος
	SP2	55	166	Διάκλαση	Ιλυόλιθος
	SP2	37	354	Στρώση	Ιλυόλιθος
	SP2	79	329	Στρώση	Ιλυόλιθος
	SP2	85	330	Διάκλαση	Ιλυόλιθος
	SP2	81	226	Διάκλαση	Ιλυόλιθος
	SP2	84	192	Διάκλαση	Ιλυόλιθος
	SP3	78	211	Διάκλαση	Ιλυόλιθος
	SP3	81	262	Διάκλαση	Ιλυόλιθος
	SP3	85	274	Διάκλαση	Ιλυόλιθος
	SP3	90	309	Διάκλαση	Ιλυόλιθος
	SP3	57	87	Στρώση	Ιλυόλιθος
	SP3	63	80	Στρώση	Ιλυόλιθος
	SP3	55	96	Στρώση	Ιλυόλιθος
	SP3	68	242	Στρώση	Ιλυόλιθος
	SP3	60	250	Στρώση	Ιλυόλιθος
	SP3	79	94	Διάτμηση	Ιλυόλιθος
	SP3	37	300	Διάτμηση	Ιλυόλιθος
	SP4	89	68	Διάτμηση	Ιλυόλιθος
	SP4	45	300	Διάκλαση	Ιλυόλιθος
	SP4	50	248	Διάκλαση	Ιλυόλιθος
	SP4	72	300	Διάκλαση	Ιλυόλιθος
	SP4	70	200	Διάκλαση	Ιλυόλιθος
	SP4	85	330	Διάκλαση	Ιλυόλιθος
	SP4	16	338	Στρώση	Ιλυόλιθος
	SP4	38	300	Διάκλαση	Ιλυόλιθος
	SP4	41	240	Διάκλαση	Ιλυόλιθος
SP4	85	160	Διάκλαση	Ιλυόλιθος	
SP4	79	262	Διάκλαση	Ιλυόλιθος	
SP4	40	233	Διάκλαση	Ιλυόλιθος	

Θέση	Κωδικός	Κλίση (°)	Φορά μέγιστης κλίσης (°)	Τύπος ασυνέχειας	Λιθολογία
	SP5	38	328	Διάκλαση	Ιλυόλιθος
	SP5	40	322	Διάκλαση	Ιλυόλιθος
	SP5	55	246	Διάκλαση	Ιλυόλιθος
	SP5	84	245	Διάκλαση	Ιλυόλιθος
	SP5	80	347	Διάκλαση	Ιλυόλιθος
	SP5	29	44	Στρώση	Ιλυόλιθος
	SP5	10	35	Στρώση	Ιλυόλιθος
	SP5	84	245	Διάκλαση	Ιλυόλιθος
	SP5	80	347	Διάκλαση	Ιλυόλιθος
	SP5	40	300	Στρώση	Ιλυόλιθος
	SP6	25	90	Στρώση	Ψαμμίτης
	SP6	30	70	Στρώση	Ψαμμίτης
	SP6	21	76	Στρώση	Ψαμμίτης
	SP6	25	38	Στρώση	Ψαμμίτης
	SP6	21	62	Στρώση	Ψαμμίτης
	SP6	69	257	Διάκλαση	Ψαμμίτης
	SP6	84	303	Διάκλαση	Ψαμμίτης
	SP6	71	250	Διάκλαση	Ψαμμίτης
	SP6	51	355	Διάκλαση	Ψαμμίτης
	SP6	82	235	Διάκλαση	Ψαμμίτης
SP6	78	303	Διάκλαση	Ψαμμίτης	

SP1 & SP4 : Νότιο τμήμα

SP5 & SP6 : Βόρειο τμήμα



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ
ΔΟΚΙΜΩΝ

**Εργαστηριακές δοκιμές αντοχής, διαβρωσιμότητας και φυσικών
χαρακτηριστικών**

Θέση 5-Βαλαώρα-Δοκιμές				
Τεμάχη	Point Load Tests	Brazilian Tests	Slake Durability Test	Αρ. Δοκιμών
A	6	6	-	12
B	2	-	-	2
Γ	1	-	-	1
Δ	-	-	2	2
Ε	6	-	-	6
ΣΤ	3	-	-	3
Σύνολο				26






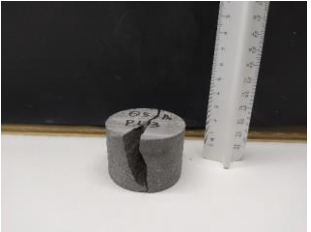
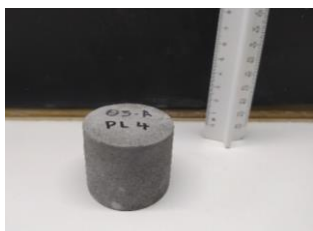


















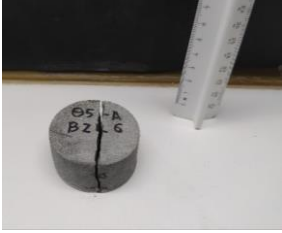
Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα					
ΤΕΜΑΧΟΣ	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ	ΔΟΚΙΜΙΟ	I_{s50} (MPa)	σ_t (MPa)	I_{d2}
Α	Ψαμμίτης	Θ5-A-PL1	3.38	-	-
		Θ5-A-PL2	3.32	-	-
		Θ5-A-PL3	3.79	-	-
		Θ5-A-PL4	3.28	-	-
		Θ5-A-PL5	3.89	-	-
		Θ5-A-PL6	3.56	-	-
		Θ5-A-BZL 1	-	7.99	-
		Θ5-A-BZL 2	-	6.92	-
		Θ5-A-BZL 3	-	8.95	-
		Θ5-A-BZL 4	-	8.33	-
		Θ5-A-BZL 5	-	10.91	-
		Θ5-A-BZL 6	-	6.72	-
Β	Ψαμμίτης	Θ5-B-PL1	4.84	-	-
		Θ5-B-PL2	2.70	-	-
Γ	Ψαμμίτης	Θ5-Γ-PL1	0.25	-	-
Δ	Ψαμμίτης	Θ5-Δ-SDT1	-	-	96.78%
		Θ5-Δ-SDT2	-	-	96.70%
Ε	Ψαμμίτης	Θ5-E-PL1	0.35	-	-
		Θ5-E-PL2	0.49	-	-
		Θ5-E-PL3	0.60	-	-
		Θ5-E-PL4	0.63	-	-
		Θ5-E-PL5	0.60	-	-
		Θ5-E-PL6	0.53	-	-
ΣΤ	Ψαμμίτης	Θ5-ΣΤ-PL1	1.95	-	-
		Θ5-ΣΤ-PL2	2.01	-	-
		Θ5-ΣΤ-PL3	2.11	-	-

Δεδομένα από: Τέμαχος Α (Ψαμμίτης)				
Δοκίμιο	W (mm)	D (mm)	Βάρος W	Ειδικό βάρος (kN/m ³)
Θ2-B-BZL 1	25.14	50.69	129.29	24.99
Θ2-B-BZL 2	21.8	50.66	111.77	24.95
Θ2-B-BZL 3	24.5	50.49	125.07	25.00
Θ2-B-BZL 4	26.1	50.63	134.25	25.06
Θ2-B-BZL 5	23.45	50.5	119.29	24.91
Θ2-B-BZL 6	25.1	50.57	127.91	24.88
Μ.Ο.				24.96

ΤΕΜΑΧΟΣ Α	
Χαρακτηρισμός	Ψαμμίτης
Brazilian Tests	x6
Point Load Tests (Axial Tests)	x6





Point Load Tests (Axial tests)								
Δοκίμια	Διαστάσεις		Έλεγχοι	Παράμετροι υπολογισμού				
	D (mm)	W (mm)		W/D (> 0.3 and < 1)	De ² (mm ²)	P (N)	I _s (Mpa)	F
05-A-PL1 ●	50.64	49	0.97	3159.37	10120	3.20	1.05	3.38
Πριν			Μετά					
05-A-PL2 ●	50.68	51.84	1.02	3345.12	10410	3.11	1.07	3.32
Πριν			Μετά					
05-A-PL3 ●	50.65	36.2	0.71	2334.52	8980	3.85	0.98	3.79
Πριν			Μετά					
05-A-PL4 ●	50.61	39.5	0.78	2545.33	8310	3.26	1.00	3.28
Πριν			Μετά					
05-A-PL5 ●	50.77	46.2	0.91	2986.48	11170	3.74	1.04	3.89
Πριν			Μετά					
05-A-PL6 ●	50.65	43.9	0.87	2831.09	9800	3.46	1.03	3.56
Πριν			Μετά					

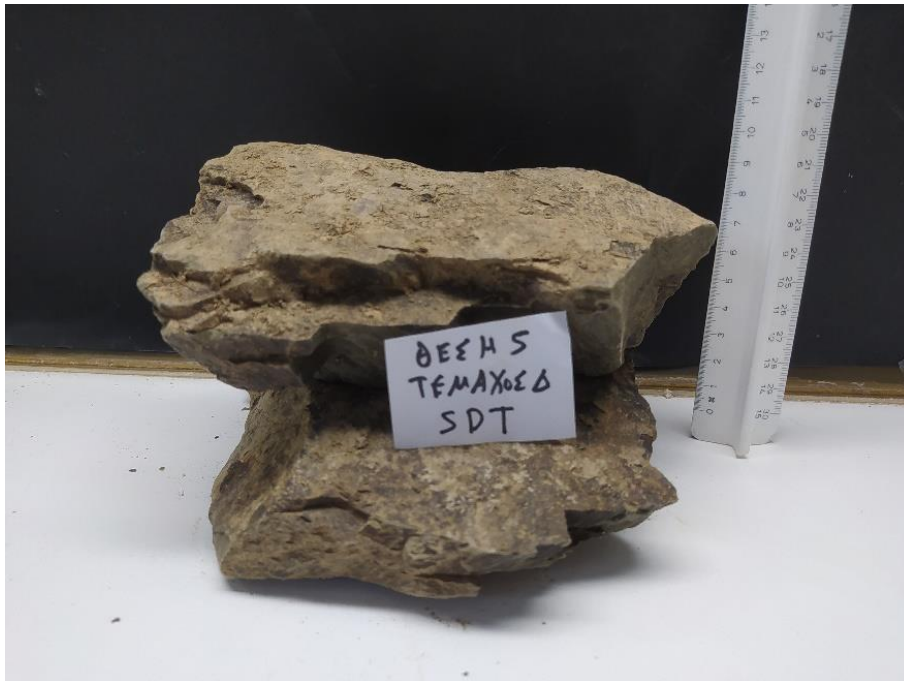
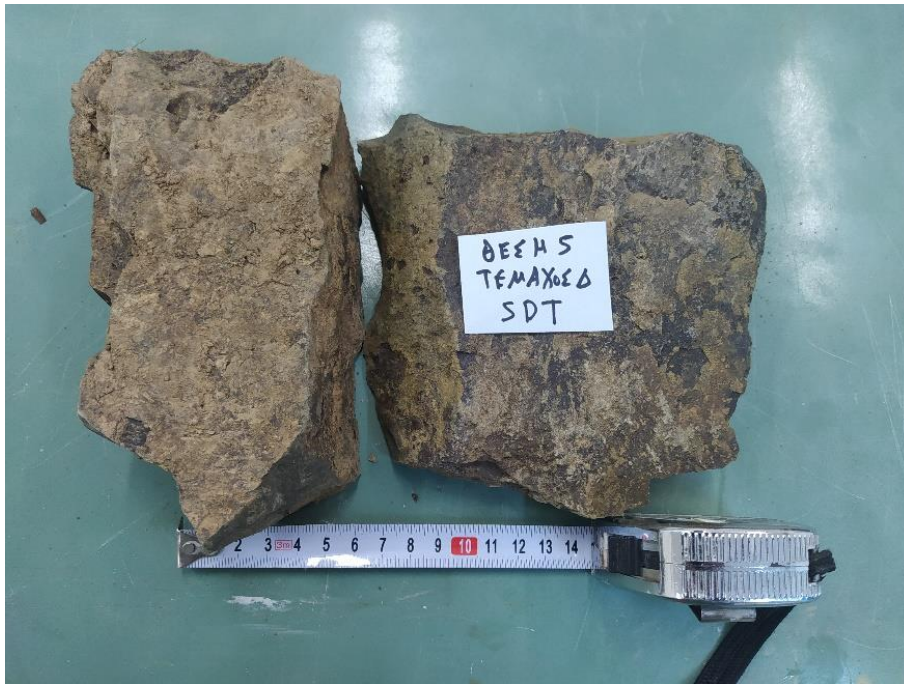
Brazilian Tests							
Δοκίμια	Διαστάσεις		Έλεγχοι W/D (>0.2 and <0.75)	Παράμετροι υπολογισμού			
	W (mm)	D (mm)		Ρυθμός Φόρτισης (kN/s)	P (kN)	σ_t (MPa)	Θραύση κατά τη γενέτειρα
Θ5-A-BZL 1	25.14	50.69	0.50	0.20	16.0	7.99	✓
Πριν			Μετά				
Θ5-A-BZL 2	21.8	50.66	0.43	0.20	12.0	6.92	✓
Πριν			Μετά				
Θ5-A-BZL 3	24.5	50.49	0.49	0.20	17.4	8.95	✓
Πριν			Μετά				
Θ5-A-BZL 4	26.1	50.63	0.52	0.20	17.3	8.33	✓
Πριν			Μετά				
Θ5-A-BZL 5	23.45	50.5	0.46	0.20	20.3	10.91	✓
Πριν			Μετά				
Θ5-A-BZL 6	25.1	50.57	0.50	0.20	13.4	6.72	✓
Πριν			Μετά				

ΤΕΜΑΧΟΣ Γ	
Χαρακτηρισμός	Ψαμμίτης
Point Load Tests (Irregular Lump Tests)	x1



Point Load Test (Irregular lumps tests)													
Δοκίμια	Διαστάσεις					Έλεγχοι διαστάσεων		Παράμετροι υπολογισμού					
	W ₁ (mm)	W ₂ (mm)	W (mm)	L (mm)	D (mm)	L/D (> 1.0)	D/W (> 0.3 and < 1)	De ² (mm ²)	P (N)	I _s (MPa)	F	I ₅₀ (MPa)	
Θ5-Γ-PL1	85.1	68.3	76.7	94.4	51	1.85	0.66	4980.53	1070	0.21	1.17	0.25	
Πριν						Μετά							

ΤΕΜΑΧΟΣ Δ	
Χαρακτηρισμός	Ψαμμίτης
Slake Durability Tests	x2















Ø5-Δ-SD1			Ø5-Δ-SD2		
	Weights	I _{Di}		Weights	I _{Di}
Initial	2136.47	100.0%	Initial	2166.63	100.0%
Cycle 1	2127.4	98.2%	Cycle 1	2156.35	98.0%
Cycle 2	2120.53	96.8%	Cycle 2	2149.83	96.7%
Drum	1641.9		Drum	1657.23	






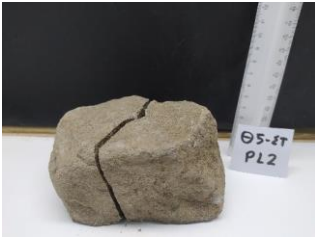
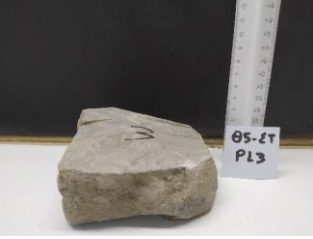

ΤΕΜΑΧΟΣ Ε	
Χαρακτηρισμός	Ψαμμίτης
Point Load Tests (Irregular Lump Tests)	x6



Point Load Test (Irregular lumps tests)												
Δοκίμα	Διαστάσεις					Έλεγχοι διαστάσεων		Παράμετροι υπολογισμού				
	W ₁ (mm)	W ₂ (mm)	W (mm)	L (mm)	D (mm)	L/D (> 1.0)	D/W (> 0.3 and < 1)	De ² (mm ²)	P (N)	I _s (Mpa)	F	I ₅₀ (MPa)
05-E-PL1	51.2	47.1	49.15	62.3	25	2.49	0.51	1564.49	600	0.38	0.90	0.35
Πριν					Μετά							
05-E-PL2	52.2	32	42.1	61.4	41	1.50	0.97	2197.74	1100	0.50	0.97	0.49
Πριν					Μετά							
05-E-PL3	45.2	40.1	42.65	72	38	1.89	0.89	2063.54	1300	0.63	0.96	0.60
Πριν					Μετά							
05-E-PL4	45	40	42.5	58.6	40	1.47	0.94	2164.51	1400	0.65	0.97	0.63
Πριν					Μετά							
05-E-PL5	50	51.9	50.95	79.8	42	1.90	0.82	2724.61	1600	0.59	1.02	0.60
Πριν					Μετά							
05-E-PL6	59	30	44.5	80	31	2.58	0.70	1756.43	1000	0.57	0.92	0.53
Πριν					Μετά							

ΤΕΜΑΧΟΣ ΣΤ	
Χαρακτηρισμός	Ψαμμίτης
Point Load Tests (Irregular Lump Tests)	x3



Point Load Test (Irregular lumps tests)												
Δοκίμια	Διαστάσεις					Έλεγχοι διαστάσεων		Παράμετροι υπολογισμού				
	W ₁ (mm)	W ₂ (mm)	W (mm)	L (mm)	D (mm)	L/D (> 1.0)	D/W (> 0.3 and < 1)	De ² (mm ²)	P (N)	I _s (MPa)	F	I ₅₅₀ (MPa)
Θ5-ΣΤ-PL1	89.1	88.2	88.65	82.2	40	2.06	0.45	4514.91	7700	1.71	1.14	1.95
Πριν						Μετά						
Θ5-ΣΤ-PL2	87	80.2	83.6	96.2	42	2.29	0.50	4470.60	7900	1.77	1.14	2.01
Πριν						Μετά						
Θ5-ΣΤ-PL3	90.1	86.2	88.15	103.2	61	1.69	0.69	6846.40	11500	1.68	1.25	2.11
Πριν						Μετά						

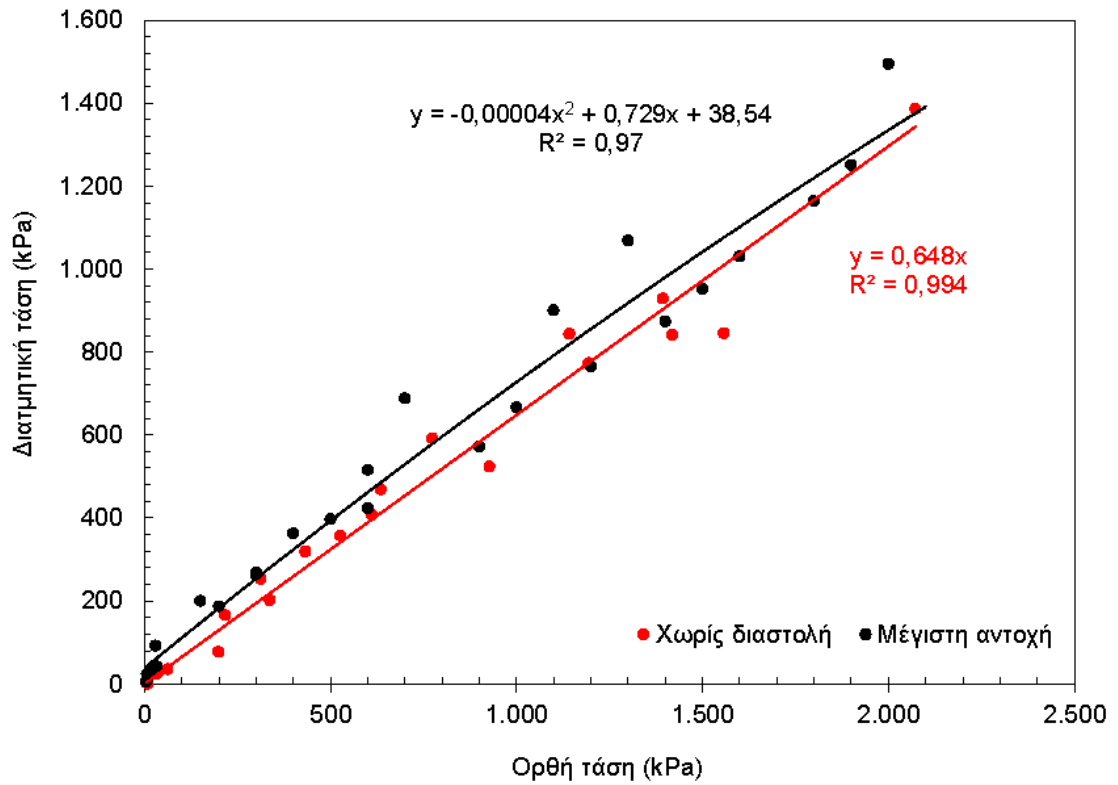
Εργαστηριακές δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχειών



ΕΡΓΟΠΡΟΓΡΑΦΗ: «Ανάπτυξη ψηφιακών εργαλείων και ενσωμάτωσή τους σε γεωτεχνολογικές μεθόδους για την έρευνα της επικινδυνότητας εκδήλωσης κατολισθήσεων σε περιβάλλον ασθενών και σύνθετων βραχομαζών στην περιοχή της Ευρτανίας και της προστασίας και στήριξης ορυγμάτων ανά μηχανισμό αστοχίας»

ΠΙΝΑΚΑΣ : ΣΥΝΟΠΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ ΒΡΑΧΟΥ

Α/Α No	Γεώτρηση /Borehole	Δείγμα /Sample	Βέθος /Depth	Περιγραφή άρρηκτου περιόριτος / Intact rock description	Περιγραφή ασυνέχειας / Discontinuity description	Εκτιμώμενη επιτόπου κατακόρυφη τάση / Estimated in-situ vertical stress (kPa)	Στάδια ορθών τάσεων / Normal stress stages (kPa)							Περίμετροι διατμητικής αντοχής/ Shear strength parameters			
							σ _{n1}	σ _{n2}	σ _{n3}	σ _{n4}	σ _{n5}	σ _{n6}	σ _{n7}	φ (°)	c (kPa)	φ (°)	c (kPa)
1	-	SV1	-	Ελαφρός έως μέτρια αποσαθρωμένος, μέτριας αντοχής ΨΑΜΜΙΤΗΣ	Τραχεία επιτόπη με μέτρια εμπλοκή/αλληλοκλειδομα. ελαφρά αποσαθρωμένη με μέτρια φλιπτική ανοχή των τοχωμάτων ασυνέχεια. Ο προσανατολισμός της επιφάνειας διάτμησης είναι παράλληλος με την στρώση. Η μέγιστη γωνία διαστολής στην διεύθυνση της διάτμησης υπό το ίδιο βέρος (νεκρό φορτίο, ορθή τάση = 6,0 kPa) είναι ίση με 69,4°	1000	6	29	150	300	700	1500	2000	34,2	76,6	32,3	0
2	-	SV2	-	Ελαφρός έως μέτρια αποσαθρωμένος, μέτριας αντοχής ΨΑΜΜΙΤΗΣ	Τραχεία κλιμακωδής με μέτρια έως καλή εμπλοκή/αλληλοκλειδομα. υψηλή με μέτρια φλιπτική ανοχή των τοχωμάτων ασυνέχεια. Ο προσανατολισμός της επιφάνειας διάτμησης είναι παράλληλος με την στρώση. Η μέγιστη γωνία διαστολής στην διεύθυνση της διάτμησης υπό το ίδιο βέρος (νεκρό φορτίο, ορθή τάση = 5,9 kPa) είναι ίση με 19,1°	500	5,9	1300	1100	600	400	200	-	38,9	21,7	35,2	0
3	-	SV3	-	Ελαφρός έως μέτρια αποσαθρωμένος, μέτριας αντοχής ΨΑΜΜΙΤΗΣ	Τραχεία επιτόπη με μέτρια εμπλοκή/αλληλοκλειδομα. ελαφρά αποσαθρωμένη με μέτρια φλιπτική ανοχή των τοχωμάτων ασυνέχεια. Ο προσανατολισμός της επιφάνειας διάτμησης είναι παράλληλος με την στρώση. Η μέγιστη γωνία διαστολής στην διεύθυνση της διάτμησης υπό το ίδιο βέρος (νεκρό φορτίο, ορθή τάση = 5,6 kPa) είναι ίση με 20,6°	750	5,6	27	300	500	1000	1200	1800	32,0	40,1	33,2	0
4	-	SV4	-	Ελαφρός έως μέτρια αποσαθρωμένος, μέτριας αντοχής ΨΑΜΜΙΤΗΣ	Τραχεία επιτόπη με μέτρια εμπλοκή/αλληλοκλειδομα. ελαφρά αποσαθρωμένη με μέτρια φλιπτική ανοχή των τοχωμάτων ασυνέχεια. Ο προσανατολισμός της επιφάνειας διάτμησης είναι παράλληλος με την στρώση. Η μέγιστη γωνία διαστολής στην διεύθυνση της διάτμησης υπό το ίδιο βέρος (νεκρό φορτίο, ορθή τάση = 4,1 kPa) είναι ίση με 16,43°	1150	4,1	32	600	900	1400	1600	1900	31,7	20,8	31,7	0



ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ (ΓΙΑ ΤΑ 4 ΔΟΚΙΜΙΑ)

Παράμετροι διατμητικής αντοχής/ Shear strength parameters			
Μέγιστη / Peak		Χωρίς διαστολή / Non-dilatant	
φ (°)	c (kPa)	φ (°)	c (kPa)
33,3	52,2	32,9	0



ΔΟΚΙΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΒΡΑΧΟΥ- DIRECT SHEAR TEST OF ROCK JOINT

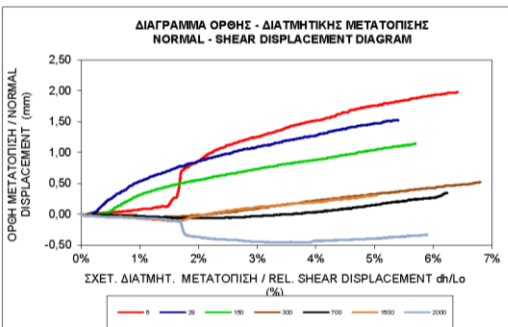
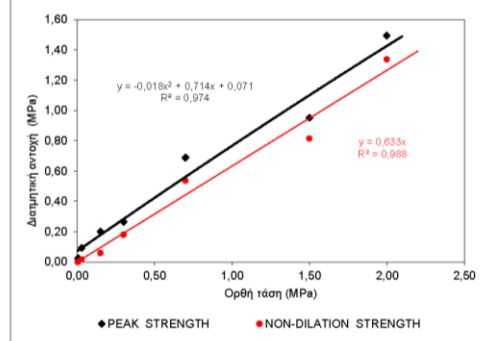
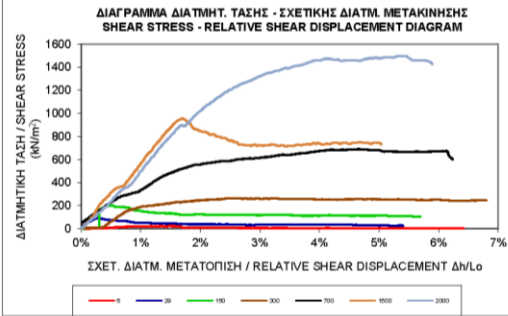
ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints: Revised Version (2014)

ΓΕΩΤΡΗΣΗ/BOREHOLE: -

ΔΕΙΓΜΑ/SAMPLE: SV1

ΒΑΘΟΣ/DEPTH (m): -

ΜΗΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ/SAMPLE LENGTH (mm): 95,68



	ΔΙΑΤΜ. ΑΝΤΟΧΗ /SHEAR STRENGTH	
	ΜΕΓΙΣΤΗ/PEAK	ΧΩΡΙΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗ/ NON-DILATION
Γωνία τριβής/phi (°)	34,2	32,3
Συνοχή/ c (kPa)	76,6	0,0

ΟΡΘΗ ΤΑΣΗ/ NORMAL STRESS (MPa)	ΔΙΑΤΜ. ΑΝΤΟΧΗ/SHEAR STRENGTH (MPa)	
	ΜΕΓΙΣΤΗ/PEAK	ΧΩΡΙΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗ/ NON-DILATION
0,006	0,02	0,00
0,029	0,09	0,02
0,150	0,20	0,06
0,300	0,26	0,18
0,700	0,69	0,54
1,500	0,95	0,82
2,000	1,49	1,34

ΕΡΓΟ / PROJECT : «Ανάπτυξη ψηφιακών εργαλείων και ενσωμάτωσή τους σε γεωτεχνολογικές μεθόδους για την έρευνα της επικινδυνότητας εκδήλωσης καταστήσεων σε περιβάλλον ασθενών και σύνθετων βραχομαζών στην περιοχή της Ευρυτανίας και της προστασίας και στήριξης ορυγμάτων ανά μηχανισμό αστοχίας»



ΔΟΚΙΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΒΡΑΧΟΥ- DIRECT SHEAR TEST OF ROCK JOINT

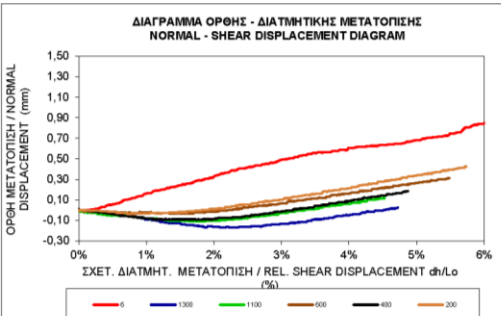
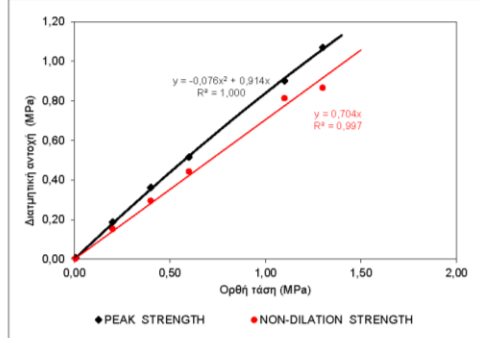
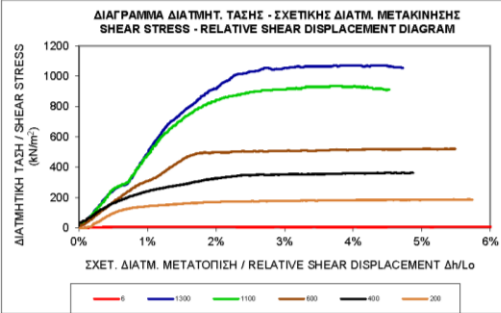
ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints: Revised Version (2014)

ΓΕΩΤΡΗΣΗ/BOREHOLE: -

ΔΕΙΓΜΑ/SAMPLE: SV2

ΒΑΘΟΣ/DEPTH (m): -

ΜΗΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ/SAMPLE LENGTH (mm): 100,91



	ΔΙΑΤΜ. ΑΝΤΟΧΗ /SHEAR STRENGTH	
	ΜΕΓΙΣΤΗ/PEAK	ΧΩΡΙΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗ/ NON-DILATION
Γωνία τριβής/phi (°)	38,9	35,2
Συνοχή/ c (kPa)	21,7	0,0

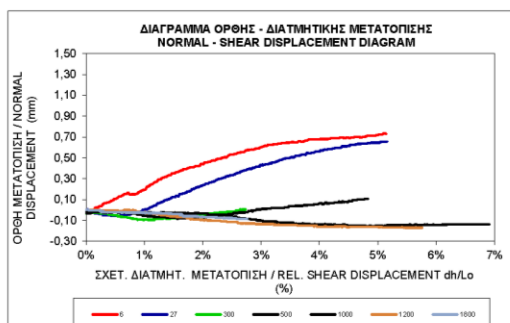
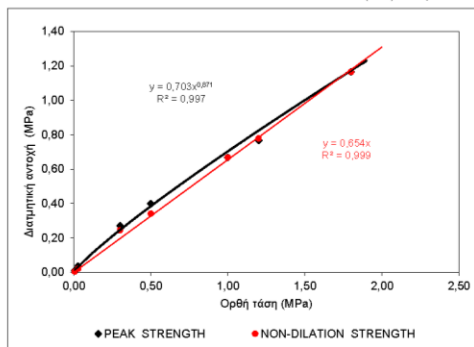
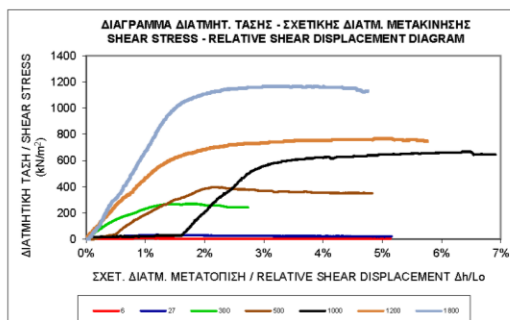
ΟΡΘΗ ΤΑΣΗ/ NORMAL STRESS (MPa)	ΔΙΑΤΜ. ΑΝΤΟΧΗ/SHEAR STRENGTH (MPa)	
	ΜΕΓΙΣΤΗ/PEAK	ΧΩΡΙΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗ/ NON-DILATION
0,006	0,01	0,00
1,300	1,07	0,87
1,100	0,90	0,81
0,600	0,52	0,44
0,400	0,36	0,30
0,200	0,19	0,15

ΕΡΓΟ / PROJECT : «Ανάπτυξη ψηφιακών εργαλείων και ενσωμάτωσή τους σε γεωτεχνολογικές μεθόδους για την έρευνα της επικινδυνότητας εκδήλωσης καταστήσεων σε περιβάλλον ασθενών και σύνθετων βραχομαζών στην περιοχή της Ευρυτανίας και της προστασίας και στήριξης ορυγμάτων ανά μηχανισμό αστοχίας»



ΔΟΚΙΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΒΡΑΧΟΥ- DIRECT SHEAR TEST OF ROCK JOINT
 ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints: Revised Version (2014)

ΓΕΩΤΡΗΣΗ/BOREHOLE: - ΔΕΙΓΜΑ/SAMPLE: **SV3** ΒΑΘΟΣ/DEPTH (m): - ΜΗΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ/SAMPLE LENGTH (mm): **100,53**



	ΔΙΑΤΜ. ΑΝΤΟΧΗ /SHEAR STRENGTH	
	ΜΕΓΙΣΤΗ/PEAK	ΧΩΡΙΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗ/ NON-DILATION
Γωνία τριβής/φ (°)	32,0	33,2
Συνοχή/ c (kPa)	40,1	0,0

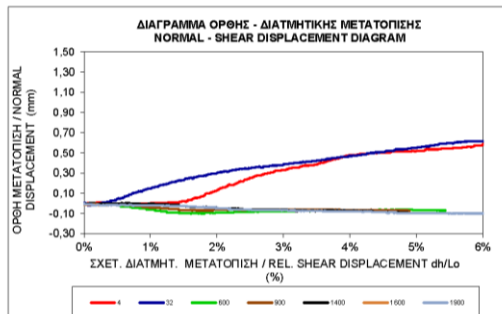
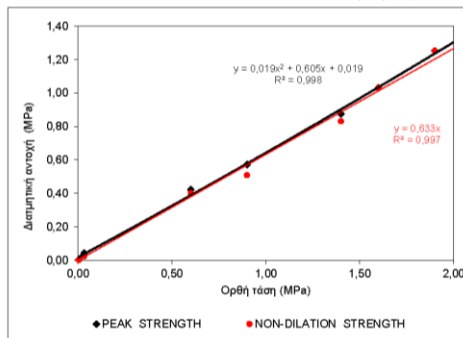
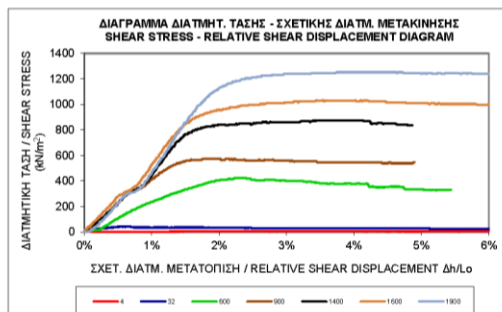
ΟΡΘΗ ΤΑΣΗ/ NORMAL STRESS (MPa)	ΔΙΑΤΜ. ΑΝΤΟΧΗ/SHEAR STRENGTH (MPa)	
	ΜΕΓΙΣΤΗ/PEAK	ΧΩΡΙΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗ/ NON-DILATION
0,006	0,01	0,00
0,027	0,03	0,02
0,300	0,27	0,24
0,500	0,40	0,34
1,000	0,67	0,67
1,200	0,77	0,78
1,800	1,16	1,16

ΕΡΓΟ / PROJECT : «Ανάπτυξη ψηφιακών εργαλείων και ενσωμάτωσή τους σε γεωτεχνολογικές μεθόδους για την έρευνα της επικινδυνότητας εκδήλωσης καταλοισήσεων σε περιβάλλον ασθενών και σύνθετων βραχωμαζών στην περιοχή της Ευρωπαιας και της προστασίας και στήριξης ορυγμάτων ανά μηχανισμό αστοχίας»



ΔΟΚΙΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΒΡΑΧΟΥ- DIRECT SHEAR TEST OF ROCK JOINT
 ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints: Revised Version (2014)

ΓΕΩΤΡΗΣΗ/BOREHOLE: - ΔΕΙΓΜΑ/SAMPLE: **SV4** ΒΑΘΟΣ/DEPTH (m): - ΜΗΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ/SAMPLE LENGTH (mm): **96,14**



	ΔΙΑΤΜ. ΑΝΤΟΧΗ /SHEAR STRENGTH	
	ΜΕΓΙΣΤΗ/PEAK	ΧΩΡΙΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗ/ NON-DILATION
Γωνία τριβής/φ (°)	31,7	31,7
Συνοχή/ c (kPa)	20,8	0,0

ΟΡΘΗ ΤΑΣΗ/ NORMAL STRESS (MPa)	ΔΙΑΤΜ. ΑΝΤΟΧΗ/SHEAR STRENGTH (MPa)	
	ΜΕΓΙΣΤΗ/PEAK	ΧΩΡΙΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗ/ NON-DILATION
0,004	0,00	0,00
0,032	0,04	0,02
0,600	0,42	0,40
0,900	0,57	0,51
1,400	0,87	0,83
1,600	1,03	1,03
1,900	1,25	1,25

ΕΡΓΟ / PROJECT : «Ανάπτυξη ψηφιακών εργαλείων και ενσωμάτωσή τους σε γεωτεχνολογικές μεθόδους για την έρευνα της επικινδυνότητας εκδήλωσης καταλοισήσεων σε περιβάλλον ασθενών και σύνθετων βραχωμαζών στην περιοχή της Ευρωπαιας και της προστασίας και στήριξης ορυγμάτων ανά μηχανισμό αστοχίας»



DIRECT SHEAR TEST OF ROCK JOINT

ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints:

ΔΟΚΙΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΒΡΑΧΟΥ

ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints:

Revised Version (2014)

ΓΕΩΤΡΗΣΗ/BOREHOLE: -

ΔΕΙΓΜΑ/SAMPLE: **SV1**

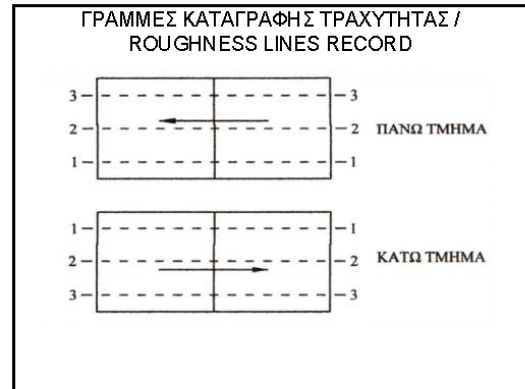
ΒΑΘΟΣ/DEPTH (m): -

DESCRIPTION/ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

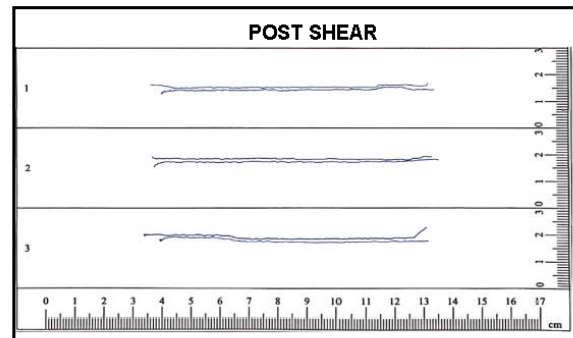
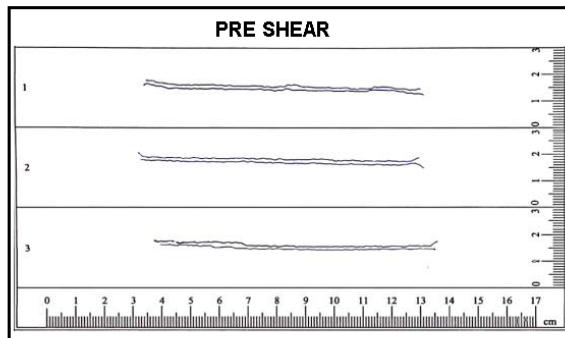
1. INTACT ROCK MATERIAL/ ΑΡΡΗΚΤΟ ΒΡΑΧΩΔΕΣ ΥΛΙΚΟ
Ελαφρώς έως μέτρια αποσαθρωμένος, μέτριας αντοχής ΨΑΜΜΙΤΗΣ

2. DISCONTINUITY/ΑΣΥΝΕΧΕΙΑ

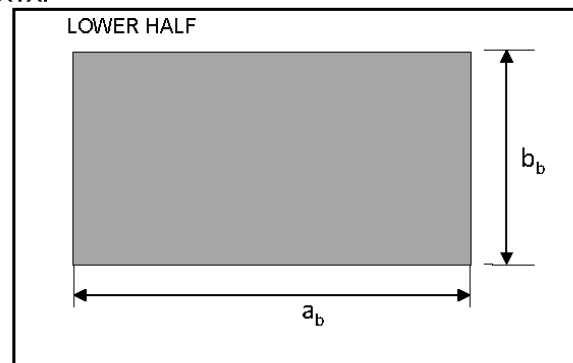
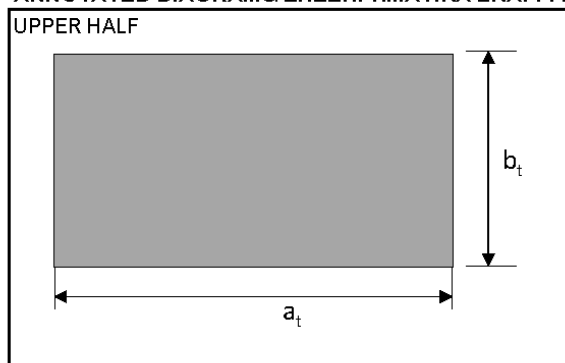
Τραχεία επίπεδη με μέτρια εμπλοκή/αλληλοκλείδωμα, ελαφρά αποσαθρωμένη με μέτρια θλιπτική αντοχή των τοιχωμάτων ασυνέχεια. Ο προσανατολισμός της επιφάνειας διάτμησης είναι παράλληλος με την στρώση. Η μέγιστη γωνία διαστολής στην διεύθυνση της διάτμησης υπό το ίδιο βάρος (νεκρό φορτίο, ορθή τάση = 6,0 kPa) είναι ίση με 69,4°



ROUGHNESS PROFILES/ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ



ANNOTATED DIAGRAMS/ΕΠΕΞΗΓΗΜΑΤΙΚΑ ΣΚΑΡΙΦΗΜΑΤΑ:



Μήκος/Length a_t (mm): **95,7**
Πλάτος/Width b_t (mm): **86,3**
Μορφή/Shape: **Rectangular**

Μήκος/Length a_b (mm): **96,4**
Πλάτος/Width b_b (mm): **85,4**
Βάρος πάνω μισού δοκιμίου/
Weight of upper half of sample(g): **2243**

ΕΡΓΟ / PROJECT : «Ανάπτυξη ψηφιακών εργαλείων και ενσωμάτωσή τους σε γεωτεχνολογικές μεθόδους για την έρευνα της επικινδυνότητας εκδήλωσης κατολισθήσεων σε περιβάλλον ασθενών και σύνθετων βραχομαζών στην περιοχή της Ευρυτανίας και της προστασίας και στήριξης ορυγμάτων ανά μηχανισμό αστοχίας»



DIRECT SHEAR TEST OF ROCK JOINT

ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints:

ΔΟΚΙΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΒΡΑΧΟΥ

ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints:

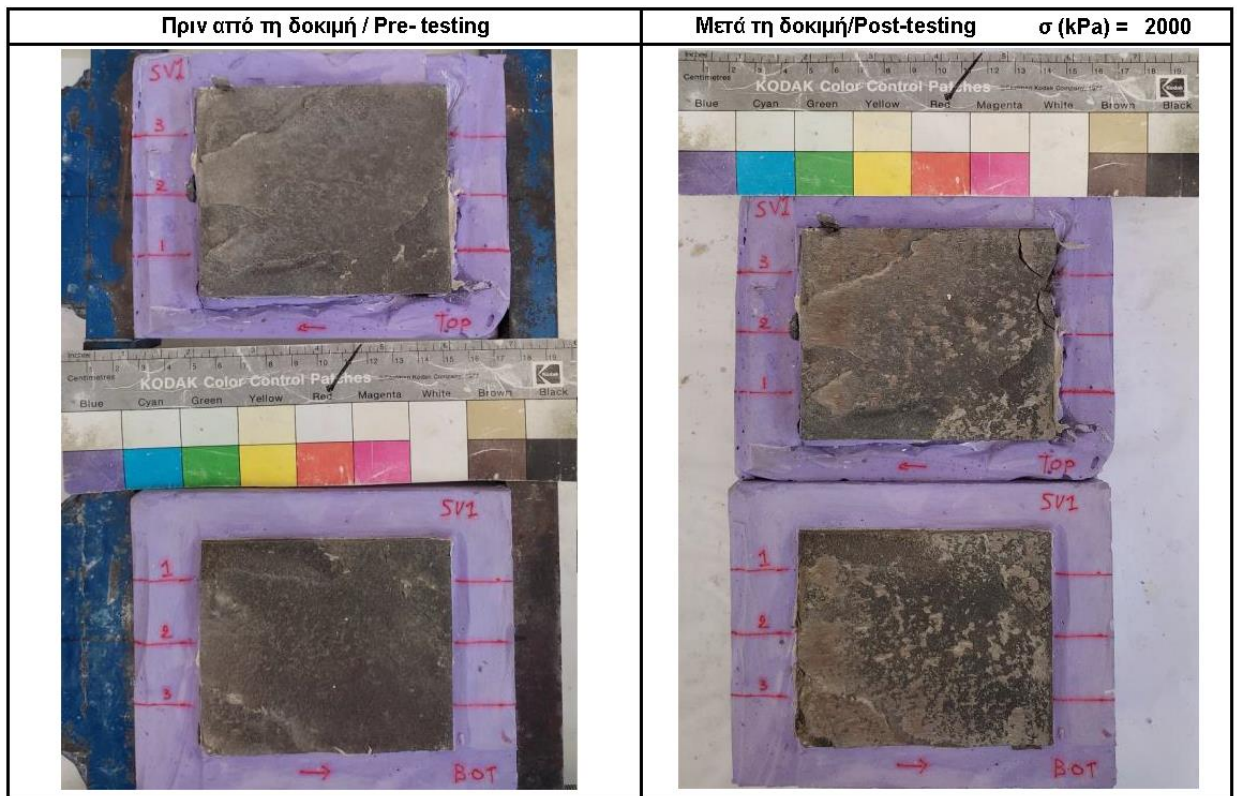
Revised Version (2014)

SAMPLE PHOTOGRAPHS/ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

ΓΕΩΤΡΗΣΗ/BOREHOLE: -

ΔΕΙΓΜΑ/SAMPLE: SV1

ΒΑΘΟΣ/DEPTH (m): -



ΕΡΓΟ / PROJECT : «Ανάπτυξη ψηφιακών εργαλείων και ενσωμάτωσή τους σε γεωτεχνολογικές μεθόδους για την έρευνα της επικινδυνότητας εκδήλωσης καταλισθήσεων σε περιβάλλον ασθενών και σύνθετων βραχομαζών στην περιοχή της Ευρυτανίας και της προστασίας και στήριξης ορυγμάτων ανά μηχανισμό αστοχίας»



DIRECT SHEAR TEST OF ROCK JOINT

ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints:

ΔΟΚΙΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΒΡΑΧΟΥ

ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints:

Revised Version (2014)

ΓΕΩΤΡΗΣΗ/BOREHOLE: -

ΔΕΙΓΜΑ/SAMPLE: **SV2**

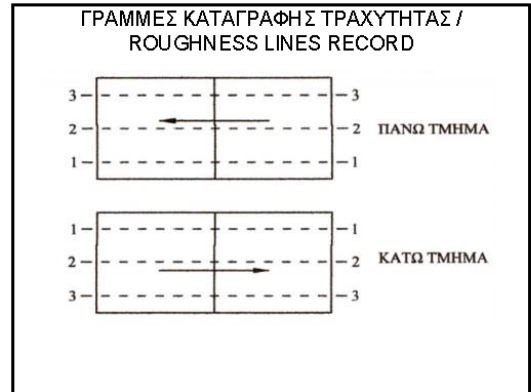
ΒΑΘΟΣ/DEPTH (m): -

DESCRIPTION/ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

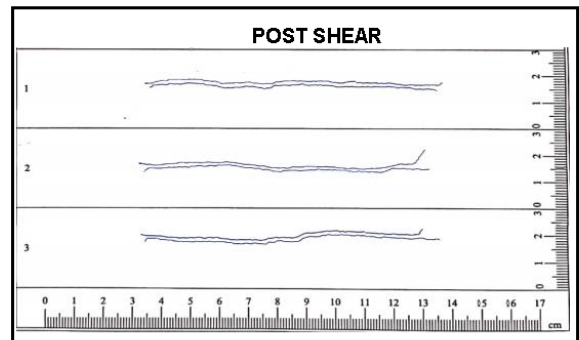
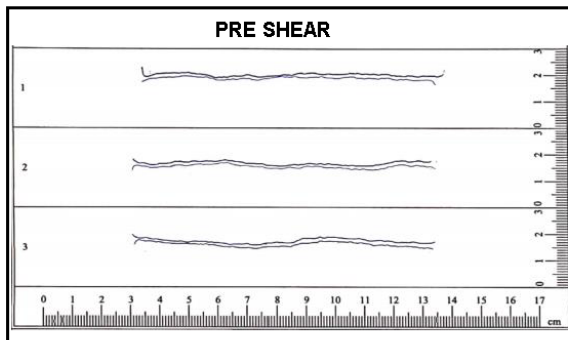
1. INTACT ROCK MATERIAL/ ΑΡΡΗΚΤΟ ΒΡΑΧΩΔΕΣ ΥΛΙΚΟ
Ελαφρώς έως μέτρια αποσασθρωμένος, μέτριας αντοχής ΨΑΜΜΙΤΗΣ

2. DISCONTINUITY/ΑΣΥΝΕΧΕΙΑ

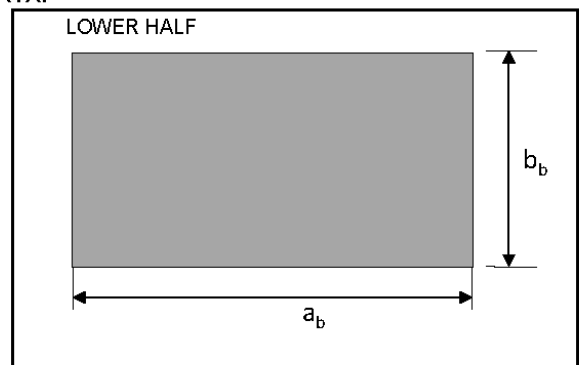
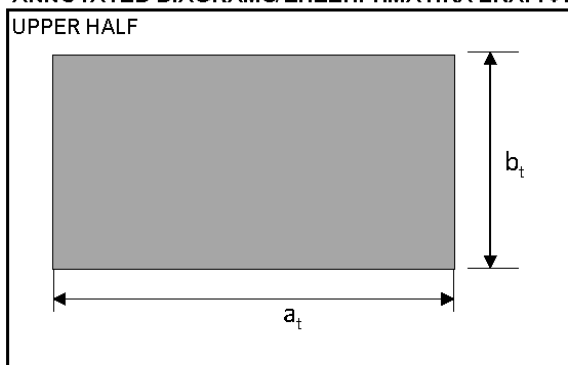
Τραχεία κυματοειδής με μέτρια έως καλή εμπλοκή/αλληλοκλείδωμα, υγιής με μέτρια θλιπτική αντοχή των τοιχωμάτων ασυνέχεια. Ο προσανατολισμός της επιφάνειας διάτμησης είναι παράλληλος με την στρώση. Η μέγιστη γωνία διαστολής στην διεύθυνση της διάτμησης υπό το ίδιο βάρος (νεκρό φορτίο, ορθή τάση = 5,9 kPa) είναι ίση με 19,1°



ROUGHNESS PROFILES/ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ



ANNOTATED DIAGRAMS/ΕΠΕΞΗΓΗΜΑΤΙΚΑ ΣΚΑΡΙΦΗΜΑΤΑ:



Μήκος/Length a_t (mm): **100,9**
Πλάτος/Width b_t (mm): **87,2**
Μορφή/Shape: **Rectangular**

Μήκος/Length a_b (mm): **100,9**
Πλάτος/Width b_b (mm): **86,7**
Βάρος πάνω μισού δοκιμίου/
Weight of upper half of sample(g): **2582**

ΕΡΓΟ / PROJECT : «Ανάπτυξη ψηφιακών εργαλείων και ενσωμάτωσή τους σε γεωτεχνολογικές μεθόδους για την έρευνα της επικινδυνότητας εκδήλωσης κατολισθήσεων σε περιβάλλον ασθενών και σύνθετων βραχομαζών στην περιοχή της Ευρυτανίας και της προστασίας και στήριξης ορυγμάτων ανά μηχανισμό αστοχίας»



DIRECT SHEAR TEST OF ROCK JOINT

ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints:
ΔΟΚΙΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΒΡΑΧΟΥ

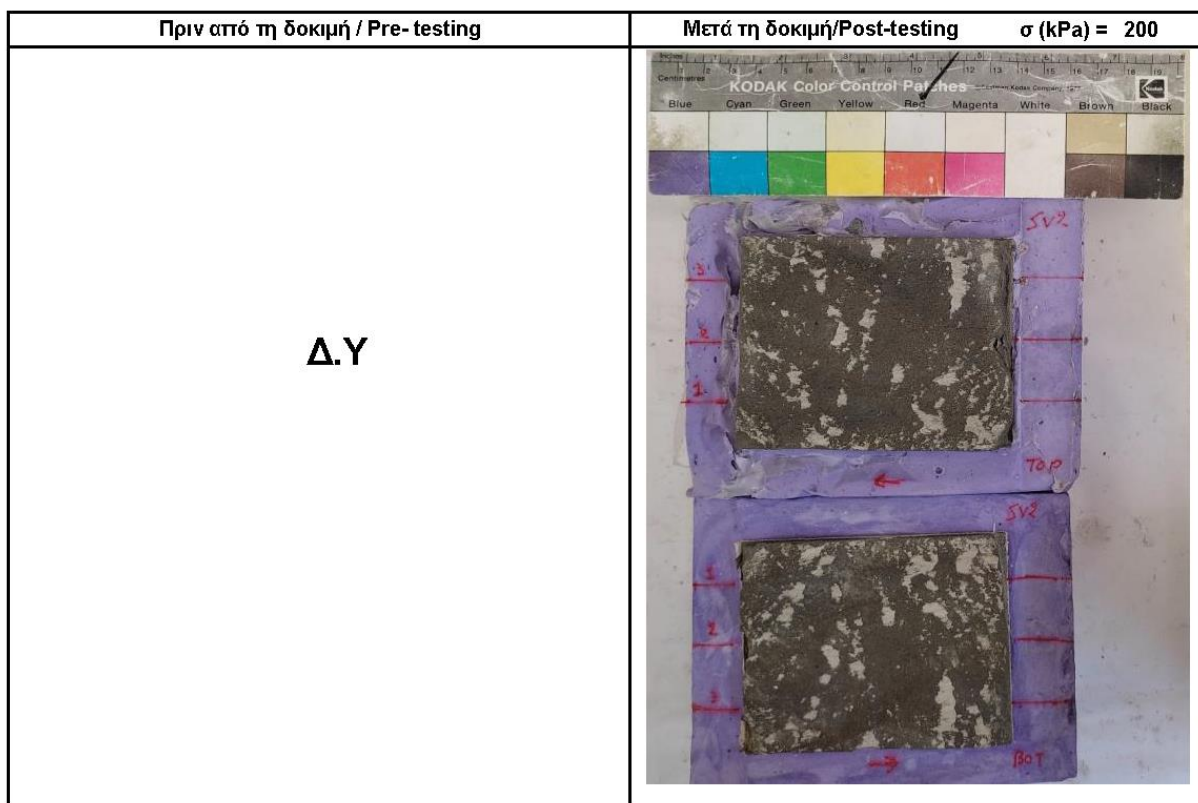
ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints:
Revised Version (2014)

SAMPLE PHOTOGRAPHS/ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

ΓΕΩΤΡΗΣΗ/BOREHOLE: -

ΔΕΙΓΜΑ/SAMPLE: SV2

ΒΑΘΟΣ/DEPTH (m): -





DIRECT SHEAR TEST OF ROCK JOINT

ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints:

ΔΟΚΙΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΒΡΑΧΟΥ

ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints:
Revised Version (2014)

ΓΕΩΤΡΗΣΗ/BOREHOLE: -

ΔΕΙΓΜΑ/SAMPLE: **SV3**

ΒΑΘΟΣ/DEPTH (m): -

DESCRIPTION/ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

1. INTACT ROCK MATERIAL/ ΑΡΡΗΚΤΟ ΒΡΑΧΩΔΕΣ ΥΛΙΚΟ

Ελαφρώς έως μέτρια αποσαθρωμένος, μέτριας αντοχής ΨΑΜΜΙΤΗΣ

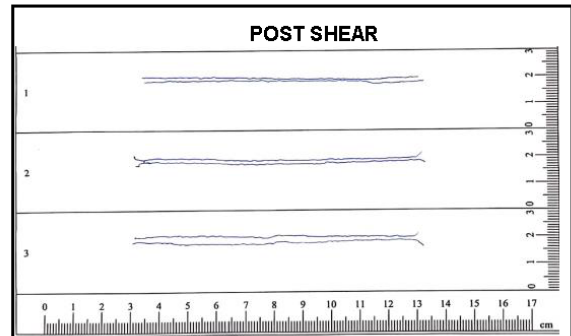
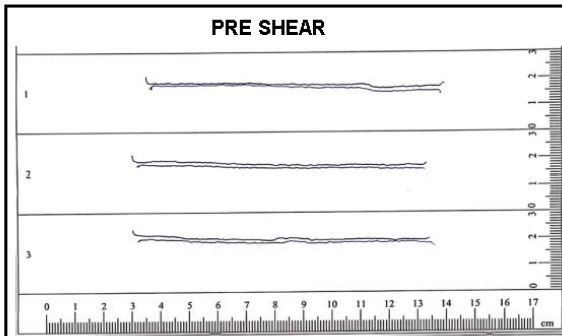
2. DISCONTINUITY/ΑΣΥΝΕΧΕΙΑ

Τραχεία επίπεδη με μέτρια εμπλοκή/αλληλοκλείδωμα, ελαφρά αποσαθρωμένη με μέτρια θλιπτική αντοχή των τοιχωμάτων ασυνέχεια. Ο προσανατολισμός της επιφάνειας διάτμησης είναι παράλληλος με την στρώση. Η μέγιστη γωνία διαστολής στην διεύθυνση της διάτμησης υπό το ίδιο βάρος (νεκρό φορτίο, ορθή τάση = 5,6 kPa) είναι ίση με 20,6°

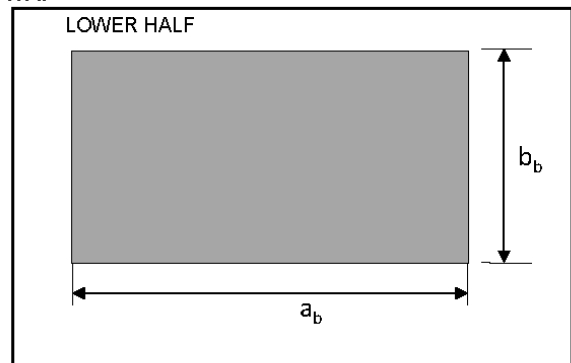
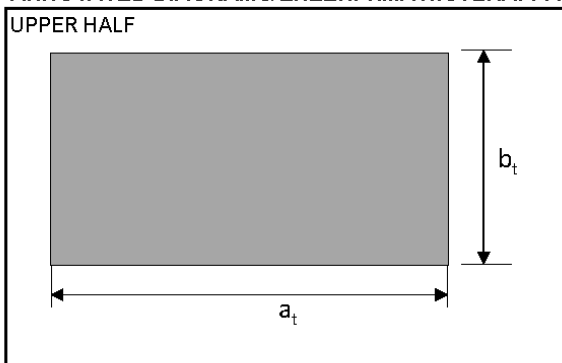
ΓΡΑΜΜΕΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ / ROUGHNESS LINES RECORD



ROUGHNESS PROFILES/ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ



ANNOTATED DIAGRAMS/ΕΠΕΞΗΓΗΜΑΤΙΚΑ ΣΚΑΡΙΦΗΜΑΤΑ:



Μήκος/Length a_t (mm): **100,5**
Πλάτος/Width b_t (mm): **86,1**
Μορφή/Shape: **Rectangular**

Μήκος/Length a_b (mm): **101,1**
Πλάτος/Width b_b (mm): **85,9**
Βάρος πάνω μισού δοκιμίου/
Weight of upper half of sample(g): **2239**

ΕΡΓΟ / PROJECT : «Ανάπτυξη ψηφιακών εργαλείων και ενσωμάτωσή τους σε γεωτεχνολογικές μεθόδους για την έρευνα της επικινδυνότητας εκδήλωσης κατολισθήσεων σε περιβάλλον ασθενών και σύνθετων βραχομαζών στην περιοχή της Ευρυτανίας και της προστασίας και στήριξης ορυγμάτων ανά μηχανισμό αστοχίας»



DIRECT SHEAR TEST OF ROCK JOINT

ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints:

ΔΟΚΙΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΒΡΑΧΟΥ

ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints:

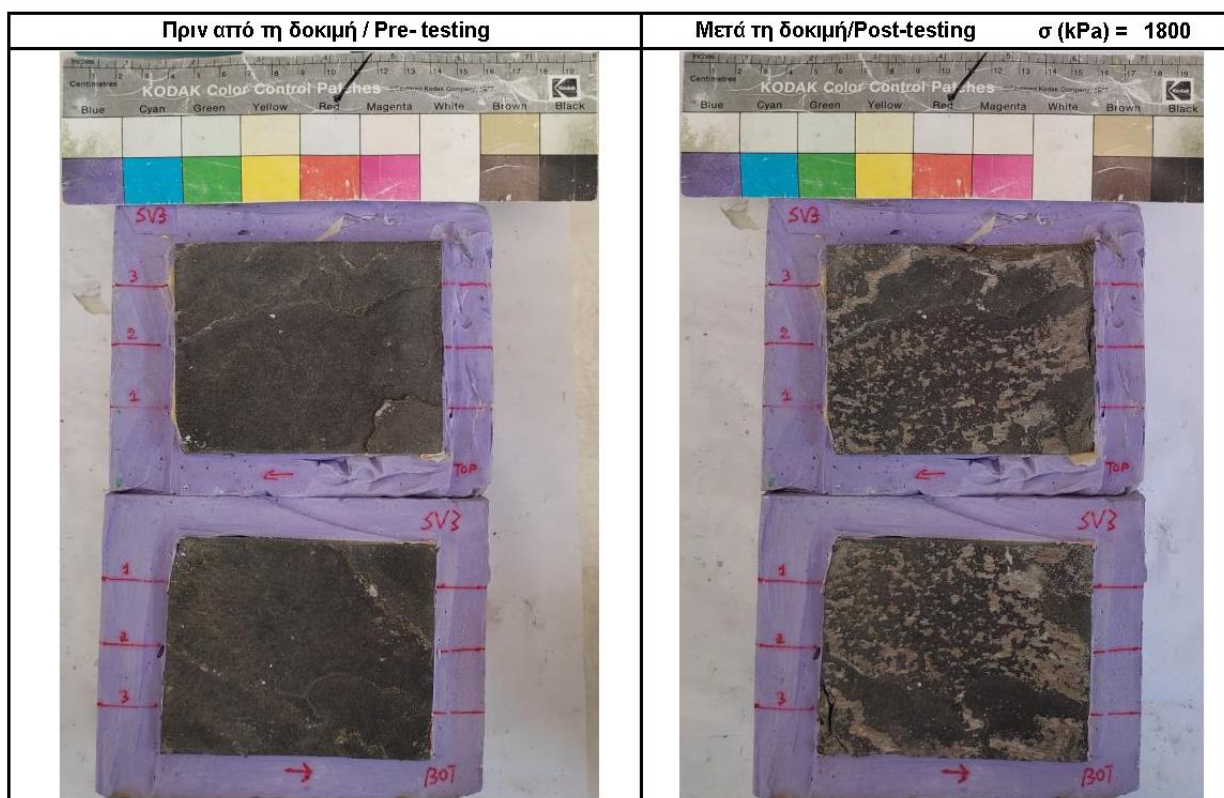
Revised Version (2014)

SAMPLE PHOTOGRAPHS/ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

ΓΕΩΤΡΗΣΗ/BOREHOLE: -

ΔΕΙΓΜΑ/SAMPLE: SV3

ΒΑΘΟΣ/DEPTH (m): -



ΕΡΓΟ / PROJECT : «Ανάπτυξη ψηφιακών εργαλείων και ενσωμάτωσή τους σε γεωτεχνολογικές μεθόδους για την έρευνα της επικινδυνότητας εκδήλωσης καταλισθήσεων σε περιβάλλον ασθενών και σύνθετων βραχομαζών στην περιοχή της Ευρυτανίας και της προστασίας και στήριξης ορυγμάτων ανά μηχανισμό αστοχίας»



DIRECT SHEAR TEST OF ROCK JOINT

ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints:

ΔΟΚΙΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΒΡΑΧΟΥ

ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints:

Revised Version (2014)

ΓΕΩΤΡΗΣΗ/BOREHOLE: -

ΔΕΙΓΜΑ/SAMPLE: **SV4**

ΒΑΘΟΣ/DEPTH (m): -

DESCRIPTION/ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

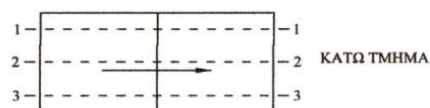
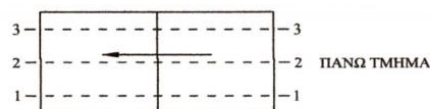
1. INTACT ROCK MATERIAL/ ΑΡΡΗΚΤΟ ΒΡΑΧΩΔΕΣ ΥΛΙΚΟ

Ελαφρώς έως μέτρια αποσαθρωμένος, μέτριας αντοχής ΨΑΜΜΙΤΗΣ

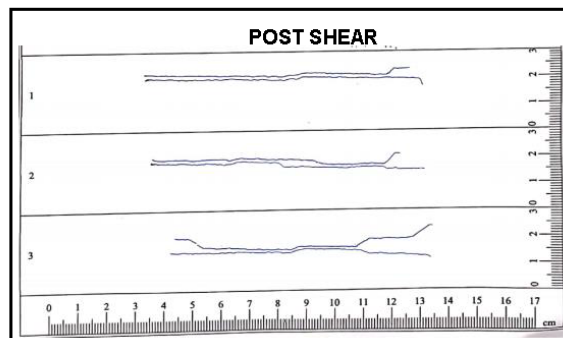
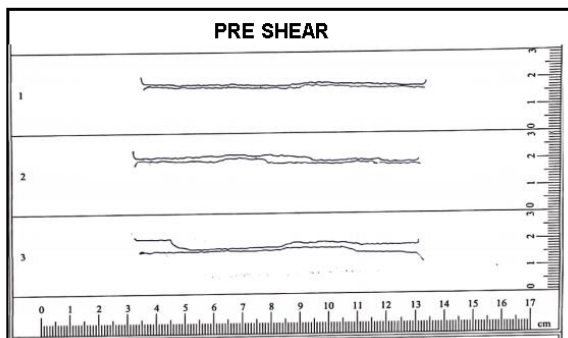
2. DISCONTINUITY/ΑΣΥΝΕΧΕΙΑ

Τραχεία επίπεδη με μέτρια εμπλοκή/αλληλοκλειδώμα, ελαφρά αποσαθρωμένη με μέτρια θλιπτική αντοχή των τοιχωμάτων ασυνέχεια. Ο προσανατολισμός της επιφάνειας διάτμησης είναι παράλληλος με την στρώση. Η μέγιστη γωνία διαστολής στην διεύθυνση της διάτμησης υπό το ίδιο βάρος (νεκρό φορτίο, ορθή τάση = 4,1 kPa) είναι ίση με 16,43°

ΓΡΑΜΜΕΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ / ROUGHNESS LINES RECORD

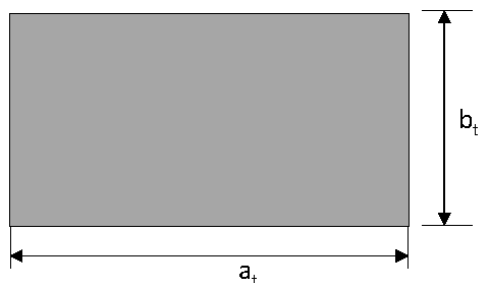


ROUGHNESS PROFILES/ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ



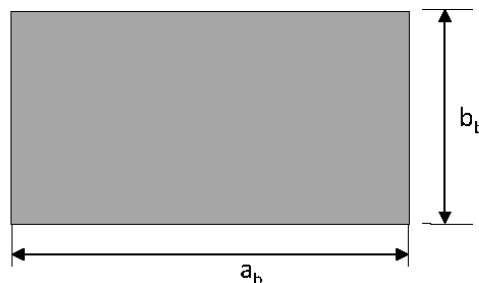
ANNOTATED DIAGRAMS/ΕΠΕΞΗΓΗΜΑΤΙΚΑ ΣΚΑΡΙΦΗΜΑΤΑ:

UPPER HALF



Μήκος/Length a_t (mm): **96,1**
Πλάτος/Width b_t (mm): **84,7**
Μορφή/Shape: **Rectangular**

LOWER HALF



Μήκος/Length a_b (mm): **96,5**
Πλάτος/Width b_b (mm): **76,2**
Βάρος πάνω μισού δοκιμίου/
Weight of upper half of sample(g): **2338**

ΕΡΓΟ / PROJECT : «Ανάπτυξη ψηφιακών εργαλείων και ενσωμάτωσή τους σε γεωτεχνολογικές μεθόδους για την έρευνα της επικινδυνότητας εκδήλωσης κατολισθήσεων σε περιβάλλον ασθενών και σύνθετων βραχομαζών στην περιοχή της Ευρυτανίας και της προστασίας και στήριξης ορυγμάτων ανά μηχανισμό αστοχίας»



DIRECT SHEAR TEST OF ROCK JOINT

ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints:

ΔΟΚΙΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΒΡΑΧΟΥ

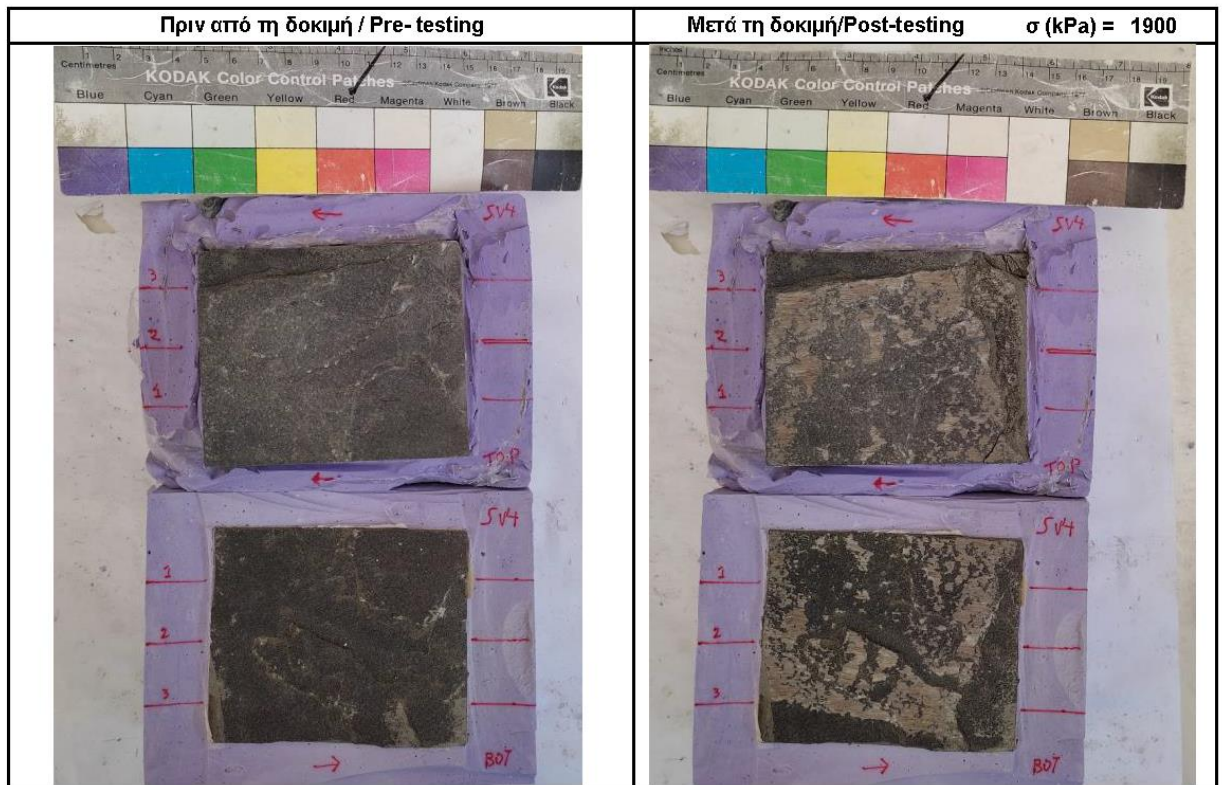
ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints:
Revised Version (2014)

SAMPLE PHOTOGRAPHS/ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

ΓΕΩΤΡΗΣΗ/BOREHOLE: -

ΔΕΙΓΜΑ/SAMPLE: SV4

ΒΑΘΟΣ/DEPTH (m): -



ΕΡΓΟ / PROJECT : «Ανάπτυξη ψηφιακών εργαλείων και ενσωμάτωσή τους σε γεωτεχνολογικές μεθόδους για την έρευνα της επικινδυνότητας εκδήλωσης κατολισθήσεων σε περιβάλλον ασθενών και σύνθετων βραχομαζών στην περιοχή της Ευρυτανίας και της προστασίας και στήριξης ορυγμάτων ανά μηχανισμό αστοχίας»

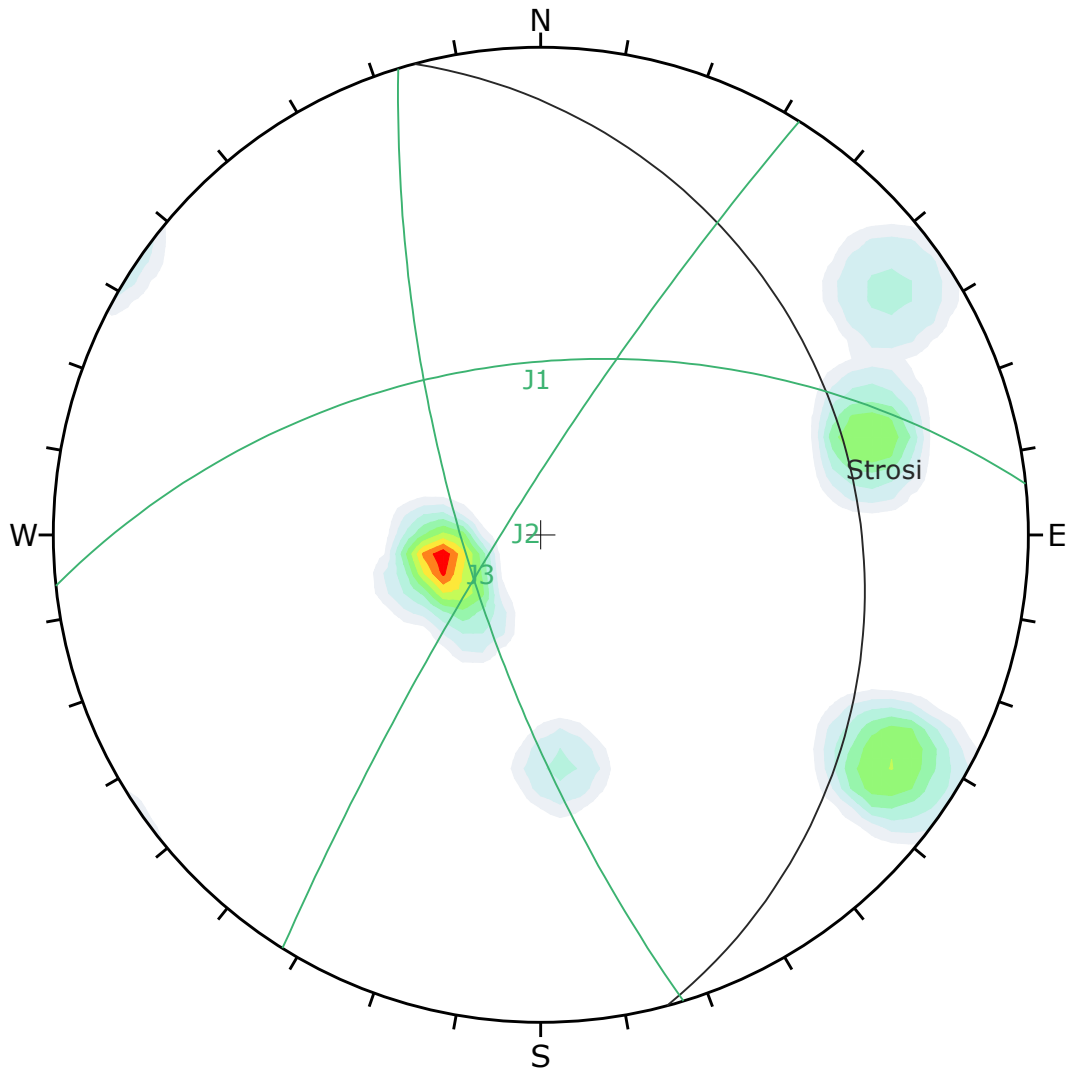
Επί τόπου δοκιμές αντοχής τοιχωμάτων ασυνεχειών - Σφύρα Schmidt

Κωδικός	Μέτρηση	Τύπος ασυνέχειας	Λιθολογία
SP1	15	Διάκλαση	Ιλυόλιθος
SP1	18	Διάκλαση	Ιλυόλιθος
SP1	28	Διάκλαση	Ιλυόλιθος
SP1	38	Διάκλαση	Ιλυόλιθος
SP1	20	Διάκλαση	Ιλυόλιθος
SP1	21	Διάκλαση	Ιλυόλιθος
SP1	21	Διάκλαση	Ιλυόλιθος
SP2	16	Διάκλαση	Ιλυόλιθος
SP2	13	Στρώση	Ιλυόλιθος
SP2	14	Διάκλαση	Ιλυόλιθος
SP2	17	Διάκλαση	Ιλυόλιθος
SP2	12	Διάκλαση	Ιλυόλιθος
SP2	15	Διάκλαση	Ιλυόλιθος
SP3	16		Ιλυόλιθος
SP3	16		Ιλυόλιθος
SP3	15		Ιλυόλιθος
SP3	25		Ιλυόλιθος
SP3	10		Ιλυόλιθος
SP3	12		Ιλυόλιθος
SP3	15		Ιλυόλιθος
SP3	12		Ιλυόλιθος
SP3	16		Ιλυόλιθος
SP3	12	Στρώση	Ιλυόλιθος
SP3	16	Στρώση	Ιλυόλιθος
SP3	13	Διάτμηση	Ιλυόλιθος
SP3	14		Ιλυόλιθος
SP4	17	Διάκλαση	Ιλυόλιθος
SP4	28	Διάκλαση	Ιλυόλιθος
SP4	13	Διάκλαση	Ιλυόλιθος
SP4	22	Διάκλαση	Ιλυόλιθος
SP4	24	Διάκλαση	Ιλυόλιθος
SP4	18	Διάκλαση	Ιλυόλιθος
SP4	14		Ιλυόλιθος
SP4	21		Ιλυόλιθος
SP4	23		Ιλυόλιθος
SP4	20		Ιλυόλιθος
SP4	14		Ιλυόλιθος
SP4	34		Ιλυόλιθος
SP4	21		Ιλυόλιθος
SP4	14		Ιλυόλιθος
SP4	17		Ιλυόλιθος

Κωδικός	Μέτρηση	Τύπος ασυνέχειας	Λιθολογία
SP1	26	Διάκλαση	Ψαμμίτης
SP6	33		Ψαμμίτης
SP6	40		Ψαμμίτης
SP6	36		Ψαμμίτης

Κωδικός	Μέτρηση	Τύπος ασυνέχειας	Λιθολογία
SP6	24		Ψαμμίτης
SP6	34		Ψαμμίτης
SP6	40		Ψαμμίτης
SP6	45		Ψαμμίτης
SP6	47		Ψαμμίτης

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ




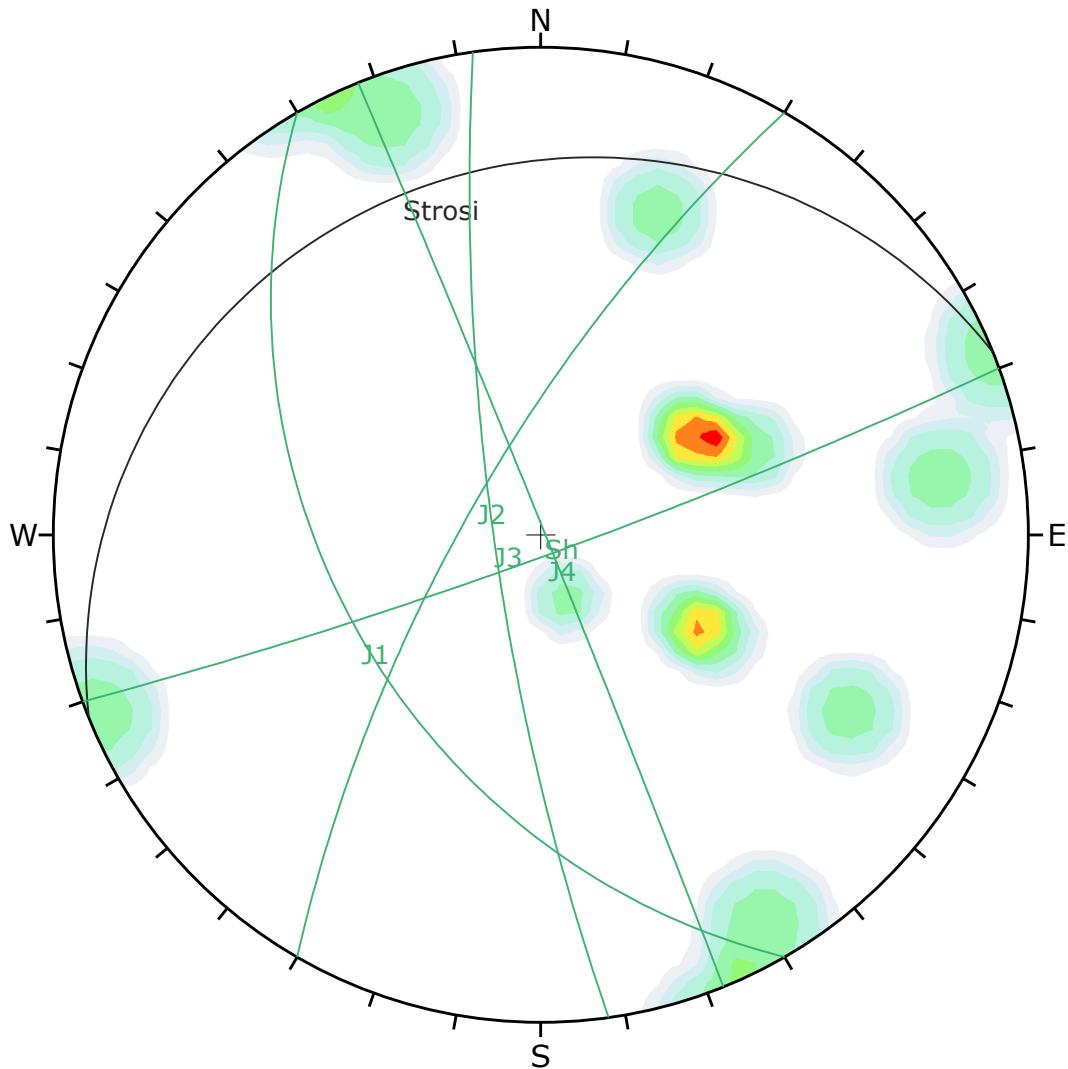
Color	Density Concentrations
	0.00 - 2.90
	2.90 - 5.80
	5.80 - 8.70
	8.70 - 11.60
	11.60 - 14.50
	14.50 - 17.40
	17.40 - 20.30
	20.30 - 23.20
	23.20 - 26.10
	26.10 - 29.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	28.35%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

	Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes				
1	■	24	75	Strosi
2	■	72	253	J3
3	■	82	302	J2
4	■	51	354	J1

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	11 (11 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

	<i>Project</i>	
	<i>Analysis Description</i>	
	<i>Drawn By</i>	<i>Company</i>
	<i>Date</i>	<i>File Name</i>
	8/24/2023, 2:25:23 PM	Valaora_N_Sand_Wedge_75_300_new.dips8




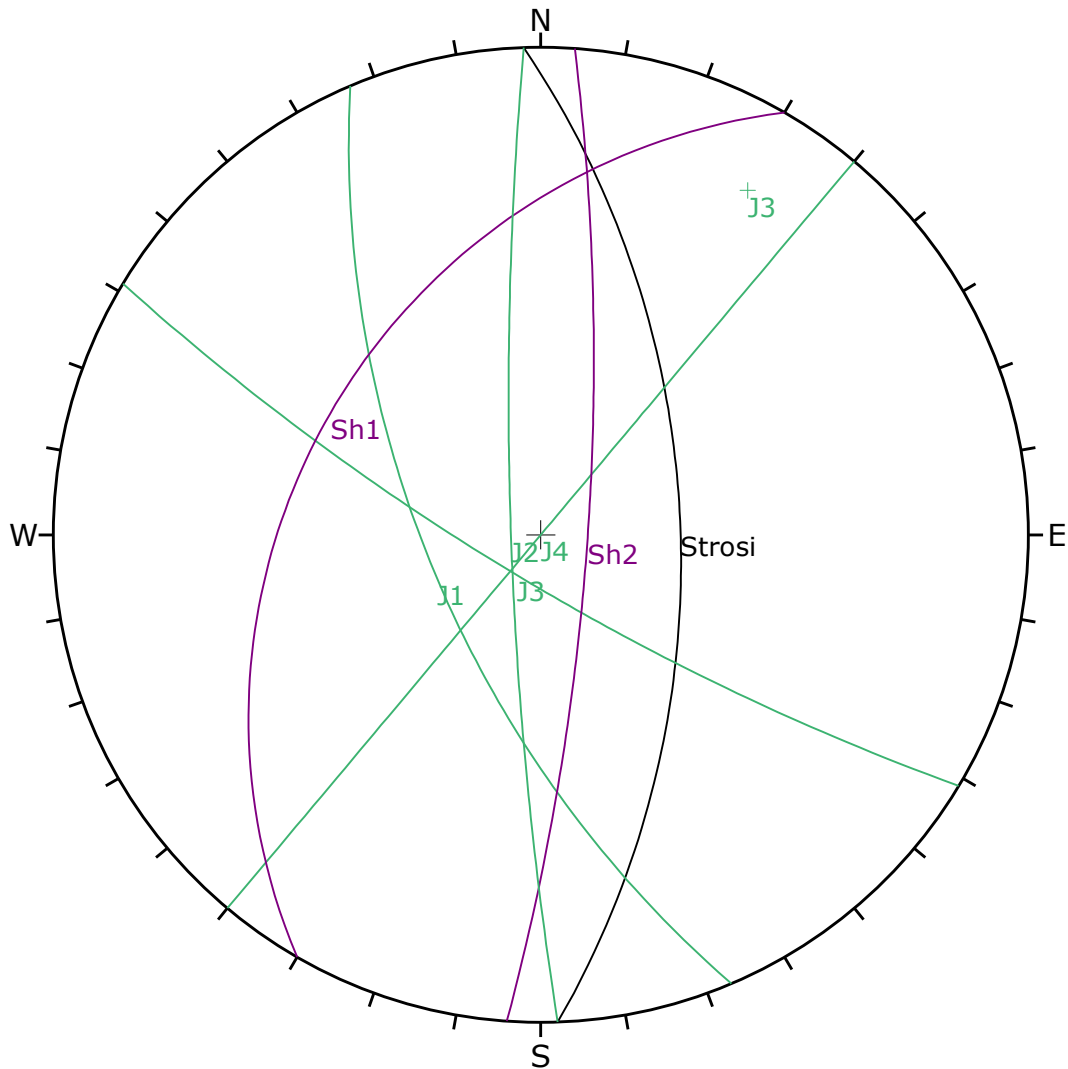
Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.90
	1.90 - 3.80
	3.80 - 5.70
	5.70 - 7.60
	7.60 - 9.50
	9.50 - 11.40
	11.40 - 13.30
	13.30 - 15.20
	15.20 - 17.10
	17.10 - 19.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	18.71%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

	Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes				
1	■	16	338	Strosi
2	■	89	68	Sh
3	■	44	240	J1
4	■	73	300	J2
5	■	79	262	J3
6	■	85	160	J4

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	12 (12 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

	<i>Project</i>	
	<i>Analysis Description</i>	
	<i>Drawn By</i>	<i>Company</i>
	<i>Date</i>	<i>File Name</i>
	25/1/2022, 6:25:55 ì	Valaora_S_Silt_S4_Planar_42_307.dips8

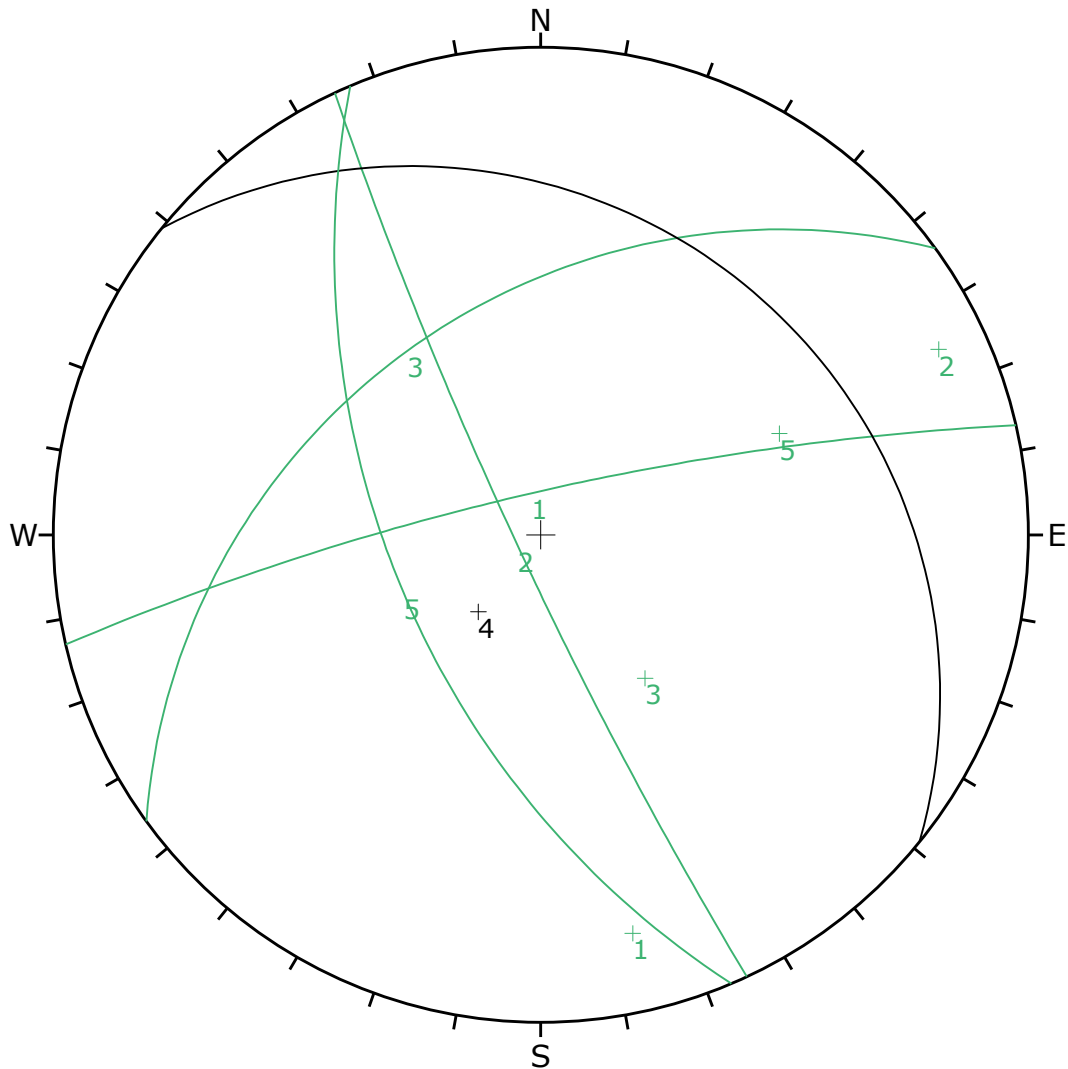


	Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes				
1	■	58	88	Strosi
2	■	64	247	J1
4	■	90	310	J4
5	■	79	211	J3
6	■	37	300	Sh1
7	■	79	94	Sh2
8	■	83	268	J2

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	11 (11 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle



<i>Project</i>	
<i>Analysis Description</i>	
<i>Drawn By</i>	<i>Company</i>
<i>Date</i>	<i>File Name</i>
10/4/2023, 12:36:04 AM	Valaora_S_Silt_S3_new.dips8



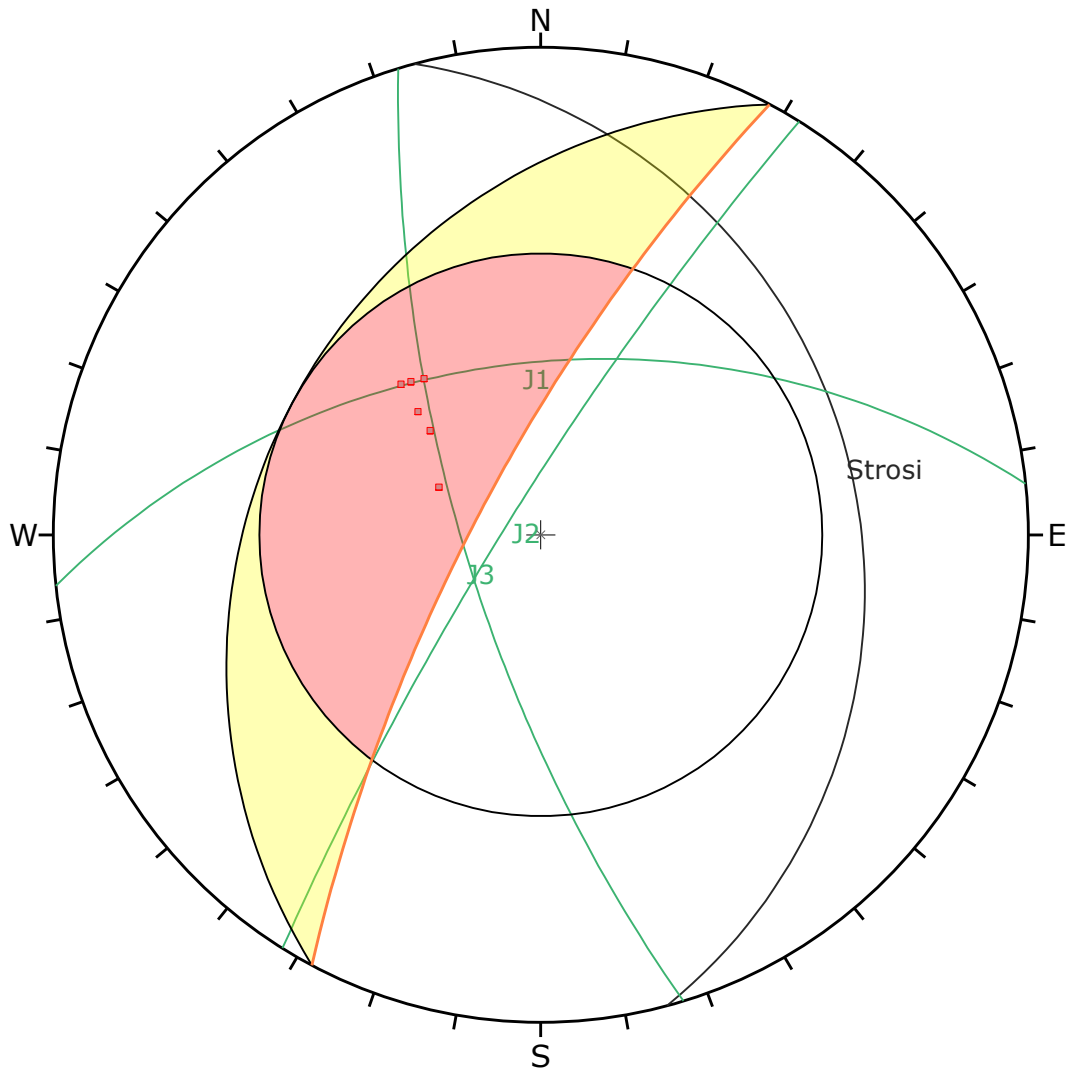
	Color	Trend	Plunge	Label
User Planes				
1	■	167	10	
2	■	65	6	
3	■	144	50	
4	■	219	67	
5	■	67	34	

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	10 (10 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle



<i>Project</i>	
<i>Analysis Description</i>	
<i>Drawn By</i>	<i>Company</i>
<i>Date</i>	<i>File Name</i>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ
ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ



Symbol	Feature
■	Critical Intersection

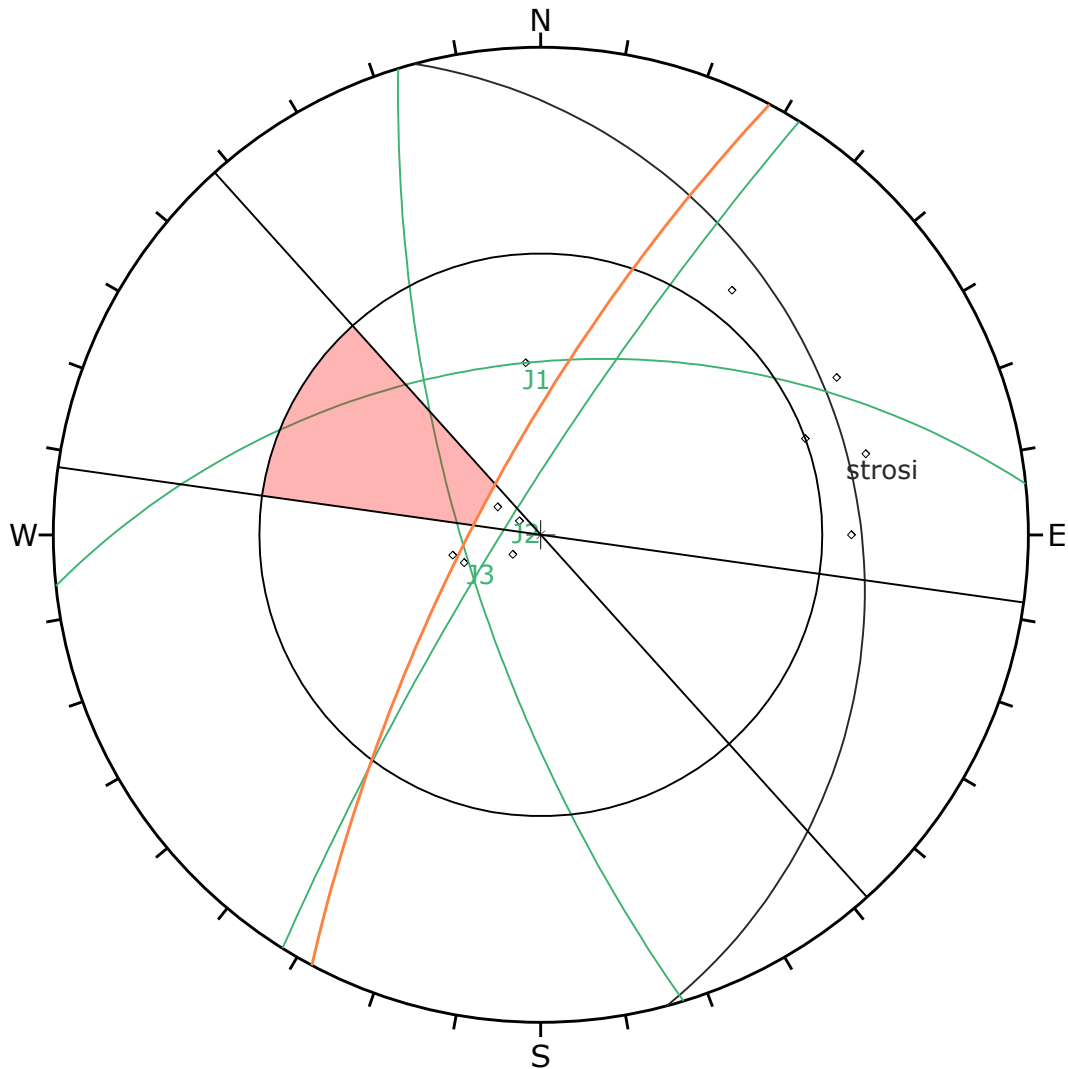
Kinematic Analysis	Wedge Sliding		
Slope Dip	75		
Slope Dip Direction	298		
Friction Angle	30°		
	Critical	Total	%
Wedge Sliding	6	55	10.91%

	Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes				
1	■	24	75	Strosi
2	■	51	354	J1
3	■	82	302	J2
4	■	72	253	J3

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	11 (11 Entries)
Intersection Mode	Grid Data Planes
Intersections Count	55
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle



<i>Project</i>			
<i>Analysis Description</i>			
<i>Drawn By</i>		<i>Company</i>	
<i>Date</i>	25/1/2022, 3:34:10 ì	<i>File Name</i>	Valaora_N_Silt_Direct_75_298.dips8



Symbol	Feature
◇	Dip Vectors

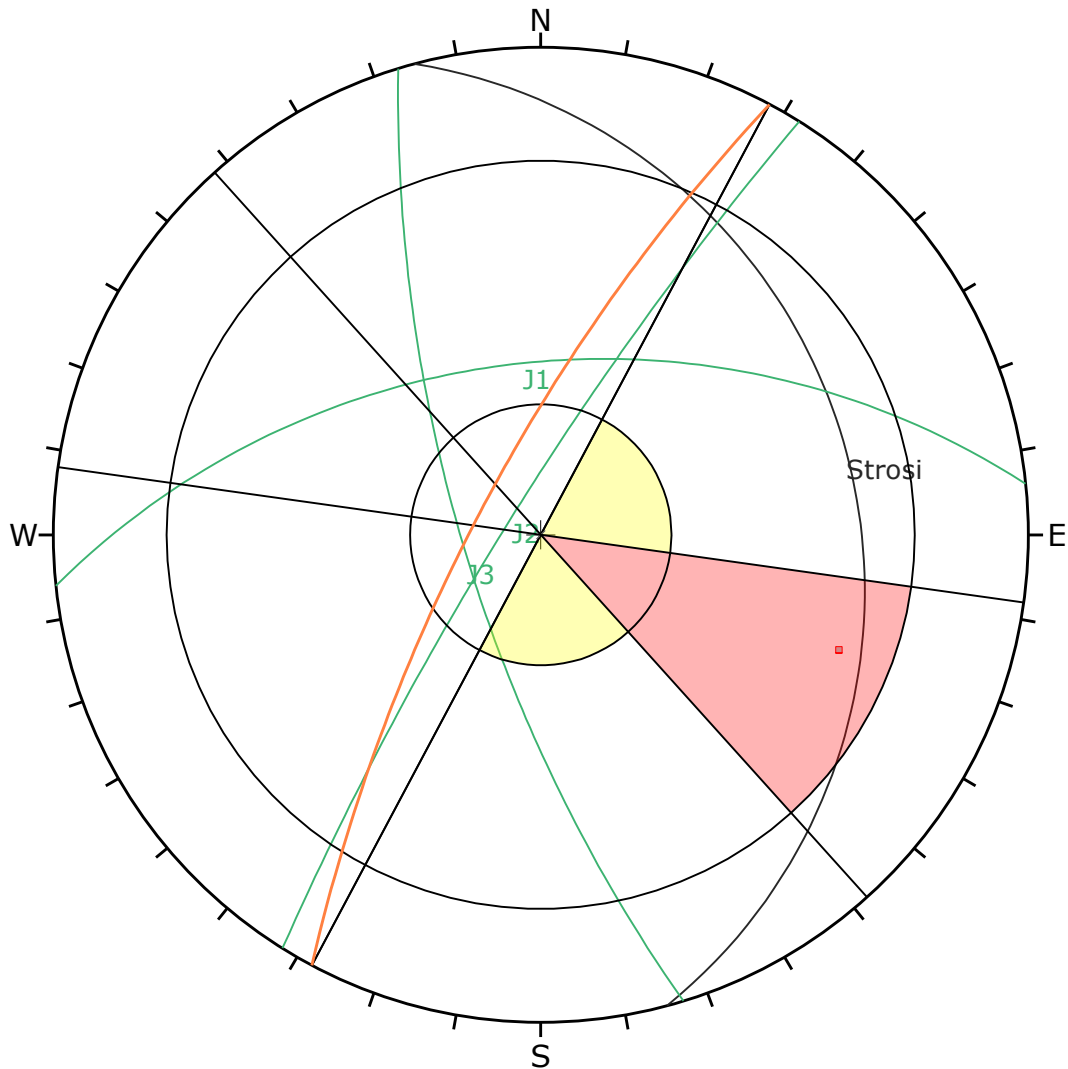
Kinematic Analysis	Planar Sliding
Slope Dip	75
Slope Dip Direction	298
Friction Angle	30°
Lateral Limits	20°

	Critical	Total	%
Planar Sliding (All)	0	11	0.00%

Plot Mode	Dip Vectors
Vector Count	11 (11 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle



<i>Project</i>	
<i>Analysis Description</i>	
<i>Drawn By</i>	<i>Company</i>
<i>Date</i>	<i>File Name</i>
25/1/2022, 3:34:10 ì	Valaora_N_Silt_Direct_75_298.dips8



Symbol	Feature
■	Critical Intersection

Kinematic Analysis	Direct Toppling
Slope Dip	75
Slope Dip Direction	298
Friction Angle	30°
Lateral Limits	20°

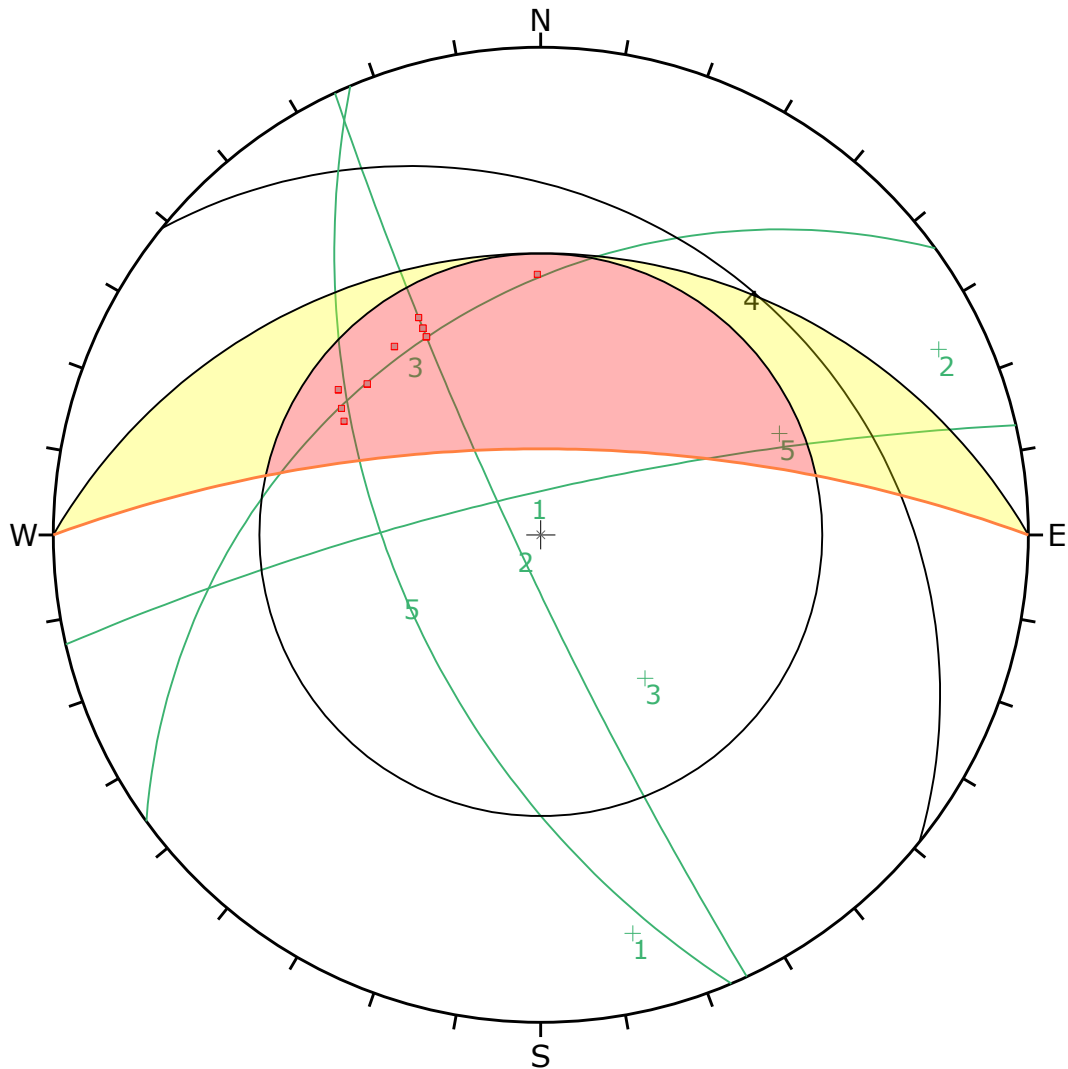
	Critical	Total	%
Direct Toppling (Intersection)	1	55	1.82%
Oblique Toppling (Intersection)	0	55	0.00%
Base Plane (All)	0	11	0.00%

	Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes				
1	■	24	75	Strosi
2	■	51	354	J1
3	■	82	302	J2
4	■	72	253	J3

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	11 (11 Entries)
Intersection Mode	Grid Data Planes
Intersections Count	55
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle



<i>Project</i>	
<i>Analysis Description</i>	
<i>Drawn By</i>	<i>Company</i>
<i>Date</i>	<i>File Name</i>
25/1/2022, 3:34:10 ì	Valaora_N_Silt_Direct_75_298.dips8



Symbol	Feature
■	Critical Intersection

Kinematic Analysis	Wedge Sliding
Slope Dip	70
Slope Dip Direction	0
Friction Angle	30°

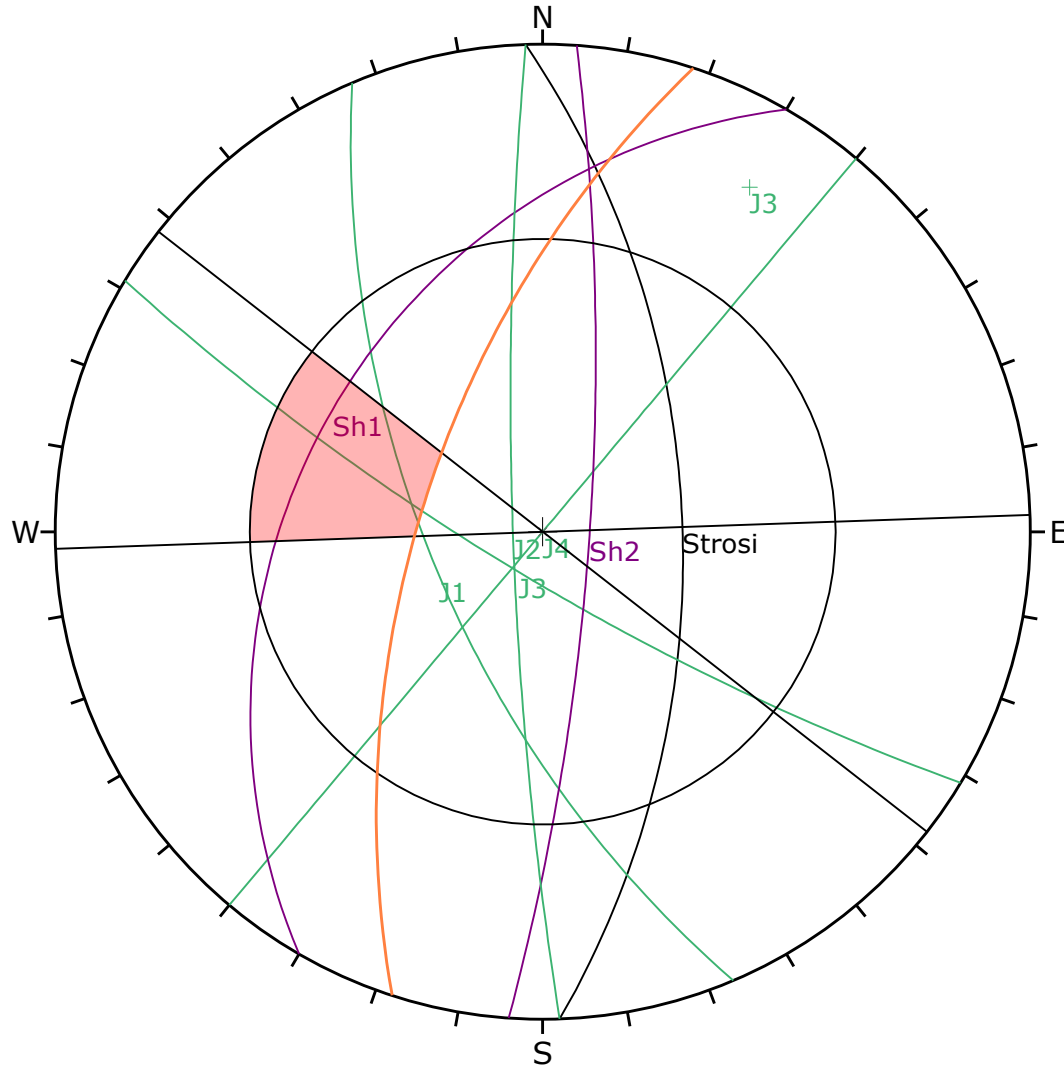
	Critical	Total	%
Wedge Sliding	12	43	27.91%

	Color	Trend	Plunge	Label
User Planes				
1	■	167	10	
2	■	65	6	
3	■	144	50	
4	■	219	67	
5	■	67	34	

Plot Mode	Dip Vectors
Vector Count	10 (10 Entries)
Intersection Mode	Grid Data Planes
Intersections Count	43
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle



<i>Project</i>	
<i>Analysis Description</i>	
<i>Drawn By</i>	<i>Company</i>
<i>Date</i>	<i>File Name</i>
5/23/2023, 10:36:21 PM	Valaora_N_Silt_SP5.dips8



Kinematic Analysis	Planar Sliding		
Slope Dip	62		
Slope Dip Direction	288		
Friction Angle	28°		
Lateral Limits	20°		
	Critical	Total	%
Planar Sliding (All)	1	11	9.09%

	Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes				
1	Black	58	88	Strosi
2	Green	64	247	J1
4	Light Green	90	310	J4
5	Light Green	79	211	J3
6	Purple	37	300	Sh1
7	Purple	79	94	Sh2
8	Light Green	83	268	J2

Plot Mode	Dip Vectors
Vector Count	11 (11 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle



Project

Analysis Description

Drawn By

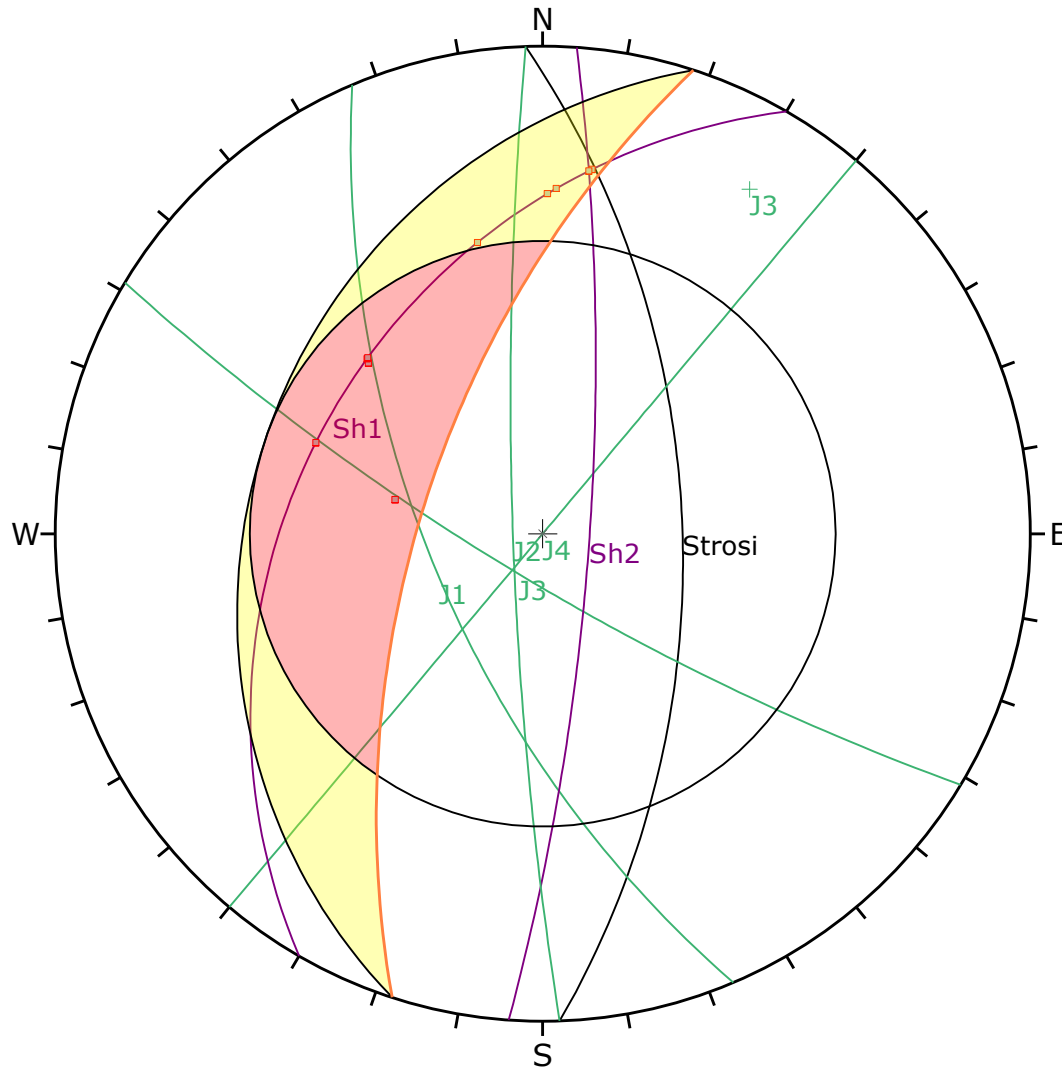
Company

Date

10/4/2023, 12:36:04 AM

File Name

Valaora_S_Silt_S3_new.dips8



Symbol	Feature
■	Critical Intersection

Kinematic Analysis	Wedge Sliding		
Slope Dip	62		
Slope Dip Direction	288		
Friction Angle	28°		
	Critical	Total	%
Wedge Sliding	10	55	18.18%

	Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes				
1	■	58	88	Strosi
2	■	64	247	J1
4	■	90	310	J4
5	■	79	211	J3
6	■	37	300	Sh1
7	■	79	94	Sh2
8	■	83	268	J2

Plot Mode	Dip Vectors
Vector Count	11 (11 Entries)
Intersection Mode	Grid Data Planes
Intersections Count	55
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle



Project

Analysis Description

Drawn By

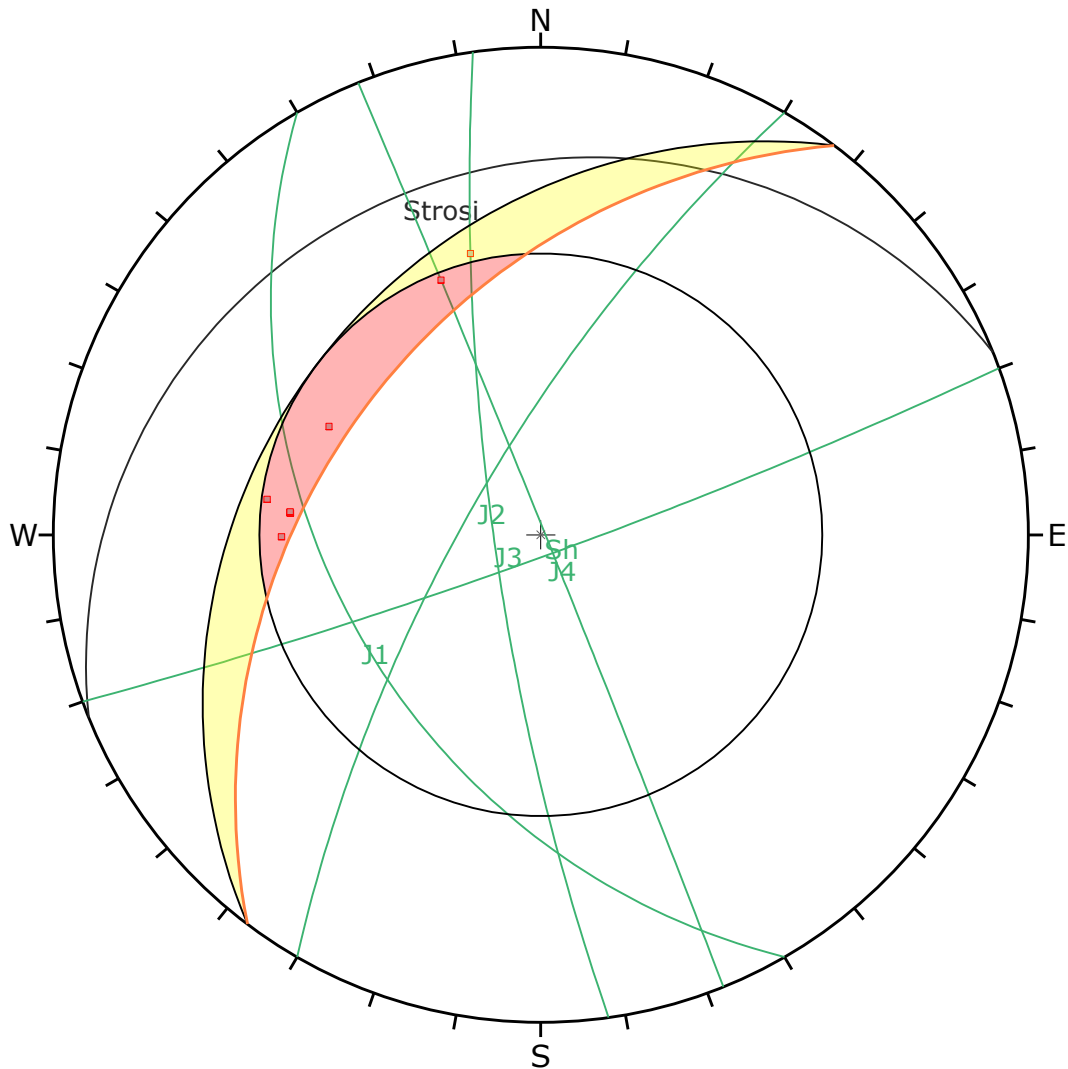
Company

Date

10/4/2023, 12:36:04 AM

File Name

Valaora_S_Silt_S3_new.dips8



Symbol	Feature
■	Critical Intersection

Kinematic Analysis	Wedge Sliding
Slope Dip	42
Slope Dip Direction	307
Friction Angle	30°

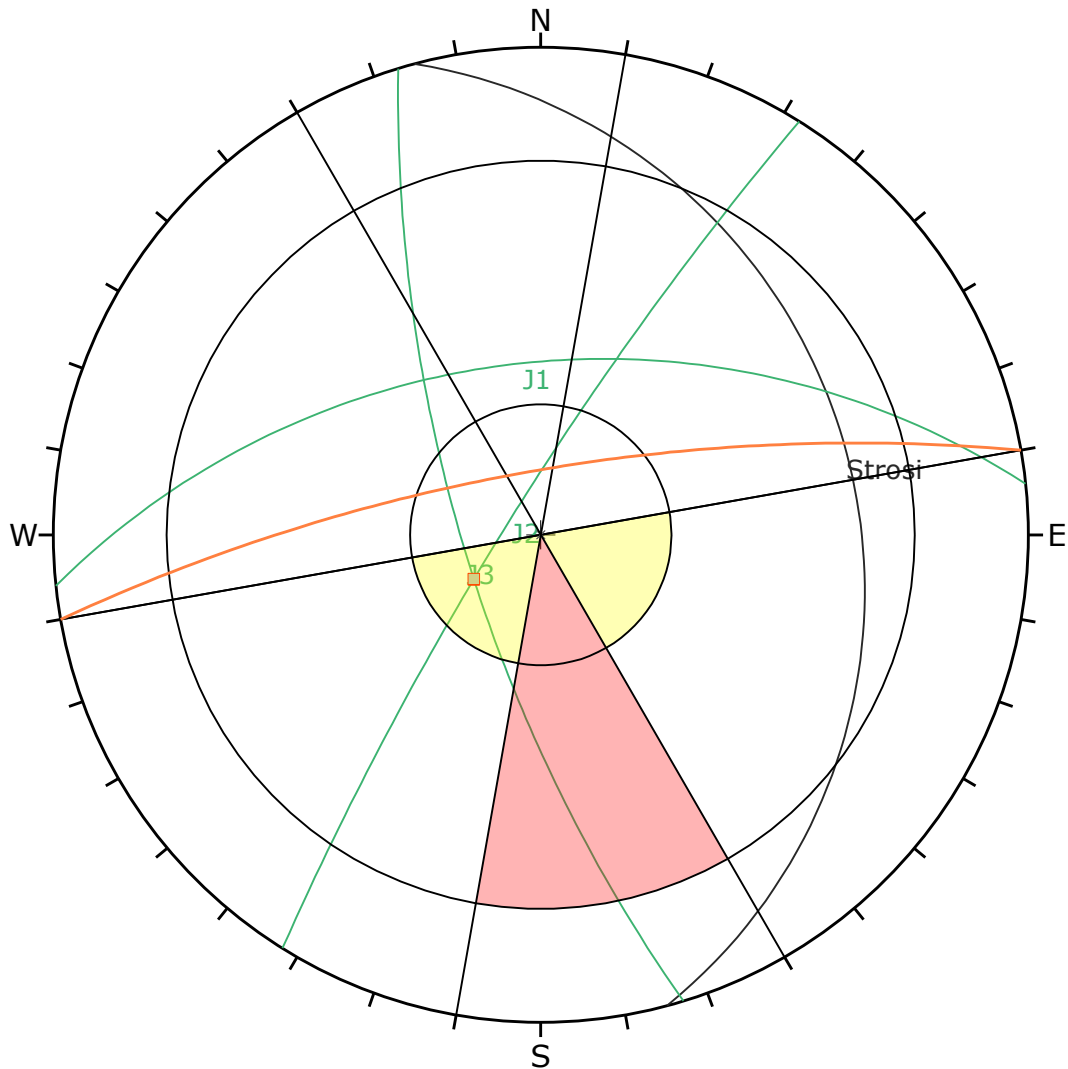
	Critical	Total	%
Wedge Sliding	8	66	12.12%

	Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes				
1	■	16	338	Strosi
2	■	89	68	Sh
3	■	44	240	J1
4	■	73	300	J2
5	■	79	262	J3
6	■	85	160	J4

Plot Mode	Dip Vectors
Vector Count	12 (12 Entries)
Intersection Mode	Grid Data Planes
Intersections Count	66
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle



<i>Project</i>	
<i>Analysis Description</i>	
<i>Drawn By</i>	<i>Company</i>
<i>Date</i>	<i>File Name</i>
25/1/2022, 6:25:55 ì	Valaora_S_Silt_S4_Planar_42_307.dips8



Symbol	Feature
■	Critical Intersection

Kinematic Analysis	Direct Toppling		
Slope Dip	75		
Slope Dip Direction	350		
Friction Angle	30°		
Lateral Limits	20°		
	Critical	Total	%
Direct Toppling (Intersection)	0	6	0.00%
Oblique Toppling (Intersection)	1	6	16.67%
Base Plane (All)	5	11	45.45%

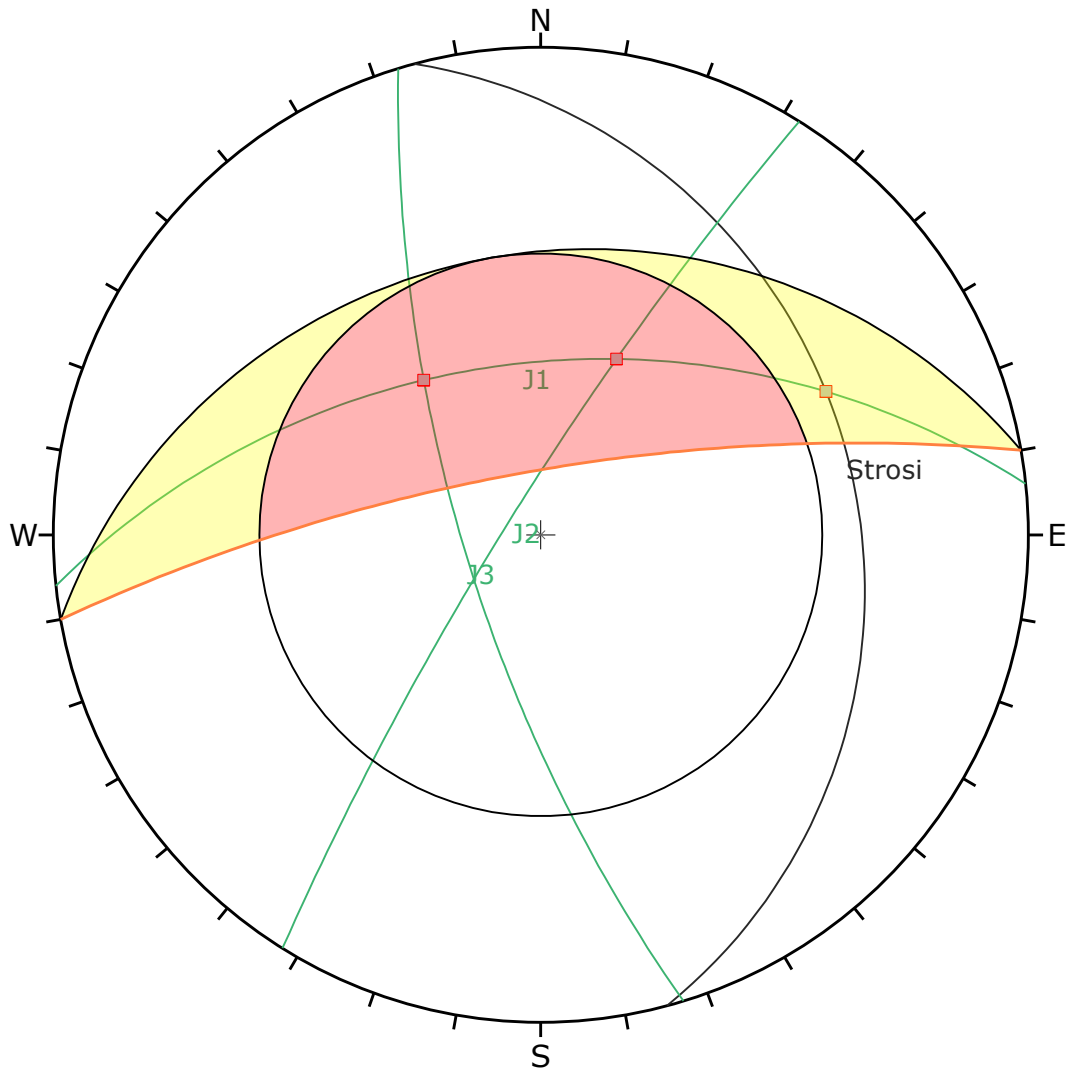
	Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes				
1	■	24	75	Strosi
2	■	72	253	J3
3	■	82	302	J2
4	■	51	354	J1

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	11 (11 Entries)
Intersection Mode	User Planes
Intersections Count	6
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle



DIPS 8.021

<i>Project</i>	
<i>Analysis Description</i>	
<i>Drawn By</i>	<i>Company</i>
<i>Date</i>	<i>File Name</i>
8/24/2023, 2:25:23 PM	Valaora_N_Sand_Wedge_75_350_new.dips8



Symbol	Feature
■	Critical Intersection

Kinematic Analysis		Wedge Sliding		
Slope Dip	75			
Slope Dip Direction	350			
Friction Angle	30°			
	Critical	Total	%	
Wedge Sliding	3	6	50.00%	

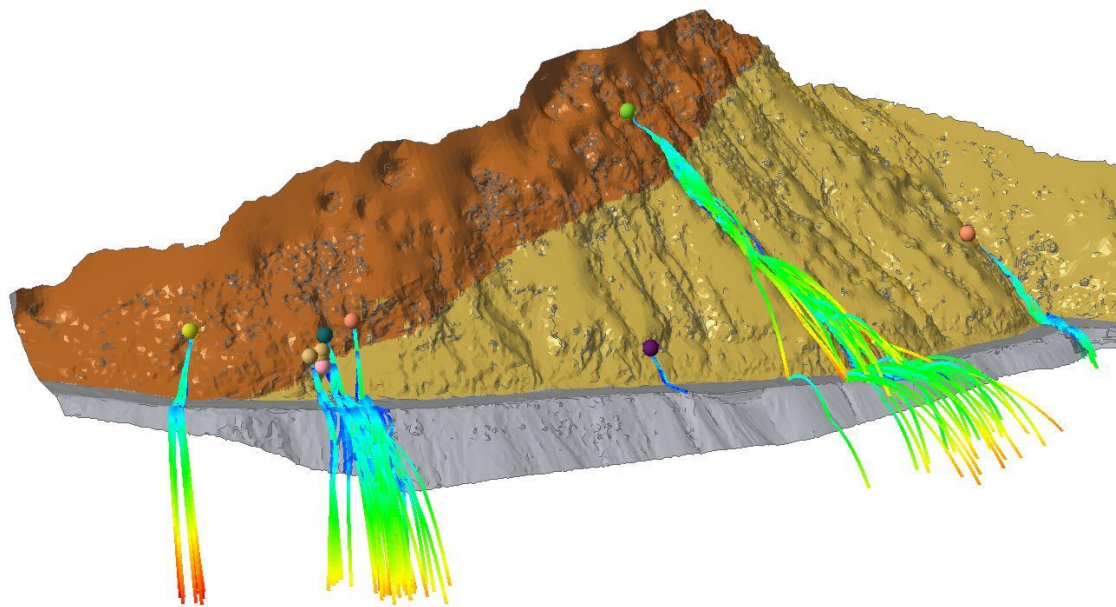
	Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes				
1	■	24	75	Strosi
2	■	72	253	J3
3	■	82	302	J2
4	■	51	354	J1

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	11 (11 Entries)
Intersection Mode	User Planes
Intersections Count	6
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle



Project			
Analysis Description			
Drawn By		Company	
Date	8/24/2023, 2:25:23 PM	File Name	Valaora_N_Sand_Wedge_75_350_new.dips8

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε
ΤΡΟΧΙΑΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΚΑΤΑΠΤΩΣΕΩΝ



ProjectIafuta
Rocfall3 Analysis Report
Created on 10/06/2023 19:11:43
Software Version: Rocfall3 1.012

Project Settings

Units:	Metric (m, kg, kJ)
Analysis Type:	Lump Mass
Consider Rotational Velocity:	Yes
Scale Rn By Velocity:	No
Scale Rn By Mass:	No
Use Spheres v1.005 and earlier:	Yes

Statistics

Sampling Method:	Latin-Hypercube
Pseudo-random Numbers:	Pseudo
Use Custom Seed:	No

Solver Options

Maximum Steps per Rock:	20000
Stopped Velocity Cutoff (m/seconds):	0.1
Normal Velocity Cutoff (m/seconds):	0.1
Maximum Timestep (seconds):	0.01

Material Properties

Bedrock Outcrops

Colour:	
Normal Restitution:	0.35 (Normal, sd=0.04)
Tangential Restitution:	0.85 (Normal, sd=0.04)
Friction Angle (°):	30

Asphalt

Colour:	
Normal Restitution:	0.4 (Normal, sd=0.04)
Tangential Restitution:	0.9 (Normal, sd=0.03)
Friction Angle (°):	30

Sandstone

Colour:	
Normal Restitution:	0.379 (Normal, sd=0.061)
Tangential Restitution:	0.825 (Normal, sd=0.083)
Friction Angle (°):	25

Siltstone

Colour:	
Normal Restitution:	0.44 (Normal, sd=0.055)
Tangential Restitution:	0.81 (Normal, sd=0.55)
Friction Angle (°):	26

Seeder Properties

4m3

Colour:	
Number of Rocks:	100
Distribution:	Over All Rock Groups

Translational Velocity

Translational Velocity (m/seconds):	0
Translational Velocity Orientation:	Trend/Plunge
Trend (°):	0
Plunge (°):	0

Rotational Velocity

Rotational Velocity (°/seconds):	0
Rotational Velocity Orientation:	Trend/Plunge
Trend (°):	0
Plunge (°):	0

Group 1

Mass (kilograms):	10000
Density (kilograms/m3):	2500

6m3

Colour:	
Number of Rocks:	100
Distribution:	Over All Rock Groups

Translational Velocity

Translational Velocity (m/seconds):	0
Translational Velocity Orientation:	Trend/Plunge
Trend (°):	0
Plunge (°):	0

Rotational Velocity

Rotational Velocity (°/seconds):	0
Rotational Velocity Orientation:	Trend/Plunge
Trend (°):	0
Plunge (°):	0

Group 1

Mass (kilograms):	15000
Density (kilograms/m3):	2500

2.5m3

Colour:	
Number of Rocks:	100
Distribution:	Over All Rock Groups

Translational Velocity

Translational Velocity (m/seconds):	0
Translational Velocity Orientation:	Trend/Plunge
Trend (°):	0
Plunge (°):	0

Rotational Velocity

Rotational Velocity (°/seconds):	0
Rotational Velocity Orientation:	Trend/Plunge
Trend (°):	0
Plunge (°):	0

Group 1

Mass (kilograms): 6250
 Density (kilograms/m3): 2500

1.2m3

Colour: 
 Number of Rocks: 100
 Distribution: Over All Rock Groups

Translational Velocity

Translational Velocity (m/seconds): 0
 Translational Velocity Orientation: Trend/Plunge
 Trend (°): 0
 Plunge (°): 0

Rotational Velocity

Rotational Velocity (°/seconds): 0
 Rotational Velocity Orientation: Trend/Plunge
 Trend (°): 0
 Plunge (°): 0

Group 1

Mass (kilograms): 3000
 Density (kilograms/m3): 2500

1m3

Colour: 
 Number of Rocks: 100
 Distribution: Over All Rock Groups

Translational Velocity

Translational Velocity (m/seconds): 0
 Translational Velocity Orientation: Trend/Plunge
 Trend (°): 0
 Plunge (°): 0

Rotational Velocity

Rotational Velocity (°/seconds): 0
 Rotational Velocity Orientation: Trend/Plunge
 Trend (°): 0
 Plunge (°): 0

Group 1

Mass (kilograms): 2500
 Density (kilograms/m3): 2500

ilio 4m3

Colour: 
 Number of Rocks: 100
 Distribution: Over All Rock Groups

Translational Velocity

Translational Velocity (m/seconds): 0
 Translational Velocity Orientation: Trend/Plunge
 Trend (°): 0
 Plunge (°): 0

Rotational Velocity

Rotational Velocity (°/seconds): 0
 Rotational Velocity Orientation: Trend/Plunge
 Trend (°): 0
 Plunge (°): 0

Group 1

Mass (kilograms): 9200

Density (kilograms/m3): 2300

3m3

Colour:

Number of Rocks:

100

Distribution:

Over All Rock Groups

Translational Velocity

Translational Velocity (m/seconds):

0

Translational Velocity Orientation:

Trend/Plunge

Trend (°):

0

Plunge (°):

0

Rotational Velocity

Rotational Velocity (°/seconds):

0

Rotational Velocity Orientation:

Trend/Plunge

Trend (°):

0

Plunge (°):

0

Group 1

Mass (kilograms):

7500

Density (kilograms/m3):

2500

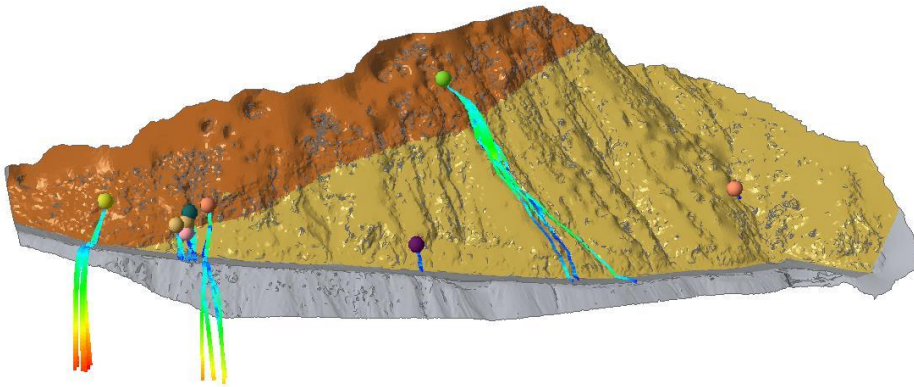
Summary Results

Run Properties

Type	Max
Total Kinetic Energy (kJ):	6681.114
Translational Kinetic Energy (kJ):	6446.971
Rotational Kinetic Energy (kJ):	499.164
Translational Kinetic Velocity (kJ):	33.257
Rotational Kinetic Velocity (kJ):	2377.831

Stopping Reason

Error:	0
Max Compute Steps:	0
Edge of Model:	115
Stopped:	885
Hit Barrier:	0



Project: liafutakalibration
Rocfall3 Analysis Report
Created on 10/06/2023 19:11:43
Software Version: Rocfall3 1.012

Project Settings

Units:	Metric (m, kg, kJ)
Analysis Type:	Lump Mass
Consider Rotational Velocity:	Yes
Scale Rn By Velocity:	No
Scale Rn By Mass:	No
Use Spheres v1.005 and earlier:	Yes

Statistics

Sampling Method:	Latin-Hypercube
Pseudo-random Numbers:	Pseudo
Use Custom Seed:	No

Solver Options

Maximum Steps per Rock:	20000
Stopped Velocity Cutoff (m/seconds):	0.1
Normal Velocity Cutoff (m/seconds):	0.1
Maximum Timestep (seconds):	0.01

Material Properties

Bedrock Outcrops

Colour:	
Normal Restitution:	0.35 (Normal, sd=0.04)
Tangential Restitution:	0.85 (Normal, sd=0.04)
Friction Angle (°):	30

Asphalt

Colour:	
Normal Restitution:	0.4 (Normal, sd=0.04)
Tangential Restitution:	0.9 (Normal, sd=0.03)
Friction Angle (°):	30

Sandstone

Colour:	
Normal Restitution:	0.379 (Normal, sd=0.061)
Tangential Restitution:	0.825 (Normal, sd=0.083)
Friction Angle (°):	25

Siltstone

Colour:	
Normal Restitution:	0.27 (Normal, sd=0.055)
Tangential Restitution:	0.66 (Normal, sd=0.55)
Friction Angle (°):	26

Seeder Properties

4m3

Colour:	
Number of Rocks:	100
Distribution:	Over All Rock Groups

Translational Velocity

Translational Velocity (m/seconds):	0
Translational Velocity Orientation:	Trend/Plunge
Trend (°):	0
Plunge (°):	0

Rotational Velocity

Rotational Velocity (°/seconds):	0
Rotational Velocity Orientation:	Trend/Plunge
Trend (°):	0
Plunge (°):	0

Group 1

Mass (kilograms):	10000
Density (kilograms/m3):	2500

6m3

Colour:	
Number of Rocks:	100
Distribution:	Over All Rock Groups

Translational Velocity

Translational Velocity (m/seconds):	0
Translational Velocity Orientation:	Trend/Plunge
Trend (°):	0
Plunge (°):	0

Rotational Velocity

Rotational Velocity (°/seconds):	0
Rotational Velocity Orientation:	Trend/Plunge
Trend (°):	0
Plunge (°):	0

Group 1

Mass (kilograms):	15750
Density (kilograms/m3):	2500

2.5m3

Colour:	
Number of Rocks:	100
Distribution:	Over All Rock Groups

Translational Velocity

Translational Velocity (m/seconds):	0
Translational Velocity Orientation:	Trend/Plunge
Trend (°):	0
Plunge (°):	0

Rotational Velocity

Rotational Velocity (°/seconds):	0
Rotational Velocity Orientation:	Trend/Plunge
Trend (°):	0
Plunge (°):	0

Group 1

Mass (kilograms): 6250
 Density (kilograms/m3): 2500

1.2m3

Colour:
 Number of Rocks: 100
 Distribution: Over All Rock Groups

Translational Velocity

Translational Velocity (m/seconds): 0
 Translational Velocity Orientation: Trend/Plunge
 Trend (°): 0
 Plunge (°): 0

Rotational Velocity

Rotational Velocity (°/seconds): 0
 Rotational Velocity Orientation: Trend/Plunge
 Trend (°): 0
 Plunge (°): 0

Group 1

Mass (kilograms): 3000
 Density (kilograms/m3): 2500

1m3

Colour:
 Number of Rocks: 100
 Distribution: Over All Rock Groups

Translational Velocity

Translational Velocity (m/seconds): 0
 Translational Velocity Orientation: Trend/Plunge
 Trend (°): 0
 Plunge (°): 0

Rotational Velocity

Rotational Velocity (°/seconds): 0
 Rotational Velocity Orientation: Trend/Plunge
 Trend (°): 0
 Plunge (°): 0

Group 1

Mass (kilograms): 2500
 Density (kilograms/m3): 2500

ilio 4m3

Colour:
 Number of Rocks: 100
 Distribution: Over All Rock Groups

Translational Velocity

Translational Velocity (m/seconds): 0
 Translational Velocity Orientation: Trend/Plunge
 Trend (°): 0
 Plunge (°): 0

Rotational Velocity

Rotational Velocity (°/seconds): 0
 Rotational Velocity Orientation: Trend/Plunge
 Trend (°): 0
 Plunge (°): 0

Group 1

Mass (kilograms): 9200

Density (kilograms/m3):	2300
3m3	
Colour:	
Number of Rocks:	100
Distribution:	Over All Rock Groups

Translational Velocity

Translational Velocity (m/seconds):	0
Translational Velocity Orientation:	Trend/Plunge
Trend (°):	0
Plunge (°):	0

Rotational Velocity

Rotational Velocity (°/seconds):	0
Rotational Velocity Orientation:	Trend/Plunge
Trend (°):	0
Plunge (°):	0

Group 1

Mass (kilograms):	7500
Density (kilograms/m3):	2500

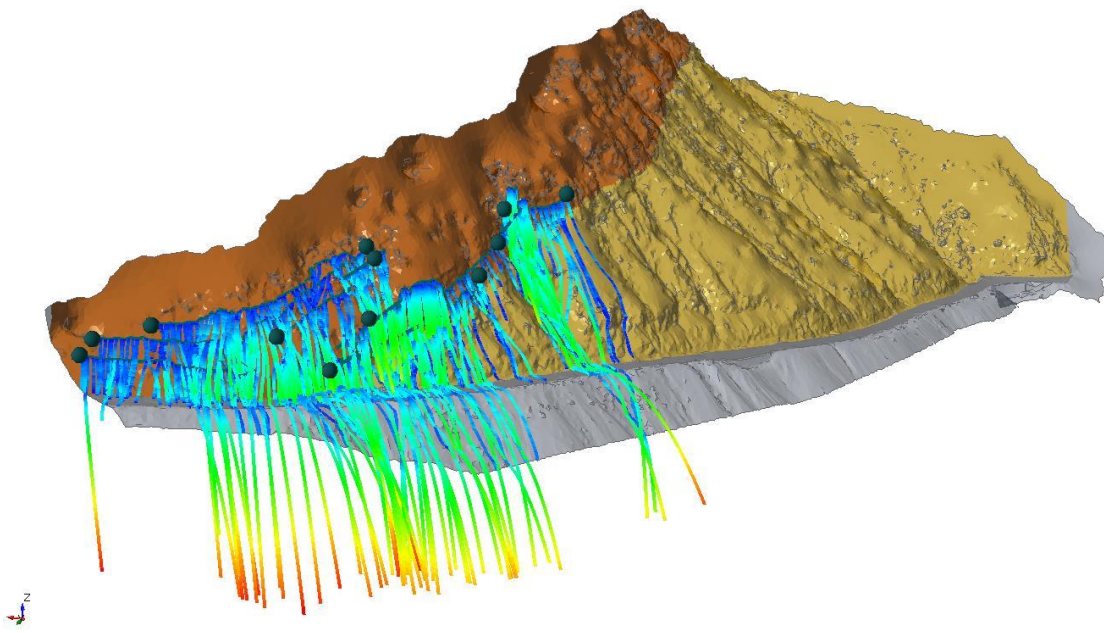
Summary Results

Run Properties

Type	Max
Total Kinetic Energy (kJ):	3551.033
Translational Kinetic Energy (kJ):	3456.407
Rotational Kinetic Energy (kJ):	269.524
Translational Kinetic Velocity (kJ):	33.257
Rotational Kinetic Velocity (kJ):	1364.624

Stopping Reason

Error:	68
Max Compute Steps:	0
Edge of Model:	15
Stopped:	917
Hit Barrier:	0



ProjectIafutakalibrationAnalysis
Rocfall3 Analysis Report
Created on 10/06/2023 19:11:43
Software Version: Rocfall3 1.012

Project Settings

Units:	Metric (m, kg, kJ)
Analysis Type:	Lump Mass
Consider Rotational Velocity:	Yes
Scale Rn By Velocity:	No
Scale Rn By Mass:	No
Use Spheres v1.005 and earlier:	Yes

Statistics

Sampling Method:	Latin-Hypercube
Pseudo-random Numbers:	Pseudo
Use Custom Seed:	No

Solver Options

Maximum Steps per Rock:	20000
Stopped Velocity Cutoff (m/seconds):	0.1
Normal Velocity Cutoff (m/seconds):	0.1
Maximum Timestep (seconds):	0.01

Material Properties

Bedrock Outcrops

Colour:	
Normal Restitution:	0.35 (Normal, sd=0.04)
Tangential Restitution:	0.85 (Normal, sd=0.04)
Friction Angle (°):	30

Asphalt

Colour:	
Normal Restitution:	0.4 (Normal, sd=0.04)
Tangential Restitution:	0.9 (Normal, sd=0.03)
Friction Angle (°):	30

Sandstone

Colour:	
Normal Restitution:	0.379 (Normal, sd=0.061)
Tangential Restitution:	0.825 (Normal, sd=0.083)
Friction Angle (°):	25

Siltstone

Colour:	
Normal Restitution:	0.27 (Normal, sd=0.055)
Tangential Restitution:	0.71 (Normal, sd=0.55)
Friction Angle (°):	26

Seeder Properties

Seeder Property 10

Colour:	
Number of Rocks:	100
Distribution:	Over All Rock Groups

Translational Velocity

Translational Velocity (m/seconds):	0
Translational Velocity Orientation:	Trend/Plunge
Trend (°):	0
Plunge (°):	0

Rotational Velocity

Rotational Velocity (°/seconds):	0
Rotational Velocity Orientation:	Trend/Plunge
Trend (°):	0
Plunge (°):	0

Group 1

Mass (kilograms):	22500
Density (kilograms/m3):	2500

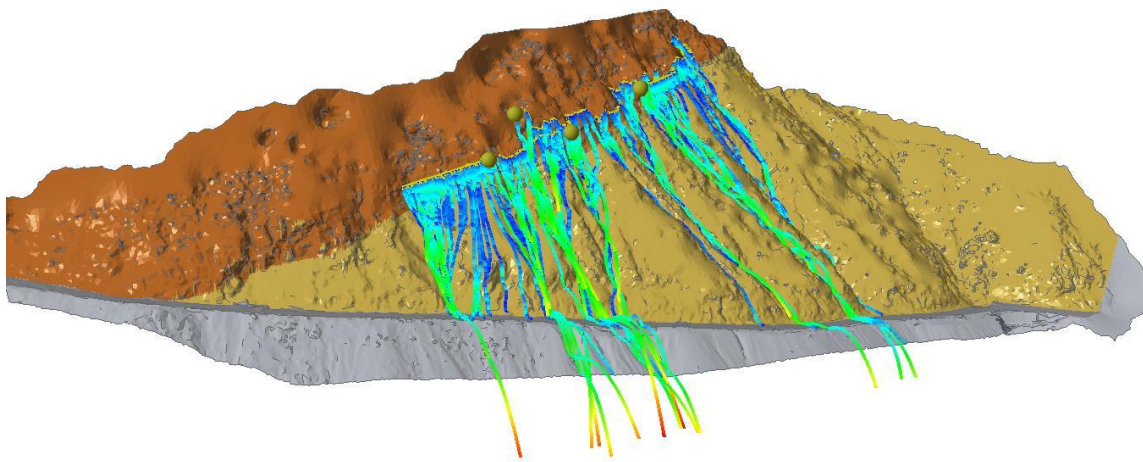
Summary Results

Run Properties

Type	Max
Total Kinetic Energy (kJ):	6284.84
Translational Kinetic Energy (kJ):	5910.26
Rotational Kinetic Energy (kJ):	1126.56
Translational Kinetic Velocity (kJ):	33.7
Rotational Kinetic Velocity (kJ):	702.547

Stopping Reason

Error:	16
Max Compute Steps:	0
Edge of Model:	75
Stopped:	509
Hit Barrier:	0



ProjectIafutakalibrationAnalysisNotos
Rocfall3 Analysis Report
Created on 10/06/2023 19:11:43
Software Version: Rocfall3 1.012

Project Settings

Units:	Metric (m, kg, kJ)
Analysis Type:	Lump Mass
Consider Rotational Velocity:	Yes
Scale Rn By Velocity:	No
Scale Rn By Mass:	No
Use Spheres v1.005 and earlier:	Yes

Statistics

Sampling Method:	Latin-Hypercube
Pseudo-random Numbers:	Pseudo
Use Custom Seed:	No

Solver Options

Maximum Steps per Rock:	20000
Stopped Velocity Cutoff (m/seconds):	0.1
Normal Velocity Cutoff (m/seconds):	0.1
Maximum Timestep (seconds):	0.01

Material Properties

Bedrock Outcrops

Colour:	
Normal Restitution:	0.35 (Normal, sd=0.04)
Tangential Restitution:	0.85 (Normal, sd=0.04)
Friction Angle (°):	30

Asphalt

Colour:	
Normal Restitution:	0.4 (Normal, sd=0.04)
Tangential Restitution:	0.9 (Normal, sd=0.03)
Friction Angle (°):	30

Sandstone

Colour:	
Normal Restitution:	0.379 (Normal, sd=0.061)
Tangential Restitution:	0.825 (Normal, sd=0.083)
Friction Angle (°):	25

Siltstone

Colour:	
Normal Restitution:	0.27 (Normal, sd=0.055)
Tangential Restitution:	0.71 (Normal, sd=0.55)
Friction Angle (°):	26

Seeder Properties

Seeder Property 11

Colour:	
Number of Rocks:	200
Distribution:	Over All Rock Groups

Translational Velocity

Translational Velocity (m/seconds):	0
Translational Velocity Orientation:	Trend/Plunge
Trend (°):	0
Plunge (°):	0

Rotational Velocity

Rotational Velocity (°/seconds):	0
Rotational Velocity Orientation:	Trend/Plunge
Trend (°):	0
Plunge (°):	0

Group 1

Mass (kilograms):	22500
Density (kilograms/m3):	2500

Summary Results

Run Properties

Type	Max
Total Kinetic Energy (kJ):	6573.95
Translational Kinetic Energy (kJ):	6301.15
Rotational Kinetic Energy (kJ):	1550.649
Translational Kinetic Velocity (kJ):	28.584
Rotational Kinetic Velocity (kJ):	824.243

Stopping Reason

Error:	19
Max Compute Steps:	0
Edge of Model:	18
Stopped:	363
Hit Barrier:	0