



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ & ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑΣ



ΚΛΟΥΡΑ ΑΛΕΞΑΝΔΡΑ

ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ
ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΟΡΥΓΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ
ΕΥΚΑΡΠΙΑΣ, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΕΠΙΓΕΙΟΥ
ΣΑΡΩΤΗ LIDAR.

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



Επιβλέπων καθηγητής: Αν. Καθηγητής Βασίλειος Μαρίνος

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2019



ΚΛΟΥΡΑ Α. ΑΛΕΞΑΝΔΡΑ
Φοιτήτρια Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ: 5122

ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ
ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΟΡΥΓΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ
ΕΥΚΑΡΠΙΑΣ, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΕΠΙΓΕΙΟΥ ΣΑΡΩΤΗ
LIDAR.

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας,
Τομέας Γεωλογίας,
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας.

Επιβλέπων καθηγητής

Αν. Καθηγητής Βασίλειος Μαρίνος



© Αλεξάνδρα Α. Κλούρα, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Γεωλογίας, 2019

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ
ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΟΡΥΓΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΥΚΑΡΠΙΑΣ, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΕΠΙΓΕΙΟΥ ΣΑΡΩΤΗ LIDAR.- *Διπλωματική εργασία*

© Alexandra A. Kloura, School of Geology A.U.TH., Department of Applied
Geology, 2018

All rights reserved

ENGINEERING GEOLOGICAL EVALUATION AND SLOPE STABILITY
ANALYSIS IN EFKARPIA AREA, THESSALONIKI WITH THE USE OF LIDAR
SCANNER. – *Bachelor Thesis*

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ
ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση,
αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής
φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το
παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό
σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν
το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του
Α.Π.Θ.



ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Τεχνικογεωλογική αξιολόγηση και ανάλυση ευστάθειας τεχνητών ορυγμάτων στην περιοχή Ευκαρπίας, Θεσσαλονίκης με τη χρήση επίγειου σαρωτή Lidar» εκπονήθηκε κατά τη φοίτηση μου στο Τμήμα Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης και ανατέθηκε από τον αναπληρωτή καθηγητή κ. Βασίλειο Μαρίνο.

Από τη θέση αυτή θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής εργασίας κ. Βασίλειο Μαρίνο για την υποστήριξη, την καθοδήγηση και την πολύπλευρη βοήθεια του αλλά και την υπομονή και το χρόνο που αφιέρωσε μέχρι την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας. Ακόμα, τον ευχαριστώ για την ευκαιρία που μου έδωσε να συμμετέχω σε δύο εκπαιδευτικές εκδρομές μεταπτυχιακού επιπέδου, από τις οποίες προσκόμισα σημαντικές εμπειρίες και γνώσεις, που με βοήθησαν στη συνέχεια στη συγγραφή της διπλωματικής μου εργασίας.

Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον διδακτορικό Ευστράτιο Καραντανέλη για την επί τόπου λήψη μετρήσεων με τη χρήση του επίγειου σαρωτή Lidar και την παροχή των δεδομένων προς επεξεργασία καθώς και για τη βοήθεια και υποστήριξη του. Ακόμα, οφείλω να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Γεώργιο Παπαθανασίου για το χρόνο και τις υποδείξεις που μου έδωσε αναφορικά με τη χρήση των απαραίτητων λογισμικών Cloud Compare και Discontinuity Set Extractor (DSE).

Επιπλέον, ευχαριστώ τον κύριο Αναστάσιο Τσικρίκη, Υποψήφιο Διδάκτορα του Τμήματος Γεωλογίας του Α.Π.Θ., για την εξυπηρέτηση και την παροχή του εργαστηριακού χώρου του τμήματος του Αλεξάνδρειου Τεχνολογικού Ιδρύματος στη Σίνδο καθώς και για το χρόνο που μου αφιέρωσε ώστε να κατανοήσω και να διεκπεραιώσω την εργαστηριακή δοκιμή άμεσης διάτμησης.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια μου για την κατανόηση και έμπρακτη υποστήριξη τους καθ' όλη την πορεία της φοίτησής μου.

Κλούρα Αλεξάνδρα,
Θεσσαλονίκη- Φεβρουάριος 2019



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά την τεχνικογεωλογική αξιολόγηση ευστάθειας τεχνητών ορυγμάτων ασβεστολιθικού υλικού. Για την εξαγωγή αποτελεσμάτων και παράλληλα συμπερασμάτων για την ευστάθεια του τεχνητού πρανούς, πραγματοποιήθηκαν επί τόπου μετρήσεις των στοιχείων γεωμετρίας και αντοχής των ασυνεχειών και ακόμα μετρήσεις μέσω επίγειου σαρωτή Lidar.

Το *Κεφάλαιο 2* αποτελεί εισαγωγή και περιγραφή όλων των χαρακτηριστικών και σταδίων που σχετίζονται με την ανάλυση ευστάθειας βραχώδους πρανούς.

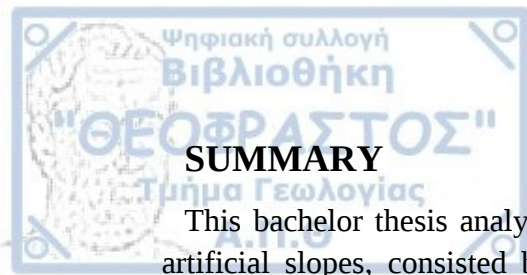
Συνεχίζοντας, στο *Κεφάλαιο 3* περιγράφεται εν συντομία η γεωλογία της ευρύτερης περιοχής μελέτης και συγκεκριμένα παρουσιάζεται η γεωλογική δομή της περιοχής, με τους επιμέρους γεωλογικούς σχηματισμούς και την τεκτονική, που διαμόρφωσε τη σημερινή της μορφή. Επίσης αναφέρονται τα σεισμολογικά δεδομένα που σχετίζονται με την ευρύτερη περιοχή.

Στο *Κεφάλαιο 4* αναλύονται οι επιμέρους τεχνικογεωλογικές ενότητες που συνιστούν τα ασβεστολιθικά πρανή ενώ παρουσιάζονται και συγκρίνονται τα τεκτονικά στοιχεία των επιμέρους ασυνεχειών που έχουν προκύψει μέσω επί τόπου μετρήσεων και μετρήσεων του σαρωτή Lidar.

Το *Κεφάλαιο 5* αναφέρεται στον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών μέσω της δοκιμής άμεσης διάτμησης.

Στο *Κεφάλαιο 6* γίνεται λεπτομερής περιγραφή της κινηματικής ανάλυσης, που πραγματοποιήθηκε ξεχωριστά για τα 2 υπό μελέτη πρανή. Ακολούθως, προσδιορίζονται οι συντελεστές ασφαλείας για κάθε ζεύγος ασυνεχειών που προέκυψε νωρίτερα και προτείνονται μέτρα αντιστήριξης για αποτροπή πιθανών μελλοντικών αστοχιών.

Τέλος, στο *Κεφάλαιο 7* παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν μέσω της μελέτης που πραγματοποιήθηκε για τις 2 περιπτώσεις τεχνητών ορυγμάτων.



SUMMARY

This bachelor thesis analyzes the engineering geological evaluation of stability on artificial slopes, consisted by limestone. The final conclusions and results for the stability of the referred slopes were extrapolated through measurements of the geometry and strength of the discontinuities, which were obtained on hand on the particular spot and also measurements with the use of the terrestrial scanner Lidar.

In *Chapter 2* the features and stages related to the stability analysis of a rock slope are introduced and theoretically described.

In continuing, *Chapter 3* is concerned with the description of the geology of the whole area of study and in particular with the geological structure of the area, its geological formations and the tectonics that led to its final form. In addition, some seismic data, regarding the whole area of study, are referred.

Chapter 4 firstly analyzes the geotechnical units of the slopes. Then, all the tectonic data of the studied discontinuities, taken from the referred measurements, are presented and compared.

Chapter 5 is related with the calculation of the shear strength of the discontinuities, concluded by the direct shear test of the rock joint.

In *Chapter 6*, we mention in detail the kinematic analysis, which was done separately for the 2 slopes under study. For each pair of discontinuities, the factors of safety are estimated and also some support measures are proposed in order to prevent any failures in the future.

Finally, *Chapter 7* presents the study conclusions for the 2 separate cases of artificial slopes.



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ **σελ.3-4**

1.1 ΓΕΝΙΚΑ **σελ.3**

1.1.1 Αντικείμενο μελέτης

1.2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ **σελ.3-4**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ **σελ.5-41**

2.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ **σελ.5**

2.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ **σελ.5-10**

2.2.1 Ταξινόμηση κατολισθήσεων κατά Varnes

2.2.2 Ταξινόμηση κατολισθήσεων κατά Zaruba- Menci

2.3 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ **σελ.10-13**

2.3.1 Παθητικοί παράγοντες

2.3.2 Ενεργητικοί παράγοντες

2.4 ΓΕΩΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ **σελ.13-26**

2.4.1 Έρευνα γραφείου

2.4.2 Έρευνα πεδίου

2.4.2.1 Επιμέρους στάδια έρευνας πεδίου

2.4.3 Εκτέλεση εργαστηριακών δοκιμών

2.4.4 Χάρτες μαζικών μετακινήσεων

2.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ **σελ.26**

2.6 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΠΡΑΝΩΝ **σελ.27-34**

2.6.1 Ανάλυση ευστάθειας σε βραχώδη πρανή

2.6.2 Μέθοδοι ανάλυσης ευστάθειας βραχωδών πρανών

2.7 ΜΕΤΡΑ ΑΝΤΙΣΤΗΡΙΞΗΣ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΠΡΑΝΩΝ **σελ.34-41**

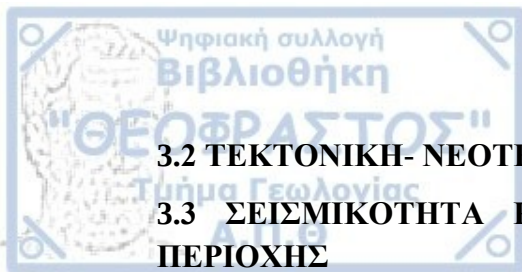
2.7.1 Προληπτικά μέτρα αντιστήριξης βραχωδών πρανών

2.7.2 Μέτρα σταθεροποίησης βραχωδών πρανών

2.8 ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΑΣΤΟΧΙΩΝ **σελ.41**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ **σελ.42-46**

3.1 ΓΕΩΛΟΓΙΑ – ΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ **σελ.42-44**



3.2 ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ- ΝΕΟΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ σελ.44-45

3.3 ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΟΤΗΤΑ ΡΗΓΜΑΤΩΝ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ σελ.45-46

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΤΕΝΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ σελ.47-60

4.1 ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΚΑΤΑ GSI σελ.47-50

4.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΚΥΡΙΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΙΚΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ σελ.51-60

4.2.1 Μετρήσεις τεκτονικών στοιχείων ασυνεχειών με τη χρήση γεωλογικής πυξίδας

4.2.2 Μετρήσεις τεκτονικών στοιχείων ασυνεχειών με τη χρήση επίγειου σαρωτή Lidar

4.2.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ επίγειου σαρωτή Lidar και επιτόπου μετρήσεων στο ύπαιθρο

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΞΑΓΩΓΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ σελ.61-69

5.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ σελ. 61-66

5.1.1 Δοκιμή άμεσης διάτμησης ασυνέχειας βραχώδους δείγματος- Γενικά

5.1.2 Δοκιμή άμεσης διάτμησης ασυνέχειας σε ανακρυσταλλωμένο ασβεστόλιθο

5.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ ΑΣΤΟΧΙΑΣ BARTON σελ. 66-69

5.2.1 Προσδιορισμός συντελεστών διατμητικής αντοχής στο βραχώδες πρανές

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΟΡΥΓΜΑΤΟΣ σελ. 70-75

6.1 ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ - ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΙΘΑΝΩΝ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ ΑΣΤΟΧΙΑΣ σελ. 70-73

6.1.1 Ανάλυση των μηχανισμών αστοχίας στο Δυτικό πρανές

6.1.2 Ανάλυση των μηχανισμών αστοχίας στο Ανατολικό πρανές

6.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ – ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ σελ. 74-75

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ σελ.76

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ σελ. 78-81

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ σελ. 82-97

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας γίνεται διερεύνηση και ανάλυση των συνθηκών ευστάθειας των ορυγμάτων στην παλαιά θέση εκμετάλλευσης του λατομείου της εταιρίας TITAN A.E., στην περιοχή της Ευκαρπίας.



Εικόνα 1: Δορυφορικός χάρτης μέσω της εφαρμογής Google Earth. Με κόκκινη πινέζα επισημαίνεται η θέση μελέτης.

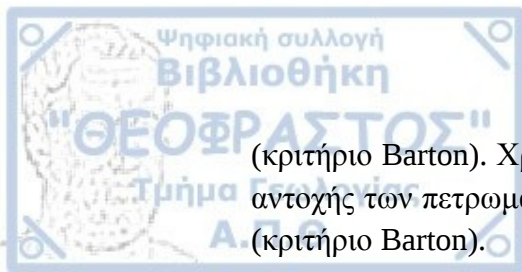
1.1.1 Αντικείμενο μελέτης

Κύριο αντικείμενο αποτελεί αρχικά η ανάλυση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των 2 ορυγμάτων της θέσης μελέτης, η τρισδιάστατη απεικόνιση με τη χρήση του επίγειου σαρωτή Lidar των συστημάτων ασυνεχειών στα βραχώδη πρανή και η σύγκριση των στοιχείων τους με τα στοιχεία που λήφθηκαν από την επιτόπου εργασία στη θέση. Τέλος, εκτελείται εξέταση των πιθανών μηχανισμών αστοχίας τους και πρόταση των κατάλληλων μέτρων προστασίας και αντιστήριξης των βραχωδών αυτών τεχνητών πρανών.

1.2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας περιλαμβάνει:

- Επίσκεψη στη θέση μελέτης- Εργασία πεδίου. Χρήση γεωλογικής πυξίδας για τη λήψη και συλλογή μετρήσεων προσανατολισμού των ασυνεχειών των πρανών. Χρήση προφιλόμετρου για την αποτύπωση του προφίλ των ασυνεχειών και μετέπειτα τον προσδιορισμό του συντελεστή τραχύτητας JRC



(κριτήριο Barton). Χρήση της σφύρας Schmidt για την επί τόπου μέτρηση της αντοχής των πετρωμάτων και τον προσδιορισμό του συντελεστή αντοχής JCS (κριτήριο Barton).

- Τεκτονική ανάλυση με τη χρήση τεκτονικών διαγραμμάτων (δίκτυο Schmidt).
- Προσδιορισμός συστημάτων ασυνεχειών των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τη χρήση του επίγειου σαρωτή Lidar, με τη χρήση του λογισμικού Cloud Compare και DSE. Σύγκριση των δεδομένων του Lidar με τις επί τόπου μετρήσεις προσανατολισμού.
- Ταξινόμηση της ποιότητας βραχομαζών των βραχωδών πρανών με τη χρήση του συστήματος γεωτεχνικής ταξινόμησης GSI.
- Εκτέλεση εργαστηριακής δοκιμής άμεσης διάτμησης.
- Υπολογισμός παραμέτρων αντοχής σε δοκίμια τεχνητών ασυνεχειών μέσω του κριτηρίου Barton-Bandis (1990).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ

2.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ

Η ερμηνεία του όρου "κατολίσθηση" έχει αποδοθεί κατά καιρούς από διάφορους επιστήμονες:

Σύμφωνα με τον Terzaghi (1950), η κατολίσθηση αποτελεί μία γρήγορη κίνηση ορισμένης μάζας πετρώματος, υπολειμματικού εδάφους ή ιζήματος ενός πρανούς, το κέντρο βάρους της οποίας μετακινείται προς τα κάτω και προς τα έξω.

Από την άλλη, σύμφωνα με τους Zaguba και Mencl (1969), ως κατολίσθηση ορίζεται η κάθε γρήγορη κίνηση πετρωμάτων, η οποία οφείλεται στην ολίσθηση τμήματος πρανούς που διαχωρίζεται από το υπόλοιπο σταθερό τμήμα με μία καλά καθορισμένη επιφάνεια.

Ο Varnes (1978) εισάγει τον όρο μετακίνηση μαζών στον οποίο περιλαμβάνεται κάθε μετακίνηση τμήματος πρανούς εξαιτίας ολισθήσεων, καταπτώσεων, ανατροπών, ροών και ερπυσμού. Εξαιρούνται από τον όρο, καθιζήσεις, χιονοστιβάδες και μετακινήσεις του πάγου.

Το 1991 ο Cruden, ως Πρόεδρος της Ομάδας Εργασίας της UNESCO για τη καταγραφή των κατολισθήσεων παγκοσμίως απέδωσε τον όρο "κατολίσθηση" ως την κίνηση μάζας βράχου, εδάφους ή κορημάτων προς τα κατάντη ενός πρανούς.

2.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ

2.2.1 Ταξινόμηση κατολισθήσεων κατά Varnes

Κατά καιρούς έχουν συνταχθεί διάφορες ταξινομήσεις των κατολισθήσεων προκειμένου να διευκολύνεται η έρευνα των κατολισθητικών φαινομένων στο ύπαιθρο. Ως κυρίαρχη και περισσότερο διαδεδομένη θεωρείται η ταξινόμηση κατά Varnes, ο οποίος το 1978 εισήγαγε ένα νέο σύστημα ταξινόμησης κατολισθήσεων. Η ταξινόμηση γίνεται σε 2 κατηγορίες με κριτήρια τον τύπο της μετακίνησης και το είδος του μετακινούμενου υλικού.

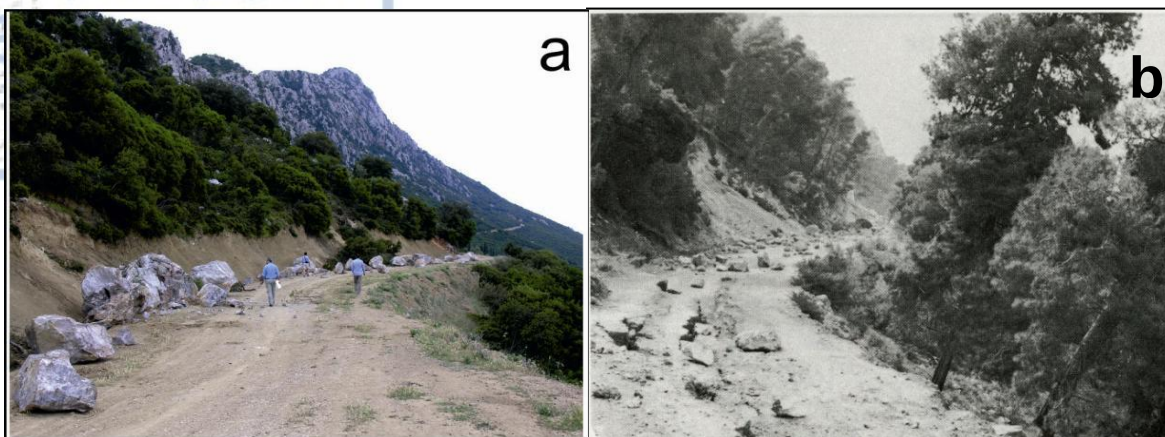
Ανάλογα με το είδος του μετακινούμενου υλικού διακρίνουμε (Varnes, 1978):

- α) μετακινήσεις εδαφικών σχηματισμών (κορήματα, γαίες).
- β) μετακινήσεις βραχώδους υποβάθρου.

Με κριτήριο τον τύπο της μετακίνησης, ανεξαρτήτως υλικού, διακρίνονται οι εξής κατηγορίες (Varnes, 1978):

Α) Καταπτώσεις: Μάζα αδιακρίτως μεγέθους αποκολλάται από ένα απότομο εδαφικό ή βραχώδες πρανές κατά μήκος μίας συγκεκριμένης επιφάνειας, με την πτώση του να γίνεται ελεύθερα και με μεγάλη ταχύτητα (**Εικόνα 1**).

Συγκεκριμένα για τις καταπτώσεις βράχων, τα τεμάχια, που αποσπώνται από το πρανές, αναπηδούν, κυλούν και ολισθαίνουν με αποτέλεσμα να κατακερματίζονται κατά τη σύγκρουση τους με το έδαφος. Οι περισσότερες καταπτώσεις σημειώνονται είτε σε εναλλαγές συμπαγών και λιγότερο συμπαγών πετρωμάτων είτε σε συμπαγή πετρώματα με δυσμενή γεωμετρία ασυνεχειών (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).



Εικόνα 1 : Καταπτώσεις σε διαταραγμένα ανθρακικά πετρώματα, α) στο όρος Μόβρη (Ν.Αχαΐας) μετά από το σεισμό του Ιουνίου 2008, β) στην περιοχή Ακροκορίνθου (Ν. Κορίνθου) μετά από τη σεισμική ακολουθία στις Αλκυονίδες νήσους. (Πηγή: α) Κουκουβέλας Ι., et al, 2010, β) Μαρίνος Π., et al, 1986)

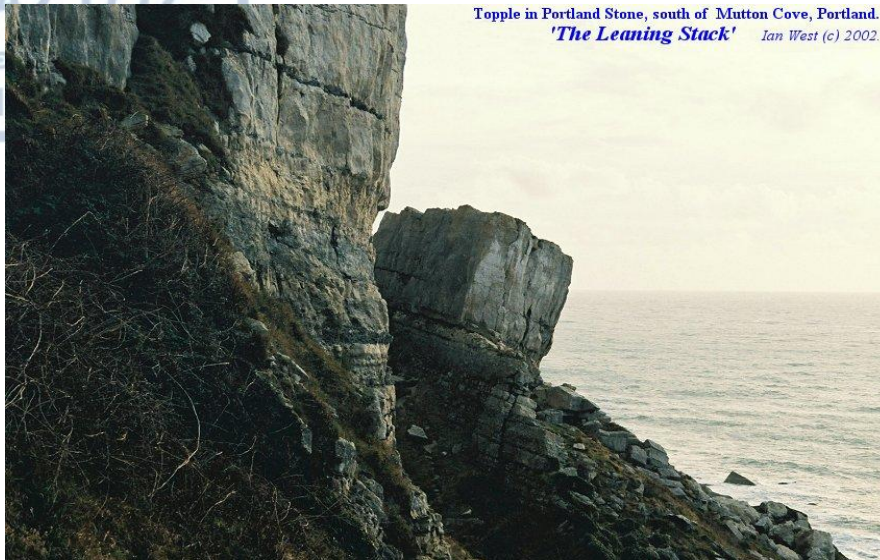
Β) Ανατροπές: Ο συγκεκριμένος τύπος εμφανίζεται κατά κύριο λόγο στα βραχώδη πρανή. Αναφέρεται στην "περιστροφή" ενός τεμάχους γύρω από ένα σημείο ή άξονα περιστροφής, το οποίο βρίσκεται χαμηλότερα από το κέντρο βάρους του. Σε τεμαχώδεις βραχώμαζες η ανατροπή εξαρτάται από δυνάμεις προερχόμενες από το βάρος του τεμάχους, την υδροστατική πίεση και τις ωθήσεις των παράπλευρων τεμαχίων (Εικόνα 2). Οι Goodman and Bray (1976) και Hoek and Bray (1977) ταξινόμησαν τις ανατροπές στις εξής υποκατηγορίες:

B1) Ανατροπή λόγω κάμψης: Η ανατροπή γίνεται με απόσπαση του τεμάχους σε κολώνες εξαιτίας ενός υποκατακόρυφου συστήματος ασυνεχειών.

B2) Ανατροπή τεμαχίων: Και σε αυτήν την περίπτωση η ανατροπή γίνεται με τον αποχωρισμό κολωνών από το πρανές με ύπαρξη ενός επιπλέον κάθετου συστήματος ασυνεχειών.

B3) Ανατροπή τεμαχίων λόγω κάμψης: Αναφέρεται στις περιπτώσεις στις οποίες η κάμψη συμβαίνει σε μία καλά καθορισμένη επιφάνεια με συγκεκριμένη γωνία, η οποία πιθανόν να συμπεριφερθεί ως επιφάνεια ολίσθησης.

B4) Δευτερογενείς ανατροπές: Οφείλονται στις φυσικές και ανθρωπογενείς παρεμβάσεις που προκαλούν την υποσκαφή της βάσης του πρανούς με αποτέλεσμα υλικό να ολισθαίνει και τελικά να ανατρέπεται. Οι ανατροπές αυτές διακρίνονται περαιτέρω ανάλογα με το τμήμα του πρανούς που ανατρέπεται και τα αίτια που την προκάλεσαν.

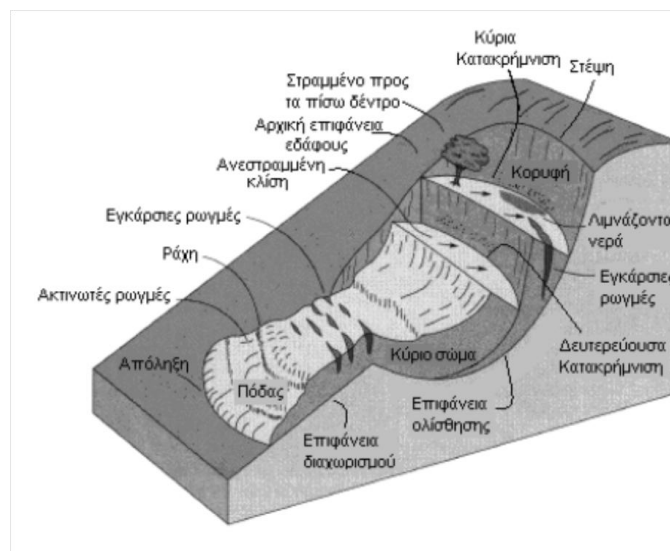


Topple in Portland Stone, south of Mutton Cove, Portland.
'The Leaning Stack' Ian West (c) 2002.

Εικόνα 2: Ανατροπή τεμάχους στην περιοχή νότια της κοιλάδας Mutton (Mutton Cove), νήσος Portland. (Πηγή: www.southampton.ac.uk)

Γ) Ολισθήσεις: Η ολίσθηση υλικού καθορίζεται από ανισότροπες διατμητικές παραμορφώσεις κατά μήκος μίας ή περισσότερων επιφανειών. Στα βραχώδη πρανή το υλικό είναι δυνατό να ολισθαίνει επάνω σε μία καλά καθορισμένη επιφάνεια ασυνέχειας. Διακρίνονται 3 κατηγορίες ολισθήσεων:

Γ1) Περιστροφικές ολισθήσεις: Η αποσπώμενη μάζα περιστρέφεται προς αντίθετη κατεύθυνση. Οι επιφάνειες ολίσθησης είναι κοίλες και συνήθως έχουν σχήμα "κουταλιού" ή κυρτό κυλινδρικό σχήμα. Οι περιστροφικές ολισθήσεις αναφέρονται κυρίως σε πρανή που αποτελούνται είτε από ομογενή άργιλο είτε από σχιστολιθικές αποθέσεις, ενώ μπορεί να συμβεί και σε πρανή κοκκώδους υλικού ή και τεμαχώδους βραχώμαζας, όπου οι πιέσεις των πόρων είναι αρκετά υψηλές (**Σχήμα 2.1**).



Σχήμα 2.1: Ιδεατό σχέδιο μίας τυπικής περιστροφικής ολίσθησης (Varnes, 1978) (τροποποιημένο από Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007).

Γ2) Μεταθετικές ολισθήσεις: Στην κατηγορία αυτή, οι μάζες κινούνται κατά μήκος μίας σχεδόν επίπεδης επιφάνειας με κατεύθυνση προς τη βάση του πρανούς με πολύ

μικρή ή μηδενική περιστροφή ή κάμψη (**Εικόνα 3**). Θεωρούνται πιο αβαθείς από τις περιστροφικές ολισθήσεις. Σχετικά με τα βραχώδη πρανή, μία μεταθετική ολίσθηση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το σύστημα των ασυνεχειών και τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά τους. Συγκεκριμένα, γίνονται επίπεδες ολισθήσεις (Hoek and Bray, 1977) ή ολισθήσεις τεμαχών (Panet, 1969) επάνω σε μία καλά καθορισμένη επιφάνεια, σφηνοειδείς ολισθήσεις στην περίπτωση 2 τεμνόμενων ασυνεχειών και κλιμακωτές μεταθετικές ολισθήσεις σε 2 ή περισσότερα συστήματα ασυνεχειών.



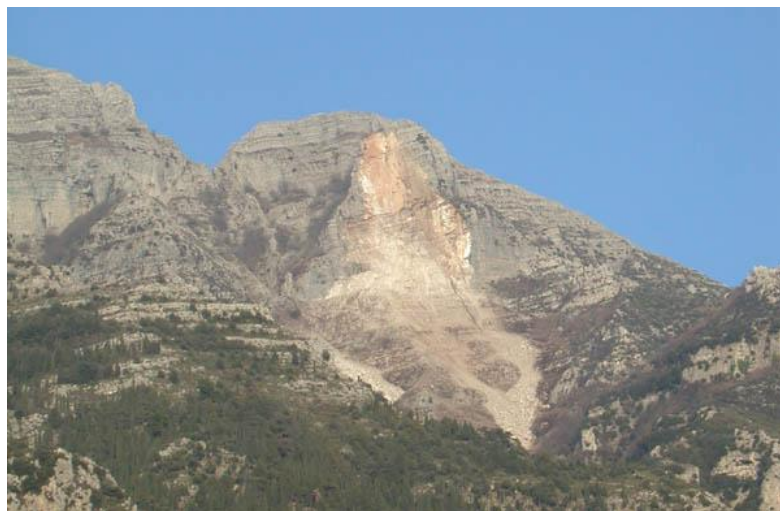
Εικόνα 3: Μεταθετική (επίπεδη) ολίσθηση στο νησί Leyte (Φιλιππίνες). (Πηγή: Natural Hazards and Earth System Sciences)

Γ3) Πλευρικές εξαπλώσεις: Η κίνηση του υλικού επεκτείνεται πλευρικά και καθορίζεται από διατμητικές ή εφελκυστικές ρωγμές. Προκαλούνται όταν το πρανές, που αποτελείται από σκληρά συμπαγή υλικά, εφάπτεται επάνω σε χαλαρότερους και μαλακότερους σχηματισμούς ή στην περίπτωση που υπάρχει αλληλουχία σκληρών και μαλακών σχηματισμών. Οι πλευρικές εξαπλώσεις γίνονται εντονότερες όταν οι ρωγμές πληρώνονται από νερό ή κορήματα (**Εικόνα 4**).



Εικόνα 4: Πλευρική εξάπλωση. (Πηγή: www.thinglink.com)

Δ) Ροές: Κινήσεις μαζών με τη μορφή υγρής ή ξηρής ροής σε χαλαρά υλικά (**Εικόνα 5**). Η ταχύτητα των ροών βρίσκεται να είναι μικρή ή μεγάλη. Στα βραχώδη υλικά οι παραμορφώσεις κατανέμονται μεταξύ διακλάσεων ποικίλων μεγεθών. Κατά τον Varnes (1978) οι ροές στο βραχώδες υπόβαθρο μπορεί να προκαλέσει εκδηλώσεις πλαστικής συμπεριφοράς, όπως πτυχώσεις, κάμψεις και διογκώσεις. Οι ροές χωρίζονται σε ροές βραχώδους υποβάθρου, ροές κορημάτων και ροές γαιών.



Εικόνα 5: Ροή βραχώδους υποβάθρου στην περιοχή Positano (Ιταλία).

(Πηγή: www.en.wikipedia.org)

Ε) Σύνθετες μετακινήσεις: Συνήθως στα πρανή παρατηρείται συνδυασμός όλων των προαναφερθέντων τύπων, δηλαδή οι μετακινήσεις γίνονται στο ίδιο ή σε διαφορετικά τμήματα του πρανούς, ταυτόχρονα ή σε διαφορετική χρονική στιγμή (**Εικόνα 6**). Ο Varnes (1978), ασχολήθηκε με τις σύνθετες μετακινήσεις και περιέγραψε περαιτέρω τις διαφορετικές μορφές αυτών: χιονοστιβάδες από καταπτώσεις βράχων, ανατροπή και περιστροφική ολίσθηση βράχου, ολίσθηση και κατάπτωση βράχων, κύρτωση και διόγκωση εδάφους και περιστροφική ολίσθηση και ροή εδάφους.



Εικόνα 6: «Frank Slide» κατολίσθηση σύνθετου τύπου μετακίνησης στην περιοχή Alberta (Καναδάς). (Πηγή: www.sanmarkotravel.com)

2.2.2 Ταξινόμηση κατολισθήσεων κατά Zaruba- Mencl

Το σύστημα ταξινόμησης των Zaruba-Mencl (1976,1982) δίνει έμφαση στα υλικά που συνιστούν τους υπό μελέτη γεωλογικούς σχηματισμούς. Χρησιμοποιήθηκε αρκετά στην Ελλάδα λόγω της καλής εφαρμογής στις γεωλογικές δομές του Ελλαδικού χώρου. Οι κατολισθήσεις χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- 1) Μετακινήσεις Τεταρτογενών αποθέσεων.
- 2) Μετακινήσεις του υποβάθρου προ-Τεταρτογενούς ηλικίας.

Η κατηγορία αυτή ταξινομείται περαιτέρω με βάση το είδος των γεωλογικών σχηματισμών και τον τύπο μετακίνησης του υλικού ενός πρानούς:

- α) Μετακινήσεις επιφανειακών αποθέσεων.
- β) Μετακινήσεις σε εδάφη και πετρώματα αργιλικού χαρακτήρα.
- γ) Μετακινήσεις συμπαγών πετρωμάτων.
- δ) Ειδικοί τύποι μετακίνησης.

2.3 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ

Σε κάθε περίπτωση πρανούς είναι σημαντικό για τον μελετητή να κατανοήσει τα αίτια που ευνοούν τη δημιουργία ασταθών συνθηκών. Τα αίτια αυτά υποδεικνύονται είτε μέσα από την ανάλυση ευστάθειας κατά το σχεδιασμό ενός πρανούς είτε όσα βρέθηκαν στην πράξη.

Οι παράγοντες εκείνοι, οι οποίοι απειλούν την ευστάθεια ενός πρανούς, προκαλώντας μεταβολές στις συνθήκες ισορροπίας του, είναι παράγοντες που μπορούν επίσης να οδηγήσουν άμεσα ή έμμεσα στην εκδήλωση κατολισθητικού φαινομένου. Αυτοί καθορίζουν κάθε μετακίνηση υλικού αφού μπορούν να επιδρούν στις εξωτερικές και εσωτερικές δυνάμεις που ασκούνται στο έδαφος. Οι παράγοντες που σχετίζονται με την ευστάθεια ενός πρανούς διακρίνονται: στους **παθητικούς** και στους **ενεργητικούς**.

2.3.1 Παθητικοί παράγοντες

Ως παθητικοί ορίζονται όσοι παράγοντες εξαρτώνται από τις ιδιαιτερότητες του ίδιου του περιβάλλοντος στην περιοχή: **φυσικά χαρακτηριστικά των υλικών και μορφολογικά ή και γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενός πρανούς**. Πιο συγκεκριμένα, μεταξύ άλλων βρίσκονται:

Η στρωματογραφία, λιθολογία και γεωλογική δομή οι οποίες ορίζουν τους πιθανούς τύπους μετακίνησης για τα διάφορα είδη υλικών.

Οι υδρογεωλογικές συνθήκες στα υλικά σχετίζονται με τη λιθολογία, τη δομή και το βαθμό αποσάθρωσης που δέχονται. Το νερό επιδρά στην αντοχή των διάφορων σχηματισμών, μειώνοντας τη διατμητική τους αντοχή και αυξάνοντας τις επί τόπου τάσεις που ασκούνται στο σύνολο του πρανούς.

Η αντοχή και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών ελέγχουν τους μηχανισμούς αστοχίας στο πρανές.

Για τα βραχώδη πρανή, οι πιο κύριοι παράγοντες θεωρούνται: η κατανομή των ασυνεχειών στο χώρο και ο βαθμός κερματισμού.

2.3.2 Ενεργητικοί παράγοντες

Ως ενεργητικοί ορίζονται οι εξωτερικοί παράγοντες που προκαλούν αστάθεια σε ένα πρανές και καθορίζουν την κλίμακα και την ταχύτητα των διάφορων κινήσεων. Οι ενεργητικοί παράγοντες είναι οι κλιματικές συνθήκες της ευρύτερης περιοχής και οι βροχοπτώσεις, οι μεταβολές στη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα, η δράση ζώων και φυτών, η σεισμικότητα και ηφαιστειότητα της περιοχής και οι ανθρωπογενείς παρεμβάσεις.

Κλιματικές συνθήκες και βροχόπτωση: Ο όγκος, η ένταση και κατανομή της βροχόπτωσης, το επικρατές κλίμα σε μία περιοχή και η απόκριση του εδάφους συμβάλλουν στην εκδήλωση αστοχιών σε ένα πρανές. Έντονες βροχοπτώσεις, γρήγορη διήθηση του νερού της βροχόπτωσης, πλημμυρικά φαινόμενα, γρήγορη τήξη-ψύξη του εδάφους αποτελούν ορισμένα παραδείγματα όσον αφορά τους παράγοντες που μπορούν να προκαλέσουν κατολίσθηση.

Όπως υποστηρίζει ο Fabio Luimo στο άρθρο «Sequence of instability processes triggered by heavy rainfall in the northern Italy», η ανομοιόμορφη κατανομή βροχόπτωσης σε περιόδους με σημαντικές μετεωρολογικές διακυμάνσεις στη Βόρεια Ιταλία συμβάλλει στη δημιουργία ασταθών συνθηκών, οι οποίες είναι δυνατό να ακολουθούν μια εξελικτική πορεία 3 σταδίων.

Διακύμανση του υδροφόρου ορίζοντα: Με την άνοδο της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα αυξάνεται η πίεση πόρων, γεγονός που προκαλεί ή επιταχύνει κατολισθητικά φαινόμενα. Ωστόσο και η απότομη πτώση της στάθμης είναι δυνατό να οδηγήσει σε ασταθείς συνθήκες καθώς οι υψηλές πιέσεις πόρων δεν μπορούν να ελαττωθούν στον ίδιο ρυθμό με την πτώση της στάθμης.

Στην κατηγορία αυτή εμπίπτει η κατολίσθηση Campo Vallemaggia στις Ελβετικές Άλπεις. Οι υψηλές πιέσεις πόρων και η μειωμένη διατμητική αντοχή των ασυνεχειών οδήγησαν στην επεισοδιακή κατολίσθηση Campo Vallemaggia. Οι διακυμάνσεις της στάθμης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα οφείλονται στις εποχιακές μεταβολές όσον αφορά την διήθηση και απορρόφηση του νερού από το έδαφος (από το άρθρο «Hydromechanical Rock Mass Fatigue in Deep-Seated Landslides Accompanying Seasonal Variations in Pore Pressures», 2016).

Δράση ζώων και φυτών: Στην κατηγορία αυτή εμπίπτουν η διάβρωση και υποσκαφή. Η υποσκαφή γίνεται είτε από ζώα που αναζητούν τροφή είτε μέσω της κυματικής και ποτάμιας δράσης. Η διάβρωση προκαλείται κυρίως από τη ροή των χειμάρρων και ποταμών, την κυματική δράση και την επίδραση του αέρα.

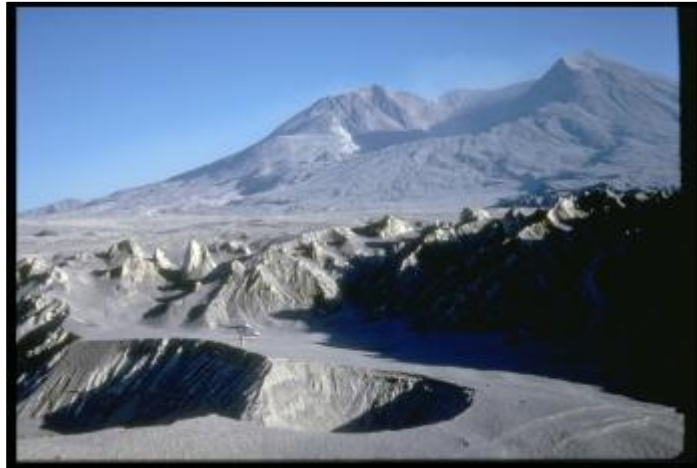
Σεισμικότητα: Οι σεισμικές δονήσεις μπορούν να προκαλέσουν ή και να επανεργοποιήσουν διάφορους τύπους κατολισθήσεων ανάλογα με τις εδαφικές συνθήκες, το μέγεθος του σεισμού και την απόσταση από το επίκεντρο. Στην περίπτωση δυνατών σεισμικών γεγονότων που σημειώνονται σε περιοχές με χαλαρά, μη συνεκτικά και κορεσμένα υλικά συναντάμε κατολισθητικά φαινόμενα τα οποία οφείλονται σε ρευστοποιήσεις εδαφών.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο σεισμός στις 8 Οκτωβρίου 2005 στην περιοχή Kashmir στο βόρειο Πακιστάν με μέγεθος $M_s = 7.6$. Το σεισμικό γεγονός αναφέρεται ως αιτία ενεργοποίησης ακολουθίας κατολισθητικών φαινομένων καθώς

υπολογίζεται ότι προκάλεσε μερικές χιλιάδες κατολισθήσεις σε εύρος $> 7.500 \text{ m}^2$ (από το άρθρο «Landslides triggered by the 8 October 2005 Kashmir earthquake», 2006).

Ηφαιστειότητα: Φαινόμενα κατολισθήσεων εκδηλώνονται σε ηφαιστειακές περιοχές σε περίπτωση απότομης διείσδυσης μάγματος στο εσωτερικό του ηφαιστείου, ισχυρής έκρηξης, σεισμού μεγάλου μεγέθους και κορεσμού του εδάφους εξαιτίας έντονης ή παρατεταμένης βροχόπτωσης. Κατολισθήσεις σημειώνονται ακόμη εξαιτίας της ροής της λάβας, η οποία παρασέρνει τα υλικά με ταχύτητα και τα διαβρώνει. Επιρρεπή σε κατολισθητικά φαινόμενα είναι οι αποθέσεις τέφρας και τα πυροκλαστικά υλικά.

Ιστορική θεωρείται η έκρηξη του ηφαιστείου της Αγίας Ελένης στην πολιτεία της Washington, στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, το Μάιο του 1980. Η έκρηξη προκλήθηκε με σεισμό μεγέθους $M_s = 5.1$ ενώ ακολούθησε η μεγαλύτερη ροή κορημάτων στην ιστορία με όγκο που υπολογίστηκε στα 2.5 km^3 (Εικόνα 7).



Εικόνα 7: Οι αποθέσεις της κατολίσθησης μετά από την ιστορική έκρηξη στο ηφαίστειο της Αγίας Ελένης, τον Μάιο του 1980 (άποψη από τα βορειοδυτικά).

(Πηγή: www.volcanoes.usgs.gov)

Ανθρώπινες παρεμβάσεις: Ποικίλες ανθρώπινες παρεμβάσεις στη φύση για την κατασκευή τεχνικών έργων προκαλούν συνθήκες αστάθειας στα πρανή με διάφορους τρόπους. Η αστάθεια στο πρανές είναι αποτέλεσμα της μείωσης της αντοχής, των φτωχών μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών, της αλλαγής της γεωμετρίας, υδρογεωλογικής συμπεριφοράς και της εφαρμογής εξωτερικών τάσεων στο πρανές. Παραδείγματα αυτών των παρεμβάσεων αποτελούν οι εκσκαφές, η κατασκευή ορυγμάτων, φραγμάτων, κτηρίων, οι μεταλλευτικές δραστηριότητες. Έμμεση παρέμβαση του ανθρώπου εντοπίζεται στις περιπτώσεις των φυσικών πρανών σε αστικές περιοχές, όπου η διοχέτευση νερού στο δίκτυο ύδρευσης για την κάλυψη των αστικών αναγκών προκαλεί διαρροές και μεταβολή της στάθμης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, με αποτέλεσμα να προκαλούνται συνθήκες αστάθειας στα φυσικά πρανή.

Η κατασκευή του αυτοκινητόδρομου στη βορειοανατολική Ινδία αποδεικνύει το γεγονός ότι η ανθρώπινη παρέμβαση είναι δυνατό να προκαλέσει σημαντικά προβλήματα. Παρόλο που οι αυτοκινητόδρομοι έχουν εξασφαλίσει μεγαλύτερη

ασφάλεια για τις μετακινήσεις και τις μεταφορές, από την άλλη η κατασκευή τους μπορεί να επιφέρει άλλου είδους προβλήματα μια και ο άνθρωπος παρεμβαίνει και καταστρέφει το φυσικό περιβάλλον. Συγκεκριμένα για την περιοχή Meghalaya στην βορειοανατολική Ινδία, η εκσκαφή μέρους του εδάφους για την διαμόρφωση του εθνικού αυτοκινητόδρομου προκάλεσε έμμεσα συνθήκες αστάθειας σε αυτή. Η ανεξέλεγκτη εκσκαφή, η αλλαγή της γεωμετρίας, η διαμόρφωση πρανών με απότομη κλίση και η εξαφάνιση της χλωρίδας, η οποία ενεργούσε ευνοϊκά για την ευστάθεια των πρανών, οδήγησαν σε συνεχείς εκδηλώσεις κατολισθητικών φαινομένων σε μία περιοχή όπου χαρακτηριζόταν από μηδενική επικινδυνότητα σε θέματα κατολισθήσεων (από το άρθρο «Soil slope instability along a strategic road corridor in Meghalaya, north-eastern India», 2017).

2.4 ΓΕΩΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

2.4.1 Έρευνα γραφείου

Αποτελεί το πρώτο βήμα για την πραγματοποίηση οποιασδήποτε μελέτης τεχνικού έργου. Στοχεύει στην κατανόηση της γεωλογίας και ιστορίας της αντίστοιχης περιοχής.

Αρχικά, συγκεντρώνουμε όλες τις διαθέσιμες πληροφορίες που αφορούν την περιοχή μελέτης και τις γεωλογικές της συνθήκες, αναζητώντας στην αντίστοιχη βιβλιογραφία, σε αρχεία και χάρτες. Ακόμα, θα πρέπει να αναζητηθούν και αν είναι απαραίτητο να αποκτηθούν χάρτες, αρχεία, αλλά και αεροφωτογραφίες, προκειμένου ο μελετητής να αποκτήσει μία πρώτη γνώση για το πεδίο που τον αφορά. Για τις περιοχές εκείνες, στις οποίες έχουν ήδη προηγηθεί μαζικές μετακινήσεις υλικών, το ενδιαφέρον του μελετητή εστιάζεται σε πληροφορίες που αφορούν την έκταση, συχνότητα και χρονικό των κινήσεων αυτών. Συγκεκριμένα, για τη συχνότητα με την οποία σημειώνονται οι διάφορες μετακινήσεις υλικού, ανακτώνται οι διάφορες ιστορικές μελέτες, γίνονται στατιστικές αναλύσεις, μελετώνται τα αρχεία μετεωρολογικών υπηρεσιών και ιδιαίτερα η επαναληψιμότητα, το κλιματικό καθεστώς και το μέγιστο ύψος βροχόπτωσης που έχει σημειωθεί στην περιοχή και ερευνάται η συσχέτιση των κινήσεων αυτών με σεισμικά γεγονότα, ηφαιστειακή δραστηριότητα και πλημμυρικά φαινόμενα.

Η αναγνώριση δυνατότητας εκδήλωσης κατολισθητικών φαινομένων από χάρτες και αεροφωτογραφίες γίνεται ως εξής:

1) Από τοπογραφικούς, γεωλογικούς χάρτες:

Στους χάρτες αυτούς εντοπίζουμε τις περιοχές με πρόσφατες παρελθοντικές ή πιθανές μελλοντικές εκδηλώσεις κατολισθητικών φαινομένων μέσω των παρακάτω στοιχείων:

Ανώμαλες- μη συμμετρικές ισοϋψείς χαρακτηριστικές λοφοειδούς τοπογραφίας:

Εδάφη που διαμορφώνουν λόφους και διαθέτουν μορφολογικά χαρακτηριστικά αντίθετα αυτών των πρανών της ευρύτερης περιοχής μαζί με την παρουσία απόκρημνων επιφανειών ολίσθησης σε υψηλότερες θέσεις αποτελούν ενδείξεις παλιάς ολίσθησης σε έναν τοπογραφικό χάρτη.

Συγκεντρωμένες ισοϋψείς- Απότομα πρανή:

Η παρουσία κολλουβιακού ή υπολειμματικού εδάφους πάνω στην επιφάνεια του υποβάθρου ευνοεί τυχόν ολισθήσεις στην περίπτωση των απότομων πρανών. Οι ολισθήσεις υλικών των πρανών εκδηλώνονται μετά από έντονες βροχοπτώσεις, υποσκαφή στο πόδι του πρανού και σεισμικές δονήσεις.

Θέσεις που υποδηλώνουν έντονη διάβρωση:

Τα υλικά διαβρώνονται από τα διάφορα κύματα και υδρορεύματα. Η διάβρωση, η οποία σημειώνεται στα χαλαρά εδαφικά υλικά, είναι εντονότερη.

Θέσεις που δείχνουν συγκεντρωμένη στράγγιση υδρορευμάτων:

Σε κάθε είδος χάρτη είναι απαραίτητη η λεπτομερής μελέτη του υδρογραφικού δικτύου της περιοχής. Η απεικόνιση των μετακινήσεων των υλικών είναι δυνατό να συνδέονται με την εμφάνιση των αγωγών στράγγισης της περιοχής.

Για τον σχεδιασμό των τεχνικών έργων μεγάλης σημασίας είναι ακόμα η αναγνώριση διηθήσεων ή πηγών της περιοχής.

2) Από αεροφωτογραφίες και δορυφορικές εικόνες:

Η Τηλεπισκόπηση (remote sensing) αποτελεί ένα από τα πιο χρήσιμα εργαλεία για την έρευνα των κατολισθήσεων στην περιοχή μελέτης. Συγκρίνοντας τις αεροφωτογραφίες και τις δορυφορικές εικόνες μεταξύ τους διευκολύνεται σε μεγάλο βαθμό η αναγνώριση των μεταβολών στην επιφάνεια του εδάφους.

Συγκεκριμένα για τις αεροφωτογραφίες, διαθέτουν τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

- Αποτυπώνουν την ευρύτερη περιοχή.
- Ο προσδιορισμός και η οριοθέτηση των κατολισθήσεων γίνεται εύκολος.
- Οι φυσικές διεργασίες (αποστράγγιση, διάβρωση κτλ.) συσχετίζονται με τις ανθρώπινες παρεμβάσεις (τεχνικά έργα).
- Εκτιμάται η φυσική κατάσταση των γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής.
- Διευκολύνεται ο εντοπισμός των διάφορων μεταβολών του εδάφους με τη σύγκριση των διάφορων αεροφωτογραφιών της περιοχής.

2.4.2 Έρευνα πεδίου

Σκοπός της έρευνας στο ύπαιθρο αποτελεί η γεωλογική-γεωτεχνική περιγραφή της ευρύτερης και ιδιαίτερα της στενής περιοχής, έτσι ώστε να καθοριστούν οι παράμετροι που θα χρησιμοποιηθούν για την ευστάθεια το σχεδιασμό, την εκσκαφή και τον ορισμό των μέτρων υποστήριξης στο υπό μελέτη πρανές. Οι έρευνες αυτές είναι απαραίτητες ακόμα για τον ορισμό των περιοχών, που είναι επιρρεπείς ως προς τα διάφορα κατολισθητικά φαινόμενα.

Για να διεξαχθεί ολοκληρωμένα η έρευνα της αστάθειας σε ένα οποιοδήποτε πρανές, είναι αναγκαία η ταυτοποίηση εκείνων των μεθόδων που οδηγούν σε ασταθείς συνθήκες, η μελέτη των παραγόντων που μπορεί να τις προκαλούν και η ανάλυση των μετακινήσεων που τελικά προκύπτουν.

Η αναγνώριση παλαιότερων ή πρόσφατων ενεργών μετακινήσεων υλικού και ασταθών περιοχών επιτυγχάνεται μέσω:

- ανωμαλιών στην κλίση του πρανούς εξαιτίας διαβρωτικών διεργασιών.
- αποθέσεων αλλόχθονου υλικού.
- διαρρήξεων.
- καταστροφών και ζημιών σε κτήρια και διάφορες άλλες δομές.
- διαφοράς στην κατανομή της βλάστησης μίας περιοχής.
- πλημμυρικών ζωνών, πηγών ή και περιοχών αποστραγγίσεων.
- εκτροπής μίας κοίτης ποταμού από κατολίσθηση και αποθέσεις κατολισθητικού φαινομένου σε πλημμυρικές πεδιάδες.

2.4.2.1 Επιμέρους στάδια έρευνας πεδίου

Μία ολοκληρωμένη έρευνα πεδίου συνίσταται από:

1) Γεωλογική και τεχνικογεωλογική χαρτογράφηση

Κατά τη χαρτογράφηση μίας περιοχής γίνονται άμεσες παρατηρήσεις και αποτυπώνονται στοιχεία όπως τα γεωμετρικά στοιχεία του πρανούς. Σε συνδυασμό με τους γεωλογικούς χάρτες μεγαλύτερης κλίμακας (1:500 έως 1:2.000), συντάσσονται απευθείας στο ύπαιθρο γεωμορφολογικοί και τεχνικογεωλογικοί χάρτες. Απαραίτητη είναι η εκτέλεση τοπογραφικών αποτυπώσεων με οριζοντιογραφίες και διατομές στην περίπτωση ολισθαινόντων τεμαχών.

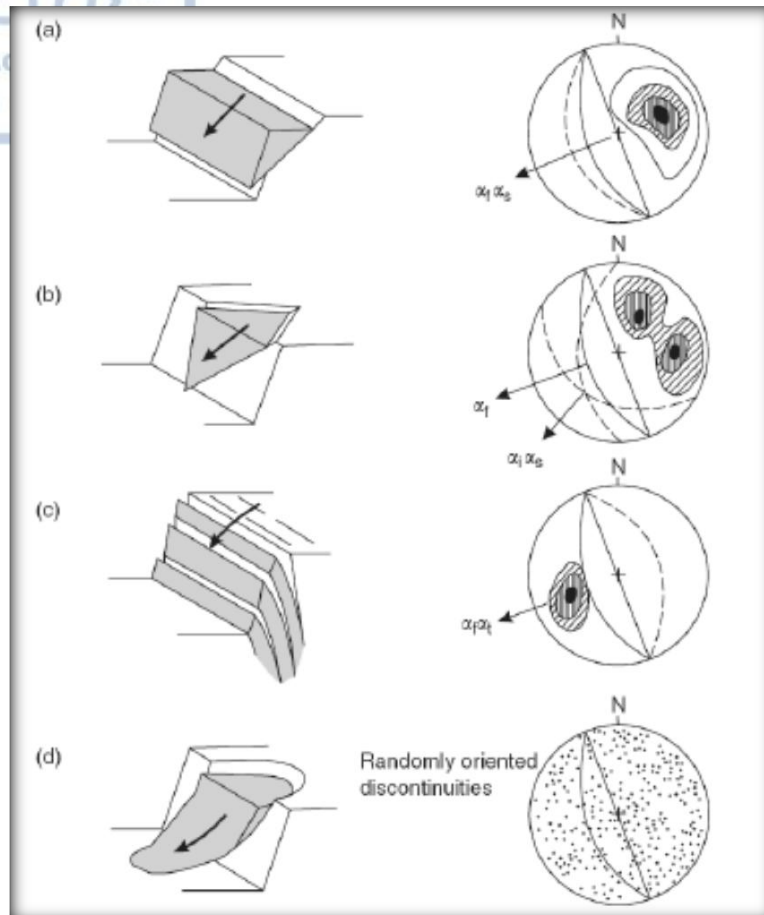
Η χαρτογράφηση, που αφορά την κατασκευή οποιουδήποτε τεχνικού έργου, πρέπει οπωσδήποτε να συμπεριλαμβάνει την αποτύπωση κάθε είδους γεωλογικού σχηματισμού καθώς και των μεταξύ τους επαφών, των σύγχρονων αποθέσεων και των τεχνητών επιχώσεων, τα στοιχεία προσανατολισμού (διεύθυνση και γωνία κλίσης) των χαρακτηριστικών δομών ενός πρανούς (στρώση στα ιζηματογενή πετρώματα, σχιστότητα στα μεταμορφωμένα, τεκτονικά στοιχεία όπως πτυχές, ρήγματα, συστήματα ασυνεχειών), την απεικόνιση στον χάρτη των αναγνωρισμένων επιφανειών παρελθοντικών κατολισθήσεων, τα υδρολογικά στοιχεία της περιοχής και τέλος την αποτύπωση κάθε είδους τεχνικού έργου (επιφανειακού, υπογείου) στην περιοχή, ήδη κατασκευασμένου για την κάλυψη των ανθρωπίνων αναγκών.

2) Τεχνικογεωλογική έρευνα

α) Μετρήσεις τεκτονικών στοιχείων (Τεκτονικά διαγράμματα)

Στην περίπτωση των βραχωδών πρανών, η ανάλυση της ευστάθειας τους βασίζεται στις επί τόπου μετρήσεις των τεκτονικών δομών και ασυνεχειών. Για κάθε ρήγμα, στρώση, σχιστότητα και διάκλαση που εντοπίζεται στο μέτωπο του πρανούς, μετρώνται με τη γεωλογική πυξίδα τα στοιχεία προσανατολισμού (διεύθυνση κλίσης, γωνία κλίσης). Τα στοιχεία αυτά θα απεικονιστούν στη συνέχεια με τη μορφή επιπέδων ή πόλων σε τεκτονικά διαγράμματα ώστε να προσδιοριστούν οι πιθανοί μηχανισμοί αστοχίας στο αντίστοιχο πρανές (Σχήμα 2.2).

Τις μετρήσεις των προαναφερθέντων στοιχείων ακολουθούν οι αντίστοιχες για κάθε μέτρηση παράμετροι, που είναι οι εξής: εμμονή, άνοιγμα, τραχύτητα, υλικό πλήρωσης, ποσότητα νερού και απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών (ίδιου συστήματος). Οι παράμετροι για κάθε τύπο ασυνέχειας καταγράφονται στο έντυπο αναγραφής ασυνεχειών (γεωμηχανικής βαθμονόμησης βραχομάζας).



Σχήμα 2.2: Μηχανισμοί εκδήλωσης αστοχιών σε βραχώδη πρηνή πάνω στο δίκτυο Schmidt. (Hoek, E., 1968) (a) Επίπεδη ολίσθηση, (b) Σφηνοειδής ολίσθηση, (c) Ολίσθηση με ανατροπή, (d) Περιστροφική ολίσθηση. (Πηγή: www.legah.metal.ntua.gr)

β) Ταξινομήσεις βραχομάζας (μόνο στα βραχώδη πρηνή)

Οι διάφορες ταξινομήσεις βραχομάζας, που προτάθηκαν κατά καιρούς από τους διάφορους επιστήμονες, έχουν κοινό στόχο: Με τις ταξινομήσεις αυτές γίνεται προσπάθεια καλύτερης κατανόησης των διαφόρων σχηματισμών που συναντώνται στο ύπαιθρο και ομαδοποίησης των βραχωδών σχηματισμών με παρόμοια μηχανική συμπεριφορά και επιδιώκεται η δημιουργία μίας κοινής γλώσσας μεταξύ των επιστημονικών κλάδων που απασχολούνται σε ένα τεχνικό έργο. Τα πιο δημοφιλή συστήματα ταξινόμησης είναι τα παρακάτω:

Σύστημα SMR (Slope Mass Rating) (Romana, 1985):

Το σύστημα SMR, ως τροποποίηση του συστήματος RMR (Beniawski, 1973), δημιουργήθηκε για την καλύτερη προσέγγιση της ευστάθειας των βραχωδών πρηνών. Χρησιμοποιείται αποκλειστικά για τα βραχώδη πρηνή, καθώς βαθμολογείται ο προσανατολισμός των ασυνεχειών της βραχομάζας σε σχέση με τη γεωμετρία και τη μέθοδο εκσκαφής του υπό μελέτη πρηνούς, με τον υπολογισμό του δείκτη SMR. Διακρίνει 5 κατηγορίες βραχομάζας στις οποίες γίνεται αξιολόγηση της ευστάθειας, των πιθανών ολισθήσεων και των απαιτούμενων μέτρων προστασίας. Για τον προσδιορισμό του δείκτη SMR χρησιμοποιείται η εξής σχέση:

$$\text{SMR} = \text{RMR}_{\text{bas}} - (F_1 F_2 F_3) + F_4 \quad (\text{Romana, 1985}) \quad \text{όπου:}$$

RMR_{bas} = Βαθμολογία της βραχομάζας με το σύστημα RMR (δεν συμπεριλαμβάνεται ο παράγοντας R_6).

F_1 = Αριθμητικός παράγοντας για την παραλληλότητα διεύθυνσης ασυνεχειών-διεύθυνσης μετώπου πρανούς (οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ του 0.15-1, $F_1=1$ για τις ασυνέχειες που βρίσκονται παράλληλα με το μέτωπο).

F_2 = Αριθμητικός παράγοντας που εκφράζει την πιθανότητα εκδήλωσης επίπεδης ολίσθησης σε σχέση με την κλίση των ασυνεχειών (οι τιμές κυμαίνονται από 0.15-1, $F_2=1$ για ασυνέχειες με $\phi > 45^\circ$).

F_3 = Αριθμητικός παράγοντας που εκφράζει τη σχέση μεταξύ της κλίσης των ασυνεχειών και της κλίσης του μετώπου του πρανούς

F_4 = Παράγοντας για την εκτίμηση της μέθοδου εκσκαφής σε σχέση με την επίδραση της στη χαλάρωση της βραχομάζας.

Σύστημα ταξινόμησης Q (Barton, Lien, Lude, 1974):

Το σύστημα Q επιδιώκει τον προσδιορισμό του δείκτη ποιότητας της βραχομάζας Q μέσω μίας μαθηματικής εξίσωσης, αποτελούμενης από 3 λόγους-όρους: Ο πρώτος όρος εκφράζει τη δομή της βραχομάζας, ο δεύτερος την ποιότητα των επιφανειών των ασυνεχειών και ο τρίτος όρος εκφράζει τις ενεργές τάσεις που ασκούνται. Είναι ευρέως διαδεδομένο στην κατασκευή υπόγειων τεχνικών έργων.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \frac{J_r}{J_a} \frac{J_w}{SRF} \quad (\text{Barton, N.G.I., 1974}) \text{ όπου:}$$

RQD = Βαθμός κερματισμού της βραχομάζας,

J_n = αριθμητικός παράγοντας του πλήθους των συστημάτων ασυνεχειών

J_r = Αριθμητικός παράγοντας της τραχύτητας των ασυνεχειών

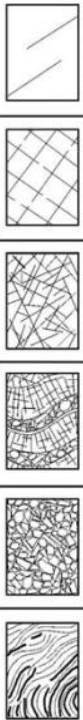
J_a = Αριθμητικός παράγοντας του βαθμού αποσάθρωσης των τοιχωμάτων των ασυνεχειών

J_w = Συντελεστής απομείωσης λόγω ύπαρξης νερού στις ασυνέχειες

SRF = συντελεστής απομείωσης λόγω των επιτόπου τάσεων

Γεωλογικός δείκτης αντοχής βραχομάζας GSI (Hoek and Marinos, 2000):

Στο σύστημα ταξινόμησης GSI, ο παρατηρητής μηχανικός καλείται να εκτιμήσει υποκειμενικά τη δομή της υπό μελέτη βραχομάζας και την ποιότητα των επιφανειών των ασυνεχειών, προσδιορίζοντας με τον τρόπο αυτό το δείκτη αντοχής GSI (**Σχήμα 2.3**). Ο δείκτης GSI αποτελεί ουσιαστικά δείκτη απομείωσης της αντοχής της βραχομάζας, καθώς δεν είναι εφικτός ο μαθηματικός υπολογισμός της αντοχής μίας βραχομάζας. Χρησιμοποιείται για τις περιπτώσεις βραχομάζας στις οποίες ισχύει το κριτήριο θραύσης των Hoek and Brown (1994-1995). Εφαρμόζεται στο σχεδιασμό και την μετέπειτα κατασκευή των περισσότερων τεχνικών έργων στον Ελλαδικό χώρο.

ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΡΗΓΜΑΤΩΜΕΝΟΥΣ ΒΡΑΧΟΥΣ (Hoek and Marinos, 2000) Βασίζονται στην εμφάνιση της βραχώδους (περιγραφή δομής και κατάσταση επιφανείας ασυνχειών) εκτιμήστε τη μέση τιμή του GSI, χωρίς υποχρεωτικά μεγάλη ακρίβεια. Το να επιλέξετε ένα εύρος τιμών από 33 ως 37 είναι πιο ρεαλιστικό από το να δηλώσετε ότι GSI=35. Σημειώνεται ότι ο Πίνακας δεν εφαρμόζεται σε κινηματικά ελεγχόμενες αστάθειες. Στην περίπτωση που οι ασθενείς επίπεδες επιφάνειες έχουν μη ευνοϊκό προσανατολισμό σε σχέση με το πρανές εκσκαφής, τότε αυτές καθορίζουν την συμπεριφορά της βραχώδους. Η διατηρητική αντοχή επιφανειών σε βράχους που υπόκεινται σε εξασθένιση λόγω διακύμανσης της περιεκτικότητας σε υγρασία, είναι περαιτέρω μειωμένη όταν υπάρχει νερό. Όταν, οι βραχώδεις ανήκουν στις μέτριες έως πτωχές κατηγορίες και υπάρχει νερό τότε μετακινούμαστε προς τα δεξιά. Η υδροστατική πίεση λαμβάνεται υπόψη με την ανάλυση ενεργών τάσεων. ΔΟΜΗ		ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΧΕΙΑΣ				
		ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ	ΜΕΤΡΙΑ	ΠΤΩΧΗ	ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ
		Πολύ τραχείες, μη αποσπασμένες επιφάνειες	Τραχείες, ελαφρά αποσπασμένες και οξείδωμένες επιφάνειες	Λείες, μετρίως αποσπασμένες και εξαλειωμένες επιφάνειες	Επιφάνειες ολίσθησης, πολύ αποσπασμένες με σημαντική επιφλοιώματα ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη θραύσματα	Επιφάνειες ολίσθησης πολύ αποσπασμένες με μαλακό αργίλικό υλικό πλήρωσης
		ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΧΕΙΩΝ →				
		ΜΕΙΟΥΜΕΝΟ ΑΝΗΛΟΚΛΕΙΔΩΜΑ ΤΩΝ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΤΕΜΑΧΩΝ				
		90	80	70	60	50
		40	30	20	10	N/A
		N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
		N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
		N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Σχήμα 2.3: Διάγραμμα του δείκτη γεωλογικής αντοχής GSI (Hoek and Marinos, 2000).

γ) Δειγματοληπτικές γεωτρήσεις

Οι δειγματοληπτικές γεωτρήσεις αποτελούν αναπόσπαστο τμήμα ενός γεωερευνητικού προγράμματος οποιουδήποτε τεχνικού έργου (Εικόνα 8). Με την εκτέλεση μίας δειγματοληπτικής γεώτρησης επιτυγχάνεται λεπτομερής μελέτη του υπεδάφους, μέσω της λήψης αντιπροσωπευτικών δειγμάτων, της εκτέλεσης επί τόπου δοκιμών, της γεωμηχανικής παρακολούθησης σε βάθος (εγκατάσταση οργάνων), προσδιορίζονται τα στοιχεία προσανατολισμού των υπαρχόντων τεκτονικών δομών και ασυνχειών του πρανούς και εντοπίζονται τα υπόγεια υδροφόρα στρώματα.

Ο αριθμός, οι θέσεις, το βάθος και ο τύπος δειγματολήπτη προσδιορίζονται αποκλειστικά από τον υπεύθυνο μελετητή του έργου και καθορίζονται ανάλογα με την πολυπλοκότητα που εμφανίζουν οι υπό μελέτη γεωλογικοί σχηματισμοί, το είδος

και μέγεθος του έργου και το συνολικό κόστος και προϋπολογισμός του τεχνικού έργου. Κάθε εργασία του μελετητή οφείλει να υπακούει στις ορισμένες γενικές προδιαγραφές.

Σύμφωνα με τον γενικό οδηγό του NAVFAC (Naval Facilities Engineering Command) (1982), για την περίπτωση της ευστάθειας πρανών και κατολισθήσεων υποχρεωτικές είναι 3-5 γεωτρήσεις, ώστε να καλύπτουν όλο το μήκος του έργου και να διευκολύνουν τη διαμόρφωση της τεχνικογεωλογικής μηκοτομής, ενώ για ενεργές ολισθήσεις κρίνεται απαραίτητη η εκτέλεση τουλάχιστον μίας γεώτρησης προς ανάντη της ολισθαίνουσας περιοχής. Το τελικό βάθος της γεώτρησης βρίσκεται σε σταθερό στρώμα, κάτω από την ενεργή ή πιθανή επιφάνεια ολίσθησης ή σε βάθος όπου δεν δύνανται ολισθήσεις εξαιτίας της γεωμετρίας του πρανού (γενικός οδηγός του NAVFAC, 1982). Σχετικά με τις περιοχές κατολισθήσεων, υποχρεωτική θεωρείται η εκτέλεση γεωτρήσεων σε 3 αντιπροσωπευτικά σημεία της κατολίσθησης και συγκεκριμένα: στο φρύδι, στο κυρίως σώμα και στο πόδι της κατολίσθησης.



Εικόνα 8: Δειγματοληπτική γεώτρηση στο πλαίσιο γεωτεχνικής έρευνας. (Πηγή: www.geognosi.gr)

δ) Επί τόπου δοκιμές

Οι επί τόπου δοκιμές εκτελούνται μόλις ληφθούν στην επιφάνεια οι πυρήνες δειγματοληψίας. Σκοπός των επί τόπου δοκιμών είναι η μέτρηση και ο προσδιορισμός ορισμένων μηχανικών χαρακτηριστικών του υλικού στις επί τόπου (πραγματικές) συνθήκες, υπό την επιβολή άμεσων φορτίσεων.

Δοκιμή προσδιορισμού σκληρότητας με τη χρήση του σφυριού Schmidt (τύπου L): Η δοκιμή αυτή είναι από τις λίγες που μπορούν να εφαρμοστούν τόσο στο εργαστήριο, στα δείγματα που προκύπτουν από τις γεωτρήσεις, όσο και στο ύπαιθρο, κατευθείαν στο μέτωπο του πρανού. Με την εκτέλεση αυτής καθορίζεται άμεσα η σκληρότητα του βραχώδους υλικού ενώ επίσης προσδιορίζεται εμμέσως και σε συνδυασμό με τη ξηρή πυκνότητα, η αντοχή του πετρώματος σε ανεμπόδιστη θλίψη.

Στη μελέτη ευστάθειας ενός πρανούς η δοκιμή αυτή χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό διότι είναι άμεση και προσδιορίζει τις απαιτούμενες παραμέτρους χωρίς να προκαλεί ρηγματώσεις και επιπλέον ζημιές στο μέτωπο του πρανούς. Τα αποτελέσματα της σκληρομέτρησης χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του συντελεστή JSC μέσω του διαγράμματος αντοχή σε μονοαξονική θλίψη-αναπηδήσεις του σφυριού Schmidt. Ο συντελεστής JSC χρησιμοποιείται αμέσως μετά για την κατασκευή του διαγράμματος αντοχής τ - σ ασυνεχειών και τον υπολογισμό της συνοχής c και γωνίας τριβής ϕ μέσω του κριτηρίου Barton-Bandis. Η δοκιμή με τη χρήση του σφυριού Schmidt δεν ενδείκνυται για μαλακά πετρώματα ή και σχηματισμούς με μηχανική αντοχή μικρότερη των 50 MPa.

Δοκιμή προσδιορισμού του δείκτη σημειακής φόρτισης (Point Load Test): Όπως και η προηγούμενη δοκιμή, η δοκιμή σημειακής φόρτισης εκτελείται είτε στο εργαστήριο είτε στο ύπαιθρο, στο μέτωπο του πρανούς. Με αυτή επιδιώκεται άμεσα η κατάταξη του ακέραίου πετρώματος σε μία τάξη με βάση την αντοχή του και έμμεσα η εκτίμηση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη.

Συγκεκριμένα, η δοκιμή σημειακής φόρτισης υπολογίζει (με τη βοήθεια του φορτίου που εφαρμόζεται στο δοκίμιο και τη διάμετρο του) το δείκτη σημειακής φόρτισης I_s , τον διορθωμένο δείκτη αντοχής σημειακής φόρτισης $I_{s(50)}$, το συντελεστή διόρθωσης μεγέθους f λαμβάνοντας υπόψη τη διόρθωση κατά ISRM, έτσι ώστε εν συνεχεία να προσδιοριστούν η αντοχή του εξεταζόμενου πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη σ_c και το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας E_t .

Δοκιμή πρότυπης διείσδυσης (SPT): Η συγκεκριμένη δοκιμή προϋποθέτει τη χρήση του δειγματολήπτη Terzaghi (διαιρετός). Μετράται ο αριθμός των κρούσεων στον οποίο επιτυγχάνεται η ανά 15 cm διείσδυση του δειγματολήπτη στο βάθος. Εκτελούνται 3 διεισδύσεις, στις οποίες αντιστοιχεί ξεχωριστά ένας αριθμός κρούσεων. Το άθροισμα των 2 τελευταίων διεισδύσεων δίνουν την τελική τιμή της δοκιμής N_{SPT} . Με τη δοκιμή αυτή επιδιώκεται να μελετηθεί η επί τόπου μηχανική συμπεριφορά, η φέρουσα ικανότητα q_c και η πιθανότητα καθιζήσεων με τον προσδιορισμό του συντελεστή καθίζησης s στο έδαφος μέσω της επιβολής διάφορων φορτίων σε αυτό. Η δοκιμή πρότυπης διείσδυσης αναφέρεται αποκλειστικά στα εδαφικά υλικά, στις περιπτώσεις όπου συναντάται επιφανειακό στρώμα εδαφικού μανδύα, υπερκείμενο του βραχώδους υποβάθρου.

Δοκιμή στατικής πενетроμέτρησης- διείσδυσης κώνου (CPT): Αποσκοπεί στην απευθείας μέτρηση των μεγεθών της αντίστασης αιχμής κώνου q_c , της τυπικής πλευρικής τριβής f_s και του μετέπειτα υπολογισμού του λόγου τριβών R_f ο οποίος χρησιμοποιείται για την περιγραφή και ταξινόμηση ενός εδαφικού δείγματος.

Με τη διείσδυση κώνου μέσω λεπτών στελεχών στο εσωτερικό των γεωτρήσεων προσδιορίζονται οι απαραίτητες γεωτεχνικές παράμετροι για την κατανόηση των επί τόπου συνθηκών, η στρωσιγένεια και τα διαφορετικά είδη που συνιστούν το έδαφος στην άμεση περιοχή μελέτης. Τα αποτελέσματα της δοκιμής μπορούν να χρησιμοποιηθούν απευθείας στην επιλογή των μετέπειτα εργασιών. Η δοκιμή διείσδυσης κώνου, όπως και η δοκιμή πρότυπης διείσδυσης αναφέρεται μόνο στα εδαφικά υλικά.

Δοκιμή πρεσσιομέτρου: Με τη δοκιμή αυτή εκτελείται στατική φόρτιση του εδάφους με τη βοήθεια κυλινδρικής βολίδας, η οποία εισάγεται μέσα στη γεώτρηση σε συγκεκριμένα βάθη. Η πίεση που ασκείται στη βολίδα και κατά επέκταση στο έδαφος αυξάνεται σταδιακά. Η συγκεκριμένη μέθοδος προσδιορίζει τη σχέση τάσης-παραμόρφωσης και την οριακή αντοχή του εδάφους.

Η δοκιμή πρεσσιομέτρου στη μελέτη ευστάθειας ενός πρανού αποσκοπεί στην κατανόηση και εκτίμηση του τρόπου και του μεγέθους παραμόρφωσης που υφίστανται τα επιμέρους εδαφικά υλικά, τα οποία μπορεί να καλύπτουν με ορισμένο πάχος το βραχώδες υπόβαθρο, σε πραγματικές συνθήκες υπό την επίδραση δοκιμαστικών φορτίων.

Δοκιμές υδροπερατότητας: Εκτελούνται στις δειγματοληπτικές γεωτρήσεις για τον προσδιορισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας k σε τυχόν εδαφικά υλικά, υπερκείμενα του βραχώδους υποβάθρου. Σε ορισμένο βάθος της γεώτρησης και σε συγκεκριμένο απομονωμένο τμήμα της διοχετεύεται νερό προκειμένου να μετρηθεί η ποσότητα νερού που απορροφάται από το έδαφος σε σχέση με την πίεση που ασκείται. Ανάλογα με τον τρόπο διοχέτευσης και μέτρησης του νερού που προσλαμβάνει και απορροφά το έδαφος διακρίνουμε: τη δοκιμή σταθερού φορτίου (**δοκιμή Lefranc**), τη δοκιμή μεταβλητού φορτίου (**δοκιμή Maag**) και τη δοκιμή αποστολής νερού με πίεση (**δοκιμή Lugeon**).

Χωρίς τη γνώση της υδροπερατότητας k και επομένως και των υδρογεωλογικών συνθηκών που επικρατούν στην άμεση περιοχή μελέτης, είναι αδύνατος ο σχεδιασμός και η μετέπειτα κατασκευή ενός τεχνικού έργου. Ειδικά για την ανάλυση ευστάθειας στα πρανή κρίνεται απαραίτητη η διεξαγωγή αυτού του τύπου δοκιμών, προκειμένου να εκτιμηθούν εκείνες οι υδρογεωλογικές συνθήκες του υπεδάφους, οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν σε αστοχία και ολίσθηση του πρανού. Τα αποτελέσματα των δοκιμών χρησιμοποιούνται μετέπειτα για το σχεδιασμό των κατάλληλων αποστραγγιστικών μέτρων προστασίας.

i. Δοκιμή Lefranc

Η δοκιμή Lefranc εφαρμόζεται ευρέως σε ομοιογενή εδάφη και όχι πετρώματα, τα οποία είναι υδροπερατά σε μεγάλο βαθμό και χαρακτηρίζονται από μέτρια συνεκτικότητα.

ii. Δοκιμή Maag

Η δοκιμή Maag εφαρμόζεται ευρέως σε ομοιογενή εδάφη και όχι πετρώματα, τα οποία είναι μέτρια συνεκτικότητας και μικρής διαπερατότητας. Η διαφορά της με τις άλλες δύο δοκιμές βρίσκεται στο ότι μετράται η πτώση στάθμης της σωληνωμένης γεώτρησης.

iii. Δοκιμή Lugeon

Η δοκιμή Lugeon εκτελείται κυρίως σε έντονα διαταραγμένα πετρώματα και λιγότερο σε σκληρά εδάφη. Η διοχέτευση του νερού με πίεση γίνεται κατά βαθμίδες.

ε) *Ερευνητικά φρεάτια*

Τα ερευνητικά φρεάτια προηγούνται των γεωτρήσεων και αποσκοπούν στη λήψη δειγμάτων εδάφους σε μικρά βάθη και τη μελέτη του εδάφους σε βάθος μέχρι 5 μέτρα.

3) Γεωφυσική έρευνα

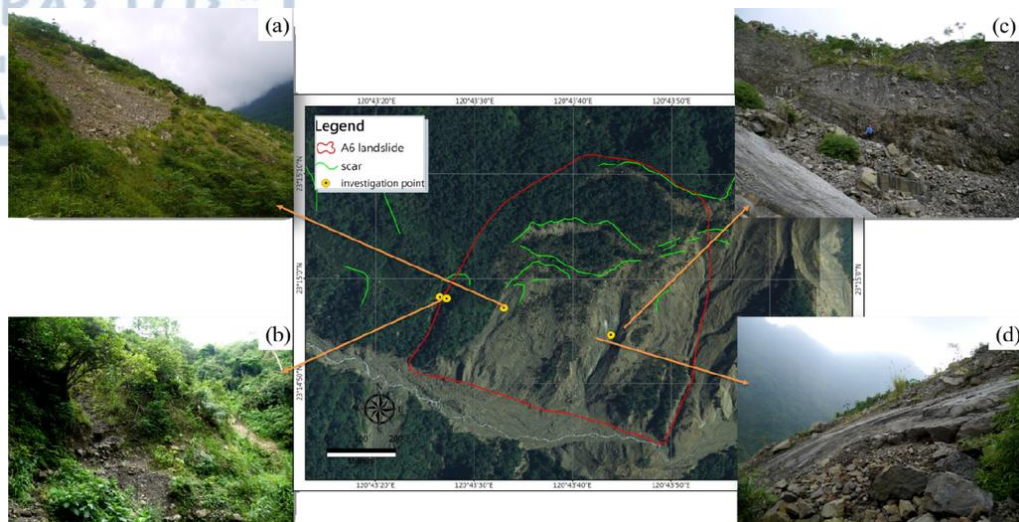
Σε αυτή συμπεριλαμβάνονται η μέθοδος σεισμικής διάθλασης και μέτρηση ηλεκτρικής αντίστασης (τομογραφίες και γεωηλεκτρικές μετρήσεις). Οι επιφάνειες ασυνεχειών εντοπίζονται μέσω των διαφορών που παρατηρούνται μεταξύ των μετακινούμενων μαζών και του σταθερού υπεδάφους.

Με τη χρήση των διάφορων γεωφυσικών μεθόδων στην έρευνα κατολισθητικών φαινομένων εξασφαλίζεται ο πλήρης χαρακτηρισμός των μετακινούμενων μαζών ενώ είναι δυνατή ακόμα και η πρόβλεψη πιθανών μελλοντικών μετακινήσεων μαζών. Για να ενισχύσουμε αυτή την πεποίθηση, παρουσιάζουμε μία συγκεκριμένη εφαρμογή των γεωφυσικών μεθόδων ως προς τον προσδιορισμό μαζικών μετακινήσεων.

Για τη μελέτη των μαζικών μετακινήσεων στην περιοχή **Séchilienne** στις Γαλλικές Άλπεις (2002-2003) χρησιμοποιήθηκαν 5 γεωφυσικές μέθοδοι: ηλεκτρομαγνητικό προφίλ, ηλεκτρική τομογραφία, τομογραφία σεισμικής διάθλασης, μετρήσεις σεισμικού δυναμικού και σεισμικού θορύβου. Ως αποτελέσματα της εφαρμογής τους ορίστηκαν: η μεγάλη διαφορά στα μεγέθη της ηλεκτρικής αντίστασης στις μετακινούμενες και ανεπηρέαστες εδαφικές μάζες (μετρούμενη ηλεκτρική αντίσταση $>3 \text{ k}\Omega\cdot\text{m}$ και $<1 \text{ k}\Omega\cdot\text{m}$ αντίστοιχα) και οι διακυμάνσεις των γεωφυσικών ανωμαλιών σε συνάρτηση με το ρυθμό μετακίνησης των μαζών, μέσω των μετρήσεων των οργάνων.

4) Μετρήσεις με χρήση των σαρωτών Lidar

Τα συστήματα Lidar αποτελούν ενεργητικά εικονοληπτικά συστήματα τηλεπισκόπησης και λειτουργούν με τη βοήθεια ακτινών laser μέσης ισχύος. Αποτελούν αποτελεσματικό μέσο εντοπισμού και μέτρησης ορισμένων σημαντικών τεχνικογεωλογικών παραμέτρων (**Εικόνα 9**). Συγκεκριμένα προσδιορίζουν τον προσανατολισμό, την απόσταση, το άνοιγμα και την τραχύτητα των ασυνεχειών, το βαθμό κερματισμού (RQD) και εμμέσως την υδροπερατότητα μίας βραχομάζας. Συντελούν στην ταξινόμηση των διαφόρων τύπων βραχομάζας σύμφωνα με τη γεωμηχανική ταξινόμηση RMR και το σύστημα SMR και εντοπίζουν τις μετακινήσεις των υλικών των πρανών, συγκρίνοντας τις μετρήσεις του σαρωτή σε διάφορες χρονικές στιγμές. Πλεονέκτημα των σαρωτών Lidar αποτελεί η ικανότητα μέτρησης σε δυσχερείς καιρικές συνθήκες και σε περιοχές έντονης φυτοκαλυψής.



Εικόνα 9: Εικόνα από σύστημα Lidar και οι παρατηρήσεις κατά την έρευνα υπαίθρου. Με κίτρινα βέλη σημειώνονται οι θέσεις παρατήρησης στο ύπαιθρο και με πράσινες γραμμές οι καταγραφόμενες δομές. (Πηγή: www.mdpi.com)

5) Γεωμηχανική παρακολούθηση με τη χρήση οργάνων

Πριν την παρακολούθηση (monitoring), θα πρέπει να γνωρίζουμε την κλίμακα και το φάσμα των μετρήσεων που θα πρέπει να πραγματοποιηθούν. Με τα στοιχεία αυτά μπορούμε να αποφασίσουμε τις θέσεις των μετρήσεων και τα είδη των οργάνων που θα χρειασθούν. Το στάδιο αυτό είναι σημαντικό και δεν πρέπει να γίνονται λάθη έτσι ώστε να διασφαλίζεται η ακρίβεια των μετρήσεων και η ορθή ερμηνεία τους.

- Επιφανειακές μετρήσεις γίνονται με την τοποθέτηση των διαφόρων οργάνων στην επιφάνεια του εδάφους. Τοπογραφικά όργανα όπως η χωροσταθμική ακίδα, ο χωροβάτης και η σταδία μετρούν τις μετακινήσεις που συμβαίνουν κατακόρυφα, δηλαδή μετρούν τις διάφορες ανυψώσεις και καθιζήσεις που συμβαίνουν στα εδάφη, στα κτήρια και στα διάφορα τεχνικά έργα. Στο ίδιο μοτίβο, γίνονται πλέον και τρισδιάστατες μετρήσεις μετακινήσεων με τους στόχους 3D οι οποίοι τοποθετούνται σε υψηλότερα σημεία περιμετρικά του έργου. Με μικρότερη εφαρμογή, οι κινήσεις μεταξύ των βραχωδών τεμαχών στην επιφάνεια προσδιορίζονται και μέσω παχυμέτρων, μετροταινίας, ηλεκτρικών μετατροπέων και εκτασιόμετρα για μεγάλης κλίμακας μετακινήσεις.
- Υπεδάφειες μετρήσεις γίνονται με την τοποθέτηση οργάνων στα στελέχη μίας δειγματοληπτικής γεώτρησης. Τα κλισιόμετρα κυρίως καταγράφουν μετρήσεις από τις οριζόντιες μετακινήσεις στο έδαφος, προσδιορίζουν την ταχύτητα της μετακίνησης των υλικών και εντοπίζουν την ακριβή τοποθεσία των επιφανειών ολίσθησης στο έδαφος. Τα εκτασιόμετρα μετρούν τις κατακόρυφες μετακινήσεις που σημειώνονται με το βάθος.
- Για τη μέτρηση της πιεζομετρικής στάθμης ή της πίεσης που αναπτύσσεται στο υπέδαφος, εξαιτίας της παρουσίας ποσότητας νερού μεταξύ των διαφόρων διακλάσεων και ασυνεχειών, χρησιμοποιούνται τα πιεζόμετρα. Τα πιεζόμετρα τοποθετούνται στην οπή των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων.

2.4.3 Εκτέλεση εργαστηριακών δοκιμών

Μετά την έρευνα πεδίου και τη λήψη αντιπροσωπευτικών δειγμάτων, εκτελούνται ορισμένες εργαστηριακές δοκιμές προκειμένου να προσδιοριστούν οι τιμές των διαφόρων παραμέτρων με βάση των οποίων θα γίνει η λήψη αποφάσεων. Οι κυριότερες δοκιμές και οι παράμετροι, που υπολογίζονται, αναφέρονται στον **Πίνακα 1**. Σημειώνεται ότι οι εργαστηριακές δοκιμές των εδαφικών υλικών εκτελούνται μόνο στην περίπτωση παρουσίας εδαφικού μανδύα, υπερκείμενου του βραχώδους υποβάθρου.

Πίνακας 1: Εργαστηριακές δοκιμές με τις αντίστοιχες παραμέτρους υπολογισμού

Κατηγορία δοκιμών	Δοκιμή	Παράμετρος
Δοκιμές προσδιορισμού των φυσικών ιδιοτήτων εδαφικών υλικών	Προσδιορισμός περιεχόμενης υγρασίας Μέθοδος παραφίνης	Φυσική υγρασία m (%)
	Κοκκομετρική ανάλυση με κόσκινα (χονδρόκοκκα υλικά)	
	Κοκκομετρική ανάλυση με αραιόμετρο (αδρόκοκκα υλικά)	
	Προσδιορισμός ορίων Atterberg	Όριο υδαρότητας LL (%), όριο πλαστικότητας PL (%), δείκτης πλαστικότητας PI (%), δείκτης υδαρότητας L_i (%)
Δοκιμές προσδιορισμού των φυσικών παραμέτρων στα βραχώδη υλικά	Προσδιορισμός υγρασίας πετρώματος	Φυσική υγρασία m (%)
	Προσδιορισμός πορώδους και πυκνότητας	Όγκος πόρων V_u , πορώδες n , ξηρή πυκνότητα P_d , υγρή πυκνότητα P_{sat}
	Προσδιορισμός δείκτη χαλάρωσης	Δείκτης χαλάρωσης I_{d2} (%)
Δοκιμές υπολογισμού της φέρουσας ικανότητας των εδαφών	Δοκιμή Καλιφορνιακού λόγου φέρουσας ικανότητας CBR	Λόγος CBR
Δοκιμή συμπίκνωσης των εδαφών	Πρότυπη μέθοδος Proctor	Περιεχόμενη υγρασία m , ξηρή πυκνότητα γ_d , βέλτιστη υγρασία m_{opt}
Δοκιμή συμπιεστότητας	Δοκιμή μονοδιάστατης στερεοποίησης (οιδημετρο)	Συντελεστής στερεοποίησης C_v , δείκτης συμπιεστότητας C_c , τάση προστερεοποίησης P_c , συντελεστής συμπιεστότητας a_v , συντελεστής συμπιεστότητας σε όγκο m_v
Δοκιμές προσδιορισμού της διατμητικής αντοχής σε συνεκτικά και μη εδάφη	Δοκιμή άμεσης διάτμησης	Συνοχή c , γωνία εσωτερικής τριβής ϕ
	Μέθοδος τριαξονικής θλίψης	Παράμετροι αντοχής: Γωνία τριβής ϕ , συνοχή c (Μέτρο ελαστικότητας E , Λόγος Poisson ν)
Δοκιμή προσδιορισμού των παραμέτρων διατμητικής αντοχής σε βραχ. δείγματα	Μέθοδος τριαξονικής θλίψης	Παράμετροι αντοχής: Γωνία τριβής ϕ , συνοχή c
Δοκιμή προσδιορισμού της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη	Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης	Αντοχή σ_c , (Μέτρο ελαστικότητας E , λόγος Poisson ν)
Δοκιμή προσδιορισμού της μέγιστης και παραμένουσας διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών σε ένα βραχώδες δείγμα	Δοκιμή διάτμησης ασυνέχειας βράχου	Γωνία τριβής φυσικής ασυνέχειας ϕ , βασική γωνία τριβής τεχνητής ασυνέχειας ϕ_b
Δοκιμή σημειακής φόρτισης	Προσδιορισμός αντοχής σε σημειακή φόρτιση (Point load test)	Δείκτης σημειακής φόρτισης I_s , μονοαξονική αντοχή σ_c
Δοκιμή προσδιορισμού της σκληρότητας	Προσδιορισμός σκληρότητας με τη σφύρα Schmidt	Μονοαξονική αντοχή σ_c

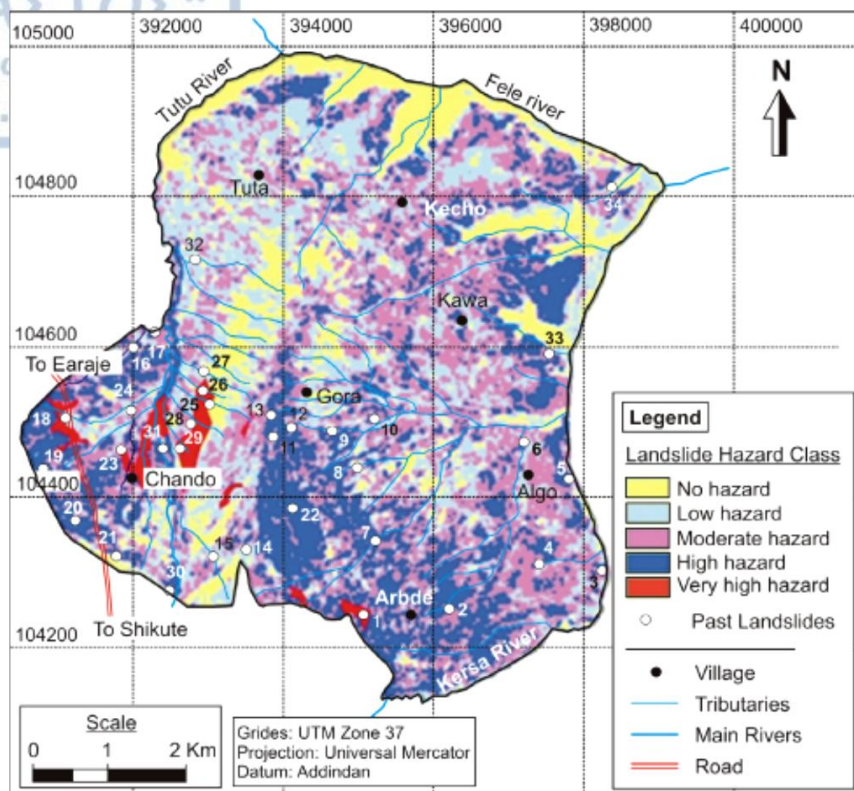
2.4.4 Χάρτες μαζικών μετακινήσεων

Η σύνταξη χαρτών μαζικών μετακινήσεων αποσκοπεί στο να εξασφαλίσει τις χρήσεις γης σε μία περιοχή, να εμποδίσει μελλοντικές μετακινήσεις και να αποτελέσει υπόβαθρο για τις λεπτομερείς μελέτες που σχετίζονται με το σχεδιασμό και την κατασκευή ενός τεχνικού έργου. Οι χάρτες, που αφορούν την πιθανότητα εκδήλωσης ενός κατολισθητικού φαινομένου, διακρίνονται σε 2 κατηγορίες: τους χάρτες κινδύνου (hazard maps) και τους χάρτες διακινδύνευσης (risk maps). Οι χάρτες κινδύνου αποτελούν μεσαίας κλίμακας χάρτες (π.χ. 1:25.000) ενώ οι χάρτες διακινδύνευσης μεγάλης κλίμακας χάρτες.

Οι χάρτες κινδύνου δείχνουν την πιθανότητα ή δυνατότητα εκδήλωσης κατολίσθησης σε μία συγκεκριμένη περιοχή και διακρίνουν τα διάφορα τμήματα αυτής σε τάξεις ανάλογα με την πιθανότητα επανεκδήλωσης του φαινομένου. Η χρονική πρόβλεψη της εκδήλωσης κατολίσθησης καθορίζεται από τις συνθήκες βροχόπτωσης και τις μετρήσεις των πιέσεων των πόρων και των μετακινήσεων του 4:

Οι χάρτες διακινδύνευσης δείχνουν την πιθανότητα πραγματοποίησης κατολίσθησης ή και το πιθανό εύρος καταστροφών στις ήδη υπάρχουσες δομές (**Σχήμα 2.4**). Για τη δημιουργία των χαρτών διακινδύνευσης πρέπει να γίνει εκτίμηση του κινδύνου κατολίσθησης για ένα συγκεκριμένο μέγεθος, χρονικό διάστημα και ένταση, του μεγέθους ζημιών στον κοινωνικό, οικοδομικό, οικονομικό και περιβαλλοντικό τομέα και του πιθανού κόστους αποκατάστασης των καταστροφών.

Ως παράδειγμα της χρησιμότητας των χαρτών αυτών αναφέρεται εδώ η περίπτωση της περιφέρειας Jeldu στην Κεντρική Αιθιοπία, όπου πραγματοποιήθηκε μελέτη όσον αφορά την εκτίμηση και τη "ζωνοποίηση" της περιοχής έρευνας με βάση την πιθανότητα εκδήλωσης κατολισθητικού φαινομένου (**Σχήμα 2.4**). Για τη μελέτη προσδιορίστηκαν στατιστικά οι διάφορες παράμετροι έτσι ώστε να γίνει συσχέτιση μεταξύ αυτών και των παρελθοντικών κατολισθήσεων. Ο τελικός χάρτης κρίθηκε αποτελεσματικά και χρήσιμος καθώς τα αποτελέσματα είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν για την καλύτερη αξιοποίηση και εκμετάλλευση της περιοχής (από το άρθρο: GIS based landslide hazard evaluation and zonation– A case from Jeldu District, Central Ethiopia, 2016).



Σχήμα 2.4: Χάρτης διακινδύνευσης για τη μελέτη της περιφέρειας Jeldu στην Κεντρική Αιθιοπία. (Πηγή: www.sciencedirect.com)

2.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ

Με τις μεθόδους ανάλυσης της ευστάθειας των πρανών προσδιορίζονται οι κύριοι μηχανισμοί και οι αρχές με βάση τις οποίες μπορεί να εκδηλωθεί αστοχία στο πρανές. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατό να οριστούν οι κατάλληλες λύσεις ώστε το πρανές να διατηρείται σε κατάσταση ισορροπίας. Για την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου ανάλυσης της ευστάθειας πρέπει να ληφθούν υπόψη:

- Τα γεωλογικά και τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά των υλικών.
- Τα διαθέσιμα γεωλογικά, τεχνικογεωλογικά, υδρογεωλογικά, σεισμικά κτλ στοιχεία που αφορούν την ευρύτερη και στενή περιοχή μελέτης.
- Το αντικείμενο μελέτης.

Για να επιτευχθεί σωστός σχεδιασμός, η ανάλυση ευστάθειας των πρανών θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη:

- Αντιπροσωπευτικές σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων των γεωλογικών υλικών του πρανούς.
- Μεταβολές στην πίεση των πόρων.
- Ανισοτροπία και ανομοιογένεια των γεωλογικών υλικών.
- Επίδραση αρχικών τάσεων
- Συνέπειες και επιφορτίσεις εξαιτίας των διάφορων κατασκευών.

2.6 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΠΡΑΝΩΝ

Οι μηχανισμοί αστοχίας στα βραχώδη πρανή εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την παρουσία και τις ιδιότητες των ασυνεχειών της βραχώμαζας καθώς από την υφή της σε σχέση με το μέγεθος εκσκαφής. Διακρίνουμε δύο ξεχωριστές περιπτώσεις με βάση το μέγεθος των τεμαχίων. Στην 1^η περίπτωση, θεωρούμε ότι το μέγεθος των τεμαχίων είναι της ίδιας τάξης με το μέγεθος της εκσκαφής και λίγες ασυνέχειες επηρεάζουν τη συμπεριφορά της βραχώμαζας, οπότε και ελέγχουμε την πιθανότητα να ολισθήσουν μεμονωμένα τεμάχια. Στην 2^η περίπτωση, θεωρούμε ότι τα τεμάχια είναι πολύ μικρά σε σύγκριση με την εκσκαφή, οπότε και η βραχώμαζα θα συμπεριφερθεί ισότροπα. Οι μηχανισμοί αστοχίας ερμηνεύονται με τη μέθοδο της οριακής ισορροπίας (Hoek and Bray, 1977).

Προκειμένου να αποφευχθούν πιθανές εκδηλώσεις αστοχιών σε ένα πρανές, είναι σημαντικό να αναγνωρίζουμε τους μηχανισμούς που είναι δυνατό να δώσουν αστοχίες σε αυτό. Στο στάδιο της υπαίθριας έρευνας, θα πρέπει να αποτυπώνονται τα στοιχεία προσανατολισμού (γωνία κλίσης, διεύθυνση κλίσης) των ασυνεχειών καθώς και του επιπέδου της επιφάνειας του πρανούς. Στη συνέχεια, οι πόλοι των επιφανειών των ασυνεχειών προβάλλονται σε διαγράμματα στερεογραφικής προβολής (στερεοδιάγραμμα Schmidt) και με στατιστική επεξεργασία προσδιορίζονται οι προσανατολισμοί που δείχνουν τη συγκέντρωση των περισσότερων ασυνεχειών. Με τον τρόπο αυτό οι ασυνέχειες διακρίνονται σε οικογένειες και προβάλλονται στο διάγραμμα οι μέγιστοι κύκλοι και οι πόλοι του κοινού προσανατολισμού κάθε οικογένειας. Ο μηχανικός μπορεί να αξιοποιήσει τα στοιχεία αυτά ώστε να καταλάβει τους πιθανούς μηχανισμούς αστοχίας σε ένα πρανές. Κάθε μηχανισμός αστοχίας στα βραχώδη πρανή έχει αντίστοιχα και μία συγκεκριμένη μορφή στο διάγραμμα στερεογραφικής προβολής.

Η αναγνώριση των πιθανών μηχανισμών αστοχίας σε ένα βραχώδες πρανές με την παραπάνω διαδικασία, δεν συμπεριλαμβάνει τις δυνάμεις που ωθούν το πρανές να αστοχήσει. Η μελέτη της δυνατότητας κίνησης και εμφάνισης ενός συγκεκριμένου μηχανισμού αστοχίας ορίζεται ως κινηματική ανάλυση (Hudson & Harrison, 2007) και αποτελεί μία αρχική εκτίμηση της συμπεριφοράς του πρανούς. Η γεωμετρία του πρανούς και ο προσανατολισμός των ασυνεχειών δείχνουν αν μία αστοχία είναι κινηματικά εφικτή.

Ως βασικοί μηχανισμοί αστοχίας στα βραχώδη πρανή ορίζονται οι εξής:

- **Κυκλική αστοχία- Ολίσθηση σε καμπύλη επιφάνεια:**

Τον τύπο αυτό τον συναντάμε σε βραχώμαζες πτωχής ποιότητας, έντονα διαρρηγμένες, αποσπασμένες, με πτωχό αλληλοκλείδωμα των τεμαχίων και χαμηλής αντοχής υλικά (**Εικόνα 10**). Η γεωμετρία της επιφάνειας αστοχίας εξαρτάται από τη γεωμετρία του πρανούς και την αντοχή της βραχώμαζας.

Η πιθανότητα, να εκδηλωθεί στο πρανές σε μία ορισμένη χρονική στιγμή κυκλική αστοχία, ερμηνεύεται μέσω της κινηματικής ανάλυσης. Ασυνεχής διασπορά των πόλων των διάφορων ασυνεχειών στο στερεοδιάγραμμα Schmidt υποδηλώνει την

πιθανότητα ολίσθησης ενός τμήματος ή του συνόλου του πρανούς κατά μήκος μίας μη καθορισμένης επιφάνειας.



Εικόνα 10: Περιστροφική ολίσθηση στην περιοχή Aldbrough στο Ηνωμένο Βασίλειο. (Πηγή: www.bgs.ac.uk)

- **Επίπεδη αστοχία- Ολίσθηση τεμάχους σε επίπεδη επιφάνεια:**

Εμφανίζεται όταν επικρατεί σύστημα ασυνεχειών (π.χ. στρώση πετρώματος) το οποίο έχει σχεδόν παράλληλη διεύθυνση με αυτή του πρανούς και κλίση ομόρροπη και μικρότερη της κλίσης του πρανούς. Η γεωμετρία της επιφάνειας αστοχίας καθορίζεται από τις ασυνέχειες του πρανού (**Εικόνα 11**).

Οι επίπεδες ολισθήσεις προϋποθέτουν (Hoek and Bray, 1981):

- α) την ύπαρξη ενός συστήματος ασυνεχειών με παράλληλη διεύθυνση και ίδια φορά με αυτή του πρανούς με μέγιστη απόκλιση διεύθυνσης 20° ,
- β) οι ασυνέχειες, που ορίζουν την επιφάνεια ολίσθησης, να διακρίνονται από υψηλή συνέχεια,
- γ) η γωνία του πρανούς ϕ_π να είναι μεγαλύτερη από τη γωνία της ασυνέχειας ϕ_α και η γωνία τριβής της ασυνέχειας ϕ να είναι μικρότερη και από τις δύο αυτές γωνίες, δηλαδή να ισχύει:

$$\phi_\pi > \phi_\alpha > \phi \text{ (Δοκιμή Markland)}$$



Εικόνα 11: Επίπεδη ολίσθηση στα Καρπάθια Όρη. (Πηγή: www.ngdc.noaa.gov)

- **Σφηνοειδής αστοχία- Ολίσθηση σφήνας σε δύο τεμνόμενες ασυνέχειες:**

Η αστοχία αυτή εκδηλώνεται, όταν η κλίση της ευθείας τομής των επιπέδων των δύο τεμνόμενων ασυνεχειών είναι ομόρροπη και μικρότερη από την κλίση του πρανούς (**Εικόνα 12**). Η γεωμετρία της επιφάνειας αστοχίας ορίζεται σε συνάρτηση με τις ασυνέχειες που εμφανίζονται στο πρανές.

Οι σφηνοειδείς ολισθήσεις εκδηλώνονται στο μέτωπο ενός πρανούς μόνο όταν (Hoek and Bray, 1981):

α) Η γωνία του πρανούς ϕ_{π} είναι μεγαλύτερη από τη γωνία της ακμής του διέδρου ϕ_{τ} , το οποίο σχηματίζεται από τα δύο αλληλοτεμνόμενα συστήματα ασυνεχειών και είναι και οι δύο μεγαλύτερες από τη γωνία τριβής της ασυνέχειας ϕ :

$$\phi_{\pi} > \phi_{\tau} > \phi \text{ (Δοκιμή Markland)}$$

β) Τα δύο αλληλοτεμνόμενα συστήματα ασυνεχειών έχουν συνέχεια στο χώρο.



Εικόνα 12: Σφηνοειδής ολίσθηση. (Πηγή: www.geo.uzh.ch)

- **Αστοχία ανατροπής- Ανατροπή παρακατακόρυφων δομών:**

Τη συναντάμε όταν η κλίση ασυνεχειών των στρωμάτων είναι μεγάλη και αντίρροπη προς την κλίση της επιφάνειας του πρανούς (**Εικόνα 13**). Η γεωμετρία της επιφάνειας αστοχίας σχετίζεται με τις ασυνέχειες που συναντώνται στην επιφάνεια του πρανούς.

Οι ολισθήσεις από ανατροπή εκδηλώνονται με την προϋπόθεση (Goodman, 1989):

α) Το επίπεδο ολίσθησης έχει παράλληλη διεύθυνση με αυτή του επιπέδου του πρανούς με μέγιστη διαφορά κλίσης 20° και φορά αντίρροπη με τη φορά του πρανούς.

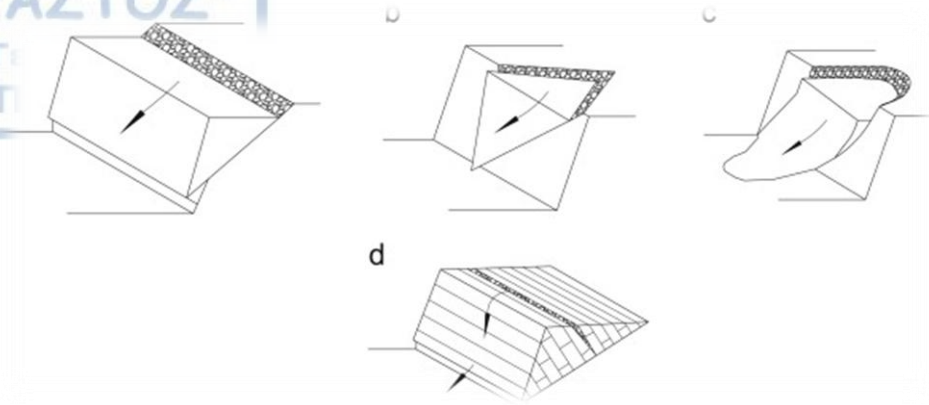
β) Η κλίση του επιπέδου ολίσθησης είναι μεγαλύτερη των 70° .



Εικόνα 13:Ολίσθηση από ανατροπή στο Jasper National Park, Καναδάς. (Πηγή: www.en.wikipedia.org)

2.6.1 Ανάλυση ευστάθειας σε βραχώδη πρανή

Η προσέγγιση της ευστάθειας στα βραχώδη πρανή διαφέρει σε σχέση με αυτή στα εδαφικά πρανή. Ο λόγος είναι η παρουσία ασυνεχειών στη βραχώδη, των επιπέδων δηλαδή που παρουσιάζουν αδυναμία και εκδηλώνουν αστοχίες. Ο γεωλογικός παράγοντας εδώ έχει κυρίαρχο ρόλο καθώς επιμέρους παράμετροι μηχανικής περιγραφής των ασυνεχειών πρέπει να υπολογίζονται προκειμένου να οριστεί ένα αξιόπιστο μοντέλο δομής της βραχώδους. Ανάλογα με αυτό και τις επί τόπου συνθήκες στο πρανές εκτιμώνται οι πιθανές αστοχίες (**Σχήμα 2.5**). Γίνεται ανάλυση της ευστάθειας με τη μέθοδο οριακής ισορροπίας σε συγκεκριμένες επιφάνειες ολίσθησης, χρησιμοποιώντας τις αντίστοιχες παραμέτρους διατμητικής αντοχής.



Σχήμα 2.5: Μηχανισμοί αστοχίας σε βραχώδη πρανή (a: Επίπεδη ολίσθηση, b: Σφηνοειδής ολίσθηση, c: Περιστροφική ολίσθηση, d: Ολίσθηση από ανατροπή, τα βέλη δείχνουν την κίνηση προς τα κατάντη). (Πηγή: www.ars.els-cdn.com)

2.6.2 Μέθοδοι ανάλυσης ευστάθειας βραχωδών πρανών

Οι κύριες μέθοδοι ανάλυσης ευστάθειας των πρανών είναι οι εξής:

- 1) Μέθοδος ανάστροφης ανάλυσης (Back analysis)
- 2) Ανάλυση οριακής ισορροπίας (Limit equilibrium analysis)
- 3) Ανάλυση παραμόρφωσης (Deformation analysis)
- 4) Πιθανολογικές μέθοδοι (Probabilistic methods)

1) Μέθοδος αντίστροφης ανάλυσης (Back analysis)

Η μέθοδος της αντίστροφης ανάλυσης χρησιμοποιείται αφού η βραχώμαζα αστοχήσει, ώστε να είναι γνωστά ο μηχανισμός, το μοντέλο και η γεωμετρία της αστάθειας. Είναι κατάλληλη για την τεχνικογεωλογική ταξινόμηση των υλικών του πρανούς. Υπολογίζονται οι τιμές της συνοχής c και της γωνία τριβής ϕ του πρανούς, οι οποίες πληρούν τις συνθήκες ισορροπίας του με αποδεκτό συντελεστή ασφάλειας. Απαραίτητη είναι η γνώση της γεωμετρίας και των συστατικών του πρανούς, οι πιθανοί μηχανισμοί αστοχίας, οι παράγοντες που τους προκαλούν κτλ.

2) Ανάλυση οριακής ισορροπίας (Limit equilibrium analysis)

Οι αναλύσεις οριακής ισορροπίας βασίζονται στην εξέταση της σχέσης μεταξύ των δυνάμεων που ωθούν το πρανές να ολισθήσει κατά μήκος μίας συγκεκριμένης επιφάνειας (δυνάμεις ανατροπής) και των δυνάμεων που αντιστέκονται στην ολίσθηση (δυνάμεις αντίστασης). Καθορίζονται από τους πιθανούς μηχανισμούς αστοχίας, το κριτήριο θραύσης Mohr-Coulomb και τον υπολογισμό του συντελεστή ασφάλειας.

Ως συντελεστής ασφάλειας ορίζεται ο λόγος των δυνάμεων που αντιστέκονται στην ολίσθηση προς τις δυνάμεις που τείνουν να προκαλέσουν ολίσθηση.

$$F = \frac{\text{Δυνάμεις αντίστασης}}{\text{Δυνάμεις ανατροπής}}$$

Ο λόγος αυτός πρέπει αν είναι ίσος με μία ορισμένη ελάχιστη τιμή. Το πρανές βρίσκεται σε κατάσταση επικείμενης αστοχίας ή σε οριακή κατάσταση ευστάθειας

όταν $F=1$. Ο αποδεκτός συντελεστής ασφάλειας είναι μεγαλύτερος της μονάδας και συγκεκριμένα εκτιμάται να είναι της τάξεως 1.4-1.5.

Όλες οι μέθοδοι που συμμετέχουν στην ανάλυση δέχονται ένα συγκεκριμένο τύπο αστοχίας, ο οποίος συνήθως καθορίζεται από το σχήμα της επιφάνειας ολίσθησης. Ακόμη, η ανάλυση οριακής ισορροπίας δέχεται τη γενικότερη θεώρηση της πλαστικής ισορροπίας. Για λόγους απλοποίησης των διάφορων υπολογισμών, οι μέθοδοι ανάλυσης της ευστάθειας συμφωνούν με ορισμένες παραδοχές που αφορούν τις συνθήκες στατικής ισορροπίας.

Οι μέθοδοι ανάλυσης οριακής ισορροπίας ταξινομούνται στις:

- α) Στις μεθόδους που μελετούν πιθανή ολίσθηση του συνόλου του πρανούς (κυκλοειδής ολίσθηση), όπου λαμβάνονται υπόψη οι παράμετροι της βραχύμαζας.
- β) Στις μεθόδους που μελετούν πιθανή ολίσθηση σε προδιαγεγραμμένη επιφάνεια ασυνέχειας, όπου λαμβάνονται υπόψη οι παράμετροι αντοχής των ασυνεχειών.

Επίπεδη ολίσθηση:

Ο συντελεστής ασφάλειας υπολογίζεται σύμφωνα με τις δυνάμεις που επιδρούν πάνω στην επιφάνεια ολίσθησης ως εξής:

$$F = \frac{cA + (W \cos \alpha - U) \tan \varphi}{W \sin \alpha} \quad \text{όπου:}$$

cA = Δύναμη που οφείλεται στη συνοχή επάνω στην επιφάνεια ολίσθησης

$(W \cos \alpha - U) \tan \varphi$ = Τριβή του τεμάχους επάνω στην επιφάνεια ολίσθησης

$W \cos \alpha$ = Συνιστώσα του βάρους της ολισθαίνουσας μάζας

U = Άνωση λόγω υδροστατικής πίεσης στην επιφάνεια ολίσθησης

$W \sin \alpha$ = Συνιστώσα του βάρους της ολισθαίνουσας μάζας παράλληλη στην επιφάνεια ολίσθησης

φ = Γωνία τριβής (°)

α = Κλίση πρανούς (°)

Αν υπάρχει εφελκυστική ρωγμή στο πρανές που είναι πληρωμένη με νερό τότε ισχύει:

$$F = \frac{cA + (W \cos \alpha - U - V \sin \alpha) \tan \varphi}{W \sin \alpha + V \cos \alpha} \quad \text{όπου:}$$

V = δύναμη λόγω υδροστατικής πίεσης νερού στην επιφάνεια ολίσθησης

Οι δυνάμεις που οφείλονται στην υδροστατική πίεση υπολογίζονται επίσης από τις εξισώσεις:

$$U = \frac{1}{2} \gamma_w z_w A \quad \text{και} \quad V = \frac{1}{2} \gamma_w z_w^2 \quad \text{όπου:}$$

A = μήκος της επιφάνειας ολίσθησης (m), γ_w = φαινόμενο βάρος νερού ($\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$), z_w = άνοδος της στάθμης του υπόγειου νερού πάνω από το επίπεδο ολίσθησης.

Σφηνοειδής ολίσθηση:

Ο συντελεστής ασφάλειας υπολογίζεται με την εξίσωση:

$$F = [(R_A + R_B)] \tan \phi \frac{1}{W \sin \alpha} \quad \text{όπου:}$$

α = Γωνία τομής των δύο συστημάτων ασυνεχειών, R_A = Δύναμη οριζόντια προς την τομή των 2 συστημάτων ασυνεχειών και R_B = Δύναμη κάθετη προς την τομή των 2 συστημάτων ασυνεχειών.

$$R_A \sin (\beta - \frac{1}{2} \xi) = R_B \sin (\beta + \frac{1}{2} \xi)$$

$$R_A \cos (\beta - \frac{1}{2} \xi) - R_B \cos (\beta + \frac{1}{2} \xi) = W \cos \alpha$$

$$R_A + R_B = \frac{W \cos \alpha \sin \beta}{\sin \frac{1}{2} \xi}$$

και προκύπτει $F = \frac{\sin \beta \tan \phi}{\sin \frac{1}{2} \xi \tan \alpha}$ (Hoek and Bray, 1981)

στην περίπτωση όπου οι συνθήκες είναι στεγνές και ισχύει $c=0$ τότε:

$$F = A \tan \phi_A + B \tan \phi_B$$

όπου: ϕ_A, ϕ_B = γωνίες τριβής των 2 συστημάτων ασυνεχειών (Hoek and Bray, 1981)

Ολίσθηση από ανατροπή:

Η ολίσθηση από ανατροπή εξαρτάται από το ύψος (h), το πλάτος (t) και τη γωνία του πρανού (θ). Υπάρχουν 4 περιπτώσεις:

- 1) $\theta < 0$ και $\frac{t}{h} > \tan \theta$: Το μελετούμενο τέμαχος παραμένει σταθερό.
- 2) $\theta > 0$ και $\frac{t}{h} > \tan \theta$: Το μελετούμενο τέμαχος θα ολισθήσει αλλά δεν θα ανατραπεί.
- 3) $\theta < 0$ και $\frac{t}{h} < \tan \theta$: Το υπό μελέτη τέμαχος θα ανατραπεί αλλά δεν θα ολισθήσει.
- 4) $\theta > 0$ και $\frac{t}{h} < \tan \theta$: Το τέμαχος μπορεί ταυτόχρονα να ολισθήσει και να ανατραπεί.

Ο συντελεστής ασφάλειας σε αυτή την περίπτωση υπολογίζεται ως εξής:

$$F = \frac{t/h}{\tan \theta}$$

Κυκλοειδής ολίσθηση:

Για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφάλειας χρησιμοποιείται κυρίως η απλοποιημένη μέθοδος των λωρίδων του Bishop (1955). Στη μέθοδο αυτή η συνολική κυκλοειδής ολίσθηση διαιρείται σε μικρότερες λωρίδες με κατακόρυφες πλευρές, έτσι ώστε να εκτιμούνται οι διάφορες παράμετροι για κάθε μία από τις λωρίδες αυτές:

$$F = \frac{\sum [cA \cos \alpha + (W - U \cos \alpha) \tan \phi] [1/Mi(a)]}{\sum W \sin \alpha} \quad \text{όπου:}$$

$$Mi(a) = \cos \alpha \left(1 + \frac{\tan \phi \tan \alpha}{F} \right)$$

Η απλοποιημένη μέθοδος του Bishop στηρίζεται στην παραδοχή ότι οι πλευρικές δυνάμεις X_1 και X_2 σε μία λωρίδα είναι ίσες και αντίθετες, επομένως $\Delta X = 0$.

3) Ανάλυση παραμόρφωσης (Deformation analysis)

Οι αναλύσεις παραμόρφωσης ανήκουν στις μεθόδους ανάλυσης της παραμόρφωσης-μετακίνησης και χρησιμοποιούν συνήθως τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Για τη συγκεκριμένη μέθοδο απαιτείται καλή γνώση της σχέσης τάσεων-παραμορφώσεων των εδαφών αλλά και των διατμητικών αντοχών τους. Αν και οι αναλύσεις αυτές προσδιορίζουν την κατανομή των τάσεων στο πρηνές και τις τυχόν μετακινήσεις σε αυτό, δεν δύνανται να μετρήσουν απευθείας την ευστάθεια, όπως συμβαίνει στις αναλύσεις οριακής ισορροπίας. Δεν έχουν ευρεία εφαρμογή καθώς σαν μέθοδοι είναι δυσκολότερες και πιο χρονοβόρες από τις άλλες μεθόδους ανάλυσης ευστάθειας.

4) Πιθανολογικές μέθοδοι (Probabilistic methods)

Με την πιθανολογική μέθοδο εξετάζεται η πιθανότητα να αστοχήσει το πρηνές κάτω από γνωστές συνθήκες. Αναλυτικότερα, εξετάζονται όλες οι επί μέρους περιπτώσεις κατανομής και επικράτησης των διαφόρων παραγόντων που συμμετέχουν στην ευστάθεια του πρηνούς, με αντίστοιχες ανά περίπτωση τυχαίες τιμές. Η δυσκολία της μεθόδου έγκειται στο μεγάλο όγκο πληροφοριών που απαιτούνται προκειμένου να αναλυθούν όλες οι δυνατές περιπτώσεις.

2.7 ΜΕΤΡΑ ΑΝΤΙΣΤΗΡΙΞΗΣ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΠΡΑΝΩΝ

Τα μέτρα προστασίας που τοποθετούνται σε πρηνή βραχωδών υλικών διακρίνονται σε 3 κατηγορίες (Πίνακας 2):

- 1) **Παθητικά μέτρα:** Χρησιμοποιούνται για την αποφυγή πτώσης και μετακίνησης τεμαχίων της βραχώμαζας. Αποτελούν την οικονομικότερη λύση στο πρόβλημα της αστάθειας των πρανών.
- 2) **Ενεργητικά μέτρα :** Αποτελούν τα πιο δραστικά μέτρα αντιστήριξης. Έχουν τη δυνατότητα να μειώνουν τις δυνάμεις που προκαλούν ολίσθηση και να αυξάνουν αντίστοιχα τις δυνάμεις που αντιστέκονται σε αυτήν, όποτε αυτό είναι απαραίτητο.
- 3) **Μέτρα βελτίωσης ποιότητας βραχώμαζας**

Πίνακας 2: Κατηγορίες μέτρων προστασίας στα βραχώδη πρανή.

Παθητικά μέτρα	Αφαίρεση επικίνδυνων τεμαχών
	Τάφροι αναχαίτισης
	Πλέγματα συγκράτησης
	Φράκτες συγκράτησης
	Φράκτες προειδοποίησης
	Παθητικά αγκύρια
	Τοποθέτηση γεωφασμάτων
Ενεργητικά μέτρα	Μεταβολή γεωμετρίας πρανούς (γωνία, κλίση πρανούς)
	Προεντεταμένα αγκύρια
	Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα
	Αποστραγγιστικές οπές
	Τοίχοι αντιστήριξης από οπλισμένο σκυρόδεμα
Μέτρα βελτίωσης της ποιότητας	Τσιμεντενέσεις κατά μήκος των ασυνεχειών
	Αποστραγγιστικά μέτρα

Για να είναι σωστή η επιλογή των διαφόρων μέτρων προστασίας, θα πρέπει προηγουμένως να είναι γνωστά η κλίμακα-βαθμός αστάθειας στο πρανές, πόσο επείγουσα είναι η ανάγκη τοποθέτησης τους, οι διαθέσιμοι χρηματικοί και υλικοί πόροι του έργου.

2.7.1 Προληπτικά μέτρα βραχωδών πρανών

Σύμφωνα με τους Κούκη και Σαμπατακάκη (2007) ως **προληπτικά μέτρα** ορίζονται τα μέτρα που λαμβάνονται με σκοπό την πρόληψη, την αποκατάσταση ή σταθεροποίηση μίας μετακίνησης. Ο σχεδιασμός τους προκύπτει ύστερα από εκτιμήσεις διαφόρων χαρακτηριστικών μίας κατάπτωσης (σε περιοχές επιρρεπείς σε τέτοιου είδους κατολισθήσεις) και της γεωμετρίας του πρανούς. Τα μέτρα προστασίας θα πρέπει να αποκαθίστανται κατά περιόδους καθώς η πτώση των τεμαχών προκαλεί αλλαγές στη δομή ενός πρανούς.

- Σχεδιασμός αναβαθμών για την αποφυγή σοβαρών ζημιών από τα αστοχούμενα τεμάχια του πρανούς. Ο σχεδιασμός τους επιτυγχάνεται με προσομοίωση καταπτώσεων βράχων.
- Τοποθέτηση φραγμών ώστε να συγκρατούνται τα τεμάχια που αποσπώνται από το πρανές. Η θέση τους επιλέγεται ανάλογα με το ύψος των αντίστοιχων τεμαχών.
- Εκσκαφή τάφρων προκειμένου η πτώση των τεμαχών να γίνεται σε ασφαλείς ζώνες, χωρίς να προκαλούνται περαιτέρω ζημιές.

Τάφροι αναχαίτισης: Αποτελούν χώρους συγκέντρωσης των αποσπόμενων τεμαχών και διασφαλίζουν την αποφυγή περαιτέρω ζημιών στο οδικό δίκτυο.

Κατασκευάζονται στη βάση του πρανούς και διαστρώνονται με κοκκώδες υλικό έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η απορρόφηση της ενέργειας των τεμαχών που αστοχούν. Οι διαστάσεις τους εξαρτώνται από τη γεωμετρία του πρανούς.

Πλέγματα συγκράτησης: Τοποθετούνται στο μέτωπο του πρανούς για να συγκρατήσουν τα τεμάχια στη θέση τους έτσι ώστε να μην αστοχήσουν (**Εικόνα 14**). Ανάλογα με το προβλεπόμενο μέγεθος καταπτώσεων που έχει εκτιμηθεί, επιλέγεται ο κατάλληλος τύπος πλέγματος.



Εικόνα 14: Μεταλλικά πλέγματα συγκράτησης των ασθενών βραχωδών τεμαχών. (Πηγή: www.asate.gr)

Τοίχοι αναχαίτισης: Οι τοίχοι αναχαίτισης από σκυρόδεμα συγκρατούν τεμάχια που πρόκειται να πέσουν. Κατασκευάζονται στα άκρα των τάφρων αναχαίτισης με ύψος 1.50-2.00 μέτρα. Όταν ένα πρανές χαρακτηρίζεται ως υψηλό, η κατασκευή του τοίχου αναχαίτισης συνοδεύεται από την τοποθέτηση ενός φράκτη συγκράτησης.

Φράκτες συγκράτησης: Οι φράκτες συγκράτησης είναι ενισχυμένες μεταλλικές κατασκευές που στοχεύουν στην συγκράτηση καταπτώσεων χωρίς να υπάρχει ο κίνδυνος καταστροφής του οδικού δικτύου. Τοποθετούνται στη βάση κυρίως απότομων πρανών (**Εικόνα 15**).



Εικόνα 15: Φράκτης συγκράτησης. (Πηγή: www.nemertes.lis.upatras.gr)

Φράκτες προειδοποίησης: Αποτελούν μέτρα προειδοποίησης σε περιοχές υψηλής επικινδυνότητας. Λειτουργούν μόνο όταν συμβαίνει κατάπτωση βράχων καθώς προειδοποιούν με ειδικά σήματα για τον κίνδυνο διέλευσης στην περιοχή.

Τοποθέτηση γεωφασμάτων: Ελέγχουν την επιφανειακή διάβρωση στα πρανή και διευκολύνουν τη φυτική ανάπτυξη, η οποία αντιστέκεται σε τυχόν κατολισθητικά φαινόμενα.

Αφαίρεση τεμαχών: Αποτελεί το πρωταρχικό και οικονομικότερο μέτρο προστασίας που εφαρμόζεται στα βραχώδη πρανή. Τεμάχη σχετικά μικρού μεγέθους, τα οποία κρίνονται επικίνδυνα για την ευστάθεια του πρανούς, αποσπώνται με προσοχή από το μέτωπο του βραχώδους πρανούς.

2.7.2 Μέτρα σταθεροποίησης βραχωδών πρανών

Τροποποίηση της γεωμετρίας του πρανούς: Η μεταβολή της γεωμετρίας του πρανούς γίνεται με 3 τρόπους: μείωση της κλίσης του πρανούς, αφαίρεση ορισμένου βάρους από την κεφαλή, προσθήκη βάρους στο πόδι του πρανούς και διαμόρφωση αναβαθμών.

Η αφαίρεση βάρους (με εκσκαφή) από την κεφαλή ενός πρανούς μειώνει τις δυνάμεις ανατροπής που μπορεί να προκαλέσουν την αστοχία του συνόλου του. Η μέθοδος αυτή δεν είναι δυνατή για όλες τις περιπτώσεις πρανών εξαιτίας της δυσκολίας πρόσβασης στο συγκεκριμένο τμήμα, του μεγάλου όγκου που το συνιστά, την έλλειψη αποθηκευτικού χώρου, προϋπάρχονσα εγκατεστημένα μέτρα ασφαλείας.

Η προσθήκη επιπλέον βάρους στη βάση του πρανούς είναι μέθοδος περισσότερο διαδεδομένη στα εδαφικά πρανή. Στοχεύει στην ευστάθεια του πρανούς μέσω της ισοστάθμισης που επιτυγχάνεται με το επιπλέον βάρος της βάσης. Προσοχή πρέπει να δίνεται στο υλικό που χρησιμοποιείται έτσι ώστε να μην ευνοείται η περαιτέρω αποσάθρωση στο μέτωπο του πρανούς.

Με τη διαμόρφωση αναβαθμών στο μέτωπο του πρανούς επιτυγχάνεται αποτελεσματικά η μείωση της κλίσης του. Η κατασκευή τους "κόβει" πιθανές επιφάνειες ασυνεχειών και αποτρέπει συνολική αστοχία του μετώπου. Η κλίση τους είναι μικρή στο εσωτερικό τους. Στη βάση των επιμέρους πρανών κατασκευάζεται ακόμα τάφρος παροχέτευσης όπου και συγκρατούνται τα αποσπώμενα τεμάχη.

Εκσκαφή πρανών- Αφαίρεση (ξεσκάρωμα) επικίνδυνων τεμαχών: Το συγκεκριμένο μέτρο, όσον αφορά τα βραχώδη τεχνητά πρανή διασφαλίζει να μη συμβεί ολική θραύση του βράχου, επιτρέπει όμως επιφανειακές θραύσεις μεταξύ των οριζόντιων αναβαθμών. Η αφαίρεση τους γίνεται είτε χειρωνακτικά από ειδικούς είτε μέσω χρήσης εκρηκτικής ύλης.

Αποστραγγιστικά μέτρα: Ανήκουν τόσο στα ενεργητικά μέτρα όσο και στα μέτρα βελτίωσης της ποιότητας μίας βραχώμαζας και θεωρούνται ως τα πιο αποτελεσματικά. Με την τοποθέτηση τους αποκλείεται ή ελαττώνεται η παρουσία του νερού και ταυτόχρονα ελαττώνονται οι (υδροστατικές) πιέσεις πόρων που αναπτύσσονται, παράγοντας σημαντικός για την ευστάθεια ενός πρανούς. Διακρίνονται σε 2 κατηγορίες:

1) Επιφανειακά μέτρα αποστράγγισης: Εμποδίζουν τα νερά της επιφανειακής απορροής και βροχόπτωσης να διεισδύσουν μέσα από τις ασυνέχειες στο εσωτερικό του πρανούς. Αποτρέπουν την άνοδο της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα, την αύξηση της πίεσης των πόρων, τον κορεσμό του υλικού πλήρωσης και την επιφανειακή διάβρωση των υλικών.

Οι κατασκευές που συνήθως χρησιμοποιούνται για την επιφανειακή αποστράγγιση των νερών είναι: Τάφροι αποχέτευσης, περιμετρικές τάφροι και εγκάρσια στραγγιστήρια.

Οι τάφροι αποχέτευσης βρίσκονται στη βάση ενός πρανούς και λειτουργούν ως λεκάνες συλλογής και παροχέτευσης του νερού της βροχόπτωσης ή της επιφανειακής απορροής. Προκειμένου να μην κατεισδύσει το νερό, προτείνεται η στεγανοποίηση και επένδυση τους με αδιαπέρατα υλικά. Οι περιμετρικές τάφροι κατασκευάζονται στην κεφαλή και στις πλευρές του πρανούς για να διοχετεύσουν το νερό προς άλλες κατευθύνσεις. Τα εγκάρσια στραγγιστήρια αποτελούν τάφρους μικρού βάθους (μέχρι 2 μέτρα) πληρωμένους με κοκκώδες υλικό φίλτρου. Χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση των νερών που μπορεί να διεισδύουν σε μικρά βάθη.

2) Υπόγεια μέτρα αποστράγγισης: Στοχεύουν στην ελάττωση στάθμης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα και στην απομάκρυνση του νερού από το εσωτερικό των πρανών. Η εφαρμογή τους είναι μεγάλης σημασίας στα βραχώδη πρανή.

Τα κυριότερα έργα υπόγειας αποστράγγισης είναι: αποστραγγιστικές τάφροι, αποστραγγιστικές κουβέρτες, αποστραγγιστικά φρεάτια (**Εικόνα 16**), οριζόντιες ή κατακόρυφες αποστραγγιστικές οπές και αποστραγγιστικές στοές ή σήραγγες.

Οι αποστραγγιστικές τάφροι και κουβέρτες εφαρμόζονται κατά κύριο λόγο στα εδαφικά πρανή για νερά σε μικρό βάθος. Τα αποστραγγιστικά φρεάτια χρησιμοποιούνται σε όλες τις περιπτώσεις και φτάνουν σε βάθη μεγαλύτερα από αυτά των στραγγιστικών τάφρων. Η απομάκρυνση του νερού στο εσωτερικό του πρανούς γίνεται με τη βοήθεια αντλίας ή με τη μεταφορά του σε υποκείμενους διαπερατούς σχηματισμούς. Οι αποστραγγιστικές οπές τοποθετούνται είτε οριζόντια σε σχέση με το μέτωπο του πρανούς είτε κατακόρυφα. Αυξάνουν τη διατμητική αντοχή των υλικών, μειώνοντας την πίεση των πόρων γι' αυτό και αποτελούν ένα από τα πιο αποτελεσματικά μέτρα αποστράγγισης. Τέλος, οι αποστραγγιστικές στοές ή σήραγγες διαθέτουν μεγάλη διάμετρο και κατασκευάζονται για περιπτώσεις μεγάλων κατολισθήσεων, καθώς αποτελούν ακριβά έργα αποστράγγισης.



Εικόνα 16: Αποστραγγιστικό φρεάτιο. (Πηγή: www.commonswikimedia.org)

Αγκυρώσεις: Τα αγκύρια ορίζονται ως οι ασφάλιστοι "τένοντες" που ασκούν εφελκυστική δύναμη στο εσωτερικό της βραχώμαζας, η οποία αντιτίθεται σε δυνάμεις ευνοϊκές προς την κίνηση των τεμαχών. Τα μήκη τους ποικίλλουν από 15 έως 40 μέτρα. Τα αγκύρια παρέχουν δύναμη σε τέτοιο βαθμό ώστε να εξασφαλίζεται ένας ικανοποιητικός συντελεστής ασφαλείας. Ανάλογα με τη διάρκεια ζωής τους διακρίνονται σε προσωρινά και μόνιμα. Όσον αφορά τη λειτουργία και τη χρήση τους διακρίνονται στα ενεργά ή προεντεταμένα και στα παθητικά αγκύρια. Τα ενεργά ή προεντεταμένα αγκύρια σταθεροποιούν τη βραχώμαζα με την τοποθέτησή τους καθώς επιβάλλουν δύναμη συγκράτησης της βραχώμαζας (**Εικόνα 17**). Αντίθετα, τα παθητικά αγκύρια ενεργοποιούνται μόνο κατά την παραμόρφωση. Στα βραχώδη πρανή χρησιμοποιούνται και οι 2 κατηγορίες αγκυρίων.



Εικόνα 17: Προεντεταμένα αγκύρια για την εξασφάλιση της ευστάθειας του πρανούς. (Πηγή: www.ekkaf.happyartists.net)

Στην περίπτωση βραχώμαζας με φτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά κατασκευάζεται δοκός από ενισχυμένο σκυρόδεμα στο μέτωπο του πρανούς. Η δοκός συγκρατεί τις κεφαλές των αγκυρίων με αποτέλεσμα η κατανομή των δυνάμεων προς το έδαφος να γίνεται ομοιόμορφα.

Τοίχοι αντιστήριξης: Κατασκευάζονται στη βάση του πρανούς (**Εικόνα 18**). Ενισχύουν και αντιστέκονται σε κάθε δύναμη που μπορεί να επιφέρει αστοχία στο σύνολο του πρανού. Είναι αποτελεσματικό μέτρο για κάθε περίπτωση αστάθειας. Το υλικό τους αποτελείται κυρίως από οπλισμένο σκυρόδεμα. Όσον αφορά τα βραχώδη πρανή, εκτός από τους τοίχους αντιστήριξης, κατασκευάζονται και τοίχοι επένδυσης. Οι τοίχοι αντιστήριξης είναι δυνατό να φέρουν αποστραγγιστικές οπές και προεντεταμένες αγκυρώσεις έτσι ώστε οι εφελκυστικές τάσεις να κατανέμονται ομοιόμορφα στις χαμηλής ποιότητας βραχομάζες.



Εικόνα 18: Τοιχεία αντιστήριξης με συρματοκιβώτια από λιθορριπή.
(Πηγή: www.startechnical.gr)

Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα: Ενισχύει τη δομή του πρανού και το προστατεύει από την επιφανειακή αποσάθρωση. Εκτοξεύεται από ειδικές αντλίες με μεγάλη ταχύτητα προς το μέτωπο του πρανού (**Εικόνα 19**).



Εικόνα 19: Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. (Πηγή: <http://www.epidomos.gr>)

2.8 ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΑΣΤΟΧΙΩΝ

Για την πρόβλεψη μελλοντικών αστοχιών και την αποφυγή τους, απαραίτητη είναι η γεωμηχανική παρακολούθηση του πρανούς (monitoring)*. Η παρακολούθηση του πρανούς αναφέρεται συγκεκριμένα στις κινήσεις της επιφάνειας του εδάφους, στις κινήσεις που λαμβάνουν μέρος υπογείως, στις πιέσεις των πόρων και στις θέσεις των ασυνεχειών. Είναι απαραίτητη στις περιοχές εκείνες στις οποίες εντοπίστηκαν στοιχεία που υποδηλώνουν ασταθή κατάσταση. Η μέτρηση των επιφανειακών και υπόγειων μετακινήσεων, όταν αυτές υπάρχουν, γίνεται προσδιορίζοντας την ταχύτητα και την κατεύθυνση της κίνησης μίας συγκεκριμένης περιοχής ή του συνόλου του πρανούς.

*Σημείωση: Η πρόβλεψη πιθανών μελλοντικών αστοχιών στο πρανές δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσας εργασίας γι' αυτό γίνεται απλή αναφορά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Όπως αναφέρθηκε ήδη, η θέση όπου λαμβάνει χώρα η εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας βρίσκεται στο παλιό λατομείο του ομίλου ΤΙΤΑΝ στην περιοχή του δήμου Ευκαρπίας, ανατολικά του ανοιχτού δημοτικού θεάτρου.

3.1 ΓΕΩΛΟΓΙΑ-ΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Η πόλη της Θεσσαλονίκης με τους επιμέρους δήμους που εντάσσονται σε αυτή, κατατάσσεται γεωτεκτονικά κυρίως στην Περιοδοπική Ζώνη και κατά ένα μικρότερο μέρος της στη Σερβομακεδονική Μάζα. Η Περιοδοπική ζώνη (Εσωτερικές Ελληνίδες) εμφανίζεται γενικά με πετρώματα που ανήκουν στις ενότητες Άσπρης Βρύσης- Χορτιάτη και Μελισσοχωρίου- Χολομώντα ενώ η Σερβομακεδονική Μάζα (Ελληνική Ενδοχώρα) με την ενότητα Βερτίσκου. Στο σύνολο τους αποτελούν το υπόβαθρο της περιοχής της Θεσσαλονίκης, το οποίο υπόκειται αποθέσεων ηλικίας Νεογενούς και Τεταρτογενούς. Αναλυτικότερα, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης συναντώνται αντίστοιχα, οι εξής γεωλογικοί σχηματισμοί:

Περιοδοπική ζώνη

Αρχικά, σε όλη την Περιοδοπική ζώνη επικρατούν Αλπικοί σχηματισμοί ηλικίας Περμίου, Τριαδικού και Ιουρασικού, χαμηλού βαθμού μεταμόρφωσης (πρασινοσχιστολιθική φάση). Η μέση διεύθυνση διάταξης των επιμέρους σχηματισμών εντοπίζεται ως ΒΔ-ΝΑ.

Ενότητα Άσπρης Βρύσης- Χορτιάτη: Ο κατώτερος ορίζοντας της ενότητας συνίσταται από κάτω προς τα πάνω από σχιστόλιθους και φυλλίτες, πυροκλαστικά και ηφαιστειακά υλικά όπως τα πορφυροειδή, μεταψαμμίτες-χαλαζίτες και τέλος νηρειτικούς ασβεστόλιθους κατά τόπους ανακρυσταλλωμένους. Οι αμέσως υπερκείμενοι σχηματισμοί υπέρκεινται τεκτονικά του κατώτερου ορίζοντα και αποτελούνται από αργιλικούς σχιστόλιθους, φυλλίτες, κερατόλιθους και μάργες με ενδιάμεσες παρεμβολές οφειολιθικών σωμάτων και διάφορων άλλων μεταμορφωμένων που συνιστούν τους γνωστούς σήμερα πράσινους γνευσίους της Θεσσαλονίκης (μαγματική σειρά Χορτιάτη).

Σερβομακεδονική μάζα

Η Σερβομακεδονική μάζα είναι γνωστό ότι αποτελείται κατά κύριο λόγο από κρυσταλλοσχιστώδη και άλλα πυριγενή πετρώματα. Ο χώρος, στον οποίο εμφανίζονται τα πετρώματα της συγκεκριμένης ενότητας, είχε λειτουργήσει κατά καιρούς ως πεδίο τεκτονικών δράσεων μέχρι να αποκτήσει τη σημερινή του υπόσταση. Η παλαιότερη τεκτονική δράση στην περιοχή χρονολογείται ως προ-άνω Παλαιοζωική.

Ενότητα Βερτίσκου: Κυριαρχούν οι γνεύσιοι, οι μαρμαρυγιακοί σχιστόλιθοι και τα μάρμαρα. Στις ανώτερες στρωματογραφικές ενότητες και συγκεκριμένα μέσα στα γνευσιακά πετρώματα, μεταγάββροι, μεταδιαβάσες και αμφιβολίτες συναντώνται ως

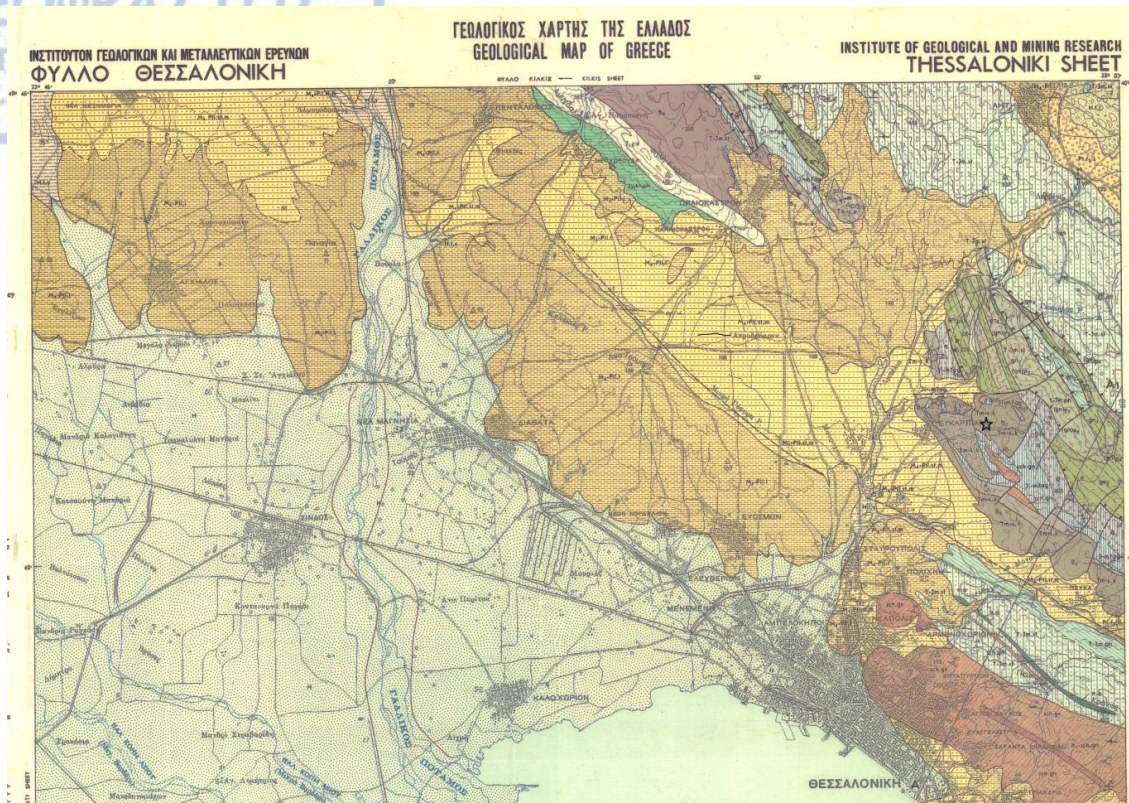
παρεμβολές ή ως φακοειδή σώματα, ενώ δεν αποκλείεται και η εμφάνιση σερπεντινικών σωμάτων.

Καινοζωικές αποθέσεις

Την εποχή του Νεογενούς δημιουργήθηκε τεκτονικό βύθισμα στην περιοχή, κάτω από τη δράση εφελκυστικών τάσεων, το οποίο σήμερα είναι γνωστό ως Λεκάνη της Μυγδονίας. Στο χώρο αυτό αποτέθηκαν μετέπειτα διαδοχικά οι διάφορες ιζηματογενείς αποθέσεις και κάλυψαν το υπόβαθρο της Σερβομακεδονικής και Περιποδοπικής ζώνης. Η ιζηματογένεση ξεκινά το Νεογενές και συνεχίζει στο Τεταρτογενές μέχρι την περίοδο του Ολοκαίνου.

Νεογενές: Η ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης καλύπτεται από τη ψαμμιτομαργαϊκή σειρά αβαθούς ποταμο-λιμναίου περιβάλλοντος και τη σειρά των ερυθρών αργίλων στα ανώτερα στρώματα, προερχόμενη από χερσαίο περιβάλλον οξειδωτικού χαρακτήρα. Τα ιζήματα χρονολογούνται στο Ανώτερο Μειόκαινο - Κατώτερο Πλειόκαινο.

Τεταρτογενές: Κατά το Πλειστόκαινο αποτίθενται αδρόκοκκα και αργιλώδη υλικά, τα οποία συνιστούν το κατώτερο σύστημα αναβαθμίδων και αμέσως υπερκείμενα τους βρίσκονται αδρόκοκκα υλικά μαζί με πηλό ή αμμώδη άργιλο, ως ανώτερο σύστημα αναβαθμίδων. Τα δύο συστήματα κατέχουν σημαντικό πάχος. Την ίδια περίοδο συναντώνται ακόμα τα ριπίδια προσχώσεων με μικρό πάχος. Στην περίοδο του Πλειστοκαίνου ανήκουν χρονικά οι παράκτιες αποθέσεις (άμμος), οι προσχώσεις κοιλάδων (αμμούχες άργιλοι) και ποταμοχειμάρριες αποθέσεις (αμμούχες άργιλοι, άμμος) με μικρό σχετικά πάχος.



Σχήμα 3.1: Τμήμα γεωλογικού χάρτη ΙΓΜΕ (Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών), φύλλο Θεσσαλονίκη. Με αστέρι σημειώνεται η περιοχή μελέτης. Το ανοιχτό καφέ χρώμα αντιπροσωπεύει τον ασβεστόλιθο ηλικίας Μέσου-Ανω Τριαδικού της ενότητας Ασπρης Βρύσης-Χορτιάτη (Περιοδοπική ζώνη). (Πηγή: www.emichanikos.gr)

3.2 ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ - ΝΕΟΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Το τεκτονικό παρελθόν για τις 2 γεωτεκτονικές ζώνες ξεκινά ακόμα από την προ-Αλπική περίοδο και συγκεκριμένα από την Ερκύνια ορογενετική (300Ma). Κατά την πρώτη ορογενετική περίοδο, σημειώνονται στο υπόβαθρο της Σερβομακεδονικής μάζας ισοκλινείς πτυχές με διεύθυνση των αξόνων τους προς Βορρά και σχηματίζεται η πρώτη σχιστότητα S_1 των μιγματιτών. Η δεύτερη φάση πτυχώσεων πραγματοποιήθηκε για τη Σερβομακεδονική μάζα (πρώτη για την Περιοδοπική ζώνη) κατά τη δεύτερη ορογενετική περίοδο, με το σχηματισμό των ισοκλινών πτυχών προσανατολισμού αξόνων ΒΔ-ΝΑ και της κύριας σχιστότητας. Ο σχηματισμός των πτυχών αυτών σημειώνεται μέχρι και το Ανώτερο Ιουρασικό - Κατώτερο Κρητιδικό.

Η Αλπική ορογένεση ξεκινά μετά το τέλος του Κρητιδικού με την ηπειρωτική σύγκρουση Απούλιας - Ευρασίας και συνεχίζεται μετέπειτα με τη συμπιεστική τεκτονική κατά το Τριτογενές. Σύμφωνα με τους Mercier (1968) και Μουντράκης (1985), η Σερβομακεδονική μάζα επιπτεύει τα Περμοτριάδικά ιζήματα της Περιοδοπικής ζώνης υπό από τη δράση της συμπιεστικής τεκτονικής του Τριτογενούς. Χαρακτηριστικά της αποτελούν: οι λεπιώσεις των στρωμάτων, τα επωθητικά γεγονότα, ο σχηματισμός πτυχών τύπου knick και η αναστροφή των στρωμάτων στο δυτικό περιθώριο της Σερβομακεδονικής με την Περιοδοπική.

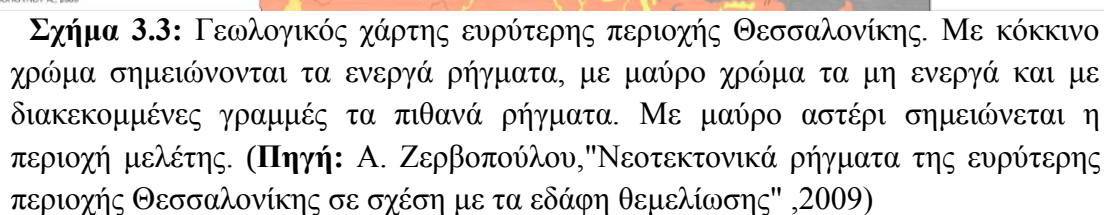
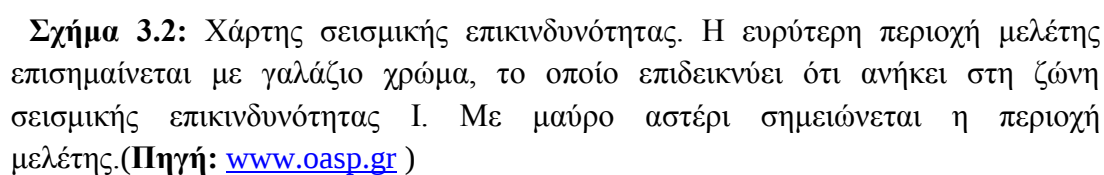
Η νεοτεκτονική-ενεργός τεκτονική στην περιοχή της Θεσσαλονίκης κυριαρχείται από εφελκυστικές τάσεις. Κατά την περίοδο του Πλειοκαίνου δημιουργούνται κανονικά και πλαγιο-κανονικά ρήγματα με κύρια διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ. Η δημιουργία αυτών των ρηγμάτων, ταυτόχρονα με την επαναδραστηριοποίηση παλαιότερων οδήγησαν στη δημιουργία των διαφόρων τεκτονικών βυθισμάτων (Λεκάνη Αξιού, Ανθεμούντα, Μυγδονίας) στον ευρύτερο εσωτερικό χώρο του Βόρειου Αιγαίου. Κατά το Πλειστόκαινο, η εκτατική τεκτονική συνεχίστηκε κάτω από θραυσιγενείς συνθήκες με τη δημιουργία κανονικών ρηγμάτων διαφόρων διευθύνσεων και μεσαίων έως μεγάλων κλίσεων. Την ίδια περίοδο εμφανίζονται ακόμα επαναδραστηριοποιημένα, ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης. Οι διευθύνσεις των κανονικών και οριζόντιας μετατόπισης ρηγμάτων αναφέρονται κυρίως στα συστήματα ΒΔ-ΝΑ και ΒΑ-ΝΔ.

3.3 ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΟΤΗΤΑ ΡΗΓΜΑΤΩΝ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Η σεισμογενής συμπεριφορά μίας περιοχής βρίσκεται σε άμεση συνάρτηση με τη γεωτεκτονική της θέση και κατά επέκταση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ύπαρξη στο χώρο ρηγμάτων. Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, η ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης δέχτηκε από το Πλειόκαινο και μετά την έντονη δράση εφελκυστικών δυνάμεων, η οποία οδήγησε στη διαμόρφωση των τεκτονικών βυθισμάτων αλλά και των κανονικών και οριζόντιας μετατόπισης ρηγμάτων με διευθύνσεις ΒΔ-ΝΑ και ΒΑ-ΝΔ. Κατά τον Βοϊδομάτη Π.Σ. (1984), οι σεισμοί που εκδηλώνονται στην περιοχή είναι κυρίως επιφανειακοί με μέγιστο εστιακό βάθος 20-25km, ενώ ως μηχανισμός γένεσης των σεισμών αναφέρονται τα κανονικά και τα δεξιόστροφα οριζόντιας μετατόπισης ρήγματα. Στον παρακάτω πίνακα (**Πίνακας 1**) σημειώνονται ανά κατηγορία τα ρήγματα που έχουν τοποθετηθεί στην ευρύτερη περιοχή της πόλης.

Πίνακας 1: Ταξινόμηση των ρηγμάτων που εντοπίστηκαν στην ευρύτερη περιοχή Θεσσαλονίκης. (Ζερβοπούλου Α.Σ. , 2010)

Ενεργά ρήγματα	Πιθανά ενεργά ρήγματα	Μη ενεργά ρήγματα
Ανθεμούντα Ρηξιγενείς ζώνες Μυγδονίας λεκάνης Ν. Απολλωνίας- Ν. Μαδύτου Σοχού Πυλαίας-Πανοράματος Στρατωνίου Κερκίνης- Πετριτίου Αγχιάλου- Ν. Μεσημβρίας Σερρών Βαλάντοβου	Θέρμης- Αεροδρομίου Βόρειου Ανθεμούντα Ασβεστοχωρίου Ευκαρπίας Καλοχωρίου Γοματίου- Ιερισσού Αμμουλιανής	Αγ. Δημητρίου Πεδίου Άρεως Κυβερνείου Ν. Ελβετίας Καλαμαριάς



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΤΕΝΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Για τη λήψη δειγμάτων και την καταγραφή των απαιτούμενων για την ανάλυση ευστάθειας στοιχείων πραγματοποιήθηκαν επισκέψεις στη θέση ενδιαφέροντος. Στο πλαίσιο των επισκέψεων καταγράφηκαν τα τεκτονικά στοιχεία (διεύθυνση και γωνία κλίσης) των ασυνεχειών, εκτιμήθηκαν επί τόπου η εμμόνη, το άνοιγμα και η απόσταση των ασυνεχειών, έγιναν επί τόπου μετρήσεις της αντοχής και της τραχύτητας των ασυνεχειών του πετρώματος με τη χρήση αντίστοιχα της σφύρας Schmidt και του προφιλόμετρου, έγινε γεωτεχνική ταξινόμηση βραχόμαζας με βάση το σύστημα GSI και τέλος λήφθηκε φωτογραφικό υλικό. Τα στοιχεία θα αναλυθούν διεξοδικά στις επόμενες παραγράφους.

4.1 ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΚΑΤΑ GSI

Η γεωτεχνική ταξινόμηση της βραχόμαζας σε επιμέρους τύπους με βάση τη δομή και την κατάσταση της επιφάνειας ασυνέχειας έλαβε χώρα κατά την επίσκεψή μας στο ύπαιθρο, στο σημείο ενδιαφέροντος.

Στη θέση μελέτης συναντώνται μόνο πετρώματα ασβεστολιθικής σύστασης. Όπως είναι γνωστό, η ποιότητα των ανθρακικών πετρωμάτων εξαρτάται στο μεγαλύτερο βαθμό από το βαθμό κερματισμού και την παρουσία ή απουσία αργιλικού υλικού πληρώσεως των ασυνεχειών τους. Η αποσάθρωση δεν αποτελεί χαρακτηριστικό παράγοντα για την ταξινόμηση τους. Αντί αυτού, η διάλυση και καρστικοποίηση που υφίστανται με βάση την ορυκτολογική τους σύσταση είναι δυνατό να απομειώσει την ποιότητα τους και συνεπώς και τη συμπεριφορά τους σε σχέση με τα διάφορα τεχνικά έργα. Για τους λόγους αυτούς χρησιμοποιήθηκε διάγραμμα GSI που αφορά μόνο ασβεστολιθικής σύστασης βραχόμαζες (B.Π.Μαρίνος, 2007) (**Σχήμα 4.1**).

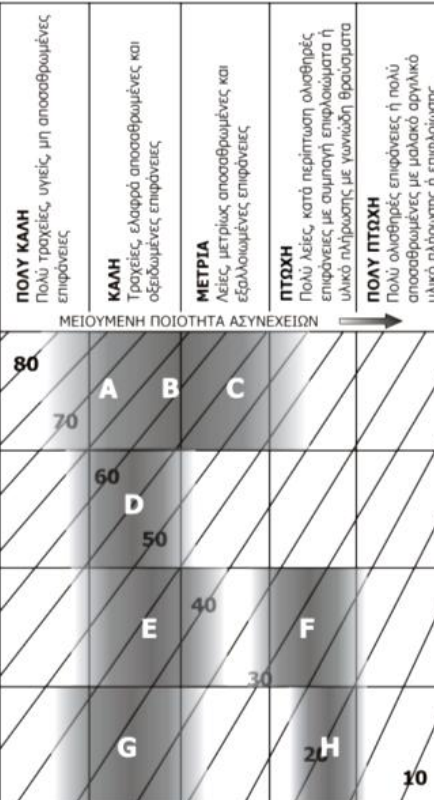
ΔΕΙΚΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ (GSI) ΓΙΑ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΙΚΕΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΕΣ

Βασίζομενοι στην περιγραφή της λιθολογικής σύστασης, της δομής και της ποιότητας των ασυνεχειών (κυρίως της στρώσης) της βραχώδους επιλέγεται το κατάλληλο πεδίο του πίνακα. Επιλέγεται η θέση στο πεδίο που περιγράφει τις συνθήκες και εκτιμάται η μέση τιμή του GSI από τις κορυφές. Το να επιλέγεται ένα εύρος τιμών π.χ. 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 γεωγονικών πεδίων. Τονίζεται ιδιαίτερα ότι το κριτήριο Hoek - Brown δεν εφαρμόζεται σε αστάθεις που ελέγχονται από συγκεκριμένες ασυνέχειες όταν οι ασθενείς επίπεδες επιφάνειες (όπως επίπεδα στρώσης) έχουν δυσμενή προσανατολισμό σε σχέση με την εκσκαφή. Τότε αυτές καθορίζουν την συμπεριφορά της βραχώδους (προσοχή λοιπόν στους τύπους B και C). Η αντοχή ορισμένων βραχωμάτων μειώνεται από τη παρουσία του υπόγειου νερού και αυτό μπορεί να ληφθεί υπόψη με μικρή μετακίνηση προς το 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.

ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΣΥΣΤΑΣΗ

ΤΥΠΟΣ Α. Αδιατάρακτο, πακτωματώδες έως άσπρωτο, αβασταλίδας με πολύ καλό αλληλοκλείσιμο που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από δύο έως τρεις ορθογώνια τεμνόμενες ογκογένεες.	ΤΥΠΟΣ Β. Αδιατάρακτο, λεπτοστρωματώδες έως μεσοστρωματώδες αβασταλίδας με σφικτή δομή που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από δύο έως τρεις (μια με την στρώση) ορθογώνια τεμνόμενες ογκογένεες ασυνεχειών. Τα πάχη των στρωμάτων είναι μερικών cm έως λίγων dm.	ΤΥΠΟΣ Γ. Αδιατάρακτο, λεπτοστρωματώδες έως μεσοστρωματώδες αβασταλίδας με εναλλαγές αργιλλικών ή ιμολιθικών και πυριταλίων με σφικτή δομή που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από δύο έως τρεις (μια με την στρώση) ορθογώνια τεμνόμενες ογκογένεες ασυνεχειών. Τα πάχη των στρωμάτων είναι μερικών cm έως λίγων dm.
ΤΥΠΟΣ Δ. Μερικώς διαταραγμένος αβασταλίδας με πολυπλευρά γυνιαία τεμάχια (blocks) που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες ογκογένεες ασυνεχειών.	ΤΥΠΟΣ Ε. Πτυχωμένος - έντονα διαταραγμένος λεπτοστρωματώδες αβασταλίδας με γυνιαία τεμάχια που σχηματίζονται από πολλές αλληλοτεμνόμενες ογκογένεες ασυνεχειών. Εμμόνη της στρώσης.	ΤΥΠΟΣ ΣΤ. Πτυχωμένος - έντονα διαταραγμένος λεπτοστρωματώδες αβασταλίδας με εναλλαγές αργιλλικών ή πυριταλίων αποτελούμενος από γυνιαία τεμάχια που σχηματίζονται από πολλές αλληλοτεμνόμενες ογκογένεες ασυνεχειών. Δομή ανοικτή λόγω της μη αλληλεμπλεκτικής των τεμαχίων και περιορισμένη εμμόνη.
ΤΥΠΟΣ Ζ. Ισομό κερματισμένος αβασταλίδας με πτωχό αλληλοκλείσιμο και με ταυτόχρονη παρουσία γυνιαίων και αποσπαραγμένων τεμαχίων.	ΤΥΠΟΣ Η. Κατακερματισμένος - αποδοργανωμένος αβασταλίδας με έντονη παρουσία αργιλικού υλικού πλήρωσης στις ασυνέχειες του. Το αβασταλίδικό τεμάχιο δεν έρχονται πάντα σε επαφή μεταξύ τους με αποτέλεσμα το αλληλοκλείσιμο να είναι πολύ πτωχό. Η βραχώδης αυτή αναντίστα συνήθως σε ζώνες μικρού πάχους σε περιοχές επιφύσεων (η κλίμακα σε αυτό το σκεδόν δεν συγκρίνεται με αυτή των άλλων εκδοχών).	

ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ
(κυρίως επίπεδα στρώσης)



Σχήμα 4.1: Διάγραμμα GSI για ασβεστολιθικές βραχώμαζες με ή χωρίς εναλλαγές.

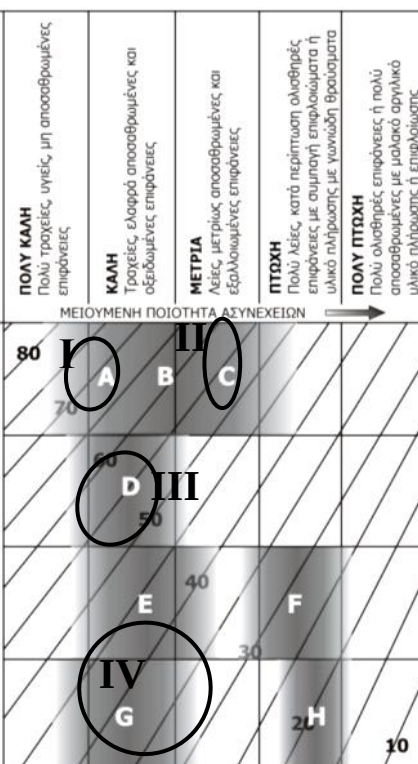
ΔΕΙΚΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ (GSI) ΓΙΑ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΙΚΕΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΕΣ

Βασίζομενοι στην περιγραφή της λιθολογικής σύστασης, της δομής και της ποιότητας των ασυνεχειών (κυρίως της στρώσης) της βραχώδους επιλέγεται το κατάλληλο πεδίο του πίνακα. Επιλέγεται η θέση στο πεδίο που περιγράφει τις συνθήκες και εκτιμάται η μέση τιμή του GSI από τις κορυφές. Το να δηλώσετε ότι το GSI = 35. Ο καθορισμός της δομής καθώς και της ποιότητας των ασυνεχειών μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ δύο γεωγονικών πεδίων. Τονίζεται ιδιαίτερα ότι το κριτήριο Hoek - Brown δεν εφαρμόζεται σε αστάθεις που ελέγχονται από συγκεκριμένες ασυνέχειες όταν οι ασθενείς επίπεδες επιφάνειες (όπως επίπεδα στρώσης) έχουν δυσμενή προσανατολισμό σε σχέση με την εκσκαφή. Τότε αυτές καθορίζουν την συμπεριφορά της βραχώδους (προσοχή λοιπόν στους τύπους B και C). Η αντοχή ορισμένων βραχωμάτων μειώνεται από τη παρουσία του υπόγειου νερού και αυτό μπορεί να ληφθεί υπόψη με μικρή μετακίνηση προς το 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.

ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΣΥΣΤΑΣΗ

ΤΥΠΟΣ Α. Αδιατάρακτο, πακτωματώδες έως άσπρωτο, αβασταλίδας με πολύ καλό αλληλοκλείσιμο που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από δύο έως τρεις ορθογώνια τεμνόμενες ογκογένεες.	ΤΥΠΟΣ Β. Αδιατάρακτο, λεπτοστρωματώδες έως μεσοστρωματώδες αβασταλίδας με σφικτή δομή που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από δύο έως τρεις (μια με την στρώση) ορθογώνια τεμνόμενες ογκογένεες ασυνεχειών. Τα πάχη των στρωμάτων είναι μερικών cm έως λίγων dm.	ΤΥΠΟΣ Γ. Αδιατάρακτο, λεπτοστρωματώδες έως μεσοστρωματώδες αβασταλίδας με εναλλαγές αργιλλικών ή ιμολιθικών και πυριταλίων με σφικτή δομή που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από δύο έως τρεις (μια με την στρώση) ορθογώνια τεμνόμενες ογκογένεες ασυνεχειών. Τα πάχη των στρωμάτων είναι μερικών cm έως λίγων dm.
ΤΥΠΟΣ Δ. Μερικώς διαταραγμένος αβασταλίδας με πολυπλευρά γυνιαία τεμάχια (blocks) που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες ογκογένεες ασυνεχειών.	ΤΥΠΟΣ Ε. Πτυχωμένος - έντονα διαταραγμένος λεπτοστρωματώδες αβασταλίδας με γυνιαία τεμάχια που σχηματίζονται από πολλές αλληλοτεμνόμενες ογκογένεες ασυνεχειών. Εμμόνη της στρώσης.	ΤΥΠΟΣ ΣΤ. Πτυχωμένος - έντονα διαταραγμένος λεπτοστρωματώδες αβασταλίδας με εναλλαγές αργιλλικών ή πυριταλίων αποτελούμενος από γυνιαία τεμάχια που σχηματίζονται από πολλές αλληλοτεμνόμενες ογκογένεες ασυνεχειών. Δομή ανοικτή λόγω της μη αλληλεμπλεκτικής των τεμαχίων και περιορισμένη εμμόνη.
ΤΥΠΟΣ Ζ. Ισομό κερματισμένος αβασταλίδας με πτωχό αλληλοκλείσιμο και με ταυτόχρονη παρουσία γυνιαίων και αποσπαραγμένων τεμαχίων.	ΤΥΠΟΣ Η. Κατακερματισμένος - αποδοργανωμένος αβασταλίδας με έντονη παρουσία αργιλικού υλικού πλήρωσης στις ασυνέχειες του. Το αβασταλίδικό τεμάχιο δεν έρχονται πάντα σε επαφή μεταξύ τους με αποτέλεσμα το αλληλοκλείσιμο να είναι πολύ πτωχό. Η βραχώδης αυτή αναντίστα συνήθως σε ζώνες μικρού πάχους σε περιοχές επιφύσεων (η κλίμακα σε αυτό το σκεδόν δεν συγκρίνεται με αυτή των άλλων εκδοχών).	

ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ
(κυρίως επίπεδα στρώσης)



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα GSI για ασβεστολιθικές βραχώμαζες. Σημειώνονται με κύκλους οι αντίστοιχες τεχνικογεωλογικές ενότητες.

Οι τεχνικογεωλογικές ενότητες (Τ.Ε.) στη θέση μελέτης με βάση το σύστημα ταξινόμησης GSI για ασβεστολιθικές βραχώμαζες είναι οι εξής:

- **Τεχνικογεωλογική ενότητα Ι: Τύπος Α**

Ασβεστόλιθος ελαφρά διαταραγμένος, συμπαγής, παχυστρωματώδης. Το GSI είναι 65-75.



Εικόνα 1: Τεχνικογεωλογικός τύπος Α ασβεστολιθικής βραχώμαζας στη θέση μελέτης.

- **Τεχνικογεωλογική ενότητα ΙΙ: Τύπος C**

Ασβεστόλιθος με εναλλαγές ιλυολίθων σε λεπτά στρώματα. Το GSI εκτιμάται ως 50-60.



Εικόνα 2: Τεχνικογεωλογικός τύπος C ασβεστολιθικής βραχώμαζας στη θέση μελέτης.

- **Τεχνικογεωλογική ενότητα III: Τύπος D**

Ασβεστόλιθος μέτρια αποσαθρωμένος με περισσότερες από 3 οικογένειες ασυνεχειών. Το GSI προβλέπεται **50-60**.



Εικόνα 3: Τεχνικογεωλογικός τύπος D ασβεστολιθικής βραχώμαζας στη θέση μελέτης.

- **Τεχνικογεωλογική ενότητα IV: Τύπος G**

Ισχυρά κερματισμένος ασβεστόλιθος, ελαφρά-μέτρια αποσαθρωμένος. Το GSI παίρνει τιμές **30-40**.



Εικόνα 4: Τεχνικογεωλογικός τύπος G ασβεστολιθικής βραχώμαζας στη θέση μελέτης.

4.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΚΥΡΙΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΙΚΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

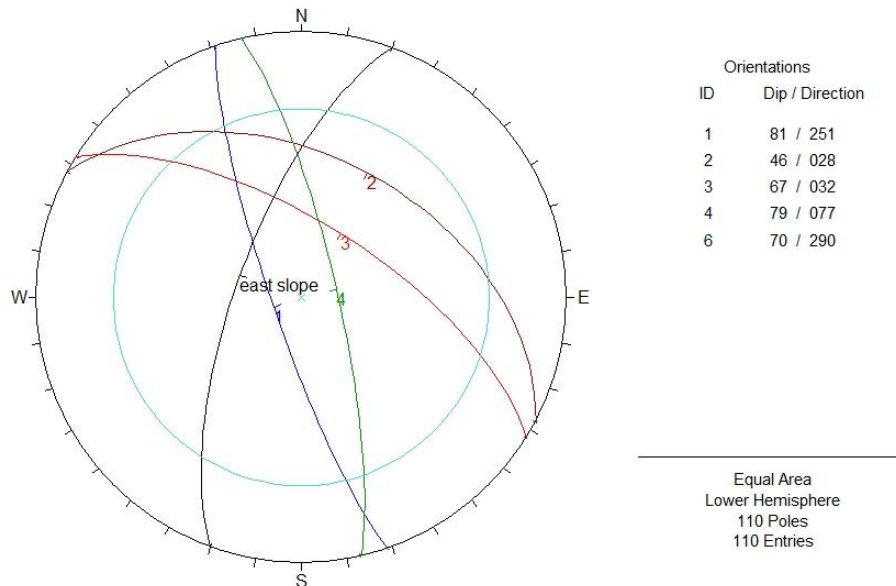
4.2.1 Μετρήσεις τεκτονικών στοιχείων ασυνεχειών με τη χρήση γεωλογικής πυξίδας

Για την όσο το δυνατόν ορθότερη εξαγωγή των κύριων συστημάτων ασυνεχειών λήφθηκαν συνολικά για τα δύο πρηνή 110 μετρήσεις στοιχείων προσανατολισμού με χρήση της γεωλογικής πυξίδας, έγινε επί τόπου περιγραφή των μηχανικών χαρακτηριστικών κάθε εμφανούς τεκτονικής δομής και ασυνέχειας στο μέτωπο του πρηνούς και τέλος εκτελέστηκαν επί τόπου μετρήσεις για τον προσδιορισμό της τραχύτητας (JRC) και της σκληρότητας (JCS) αντίστοιχα με χρήση του προφιλόμετρου και του σφυριού Schmidt τύπου L. Οι μετρήσεις που λήφθηκαν μέσω της γεωλογικής πυξίδας παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

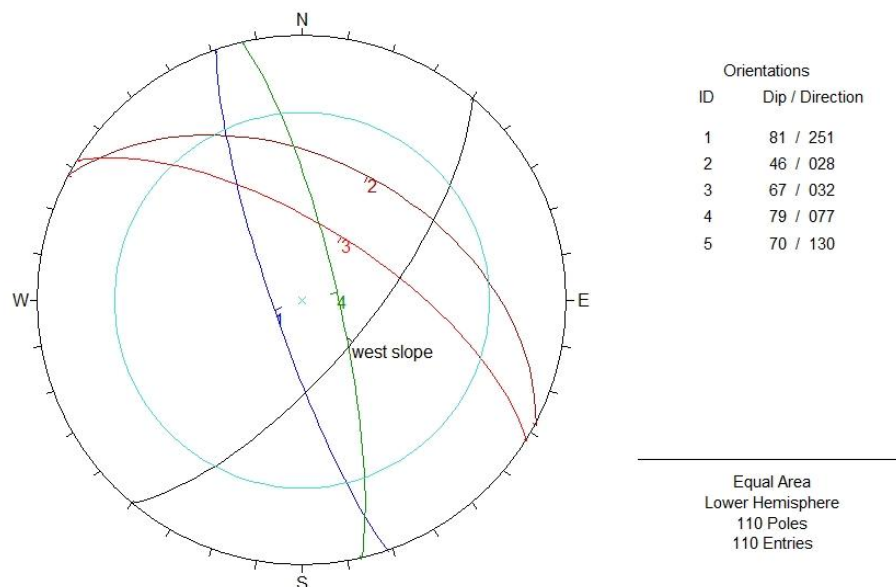
Πίνακας 1: Επί τόπου μετρήσεις τεκτονικών στοιχείων των ασυνεχειών με χρήση της γεωλογικής πυξίδας.

ΑΑ	Διεύθυνση κλίσης/ Κλίση	ΑΑ	Διεύθυνση κλίσης/ Κλίση	ΑΑ	Διεύθυνση κλίσης/ Κλίση	ΑΑ	Διεύθυνση κλίσης/ Κλίση	ΑΑ	Διεύθυνση κλίσης/ Κλίση
1	250/85	25	081/65	49	078/27	73	007/80	97	034/84
2	251/78	26	084/49	50	073/48	74	101/66	98	044/67
3	251/80	27	084/80	51	072/49	75	107/85	99	044/71
4	021/50	28	083/90	52	041/19	76	098/36	100	043/44
5	016/29	29	263/65	53	039/46	77	097/47	101	223/73
6	024/60	30	276/83	54	034/40	78	088/55	102	036/31
7	024/55	31	092/45	55	344/40	79	045/35	103	036/82
8	203/75	32	031/54	56	073/43	80	046/56	104	035/83
9	022/59	33	029/52	57	043/30	81	108/45	105	026/23
10	041/60	34	218/25	58	049/30	82	104/59	106	026/25
11	026/70	35	219/15	59	039/38	83	096/58	107	201/85
12	025/40	36	033/41	60	039/68	84	114/47	108	027/89
13	022/45	37	029/70	61	041/40	85	111/60	109	027/10
14	022/50	38	036/48	62	030/45	86	290/54	110	023/34
15	016/45	39	035/50	63	074/82	87	112/29		
16	048/65	40	034/70	64	252/60	88	008/38		
17	011/25	41	031/52	65	072/32	89	014/83		
18	189/85	42	069/75	66	088/64	90	019/80		
19	027/40	43	072/35	67	141/66	91	011/87		
20	209/50	44	238/75	68	048/81	92	188/79		
21	031/30	45	061/84	69	020/36	93	030/56		
22	089/24	46	060/35	70	020/80	94	034/45		
23	081/30	47	059/50	71	017/40	95	029/75		
24	081/40	48	054/37	72	016/75	96	212/51		

Τα στοιχεία προσανατολισμού (κλίση/διεύθυνση κλίσης) εισήχθησαν στο πρόγραμμα Dips (Rocscience Inc.), μέσω του οποίου έγινε προβολή τους στο τεκτονικό διάγραμμα με τη μορφή πόλων. Ακολουθώντας, με τη στατιστική επεξεργασία των πόλων στο τεκτονικό διάγραμμα ορίστηκαν οι κύριες οικογένειες ασυνεχειών, που εντοπίζονται στα δύο μελετώμενα πρανή. Οι κύριες οικογένειες ασυνεχειών απεικονίζονται στα παρακάτω τεκτονικά διαγράμματα:



Σχήμα 4.3: Τεκτονικό διάγραμμα στο Ανατολικό πρανές. (1-4: Γωνία κλίσης/ Διεύθυνση κλίσης κύριων συστημάτων ασυνεχειών, 6: Γωνία κλίσης / Διεύθυνση κλίσης Ανατολικού πρανούς.)



Σχήμα 4.4: Τεκτονικό διάγραμμα στο Δυτικό πρανές. (1-4: Γωνία κλίσης/ Διεύθυνση κλίσης κύριων συστημάτων ασυνεχειών, 5: Γωνία κλίσης / Διεύθυνση κλίσης Δυτικού πρανούς.)

Συνοψίζοντας από τις επί τόπου μετρήσεις και παρατηρήσεις, τα κύρια συστήματα ασυνεχειών διακρίνονται με τα χαρακτηριστικά που παρατίθενται στον **Πίνακα 2**:

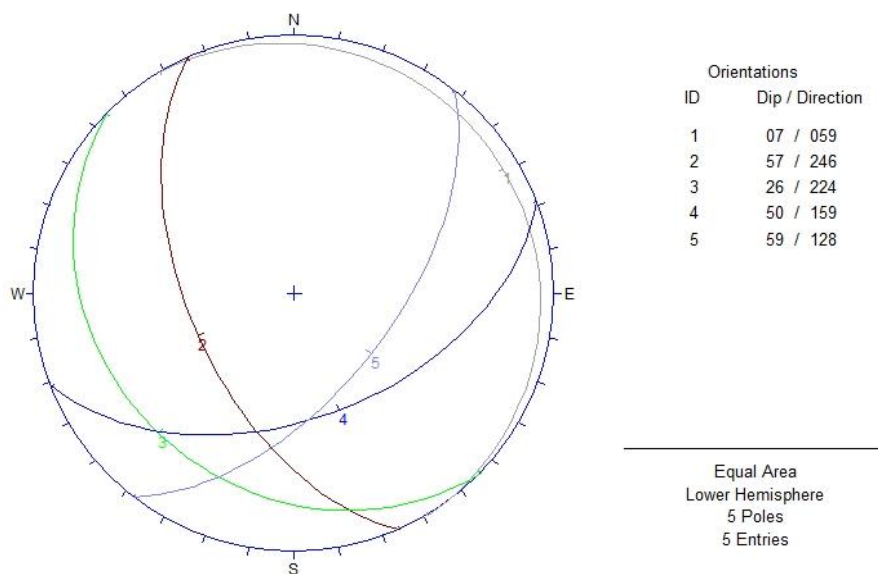
Πίνακας 2 : Συγκεντρωτικά στοιχεία ασυνεχειών.

Ασυνέχεια	Αντοχή ασυνέχειας (MPa)	Τραχύτητα	Εμμονή	Άνοιγμα	Απόσταση	Εδαφικό υλικό
J₁	80	14	Μικρή	Μερικώς πλατιά	Μεγάλη	Ναι
J₂	83	4	Μικρή-Μέση	Ανοιχτή	Μέτρια	Όχι
J₃	62	4	-	Μερικώς ανοιχτή	Πολύ μικρή-μικρή	Όχι
J₄	96	10	Μικρή	-	Μεσαία	Όχι

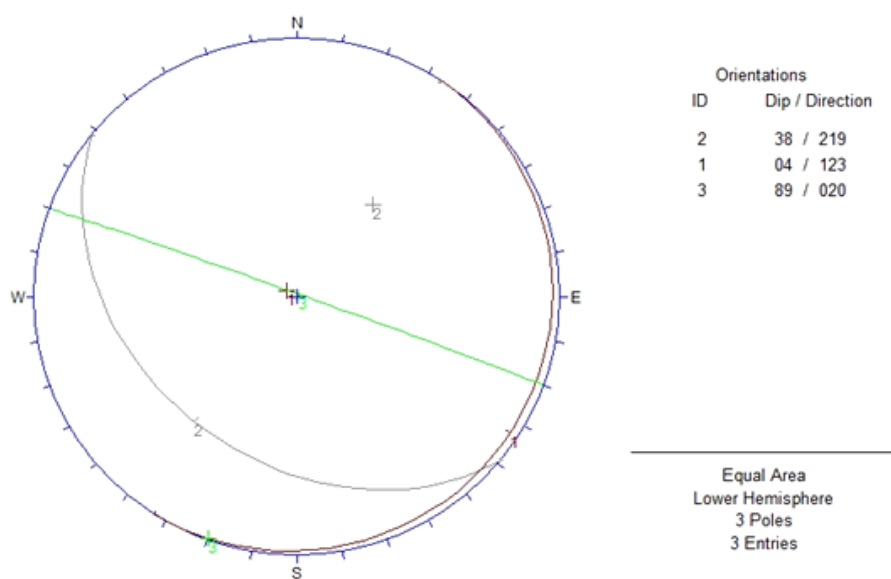
4.2.2 Μετρήσεις τεκτονικών στοιχείων ασυνεχειών μέσω επίγειου σαρωτή Lidar

Με τη χρήση του επίγειου σαρωτή πραγματοποιήθηκαν 2 κύριες σειρές σαρώσεων, προκειμένου να πραγματοποιηθούν λήψεις υψηλής ακρίβειας στις επιφάνειες των 2 πρανών. Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.2.1, ο σαρωτής Lidar σκανάρει κάθε επιφάνεια προς μελέτη με τη χρήση ακτινών laser μέσης ισχύος. Με τον τρόπο αυτό λαμβάνονται ανά σάρωση εκατοντάδες χιλιάδες σημεία στο χώρο (3-D points) , παράγοντας το τρισδιάστατο μοντέλο της στενής περιοχής μελέτης.

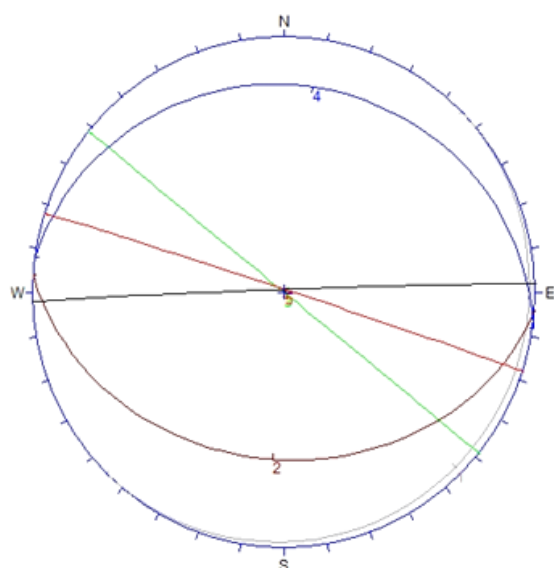
Οι σαρώσεις, οι οποίες προέκυψαν κατά την επίσκεψη στο ύπαιθρο, χρησιμοποιήθηκαν μετέπειτα από τα λογισμικά Cloud Compare και DSE (Discontinuity Set Extractor, by Adrián J. Riquelme, (www.personal.ua.es/)). Το λογισμικό Cloud Compare τροποποίησε τα σύνολα των 3-D σημείων (3-D point clouds, 3-DPD), που προέκυψαν απευθείας από τις σαρώσεις, προκειμένου να γίνει επεξεργασία τους από το λογισμικό DSE. Στη συνέχεια μέσω του προγράμματος DSE πραγματοποιήθηκε λεπτομερής ανάλυση όλων των 3-DPD ώστε τελικά να προκύψουν τα κυριότερα συστήματα ασυνεχειών. Τα στοιχεία προσανατολισμού κάθε επιπέδου ασυνεχειών απεικονίζονται με τη μορφή πόλων στα παρακάτω στερεοδιαγράμματα.



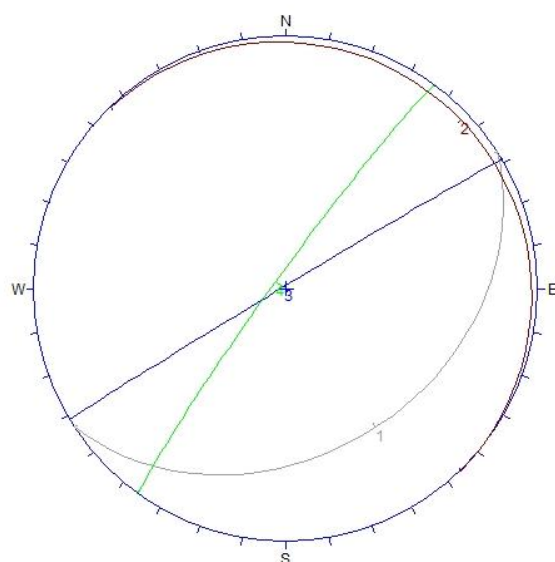
Σχήμα 4.5: Στερεογραφική προβολή των κυριότερων συστημάτων ασυνεχειών της σάρωσης N-196 στο Δυτικό πρανές (70/130).



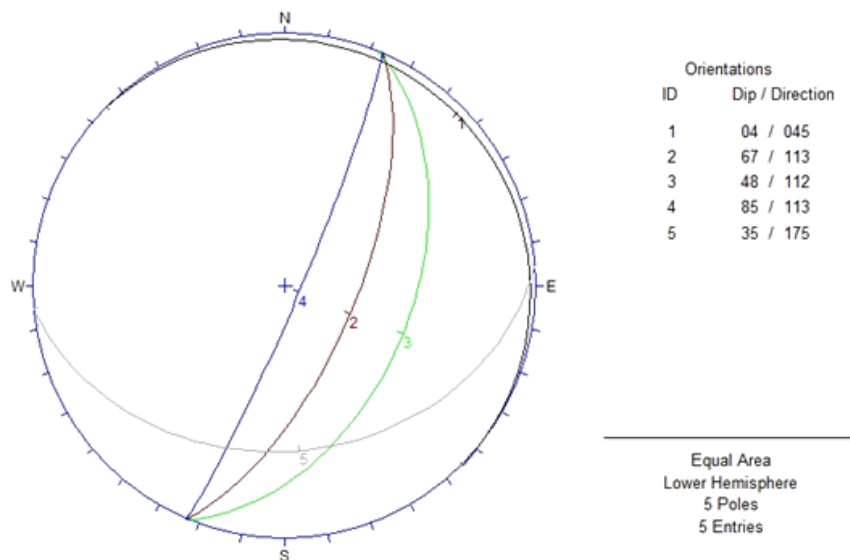
Σχήμα 4.6: Στερεογραφική προβολή των αποτελεσμάτων της σάρωσης N-197, Δυτικό πρανές.



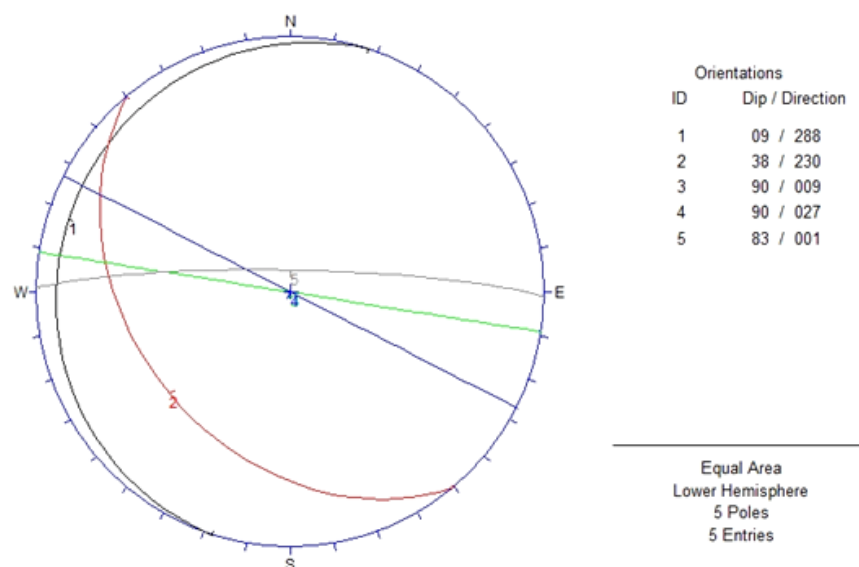
Σχήμα 4.7: Στερεογραφική προβολή επιπέδων των κύριων ασυνεχειών της σάρωσης N-198 στο Δυτικό πρανές.



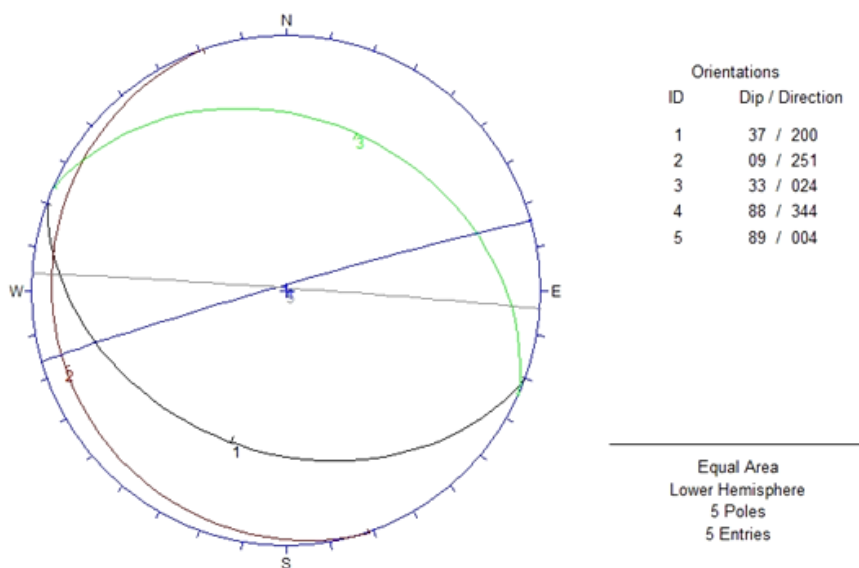
Σχήμα 4.8: Στερεογραφική προβολή επιπέδων των κύριων ασυνεχειών, που προέκυψαν από τη σάρωση N-199, Δυτικό πρανές.



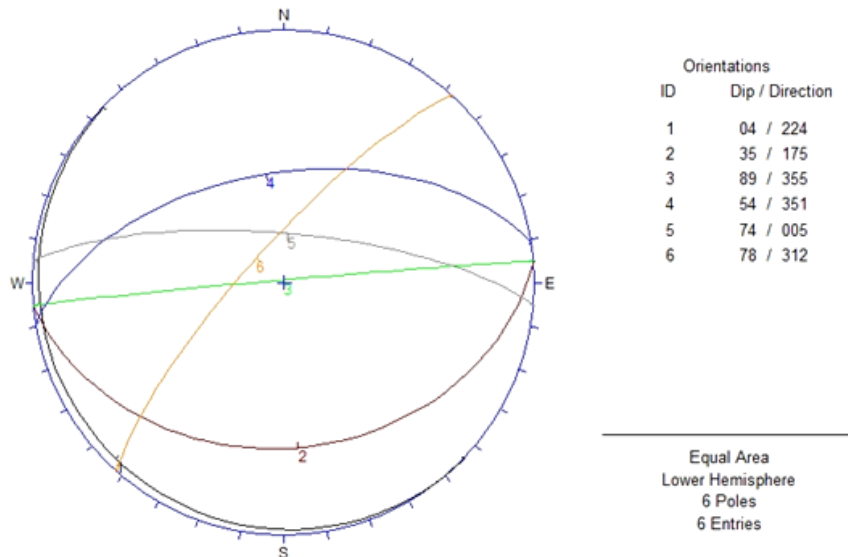
Σχήμα 4.9: Στερεογραφική προβολή αποτελεσμάτων σάρωσης N-200 (Δυτικό πρανές).



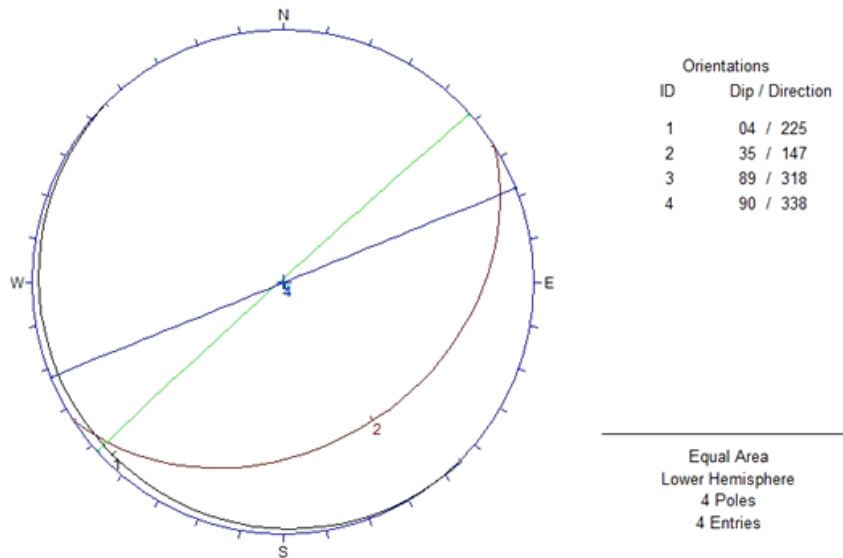
Σχήμα 4.10: Στερεογραφική προβολή των κυριότερων επιφανειών ασυνεχειών της σάρωσης S-233 στο Ανατολικό πρανές (70/290).



Σχήμα 4.11: Στερεογραφική προβολή. Τα κύρια συστήματα ασυνεχειών προέκυψαν μετά από επεξεργασία της σάρωσης S-234 στο Ανατολικό πρανές.



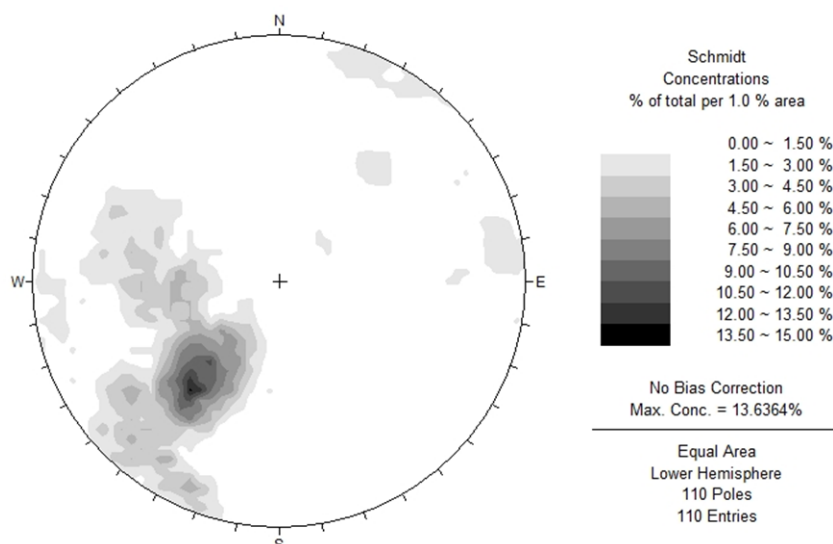
Σχήμα 4.12: Στερεογραφική προβολή αποτελεσμάτων σάρωσης S-235, Ανατολικό πρανές.



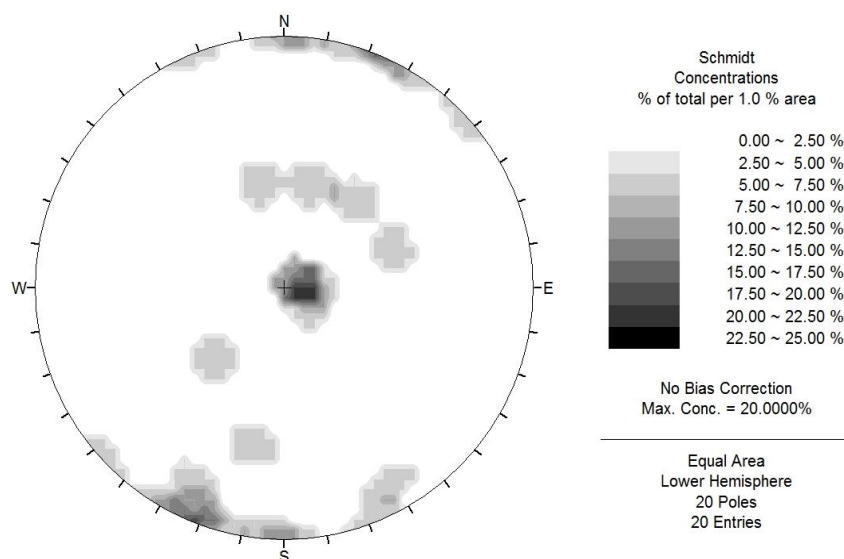
Σχήμα 4.13 : Στερεογραφική προβολή των επιπέδων ασυνεχειών μέσω της σάρωσης S-236 (Ανατολικό πρανές).

4.2.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ επίγειου σαρωτή Lidar και επιτόπου μετρήσεων στο ύπαιθρο

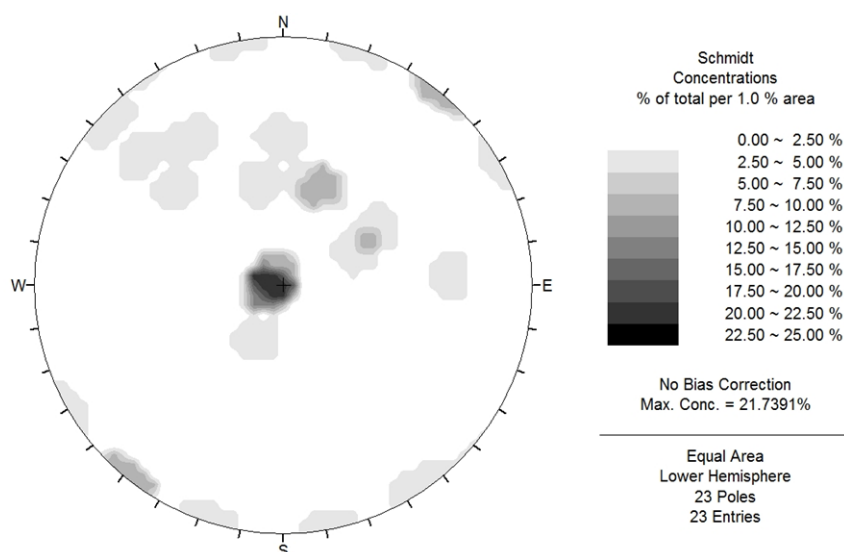
Στις δύο προηγούμενες παραγράφους παρατέθηκαν τα αποτελέσματα των μετρήσεων, που αφορούν την κατανομή των συστημάτων ασυνεχειών στο χώρο, με τη μορφή στερεοδιαγραμμάτων. Για την καλύτερη κατά το δυνατό σύγκριση και ερμηνεία των μετρήσεων θα χρησιμοποιήσουμε στερεοδιαγράμματα στα οποία τα συστήματα ασυνεχειών θα απεικονίζονται με τη μορφή πόλων (Σχήματα 4.14-4.16).



Σχήμα 4.14: Στερεογραφική προβολή πόλων. Διακρίνονται οι κύριες συγκεντρώσεις των πόλων των ασυνεχειών, που μετρήθηκαν επί τόπου στο ύπαιθρο. Κάθε συγκέντρωση αποτελείται από πόλους με παρόμοια στοιχεία προσανατολισμού (Γωνία κλίσης / Διεύθυνση κλίσης).



Σχήμα 4.15: Στερεογραφική προβολή πόλων του Δυτικού ημισφαιρίου. Οι μετρήσεις προέκυψαν μέσω της χρήσης του επίγειου σαρωτή Lidar (Σάρωσεις N196-200).



Σχήμα 4.16: Στερεογραφική προβολή πόλων του Ανατολικού ημισφαιρίου. Οι μετρήσεις προέκυψαν μέσω της χρήσης του επίγειου σαρωτή Lidar (Σάρωσεις S234-236).

Όπως φαίνεται από το **Σχήμα 4.14**, η πυκνότερη συγκέντρωση πόλων βρίσκεται στο νοτιοδυτικό τμήμα του στερεοδιαγράμματος. Άλλες συγκεντρώσεις των πόλων των ασυνεχειών παρατηρούνται στο δυτικό- βορειοδυτικό τμήμα και σε πολύ χαμηλότερο βαθμό στο βορειοανατολικό τμήμα του δικτύου Schmidt. Στα **σχήματα 4.15** και **4.16**, παρατηρούνται περισσότερες και διάσπαρτες συγκεντρώσεις πόλων και συγκεκριμένα:

- Στο **σχήμα 4.15**, οι πιο πυκνές συγκεντρώσεις παρατηρούνται στο κέντρο του δικτύου, στο νοτιοδυτικό και στο βορειοανατολικό τμήμα του δικτύου Schmidt. Μικρότερες συγκεντρώσεις εμφανίζονται στο βορειοδυτικό και ανατολικό τμήμα.
- Στο **σχήμα 4.16**, μεγάλο πλήθος πόλων συγκεντρώνεται στο κεντρικό, νοτιοδυτικό και βόρειο-βορειοανατολικό τμήμα.

Συγκρίνοντας τα τρία σχήματα μεταξύ τους, συμπεραίνουμε ότι οι συγκεντρώσεις των πόλων, οι οποίες αντιπροσωπεύουν τα συστήματα ασυνεχειών στα δύο πρηνή, δεν ταυτίζονται πλήρως. Τα αποτελέσματα των δύο σαρώσεων αποκλίνουν σε ορισμένο βαθμό από τις μετρήσεις που λήφθηκαν επί τόπου με τη γεωλογική πυξίδα για αυτό και θεωρούμε ότι η συσχέτιση μεταξύ τους δεν είναι απόλυτη.

Εν κατακλείδι, για την ανάλυση ευστάθειας στα δύο βραχώδη πρηνή και την εκτίμηση του συντελεστή ασφαλείας θα χρησιμοποιήσουμε τις επί τόπου μετρήσεις της γεωλογικής πυξίδας (**Σχήμα 4.14**). Η επιλογή τους, έναντι των μετρήσεων που προέκυψαν από τις δύο σαρώσεις, στηρίζεται στο ότι οι πρώτες θεωρούνται περισσότερο αξιόπιστες σε σχέση με τις αντίστοιχες του σαρωτή Lidar. Η διάκριση αυτή βασίζεται στην υψηλής τάξεως πιθανότητα ύπαρξης τυχόν σφαλμάτων στις μετρήσεις που προκύπτουν μέσω των διάφορων λήψεων σαρώσεων. Για αυτό το λόγο, οι μετρήσεις των σαρώσεων μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστες ως προς περαιτέρω χρήση τους, μόνο εφόσον προηγηθεί διόρθωση και επεξεργασία τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΞΑΓΩΓΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

5.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

5.1.1 Δοκιμή άμεσης διάτμησης ασυνέχειας βραχώδους δείγματος

Με τη δοκιμή της άμεσης διάτμησης υπολογίζεται η γωνία τριβής ϕ_b επίπεδων, λείων ασυνεχειών πετρωμάτων και προσδιορίζεται η μεταβολή της διατμητικής αντοχής με την μεταβολή μίας ορθής τάσης, που εφαρμόζεται κάθετα στην επιφάνεια διάτμησης του βραχώδους δείγματος. Συγκεκριμένα, καθορίζονται τα διάφορα στοιχεία των επιφανειών μέσω των οποίων μεταβάλλεται η τιμή της διατμητικής αντοχής υπό την επίδραση διαφόρων τάσεων. Η δοκιμή άμεσης διάτμησης προκαλεί τη θραύση του δείγματος, με την επιβολή διαφορικής μετακινήσεως των δύο τμημάτων του υποδοχέα που περιέχει το δοκίμιο. Η θραύση του δοκιμίου γίνεται κατά μία προδιαγεγραμμένη επίπεδη επιφάνεια που ονομάζεται επιφάνεια διατμήσεως.

Η διαδικασία της δοκιμής άμεσης διάτμησης βραχώδους υλικού περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

- 1) Παρασκευή δοκιμίου: Αρχικά εκτελείται η θραύση του δείγματος με τη χρήση τροχού έτσι ώστε να επιτευχθεί τεχνητή ασυνέχεια, αντιπροσωπευτική της φυσικής που θα συναντούσαμε στο ύπαιθρο. Το δείγμα διαιρείται σε 2 επιμέρους στελέχη με ίσες διαστάσεις. Αμέσως μετά ακολουθεί ο εγκιβωτισμός αντίστοιχα των δύο στελεχών με τη χρήση διαλύματος γύψου (αναλογία γύψου-νερού: 3:1), έχοντας ευθυγραμμίσει το κάθε στέλεχος. Η ασυνέχεια θα πληρωθεί κατά 1 cm με το μείγμα γύψου. Το δοκίμιο είναι έτοιμο για χρήση όταν διαπιστώνεται η πλήρης στερεοποίηση του με το γύψο.
- 2) Πριν την έναρξη της δοκιμής, σημειώνουμε το υπερκείμενο (Top) και το υποκείμενο στέλεχος (Bottom) καθώς και το όνομα του δείγματος. Συγκρίνουμε τα δύο στελέχη με την κλίμακα χρωμάτων και τα φωτογραφίζουμε. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται πριν από κάθε στάδιο φόρτισης, έτσι ώστε να σημειώνονται τυχόν φθορές ή αλλαγές που έχουν προκληθεί από το κάθε στάδιο φόρτισης.
- 3) Προσδιορίζουμε προφίλ τραχυτήτων με τη χρήση του προφιλόμετρου.
- 4) Ζυγίζουμε τα δύο στελέχη και ετοιμάζουμε το έντυπο αναφοράς, στο οποίο θα αναγράφονται όλα τα απαραίτητα στοιχεία από την εκτέλεση της δοκιμής.
- 5) Ρυθμίζουμε το δυναμοδακτύλιο (LR). Για την εκτέλεση της δοκιμής χρησιμοποιούνται 2 δυναμοδακτύλιοι (LR_1 , LR_2). Κάθε δυναμοδακτύλιος δέχεται συγκεκριμένο μέγεθος φόρτισης.
- 6) Συναρμολογούμε τη συσκευή διάτμησης έχοντας τα μεταλλικά πλαίσια ευθυγραμμισμένα και σταθερά. Οι επιφάνειες επαφής των πλαισίων γρασσώνονται με γράσο σιλικόνης έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η υδατοστεγανότητα και η μείωση των τριβών κατά τη διάρκεια της διάτμησης.

7) Βιδώνουμε τους οδηγούς (με 2 βίδες) που εξασφαλίζουν την αποφυγή της εκκεντρότητας των 2 τεμαχίων της κυψέλης. Το δοκίμιο τοποθετείται στην κυψέλη διάτμησης. Τοποθετούμε τα μηχανοσκόπετρα για τη μέτρηση της διατμητικής μετατόπισης και τη γωνία διαστολής.

8) Επάνω από την κυψέλη διάτμησης τοποθετούμε 2 κυλινδρικά βαρίδια (με γνωστό βάρος). Το έμβολο εφάπτεται στο υποκείμενο σύνολο βαρών και εξασκεί επάνω τους την απαιτούμενη ανά περίπτωση πίεση.

9) Ρυθμίζουμε την πίεση της μικρής αντλίας, η οποία αποτελεί την ασκούμενη προς το δοκίμιο πίεση.

10) Η εφαρμογή των ορθών τάσεων γίνεται σε στάδια και η φόρτιση γίνεται κατά βαθμίδες. Κάθε βαθμίδα πιέσεως παραμένει στο δοκίμιο μέχρι να διαπιστωθεί μετατόπιση του υποκείμενου στελέχους κατά ποσοστό 10% του μήκους του μικρότερου σε διάσταση άξονα .

11) Η διάτμηση του εξεταζόμενου υλικού επαναλαμβάνεται σε δύο άλλα παρόμοια δοκίμια (του ίδιου βάθους δειγματοληψίας), ώστε τελικώς να υπάρχουν τρεις τιμές τ (διατμητική τιμή αντοχής) για 3 τιμές ορθών τάσεων. Από τις τιμές αυτές προσδιορίζεται η γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ_b) και η συνοχή (c) του βραχώδους υλικού για επίπεδη και λεία επιφάνεια ασυνέχειας. Για να υπολογιστεί η πραγματική γωνία τριβής ϕ και η συνοχή c χρησιμοποιείται το κριτήριο του Barton-Bandis (1990), από την επίλυση του οποίου προκύπτει ότι:

$$\phi = \phi_b + i \text{ όπου } i = JRC \log_{10} \left(\frac{JSC}{\sigma_n} \right)$$

5.1.2 Δοκιμή άμεσης διάτμησης ασυνέχειας σε ανακρυσταλλωμένο ασβεστόλιθο

Το δείγμα του ανακρυσταλλωμένου ασβεστόλιθου, που συλλέχθηκε από τη θέση στο ύπαιθρο, χρησιμοποιήθηκε ως δοκίμιο για την εκτέλεση της δοκιμής άμεσης διάτμησης. Σύμφωνα με τη διαδικασία που αναλύθηκε προηγουμένως, το δείγμα διαιρέθηκε σε 2 επιμέρους στελέχη με τη χρήση τροχού (**Εικόνα 1**) και στη συνέχεια εγκιβωτίστηκε μέσα σε διάλυμα γύψου (**Εικόνα 2**).



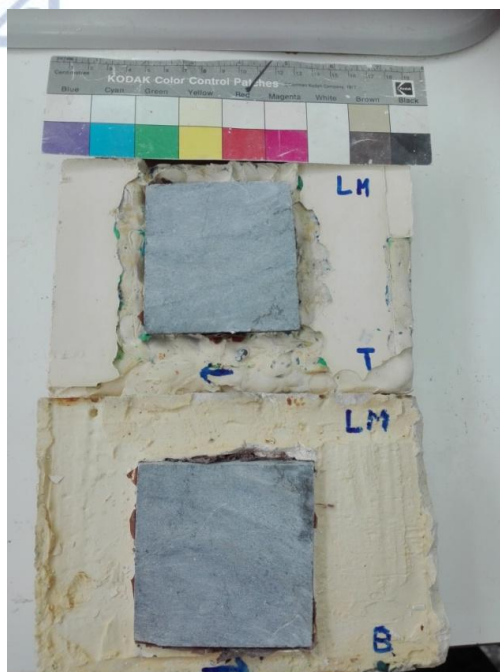
Εικόνα 1: Κοπή του ασβεστολιθικού δείγματος με ειδικό τροχό.



Εικόνα 2: Εγκιβωτισμός δοκιμίου (πλήρωση ασυνέχειας κατά 1 cm).

Πριν ξεκινήσει η εκτέλεση της δοκιμής, το εγκιβωτισμένο πλέον δοκίμιο φωτογραφίστηκε με κλίμακα αναφοράς, την κλίμακα χρωμάτων. Σε κάθε στέλεχος μετρήθηκε αντίστοιχα το βάρος και τα μήκη των δύο αξόνων (μεγάλος και μικρός άξονας), σημειώθηκε το όνομα του δείγματος (L_M), η θέση του κάθε στελέχους σε αντιστοιχία με το άλλο (B: Bottom, T: Top) και η φορά μετατόπισης τους (**Εικόνα 3**).

Τέλος, το δοκίμιο ελέγχθηκε για τυχόν διαστολές και για την επιπεδότητα της επιφάνειας ασυνέχειας.



Εικόνα 3: Τα 2 στελέχη δοκιμίου με την κλίμακα χρωμάτων. Σημειώνονται το όνομα δείγματος (L_M), η θέση αντίστοιχα των τεμαχών (B,T) και η φορά μετατόπισης (με βέλη).

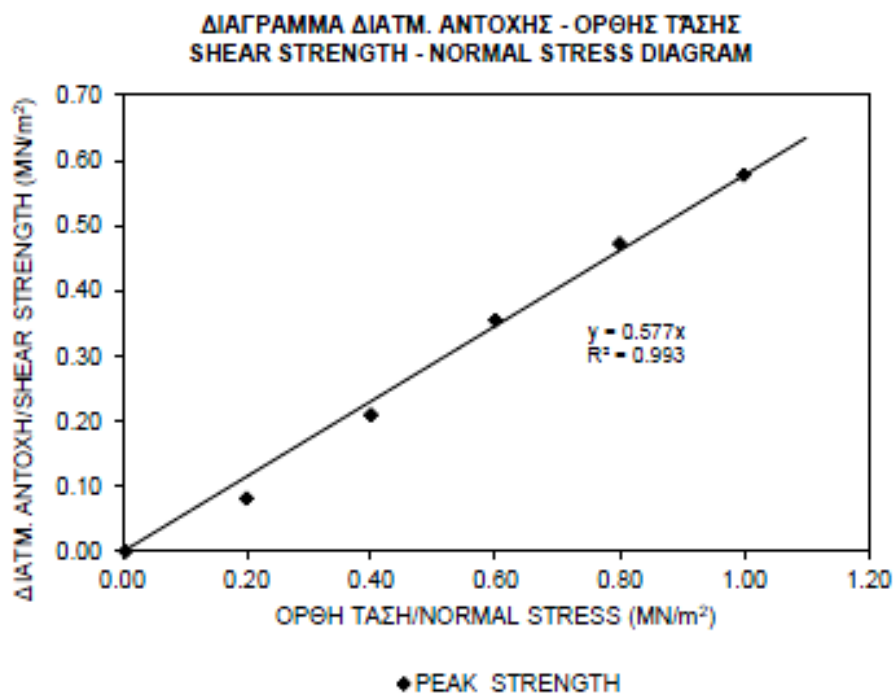
Η δοκιμή άμεσης διάτμησης πραγματοποιήθηκε σε 5 στάδια. Σε κάθε στάδιο το δείγμα υποβλήθηκε αντίστοιχα σε διαφορετικό μέγεθος φόρτισης. Μετατόπιση κατά ποσοστό 10% του μήκους δοκιμίου σηματοδοτεί και τη λήξη του κάθε σταδίου. Οι τάσεις που ασκήθηκαν κατά την εκτέλεση της δοκιμής διαμόρφωσαν το τελικό διάγραμμα διατμητικής αντοχής (τ)-ορθής τάσης (σ_n) από την οποία προέκυψαν οι τιμές συνοχής c και γωνίας τριβής ϕ . Τα δεδομένα και αποτελέσματα της δοκιμής παρουσιάζονται στους επόμενους πίνακες (Πίνακες 1-3).

Πίνακας 1: Διαστάσεις βραχώδους δοκιμίου L_M .

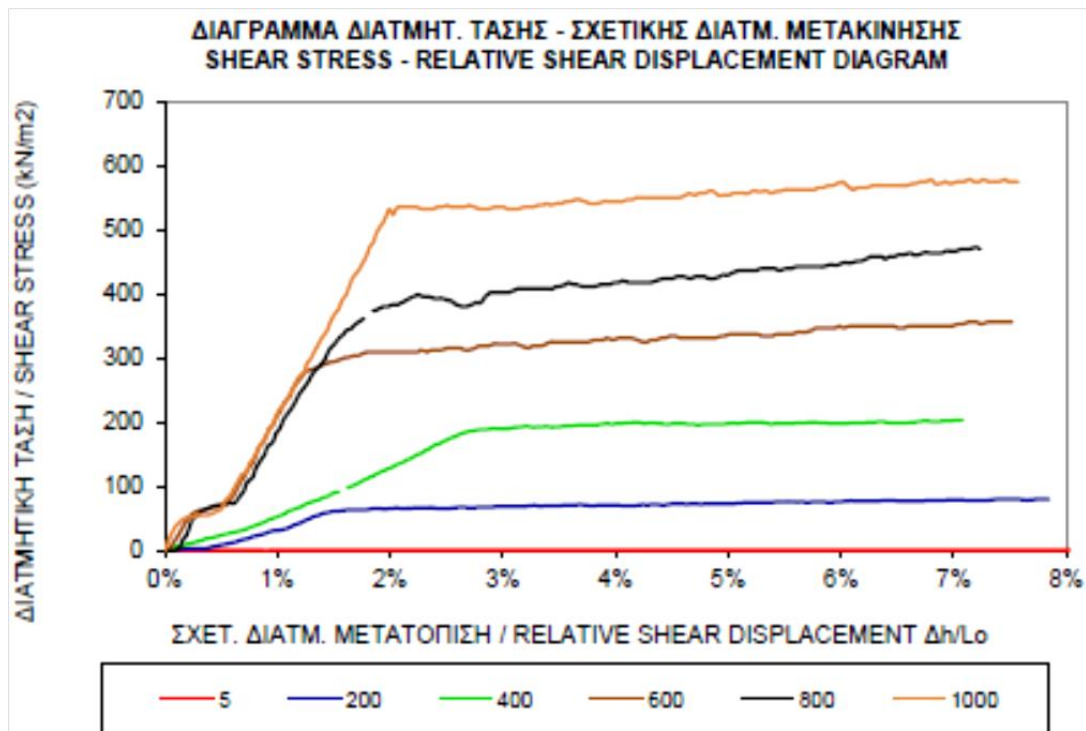
Βάρος δοκιμίου W (gr)	2.044
Μήκος μεγάλου άξονα L_T (mm)	77
Μήκος μικρού άξονα L_B (mm)	77,55

Πίνακας 2: Αντιστοίχιση τάσεων και μετατοπίσεων του δοκιμίου L_M στη δοκιμή άμεσης διάτμησης.

No	Ορθή τάση (Kappa)	Πίεση μικρής αντλίας (Kappa)	Διατμητική μετατόπιση (mm)
1	200	234,22	15,37
2	400	644,27	15,42
3	600	1003,99	15,03
4	800	1363,71	15,78



Σχήμα 5.1: Διάγραμμα Διατμητικής αντοχής (τ)- Ορθής τάσης βραχώδους δοκιμίου (σ_n) L_M .



Σχήμα 5.2: Διάγραμμα διατμητικής τάσης- Σχετικής διατμητικής μετατόπισης βραχώδους δοκιμίου L_M .

Πίνακας 3: Αποτελέσματα δοκιμής άμεσης διάτμησης ασυνέχειας βραχώδους δοκιμίου L_M .

Ορθή τάση (σ_n) (KPa)	Διατμητική τάση (τ) (MPa)
	Μέγιστη (peak)
5	0.001
200	0.082
400	0.210
600	0.355
800	0.473
1000	0.578
Συνοχή c (Kappa)	0.0
Γωνία τριβής ϕ_b (°)	30

5.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ ΑΣΤΟΧΙΑΣ BARTON-BANDIS

Προτού προχωρήσουμε στην κινηματική ανάλυση και τον προσδιορισμό συντελεστού ασφαλείας, απαραίτητος χρήζεται ο προσδιορισμός των συντελεστών που ορίζουν για κάθε οικογένεια ασυνεχειών τη διατμητική τους αντοχή. Η διατμητική αντοχή εκφράζεται μέσω 2 συντελεστών: της συνοχής c και της γωνίας τριβής ϕ .

Οι συντελεστές διατμητικής αντοχής ορίζονται εμμέσως από το κριτήριο αστοχίας του Barton. Από την επίλυση του κριτηρίου προκύπτουν οι τιμές της διατμητικής τάσης τ εν συναρτήσει των τιμών της ορθής τάσης σ_n και οι οποίες μαζί ορίζουν το διάγραμμα τ - σ_n . Πάνω στο διάγραμμα τ - σ_n προσδιορίζονται στη συνέχεια γραφικά οι συντελεστές διατμητικής αντοχής c και ϕ . Το κριτήριο αστοχίας του Barton-Bardis (1990) επιλύεται ξεχωριστά για κάθε οικογένεια ασυνεχειών.

$$\tau = \sigma_n \cdot \exp[\phi_b + JRC \log_{10} \frac{JCS}{\sigma_n}] \quad (\text{Κριτήριο αστοχίας Barton-Bardis, 1990})$$

όπου:

τ : Διατμητική τάση (MPa)

σ_n : Ορθή τάση (MPa)

ϕ_b : Γωνία τριβής (°)

JRC : Συντελεστής τραχύτητας ασυνέχειας

JCS : Συντελεστής αντοχής ασυνέχειας (MPa)

5.2.1 Προσδιορισμός συντελεστών διατμητικής αντοχής

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η επίλυση του κριτηρίου αστοχίας έγινε με τη χρήση του ειδικού λογισμικού Rocdata (Rocscience Inc). Για κάθε περίπτωση ασυνέχειας εισήχθησαν αντίστοιχα οι τιμές για τους εξής συντελεστές: γωνία τριβής ϕ_b , συντελεστές JRC και JCS (Πίνακας 4), μοναδιαίο βάρος γ και ύψος πρανού. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιήθηκαν αυτόματα στο μαθηματικό τύπο του κριτηρίου με αποτέλεσμα να προκύψουν τα αντίστοιχα διαγράμματα τ - σ_n αλλά και οι 2 ζητούμενες παράμετροι της διατμητικής αντοχής της ασυνέχειας.

Παρακάτω αναφέρονται ξεχωριστά τα αποτελέσματα για τις 4 οικογένειες ασυνεχειών για κάθε τιμή ύψους των επιμέρους αναβαθμών και των συνόλων των πρανών.* Διευκρινίζεται ότι σταθερές παραμένουν για κάθε περίπτωση οι τιμές των συντελεστών: γωνία τριβής ϕ_b (έχει υπολογιστεί μέσω της δοκιμής άμεσης διάτμησης) και μοναδιαίο βάρος άρρηκτου βράχου γ (εξαρτάται από το είδος του πετρώματος). Οι τιμές αυτών είναι:

$$\phi_b = 30^\circ, \quad \gamma = 0.026 \text{ MN/m}^3$$

Πίνακας 4: Τιμές συντελεστών JCS (αντοχή ασυνέχειας) και JRC (τραχύτητα ασυνέχειας) για κάθε διάκλαση.

Διάκλαση	JCS(MPa)	JRC
J1	80	14
J2	83	4
J3	62	4
J4	96	10

❖ Διάκλαση J₁ (81/251)

Δυτικό πρανές (70/130)

Πίνακας 5: Παράμετροι διατμητικής αντοχής για το σύστημα ασυνεχειών J₁.

Ύψος αναβαθμού-πρανού (m)	c (t/m ²)**	ϕ (°)
4	11,61 t/m ²	58,67°
36	22,31 t/m ²	50,72°
40	23,29 t/m ²	50,26°

Ανατολικό πρανές (70/290)

Πίνακας 6: Παράμετροι διατμητικής αντοχής για το σύστημα ασυνεχειών J₁.

Ύψος αναβαθμού-πρανού (m)	c (t/m ²)	ϕ (°)
6	12,68 t/m ²	58,76°
44	24,23 t/m ²	51,72°

50	25,60 t/m ²	51,18°
----	------------------------	--------

* (Τα διαγράμματα τ - σ_n επισυνάπτονται στο Παράρτημα).

** (Η συνοχή c εκφράζεται με 2 τιμές αντίστοιχα για κάθε μονάδα μέτρησης. Αν και πιο διαδεδομένη μονάδα μέτρησης αποτελεί η μονάδα μέτρησης πίεσης MPa, για την επίλυση του κριτηρίου αστοχίας χρησιμοποιήθηκε η μονάδα t/m².)

❖ Διάκλαση J₂ (46/028)

Δυτικό πρανές (70/130)

Πίνακας 7: Παράμετροι διατμητικής αντοχής για το σύστημα ασυνεχειών J₂.

Ύψος αναβαθμού-πρανούς (m)	c (t/m ²)	ϕ (°)
4	0,228 t/m ²	41,02°
36	1,47 t/m ²	37,61°
40	1,61 t/m ²	37,44°

Ανατολικό πρανές (70/290)

Πίνακας 8: Παράμετροι διατμητικής αντοχής για το σύστημα ασυνεχειών J₂.

Ύψος αναβαθμού-πρανούς (m)	c (t/m ²)	ϕ (°)
6	0,321 t/m ²	40,39°
44	1,74 t/m ²	37,29°
50	1,94 t/m ²	37,09°

❖ Διάκλαση J₃ (67/032)

Δυτικό πρανές (70/130)

Πίνακας 9: Παράμετροι διατμητικής αντοχής για το σύστημα ασυνεχειών J₃.

Ύψος αναβαθμού-πρανούς (m)	c (t/m ²)	ϕ (°)
4	0,223 t/m ²	40,52°
36	1,41 t/m ²	37,11°
40	1,58 t/m ²	36,94°

Πίνακας 10: Παράμετροι διατμητικής αντοχής για το σύστημα ασυνεχειών J₃.

Ύψος αναβαθμού-πρανούς (m)	c (t/m ²)	φ (°)
6	0,315 t/m ²	39,89°
44	1,71 t/m ²	36,80°
50	1,91 t/m ²	36,60°

❖ Διάκλαση J₄ (79/077)

Δυτικό πρανές (70/130)

Πίνακας 11: Παράμετροι διατμητικής αντοχής για το σύστημα ασυνεχειών J₄.

Ύψος αναβαθμού-πρανούς (m)	c (t/m ²)	φ (°)
4	2,06 t/m ²	56,24°
36	7,64 t/m ²	48,56°
40	8,19 t/m ²	48,17°

Ανατολικό πρανές (70/290)

Πίνακας 12: Παράμετροι διατμητικής αντοχής για το σύστημα ασυνεχειών J₄.

Ύψος αναβαθμού-πρανούς (m)	c (t/m ²)	φ (°)
6	2,55 t/m ²	54,89°
44	8,73 t/m ²	47,82°
50	9,51 t/m ²	47,35°

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΟΥΣ

6.1 ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ- ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΙΘΑΝΩΝ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

Για την εξέταση δυνητικών αστοχιών στο μέτωπο του πρανούς απαιτείται η προβολή των ορισμένων συστημάτων ασυνεχειών και της επιφάνειας του πρανούς με τη μορφή μέγιστων κύκλων καθώς και η προβολή της γωνίας τριβής ως κύκλος στο δίκτυο Schmidt. Η προβολή των προηγούμενων στο δίκτυο Schmidt μας δίνει τη δυνατότητα να εξετάσουμε κάθε πιθανότητα δημιουργίας εκείνων των προϋποθέσεων που ευνοούν αντίστοιχα κάθε μηχανισμό αστοχίας (§4.2).

Στις επόμενες παραγράφους εξετάζεται κάθε περίπτωση δυνητικής ολίσθησης ξεχωριστά για τα δύο μελετούμενα πρανή και κατ'επέκταση ο τύπος συμπεριφοράς (ισότροπη, ανισότροπη) που παρουσιάζουν οι βραχώμαζες αντίστοιχα στα πρανή.

6.1.1 Ανάλυση μηχανισμών αστοχίας στο Δυτικό πρανές

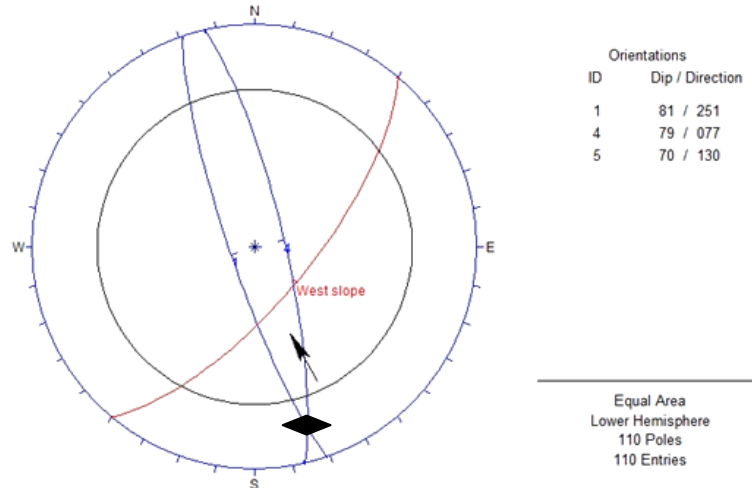
Στο πλαίσιο της κινηματικής ανάλυσης εξετάστηκαν πιθανές κινήσεις ή ολίσθησεις σε ένα επίπεδο ασυνέχειας (επίπεδη, ανισότροπη ολίσθηση), κατά μήκος της τομής δύο επιπέδων ασυνεχειών (σφηνοειδής ολίσθηση) ή και κατά μήκος μιας μη καθορισμένης επιφάνειας (κυκλική ολίσθηση).

Για τα τέσσερα συστήματα ασυνεχειών που επικρατούν στα πρανή (§5.2.1) και για κάθε τύπο αστοχίας έγινε η δοκιμή Markland (Hoek and Bray, 1981) χρησιμοποιώντας ως δεδομένα, πέρα από τα στοιχεία προσανατολισμού των ασυνεχειών, τα στοιχεία προσανατολισμού του πρανούς και τη γωνία τριβής. Ταυτόχρονα και ανεξάρτητα από τη δοκιμή Markland χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά Rocplane, Swedge, Slide, Unwedge (Rocscience Inc.) προς επιβεβαίωση και γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων.

Πίνακας 1: Τεκτονικά στοιχεία των κύριων συστημάτων ασυνεχειών.

J	Γωνία κλίσης (°)	Διεύθυνση κλίσης (°)
1	81	251
2	46	028
3	67	032
4	75	077

Όπως διαπιστώθηκε, οι επιφάνειες των κύριων ασυνεχειών δεν παρουσιάζουν επιδεκτικότητα ως προς κυκλική, επίπεδη και υπό ανατροπή ολίσθηση στο μέτωπο του πρανούς με στοιχεία προσανατολισμού 70/130 καθώς δεν πληρούνται οι προϋποθέσεις που υποδεικνύονται μέσω της **δοκιμής Markland**. Ωστόσο, επιδεκτικότητα σε ολίσθηση τεμάχους δείχνει το ζεύγος **J₁(81/251)- J₄(75/077)**, το οποίο δεν πληρεί τις προϋποθέσεις για τη δημιουργία σφήνας, καθώς η γωνία τομής ϕ_t είναι μεγαλύτερη της γωνίας του πρανούς.



Σχήμα 6.1: Στερεογραφική προβολή. Με βέλος υποδεικνύεται η σφήνα που δημιουργείται από τα δύο συστήματα ασυνεχειών. Το ζεύγος διακλάσεων δεν πληρεί τις προϋποθέσεις. Ο κύκλος αναπαριστά τη γωνία τριβής ϕ_b του πρανού και οι μέγιστοι κύκλοι τις επιφάνειες (με κόκκινο χρώμα σημειώνεται το μέτωπο του πρανού). Ο ρόμβος δείχνει την γωνία τομής ϕ_t . (1-4: Ζεύγος ασυνεχειών, 5: Δυτικό πρανές)

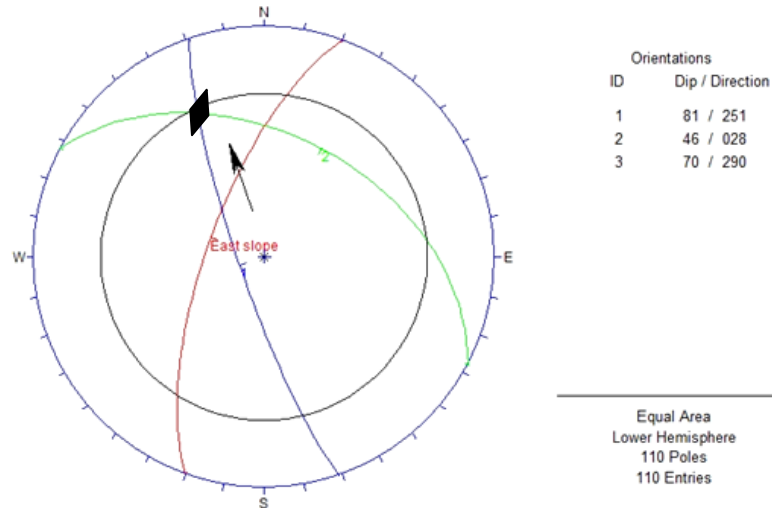
6.1.2 Ανάλυση μηχανισμών αστοχίας στο ανατολικό πρανές

Όπως στην προηγούμενη παράγραφο, οι δυνητικές ολισθήσεις εξετάστηκαν χρησιμοποιώντας τις ίδιες μεθόδους και για το πρανές με στοιχεία προσανατολισμού (70/290). Κάθε μηχανισμός αστοχίας εξετάστηκε αντίστοιχα για τα τέσσερα κύρια συστήματα ασυνεχειών.

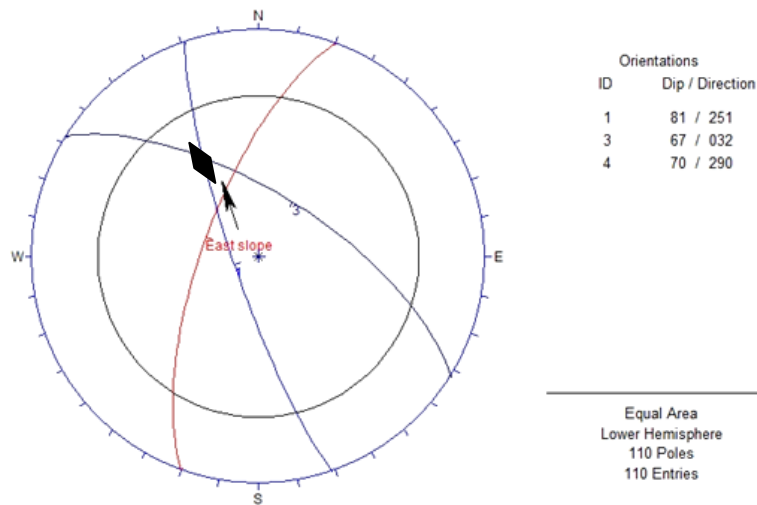
Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για το "ανατολικό" πρανές συμπίπτουν με όσα διατυπώθηκαν προηγουμένως για την περίπτωση του "δυτικού" πρανού. Αυτό σημαίνει ότι στο μέτωπο του συγκεκριμένου πρανού δεν είναι δυνατόν να προκληθεί κυκλική, επίπεδη και υπό ανατροπή ολίσθηση, δείχνοντας ότι το ασβεστολιθικό πρανές δεν εκδηλώνει ούτε ισότροπη ούτε ανισότροπη (όσον αφορά την επίπεδη και υπο ανατροπή ολίσθηση) συμπεριφορά. Παρ'όλα αυτά, το πρανές παρουσιάζει ανισότροπη συμπεριφορά, μιας και τα εξής τέσσερα ζεύγη επιφανειών δείχνουν επιδεκτικότητα προς δημιουργία σφήνας κατά το επίπεδο της τομής τους.

$$J_1-J_2, J_1-J_3, J_2-J_3, J_2-J_4$$

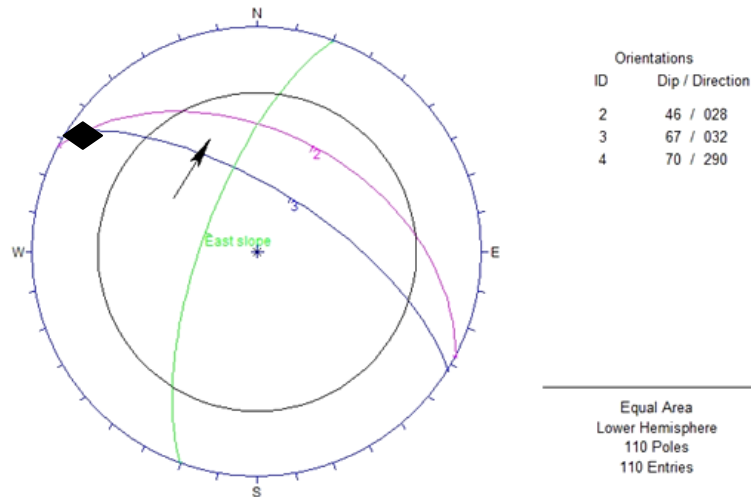
Με βάση τη **δοκιμή Markland**, οι προϋποθέσεις σφηνοειδούς ολίσθησης καλύπτονται μόνο για τα ζεύγη J_1-J_2 και J_2-J_4 . Για τα άλλα δύο ζεύγη όπως παρατηρείται δεν ισχύει η ανισότητα $\phi_\pi > \phi_t > \phi$, καθώς η γωνία τομής ϕ_t είναι μεγαλύτερη της γωνίας του πρανού.



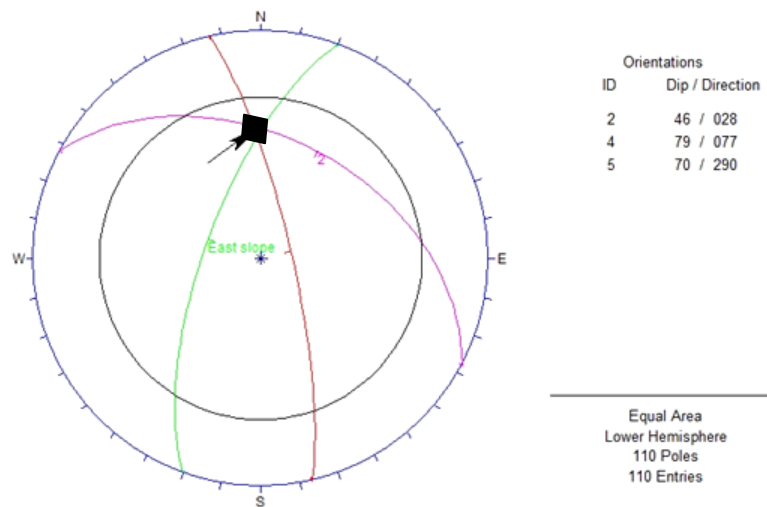
Σχήμα 6.2: Στερεογραφική προβολή. Με βέλος υποδεικνύεται η σφήνα που δημιουργείται από τα δύο συστήματα ασυνεχειών. Ο κύκλος αναπαριστά τη γωνία τριβής ϕ_π του πρανούς, με ρόμβο η γωνία τομής ϕ_τ των ασυνεχειών και οι μέγιστοι κύκλοι τις επιφάνειες: με κόκκινο χρώμα σημειώνεται το μέτωπο του πρανούς. (1-2: Ζεύγος ασυνεχειών που δημιουργεί σφήνα, 3: ανατολικό πρανές).



Σχήμα 6.3: Στερεογραφική προβολή. Με βέλος υποδεικνύεται η σφήνα που δημιουργείται αλλά δεν πληρεί τις προϋποθέσεις της δοκιμής Markland. Ο κύκλος αναπαριστά τη γωνία τριβής ϕ_π του πρανούς και οι μέγιστοι κύκλοι τις επιφάνειες (με κόκκινο χρώμα το μέτωπο του πρανούς). Ο ρόμβος δείχνει τη γωνία τομής ϕ_τ των δύο ασυνεχειών. (1-3: Ζεύγος ασυνεχειών που δημιουργεί σφήνα, 4: ανατολικό πρανές).



Σχήμα 6.4: Στερεογραφική προβολή. Με βέλος υποδεικνύεται η σφήνα που δημιουργείται από τα δύο συστήματα ασυνεχειών, η οποία όμως δεν πληρεί τις προϋποθέσεις προς ολίσθηση της. Ο κύκλος αναπαριστά τη γωνία τριβής ϕ_π του πρανούς, ο ρόμβος τη γωνία τομής ϕ_τ και οι μέγιστοι κύκλοι τις επιφάνειες (με πράσινο χρώμα φαίνεται το μέτωπο του πρανούς). (2-3: Ζεύγος ασυνεχειών που δημιουργεί σφήνα, 4: ανατολικό πρανές)



Σχήμα 6.5: Στερεογραφική προβολή. Με βέλος υποδεικνύεται η σφήνα που δημιουργείται από τα δύο συστήματα ασυνεχειών. Ο κύκλος αναπαριστά τη γωνία τριβής ϕ_π του πρανούς οι μέγιστοι κύκλοι τις επιφάνειες και ο ρόμβος τη γωνία τομής ϕ_τ . (2-4: Ζεύγος ασυνεχειών που δημιουργεί σφήνα, 5: ανατολικό πρανές).

6.2 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΣΦΗΝΟΕΙΔΩΝ ΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ

Έχοντας διερευνήσει κάθε δυνατό μηχανισμό αστοχίας που μπορεί να πυροδοτήσει αστάθεια και πιο συγκεκριμένα κίνηση και ολίσθηση των βραχωδών τεμαχών, καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι ο μοναδικός τύπος αστοχίας για τα μελετούμενα πρανή είναι οι **σφηνοειδείς αποκολλήσεις**, δηλαδή η δημιουργία και αποκόλληση βραχώδων σφηνών πάνω στο επίπεδο το οποίο ορίζεται από την τομή δύο διασταυρούμενων επιφανειών ασυνεχειών.

Ωστόσο, η ανάλυση της ευστάθειας πρανούς δε σταματά εδώ. Θα πρέπει να οριστούν οι συνθήκες κατά τις οποίες αναμένεται να ευνοηθούν πτώσεις και ολίσθησεις τεμαχών προκειμένου να γίνεται έγκαιρα η πρόληψη και αντιμετώπιση τους. Οι συνθήκες που θα εξεταστούν για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας (**F**) είναι:

- Το μέγεθος των σεισμικών δονήσεων στην περιοχή μελέτης.
- Η απουσία ή παρουσία νερού σε ρωγμές και διακλάσεις. (Ενδεχόμενο καρστικοποίησης της ασβεστολιθικής βραχώμαζας).
- Η παρουσία εδαφικού υλικού ως υλικό πλήρωσης.

Ο συντελεστής ασφάλειας υπολογίστηκε μέσω του προγράμματος Swedge εισάγοντας ως δεδομένα τα τεκτονικά στοιχεία (γωνία κλίσης/διεύθυνση κλίσης), τη συνοχή **c**, τη γωνία τριβής **φ** κάθε επιπέδου ασυνέχειας, τα τεκτονικά στοιχεία του πρανούς και του ανώτερου τμήματος τους (γωνία κλίσης στο ανώτερο τμήμα = 5°), το ύψος **h** επιμέρους αναβαθμού/ συνόλου του πρανούς και το μοναδιαίο βάρος του ασβεστόλιθου ($\gamma = 2,65 \text{ t/m}^3$). Προκειμένου να προσδιοριστεί όσο το δυνατό σαφέστερα, για κάθε ζεύγος διακλάσεων αναφέρονται οι εξής περιπτώσεις:

- 1) Απουσία δυνάμεων ώθησης προς ολίσθηση τεμαχών.
- 2) Παρουσία νερού σε ρωγμές και διακλάσεις.
- 3) Δυνατότητα εκδήλωσης σεισμικού φαινομένου με σεισμικό συντελεστή ίσο με 1,6.
- 4) Συνδυασμός των προηγούμενων περιπτώσεων.

Ανατολικό πρανές ($70^\circ/290^\circ$) - Διακλάσεις J_1 - J_2

Πίνακας 2: Τιμές συντελεστού ασφαλείας για το ζεύγος ασυνεχειών J_1 - J_2 αναφορικά με τις υδρολογικές και σεισμικές συνθήκες στην περιοχή. Με έντονα γράμματα σημειώνονται οι μη αποδεκτές τιμές.

	Παρουσία νερού	-	-	+	+
	Σεισμικός παράγοντας	-	+	-	+
J_1 - J_2	6m	12.04	3.00	10.12	2.52
	44m	5.00	1.24	3.44	0.86
	50m	4.80	1.24	3.27	0.81

Σφηνοειδής αποκόλληση αναμένεται να εκδηλωθεί στα 44m και στα 50m. Για την αποφυγή αυτής της περίπτωσης, συνίσταται να τοποθετηθούν ορισμένα μέτρα

αντιστήριξης, όπως αγκυρώσεις, προκειμένου να εξασφαλιστεί η συγκράτηση επιφανών τεμαχών, καθώς και αποστραγγιστικές οπές για τη μείωση της πίεσης πόρων.

Ανατολικό πρανές (70°/290°) – Διακλάσεις J₂-J₄

Πίνακας 3: Τιμές συντελεστού ασφαλείας για το ζεύγος ασυνεχειών J₂- J₄ αναφορικά με τις υδρολογικές και σεισμικές συνθήκες στην περιοχή. Με έντονα γράμματα σημειώνονται οι μη αποδεκτές τιμές.

	Παρουσία νερού	-	-	+	+
	Σεισμικός παράγοντας	-	+	-	+
J ₂ -J ₄	6m	15.51	4.55	0	0
	44m	8.29	2.43	0	0
	50m	8.01	2.35	0	0

Απαιτείται τοποθέτηση αποστραγγιστικών σωλήνων για την απομάκρυνση του νερού, που διεισδύει στις διακλάσεις, και περιμετρικής τάφρου για την εκτροπή του νερού προς διαφορετικές κατευθύνσεις. Αναγκαία κρίνεται επίσης η τοποθέτηση αγκυρώσεων ενώ συνίσταται και η τοποθέτηση βραχοπαγιδών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η τεχνικογεωλογική αξιολόγηση μέσω της κινηματικής ανάλυσης της ευστάθειας σε ένα βραχώδες πρανές, με τη λήψη τόσο επί τόπου μετρήσεων γεωμετρίας και αντοχής, όσο και μετρήσεων με μεθόδους τηλεπισκόπησης- Lidar. Το υπό μελέτη πρανές τοποθετείται στο παλιό εργοτάξιο του ομίλου TITAN στην περιοχή Ευκαρπίας. Τα ασβεστολιθικής σύστασης πρανή εξετάστηκαν με επί τόπου μετρήσεις με γεωλογική πυξίδα, προφιλόμετρο και σφύρα Schmidt και μετρήσεις με τη χρήση του επίγειου σαρωτή Lidar. Καταλήγοντας, έγινε προσδιορισμός του συντελεστή ασφαλείας και δόθηκαν προτεινόμενα μέτρα αντιστήριξης για την αντιμετώπιση πιθανών μελλοντικών αστοχιών.

Η αξιολόγηση, η εξέταση και ακολούθως η ανάλυση των συνθηκών οι οποίες κρίνουν την ευστάθεια του πρανούς διεκπεραιώθηκε με τις εξής μεθόδους: α) Επί τόπου αξιολόγηση και λήψη μετρήσεων με τη χρήση οργάνων (γεωλογική πυξίδα, σφυρί τύπου Schmidt, προφιλόμετρο), β) Αυτόματοποιημένος προσδιορισμός των στοιχείων προσανατολισμού των επιφανειών των πρανών μέσω του επίγειου σαρωτή Lidar και γ) Εκτέλεση δοκιμής άμεσης διάτμησης ασυνέχειας σε δείγμα ασβεστολιθικού υλικού.

Από τις επί τόπου μετρήσεις και τις μετρήσεις του επίγειου σαρωτή βρέθηκαν οι σημαντικότερες ομάδες ασυνεχειών για δύο πρανή, οι οποίες δύνανται να παρουσιάσουν ολίσθηση τεμαχών. Συγκρίνοντας αυτές μεταξύ τους, συμπεράναμε ότι δεν υπάρχει μεταξύ τους ταύτιση αλλά ότι παρατηρείται καλή συσχέτιση μεταξύ των αντίστοιχων κύριων οικογενειών ασυνεχειών. Για το λόγο αυτό, για την ανάλυση της ευστάθειας των δύο πρανών χρησιμοποιήθηκαν οι ληφθείσες επί τόπου μετρήσεις ως περισσότερο αξιόπιστες σε σχέση με τις μετρήσεις του επίγειου σαρωτή.

Στη συνέχεια, εφαρμόστηκε κινηματική ανάλυση για τα τέσσερα κύρια συστήματα ασυνεχειών (προβολή στερεοδιαγραμμάτων με το λογισμικό Dips της Rocscience. Ως κύριος και μοναδικός πιθανός μηχανισμός αστοχίας βρέθηκε να είναι η σφηνοειδής ολίσθηση τόσο στο Δυτικό όσο και στο Ανατολικό πρανές. Εκτελέστηκε δοκιμή άμεσης διάτμησης επάνω σε δείγμα από τη θέση μελέτης για τον προσδιορισμό της γωνίας τριβής λείας επιφάνειας ασυνέχειας και εφαρμόστηκε το κριτήριο του Barton-Bandis (με τη χρήση του λογισμικού Rocdata, Rocscience). Στη συνέχεια, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις συνθήκες που μπορεί να υφίσταται το κάθε πρανές και σε συνάρτηση με τα επιμέρους στοιχεία των ασυνεχειών, υπολογίστηκε ο συντελεστής ασφαλείας για όλα τα ζεύγη ασυνεχειών, χρησιμοποιώντας το λογισμικό Swedge (Rocscience Inc.).

Τέλος, από τον προσδιορισμό του συντελεστή ασφαλείας αντίστοιχα για κάθε ζεύγος διακλάσεων στα δύο πρανή, καταλήξαμε ότι δεν παρουσιάζονται ιδιαίτερα προβλήματα αστοχιών για τα οποία παρ'όλα αυτά προτάθηκαν μέτρα αντιστήριξης. Εξαίρεση αποτέλεσε η περίπτωση του ζεύγους διακλάσεων J₂-J₄ στο Ανατολικό πρανές (70°/290°), όπου ο πολύ χαμηλός συντελεστής ασφαλείας υποδεικνύει την άμεση παρέμβαση στο πρανές με την τοποθέτηση συγκεκριμένων μέτρων αντιστήριξης.



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ:

Βιβλία- Εργασίες:

- Θ. Αστάρας, 2011, Τηλεπισκόπηση-Φωτοερμηνεία στις γεωεπιστήμες, Εκδόσεις Αϊβάζη, Θεσσαλονίκη, pp. 152.
- Γ. Δημόπουλος, 2007, Γεωλογικές μελέτες τεχνικών έργων-Υδρογεωλογικές μελέτες, Εκδοτικός οίκος Αδελφών Κυριακίδη, Θεσσαλονίκη, pp. 254-261.
- Α.Σ. Ζερβοπούλου, 2010, Νεοτεκτονικά ρήγματα της ευρύτερης περιοχής της Θεσσαλονίκης σε σχέση με τα εδάφη θεμελίωσης, Διδακτορική διατριβή, Αριστοτέλειο πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Γεωλογίας, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα.
- Μ.Καλπογιαννάκη, 2013, Εκτίμηση φυσικών παραμέτρων και παραμέτρων αντοχής βραχώδους, Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Εφαρμοσμένης Γεωλογίας & Γεωφυσικής, Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας, Πάτρα, Ελλάδα.
- Π. Κάτσικα, 2013, Ευστάθεια υψηλών πρανών σε ασβεστολιθική βραχώμαζα. Εφαρμογή σε περιοχές υψηλού κινδύνου της Ε.Ο. Πατρών-Τριπόλεως, Διατριβή Ειδίκευσης, Πανεπιστήμιο Πατρών, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Εφαρμοσμένης Γεωλογίας, Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας, Πάτρα, Ελλάδα.
- Γ.Χ. Κούκης, Ν.ΣΤ. Σαμπατακάκης, 2007, Γεωλογία τεχνικών έργων, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, pp. 223-294.
- Γ.Χ. Κούκης, Ν.ΣΤ. Σαμπατακάκης, 2002, Τεχνική Γεωλογία, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, pp. 381-435, 445-504.
- Μαρίνος, Β.Π., 2007, Γεωτεχνική ταξινόμηση και τεχνικογεωλογική συμπεριφορά ασθενών και σύνθετων γεωυλικών κατά τη διάνοιξη σηράγγων, Διδακτορική διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο πολυτεχνείο (ΕΜΠ), Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Γεωτεχνικής, Αθήνα, Ελλάδα.
- Κ. Παπαθεοδώρου, 2015, Γενική και εφαρμοσμένη γεωλογία-Θεωρία και εφαρμογές σε μικρά τεχνικά έργα, Βοηθητικές σημειώσεις, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κεντρικής Μακεδονίας, Τμήμα Γεωπληροφορικής και Τοπογραφίας Τ.Ε., Σέρρες, Ελλάδα.
- Ι. Τσεπκεντζής, Ιανουάριος 2010, Προκαταρκτική μελέτη γεωλογικής καταλληλότητας στα πλαίσια της μελέτης τροποποίησης γενικού πολεοδομικού σχεδίου Δήμου Πολίχνης Νομού Θεσσαλονίκης,
- Β. Χρηστάρας, Μ. Χατζηαγγέλου, 2011, Απλά βήματα στην εδαφομηχανική, Εκδοτικός οίκος University studio press, Θεσσαλονίκη, pp. 131-140.



- Η. Χατζάκη, 2010, Διερεύνηση της κατολίσθησης στον οικισμό Λαμπιρίου Δήμου Ζηριάς Νομού Αχαΐας, Πτυχιακή εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Εφαρμοσμένης Γεωλογίας και Γεωφυσικής, Πάτρα, Ελλάδα.

Δημοσιεύσεις:

- Α. Ζερβοπούλου, Σ. Παυλίδης, Ιανουάριος 2005, Μορφοτεκτονική μελέτη της ευρύτερης περιοχής Θεσσαλονίκης για τη χαρτογράφηση νεοτεκτονικών ρηγμάτων, Δελτίο Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, Τομ. XXXVII.
- Β. Μαρίνος, Π. Μαρίνος, Ε. Hoek, 2004, Γεωλογικός δείκτης αντοχής GSI. εφαρμογή, συστάσεις, περιορισμοί και πεδία μεταβολών ανάλογα με τον τύπο του πετρώματος, Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας τομ. XXXVI, Πρακτικά 10ου Διεθνούς Συνεδρίου, Θεσσαλονίκη Απρίλιος 2004, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ελλάδα.
- Α. Zervopoulou, S. Pavlides, Μάιος 2016, Geological mapping in urban areas. A case study from the inner city of Thessaloniki, Greece, Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, Τόμ. L, σελ. 1027-1036, Πρακτικά 14^{ου} Διεθνούς Συνεδρίου, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα.
- V. Zygouri, I. K. Koukouvelas, 2015, Evolution of rock falls in the Northern part of the Peloponnese, Greece, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (26), Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, Ελλάδα.

ΞΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ:

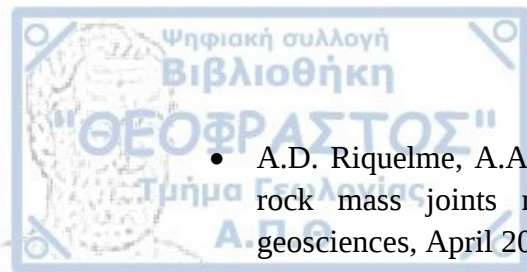
Βιβλία- Εργασίες:

- D.Brunsdan, D.B.Prior, Slope Instability, Wiley-Interscience Publications.
- G.P. Giani, 1992, Rock slope stability analysis, A.A.Balkema Publications.
- E.Hoek, 2007, Practical rock engineering.
- L.I. González de Vallejo, M. Ferrer, 2011, Geological Engineering, CRC Press/Balkema Publications.
- A. G. Riquelme, 2015, Uso de nubes de puntos 3D para identificación y caracterización de familias de discontinuidades planas en afloramientos rocosos y evaluación de la calidad geomecánica, Tesis doctoral, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Alicante, Alicante, España.

Δημοσιεύσεις:

- T.Jb. Dewez, D. Girardeau-Montaut, J. Rohmer, 2016, Facets: A Cloud Compare plugin to extract geological planes from unstructured 3D points, Congress ISPRS2016, Prague.

- S. G. Evans, R. H. Guthrie, et al, 2007, The disastrous 17 February 2006 rockslide-debris avalanche on Leyte Island, Philippines: a catastrophic landslide in tropical mountain terrain, Natural Hazards and Earth System Science, Copernicus Publications on behalf of the European Geosciences Union, pp.89-101.
- S.R. Hencher & L. R. Richards, 2014, Assessing the shear strength of rock discontinuities at laboratory and field scales, Rock mechanics and rock engineering, Vol. 48, No. 3, pp.883-905.
- Hoek, E. (1968) Brittle failure of rock. In: Rock Mechanics in Engineering Practice (eds K. G. Stagg and O. C. Zienkiewicz), John Wiley & Sons, London, pp. 99–124.
- E.Hoek, P.Londe, 1974, The design of rock slopes and foundations, General report for Third Congress of the International Society for Rock Mechanics, Denver.
- Tilahun Hamza , Tarun Kumar Raghuvanshi, 2016, GIS based landslide hazard evaluation and zonation– A case from Jeldu District, Central Ethiopia, Journal of King Saud University –Science, www.ksu.edu.sa.
- F. Lumio, 2004, Sequence of instability processes triggered by heavy rainfall in the Northern Italy, Geomorphology, Vol. 66, pp. 13-39.
- Markland, J. T., 1972, A useful technique for estimating the stability of rock slopes when the rigid wedge sliding type of failure is expected. Imperial College Rock Mechanics Research Report No. 19, 10.
- O. Meric, S. Garambois, et al., 2005, Application of geophysical methods for the investigation of the large gravitational mass movement of Séchilienne, France, NRC Research Press Web, pp. 1105-1115, www.cgj.nrc.ca.
- L. A. Owen, Ulrich Kamp, 2007, Landslides triggered by the 8 October 2005 Kashmir earthquake, Geomorphology, Vol. 94, pp. 1–9, www.elsevier.com/locate/geomorph.
- B. R. Paterson, 2010, Slope instability along State Highway 73 through Arthur's Pass, South Island, New Zealand, New Zealand Journal of Geology and Geophysics, Vol. 39, pp. 339-351, <http://www.tandfonline.com/loi/tnzg20>.
- G. Preisig, E. Eberhardt, et al., 2014, Hydromechanical Rock Mass Fatigue in Deep-Seated Landslides Accompanying Seasonal Variations in Pore Pressures, Rock Mechanics Rock Engineering, (2016), Vol. 49, pp. 2333–2351.
- A. Polat, I. Keskin, I. Denizli, 2015, Preventing and Analysis of Falling Rocks: A Case of Sarica Village (Gürün, Turkey), JOURNAL GEOLOGICAL SOCIETY OF INDIA, Vol.88, December 2016, pp.763-772.



- A.D. Riquelme, A. Abellan, et al., 2013, A new approach for semi-automatic rock mass joints recognition from 3-D point clouds, Computers and geosciences, April 2014.
- A.D. Riquelme, R. Tomás, et al., April 2018, Analysis of the persistence and normal spacing of discontinuities via 3D point clouds: a practical discussion, <https://www.researchgate.net/publication/325313656>.
- R. K. Umrao, R. Singh, 2016, Soil slope instability along a strategic road corridor in Meghalaya, north-eastern India, Rock Mechanics Rock Engineering, (2016), Vol. 49, pp. 2333–2351.
- A. Watlet, K. Olivier, A. Triantafyllou, April 2016, Comparison of 3D point clouds produced by LIDAR and UAV photoscan in the Rochefort cave (Belgium), <https://www.researchgate.net/publication/301547442>.

Διαδικτυακές πηγές:

<https://issuu.com/enggeoauth/docs>

<https://geo.auth.gr/courses>

<https://simigis.blogspot.gr>

<http://www.iitbhu.ac.in>

<https://repository.kallipos.gr>

<https://volcanoes.usgs.gov>

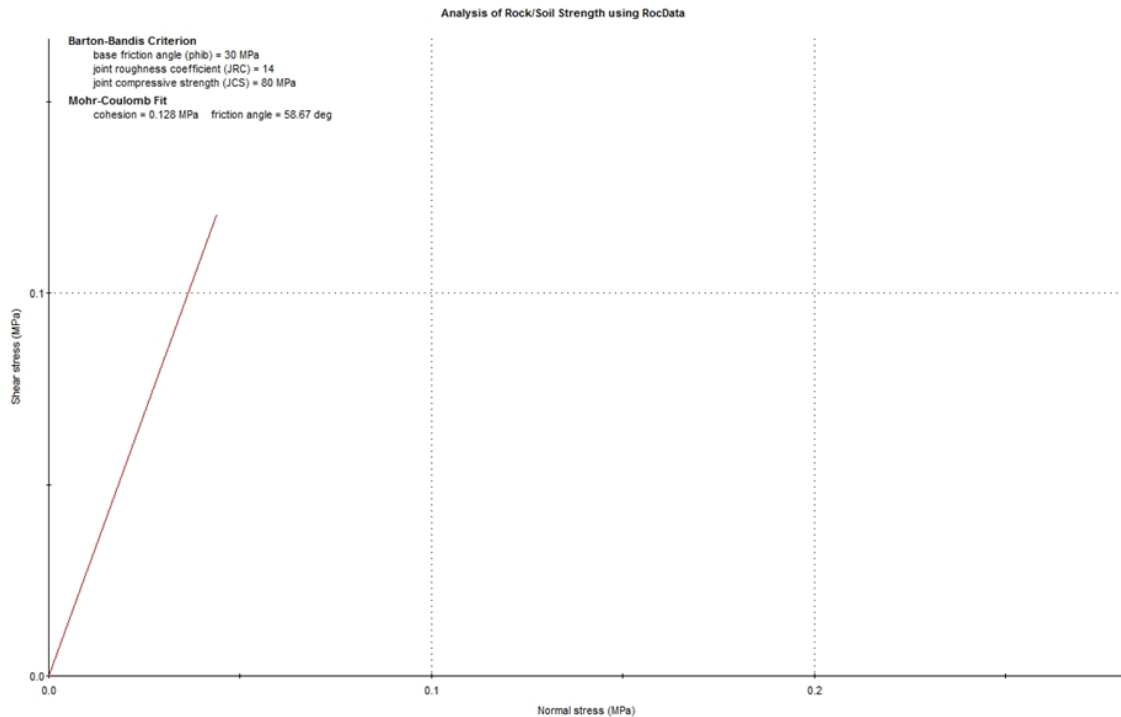
<http://www.legah.metal.ntua.gr>

<http://www.elebor.gr>

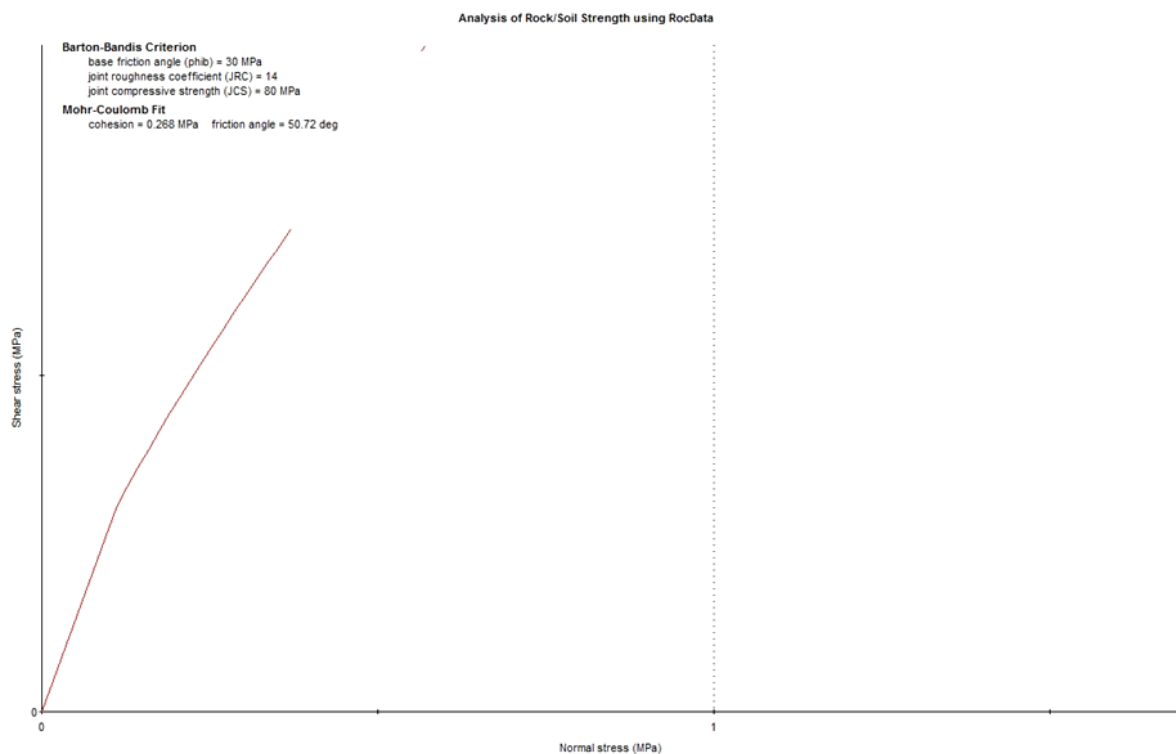
<https://wikivisually.com>

<http://currents.plos.org>

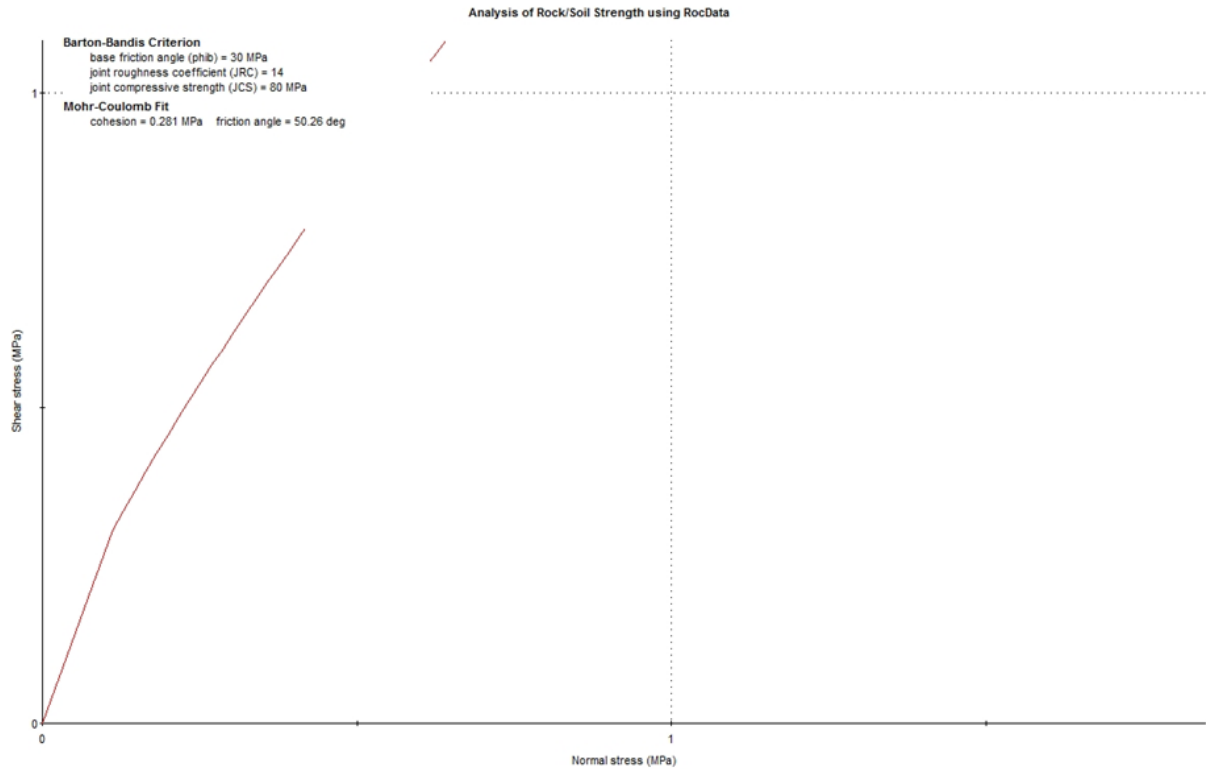
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ



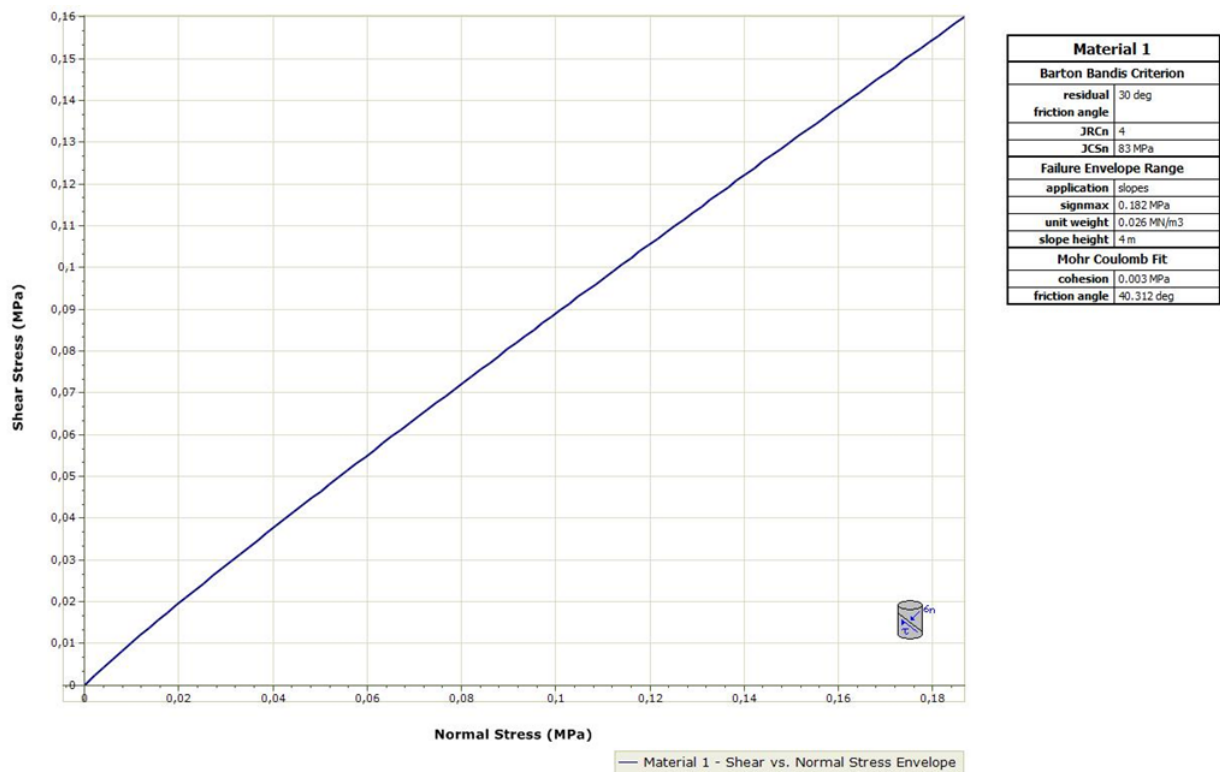
Σχήμα Ι: Διάγραμμα διατμητικής- (κάθετης) ορθής τάσης για το σύστημα ασυνεχειών J_1 στο δυτικό πρανές, για ύψος 4m.



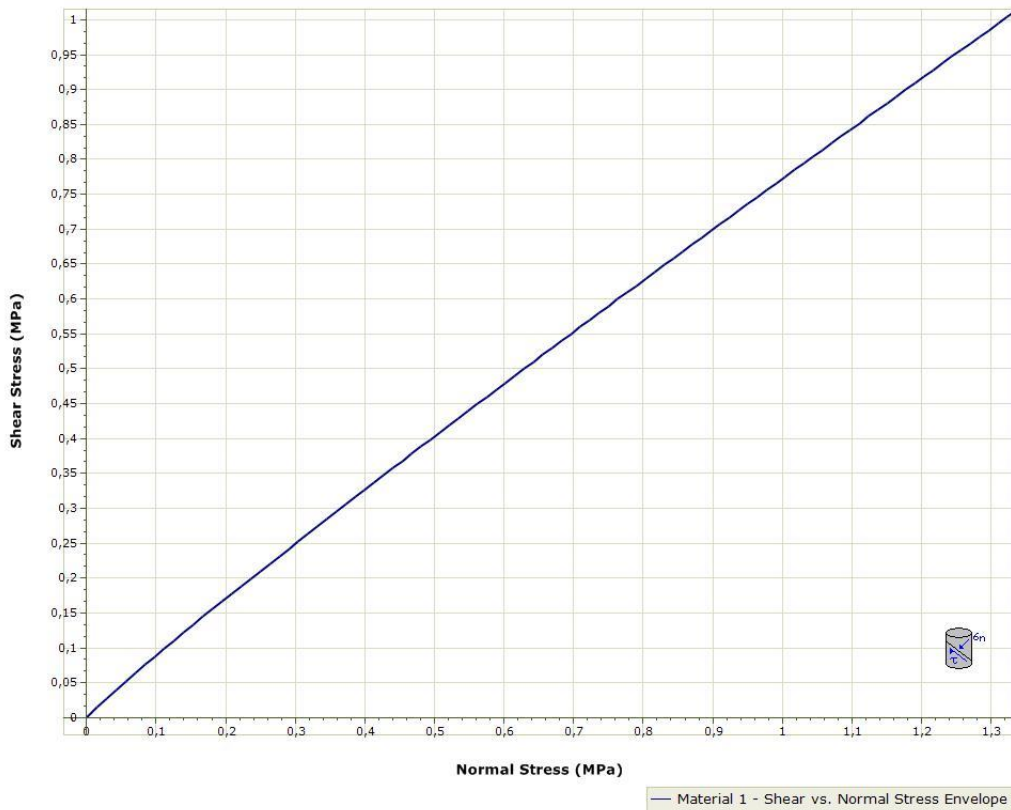
Σχήμα ΙΙ : Διάγραμμα διατμητικής- (κάθετης) ορθής τάσης για το σύστημα ασυνεχειών J_1 στο δυτικό πρανές, για ύψος 36m.



Σχήμα III : Διάγραμμα διατμητικής- (κάθετης) ορθής τάσης για το σύστημα ασυνεχειών J_1 στο δυτικό πρανές, για ύψος 40m.

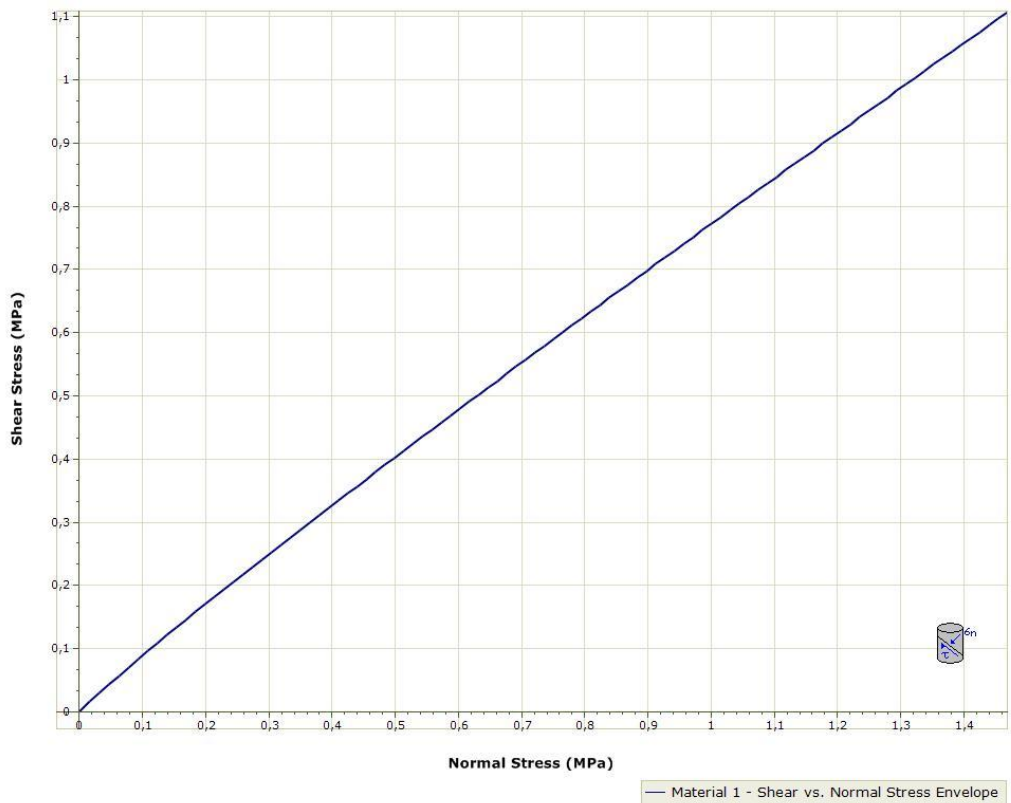


Σχήμα IV: Διάγραμμα διατμητικής- (κάθετης) ορθής τάσης για το σύστημα ασυνεχειών J_2 στο δυτικό πρανές, για ύψος 4m.



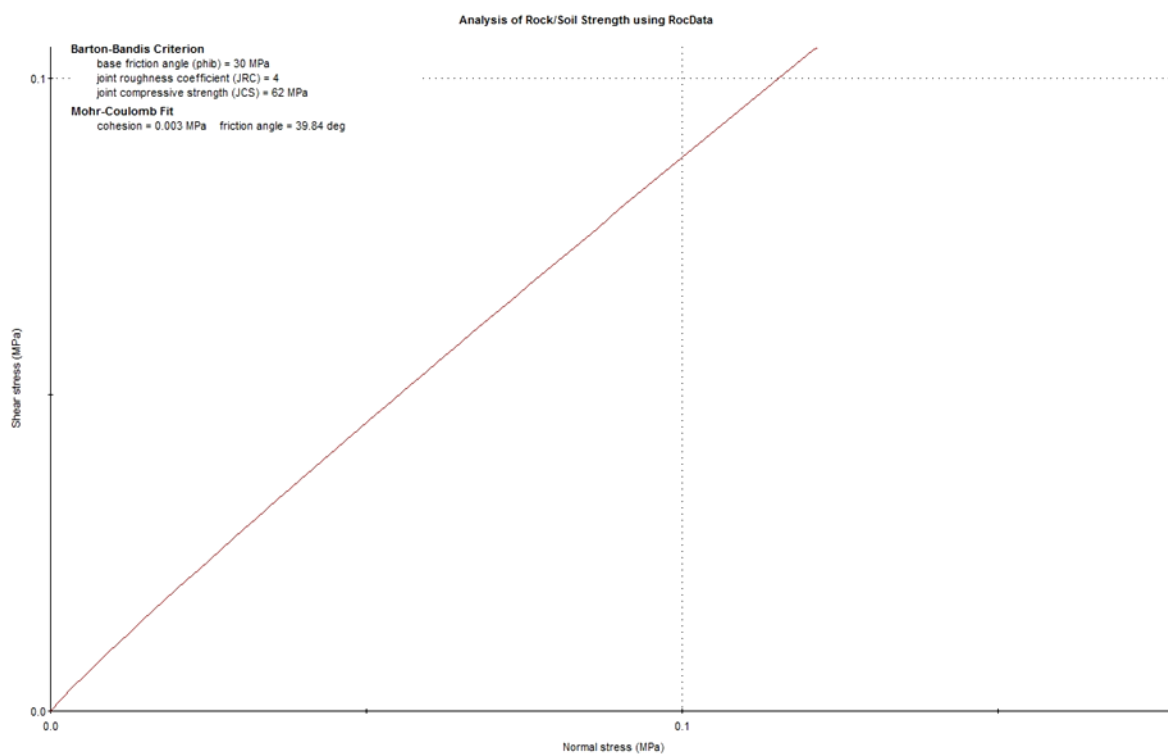
Material 1	
Barton Bandis Criterion	
residual friction angle	30 deg
JRCn	4
JCSn	83 MPa
Failure Envelope Range	
application	slopes
signmax	1.304 MPa
unit weight	0.026 MN/m ³
slope height	36 m
Mohr Coulomb Fit	
cohesion	0.022 MPa
friction angle	36.897 deg

Σχήμα V: Διάγραμμα διατμητικής- (κάθετης) ορθής τάσης για το σύστημα ασυνεχειών J₂ στο δυτικό πρανές, για ύψος 36m.

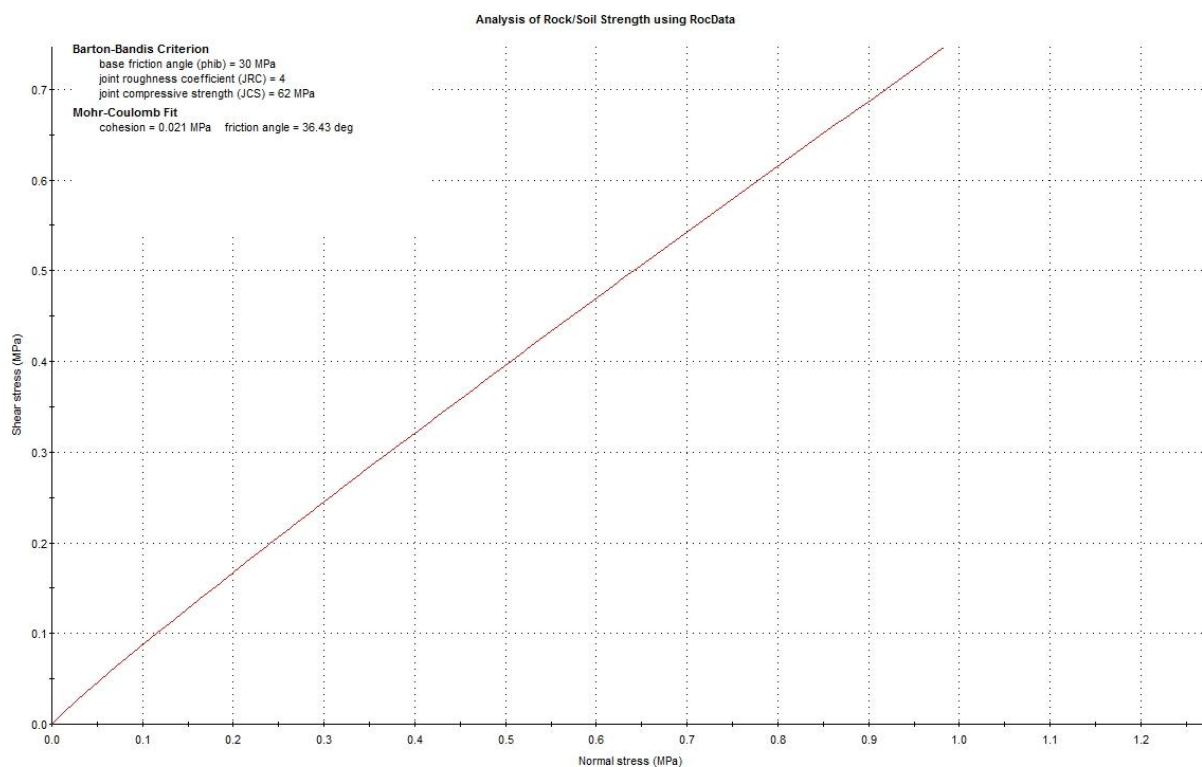


Material 1	
Barton Bandis Criterion	
residual friction angle	30 deg
JRCn	4
JCSn	83 MPa
Failure Envelope Range	
application	slopes
signmax	1.433 MPa
unit weight	0.026 MN/m ³
slope height	40 m
Mohr Coulomb Fit	
cohesion	0.024 MPa
friction angle	36.734 deg

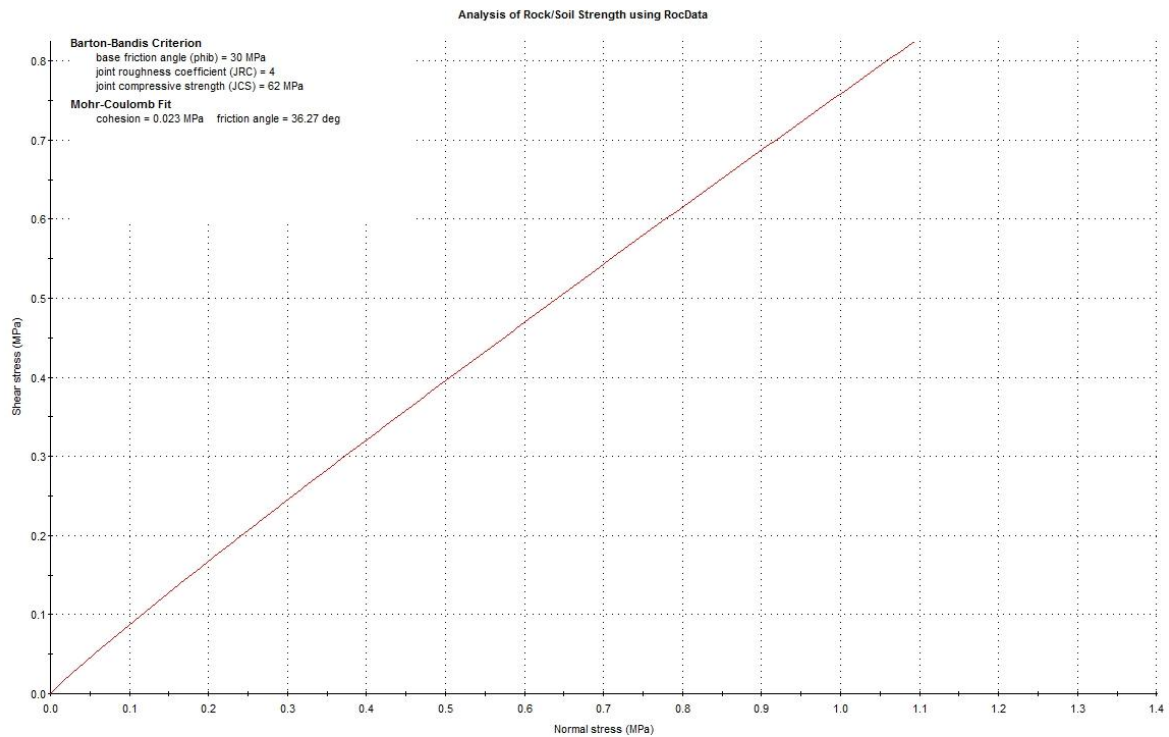
Σχήμα VI: Διάγραμμα διατμητικής- (κάθετης) ορθής τάσης για το σύστημα ασυνεχειών J₂ στο δυτικό πρανές, για ύψος 40m.



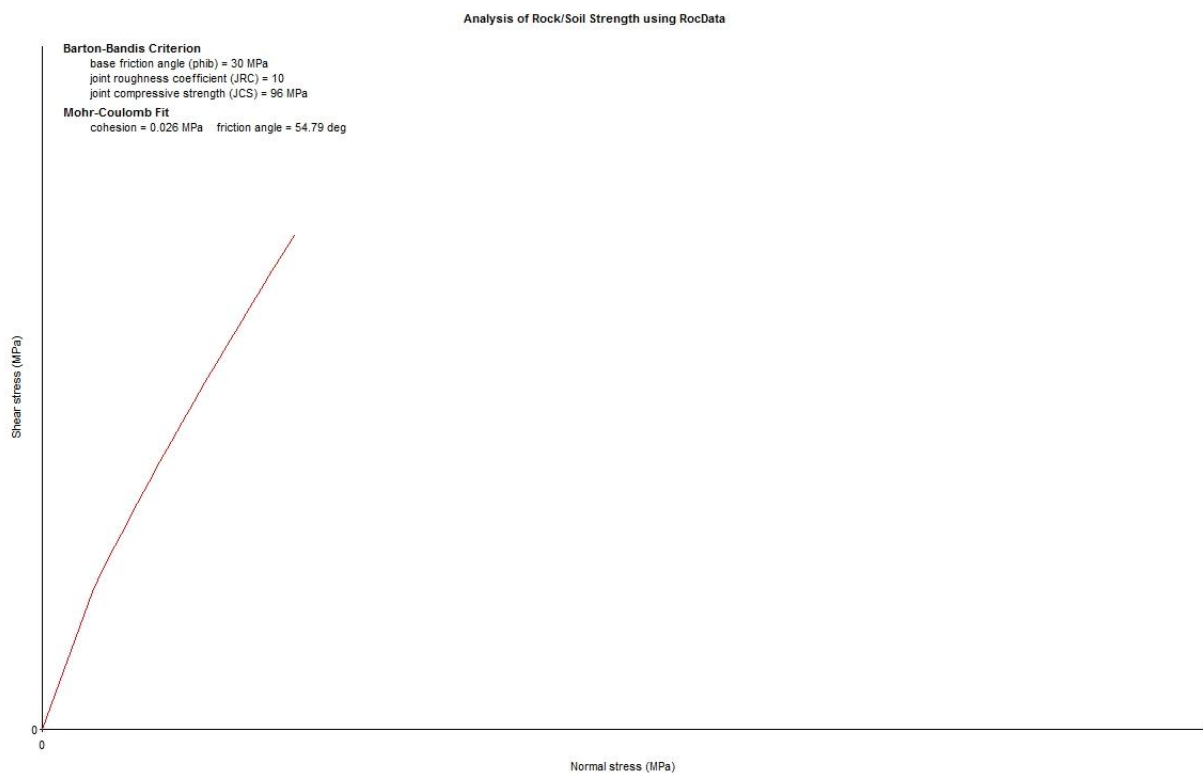
Σχήμα VII: Διάγραμμα διατμητικής- (κάθετης) ορθής τάσης για το σύστημα ασυνεχειών J_3 στο δυτικό πρανές, για ύψος 4m.



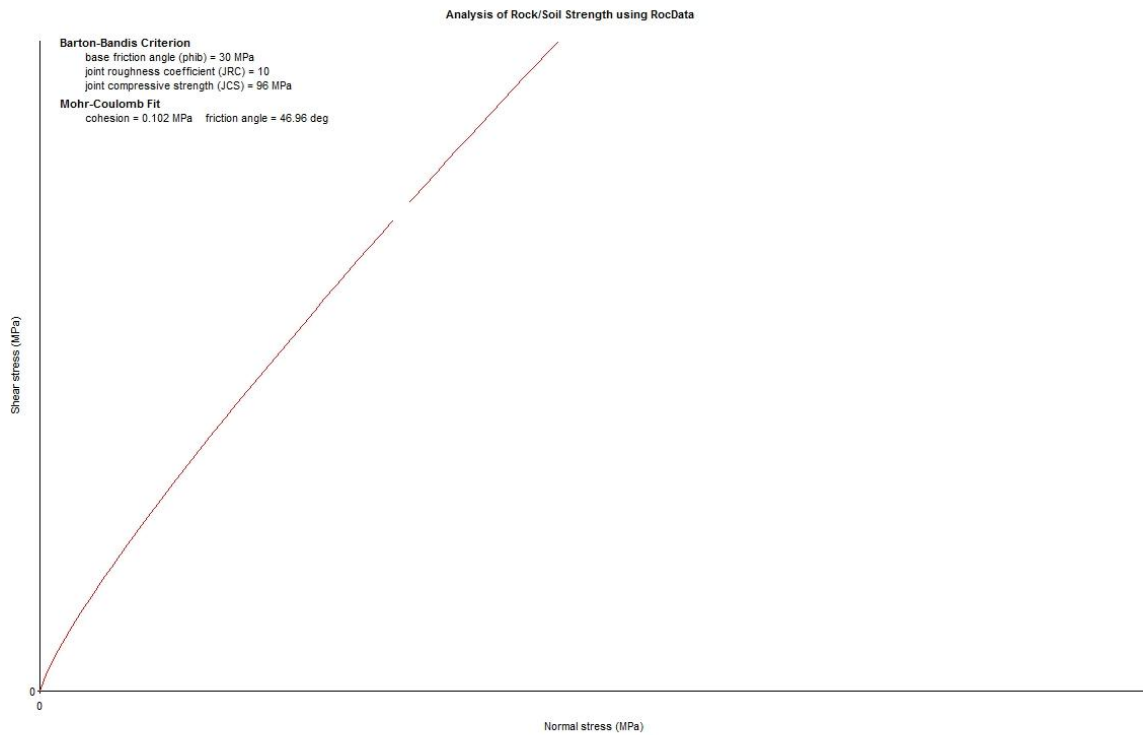
Σχήμα VIII: Διάγραμμα διατμητικής- (κάθετης) ορθής τάσης για το σύστημα ασυνεχειών J_3 στο δυτικό πρανές, για ύψος 36m.



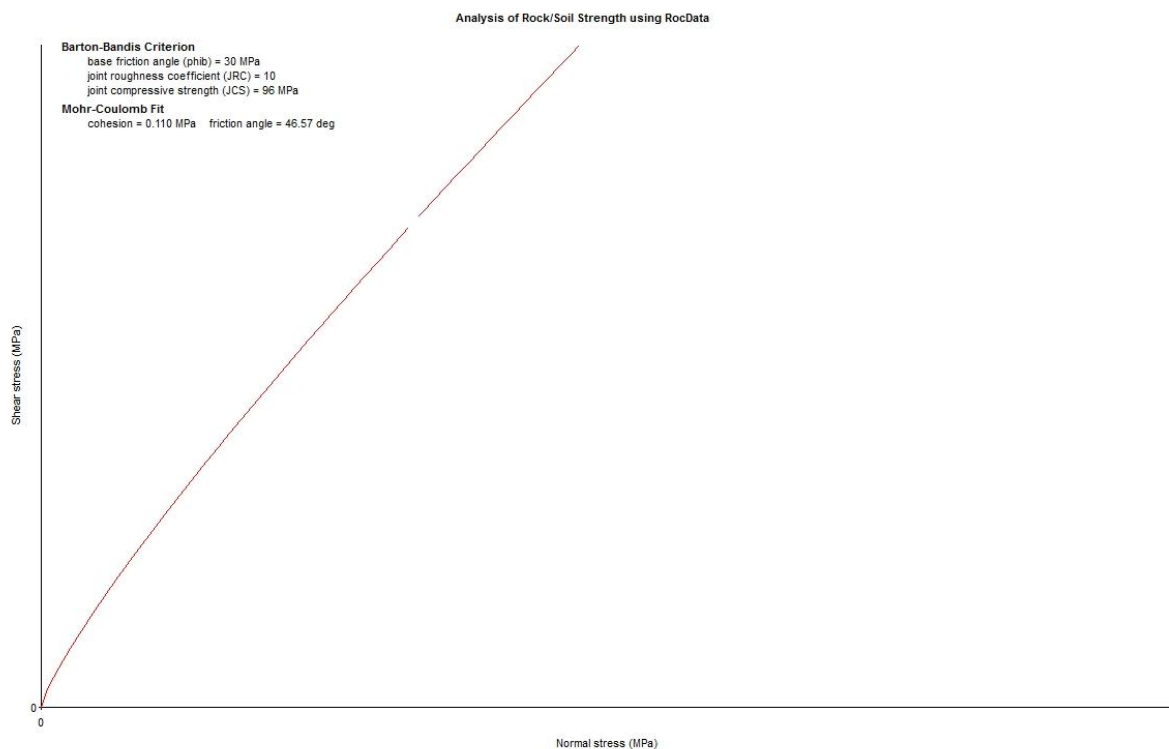
Σχήμα IX : Διάγραμμα διατμητικής- (κάθετης) ορθής τάσης για το σύστημα ασυνεχειών J₃ στο δυτικό πρανές, για ύψος 40m.



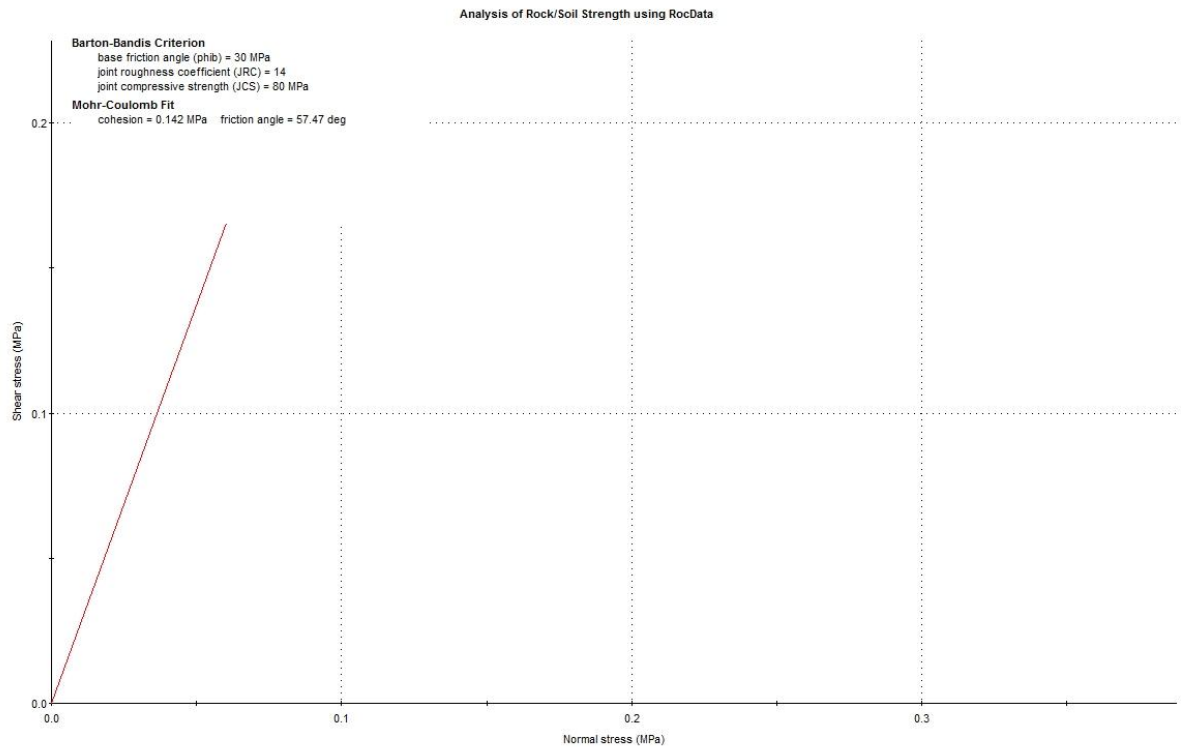
Σχήμα X: Διάγραμμα διατμητικής- (κάθετης) ορθής τάσης για το σύστημα ασυνεχειών J₄ στο δυτικό πρανές, για ύψος 4m.



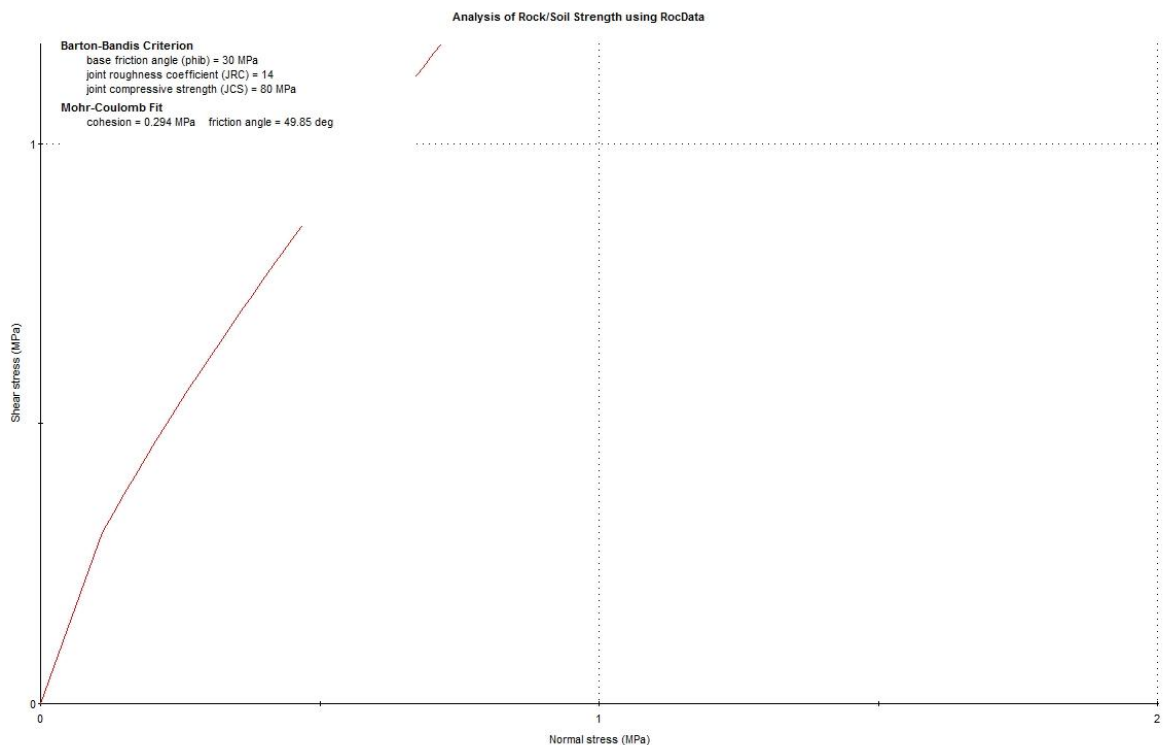
Σχήμα XI: Διάγραμμα διατμητικής- (κάθετης) ορθής τάσης για το σύστημα ασυνεχειών J₄ στο δυτικό πρανές, για ύψος 36m.



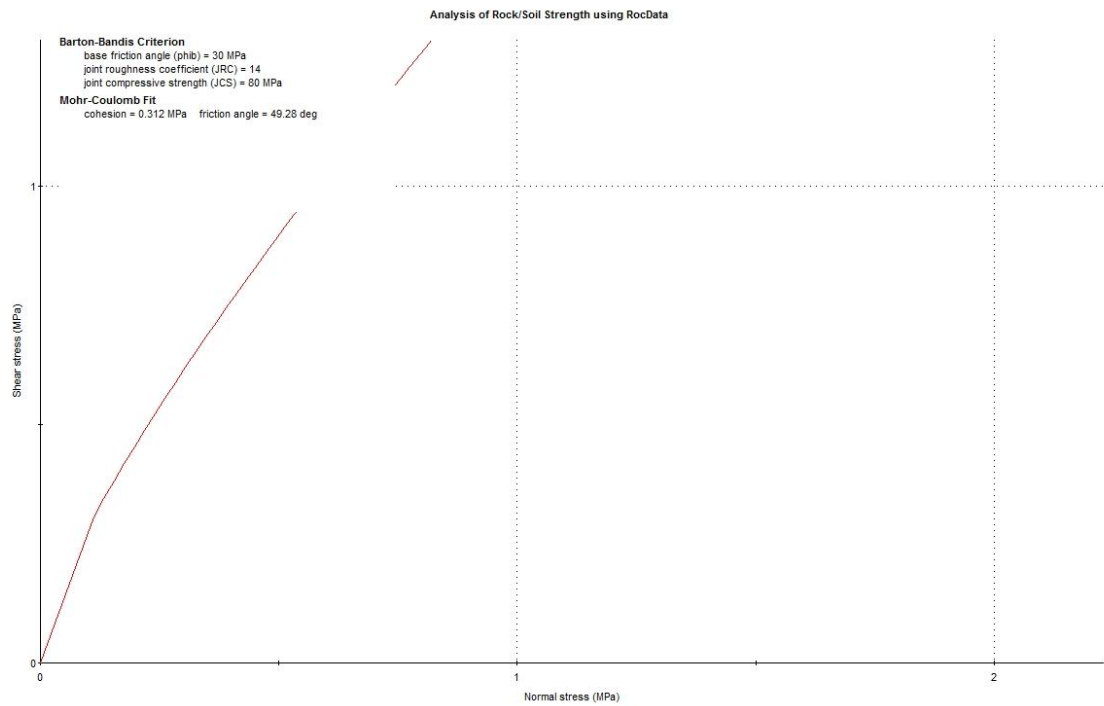
Σχήμα XII: Διάγραμμα διατμητικής- (κάθετης) ορθής τάσης για το σύστημα ασυνεχειών J₄ στο δυτικό πρανές, για ύψος 40m.



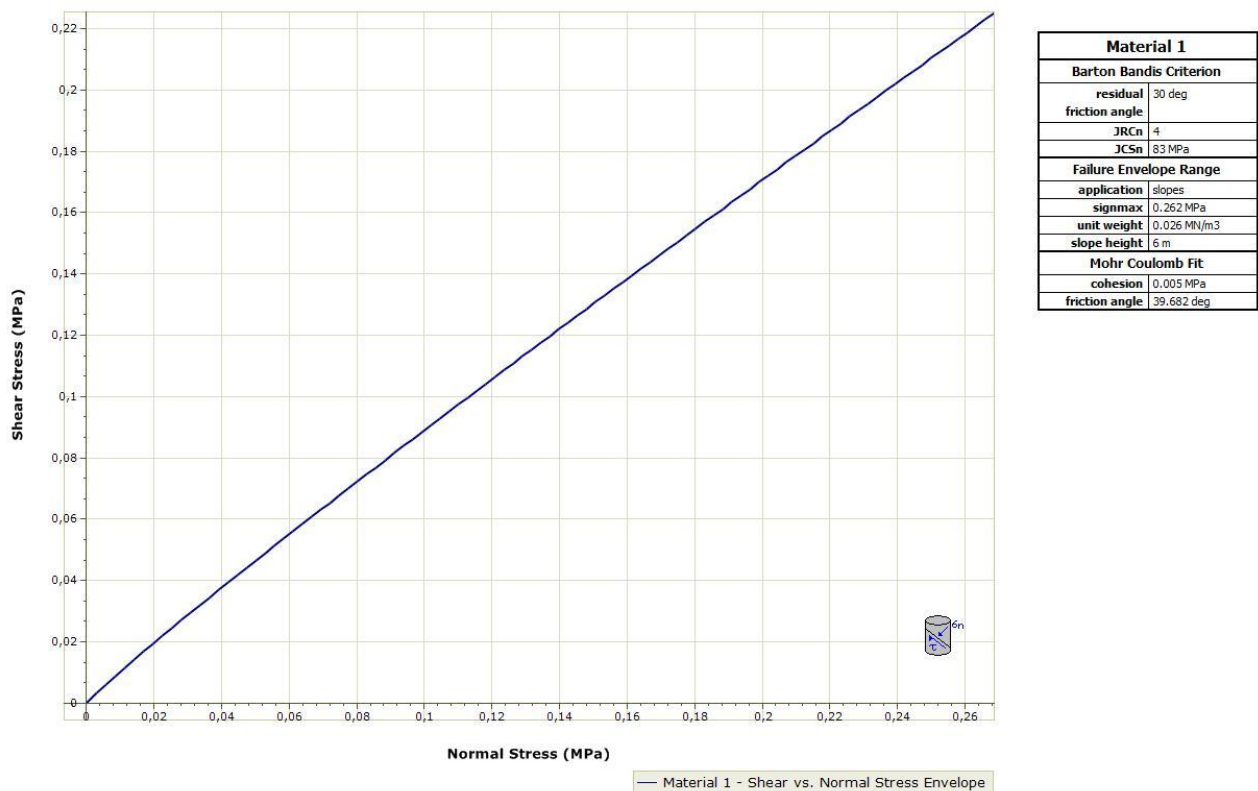
Σχήμα XIII: Διάγραμμα διατμητικής- (κάθετης) ορθής τάσης για το σύστημα ασυνεχειών J_1 στο ανατολικό πρανές, για ύψος 6m.



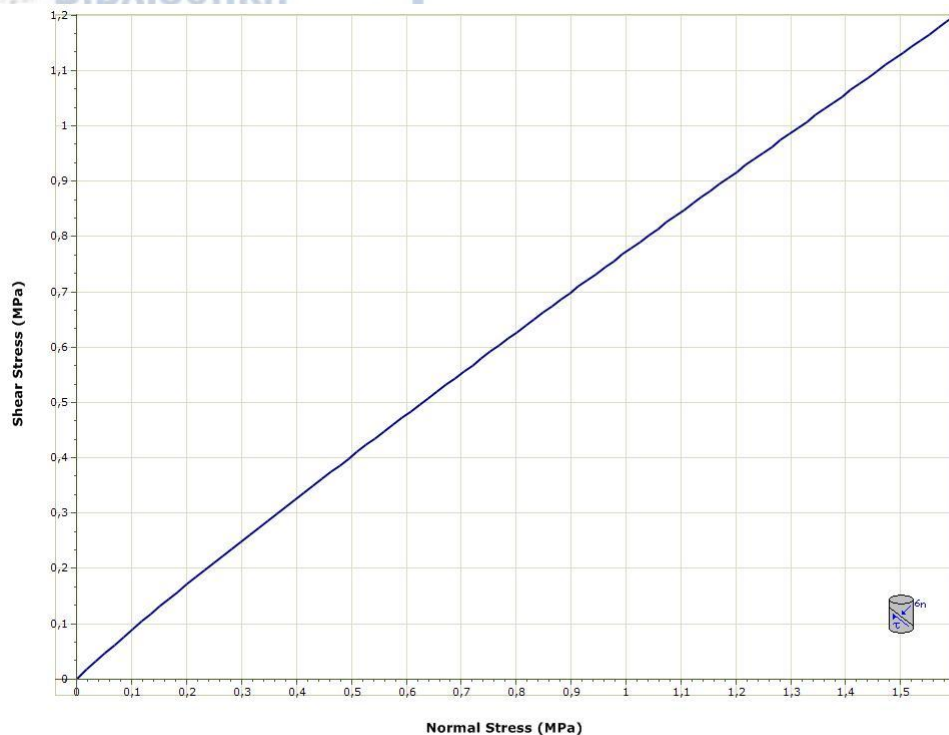
Σχήμα XIV: Διάγραμμα διατμητικής- (κάθετης) ορθής τάσης για το σύστημα ασυνεχειών J_1 στο ανατολικό πρανές, για ύψος 44m.



Σχήμα XV: Διάγραμμα διατμητικής- (κάθετης) ορθής τάσης για το σύστημα ασυνεχειών J_1 στο ανατολικό πρανές, για ύψος 50m.

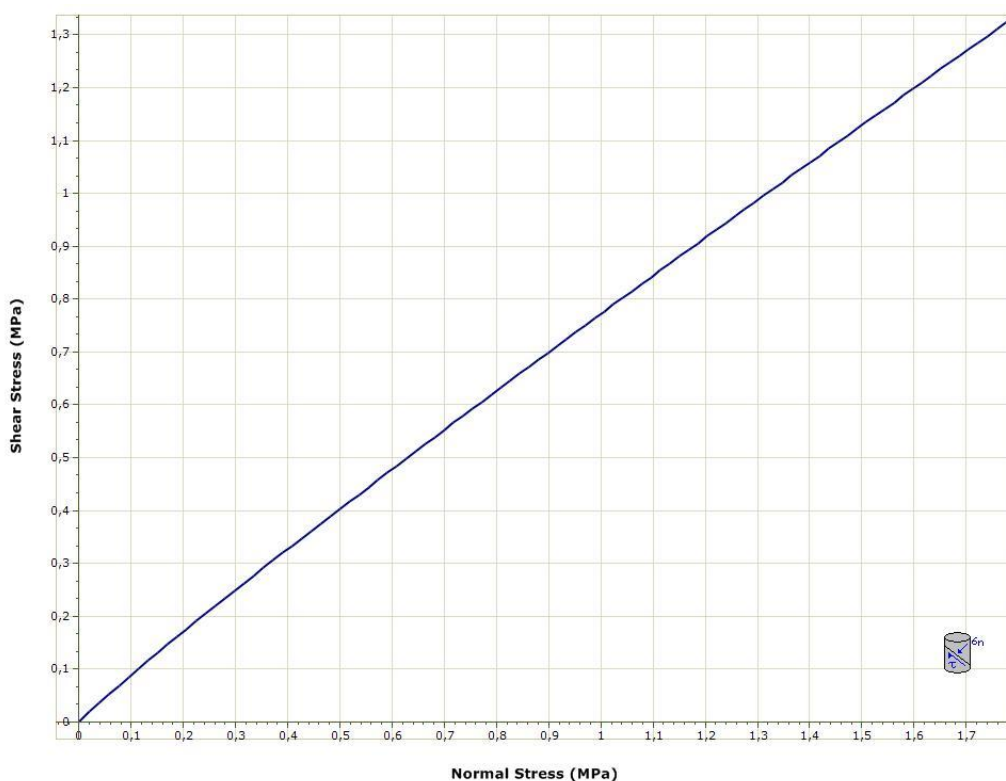


Σχήμα XVI: Διάγραμμα διατμητικής- (κάθετης) ορθής τάσης για το σύστημα ασυνεχειών J_2 στο ανατολικό πρανές, για ύψος 6m.



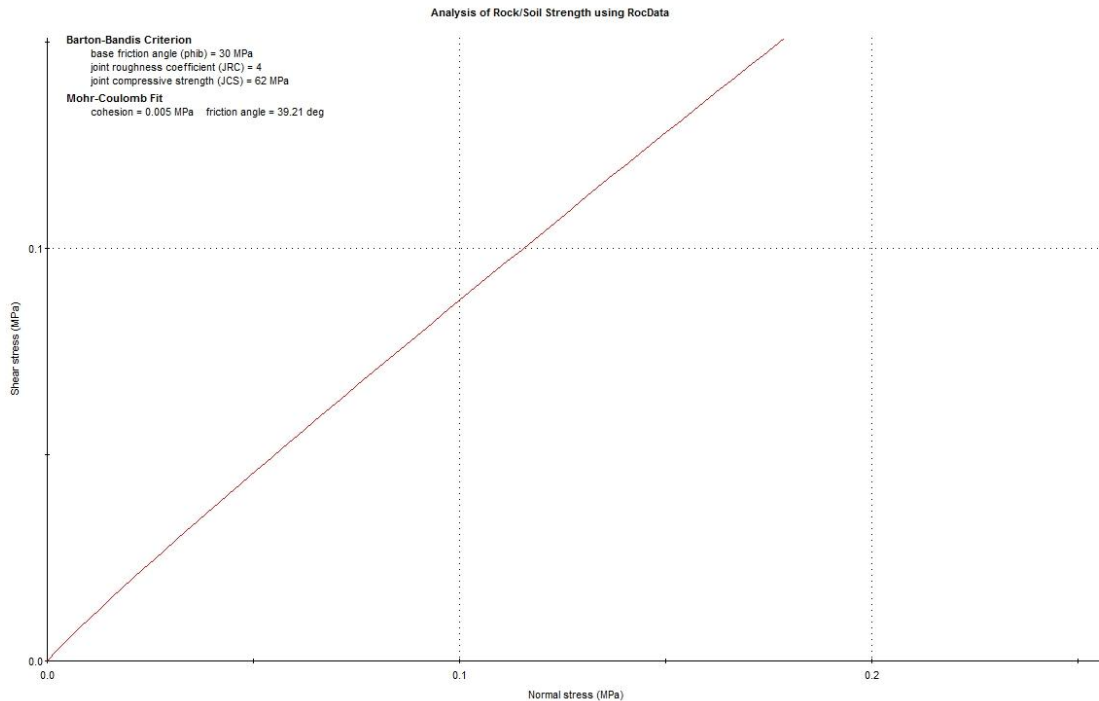
Material 1	
Barton Bandis Criterion	
residual friction angle	30 deg
JRCn	4
JCSn	83 MPa
Failure Envelope Range	
application	slopes
signmax	1.561 MPa
unit weight	0.026 MN/m ³
slope height	44 m
Mohr Coulomb Fit	
cohesion	0.026 MPa
friction angle	36.586 deg

Σχήμα XVII: Διάγραμμα διατμητικής- (κάθετης) ορθής τάσης για το σύστημα ασυνεχειών J_2 στο ανατολικό πρανές, για ύψος 44m.

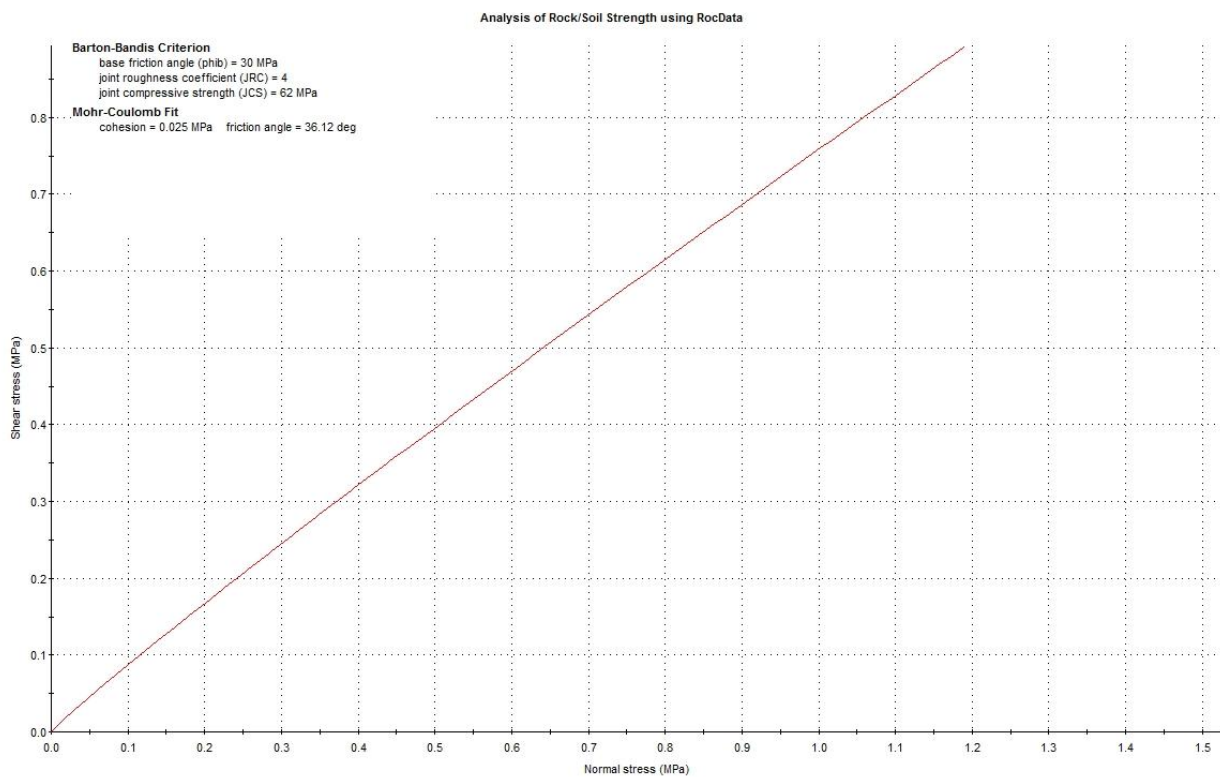


Material 1	
Barton Bandis Criterion	
residual friction angle	30 deg
JRCn	4
JCSn	83 MPa
Failure Envelope Range	
application	slopes
signmax	1.75 MPa
unit weight	0.026 MN/m ³
slope height	50 m
Mohr Coulomb Fit	
cohesion	0.029 MPa
friction angle	36.387 deg

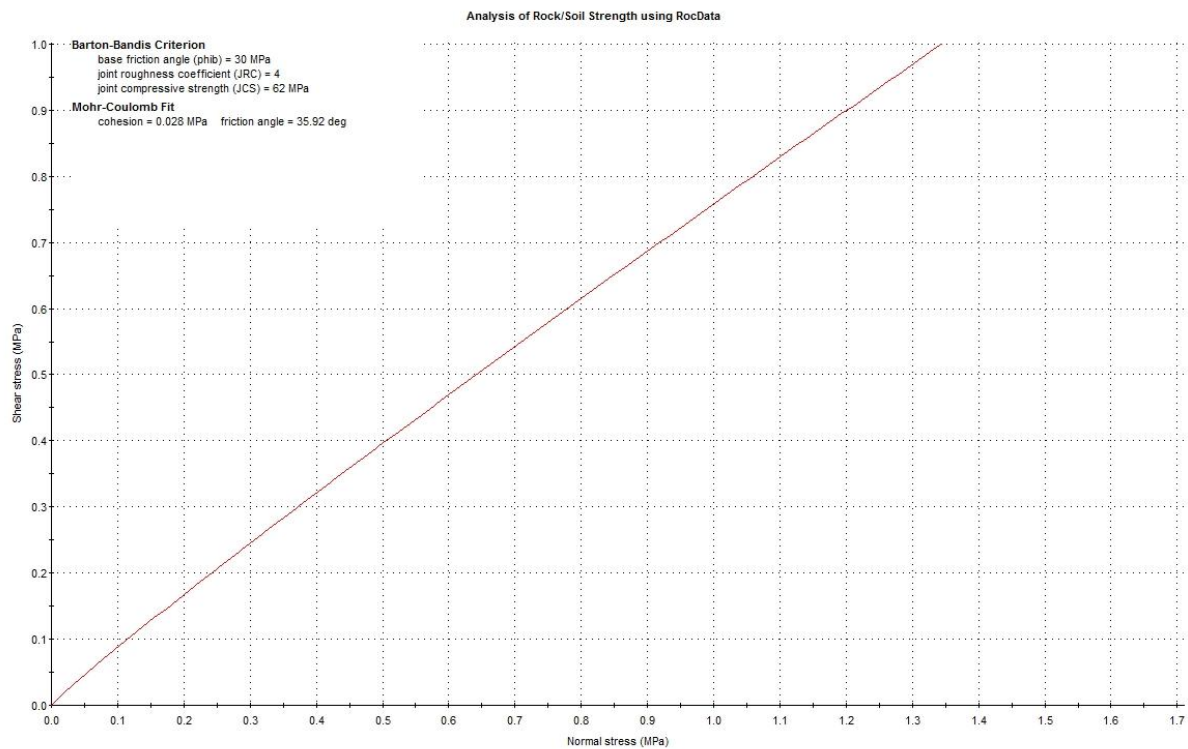
Σχήμα XVIII: Διάγραμμα διατμητικής- (κάθετης) ορθής τάσης για το σύστημα ασυνεχειών J_2 στο ανατολικό πρανές, για ύψος 50m.



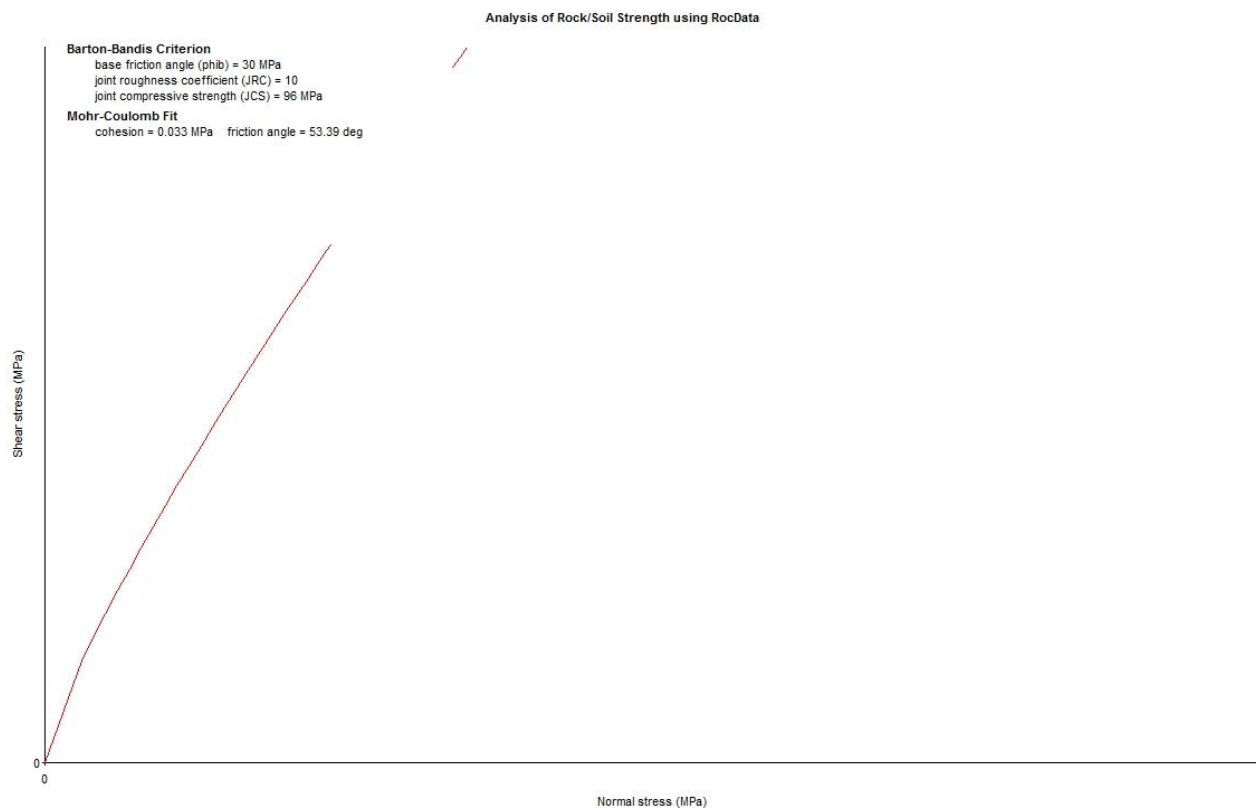
Σχήμα XIX : Διάγραμμα διατμητικής- (κάθετης) ορθής τάσης για το σύστημα ασυνεχειών J₃ στο ανατολικό πρανές, για ύψος 6m.



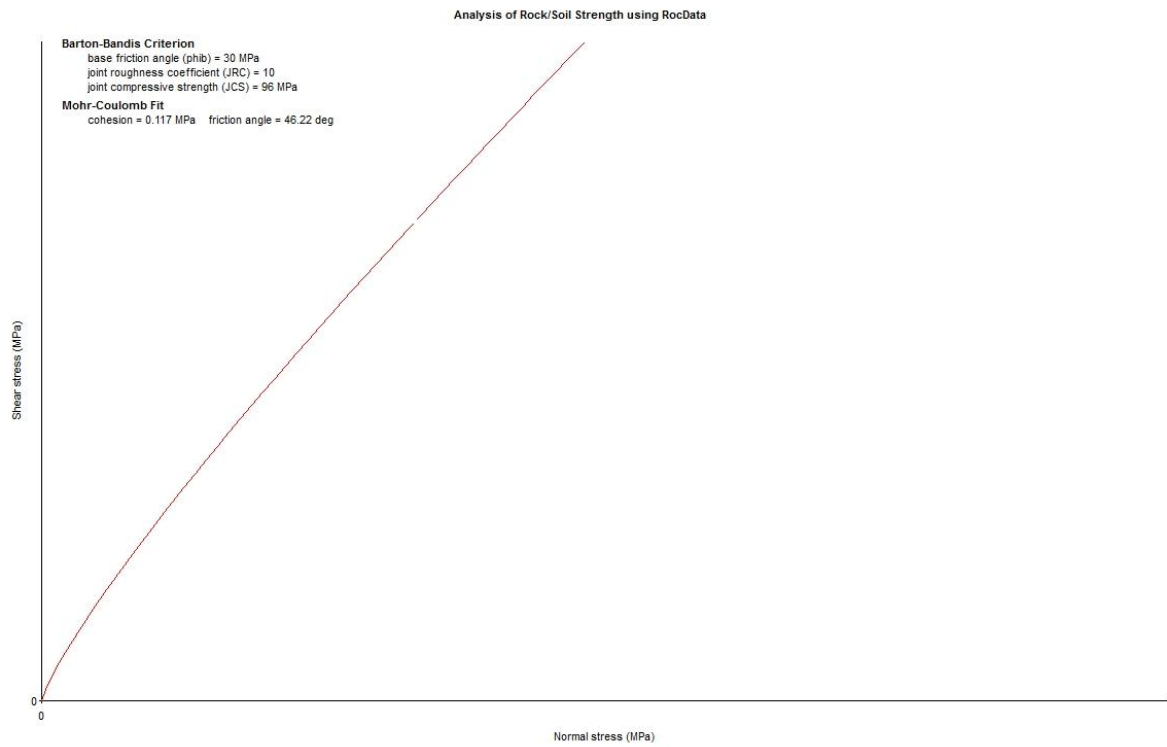
Σχήμα XX: Διάγραμμα διατμητικής- (κάθετης) ορθής τάσης για το σύστημα ασυνεχειών J₃ στο ανατολικό πρανές, για ύψος 44m.



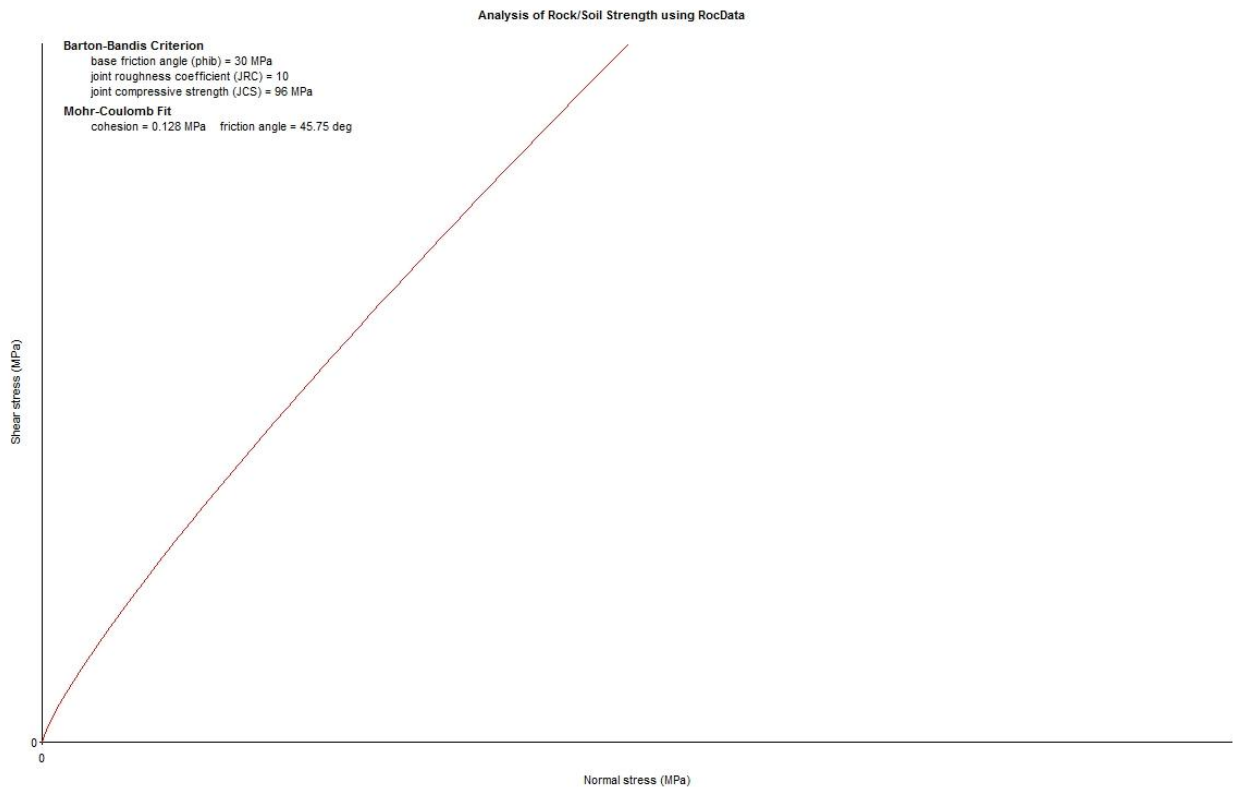
Σχήμα XXI: Διάγραμμα διατμητικής- (κάθετης) ορθής τάσης για το σύστημα ασυνεχειών J₃ στο ανατολικό πρανές, για ύψος 50m.



Σχήμα XXII: Διάγραμμα διατμητικής- (κάθετης) ορθής τάσης για το σύστημα ασυνεχειών J₄ στο ανατολικό πρανές, για ύψος 6m.



Σχήμα XXIII: Διάγραμμα διατμητικής- (κάθετης) ορθής τάσης για το σύστημα ασυνεχειών J₄ στο ανατολικό πρανές, για ύψος 44m.



Σχήμα XXIV: Διάγραμμα διατμητικής- (κάθετης) ορθής τάσης για το σύστημα ασυνεχειών J₄ στο ανατολικό πρανές, για ύψος 50m.