



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ, ΙΣΤΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας



ANNA K. ΔΕΡΗ

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΠΡΑΝΩΝ ΣΕ
ΤΜΗΜΑ ΤΟΥ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΟΥ ΔΡΟΜΟΥ ΤΗΣ
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2023



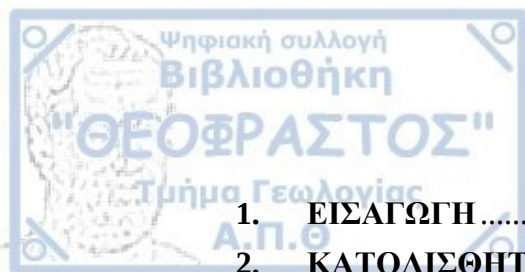
ANNA K. ΔΕΡΗ

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΠΡΑΝΩΝ ΣΕ ΤΜΗΜΑ
ΤΟΥ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΟΥ ΔΡΟΜΟΥ ΤΗΣ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας στα πλαίσια του Προπτυχιακού Προγράμματος
Σπουδών, Κατεύθυνση «Εφαρμοσμένη Γεωλογία»

Επιβλέπων καθηγητής:

Γεώργιος Παπαθανασίου, Επίκουρος καθηγητής Α.Π.Θ.



Περιεχόμενα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
2. ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ	6
2.1. Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ	6
2.2. ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΧΩΡΟ	9
2.2.1. ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗ ΠΑΝΑΓΟΠΟΥΛΑΣ.....	15
2.2.2. ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗ ΤΣΑΚΩΝΑΣ.....	17
2.2.3. ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗ ΤΕΜΠΩΝ	19
2.3. ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΠΡΑΝΩΝ 22	
2.3.1. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΟΡΙΑΚΗΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ	22
2.3.2. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΣΤΟΧΙΩΝ ΣΕ ΒΡΑΧΩΔΗ ΠΡΑΝΗ.....	25
2.4. ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΠΡΑΝΩΝ.....	33
2.4.1. ΜΕΤΡΑ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗΣ Ή ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	34
2.4.2. ΠΡΟΛΗΠΤΙΚΑ ΜΕΤΡΑ.....	36
3. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ – ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΟΣ ΔΡΟΜΟΣ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ	40
3.1. ΓΕΩΛΟΓΙΑ – ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	42
3.2. ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	42
3.3. ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	43
3.4. ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	44
3.5. ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΠΕΔΙΟΥ	45
3.6. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	49
3.7. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	55
3.8. ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΑ ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	59
4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	61



ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία αποτελεί την προπτυχιακή διπλωματική μου εργασία, η οποία είναι υποχρεωτική για το προπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών του Τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Το θέμα της εργασίας ανήκει στην κατεύθυνση της Εφαρμοσμένης Γεωλογίας, την οποία και επέλεξα να ακολουθήσω. Ειδικότερα, στην Τεχνική Γεωλογία, είναι απαραίτητη η μελέτη των βραχοκαταπτώσεων, ώστε να καταστεί δυνατή η κατασκευή των τεχνικών έργων. Αν κρίνουμε, λοιπόν, από την σημαντικότητα των τεχνικών έργων, αλλά και της μέγιστης ασφάλειας αυτών, είναι εξίσου σημαντική και η ορθή μελέτη των πιθανών βραχοκαταπτώσεων στο εκάστοτε σημείο. Για τον λόγο αυτό, επέλεξα να μελετήσω το συγκεκριμένο θέμα.

Η πραγματοποίηση της παρούσας εργασίας δεν θα ήταν εφικτή χωρίς την καθοδήγηση και επίβλεψη του κύριου Γεώργιου Παπαθανασίου, Επίκουρου Καθηγητή του Τομέα Τεκτονικής, Ιστορικής και Εφαρμοσμένης Γεωλογίας, του Τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Η βοήθειά του ήταν καθοριστική, τόσο στην θεωρία όσο και στην πράξη, καθώς σε κάθε απορία και τροχοπέδη που συναντούσα ήταν παρών, βοηθώντας με να συνεχίσω την εκπόνηση της εργασίας μου, χωρίς απογοήτευση και με περισσότερο ζήλο. Επίσης, δεν θα μπορούσα να παραλείψω την εξαιρετικά σημαντική συμβολή του κατά την λήψη των μετρήσεων στην περιοχή μελέτης, καθώς με ακολούθησε και μου παρείχε τις πρακτικές γνώσεις του και τον υλικό εξοπλισμό.

Τέλος, οφείλω ένα τεράστιο ευχαριστώ από καρδιάς, σε όλους τους ανθρώπους που στάθηκαν δίπλα μου καθ' όλη την διάρκεια των προπτυχιακών μου σπουδών, παρά την όποια πίεση, «σηκώνοντάς με» κάθε φορά που πήγαινα να λυγίσω και δεν κατάφερνα να βρω μόνη μου τη δύναμη. Πρώτα απ' όλα, ευχαριστώ, λοιπόν, την οικογένειά μου, τις φίλες και τους φίλους μου, τους καθηγητές και τους συμφοιτητές μου, που ακόμα και η πιο μικρή βοήθεια από τον καθένα τους, σε οποιοδήποτε τομέα, διδακτικό ή συναισθηματικό, αποτέλεσε βασικό λιθαράκι στην ολοκλήρωση των προπτυχιακών μου σπουδών.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, το αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη κατολισθητικών φαινομένων και βραχοκαταπτώσεων, τα οποία έχουν καθοριστική συμβολή στην ασφάλεια των τεχνικών έργων που κατασκευάζονται. Συγκεκριμένα, μελετάται η ευστάθεια των βραχωδών πρανών σε ένα τμήμα του Περιφερειακού δρόμου της Θεσσαλονίκης, οι πιθανές αστοχίες και τα μέτρα προστασίας για την αποφυγή και την αποκατάσταση αυτών.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την εκτέλεση της εν λόγω μελέτης, αλλά και το περιεχόμενο της εργασίας αυτής, συνοψίζεται παρακάτω σε χρονολογική σειρά.

Σε πρώτο στάδιο, συγκέντρωσα το βιβλιογραφικό υλικό, από βιβλία, μελέτες, εργασίες και το διαδίκτυο. Από αυτά, αφού διασταύρωσα την εγκυρότητα των πληροφοριών και μετά από πολλές ώρες μελέτης, ολοκλήρωσα το θεωρητικό κομμάτι της εργασίας μου.

Σε δεύτερο στάδιο, ξεκίνησε το πρακτικό κομμάτι της εργασίας. Πιο συγκεκριμένα, αφού αποφασίστηκε το σημείο μελέτης, ορίστηκε μέρα και ώρα για την μελέτη της περιοχής. Έχοντας τον κατάλληλο εξοπλισμό, και περίσσια όρεξη για δουλειά, ένα Δευτεριάτικο πρωινό, φτάσαμε, με τον κύριο Παπαθανασίου, στον περιφερειακό δρόμο της Θεσσαλονίκης, στο ύψος που είναι κάθετο στην έξοδο για το Κανταζόγλειο Στάδιο. Εκεί, μελετήσαμε ένα τμήμα του πρανούς, το οποίο, πρόσφατα, είχε υποστεί κατολίσθηση. Πήραμε μετρήσεις με σύγχρονα τεχνολογικά μέσα και όργανα, ώστε να έχουμε τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα στην τεχνικογεωλογική χαρτογράφηση του σημείου. Επίσης, αποκομίσαμε και το κατάλληλο φωτογραφικό υλικό για τον εμπλουτισμό της εργασίας.

Σε τρίτο στάδιο, οι μετρήσεις που πήραμε από το πρανές έπρεπε να επεξεργαστούν και να ερμηνευτούν, οδηγώντας μας στα τελικά αποτελέσματα. Για την επεξεργασία, λοιπόν, των μετρήσεων χρησιμοποίησα το πρόγραμμα DIPS. Στο DIPS, αφού καταχώρησα τα στοιχεία του πρανούς και των αστοχιών του, προχώρησα στην κινηματική ανάλυση για να καταλήξω στον τύπο αστοχίας και τα χαρακτηριστικά της. Μετά το πέρας αυτής της διαδικασίας, αποτύπωσα τα διαγράμματα από το DIPS στην εργασία, εξηγώντας κάθε ένα από αυτά για να καταλήξω στα τελικά συμπεράσματα για το πρανές που μελετήσαμε.

Τέλος, προτάθηκαν ενδεικτικά μέτρα για την προστασία της συγκεκριμένης περιοχής από πιθανές βραχοκαταπτώσεις.

2. ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ

2.1. Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ

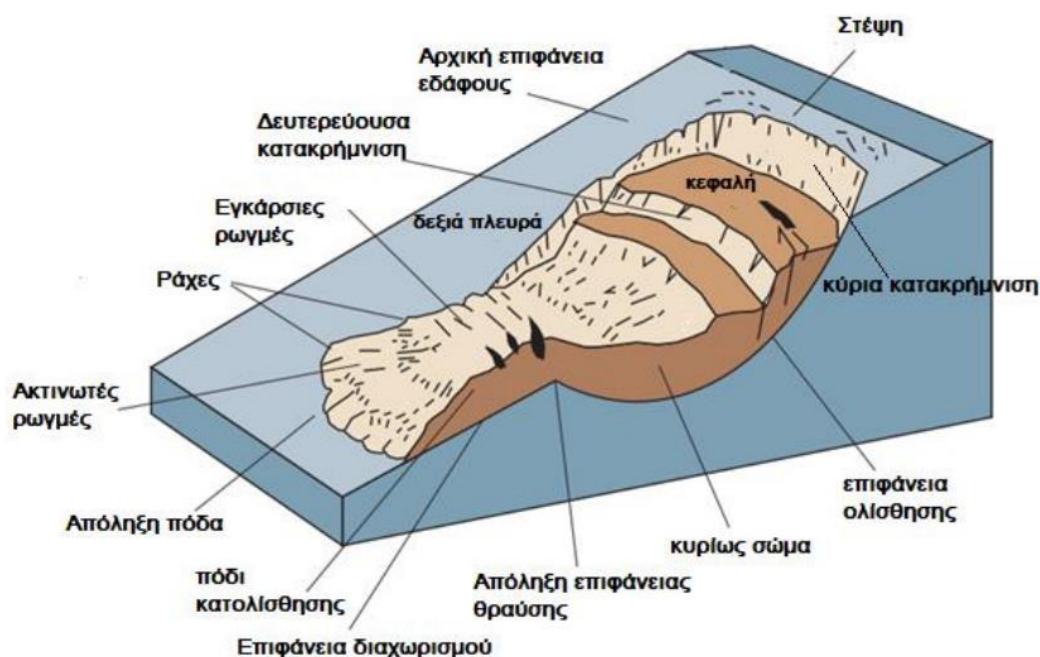
Ο όρος κατολίσθηση χρησιμοποιείται για να περιγράψει τις επιφανειακές μετακινήσεις γεωλογικών μαζών. Για την πραγματοποίηση των μετακινήσεων αυτών, η διατμητική αστοχία λαμβάνει χώρα κατά μήκος είτε ενός συγκεκριμένου επιπέδου, είτε κάποιου συνδυασμού επιπέδων. Το φαινόμενο εντοπίζεται τόσο σε ξηρά, όσο και σε υδάτινα περιβάλλοντα.

Η πρώτη προσπάθεια απόδοσης ορισμού για την κατολίσθηση έγινε το 1950 και συνεχίστηκαν μέχρι και το 1978. Τότε, ο Varnes χρησιμοποίησε τον όρο μετακίνηση μαζών και περιέλαβε σε αυτόν κάθε μετακίνηση τμήματος πρηνούς που οφείλεται σε ολίσθηση, κατάπτωση, ανατροπή, ροή και ερπυσμό. Ωστόσο, με βάση τον συγκεκριμένο ορισμό, οι κατολισθήσεις δεν περιλαμβάνουν καθιζήσεις, χιονοστιβάδες και μετακινήσεις πάγου. Από το 1978 μέχρι και σήμερα, η επιστημονική κοινότητα χρησιμοποιεί κατά πλειοψηφία τον ορισμό του Varnes, αναγνωρίζοντας την ευρύτερη έννοια που προσδίδει στην κατολίσθηση.

Σε κάθε κατολίσθηση διακρίνονται επιμέρους τμήματα, τα οποία την χαρακτηρίζουν. Αναλυτικότερα, αυτά είναι τα εξής (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007):

- Στέψη: Είναι το ανώτερο σταθερό τμήμα του εδάφους και γειτονεύει με την κύρια κατακρήμνιση.
- Κύρια κατακρήμνιση: Είναι η απότομη βύθιση του αδιατάρακτου εδάφους στο ανώτερο τμήμα της κατολίσθησης, δηλαδή τη στέψη. Οφείλεται στην κίνηση της ολισθαίνουσας μάζας.
- Κορυφή: Είναι το ανώτατο σημείο επαφής της κύριας κατακρήμνισης και της ολισθαίνουσας μάζας.
- Κεφαλή: Αποτελείται από τα ανώτερα τμήματα των υλικών που κατολισθαίνουν.
- Δευτερεύουσα κατακρήμνιση: Είναι οι απότομες επιφάνειες στο εσωτερικό του μετακινούμενου υλικού της κατολίσθησης. Προέρχονται από διαφορικές μετακινήσεις του υλικού αυτού.
- Κύριο σώμα: Είναι το τμήμα της μετακινούμενης μάζας άνωθεν της επιφάνειας ολίσθησης, μεταξύ κύριας κατακρήμνισης και απόληξης της επιφάνειας ολίσθησης.
- Πόδας: Είναι το τμήμα του υλικού που μετατοπίστηκε, το οποίο έχει κινηθεί πέραν της απόληξης της επιφάνειας ολίσθησης και υπέρκειται της αρχικής επιφάνειας του εδάφους.
- Άκρο: Είναι το σημείο της απόληξης που απέχει περισσότερο από την κύρια κατακρήμνιση.
- Απόληξη πόδα: Είναι το κατώτερο κυρτό τμήμα της κατολισθαίνουσας μάζας και βρίσκεται στο πιο απομακρυσμένο σημείο από την κύρια κατακρήμνιση.
- Επιφάνεια θραύσης: Είναι η επιφάνεια στην οποία γίνεται ο αποχωρισμός της μάζας που κατολισθαίνει από το σταθερό υπόβαθρο. Αποτελεί επέκταση της κύριας κατακρήμνισης.
- Απόληξη της επιφάνειας θραύσης: Είναι η τομή του χαμηλότερου τμήματος της επιφάνειας θραύσης και της αρχικής επιφάνειας του εδάφους.

- Επιφάνεια διαχωρισμού: Είναι η αρχική επιφάνεια του φυσικού εδάφους που έχει καλυφθεί από τον πόδα.
- Μετακινούμενη μάζα: Είναι το υλικό που κατολισθαίνει.
- Επιφάνεια ολίσθησης: Είναι η επιφάνεια όπου πραγματοποιείται η κύρια μετατόπιση του υλικού που κατολισθαίνει. Συνήθως, το ανώτερο τμήμα της ταυτίζεται με την επιφάνεια θραύσης, ενώ το κατώτερο, που βρίσκεται κάτω από τον πόδα, είναι η προϋπάρχουσα επιφάνεια του πρανούς.
- Πλευρά: Είναι η δεξιά ή αριστερή πλευρά της κατολίσθησης, από τη στέψη προς την κατολισθαίνουσα μάζα.
- Αρχική επιφάνεια εδάφους: Είναι η επιφάνεια του φυσικού εδάφους πριν εκδηλωθεί η κατολίσθηση.



Σχήμα 1: Τμήματα κατολίσθησης – Προτεινόμενη ονοματολογία από τον Varnes (1978) (τροποποιημένο από Highland και Bobrowsky (2008)) (πηγή Παπαθανασίου Γ., 2022)

Η ενεργοποίηση των κατολισθήσεων αποτελεί σύνθετο φαινόμενο και εξαρτάται τόσο από εγγενείς, όσο και από εξωγενείς παράγοντες (Terzaghi, 1950). Πιθανότητα ενεργοποίησης μιας νέας ή μιας παλιάς κατολίσθησης μπορεί να προκύψει από τη δράση κρίσιμων παραγόντων, όπως είναι το νερό ή από επιδράσεις προκληθείσες από τον άνθρωπο, όπως είναι η αλλαγή της γεωμετρίας του πρανούς, η εξωτερική φόρτισή του, κ.λπ. αλλά και από φαινόμενα που μειώνουν την διατμητική αντοχή της βραχομάζας, όπως είναι η αποσάθρωση, η διάβρωση κ.λπ.

Ειδικότερα, η σαφέστερη και πιο διαδεδομένη ομαδοποίηση των παραγόντων που προκαλούν τις κατολισθήσεις δόθηκε από τον Varnes (1978). Διακρίνονται τρεις επιμέρους κατηγορίες. Πιο αναλυτικά, με βάση τους Κούκη και Σαμπατακάκη (2007), έχουμε:

- Παράγοντες που ενισχύουν την αύξηση της διατμητικής τάσης που ασκείται στο μετακινούμενο υλικό

- Παράγοντες που βοηθούν την πιθανή χαμηλή διατμητική αντοχή του υλικού
- Παράγοντες που συμβάλλουν στην μείωση της διατμητικής αντοχής του υλικού

Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, οι κατολισθήσεις συμβαίνουν απρόσμενα και θεωρούνται ως ένας από τους συχνότερους φυσικούς κινδύνους σε κάθε γεωγραφικό μήκος και πλάτος της γης. Αποτελούν βασική αιτία απώλειας ανθρώπινων ζώων και περιουσιών, γεγονός που φανερώνει τις σημαντικές κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις τους.

Κατολισθήσεις έχουν καταγραφεί από αρχαιοτάτων χρόνων. Δύο από τις παλαιότερες εκδηλώθηκαν στην επαρχία Honan της Κεντρικής Κίνας το 1767 π.Χ. (Schuster, 1996) και στην Ελίκη της Πελοποννήσου το 373/2 π.Χ. (Μαρινάτος, 1960). Αιτία αυτών αποτέλεσαν ισχυρές σεισμικές δονήσεις. (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007)

Κατά καιρούς έχουν προταθεί διάφορα συστήματα ταξινόμησης των κατολισθήσεων, βασιζόμενα το κάθε ένα σε ξεχωριστά στοιχεία. Μερικά αρχικά εγχειρήματα ταξινόμησης έγιναν το 1939 και το 1958, από τους Sharpe και Varnes, αντίστοιχα. Οι παράμετροι στις οποίες βασίστηκαν ήταν ο τύπος και η ταχύτητα κίνησης, ο τύπος του υλικού και η περιεχόμενη υγρασία. Αργότερα, το 1973, ο Erskine προχώρησε σε ταξινόμηση των κατολισθήσεων βασιζόμενος στην ενεργότητά τους και στις πιθανές επιπτώσεις τους στα τεχνικά έργα. Εκ μιας άλλης οπτικής, οι Zaruba και Mencl, 1969 και 1976 αντίστοιχα, διέκριναν τις κατολισθήσεις σε κατηγορίες ανάλογα με κάποιες ιδιομορφίες που εμφάνιζε η γεωλογική δομή των χωρών τους. Το 1977, ο Coates, λαμβάνοντας υπόψη το υλικό που μετακινείται και τον τύπο κίνησης που ακολουθεί, προχώρησε και αυτός σε μια διαφορετική ταξινόμηση για τις κατολισθήσεις. Ύστερα από όλες αυτές τις προσπάθειες, το 1978, ο Varnes πρότεινε την πιο αποδεκτή για την επιστημονική κοινότητα ταξινόμηση για τις κατολισθήσεις.

Το σύστημα ταξινόμησης του Varnes (1978) βασιζόταν στον τύπο της μετακίνησης και στο είδος του υλικού που κατολισθαίνει. Όσον αφορά τον τύπο της μετακίνησής τους, οι κατολισθήσεις διακρίνονται σε πτώσεις, ανατροπές, ολισθήσεις, πλευρικές εξαπλώσεις και ροές. Μπορεί, επίσης, να υπάρχει και συνδυασμός των παραπάνω τύπων δημιουργώντας έτσι μία σύνθετη μορφή κατολίσθησης. Λαμβάνοντας υπόψη το είδος του υλικού που μετακινείται, παρατηρούνται κινήσεις τόσο στο βραχώδες υπόβαθρο, όσο και στους εδαφικούς σχηματισμούς (κορήματα και γαίες). Αξίζει να τονισθεί το γεγονός ότι αυτή η ταξινόμηση του Varnes (1978) για τις κατολισθήσεις επικρατεί πλέον σε παγκόσμιο επίπεδο. Πιθανώς να υπάρχουν μικρές τροποποιήσεις ανάλογα με τις γεωλογικές συνθήκες που επικρατούν σε κάθε περίπτωση, ωστόσο εντάσσονται στο κοινό γενικότερο πλαίσιο.

Τύπος κίνησης	Τύπος μετακινούμενου υλικού		
	Βραχώδες υπόβαθρο	Μηχανικά εδάφη	
		Χονδρόκοκκα	Λεπτόκοκκα
Κατάπτωση	Κατάπτωση βράχων	Κατάπτωση κορημάτων	Κατάπτωση γαιών
Ανατροπή	Ανατροπή βράχων	Ανατροπή κορημάτων	Ανατροπή γαιών

Ολίσθηση	Περιστροφική	Περιστροφική ολίσθηση βραχώδους υποβάθρου	Περιστροφική ολίσθηση κορημάτων	Περιστροφική ολίσθηση γαιών
	Μεταθετική	Μεταθετική ολίσθηση βραχώδους υποβάθρου	Μεταθετική ολίσθηση κορημάτων	Μεταθετική ολίσθηση γαιών
Πλευρική εξάπλωση		Πλευρική εξάπλωση βραχώδους υποβάθρου	Πλευρική εξάπλωση κορημάτων	Πλευρική εξάπλωση γαιών
Ροή		Ροή βραχώδους υποβάθρου (ερπυσμός)	Ροή κορημάτων	Ροή γαιών
			(ερπυσμός εδάφους)	
Σύνθετη		Συνδυασμός δύο ή περισσότερων τύπων		

Πίνακας 1: Ταξινόμηση μετακίνησης πρανών κατά Varnes (1978) (από Κούκη και Σαμπατακάκη, 2007)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το νερό αποτελεί έναν από τους παράγοντες που επηρεάζουν τις κατολισθήσεις. Τα υλικά, λοιπόν, των κατολισθήσεων, ανάλογα με το ποσοστό της περιεχόμενης υγρασίας τους, διακρίνονται μέσω μακροσκοπικής παρατήρησης στις παρακάτω κατηγορίες (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007):

- Ξηρά υλικά, όταν το ποσοστό της περιεχόμενης υγρασίας είναι μηδενικό
- Διαβρεγμένα υλικά, όταν υπάρχει ποσοστό υγρασίας αλλά δεν κυκλοφορεί ελεύθερο νερό
- Υγρά (διαποτισμένα) υλικά, όταν το ποσοστό της περιεχόμενης υγρασίας είναι υψηλό, στο εσωτερικό της μάζας ρέει ελεύθερο νερό και λειτουργούν ως ελαφρώς υδρά ή στο εσωτερικό περιέχονται μεγάλες ποσότητες νερού και το υλικό παίρνει ρευστή μορφή

2.2. ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΧΩΡΟ

Στον Ελληνικό χώρο παρατηρούνται πολύ συχνά κατολισθήσεις, με την πλειοψηφία τους να αποτελούν ζώνες που είχαν ενεργοποιηθεί παλαιότερα. Οι ζώνες αυτές προκλήθηκαν από γεωλογικές και κλιματικές διεργασίες που συνέβησαν στο παρελθόν και εξακολουθούν να συμβαίνουν ακόμη και σήμερα. Σημαντικό μερίδιο ευθύνης για την μεγάλη συχνότητα των κατολισθήσεων προσδίδεται σε ορισμένα χαρακτηριστικά της χώρας. Αυτά είναι (Μπαντής, 2008):

- οι ιδιαίτερες γεωλογικές συνθήκες
- το έντονο ανάγλυφο
- οι μεταβαλλόμενες κλιματολογικές συνθήκες
- η έντονη σεισμική δραστηριότητα και
- οι ανθρωπογενείς επεμβάσεις

Όσον αφορά τις κλιματολογικές συνθήκες, και ειδικότερα τις μεγάλων εύρους διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, αυτές προκαλούν διαστολή και συστολή στα πετρώματα, αλλά συμβάλλουν και στην ανάπτυξη διαφορετικών εσωτερικών τάσεων. Ως αποτέλεσμα, καταστρέφεται ο ιστός των πετρωμάτων και δημιουργούνται ρωγμές

στα πετρώματα. Μέσω των ρωγμών, εισέρχεται ευκολότερα νερό στο πέτρωμα, το οποίο μεταβάλλει το pH του και προκαλεί την χημική αποσάθρωση της βραχομάζας.

Σχετικά με τις βροχοπτώσεις του Ελληνικού χώρου, αποτελούν μαζί με τους σεισμούς τους κυριότερους παράγοντες πρόκλησης κατολισθήσεων. Παρατηρείται άνιση κατανομή τους στις διάφορες περιοχές της χώρας και εμφανίζονται με μη κανονική ένταση και ύψος βροχόπτωσης. Η μορφή αυτή καλείται «μορφή ακραίων καιρικών φαινομένων» και αποτελεί σημαντικό αντίκτυπο των παγκόσμιων κλιματικών μεταβολών. Οι πιο πολλές από τις κατολισθήσεις εμφανίζουν ενδείξεις ότι συνδέονται με διμηνιαίο βροχομετρικό ύψος 100 – 500 mm, ανάλογα πάντα με τα χαρακτηριστικά που έχει η κάθε περιοχή, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Ετήσια βροχομετρικά χαρακτηριστικά γεωγραφικού διαμερίσματος	Κρίσιμο διμηνιαίο βροχομετρικό ύψος για εκδήλωση κατολισθήσεων
< 500 mm	≥ 200 mm
500 – 100 mm	≥ 350 mm
100 – 1500 mm	> 400 mm

Πίνακας 2: Συσχέτιση ετήσιων βροχομετρικών χαρακτηριστικών και κρίσιμου διμηνιαίου βροχομετρικού ύψους για την εκδήλωση των κατολισθήσεων (Μπαντής, 2008)

Αναφορικά με την γεωλογική δομή και την τεκτονική εξέλιξη του Ελληνικού χώρου, επιβάλλεται να αναφερθεί πόσο σύνθετη και έντονη είναι αντίστοιχα η κάθε μία από αυτές. Σε μεγάλο βαθμό συνέβαλαν οι επάλληλες ορογενετικές κινήσεις που πραγματοποιήθηκαν παλαιότερα και συνεχίζονται μέχρι και σήμερα. Χαρακτηριστικό γεγονός αποτέλεσε η αλπική ορογένεση, η οποία διαμόρφωσε τον Ελληνικό χώρο με τον έντονο κατακόρυφο και οριζόντιο διαμελισμό του. Μεγάλη ήταν και η συμβολή των κατακόρυφων μετακινήσεων του Τεταρτογενούς, που συνδυάστηκαν με την δημιουργία απότομων ακτών και την εξέλιξη των τεκτονικών τάφρων του νεογενούς. Άμεση είναι η σύνδεση των τεκτονικών αυτών τάφρων με την έντονη σεισμικότητα της περιοχής. (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007)

Η συστηματική καταγραφή των κατολισθήσεων στην περιοχή της Ελλάδας έκανε την εμφάνισή της, μέσω ενός σχεσιακού συστήματος δεδομένων, στα τέλη της δεκαετίας του '80 (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007). Ακολούθησε στατιστική θεώρηση των δεδομένων, μέρος της οποίας παρουσιάζεται στους πίνακες 3, 4, 5, 6 και 7. Επιπλέον, μελετήθηκαν και έννοιες γύρω από την κατολίσθηση, όπως είναι η ενεργότητά της, η ταχύτητα μετακίνησής της και η επικινδυνότητα με τους διεθνείς όρους απόδοσής της.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΥΠΟΔΙΑΙΡΕΣΗ	ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ (%)	ΕΚΤΑΣΗ (%)	ΣΧΕΤΙΚΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ (%)
Είδος περιοχής	Οικιστική	67.71		
	Καλλιεργήσιμη	21.20		
	Δασική	11.09		
Ανθρωπογενής επίδραση στη βλάστηση	Ασθενής	12		
	Μέτριος	5		
	Έντονος	12		
	Γυμνή περιοχή	2		
	Προλίβαδα	10		
	Καλλιεργήσιμη	59		
Υψόμετρο	0 – 200m (πεδινό)	20.79	34.58	13.97
	200 – 600m (λοφώδες)	41.66	34.85	27.80
	600 – 1000m (ημιορεινό)	31.32	19.64	37.12
	1000 – 1600m (ορεινό)	6.14	6.93	20.59
	> 1600m (πολύ ορεινό)	0.09	4.00	0.52
Τοπογραφικό ανάγλυφο	Έντονο	61.04		
	Μέτριο	33.52		
	Ομαλό	5.44		
Μέση ετήσια βροχόπτωση	< 400mm	1.44	1.72	7.95
	400 – 600mm	10.05	21.76	4.38
	600 – 800mm	18.85	32.74	5.45
	800 – 1000mm	20.02	17.84	10.64
	1000 – 1400mm	26.66	22.32	11.34
	> 1400mm	22.98	3.62	60.24
Είδος διάβρωσης	Επιφανειακή	51		
	Χειμάρρια	44		
	Υπόγεια	5		

Πίνακας 3: Συχνότητα εμφάνισης κατολισθήσεων στον Ελληνικό χώρο σε σχέση με τα γενικά χαρακτηριστικά της ευρύτερης περιοχής (ΚΟΥΚΙΣ et al, 1994)

Γεωτεκτονική ζώνη	Συχνότητα κατολισθήσεων (%)
Ροδόπης	3.00
Σερβομακεδονική	0.50
Περιοδοπική	0.00

Αξιού	2.00
Πελαγονική	39.00
Παρνασσού	4.00
Ωλονού – Πίνδου	41.00
Γαβρόβου	4.00
Ιόνιος	4.50
Παξών	2.00

Πίνακας 4: Συχνότητα εμφάνισης κατολισθήσεων κατά γεωτεκτονική ζώνη (KOUKIS et al. 2005)

Λιθολογικός τύπος	Συχνότητα κατολισθήσεων (%)	Έκταση (%)	Σχετική συχνότητα κατολισθήσεων (%)
Χαλαρά Τεταρτογενή ιζήματα	20.65	15.87	12.99
Νεογενή	28.20	24.00	11.74
Φλύσχης	30.35	8.48	35.75
Σχιστοκερατόλιθοι	3.62	1.22	29.64
Ασβεστόλιθοι	4.85	19.50	2.48
Μεταμορφωμένα	9.32	18.35	5.07
Ηφαιστειακά	3.00	12.58	2.37

Πίνακας 5: Συχνότητα και σχετική συχνότητα κατολισθήσεων κατά λιθολογικό τύπο (KOUKIS et al, 2005)

Τύπος κατολίσθησης		Τύπος μετακινούμενου υλικού	
		Βραχώδες υπόβαθρο	Μηχανικά εδάφη
Κατάπτωση		1.31	-
Ανατροπή		0.11	-
Ολίσθηση	Περιστροφική	-	39.30
	Μεταθετική	0.34	7.40
Πλευρική Εξάπλωση		-	0.46
Ροή		-	Κορημάτων
		-	Γαιών
		-	Ερπυσμός
Σύνθετη			0.50

Πίνακας 6: Συχνότητα εμφάνισης κατολισθήσεων σε σχέση με τη βασική ταξινόμησή τους (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007)

Χαρακτηριστικά	Υποδιαίρεση	Συχνότητα εμφάνισης
Κλίση πρηνούς (σε μοίρες)	0 – 15	0.28
	6 – 15	8.26
	16 – 30	57.00
	31 – 45	23.85
	46 – 60	6.10
	61 – 75	3.47
	> 75	1.04
Προσανατολισμός στρωμάτων σε σχέση με το πρηνές	Ευνοϊκός	25.20
	Υποοριζόντια	26.97
	Δυσμενής	47.83
Βάθος ολίσθησης	Επιφανειακή (<1.50m)	13.33
	Αβαθής (1.5 – 5.0m)	69.94
	Βαθιά (5 – 20m)	14.36
	Πολύ βαθιά (>20m)	2.37
Πάχος μανδύα αποσάθρωσης	0 – 0.5m	2.38
	0.5 – 1.5m	37.45
	1.5 – 3m	50.54
	> 3m	9.63
Ταχύτητα μετακίνησης	m/min	10.56
	m/day	55.43
	m/year	25.39
	cm/year	8.62
Στάδιο εξέλιξης	Αρχικό	45.75
	Προχωρημένο	51.75
	Τελικό	2.50

Πίνακας 7: Συχνότητα εμφάνισης κατολισθήσεων σε σχέση με τα κύρια χαρακτηριστικά του φαινομένου (ΚΟΥΚΙΣ et al, 1994)

Πρωτίστως, ο προσδιορισμός της ενεργότητας μιας κατολίσθησης αποτελεί έναν από τους πλέον σημαντικούς παράγοντες κατά την διάρκεια της έρευνας και μελέτης της. Για την ορθή εξέλιξη της διαδικασίας έχουν προταθεί τρεις παράμετροι, από την Ομάδα Εργασίας της UNESCO (WP/WLI, 1993). Οι παράμετροι είναι (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007):

- Καθεστώς της ενεργότητας, που σχετίζεται με το χρονικό των μετακινήσεων
- Κατανομή της ενεργότητας, που περιγράφει ποια τμήματα της κατολίσθησης μετακινούνται
- Τύπος της ενεργότητας, που καθορίζει τον τρόπο εκδήλωσης των διαφορετικών μετακινήσεων σε μια ενιαία μάζα της κατολίσθησης

Ακολουθώντας, μια παράμετρος που σχετίζεται με άμεσο τρόπο με τις επιπτώσεις των κατολισθήσεων στο ανθρωπογενές περιβάλλον είναι η ταχύτητα μετακίνησής τους. Η ταχύτητα μετακίνησης μιας κατολίσθησης προσδιορίζεται αρκετά δύσκολα, καθώς αναπτύσσει διαφορετικές τιμές στα διάφορα στάδια εξέλιξής της και στα διάφορα τμήματά της. Στους παρακάτω πίνακες φαίνεται η πιο πρόσφατη ταξινόμηση που έχει γίνει στις κατολισθήσεις με βάση την ταχύτητα μετακίνησής τους και πιθανές βλάβες που μπορεί να προκαλέσει μια κατολίσθηση ανάλογα με την ταχύτητά της.

Κατηγορία	Περιγραφή	Ταχύτητα mm/sec	Τυπική ταχύτητα
7	Εξαιρετικά γρήγορη	$> 5 \times 10^3$	$> 5 \text{ m/sec}$
6	Πολύ γρήγορη	$> 5 \times 10^1$	$> 3 \text{ m/min}$
5	Γρήγορη	$> 5 \times 10^{-1}$	$> 1.8 \text{ m/hr}$
4	Μέτρια	$> 5 \times 10^{-3}$	$> 13 \text{ m/μήνα}$
3	Αργή	$> 5 \times 10^{-5}$	$> 1.6 \text{ m/έτος}$
2	Πολύ αργή	$> 5 \times 10^{-7}$	$> 16 \text{ mm/έτος}$
1	Εξαιρετικά αργή	$< 5 \times 10^{-7}$	$< 16 \text{ mm/έτος}$

Πίνακας 8: Κλίμακα ταχύτητας μετακίνησης κατολισθήσεων (WP/WLI, 1995)

Κατηγορία ταχύτητας μετακίνησης	Πιθανές βλάβες
7	Καταστροφές κτιρίων λόγω έντονων μετακινήσεων ή πρόσκρουσης της μετακινούμενης μάζας, πολλοί θάνατοι, απίθανη η ύπαρξη επιζώντων.
6	Μερικοί θάνατοι, περιορισμένος χρόνος για ασφαλή φυγή όλων των κατοίκων.
5	Δυνατή η ασφαλής φυγή των κατοίκων. Σπίτια, εγκαταστάσεις και δίκτυα υποδομής με μεγάλες βλάβες ή τελείως κατεστραμμένα.
4	Μερικές από τις προσωρινές εγκαταστάσεις είναι δυνατό να διατηρηθούν.
3	Δυνατή η λήψη μέτρων προστασίας κατά την ενεργοποίηση. Μερικές καλά σχεδιασμένες εγκαταστάσεις μπορεί να διατηρηθούν με κατάλληλη συντήρηση, αν δεν υπάρξει ξαφνική επιτάχυνση της κίνησης.
2	Μερικές από τις μόνιμες κατασκευές παραμένουν ανέπαφες.

Η μετακίνηση προσδιορίζεται μόνο με ενόργανες μετρήσεις λόγω του μικρού μεγέθους της. Οι κατασκευές δεν υφίστανται βλάβες, όταν λαμβάνονται τα κατάλληλα μέτρα.

Πίνακας 9: Πιθανές βλάβες ανάλογα με την ταχύτητα μετακίνησης (WP/WLI, 1995)

Επιπροσθέτως, σε μια περιοχή, στην οποία πρόκειται να κατασκευαστεί ένα τεχνικό έργο, επιβάλλεται να έχει μελετηθεί ο κίνδυνος που υπάρχει για να συμβεί μια κατολίσθηση. Για την περιγραφή της συγκεκριμένης έννοιας χρησιμοποιείται ο όρος «κίνδυνος – επικινδυνότητα» που σε διεθνές επίπεδο αποδίδεται μέσω επιμέρους όρων (Varnes, 1984). Πιο συγκεκριμένα, οι όροι που υπερσχύουν στη διεθνή επιστημονική κοινότητα είναι (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007):

- Natural Hazard (H): Η πιθανότητα εκδήλωσης ενός δυναμικού φυσικού καταστροφικού φαινομένου, όπως είναι η κατολίσθηση, σε μια ορισμένη χρονική περίοδο και σε μια δεδομένη περιοχή.
- Τρωτότητα (Vulnerability) (V): Ο βαθμός απώλειας κάποιου στοιχείου του κινδύνου που οφείλεται στο φυσικό καταστροφικό φαινόμενο και εκφράζεται με κλίμακα, στην οποία ισχύει η κατάταξη από την τιμή 0, για μηδενική ύπαρξη βλάβης, έως και την τιμή 1, για πρόκληση ολικής βλάβης.
- Στοιχεία του κινδύνου (Elements of risk) (E): Ο πληθυσμός, οι περιουσίες, οι οικονομικές επιπτώσεις κ.λπ. μιας συγκεκριμένης περιοχής.
- Ειδικός κίνδυνος (Specific Risk) (Rs): Ο αναμενόμενος βαθμός απωλειών, εξαιτίας του συγκεκριμένου φυσικού καταστροφικού φαινομένου ($R_s = H \times V$).
- Συνολικός κίνδυνος (Total Risk) (Rt): Ο αναμενόμενος αριθμός θυμάτων, τραυματισμών, βλαβών – ζημιών σε περιουσίες και επιπτώσεων σε οικονομικές δραστηριότητες, λόγω του φυσικού καταστροφικού φαινομένου ($R_t = (E) \times (R_s) = (E) \times (H \times V)$).
- Ζωνοποίηση (Zonation): Η οριοθέτηση ενός τμήματος γήινης επιφάνειας και η ταξινόμησή του σύμφωνα με τον βαθμό του υπαρκτού ή του δυνητικού κινδύνου από κατολίσθηση, χωρίς την απαραίτητη ύπαρξη περιορισμών.

Στον Ελληνικό χώρο παρατηρείται εκδήλωση κατολισθήσεων σε όλους τους γεωλογικούς σχηματισμούς, με τις πιο σημαντικές εξ αυτών να λαμβάνουν χώρα στο δυτικό αλλά και στο κεντρικό τμήμα του. Τα νεογενή πετρώματα, ο φλύσχος και οι τεταρτογενείς αποθέσεις, όπως είναι τα κορρήματα κλιτύων, τα αλλούβια κ.λπ., εμφανίζουν πλήθος κατολισθήσεων. Αναφορικά με τις κατολισθήσεις στους βραχώδεις σχηματισμούς, πρόκειται για σκληρά πετρώματα, τα οποία επικάθονται σε μαλακούς σχηματισμούς. Καθοριστικούς παράγοντες για την ευστάθεια τέτοιου είδους πρανών αποτελούν η γεωδυναμική εξέλιξη της περιοχής γύρω από το σημείο της κατολίσθησης, η έντονη νεοτεκτονική δραστηριότητα που παρουσιάζεται και η λιθολογική τους σύσταση. Στη συνέχεια, ακολουθούν λίγα λόγια για ορισμένες από τις πιο σημαντικές κατολισθήσεις του Ελληνικού χώρου.

2.2.1. ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗ ΠΑΝΑΓΟΠΟΥΛΑΣ

Η περιοχή της Παναγοπούλας βρίσκεται στο νότιο τμήμα του Δυτικού Κορινθιακού Κόλπου, συνορεύοντας δυτικά με το χωριό Ψαθόπυργο και ανατολικά με το χωριό Λαμπίρη. Επηρεάζεται μορφολογικά από την έντονη τεκτονική και σεισμική δραστηριότητα του Κορινθιακού κόλπου. Στο χερσαίο πρανές της περιοχής, ανάντη της ακτογραμμής, έχουν λάβει επανειλημμένα χώρα μεγάλου μεγέθους κατολισθητικά

φαινόμενα, τα οποία προκάλεσαν σημαντικές καταστροφές στα διερχόμενα από το σημείο οδικό και σιδηροδρομικό δίκτυο. Ως αποτέλεσμα, η κυκλοφορία διακοπτόταν. (Σακελλαρίου Α. κ.ά., 2001)

Η κατολίσθηση της θέσης «Παναγοπούλα» πραγματοποιήθηκε επί ενός αντερείσματος, με μέση κλίση $\sim 30^\circ$ και υψόμετρο $\sim 300\text{m}$, που βρίσκεται ανάμεσα σε έναν ανατολικό χείμαρρο, με ήπιες κλίσεις κλιτύων και όχι έντονα φαινόμενα κατά βάθους διάβρωσης, και έναν δυτικό χείμαρρο, με απότομες κλιτύες στην κοίτη του και έντονη κατά βάθος διάβρωση.

Από γεωλογικής άποψης, η περιοχή χαρακτηρίζεται από αλπικό υπόβαθρο, με σχηματισμούς έντονα τεκτονισμένους και δομημένους κατά λέπη με επάλληλες επιπτεύσεις. Από τους παλαιότερους προς τους νεότερους γεωλογικούς σχηματισμούς της περιοχής εμφανίζονται οι εξής (Ταβουλάρης, 2017):

- i. Πολύχρωμοι κερατόλιθοι: Πτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά.
- ii. Ασβεστόλιθοι και Κερατόλιθοι: Μέτρια μηχανικά χαρακτηριστικά.
- iii. Κρητιδικοί Ασβεστόλιθοι: Κύρια εμφάνιση αλπικού υποβάθρου.
- iv. Μεταβατικοί Ασβεστόλιθοι: Μεταβατική φάση ασβεστόλιθων – φλύσχη. Έχει μεγάλο εύρος εναλλαγών, έντονο τεκτονισμό. Αποτέλεσε το σημείο όπου πραγματοποιήθηκε η μεγάλη κατολίσθηση στα ανάντη της Ν.Ε.Ο. το 1971.
- v. Φλύσχης. Επιφανειακή εμφάνιση.
- vi. Πρόσφατα Μεταλπικά Ιζήματα Πλειστοκαίνου και Τεταρτογενούς. Τα Πλειστοκαινικά Ιζήματα είναι πολύμεικτα κροκαλοπαγή που καλύπτουν το Ανατολικό τμήμα και εμφανίζουν επιφανειακά έντονη αποσάθρωση. Τα Τεταρτογενή είναι κυρίως εδαφικά υλικά, πλευρικά και αργιλικά κορήματα, αποθέσεις κοίτης χειμάρρων και αλλουβιακών ριπιδίων.
- vii. Βραχώδη διαταραγμένα και ολισθημένα υλικά. Κεντρικά στην περιοχή και στο κατάντη τμήμα της στέψης.

Σύμφωνα με τους Σακελλαρίου Α. κ.ά. (2001), η τάφρος του Κορινθιακού Κόλπου είναι μια μεταλπική λεκάνη, ασύμμετρου σχήματος, που ξεκίνησε να εξελίσσεται από το Άνω Μειόκαινο – Πλειόκαινο και συνεχίζει έως σήμερα. Κυρίως, επηρεάζεται από χερσαίες και θαλάσσιες ρηξιγενείς ζώνες του νότιου περιθωρίου της. Η περιοχή της Παναγοπούλας βρίσκεται στο κομμάτι του πρανούς που αναπτύσσεται κατά μήκος δύο παράλληλων ενεργών ρηγμάτων, του Ψαθόπυργου, στην βάση της χερσαίας πλευράς, και της νότιας ρηξιγενούς ζώνης του κόλπου, στη βάση του υποθαλάσσιου πρανούς. Την περιοχή διασχίζει μια εκ των έξι κύριων ενεργών ρηξιγενών ζωνών, με διεύθυνση Α – Δ, που συνέβαλαν στην διάνοιξη του Κορινθιακού Κόλπου. Η ζώνη αυτή διέρχεται σχεδόν από την βάση του ασβεστολιθικού πρανούς στην Ν.Ε.Ο. και έχει κλίση $60-65^\circ$ προς τον Β, δηλαδή περίπου κάθετη διεύθυνση κλίσης στον άξονα της Ε.Ο. Στη δυτική πλευρά της περιοχής η διεύθυνση της ρηξιγενούς ζώνης μεταβάλλεται σε ΒΔ-ΝΔ. (Φυτρολάκης και Αντωνιάδης, 1974)

Το κρισιμότερο κατολισθητικό φαινόμενο της περιοχής πραγματοποιήθηκε στις 25-26 Απριλίου και στις 3 Μαΐου του 1971, λίγο καιρό αφότου κατασκευάστηκε ο νέος δρόμος, στο 193° χιλιόμετρο της Εθνικής Οδού Κορίνθου – Πατρών. Το εύρος της κατολίσθησης κυμάνθηκε στα 350 με 250 μέτρα και ο μετακινούμενος όγκος ξεπέρασε το $1.000.000\text{m}^3$. Συνέπεια του γεγονότος ήταν ο αποκλεισμός τριών κομβικών συγκοινωνιακών αξόνων (Σιδηροδρομικός Άξονας, Παλαιά Εθνική Οδός και Νέα Εθνική Οδός) για αρκετό καιρό και η πραγματοποίηση της συγκοινωνίας για το διάστημα αυτό μόνο μέσω θαλάσσης. (Ταβουλάρης, 2017)

Με βάση την αναγνωριστική γεωλογική μελέτη (2002) του πρώην Υπουργείου Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων, οι μετακινήσεις που καταγράφηκαν εντοπίστηκαν στην Ν.Ε.Ο. και κατάντη αυτής. Πρόκειται για βάθη μετακίνησης από 7m έως και 16m στην Ν.Ε.Ο., ενώ για βάθη 23m έως και 26m στο παραλιακό μέτωπο.

Για την αποκατάσταση της ευστάθειας στην περιοχή λήφθηκαν μέτρα προστασίας, τα οποία όμως αποδείχθηκαν περιστασιακά. Και αυτό γιατί στο διάστημα των επόμενων εικοσιτριών χρόνων εμφανίζονταν ανά διαστήματα είτε καθιζήσεις του οδοστρώματος, είτε κατολισθητικά φαινόμενα (ολισθήσεις, διαβρώσεις, θραύσεις) που οδηγούσαν μέχρι και σε προσωρινή διακοπή της κυκλοφορίας. Πολύ συχνά, επίσης, στα πρηνή της Νέας Εθνικής Οδού, δημιουργούνταν μεγάλη ροή επιφανειακού νερού, που θύμιζε καταρράκτη. (Ταβουλάρης, 2017)



Εικόνα 1: Κατολίσθηση Παναγοπούλας Ν.Ε.Ο. Αθηνών - Πατρών, 1971. Περιστροφική ολίσθηση (τύπου εδάφους) σε κατακερματισμένο ασβεστόλιθο σε εναλλαγές με αργιλικούς σχιστόλιθους και πυριτιόλιθους. Λήψη από ελικόπτερο στις 28/04/1971, για τους σκοπούς της γεωτεχνικής μελέτης που εκπονήθηκε εκείνη την περίοδο από την ΓΕΩΕΡΕΥΝΑ ΑΕ. (Koukis et al, 2005)

2.2.2. ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗ ΤΣΑΚΩΝΑΣ

Η περιοχή της Τσάκωνας βρίσκεται στον νομό Αρκαδίας και την διασχίζει η Νέα Εθνική Οδός Τρίπολης – Καλαμάτας. Το σημείο της κατολίσθησης τοποθετείται σε απόσταση περίπου 15km νότια της Μεγαλόπολης, επί της Ν.Ε.Ο. Τρίπολης – Καλαμάτας, σχεδόν στα σύνορα των νομών Αρκαδίας και Μεσσηνίας. Η κατολίσθηση οριοθετείται βόρεια και νότια σχεδόν ευθύγραμμα με διεύθυνση ΑΒΑ – ΔΝΔ. Το όριο της νότιας πλευράς συμπίπτει με μια μορφολογική ασυνέχεια που συναντά νότια αυτής

ανοιχτό αντίκλινο. Από την άλλη, το όριο της βόρειας πλευράς βρίσκεται ελαφρώς νότια ενός μικρού ρέματος κατά βάθος διαβρωμένου και έχει διεύθυνση ΒΑ – ΝΔ.

Γεωλογικά, στην περιοχή συναντάμε 3 λιθοστρωματογραφικούς σχηματισμούς της ενότητας Πίνδου. Από τον παλαιότερο στο νεότερο, είναι οι εξής (Φουντούλης κ.ά., 2004):

- i. Κερατολιθική σειρά. Στην περιοχή της κατολίσθησης κυριαρχούν οι ψαμμίτες, χρονολογίας Ιουρασικού – Κ. Κρητιδικού.
- ii. Ασβεστόλιθοι και Ψαμμίτες (πρώτος φλύσσης). Έχουν αποκολληθεί και σχετίζεται τεκτονικά με την υποκείμενη Κερατολιθική σειρά.
- iii. Ανωκρητιδικοί Ασβεστόλιθοι. Υπέρκεινται των υπολοίπων.

Η περιοχή της κατολίσθησης έχει υποστεί έντονη τεκτονική παραμόρφωση. Αυτή είναι ιδιαίτερα εμφανής λόγω των πτυχών, των λεπιώσεων, των ρηγμάτων και των διακλάσεων. Οι δύο κύριες φάσεις παραμόρφωσης που διακρίνονται στην περιοχή είναι η Αλπική και η Μεταλπική ή Νεοτεκτονική. Η Αλπική φάση παραμόρφωσης είναι η παλαιότερη και σε αυτή οι κινήσεις έχουν εφαπτομενικό χαρακτήρα και γενική φορά από ανατολή προς δύση. Ως αποτέλεσμα τους τα πετρώματα είτε πτυχώνονται είτε θραύονται, ανάλογα με την μηχανική συμπεριφορά που έχει το καθένα. Η Μεταλπική φάση παραμόρφωσης αποτελεί την περίοδο «γένεσης» μεγάλων ρηξιγενών ζωνών, εκ των οποίων κάποιες είναι ενεργές μέχρι και σήμερα. Σε αυτή τη φάση, επικρατούν οι κατακόρυφες κινήσεις και δημιουργούνται έτσι τεκτονικά κέρατα και βυθίσματα. Το σημείο της κατολίσθησης της Τσάκωνας τοποθετείται στο ΝΔ όριο μιας νεοτεκτονικής δομής, μεταξύ των τεκτονικών βυθισμάτων της Άνω Μεσσηνίας και της Μεγαλόπολης. Συμπεραίνουμε, λοιπόν, ότι η κατολίσθηση της Τσάκωνας βρίσκεται σε μια τεκτονικά ενεργή περιοχή, και σε απόσταση περίπου 2 χιλιομέτρων από την ενεργή ρηξιγενή ζώνη της Μέλπειας. (Φουντούλης Ι. κ.ά., 2004)

Η κατολίσθηση της Τσάκωνας χαρακτηρίζεται από έναν επιμήκη άξονα μήκους 1200m με εγκάρσια προς την Εθνική Οδό διεύθυνση και πλάτος γύρω στα 300m. Κάποιες πρώτες αστοχίες εμφανίστηκαν το 2000, αφού ολοκληρώθηκε η κατασκευή της Ν.Ε.Ο., ενώ η τελική αστοχία πραγματοποιήθηκε τον Φεβρουάριο του 2003, καθώς έντονες βροχοπτώσεις έλαβαν χώρα στην περιοχή. Η τελική αστοχία χαρακτηρίζεται ως μεταθετική ολίσθηση, στην οποία αναπτύσσονται επιμέρους αστοχίες με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Με βάση την γεωτεχνική έρευνα στην περιοχή, ο συνολικός όγκος των υλικών που ολίσθησαν έφθασε τα 9.000.000m³.

Πέρα από τις έντονες βροχοπτώσεις, αξίζει να σημειωθεί ότι συνέβαλαν και άλλοι παράγοντες στην εκδήλωση της κατολίσθησης. Πρόκειται για παράγοντες που δημιούργησαν το γεωλογικό πλαίσιο μια ασταθούς περιοχής, δηλαδή λιθολογία, τεκτονική, μορφολογία και υδρογεωλογία, και για παράγοντες που είχαν ενισχυτική δράση και επιτάχυναν την τελική εκδήλωση της αστοχίας, δηλαδή ανθρωπογενείς παρεμβάσεις και κλιματολογικές συνθήκες μια ιδιαίτερα υγρής περιόδου. (Σωτηρόπουλος Λ. κ.ά., 2004)



Εικόνα 2: Κατολίσθηση Τσάκωνα Ε.Ο. Τρίπολης - Καλαμάτας, 2003. Περιτροφική ολίσθηση (τύπου εδάφους) σε διατμημένο φλύσχη (εδώ σε αργιλικό σχιστόλιθο) (Ελληνική Γεωλογική Εταιρεία, 2004)

2.2.3. ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗ ΤΕΜΠΩΝ

Η Εθνική Οδός στην κοιλάδα των Τεμπών βρίσκεται σε κοιλάδα που ανήκει στον Κίσσαβο. Το πρηνές είναι σχεδόν κατακόρυφο και οι κλιτύες του χαρακτηρίζονται από μεγάλες μορφολογικές κλίσεις. Πρόκειται για μια περιοχή με έντονο ανάγλυφο, όπου εμφανίζεται ποικιλία γεωμορφών, ενώ τα ρέματα έχουν χαρακτηριστικό σχήμα V. Το πρηνές που υπέστη την κατολίσθηση αποτελείται από κατακερματισμένους βραχώδεις γεωλογικούς σχηματισμούς. Πιο συγκεκριμένα, την περιοχή δομούν έντονα κερματισμένα ασβεστολιθικά πετρώματα, καθώς και κορρήματα.

Με την κατολίσθηση στην περιοχή των Τεμπών, η Εθνική Οδός σε αυτό το ύψος έκλεισε για μεγάλο χρονικό διάστημα, εξαιτίας του μεγάλου όγκου βραχωδών μαζών που αποκολλήθηκαν, ταλαιπωρώντας έτσι πλήθος ανθρώπων που μετακινούνταν μέσω του συγκεκριμένου τμήματος του δρόμου. Επιπλέον, τραγικό γεγονός αποτέλεσε η απώλεια μίας ανθρώπινης ζωής.

Για την εκδήλωση του συγκεκριμένου φαινομένου στην Κοιλάδα των Τεμπών συνέβαλαν περισσότεροι από ένας παράγοντες. Πρώτον, η οριακή ισορροπία των πρηνών δίχως την ύπαρξη των κατάλληλων μέτρων ασφαλείας, για να συγκρατήσουν τους βράχους σε περίπτωση πτώσης τους, είναι ο ένας εξ αυτών. Στην εν λόγω περίπτωση, πραγματοποιήθηκε αποκόλληση ενός μπλοκ τεμαχών από μεγάλο υψόμετρο, που προκάλεσε την κατολίσθηση και περίπου 120 τόνοι βραχώδους υλικού έπεσαν στο οδικό δίκτυο (Χρηστάρας κ.ά., 2010). Δεύτερον, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, μορφολογικά τα πρηνή των Τεμπών χαρακτηρίζονται από μεγάλα υψόμετρα και μεγάλες γωνίες κλίσης που με την επίδραση της έντονης τεκτονικής δραστηριότητας στο πέρασμα των χρόνων ήταν πιο ευάλωτα σε πτώση. Η Θεσσαλία χαρακτηρίζεται ως περιοχή μέτριας έως υψηλής σεισμικότητας, με πολλούς σεισμούς μεγέθους >4 , οι οποίοι έχουν προκαλέσει φθορές στους σχηματισμούς της περιοχής.

Τρίτον, ισχυρές βροχοπτώσεις, που κατέκλυσαν την περιοχή των Τεμπών, αύξησαν σημαντικά την πίεση στους πόρους των πετρωμάτων και συνδυαστικά με το αργιλικό υλικό πλήρωσης των ασυνεχειών τους, ήταν αναπόφευκτο γεγονός η εκδήλωση της βραχοκατάπτωσης (Χρηστάρας et al., 2010).

Για την αποφυγή επανάληψης του ίδιου ή παρόμοιου περιστατικού, το Γεωτεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, και ειδικότερα το Παράρτημα Κεντρικής Ελλάδος, επισήμαναν ορισμένες κινήσεις των αρμόδιων για την προστασία της περιοχής. Απαραίτητος θεωρείται ο συστηματικός έλεγχος της ζώνης επιρροής και της έντασης των δονήσεων από τις εκρήξεις για να διασφαλιστεί η μη επιρροή τους στην υπάρχουσα επισφαλή ισορροπία, στα σημεία που η σήραγγα προσεγγίζει τα πρανή της οδού. Επιπλέον, συνίσταται έλεγχος των Γεωλογικών και Γεωτεχνικών μελετών που πραγματοποιήθηκαν για την σχεδίαση και υλοποίηση του εν λόγω έργου, αλλά και απόδοση ευθυνών στους αρμόδιους. Επιπροσθέτως, κατά την διάρκεια εξέλιξης των έργων επιβάλλεται αυστηρή εφαρμογή κατάλληλων μέτρων για την ασφάλεια τόσο του χώρου, όσο και των παρευρισκόμενων σε αυτόν. Τέλος, στην περίπτωση των Τεμπών, πρόκειται για ένα έργο μεγάλης κλίμακας και σε συνδυασμό με την έντονη μορφολογία αναμένονται μέχρι έναν βαθμό κάποιες αστοχίες. Όμως, όταν διέρχεται η Εθνική Οδός από την περιοχή, θα πρέπει οι αρμόδιοι να έχουν προνοήσει για πρόσθετα μέτρα ασφαλείας και να έχουν ερευνήσει τις οποιεσδήποτε αστοχίες ενδέχεται να συμβούν. (Γεωτεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας – Παράρτημα Κεντρικής Ελλάδος, 2009)



Εικόνα 3: Κατολίσθηση Τεμπών, 2009 (Αρχείο Γ. Παπαθανασίου, 2009)



Εικόνα 4: Κατολίσθηση Τεμπών, 2009 (Αρχείο Ε. Λέκκα, 2009)



Τέμνη, Θεσσαλία

17-12-2009

Εικόνα 5: Κατολίσθηση Τεμπών, 2009 (Αρχείο Γ. Παπαθανασίου, 2009)

2.3. ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΠΡΑΝΩΝ

Η ανάλυση της ευστάθειας ενός πρανού σχετίζεται με τον πιθανό μηχανισμό που θα οδηγήσει στην αστοχία (θραύση) του πρανού. Επιπλέον, περιέχει και τις μεθοδολογίες που ακολουθούνται για την επίλυση της πιθανής αστοχίας. Στόχος της κινηματικής ανάλυσης είναι η διερεύνηση της ύπαρξης ή μη δυνατότητας να εκδηλωθεί κατολίσθηση ή αστοχία στη βραχομάζα.

Οι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη στην κινηματική ανάλυση ευστάθειας, για τον σωστό σχεδιασμό των πρανών είναι οι εξής (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007):

- Αντιπροσωπευτικές σχέσεις τάσεων – παραμορφώσεων των γεωλογικών υλικών των εμπλεκόμενων πρανών
- Μεταβολές της πίεσης των πόρων
- Ανισοτροπία και ανομοιογένεια των γεωλογικών υλικών
- Επίδραση αρχικών τάσεων
- Συνέπειες και επιφορτίσεις λόγω κατασκευών στα πρανή

Ύστερα από πολλές μελέτες, καθιερώθηκαν δύο κύριες μέθοδοι για την προσέγγιση και ανάλυση της ευστάθειας των πρανών. Αυτές είναι οι αναλύσεις της παραμόρφωσης, που δε θα αναλυθούν καθώς δεν χρησιμοποιούνται συχνά, και οι αναλύσεις της οριακής ισορροπίας. Κύρια διαφορά των δύο μεθόδων είναι η εκτίμηση ή μη των παραμορφώσεων πριν την αστοχία. Ειδικότερα, στις αναλύσεις της παραμόρφωσης, όπως αναμένεται, λαμβάνεται υπόψη το εκτιμώμενο εύρος παραμορφώσεων που θα έχουν οι μετακινήσεις των πρανών, ενώ στις αναλύσεις της οριακής ισορροπίας έχει περισσότερη σημασία η αποσόβηση της αστοχίας.

2.3.1. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΟΡΙΑΚΗΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

Οι πιο συνηθισμένες αναλύσεις για την ευστάθεια των βραχωδών πρανών είναι αυτές της οριακής ισορροπίας. Οι εν λόγω αναλύσεις βασίζονται στην εξέταση της ισορροπίας των δυνάμεων που πιθανότατα θα προκαλέσουν ολίσθηση του πρανού κατά μήκος μιας ασυνέχειας και των δυνάμεων που αντιστέκονται στην ολίσθηση. Τα κύρια κοινά χαρακτηριστικά των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό που απαιτούν αυτές οι αναλύσεις είναι:

- Υπολογισμός συντελεστή ασφαλείας (SF)
Υπολογίζεται το οριακό φορτίο που μπορεί να προκαλέσει αστοχία στη βραχομάζα και συγκρίνεται με το φορτίο που αντιστέκεται σε αυτή.

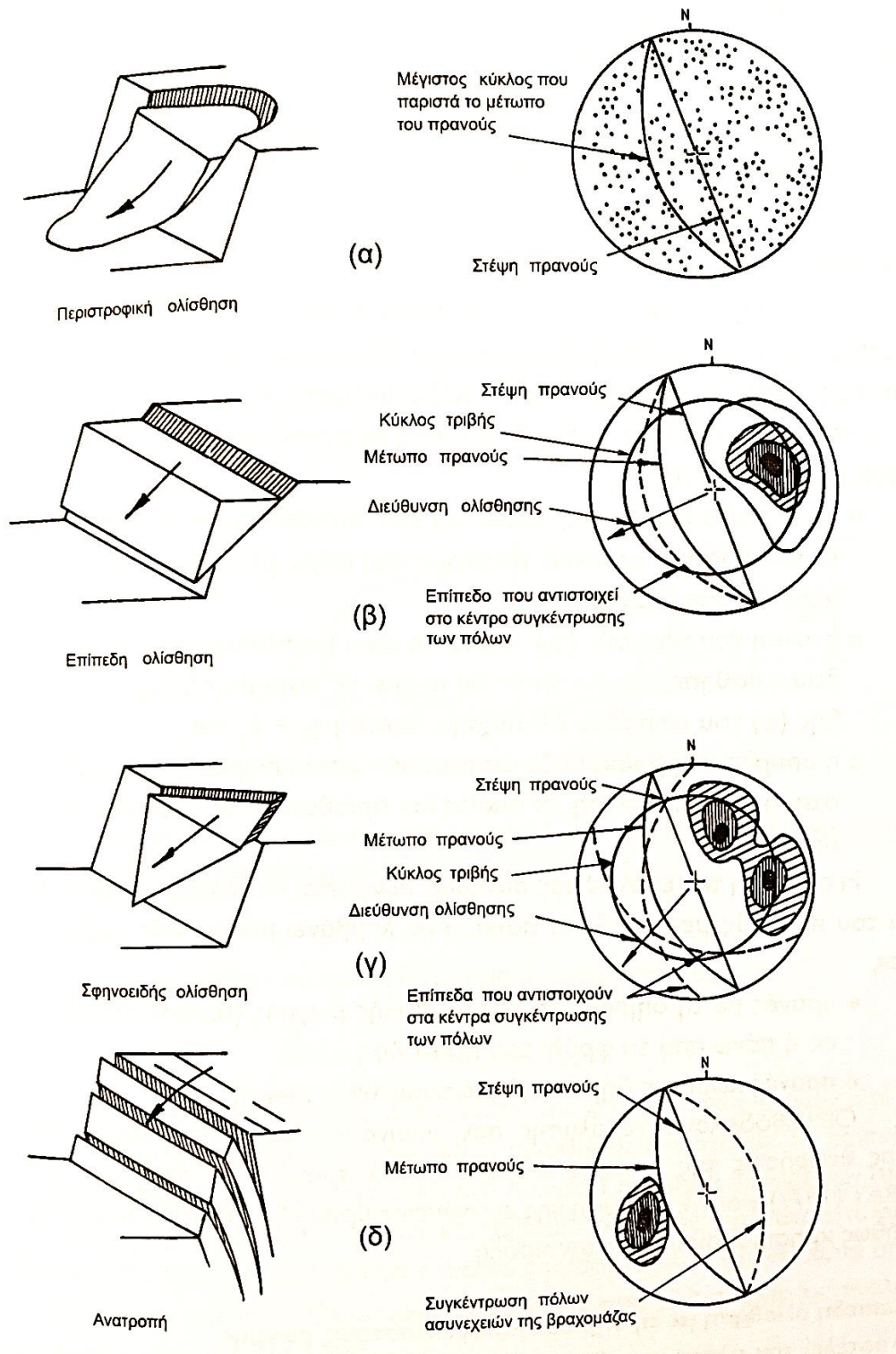
$$SF = \frac{\text{δυνάμεις που αντιστέκονται στην ολίσθηση}}{\text{δυνάμεις που προκαλούν την ολίσθηση}} = \frac{P_{\text{ΠΑΘ}}}{P_{\text{ΕΝΕΡΓ}}}$$

Για $F = 1$ η βραχομάζα βρίσκεται σε κατάσταση οριακής ισορροπίας

- Για κάθε μέθοδο υπάρχει συγκεκριμένη γεωμετρία της επιφάνειας ολίσθησης. Ανάλογα με το αν η ολίσθηση είναι επίπεδη, κυκλική ή σύνθετη, μεταβάλλεται το πόσο πολύπλοκη θα είναι η μεθοδολογία ανάλυσης που θα ακολουθηθεί.
- Ισχύει το κριτήριο θραύσης Mohr – Coulomb.
Υπολογίζεται η διατμητική αντοχή έμμεσα, από τις παραμέτρους c και ϕ .
- Λαμβάνονται υπόψη παραδοχές στις συνθήκες στατικής ισορροπίας εξαιτίας της ύπαρξης πολλών αγνώστων στις σχέσεις που χρησιμοποιούνται.



Για την ανάλυση στα βραχώδη πρηνή, σημαντικός είναι ο ρόλος του γεωλογικού παράγοντα, καθώς σκοπός της διαδικασίας είναι η εκτίμηση ενός αξιόπιστου μοντέλου της δομής της βραχομάζας. Για την ανάλυση της ευστάθειας των βραχωδών πρανών, αρχικά, πρέπει να γίνει μια εκτίμηση των δυνητικών ολισθήσεων. Βασική παράμετρο της συγκεκριμένης εκτίμησης αποτελεί ο προσανατολισμός των επιπέδων των ασυνεχειών και η σύγκρισή του με τον προσανατολισμό του επιπέδου του πρανούς. Τα επίπεδα του πρανούς και των ασυνεχειών αποτυπώνονται στο στερεοδιάγραμμα Schmidt. Στο ίδιο διάγραμμα τοποθετείται και ο κύκλος που εκφράζει την βασική γωνία τριβής (ϕ_b). Με βάση το στερεοδιάγραμμα μπορεί να προκύψουν οι περιπτώσεις του σχήματος 2. (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007)



Σχήμα 2: Βασικοί τύποι ολισθήσεων βραχωδών πρανών και αντίστοιχα διαγράμματα στατιστικής επεξεργασίας πόλων ασυνεχειών - αποτύπωσης κυρίων επιπέδων (Hoek and Bray, 1973)

Ακολουθώντας, είναι απαραίτητη η εκτενέστερη μελέτη της δυνατότητας εκδήλωσης του κάθε τύπου αστοχίας και της κάθε μιας μεθόδου ανάλυσης της ευστάθειας των βραχωδών πρανών. Ακολουθεί αναφορά και ανάλυσή τους στην επόμενη παράγραφο.

2.3.2. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΣΤΟΧΙΩΝ ΣΕ ΒΡΑΧΩΔΗ ΠΡΑΝΗ

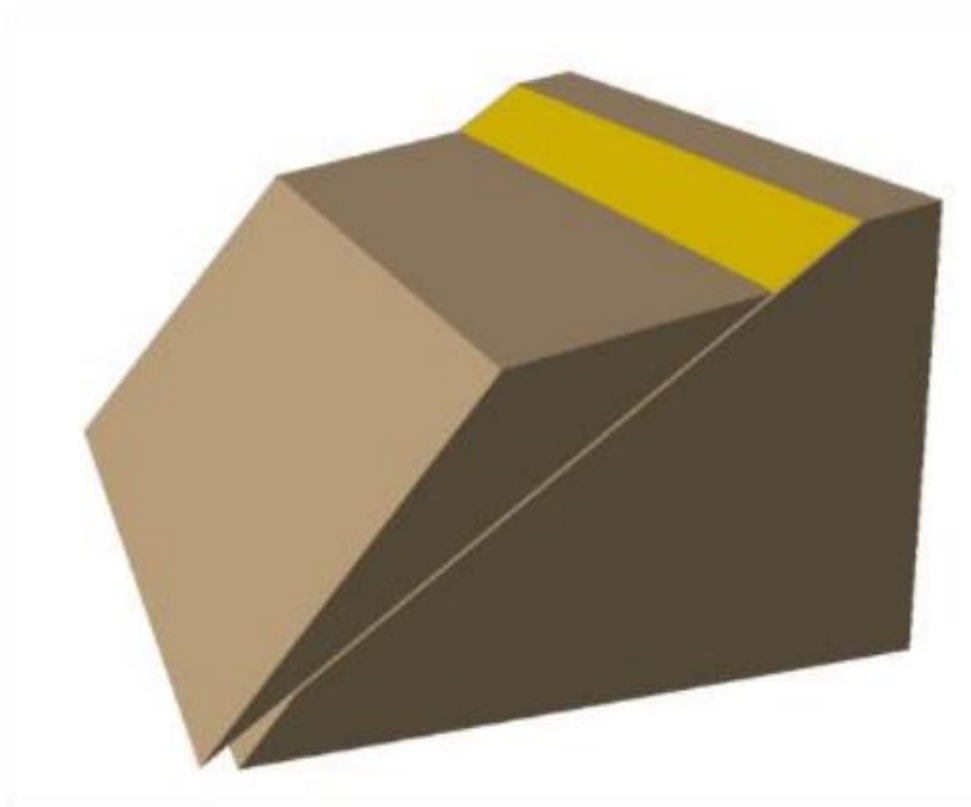
2.3.2.1. ΕΠΙΠΕΔΗ ΟΛΙΣΘΗΣΗ

Πρόκειται για μια αρκετά σπάνια περίπτωση αστοχίας σε βραχώδη πρανή, καθώς είναι εξαιρετικά δύσκολο να συγκεντρώνονται όλες οι απαραίτητες γεωμετρικές συνθήκες για την συγκεκριμένη αστοχία. Ωστόσο, θεωρείται πως είναι ιδιαίτερα χρήσιμη γιατί δείχνει πόσο ευαίσθητη είναι η ευστάθεια του πρανού ως προς τη διατμητική αντοχή του επιπέδου ολίσθησης και τις συνθήκες του υπόγειου νερού. Συνήθως, οι επιφάνειες της επίπεδης ολίσθησης είναι δομικές ασυνέχειες, δηλαδή ρήγματα, διακλάσεις, επίπεδα στρώσης ή επίπεδα επαφής υγιούς πετρώματος με το αποσαθρωμένο πέτρωμα. (Χατζηγηγορίου και Κουντουράς, 2019)

Η επίπεδη ολίσθηση ελέγχεται από μόνο μία επιφάνεια ασυνέχειας, η οποία προβάλλει στο μέτωπο του πρανού (Παπαθανασίου, 2022). Για να εκδηλωθεί αυτό το είδος αστοχίας πρέπει να τηρούνται οι παρακάτω προϋποθέσεις (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007):

- Το επίπεδο ολίσθησης και το επίπεδο του πρανού πρέπει να είναι σχεδόν παράλληλα μεταξύ τους (διαφορά μέγιστης κλίσης τους $\pm 20^\circ$)
- Για τις γωνίες κλίσης των επιπέδων πρέπει να ισχύει η σχέση $\psi_f > \psi_p > \phi$, όπου ψ_f είναι η κλίση του πρανού, ψ_p είναι η κλίση του επιπέδου ολίσθησης και ϕ είναι η γωνία τριβής του επιπέδου ολίσθησης
- Πρέπει να υπάρχουν στη βραχομάζα οι λεγόμενες «επιφάνειες απελευθέρωσης», οι οποίες αντιστέκονται μηδαμινά στην ολίσθηση και της βάζουν πλευρικά όρια

Η ανάλυση της ευστάθειας συνήθως γίνεται με κάθετη διατομή στο μέτωπο του πρανού, μοναδιαίου πάχους, και μπορεί να εμφανίζει δύο περιπτώσεις. Πρώτη και πιο διαδεδομένη είναι η επίπεδη ολίσθηση με την δημιουργία εφελκυστικής ρωγμής. Η εφελκυστική ρωγή μπορεί να βρίσκεται είτε στην ανώτερη επιφάνεια του πρανού, είτε στο μέτωπό του και η θέση της εκτιμάται από τη σχέση $Z/H = (1 - \cot \psi_f \tan \psi_p)$, όπου Z είναι το βάθος της εφελκυστικής ρωγμής και H είναι το ύψος του πρανού. Δεύτερη είναι η επίπεδη ολίσθηση που δεν περιλαμβάνει δημιουργία εφελκυστικής ρωγμής και αποτελεί την κλασική περίπτωση επίπεδης ολίσθησης. Για την κάθε περίπτωση ισχύουν παραδοχές και υπολογίζεται ο συντελεστής ασφάλειας, ο οποίος μεταβάλλεται με την ύπαρξη ή όχι νερού στην ασυνέχεια.



Σχήμα 3: Απεικόνιση ολίσθησης τεμάχους σε επίπεδη επιφάνεια (Παπαθανασίου, 2022)



Εικόνα 6: Επίπεδη ολίσθηση (Αρχείο Β. Μαρίνου) (από Γ. Παπαθανασίου, 2021)

2.3.2.2. ΣΦΗΝΟΕΙΔΗΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗ

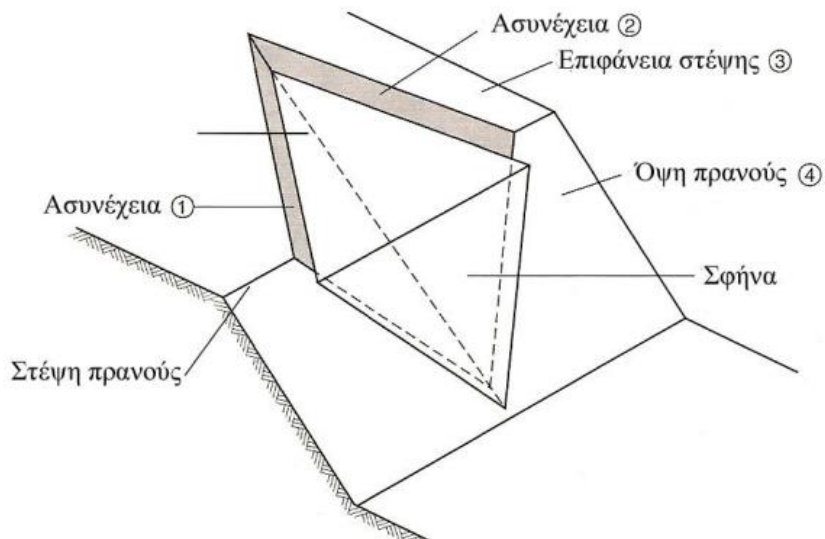
Η περίπτωση της σφηνοειδούς ολίσθησης είναι περισσότερο συχνή από την ολίσθηση σε επίπεδη επιφάνεια. Πρόκειται για έναν πολύ απλό κύριο μηχανισμό, ωστόσο για την μαθηματική του προσέγγιση απαιτούνται αρκετές παράμετροι και αυτό δυσχεραίνει την διαδικασία. Η εν λόγω αστοχία πραγματοποιείται σε ογκοτεμαχισμένα πετρώματα και η ολίσθηση γίνεται μεταξύ πρισματικών τεμαχίων του πετρώματος και μετώπου πρανούς (Χατζηγρηγορίου και Κουντουράς, 2019).

Στις σφηνοειδείς αστοχίες περιλαμβάνεται η μάζα που ολισθαίνει, η οποία καθορίζεται από δύο επιφάνειες ασυνεχειών τεμνόμενες κατά μία γραμμή, με κατηφορική κλίση προς το μέτωπο του πρανούς (Παπαθανασίου, 2022). Η διεύθυνση της ολίσθησης ταυτίζεται με τη διεύθυνση της τομής των ασυνεχειών και αναγνωρίζεται μέσω της στερεογραφικής προβολής.

Για να ικανοποιείται ο κύριος μηχανισμός της σφηνοειδούς ολίσθησης και να είναι δυνατή η ανάλυσή του γίνονται κάποιες παραδοχές αναφορικά με την γεωμετρία της βραχοσφήνας. Αυτές είναι οι εξής:

- Η συνθήκη της ολίσθησης είναι $\psi_H > \psi_i > \phi$, όπου ψ_H είναι η γωνία κλίσης του πρανούς, ψ_i είναι η γωνία κλίσης της γραμμής τομής των δύο επιπέδων ως προς την οριζόντια. Η γωνία μεταξύ των δύο επιπέδων ορίζεται ως γωνία ξ , ενώ η γωνία μεταξύ της διαμέσου της ξ και του οριζοντίου επιπέδου που περνάει από τον πόδα της σφήνας είναι η γωνία β .
- Οι δύο μεγάλες επιφάνειες ασυνέχειας ορίζονται ως A και B, με αυτήν που έχει τη μεγαλύτερη γωνία κλίσης να είναι η B.
- Η αστοχία σφηνοειδούς μορφής συμβαίνει μόνο με ολίσθηση και ελέγχεται μόνο από την τριβή.
- Και τα δύο επίπεδα έχουν ίδια γωνία εσωτερικής τριβής ϕ .

Αφού ισχύουν όλα τα παραπάνω, γίνεται μια προκαταρκτική εκτίμηση της ευστάθειας της συγκεκριμένης ολίσθησης και αν εγκριθεί, ακολουθεί λεπτομερής και συστηματική ανάλυση. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για την περαιτέρω ανάλυση είναι των Hoek and Bray (1977). Υπολογίζεται, αρχικά, ο συντελεστής ασφάλειας για στεγνές συνθήκες και με την ύπαρξη μόνο της τριβής. Αν ο συντελεστής είναι μεγαλύτερος του 2 ($SF > 2$), δεν είναι πιθανή η σφηνοειδής ολίσθηση. Αντιθέτως, αν ισχύει $SF < 2$, υπάρχει πιθανότητα να αστοχήσει βραχοσφήνα και πρέπει να γίνει και η λεπτομερέστερη ανάλυση. Σε αυτή, λαμβάνεται υπόψη και η εισχώρηση νερού από τις ασυνέχειες και οι υδροστατικές πιέσεις που συνεπάγονται. Στη συνέχεια, ακολουθεί υπολογισμός του συντελεστή ασφάλειας, σύμφωνα με τις νέες συνθήκες.



Σχήμα 4: Αστοχία σφήνας (Λιόνης, 2010)



Εικόνα 7: Πρανές σε λατομείο, στο οποίο υπάρχουν ενδείξεις αστοχίας σφήνας. (British Geological Survey)

2.3.2.3. ΟΛΙΣΘΗΣΗ ΜΕ ΑΝΑΤΡΟΠΗ

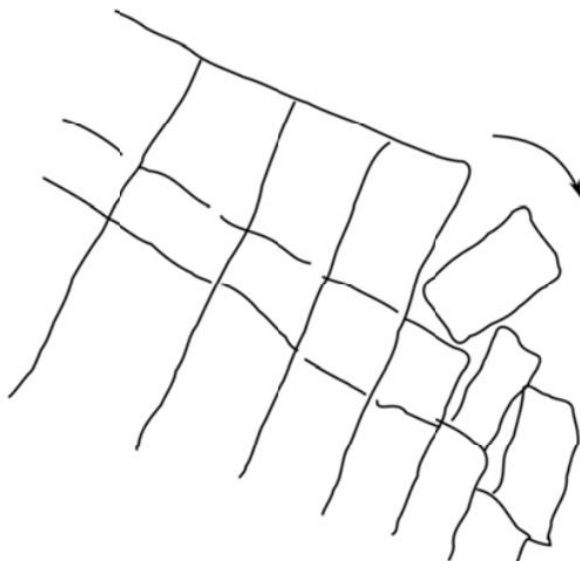
Στις αστοχίες ανατροπής, πλάκες ή κολώνες βράχου οριοθετούνται από ασυνέχειες, οι οποίες βυθίζονται απότομα στο μέτωπο του πρανούς και αντίρροπα με αυτό (Παπαθανασίου, 2022). Ο μηχανισμός της ανατροπής αποτελείται από

περιστροφή των στρώσεων ή των τεμαχών του πετρώματος γύρω από συγκεκριμένο σημείο ή άξονα, που βρίσκεται χαμηλότερα από το κέντρο βάρους του τεμάχους και ανήκει σε σταθερή βάση (Χατζηγηγορίου και Κουντουράς, 2019). Το αν μπορεί να εκδηλωθεί το φαινόμενο εξετάζεται με μεθόδους στερεογραφικής προβολής.

Σύμφωνα με μελέτες των Goodman and Bray (1976), η ολίσθηση με ανατροπή περιλαμβάνει τους παρακάτω τύπους:

- Ανατροπή λόγω κάμψης: συνεχή στρώματα πετρώματος, που είναι βυθισμένα απότομα και αντίρροπα προς το πρανές, κάμπτονται προς την επιφάνεια του πρανούς και θραύονται. Ενώ κάμπτονται, οι διεπιφάνειες των στρώσεων ολισθαίνουν και η ανώτερη επιφάνεια του πρανούς αποκτά βαθμιδωτή μορφή.
- Ανατροπή τεμαχών: ανατροπή εγκάρσια ρωγματομένων παρακατακόρυφων στρωμάτων ή στηλοειδών τεμαχών πετρώματος.
- Ανατροπή τεμαχών με τη μορφή κάμψης: ψευδοσυνεχής κάμψη παρακατακόρυφων στρωμάτων με πολλαπλές εγκάρσιες ασυνέχειες, που οφείλεται στην ολίσθηση των εγκάρσιων ασυνεχειών.

Οι ίδιοι, προχώρησαν στην ανάπτυξη ενός αναλυτικού υπολογισμού για την εκτίμηση της ευστάθειας του πρανούς, λαμβάνοντας υπόψη τα τεμάχη που κινδυνεύουν να ανατραπούν. Ειδικότερα, γίνεται αρίθμηση των τεμαχών από τον πόδα του πρανούς (No 1). Υπολογίζονται τα γεωμετρικά μεγέθη κάθε τεμάχους και διαχωρίζονται σε ομάδες ανάλογα με τις συνθήκες ευστάθειάς τους. Οι ομάδες είναι τα ευσταθή τεμάχη, που βρίσκονται στο άνω τμήμα του πρανούς, τα ενδιάμεσα τεμάχη, που κινδυνεύουν από ανατροπή, και τα ολισθαίνοντα τεμάχη, που βρίσκονται στον πόδα του πρανούς. Στη συνέχεια, αναλύονται οι δυνάμεις που ασκούνται στο κάθε τέμαχος και προσδιορίζεται η απαιτούμενη δύναμη στο τέμαχος 1, για να φτάσει σε οριακή ισορροπία. Αν το αποτέλεσμα έχει αρνητική τιμή, πρόκειται για ευσταθές τέμαχος, ενώ αν έχει θετική τιμή, πρόκειται για ασταθές τέμαχος (συνήθως έναντι ολίσθησης). Για να θεωρηθεί ότι ισχύει η κατάσταση οριακής ισορροπίας, η δύναμη του τεμάχους είναι ίση με μηδέν. Ακολουθεί ο υπολογισμός του συντελεστή ασφάλειας. Η παραπάνω ανάλυση θεωρείται ιδιαίτερα χρήσιμη για την εκτέλεση παραμετρικών αναλύσεων και για την διερεύνηση της επίδρασης της διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών. (Χατζηγηγορίου και Κουντουράς, 2019)



Σχήμα 5: Περιτροφικές και μεταφορικές κινήσεις τεμαχών πετρώματος κατά την ανατροπή. (Νομικός, 2015)



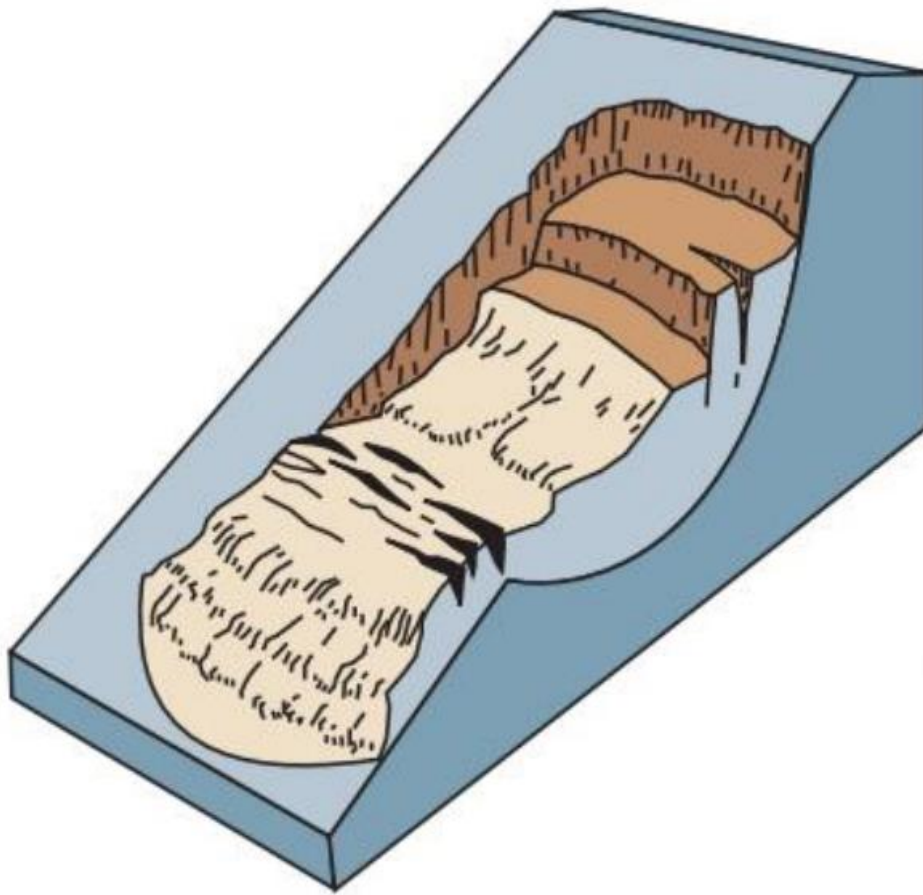
Εικόνα 8: Ολίσθηση από ανατροπή (Αρχείο Β. Μαρίνου) (από Γ. Παπαθανασίου, 2021)

2.3.2.4. ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΗ ΟΛΙΣΘΗΣΗ

Έχει παρατηρηθεί ότι ένα πέτρωμα, όταν εμφανίζει πυκνές διακλάσεις, δεν διατηρεί την προεξέχουσα δομική επιφάνεια ασυνέχειας που είχε. Κατά συνέπεια, η επιφάνεια ολίσθησης βρίσκει, ελεύθερα, τη γραμμή της ελάχιστης αντίστασης μέσα στο πρανές. Συνήθως, η επιφάνεια ολίσθησης είναι κυκλικής μορφής και βάσει αυτού γίνονται οι αναλύσεις ευστάθειας. (Παυλίδης, 2009)

Εξ ορισμού, οι περιστροφικές αστοχίες λαμβάνουν χώρα σε έντονα διακλασμένες βραχομάζες ή σε βραχομάζες αποτελούμενες από υλικά με χαμηλή αντοχή άρρηκτου πετρώματος. Για την μελέτη της ευστάθειας των πρανών στην συγκεκριμένη περίπτωση, χρησιμοποιούνται μέθοδοι οριακής ισορροπίας. Με τις μεθόδους αυτές υπολογίζεται ο συντελεστής ασφάλειας SF για την δυσμενέστερη επιφάνεια ολίσθησης. Αξίζει να σημειωθεί το γεγονός ότι κρίθηκε αναγκαία η λήψη απλοποιητικών υποθέσεων για την επιτυχή λύση των μεθόδων. Επιπροσθέτως, με το πέρασμα των χρόνων, ξεκίνησε η χρήση και άλλων μεθόδων, οι οποίες έχουν ως βάση τους την ελαστική ή πλαστική θεωρία. Αποτέλεσμα αυτών είναι ο υπολογισμός σε κρίσιμες θέσεις των μέγιστων διατμητικών τάσεων, ώστε να συγκριθούν με τη διατμητική αντοχή στις ίδιες θέσεις.

Για να αναπτυχθούν οι μέθοδοι οριακής ισορροπίας λήφθηκε υπόψη η πλαστική ισορροπία των δοκιμαστικών επιφανειών ολίσθησης. Ακολούθησε, αργότερα, η μέθοδος του κύκλου τριβής, μέσω της οποίας παρουσιάστηκε η μέθοδος των λωρίδων (Fellenius, 1927, 1936). Η μέθοδος ανάλυσης των ενεργών τάσεων και η κατανόηση της πίεσης των πόρων του νερού δόθηκαν το 1936 από τον Terzaghi. Για βέλτιστα αποτελέσματα και λαμβάνοντας υπόψη τις πλευρικές δυνάμεις μεταξύ των λωρίδων επινοήθηκαν νέες μέθοδοι ανάλυσης από τους Fellenius (1936) και Bishop (1955). Κατόπιν, και με τη συμβολή της εξέλιξης της τεχνολογίας, προτάθηκαν αναλυτικότερες και πιο δύσκολες μέθοδοι που χρειάζονται H/Y για την διενέργειά τους (Morgenstern and Price (1965), Nonveiller (1965), Spencer (1967), Bailey and Christian (1969), Janbu (1973)).



Σχήμα 6: Σκίτσο κυκλικής ολίσθησης (Τσαφάρα, 2021)

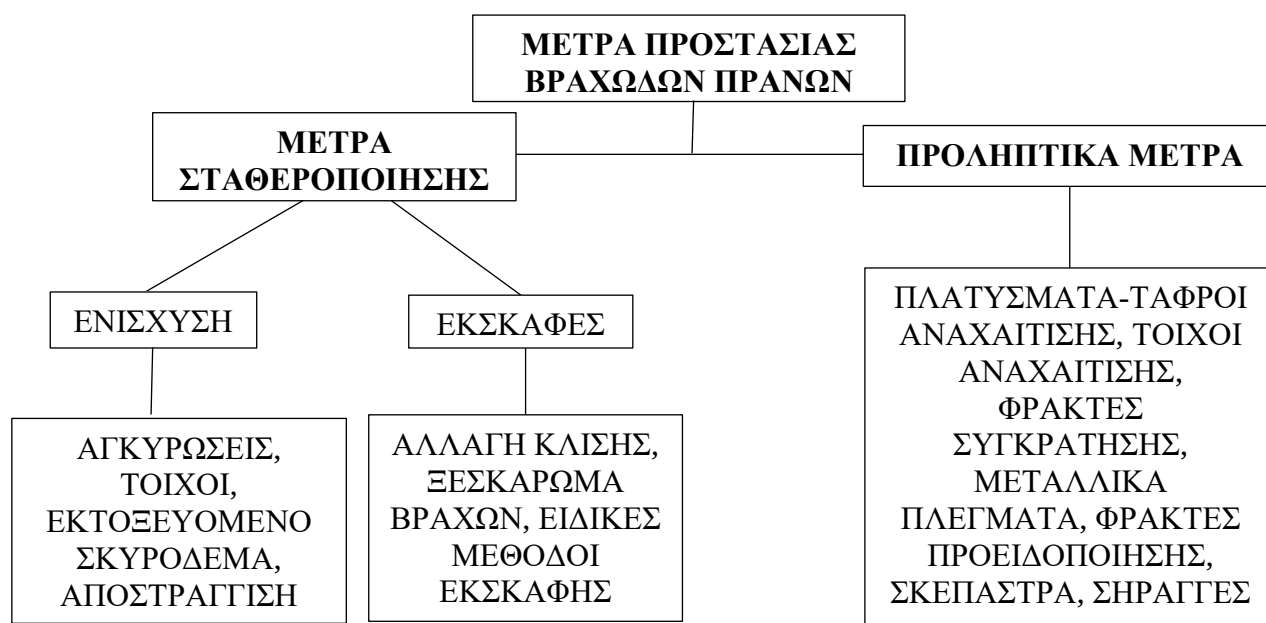


Εικόνα 9: Κυκλική ολίσθηση (Αρχείο Β. Μαρίνου) (από Γ. Παπαθανασίου, 2021)

2.4. ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΠΡΑΝΩΝ

Στο σημείο αυτό της εργασίας, ύστερα από το πέρας των ανωτέρω αναλύσεων, είναι απαραίτητο να τονισθεί η σημαντικότητα λήψης μέτρων προστασίας έναντι των καταπτώσεων των βραχωδών πρανών. Σκοπός αυτής της διαδικασίας είναι η πρόληψη των αρνητικών συνεπειών του φαινομένου προς το ανθρωπογενές περιβάλλον. Ο κύριος διαχωρισμός των μέτρων προστασίας για τα βραχώδη πρανή βασίζεται στον χρονικό παράγοντα υλοποίησής τους, δηλαδή στο αν κατασκευάζονται πριν ή μετά την εκδήλωση της κατάπτωσης. Οι δύο κατηγορίες μέτρων προστασίας που προκύπτουν είναι τα προληπτικά μέτρα και τα μέτρα αποκατάστασης ή σταθεροποίησης, αντίστοιχα (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007). Συνήθως, ενδείκνυται τα μέτρα να λαμβάνονται πριν την εκδήλωση κάποιου φαινομένου κατάπτωσης, σε προληπτικό στάδιο δηλαδή, ώστε να διασφαλίζεται με αυτόν τον τρόπο η λειτουργικότητα του έργου ή της περιοχής.

Για να σχεδιαστούν τα κατάλληλα μέτρα σε κάθε περίπτωση πρέπει να έχουν προηγηθεί υπαίθριες έρευνες, εκτέλεση επιτόπου και εργαστηριακών δοκιμών, αναλύσεις ευστάθειας κ.λπ. Οι αναλύσεις ευστάθειας των μέτρων προτείνεται να πραγματοποιούνται από το σχεδιαστικό τους επίπεδο έως και μετά το τέλος της κατασκευής τους και για μεγάλο χρονικό διάστημα. Ωστόσο, όπως έχει αποδειχθεί εμπειρικά, τον σημαντικότερο ρόλο, κατά την διάρκεια της διαδικασίας, κατέχει η ορθή αξιολόγηση, η εμπειρία και η τεχνική κρίση του μελετητή σε συνδυασμό με την συγκέντρωση όλων των απαραίτητων στοιχείων, καθώς και οι αναλυτικές τεχνικές που αποσκοπούν στην εύρεση της ασφαλέστερης και οικονομικότερης λύσης αναφορικά με τη σταθεροποίηση των πρανών.



Σχήμα 7: Κατηγορίες μέτρων προστασίας βραχωδών πρανών (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007)

2.4.1. ΜΕΤΡΑ

ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗΣ

Ή

ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

2.4.1.1. Αγκυρώσεις

Οι αγκυρώσεις συμβάλλουν γενικά στην αύξηση της διατμητικής αντοχής της βραχομάζας κυρίως με την αύξηση των κάθετων δυνάμεων που επενεργούν στις κρίσιμες επιφάνειες αδυναμίας (ασυνέχειες).

Τα αγκύρια έχουν μήκος από 5 μέχρι 50 μέτρα και μεταβιβάζουν εφελκυστικές δυνάμεις από 150 μέχρι 2500 kN, που σε εξαιρετικές περιπτώσεις μπορεί να φτάσουν μέχρι 10000 kN. Η εφαρμογή τους πραγματοποιείται τόσο σε βραχώδεις όσο και σε εδαφικούς σχηματισμούς. Τα αγκύρια με μήκος 1,5 έως 6 μέτρα, θεωρούνται μικρού μήκους, ονομάζονται κοχλίες ή μπουλόνια και χρησιμοποιούνται μόνο σε πετρώματα για την υποστήριξη κυρίως υπόγειων έργων.

Τα αγκύρια και τα μπουλόνια, ανάλογα με τη διάρκεια ζωής τους διακρίνονται σε *προσωρινά*, τα οποία έχουν διάρκεια ζωής 1,5-2 χρόνια, μέχρι δηλαδή να κατασκευαστεί η μόνιμη επένδυση, και σε *μόνιμα*, που η διάρκεια ζωής τους αντιστοιχεί στον χρόνο λειτουργίας του έργου.

Από πλευρά στατικής λειτουργίας και του ρόλου τους στην εντατική κατάσταση του περιβάλλοντος χώρου διακρίνονται σε *ενεργά* ή *προεντεταμένα*, τα οποία προεντείνονται στην τελική φάση κατασκευής τους και επιφέρουν μια νέα δύναμη που συμβάλλει στη σταθεροποίηση, και σε *παθητικά*, τα οποία δεν παραλαμβάνουν καμία δύναμη με την εγκατάστασή τους αλλά όταν αρχίσει η παραμόρφωση αυτομάτως ενεργοποιούνται. (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007)

2.4.1.2. Τοίχοι

Πρόκειται κυρίως για *τοίχους αντιστήριξης*, οι οποίοι είναι συνήθως από οπλισμένο σκυρόδεμα και παρουσιάζονται με τη μορφή τοίχων βαρύτητας, τοίχων με πρόβολο και διαφόρων πετασμάτων. Οι τοίχοι πρέπει να θεμελιώνονται στο υγιές υπόβαθρο, είναι άκαμπτοι και δεν έχουν περιθώρια μετακινήσεων. Φέρουν οπές αποστράγγισης, όπως επίσης και στραγγιστικό σωλήνα στη βάση τους.

Επιπλέον, στα βραχώδη πρανή χρησιμοποιούνται και οι *τοίχοι επένδυσης*, που έχουν σαν βασικό σκοπό την επένδυση της βάσης ή κάποιου άλλου τμήματος του πρανούς που αποτελείται από χαμηλής ανθεκτικότητας βραχώδη υλικά, των οποίων η χαλάρωση μπορεί να προκαλέσει καταπτώσεις. Πρόκειται και πάλι για τοίχους οπλισμένους, με οπές αποστράγγισης και συχνά ενισχυμένους με προεντεταμένες αγκυρώσεις. Έτσι, κατανέμονται καλύτερα οι εφελκυστικές τάσεις των αγκυρώσεων μέσω του τοίχου στην χαμηλής ποιότητας βραχομάζα. (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007)

2.4.1.3. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα λαμβάνεται σε απότομα πρανή για να συγκρατήσει μικροτεμάχια που πρόκειται να αποσπαστούν και να ολισθήσουν. Σκοπός του εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι η ενίσχυση του πρανούς και η προστασία του από αποσθρωτικούς παράγοντες. Πρόκειται για ένα μέτρο σχετικά χαμηλού κόστους που συναντάται κατά μήκος οδικών αρτηριών, σιδηροδρομικών γραμμών και σε περιοχές όπου υπάρχουν ή κατασκευάζονται μεγάλα τεχνικά έργα.

Αποτελείται από μείγμα τσιμέντου, άμμου και λεπτόκοκκου αδρανούς υλικού με νερό, που εκτοξεύεται από ειδική αντλία με μεγάλη ταχύτητα και υπό πίεση και στη συνέχεια εφαρμόζεται και προσκολλάται στο βραχώδες πρανές. Το πάχος του είναι συνήθως 5 – 20 cm και στο κάτω τμήμα του πρανούς τοποθετούνται, επίσης, πλαστικοί σωλήνες για να αποστραγγίσουν το εξερχόμενο από το εσωτερικό του πετρώματος νερό. Τις περισσότερες φορές συνοδεύεται από μεταλλικό πλέγμα για μεγαλύτερη ενίσχυση. (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007)



Εικόνα 10: Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος, Γερμανία (2013) (Wikipedia)

2.4.1.4. Αποστράγγιση

Είναι το πιο σημαντικό μέτρο προστασίας, τόσο ως προληπτικό, όσο και ως αποκατάστασης. Η αποστράγγιση συνεισφέρει στη μείωση τους βάρους της μάζας που τείνει να μετακινηθεί και συγχρόνως αυξάνει τη διατμητική αντοχή των υλικών του πρανούς, λόγω της μείωσης των υδροστατικών πιέσεων στην επιφάνεια ολίσθησης και τους πόρους. Μπορεί να διαχωριστεί στην επιφανειακή και στην υπόγεια αποστράγγιση. (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007)

Για να θεωρηθεί ένα σύστημα αποστράγγισης επιτυχημένο θα πρέπει (Δημητράκη, 2014):

- Να εμποδίζει την διείσδυση επιφανειακών νερών μέσα στο πρανές, από κάποια ρωγμή ή κάποιο εφελκυστικό ρήγμα. Αποτρέπεται, έτσι, η ανάπτυξη ή η επιβάρυνση φρεάτιου ορίζοντα.
- Να εκτονώνει τις υδροστατικές πιέσεις στις περιοχές του εφελκυστικού ρήγματος και της επιφάνειας ολίσθησης. Αυτό μπορεί να γίνει με τη βοήθεια γεωτρήσεων, κατασκευασμένες από τις ελεύθερες επιφάνειες του πρανού ή μέσω αποστραγγιστικών στοών.

2.4.1.5. Αλλαγή κλίσης – Αποφόρτιση

Το εύρος των εργασιών που συμβάλλουν στην αλλαγή της κλίσης του πρανούς καθορίζεται με βάση τις αναλύσεις ευστάθειας. Οι εργασίες αυτές αποβλέπουν στη μείωση της μέσης κλίσης του πρανούς, η οποία ειδικά στα σχετικά υψηλά βραχώδη πρανή επιτυγχάνεται κυρίως με τη διαμόρφωση αναβαθμών, πλάτους τουλάχιστον 5 μέτρων, ανά 10 μέτρα περίπου ύψους πρανούς. Οι αναβαθμοί συνήθως έχουν ελαφριά κλίση προς το εσωτερικό του πρανούς. Στην βάση του πρανούς φέρουν τάφρο παροχέτευσης (επενδυμένη ή όχι), ενώ κάποιες φορές επιστρώνονται με ασφαλικό υλικό ώστε να μειωθεί η κατείσδυση των επιφανειακών νερών. Επίσης, κρίσιμη είναι και η απομάκρυνση υλικών κυρίως από την κεφαλή αλλά και από το κύριο σώμα του πρανούς, συγκεκριμένα της ολισθαίνουσας μάζας. (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007)

2.4.1.6. Ξεσκάρωμα βράχων

Απομακρύνονται οι επικίνδυνοι για κατάπτωση βράχοι, που συνήθως είναι επικρεμάμενοι, από το μέτωπο του πρανούς. Το ξεσκάρωμα μπορεί να γίνει α) με χειρωνακτικά – μηχανικά μέσα από ειδικευμένο προσωπικό, απομακρύνοντας φυτά και μεμονωμένους χαλαρωμένους βράχους από το απότομο βραχώδες πρανές, και β) με ελεγχόμενη χρήση εκρηκτικών που περιλαμβάνει απομάκρυνση εκτεταμένων χαλαρωμένων και επικρεμάμενων ζωνών του απότομου πρανούς. Για την ελεγχόμενη χρήση εκρηκτικών χρησιμοποιούνται εκρηκτικά χαμηλής ταχύτητας με διάμετρο περίπου ίση με το μισό της διαμέτρου της οπής του διατρήματος. Οι εκρήξεις γίνονται συνήθως με χρονική καθυστέρηση περίπου 25 msec από τα μπροστινά προς τα πίσω διατρήματα. (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007)

2.4.2. ΠΡΟΛΗΠΤΙΚΑ ΜΕΤΡΑ

2.4.2.1. Τάφροι αναχαίτισης (τάφροι παγίδευσης)

Αποτελούν χώρους «υποδοχής» των βραχοκαταπτώσεων στην βάση του πρανούς, ώστε να μην επηρεάζεται η λειτουργικότητα και η ασφάλεια της οδού. Είναι απαραίτητο να έχουν τα κατάλληλα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (πλάτος και βάθος) για να εξασφαλίζεται επαρκώς η συγκράτηση των καταπτώσεων. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι αλληλένδετα με τη γεωμετρία του πρανούς (κλίση και ύψος). Συνήθως η τάφρος επικαλύπτεται με κοκκώδες υλικό για την απορρόφηση της ενέργειας των καταπτώσεων, ενώ συνοδεύεται και από την κατασκευή τοίχου ή φράχτη αναχαίτισης στο κατάντη άκρο της. (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007)

2.4.2.2. Τοίχοι αναχαίτισης

Οι τοίχοι αναχαίτισης είναι άκαμπτες κατασκευές από σκυρόδεμα που έχουν σαν βασικό σκοπό τη συγκράτηση των καταπτώσεων. Κατασκευάζονται στα άκρα των πλατυσμάτων – τάφρων αναχαίτισης, ως ενισχυτικό έργο αυτών, και το ύψος τους είναι περίπου 1,5 έως 2 μέτρα.

Στην περίπτωση που τα πρανή είναι πολύ απότομα και λείπει εντελώς η τάφρος αναχαίτισης, το ύψος του τοίχου αναχαίτισης μπορεί να αυξηθεί. Όταν υπάρχουν υψηλά πρανή, για την επίτευξη των βέλτιστων αποτελεσμάτων, πάνω από τους τοίχους αναχαίτισης τοποθετούνται επιπλέον φράκτες συγκράτησης για την αύξηση του ωφέλιμου ύψους τους. (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007)



Εικόνα 11: Τοίχος αναχαίτισης, ενισχυμένος με συρματοκιβώτιο, Νέα Ζηλανδία (2016)

2.4.2.3. Φράκτες συγκράτησης

Είναι κατασκευασμένοι από μέταλλο και τοποθετούνται στην ευρύτερη ζώνη της βάσης ενός απότομου πρανούς με σκοπό την συγκράτηση των αναμενόμενων καταπτώσεων μακριά από την προστατευόμενη περιοχή. Η προστατευόμενη περιοχή μπορεί να είναι ένας οδικός άξονας, ένας οικισμός κ.λπ.

Κατά την σχεδιασμό των συγκεκριμένων φρακτών πρέπει να ικανοποιούνται ορισμένες κατασκευαστικές απαιτήσεις, οι οποίες στηρίζονται σε αναμενόμενες καταπτώσεις. Για τον λόγο αυτό, η κατασκευή τους απαιτεί ενισχυμένα τεχνικά υλικά. Τα βασικά χαρακτηριστικά μιας ανάλογης κατασκευής είναι α) η αποφυγή «αλλοίωσης» του φυσικού περιβάλλοντος και β) οι δυνατότητες αναχαίτισης είναι πολύ μεγαλύτερες σχετικά με μια τελείως «άκαμπτη» κατασκευή και μάλιστα όταν γίνεται αναφορά σε υψηλό εύρος τιμών δυναμικής ενέργειας πρόσκρουσης (τουλάχιστον 2000 kJ).

Τέλος, σε περιπτώσεις που το απαιτούμενο ύψος για την ενεργή αναχαίτιση των καταπτώσεων είναι μεγάλο (>4 μέτρα) χρησιμοποιείται συνδυασμός τοίχου αναχαίτισης στην κορυφή του οποίου τοποθετείται επιπλέον φράκτης συγκράτησης. (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007)

2.4.2.4. Μεταλλικά πλέγματα

Τα μεταλλικά πλέγματα, ή αλλιώς πλέγματα συγκράτησης, τοποθετούνται στο μέτωπο του βραχώδους πρανούς, συγκρατούν τον περιορισμένο όγκο βραχωδών τεμαχών και παρεμποδίζουν την κατάπτωσή τους επί του τεχνικού έργου. Το πλέγμα συμβάλει στην σημαντική μείωση των απαιτούμενων διαστάσεων της τάφρου αναχαίτισης στη βάση του πρανούς. Με αυτόν τον τρόπο διευκολύνεται σημαντικά η τοποθέτηση του πλέγματος σε απότομα πρανή, όπου είναι δύσκολη η δημιουργία πλατύσματος.

Στο ανάντη άκρο, το πλέγμα προσδένεται κατάλληλα με περιμετρικό συρματοσχοίνο το οποίο πακτώνεται πίσω από το μέτωπο του πρανούς, με αγκύρια ολόσωμης πάκτωσης. Για μεγαλύτερη ενίσχυση το πλέγμα προσδένεται και με εγκάρσια συρματοσχοίνα που φτάνουν μέχρι τη βάση του πρανούς. Συνήθως, το πλέγμα πακτώνεται σε τοιχίο ύψους έως 0,6 μέτρα, ώστε να συγκεντρώνονται τα υλικά των καταπτώσεων πίσω από το τοιχίο. Το είδος του πλέγματος που χρησιμοποιείται κάθε φορά μπορεί να είναι κοινό μεταλλικό, για μικρών διαστάσεων καταπτώσεις, ή

μορφής αλληλοπλεκόμενων μεταλλικών δακτυλίων, για μεγαλύτερες καταπτώσεις, και εξαρτάται από το μέγεθος των αναμενόμενων καταπτώσεων. (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007)



Εικόνα 12: Αστοχία μεταλλικού πλέγματος στον δρόμο Ιωαννίνων - Πράμαντα (2020)

2.4.2.5. Φράκτες προειδοποίησης

Πρόκειται για συστήματα προειδοποίησης τα οποία ενεργοποιούνται σε περίπτωση βραχοκαταπτώσεων και χρησιμοποιούνται για την επαρκή ασφάλεια κυκλοφοριακών αξόνων σε θέσεις υψηλής επικινδυνότητας. Το πιο απλό από αυτά τα συστήματα αποτελείται από μια σειρά στύλων, που φέρουν εγκάρσιους δοκούς από τους οποίους διέρχονται σύρματα σε απόσταση περίπου 0.5 μέτρα μεταξύ τους. Οι καταπτώσεις προκαλούν θραύση στα σύρματα και στη συνέχεια διεγείρεται κάποιο σήμα προειδοποίησης, το οποίο μπορεί να είναι ηχητικό ή μια ειδική σηματοδότηση για την διακοπή της κυκλοφορίας του συγκεκριμένου οδικού άξονα στο κομμάτι που επηρεάζεται από την κατάπτωση. (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007)

2.4.2.6. Σκέπαστρα και σήραγγες

Σε θέσεις όπου τα πρανή είναι πολύ υψηλά και παρουσιάζουν υψηλή επικινδυνότητα καταπτώσεων, οι εργασίες σταθεροποίησης είναι εξαιρετικά δαπανηρές και πολλές φορές μη εφικτές. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η κατασκευή σκέπαστρων ή η τροποποίηση του οδικού άξονα μέσω σηράγγων φαίνεται ιδανική. Τα βασικά μέρη ενός σκέπαστρου είναι τα εξής (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007):

- Η επικλινής μορφή της οροφής του και η επένδυσή της με θραυστό υλικό

- Η επαρκής θεμελίωση του κατάντη άκρου στον υγιή βράχο

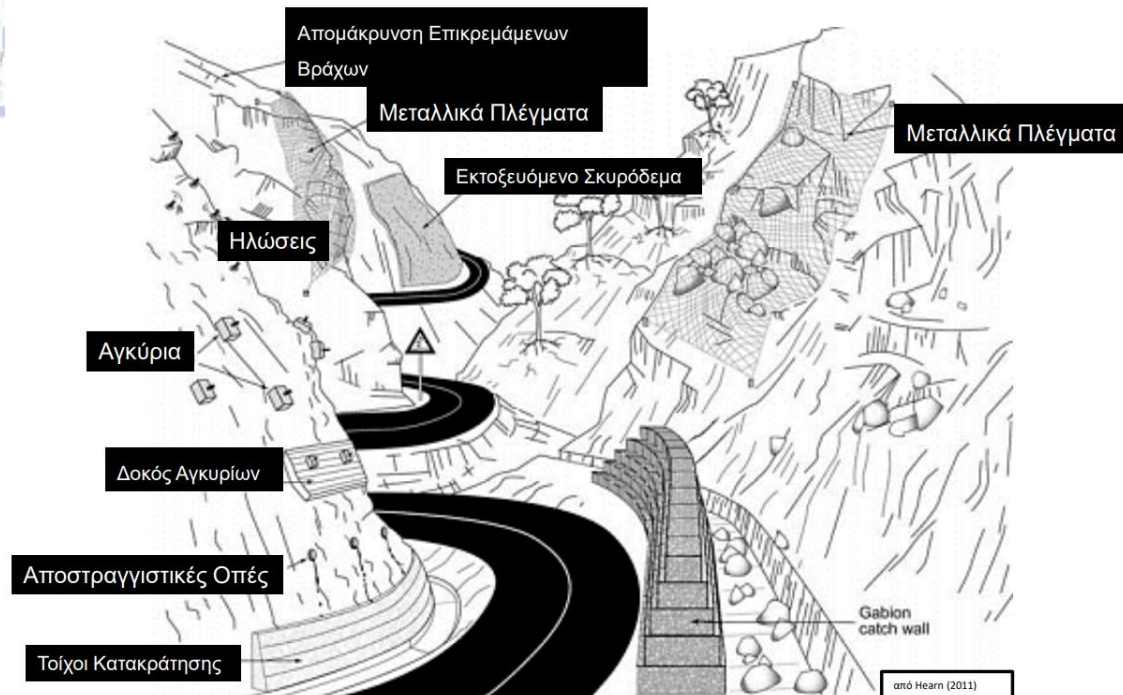
Σχετικά με την κατασκευή των σήραγγων, σκοπός είναι η αποφυγή μιας κατολισθαίνουσας ζώνης. Μία σήραγγα μπορεί να τοποθετηθεί μέσα σε ζώνη διάρρηξης (ο άξονάς της είναι παράλληλος προς τη ζώνη διάρρηξης), στο «πάτωμα» και το «ταβάνι» του ρήγματος, μπορεί να συναντά το ρήγμα εγκάρσια και λοξά ή να βρίσκεται έξω από το ρήγμα. (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007)



Εικόνα 13: Σκέπαστρο στη Νέα Ζηλανδία (2016)



Εικόνα 14: Αστοχία πρανούς μετά το πέρας σήραγγας



Σχήμα 8: Σκίτσο μέτρων προστασίας (Τροποποιημένο από Hearn, 2011) (Παπαθανασίου, 2021)

3. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ – ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΟΣ ΔΡΟΜΟΣ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

Το σημείο μελέτης της συγκεκριμένης εργασίας βρίσκεται στο τμήμα του περιφερειακού δρόμου της Θεσσαλονίκης που είναι κάθετο στην έξοδο για το Καντατζόγλειο Στάδιο. Αποφασίστηκε η μελέτη του συγκεκριμένου σημείου καθώς πραγματοποιήθηκε σημαντική βραχοκατάπτωση, προ ολίγων ημερών, και το σημείο θεωρείται ύψιστης προσοχής. Ειδικότερα, πρόκειται για μια από τις βασικότερες εξόδους του περιφερειακού δρόμου, η οποία συγκεντρώνει μεγάλο ποσοστό του κυκλοφοριακού της πόλης και συνεπώς υπάρχει μεγάλη διακινδύνευση σε περίπτωση κάποιας αστοχίας.

41

3.1. ΓΕΩΛΟΓΙΑ – ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Η ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, και συνεπώς η περιοχή μελέτης μας, ανήκει γεωλογικά κυρίως στην Περιοδοποτική ζώνη και μερικώς στην Σερβομακεδονική (Ζερβοπούλου και Παυλίδης, 2005). Αναλυτικά, το υπόβαθρο αποτελείται από διμαρμαρυγιακούς γνεύσιους και σχιστόλιθους της Σερβομακεδονικής ζώνης, αμμούχους αργιλικούς σχιστόλιθους και ανακρυσταλλωμένους ασβεστόλιθους της ενότητας Άσπρης Βρύσης – Χορτιάτη με χαλαζίτες, φυλλίτες και ασβεστόλιθους της ενότητας Μελισσοχωρίου – Χολομώντα (υποενότητες της Περιοδοποτικής ζώνης). Ηλικιακά προσδιορίζονται στο τέλος του Παλαιοζωικού έως και τα μέσα του Μεσοζωικού αιώνα.

Το υπόβαθρο καλύπτεται από νεογενείς και τεταρτογενείς αποθέσεις. Πρόκειται για ερυθρές αργίλους, βαθύτερα σε επαφή με το υπόβαθρο, και για μια ψαμμιτομαργαϊκή σειρά, πάνω από τις αργίλους. Η ψαμμιτομαργαϊκή σειρά αντιπροσωπεύει αβαθές ποταμολιμναίο, με εναλλαγές, περιβάλλον απόθεσης. Η σειρά των ερυθρών αργίλων αντιπροσωπεύει ένα έντονα οξειδωτικό χερσαίο περιβάλλον. (Πανταζοπούλου κ.ά., 2017) Τα παραπάνω πετρώματα, υποβάθρου και επιφανειακά, έχουν διεύθυνση ΒΔ – ΝΑ.

3.2. ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Στην πόλη της Θεσσαλονίκης παρατηρούνται αλλαγές και ποικιλία των υλικών της. Οι μελέτες που πραγματοποιήθηκαν, μέσω γεωτρήσεων, παλαιών χαρτών, γκραβουρών, αεροφωτογραφιών κ.ά., έδειξαν ενεργό τεκτονική στην περιοχή. (Πανταζοπούλου κ.ά., 2017)

Πιο συγκεκριμένα, τα μεταπτωτικά ρήγματα των οδών Αγίου Δημητρίου και Εγνατίας, που σήμερα θεωρούνται μη ενεργά, ευθύνονται για την αμφιθεατρική όψη της πόλης. Είναι κανονικά ρήγματα με ΒΔ – ΝΑ διεύθυνση και ΝΔ κλίση. Τα ρήγματα που βρίσκονται στην περιοχή Μπότσαρη και Βούλγαρη έχουν δημιουργήσει μία κοιλάδα της οποίας τα ρέματα φτάνουν και τελικά εκβάλλουν στην Θερμαϊκό κόλπο. Νοτιότερα συναντάται το ρήγμα της Πυλαίας – Πανοράματος, ενεργό και το σημαντικότερο της πόλης, με μήκος 12 km. Τέλος, το ρήγμα του ποταμού Ανθεμούντα, νότιο όριο της κοιλάδας του εν λόγω ποταμού, εκτείνεται έως την περιοχή του Αγγελοχωρίου. Το ρήγμα αυτό είναι κανονικό με διεύθυνση Α – Δ, κλίση προς το Β και μήκος μεγαλύτερο των 32 km.

Επίσης, στη Θεσσαλονίκη έχουν σημειωθεί σημαντικά σεισμικά γεγονότα, τα οποία έχουν επηρεάσει τη γεωμορφολογία της. Ο πιο πρόσφατος και γνωστός σεισμός της πόλης που καταγράφηκε έγινε στις 20 Ιουνίου του 1978 και είχε μέγεθος 6.5 βαθμούς της κλίμακας Richter. Το επίκεντρό του ήταν 20 km ανατολικά της Θεσσαλονίκης, στο χωριό Στίβος, μεταξύ Κορώνειας και Βόλβης, και διήρκησε 10 δευτερόλεπτα. Θεωρήθηκε σεισμός μικρού εστιακού βάθους (8 – 10 km), γεγονός που σε συνδυασμό με τα παραπάνω τον καθιστά αρκετά επικίνδυνο. Προκάλεσε υλικές καταστροφές και ανθρώπινες απώλειες, με σημαντικότερη την κατάρρευση μιας πολώροφης πολυκατοικίας στην πλατεία Ιπποδρομίου. (Πανταζοπούλου κ.ά., 2017)

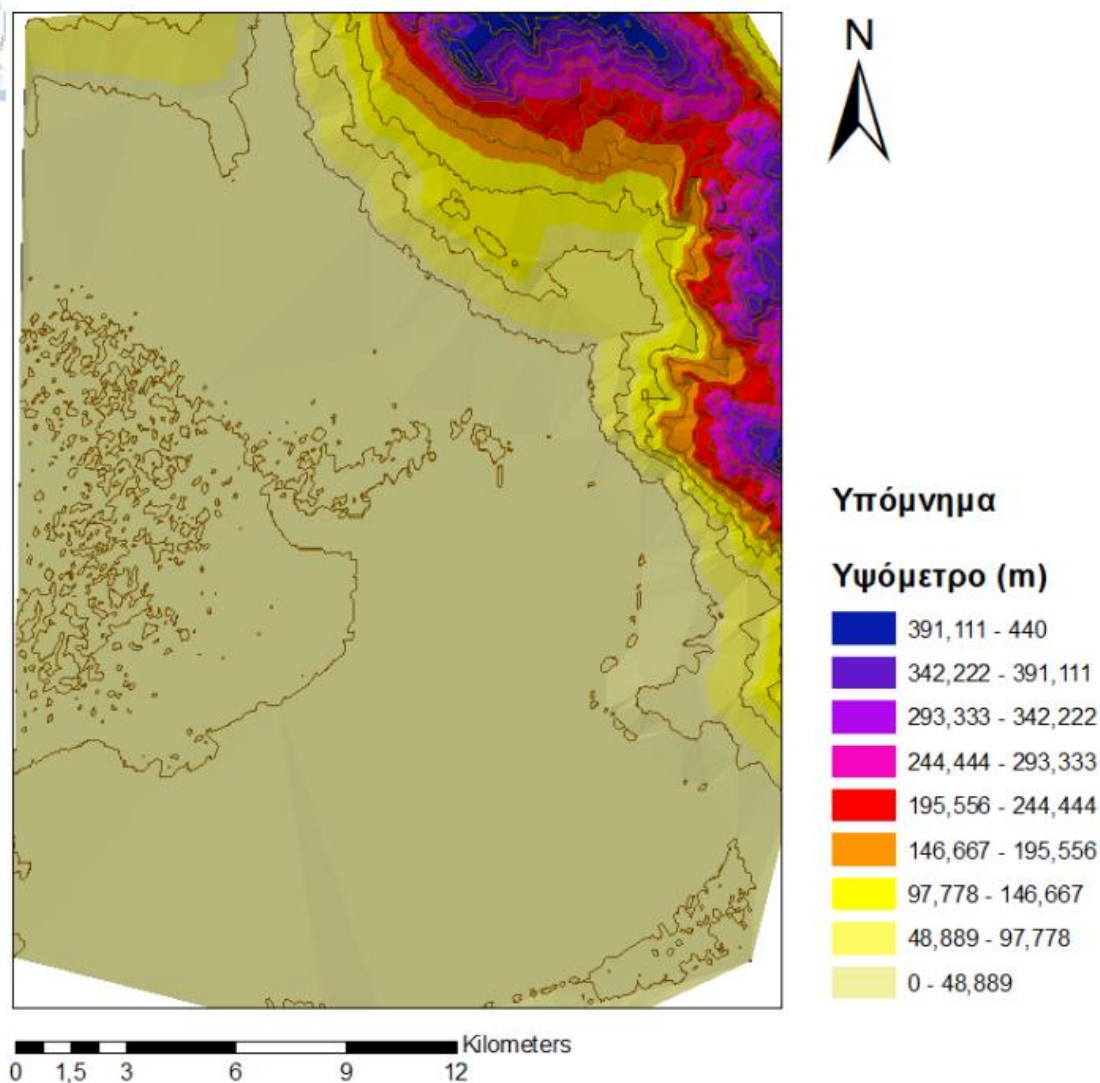
Ημερομηνία	Μέγεθος	Περιοχή	Επικεντρική απόσταση	Ένταση στη Θεσσαλονίκη
597 μ. Χ.	6.8	Σέρρες	110 km	VI0

620 μ. X.	6.6	Θεσσαλονίκη	40 km	
667 μ. X.	6.6	Θεσσαλονίκη	20 km	
700 μ. X.	6.6	Θεσσαλονίκη	12 km	
1395 μ. X.	6.7	Έδεσσα	70 km	VII
1430 μ. X.	6.0	Θεσσαλονίκη	30 km	VII
1677 μ. X.	6.2	Θεσσαλονίκη	20 km	VII-VIII
22/06/1759	6.5	Θεσσαλονίκη	15 km	IX
05/05/1829	7.3	Δράμα	120 km	V+ ~ VI
05/06/1902	6.6	Θεσσαλονίκη	20 km	VII+
04/04/1904	7.3	N. Βουλγαρία	130 km	VI
08/11/1905	7.5	Χαλκιδική	120 km	VI
08/03/1931	6.7	N. Γιουγκοσλαβία	85 km	VI
26/09/1932	7.0	Χαλκιδική	75 km	VI
20/06/1978	6.5	Θεσσαλονίκη	28 km	VII

Πίνακας 10: Σημαντικοί σεισμοί της Θεσσαλονίκης (Σέξτος κ.ά., 2008)

3.3. ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Η περιοχή της Θεσσαλονίκης παρουσιάζει ποικιλία κλιμάτων. Πιο συγκεκριμένα, οι παράκτιες περιοχές χαρακτηρίζονται από μεσογειακό κλίμα, το εσωτερικό χαρακτηρίζεται από ηπειρωτικό κλίμα, ενώ οι περιοχές με μεγάλο υψόμετρο εμφανίζουν ορεινό κλίμα. Βάσει δεδομένων του μετεωρολογικού σταθμού της Μίκρας (ΕΜΥ), τον Ιούλιο σημειώνονται οι υψηλότερες θερμοκρασίες και τον Ιανουάριο οι ελάχιστες. Επιπλέον, η μέση ετήσια θερμοκρασία της Θεσσαλονίκης είναι στους 15°C και η μέση ετήσια βροχόπτωση φτάνει τα 475 mm.



3.4. ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για την κατανόηση της γεωλογίας μιας περιοχής είναι η μελέτη του τρόπου με τον οποίο αναπτύσσεται το υδρογραφικό της δίκτυο. Μέσω αυτού κινείται το υπόγειο νερό και μεταφέρονται τα ιζήματα της υδρολογικής λεκάνης.

Η Θεσσαλονίκη έχει υδρογραφικό δίκτυο δενδριτικής μορφής, το οποίο πλέον διαμορφώνει σχεδόν αποκλειστικά το ανάγλυφο της περιοχής. Η υδρολογική λεκάνη της πόλης της Θεσσαλονίκης φτάνει τα 66 km² σε έκταση και χωρίζεται σε μικρότερες υπολεκάνες. Οι υπολεκάνες έχουν διευθύνσεις από ΒΑ – ΝΔ έως Α – Δ (Ζερβοπούλου και Παυλίδης, 2005). Τα ρέματα του υδρογραφικού δικτύου της Θεσσαλονίκης είναι τα εξής (Κοκκαλά, 2015):

- Ρέμα Συκεών
- Ρέμα Αγίου Παύλου – Ευαγγελίστριας
- Ρέμα Σαράντα Εκκλησιών
- Ρέμα του Πεδίου Άρεως
- Ρέμα της Τούμπας ή Κωνσταντινίδη

- Ρέμα Κυβερνείου ή Μεγάλο Ρέμα
- Ρέμα Αλλατίνη ή Ντεπώ

3.5. ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΠΕΔΙΟΥ

Η υπαίθρια μελέτη της περιοχής ενδιαφέροντος πραγματοποιήθηκε τον Ιούνιο του 2023. Η περιοχή μελέτης μας βρίσκεται στον περιφερειακό δρόμο της Θεσσαλονίκης, λίγο πριν την έξοδο για το Καυτατζόγλειο στάδιο. Σκοπός της εν λόγω μελέτης είναι η εκτίμηση του τύπου κατολίσθησης που συνέβη, και που μπορεί να συμβεί στο μέλλον, ώστε να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα και να μην υπάρξουν θύματα αλλά και υλικές ζημιές.

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη υποενότητα, η περιοχή μελέτης μας ανήκει κατά κύριο λόγο στην Περιοδοπική ζώνη και συνεπώς στις Εσωτερικές Ελληνίδες του Ελληνικού Ορογενούς. (Ζερβοπούλου και Παυλίδης, 2005) Τα πετρώματα που κυριαρχούν είναι ιζηματογενή μεταβατικά με μια ελαφριά πρασινοσχιστολιθικής φάσης μεταμόρφωση. Σε μικρότερο βαθμό, εμφανίζονται πετρώματα της Σερβομακεδονικής μάζας, δηλαδή διμαρμαρυγικοί γνεύσιοι και σχιστόλιθοι.

Η διεύθυνση του δρόμου υπολογίστηκε στις 075° . Το πρηνές μελέτης μας, στο μήκος των 100 περίπου μέτρων που μετρήσαμε, αποτελείται κυρίως από εναλλαγές γάββρου και γνευσίου. Το ύψος του φτάνει στα 8m, ενώ έχει γωνία κλίσης $080^\circ - 085^\circ$ και διεύθυνση κλίσης 165° .

Σε πρώτο στάδιο έγινε ολοκληρωμένη τεχνικογεωλογική χαρτογράφηση της περιοχής και λήψη μετρήσεων στις ασυνέχειες προς επεξεργασία, ώστε να δοθούν τα ανάλογα αποτελέσματα. Για την διεκπεραίωση των μετρήσεων στις ασυνέχειες χρησιμοποιήθηκαν κλασικές μέθοδοι. Αρχικά, έγινε χρήση γεωλογικής πυξίδας για τον προσδιορισμό των στοιχείων των ασυνεχειών, δηλαδή γωνία κλίσης και φορά βύθισης. Στη συνέχεια, με τη χρήση της σφύρας Schmidt, υπολογίστηκαν οι συντελεστές που προσδιορίζουν την αντοχή των τοιχωμάτων του πρηνούς σε μονοαξονική θλίψη, ή πιο απλά την σκληρότητα των πετρωμάτων. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε το προφیلόμετρο, ένα όργανο το οποίο, με βάση τυποποιημένα προφίλ, συμβάλει στον υπολογισμό του συντελεστή τραχύτητας. Λήφθηκαν μετρήσεις όγκων μαζών που είχαν αποκολληθεί από το πρηνές, με την βοήθεια της εξελιγμένης τεχνολογίας της εποχής και συγκεκριμένα του προγράμματος 3D Scanner. Τέλος, παρατηρήθηκαν χαρακτηριστικά του πρηνούς, όπως το υλικό πλήρωσης των πετρωμάτων, η κατάσταση των πετρωμάτων στις ασυνέχειες αλλά και στο σύνολο, και η γενικότερη δομή της βραχομάζας.



Εικόνα 16: Γεωλογική πυξίδα



Εικόνα 17: Σφύρα Schmidt



Εικόνα 18: Προφιλόμετρο

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε στον χώρο του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης μελέτη του προγράμματος DIPS, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία τεκτονικών διαγραμμάτων και για την επεξεργασία των παραπάνω δεδομένων. Το DIPS είναι ένα πρόγραμμα στερεογραφικής προβολής για την ανάλυση και παρουσίαση γεωτεχνικών δεδομένων σχετιζόμενα με τον προσανατολισμό. Χαρακτηρίζεται από την απεικόνιση πόλων, καμπύλων που αντιστοιχούν σε επίπεδα ασυνεχειών και την ομαδοποίησή τους ανάλογα με την κατανομή τους. Παρέχει τη δυνατότητα προσδιορισμού ύπαρξης ή όχι ολίσθησης, ανάλυσης του μηχανισμού ολίσθησης και υπολογισμού του συντελεστή ασφάλειας.



Εικόνα 19: Τμήμα του πρανούς μελέτης (1) – Ιούνιος 2023



Εικόνα 20: Τμήμα του πρανούς μελέτης (2) - Ιούνιος 2023



Εικόνα 21: Επί το έργο – Ιούνιος 2023

3.6. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Με τη χρήση της γεωλογικής πυξίδας προέκυψαν τα παρακάτω τεκτονικά στοιχεία:

Α/Α	ΕΙΔΟΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ	ΚΛΙΣΗ	ΦΟΡΑ ΒΥΘΙΣΗΣ
1	J	80	170
2	J	85	350

3	J	65	355
4	J	85	360
5	J	75	290
6	J	85	300
7	J	65	295
8	J	60	260
9	J	55	015
10	J	60	010
11	J	45	130
12	J	85	090
13	J	77	340
14	J	75	358
15	J	70	290
16	J	20	165
17	J	85	340
18	J	75	302
19	J	30	140
20	J	80	250
21	J	80	180
22	J	85	160
23	J	87	245
24	J	50	345
25	J	72	062
26	J	60	038
27	J	75	155
28	J	50	029
29	J	47	009
30	J	66	331
31	J	77	330
32	J	56	352
33	J	45	354
34	J	54	002
35	J	70	178
36	J	55	006
37	J	85	010
38	J	60	011
39	J	53	012
40	J	73	159
41	J	45	356
42	J	75	182
43	J	50	006
44	J	55	007
45	J	85	010

Πίνακας 11: Τεκτονικά στοιχεία πρηνούς μελέτης, όπου J: Διάκλαση

Στο φύλλο αναγραφής ασυνεχειών, εκτός από τα στοιχεία του προσανατολισμού των επιφανειών, κατά την λήψη των μετρήσεων, σημειώθηκαν και κάποια περαιτέρω

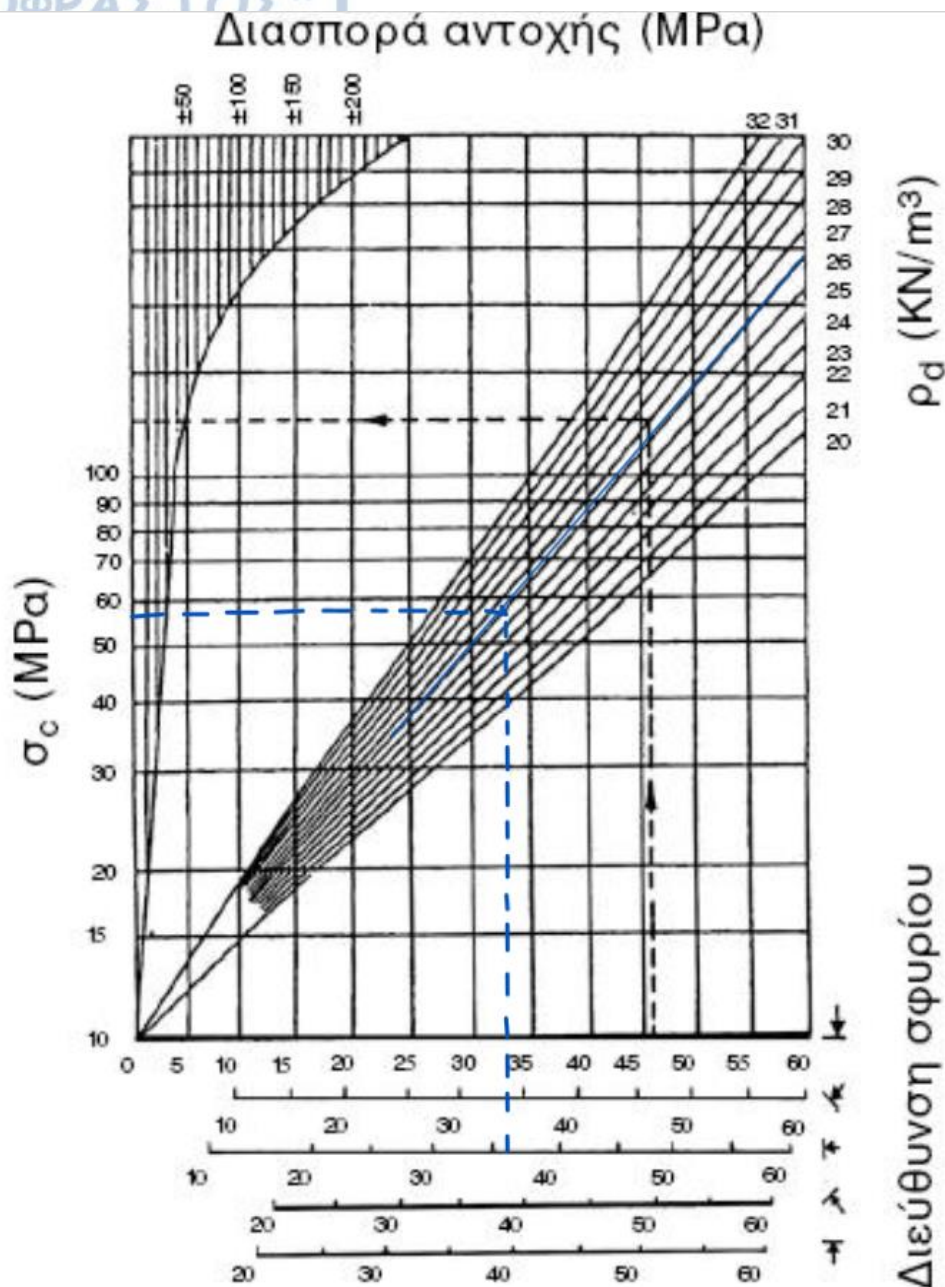
χαρακτηριστικά των ασυνεχειών. Τα χαρακτηριστικά αυτά σχετίζονται με την απόσταση, το άνοιγμα, το υλικό πλήρωσης και την αποσάθρωσή της. Κατά μέσο όρο προκύπτουν τα εξής στοιχεία:

- Απόσταση μεταξύ των συνεχειών: 3 – 40 cm
- Άνοιγμα: 1 έως > 5 mm
- Υλικό πλήρωσης: Μαλακό
- Αποσάθρωση: Μέτρια

Με την χρήση της σφύρας Schmidt και την διαδικασία της κρουσιμέτρησης υπολογίσαμε την αντοχή των πετρωμάτων του πρανούς μελέτης. Κατά τη μέθοδο αυτή προκύπτει μία τιμή R που αντιπροσωπεύει την τιμή αναπήδησης της σφύρας. Η τιμή R σε συνάρτηση με το φαινόμενο βάρος του πετρώματος, με τη βοήθεια του σχήματος 10 συμβάλλουν στην εύρεση της αντοχής (JCS) της ασυνέχειας του πετρώματος. Στην περίπτωση μας, παρατηρούμε τις μπλε γραμμές του σχήματος, καταλήξαμε σε αντοχή πετρώματος της τάξης των 57 MPa, δηλαδή σκληρό υλικό.

A/A	R
1	34
2	42
3	48
4	44
5	51
6	30
7	28
8	22
9	22
10	30
11	42

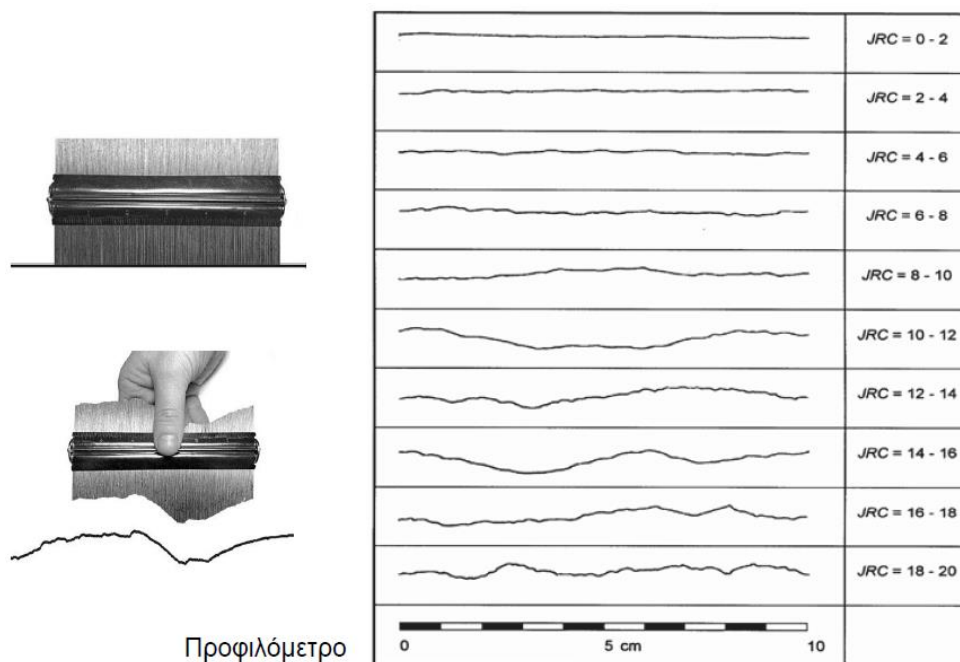
Πίνακας 12: Μετρήσεις κρουσιμέτρησης



Σχήμα 9: Σχέση αντοχής σε μονοαξονική θλίψη με σκληρότητα Schmidt (Τροποποιημένο από Κούκης και Σαμπατακάκης, 2002)

Τέλος, χρησιμοποιήσαμε το προφιλόμετρο στις επιφάνειες των ασυνεχειών με σκοπό την ποσοτικοποίηση της τραχύτητας. Το προφίλ που προκύπτει συγκρίνεται με το τυπικό προφίλ των Barton & Choubey (1977), το οποίο φαίνεται στο σχήμα 11, και έτσι καταλήγουμε στον συντελεστή τραχύτητας JRC. Στο πρυνές μελέτης μας καταλήξαμε σε JRC της κατηγορίας 8 – 10, που μεταφράζεται σε ολισθηρή κυματοειδή επιφάνεια.

Εικόνα 22: Το επικρατέστερο προφίλ των επιφανειών του πρανούς μελέτης



Σχήμα 10: Τυπικά προφίλ για την εύρεση του συντελεστή τραχύτητας JRC (Barton & Choubey, 1977) (από παρουσιάσεις Τεχνικής Γεωλογίας, Γ. Παπαθανασίου)

Υπολογίσαμε, επίσης, τους όγκους των τεμαχών που αποκολλήθηκαν από το πρανές. Τα τεμάχια εμφάνισαν ποικιλία μεγεθών και όγκων. Ενδεικτικά:

- $V_1 = 37\text{cm} \times 52\text{cm} \times 61\text{cm} = 117.364\text{cm}^3 = 0,12\text{m}^3$
- $V_2 = 30\text{cm} \times 16\text{cm} \times 12\text{cm} = 5.760\text{cm}^3 = 0,01\text{m}^3$
- $V_3 = 20\text{cm} \times 37\text{cm} \times 25\text{cm} = 18.500\text{cm}^3 = 0,02\text{m}^3$



Εικόνα 23: Κατολισθαίνοντα τεμάχη στο σημείο μελέτης (1) – Ιούνιος 2023

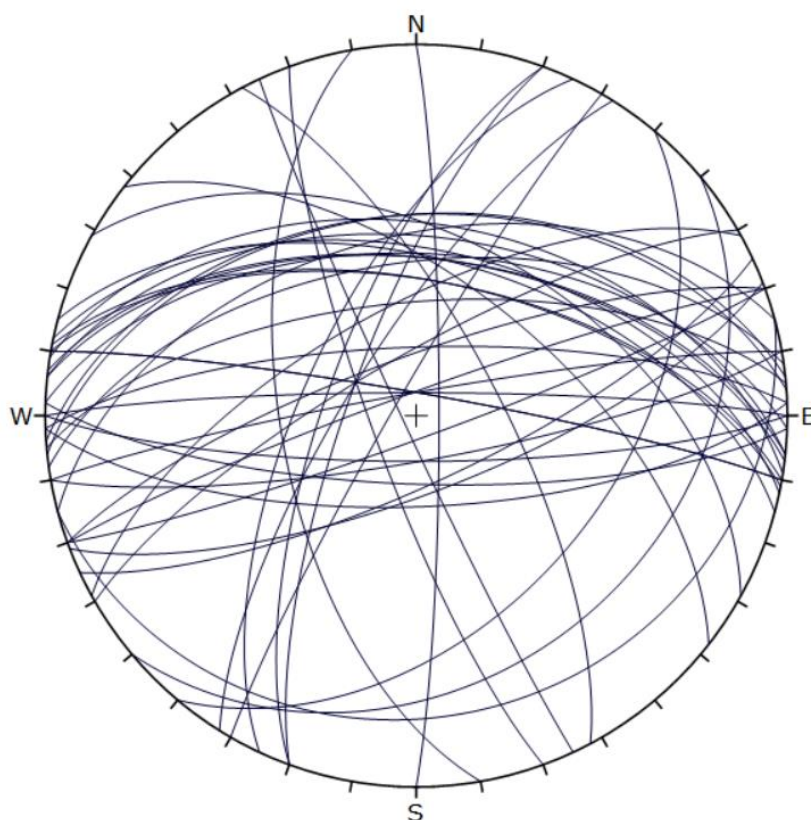


Εικόνα 24: Κατολισθαίνοντα τεμάχη στο σημείο μελέτης (2) – Ιούνιος 2023

Με τα παραπάνω στοιχεία, συνεχίζουμε στον υπολογισμό της γωνίας τριβής του πρανούς. Ισχύει ο τύπος $\phi = \phi_b + i$, όπου ϕ_b είναι η βασική γωνία τριβής του πετρώματος και στην περίπτωση μας ισούται με 26° (Barton & Choubey, 1977) και i είναι η γωνία τραχύτητας του πετρώματος, την οποία υπολογίσαμε από τον τύπο $i = JRC \times \log_2 \frac{JCS}{\sigma_n}$. Για το σ_n , όπου ισχύει ο τύπος $\sigma_n = \gamma \times z \times \cos\psi$, λαμβάνουμε την παραδοχή πως η τάση που ασκείται είναι η μέγιστη, οπότε υπολογίζουμε το γινόμενο $\gamma \times z$. Το ύψος του πρανούς ισούται με 8m, ενώ το φαινόμενο βάρος του υλικού μας ισούται με 26 kN/m^3 . Συνεπώς, το σ_n είναι ίσο με 208 kN/m^2 . Για να υπολογιστεί ο λογάριθμος θα πρέπει οι 2 τιμές να είναι σε ίδιες μονάδες, οπότε μετατρέπουμε τα 208 kPa σε MPa , δηλαδή έχουμε $\sigma_n = 0,2 \text{ MPa}$. Εν κατακλείδι, υπολογίζουμε την γωνία τραχύτητας ίση με $22,14^\circ$.

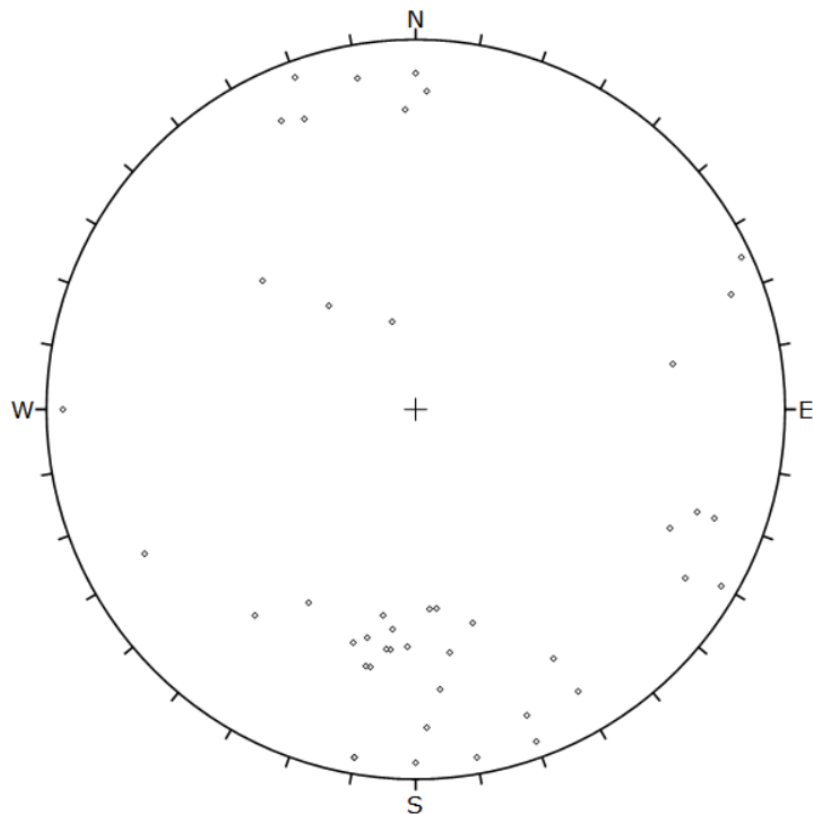
3.7. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, η επεξεργασία των μετρήσεων έγινε στο πρόγραμμα DIPS. Ακολουθούν παρακάτω τα αποτελέσματα που προέκυψαν:



Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	45 (45 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

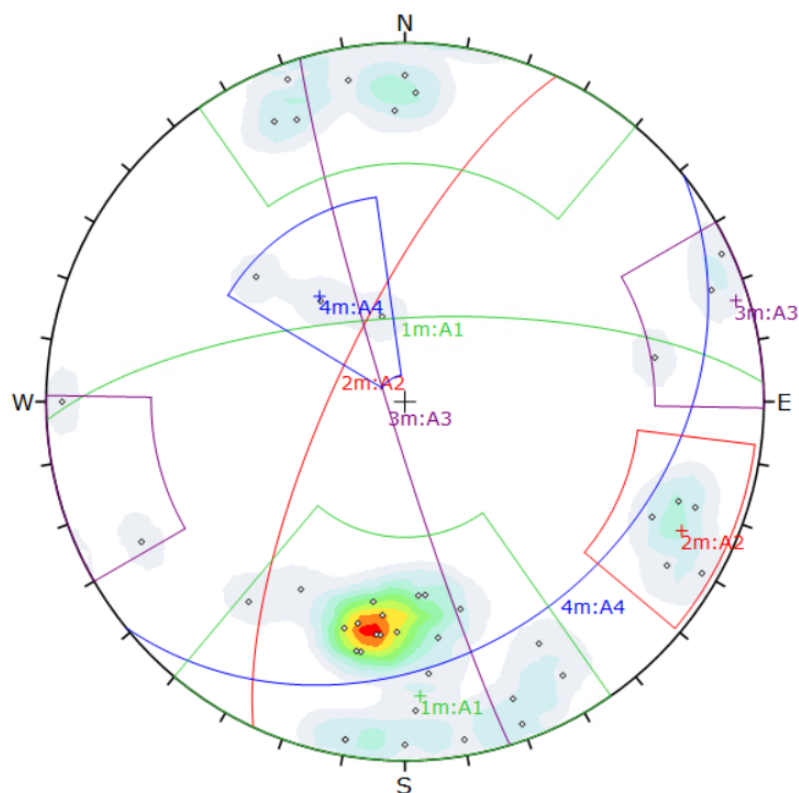
Σχήμα 11: Οι επιφάνειες των ασυνεχειών που μετρήσαμε.



Symbol	Feature
○	Pole Vectors

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	45 (45 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

Σχήμα 12: Οι πόλοι των επιφανειών του σχήματος 12.



Symbol	Feature
○	Pole Vectors

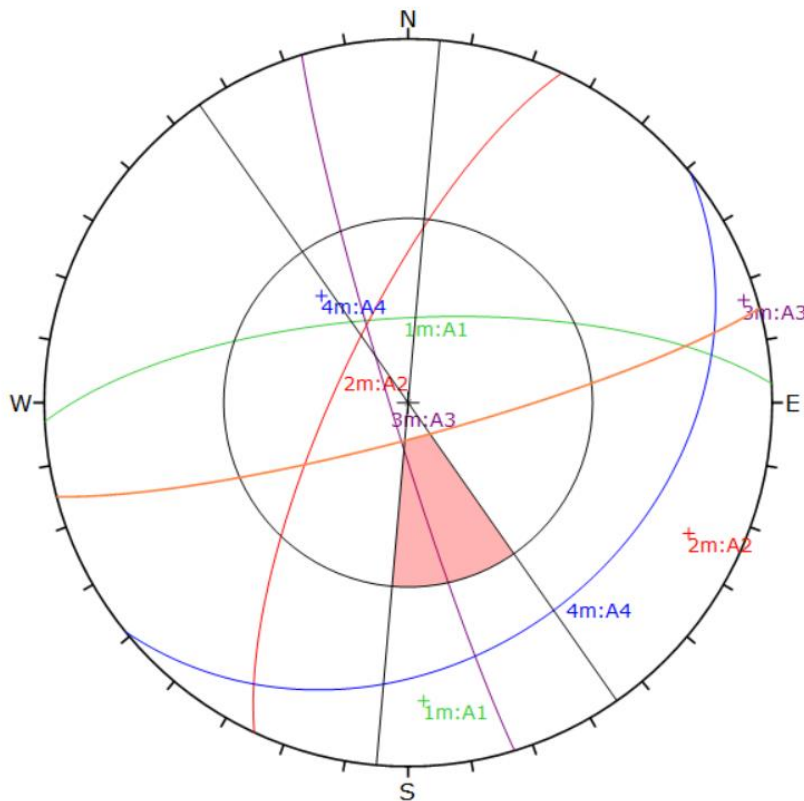
Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.00
	1.00 - 3.00
	3.00 - 5.40
	5.40 - 7.20
	7.20 - 9.00
	9.00 - 10.80
	10.80 - 12.60
	12.60 - 14.40
	14.40 - 16.20
	16.20 - 18.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	17.24%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Color	Dip	Dip Direction	Label
Mean Set Planes			
1m	71	357	A1
2m	74	295	A2
3m	86	253	A3
4m	31	141	A4

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	45 (45 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

Σχήμα 13: Οι 4 οικογένειες ασυνεχειών.



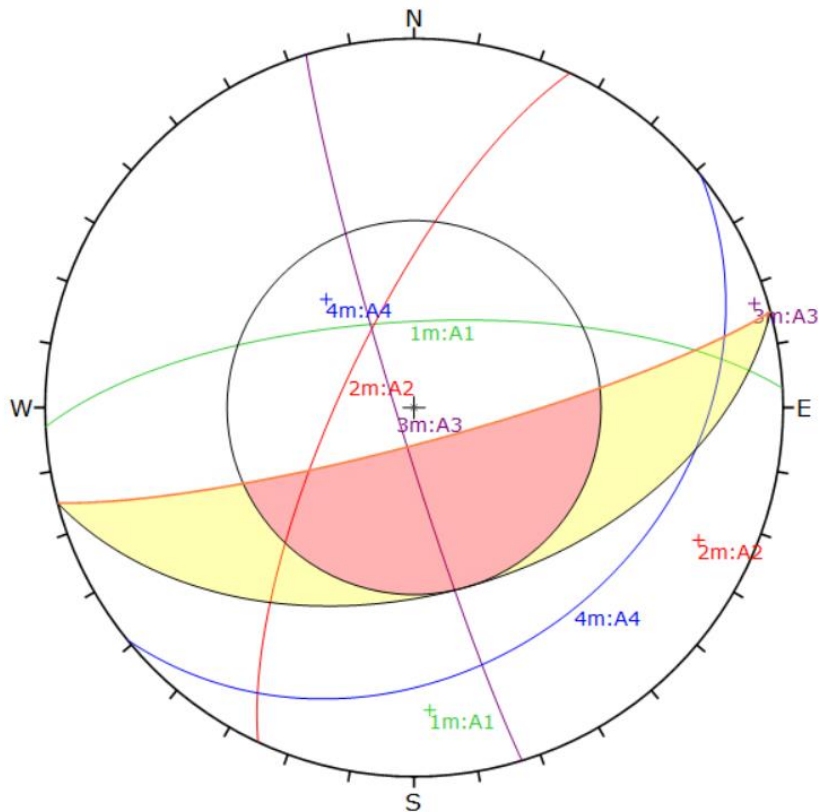
Kinematic Analysis		Planar Sliding		
Slope Dip		82		
Slope Dip Direction		165		
Friction Angle		48°		
Lateral Limits		20°		
		Critical	Total	%
Planar Sliding (All)		6	45	13.33%
Planar Sliding (Set 1: A1)		6	32	16.75%

	Color	Dip	Dip Direction	Label
Mean Set Planes				
1m		71	357	A1
2m		74	295	A2
3m		66	253	A3
4m		31	141	A4

Plot Mode		Dip Vectors
Vector Count		45 (45 Entries)
Hemisphere		Lower
Projection		Equal Area

Σχήμα 14: Επίπεδη ολίσθηση.

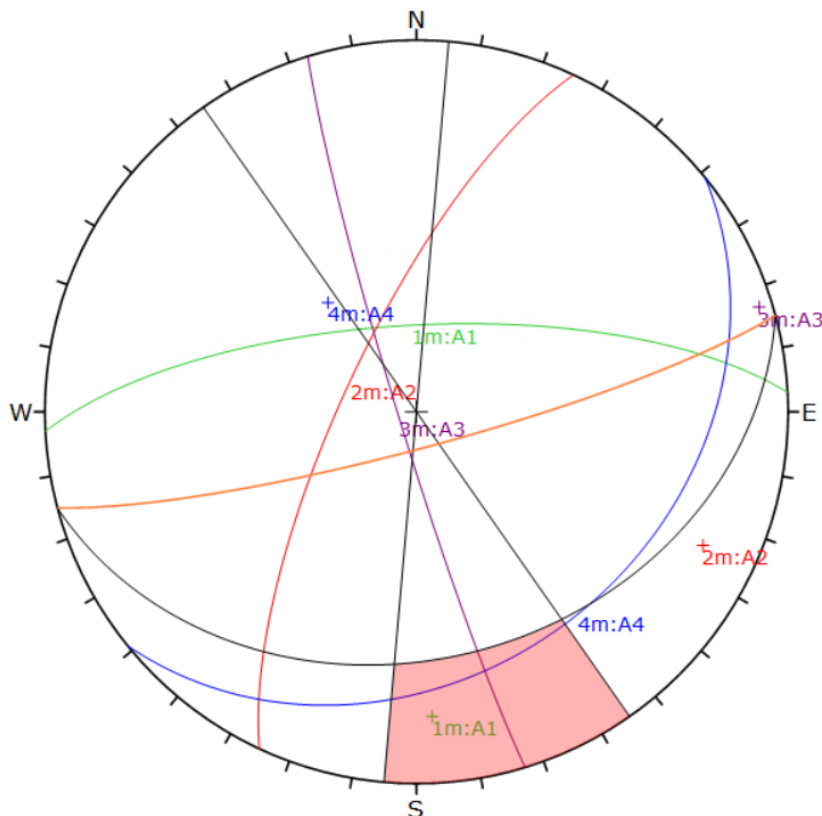
Για να υπάρχει πιθανότητα επίπεδης ολίσθησης πρέπει να πληρούνται ορισμένες προϋποθέσεις. Πρώτον, η ασυνέχεια, ή το σύνολο των ασυνεχειών, να «ανατέλλει» στην επιφάνεια του πρανούς. Δεύτερον, η ασυνέχεια και το πρανές να εμφανίζουν σχεδόν παράλληλη διεύθυνση και φορά, με διαφορά $\pm 20^\circ$. Τρίτον, η κλίση του πρανούς να είναι μεγαλύτερη από την κλίση της ασυνέχειας και οι δυο τους να είναι μεγαλύτερες από την γωνία τριβής της ασυνέχειας (ϕ). (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007) Στην περίπτωση μας, δεν τηρούνται τα παραπάνω κριτήρια, συνεπώς δεν εκδηλώνεται επίπεδη ολίσθηση στο πρανές μελέτης. Ωστόσο, το πρόγραμμα εμφανίζει ένα μικρό ποσοστό πιθανότητας επίπεδης ολίσθησης. Παρόλο που με βάση τους μέγιστους κύκλους δεν υπάρχει τέτοια πιθανότητα, αν ληφθούν υπόψη οι πόλοι των ασυνεχειών της A1, και συγκεκριμένα αυτοί που αντιστοιχούν στον αντιδιαμετρικό μέγιστο κύκλο της, εμφανίζεται πιθανότητα επίπεδης ολίσθησης στο πρανές μελέτης μας.



Symbol	Feature			
	Critical Intersection			
Kinematic Analysis				
Wedge Sliding				
Slope Dip	82			
Slope Dip Direction	165			
Friction Angle	48°			
	Critical	Total	%	
Wedge Sliding	0	6	0.00%	
Mean Set Planes				
1m		71	357	A1
2m		74	295	A2
3m		86	253	A3
4m		31	141	A4
Plot Mode		Dip Vectors		
Vector Count		45 (45 Entries)		
Intersection Mode		User and Mean Set Planes		
Intersections Count		6		
Hemisphere		Lower		
Projection		Equal Area		

Σχήμα 15: Σφηνοειδής ολίσθηση.

Κατά την σφηνοειδή ολίσθηση δημιουργείται ένα διέδρο, από τον συνδυασμό 2 ασυνεχειών, το οποίο ολισθαίνει κατά την ακμή του. Για την εκδήλωση σφηνοειδούς ολίσθησης, λοιπόν, τηρούνται ανάλογες προϋποθέσεις. Πρώτον, θα πρέπει η γωνία κλίσης του πρανούς να είναι μεγαλύτερη από τη γωνία της ακμής και οι δυο τους να είναι μεγαλύτερες από την γωνία τριβής της ασυνέχειας (ϕ). Δεύτερον, η τομή των ασυνεχειών θα πρέπει να «ανατέλλει» στην επιφάνεια του πρανούς. (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007) Στην περίπτωση μας, δεν δημιουργείται κάποιο διέδρο και, συνεπώς, δεν προκύπτει σφηνοειδής ολίσθηση.



Kinematic Analysis		Flexural Topping		
Slope Dip	82			
Slope Dip Direction	165			
Friction Angle	48°			
Lateral Limits	20°			
		Critical	Total	%
Flexural Topping (All)	8	45	17.78%	
Flexural Topping (Set 1: A1)	8	32	25.00%	

Color	Dip	Dip Direction	Label
Mean Set Planes			
1m	71	357	A1
2m	74	295	A2
3m	86	253	A3
4m	31	141	A4

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	45 (45 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

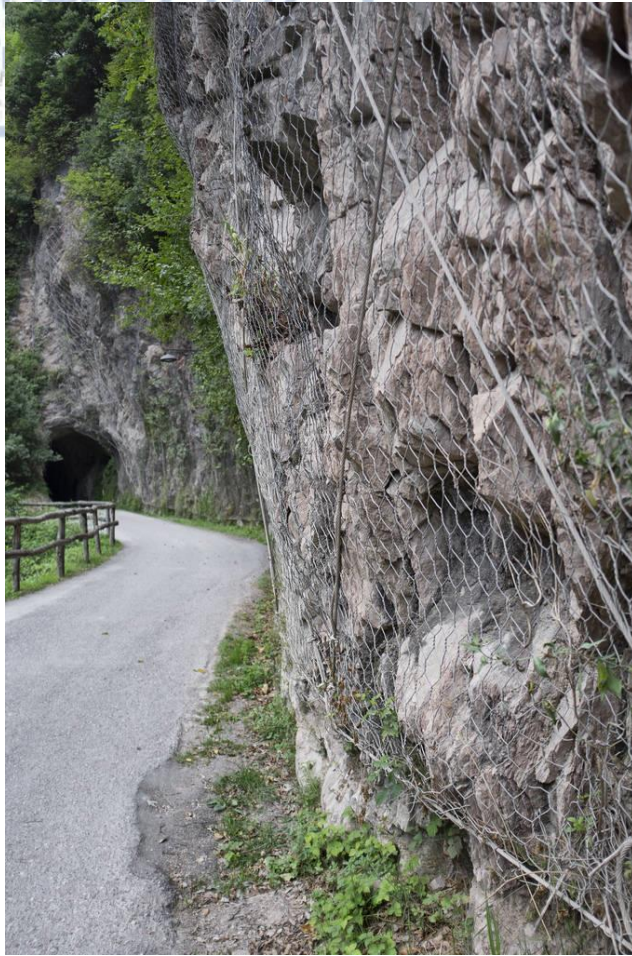
Σχήμα 16: Ολίσθηση από ανατροπή.

Όσον αφορά την ολίσθηση από ανατροπή, θα πρέπει η φορά κλίσης της ασυνέχειας και η φορά κλίσης του πρανούς να είναι αντίρροπες, με διαφορά στη διεύθυνση $\pm 20^\circ$. Επιπλέον, η γωνία κλίσης της ασυνέχειας θα πρέπει να ξεπερνά τις 70° . (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007) Στην περίπτωση μας, προκύπτει πιθανή ολίσθηση από ανατροπή, καθώς η οικογένεια ασυνεχειών A1 πληροί τις απαραίτητες προϋποθέσεις.

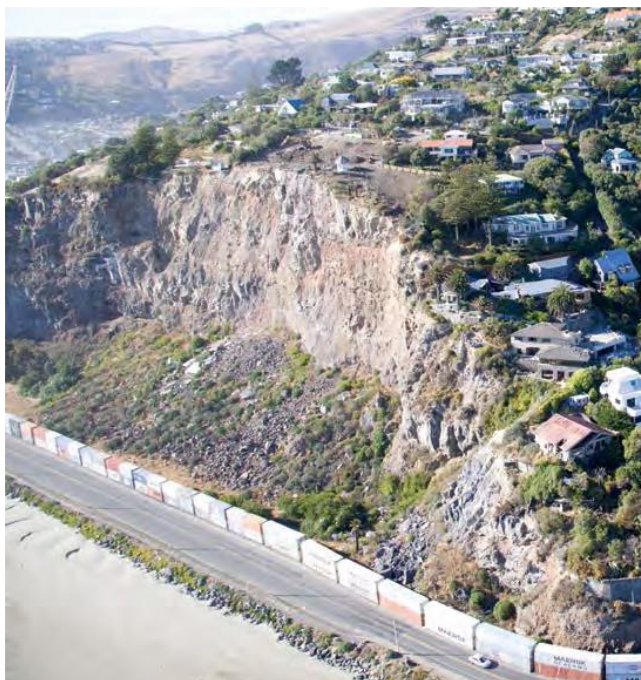
3.8. ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΑ ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Μετά το πέρας των μετρήσεων, της επεξεργασίας τους και της μελέτης των αποτελεσμάτων κρίνεται απαραίτητο να προταθούν ορισμένα μέτρα προστασίας της περιοχής από πιθανή βραχοκατάπτωση. Πρόκειται για δύο μέτρα προστασίας που κατατάσσονται στα προληπτικά, και συγκεκριμένα είναι το πλέγμα και ο φράχτης ή τοίχος αναχαίτισης.

Όσον αφορά το πλέγμα, όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, είναι φτιαγμένο ως επί το πλείστον από μεταλλικό υλικό και τοποθετείται στο μέτωπο του βραχώδους πρανούς για να συγκρατήσει τα βραχώδη τεμάχια από την πτώση τους στο εκάστοτε τεχνικό έργο. Επιπλέον, τα πλέγματα συμβάλλουν στη μείωση των απαιτούμενων διαστάσεων της τάφρου αναχαίτισης στη βάση του πρανούς, εξοικονομώντας έτσι χώρο και χρόνο στην κατασκευή. (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007)



Εικόνα 25: Μεταλλικό πλέγμα για την προστασία πρανούς από κατολίσθηση (<https://create.vista.com/el/unlimited/stock-photos/319598544/stock-photo-rockfall-protection-nets/>)



Εικόνα 26: Τοίχος αναχαιτίσης στο άκρο τάφρου αναχαιτίσης στη Νέα Ζηλανδία (New Zealand Geotechnical Society Inc, 2016)

Από την άλλη πλευρά, προτείνεται η κατασκευή τοίχου αναχαίτισης. Πρόκειται για μια άκαμπτη κατασκευή από σκυρόδεμα με κύριο σκοπό της την συγκράτηση των καταπτώσεων. Τοποθετείται στα άκρα πλατυσμάτων ή τάφρων αναχαίτισης και εμποδίζει τα αποκολλημένα τεμάχια να προσεγγίσουν το τεχνικό έργο. Σε περίπτωση πολύ υψηλού πρανούς, αυξάνεται το ωφέλιμο ύψος τους με την τοποθέτηση επιπλέον φράχτη συγκράτησης. (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2007)

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ολοκλήρωση της συγκεκριμένης εργασίας παρέχει τα απαραίτητα στοιχεία για την εκτίμηση πιθανού τύπου αστοχίας πρανούς στην περιοχή μελέτης, δηλαδή στο τμήμα του περιφερειακού δρόμου της Θεσσαλονίκης που μελετάμε. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε με μεθόδους που παρέχουν έγκυρα αποτελέσματα και τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν είναι η γεωλογική πυξίδα, η σφύρα Schmidt και το προφίλόμετρο. Δεν θα μπορούμε να μη γίνει, ωστόσο, και χρήση της σύγχρονης τεχνολογίας. Ειδικότερα, εφαρμογές όπως το 3D Scanner, κατά την διάρκεια της εργασίας πεδίου, και το λογισμικό DIPS, που μας παρέχει η Rocscience, κατά την επεξεργασία των μετρήσεων στο γραφείο, αποτέλεσαν καθοριστικούς παράγοντες για την εξαγωγή των τελικών αποτελεσμάτων και την ολοκλήρωση της μελέτης.

Με την χρήση του λογισμικού DIPS, εξήγαμε την κινηματική ανάλυση του πρανούς, μελετώντας τον τύπο ήδη υπάρχουσών αστοχιών αλλά και πιθανών μελλοντικών αστοχιών. Έχοντας τέτοιου είδους αποτελέσματα μας παρέχεται η δυνατότητα να λάβουμε τα κατάλληλα μέτρα για την πρόληψη καταστροφών και γενικότερα αρνητικών επιπτώσεων μιας βραχοκατάπτωσης. Στο πρανές μελέτης μας, καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι ο μόνος πιθανός τύπος ολίσθησης είναι από ανατροπή.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Αναγνωστοπούλου Σ., 2015, Κατολισθαίνουσα ζώνη Παναγοπούλας: Διαχρονική εξέλιξη εδαφικών μετακινήσεων με ενόργανες μετρήσεις και αποτελεσματικότητα των μέτρων προστασίας, Διατριβή διπλώματος ειδίκευσης, Πανεπιστήμιο Πατρών.

Γεωτεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Παράρτημα Κεντρικής Ελλάδας, 2009, Δελτίο τύπου για την κατολίσθηση των Τεμπών

Ζερβοπούλου Α. και Παυλίδης Σ., 2005, Μορφοτεκτονική μελέτη της ευρύτερης περιοχής της Θεσσαλονίκης για τη χαρτογράφηση νεοτεκτονικών ρηγμάτων, Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας τομ. XXXVIII.

Κατσικάς Χ., 2012, Κατολίσθηση Μαλακάσας – Συμπεριφορά και θεώρηση των μέτρων αντιμετώπισης 15 χρόνια μετά την αστοχία, Διπλωματική εργασία ΕΜΠ.

Κοκκαλά Α., 2015, Κατασκευή τεχνικογεωλογικής τράπεζας δεδομένων για τον σχεδιασμό σιδηρόδρομων στη λεκάνη Θεσσαλονίκης, Μεταπτυχιακή διατριβή ειδίκευσης ΑΠΘ.

Κούκης Γ. και Σαμπατακάκης Ν., 2007, Γεωλογία τεχνικών έργων, Εκδόσεις Παπασωτηρίου

Κωστόπουλος Κ., 2022, Αξιολόγηση της επικινδυνότητας βραχοκαταπτώσεων με τη χρήση νέων τεχνολογιών (UAV), Διπλωματική εργασία ΑΠΘ.

Λεβάν Α. Μαϊσουρατζέ, 2016, Γεωλογία της Περιοδοπικής ζώνης στην περιοχή Ευκαρπία – Φίλυρο (ΒΑ Θεσσαλονίκη) με γεωλογική χαρτογράφηση κλίμακας 1:10.000, Διπλωματική εργασία ΑΠΘ.

Λιόνης Χ., 2010, Επικινδυνότητα καταπτώσεων και ολισθήσεων έναντι αστοχίας βραχωδών πρανών σε κατοικημένες περιοχές, Διπλωματική εργασία Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο Αθηνών.

Λουπασάκης Κ., 2013-14, Ευστάθεια πρανών, Σημειώσεις διαλέξεων Εδαφομηχανική και στοιχεία θεμελιώσεων ΕΜΠ.

Μπαντής Σ., 2008, Τεχνική γεωλογία, Gutenberg.

Νομικός Π., 2015, Εισαγωγή στη μηχανική των πετρωμάτων, Εκδόσεις Κάλλιπος.

Πανταζοπούλου Ζ., Μουρατίδης Α. και Τσακίρη-Στρατή Μ., 2017, Φυσικές και ανθρωπογενείς διεργασίες στο ευρύτερο οικιστικό συγκρότημα της Θεσσαλονίκης, Living with GIS, ΑΠΘ.

Παπαθανασίου Γ., 2021, Ευστάθεια βραχωδών πρανών, Παρουσιάσεις διαλέξεων Τεχνικής Γεωλογίας ΑΠΘ.

Παπαθανασίου Γ., 2021, Κατολισθήσεις, Παρουσιάσεις διαλέξεων Τεχνικής Γεωλογίας ΑΠΘ.

Παπαθανασίου Γ., 2022, Τεχνική γεωλογία και γεωλογικοί κίνδυνοι, Εκδόσεις Κάλλιπος.

Παυλίδης Κ., 2009, Ανάλυση ευστάθειας διαμορφωμένων πρανών στο τμήμα Ρεντίνας-Στρυμώνα της Εγνατίας Οδού, Διατριβή ειδίκευσης ΑΠΘ.

Σακελλαρίου Α., Λυκούσης Β., Ρουσάκης Γ. και Γεωργίου Π., 2001, Φαινόμενα ολισθήσεων σε υποθαλάσσια ενεργά ρηξιγενή πρανή: Περιοχή Παναγοπούλας – Δ.

Κορινθιακός Κόλπος, Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας τομ. XXXIV/5, 1723 – 1731, Πρακτικά 9^{ου} Διεθνούς Συνεδρίου, Αθήνα.

Σωτηρόπουλος Λ., Λυμπέρης Ε., Σιγάλας Α., Ντουρούπη Α., Προβιά Κ. και Ντουινιάς Γ., 2004, Κατολίσθηση στην περιοχή Τσάκωνας Ν. Αρκαδίας – Γεωλογικές συνθήκες και μηχανισμός ενεργοποίησης, Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας τομ. XXXVI, Θεσσαλονίκη.

Ταβουλάρης Ν., 2017, Έρευνα παραμέτρων κατολισθητικότητας στην πρόγνωση αστοχιών πρανών, Διδακτορική διατριβή ΕΜΠ.

Τσαφάρα Θ. Κ., 2021, Μελέτη ευστάθειας χερσαίων και υποθαλάσσιων πρανών με χρήση αναλυτικών αριθμητικών μεθόδων, Διπλωματική εργασία ΕΜΠ

Φουντούλης Ι., Λαδάς Ι., Σπυρίδωνος Ε. και Μαριολάκος Η., 2004, Η σημασία της τεκτονικής και της υδρογεωλογίας για την κατολίσθηση της Τσάκωνας Αρκαδίας, Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας τομ. XXXVI, Πρακτικά 10^{ου} Διεθνούς Συνεδρίου, Θεσσαλονίκη.

Φυτρολάκης Ν. και Αντωνιάδης Δ., 1974, Κατολισθήσεις και γεωλογικές συνθήκες επί της Εθνικής Οδού Κορίνθου – Πατρών, περιοχής Ψαθόπυργου, Μεταλλειολογικά-Μεταλλουργικά Χρονικά (20/1974).

Χατζηγηργορίου Γ. και Κουντουράς Δ., 2019, Ευστάθεια βραχωδών πρανών και ευαισθησία αναλύσεων, Διπλωματική εργασία ΑΠΘ.

Χρηστάρας Β. και Χατζηαγγέλου Μ., 2011, Απλά βήματα στην εδαφομηχανική, University Studio Press.

Ministry of Business, Innovation and Employment, New Zealand Geotechnical Society Inc, NZ Transport Agency, 2016, Rockfall: Design considerations for passive protection structures.

<https://www.elekkas.gr/index.php/en/epistimoniko-ergo/scientificmissions/1642-tempi-2009>, Φωτογραφικό αρχείο Ευθ. Λέκκα.

https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CF%81%CF%87%CE%B5%CE%AF%CE%BF:Bauarbeiten_%C3%B6stliches_Domumfeld-K%C3%B6lner_Dom-Spritzbeton-8306.jpg.

<https://www.geoengineer.org/software/dips>.

<https://www.7meres.gr/prosochi-epesan-vrachoi-sto-dromo-apo-ioannina-gia-pramanta/>, ΠΡΟΣΟΧΗ – Έπεσαν βράχοι στο δρόμο από Ιωάννινα για Πράμαντα, 7μέρες, 2020.

<https://create.vista.com/el/unlimited/stock-photos/319598544/stock-photo-rockfall-protection-nets/>.

<https://www.bgs.ac.uk/>, British Geological Survey.