

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Σχολή Θετικών Επιστημών

Τμήμα Γεωλογίας



Μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών γεωλογίας

Ειδίκευση: Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Γεωλογία

Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης

**ΕΡΕΥΝΑ ΕΠΙ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ
ΜΑΡΓΑΪΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΜΕΓΑΛΩΝ
ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΕΚΣΚΑΦΩΝ. ΤΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΤΟΥ
ΟΙΚΙΣΜΟΥ ΜΑΥΡΟΠΗΓΗΣ ΣΤΗΝ ΠΤΟΛΕΜΑΪΔΑ**

Μαρία Γολιδοπούλου

Γεωλόγος

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

Μαρίνος Βασίλειος, Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Επιβλέπων

Παυλίδης Σπυρίδων, Καθηγητής, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Μέλος

Βουδούρης Κωνσταντίνος, Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Μέλος

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	2
1.1 Θεωρητικό υπόβαθρο κατολισθήσεων	2
1.1.1 Βασικοί τύποι ολίσθησης πρανών (ταξινόμηση κατά VARNES) ..	4
1.1.2 Ταξινόμηση με βάση την ταχύτητα της κατολίσθησης	12
1.1.3 Αίτια κατολισθήσεων	13
1.2 Προσδιορισμός φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών φυσικά	18
1.2.1 Προσδιορισμός φυσικών χαρακτηριστικών	18
1.2.2 Προσδιορισμός μηχανικών χαρακτηριστικών	30
1.3 Μέθοδοι ανάλυσης ευστάθειας πρανών	38
1.3.1 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων	38
1.3.2 Μέθοδος ανάλυσης οριακής ισορροπίας	40
1.4 Όργανα παρακολούθησης των κατολισθήσεων	51
1.5 Μέτρα αντιμετώπισης των κατολισθήσεων	57
2. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΜΑΡΓΑΪΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ	60
2.1 Συμπεριφορά της μάργας σύμφωνα με τα γεωτεχνικά της χαρακτηριστικά	60
2.2 Ταξινόμηση της μάργας σύμφωνα με την σύστασή της	61
2.3 Περιπτώσεις μαργαϊκών σχηματισμών στον ελληνικό χώρο	63
3. ΕΞΕΤΑΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΑΥΡΟΠΗΓΗΣ Ν. ΚΟΖΑΝΗΣ	76
3.1 Γεωγραφική τοποθέτηση και γεωμορφολογία της περιοχής έρευνας	76

3.2 Γεωτεκτονική τοποθέτηση της ευρύτερης περιοχής έρευνας στην Πελαγονική ζώνη	78
3.3 Γεωτεκτονική εξέλιξη της ευρύτερης περιοχής μελέτης.....	82
3.4 Γεωλογία της περιοχής μελέτης (Λεκάνη Φλώρινας – Πτολεμαΐδας - Σερβίων).....	84
3.5 Τεκτονική της περιοχής έρευνας.....	90
3.6 Εκδήλωση σεισμικότητας στην περιοχή έρευνας.....	95
3.7 Υδρογεωλογικές συνθήκες στην περιοχή έρευνας.....	99
3.7.1 Περαιτότητα των γεωλογικών σχηματισμών στην ευρύτερη περιοχή έρευνας	99
3.7.2. Υδροφόρα συστήματα στην περιοχής έρευνας.....	102
4. ΚΙΝΗΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΤΑ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΑ ΕΛΑΦΙΚΑ ΠΡΑΝΗ ΕΚΣΚΑΦΩΝ ΜΕΓΑΛΟΥ ΒΑΘΟΥΣ ΚΑΙ ΠΛΑΤΟΥΣ	108
4.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την παραμόρφωση	109
4.2 Σχέση χρόνου - μετακίνησης	109
4.3 Κινήσεις περιφερικών εδαφικών πρανών μετά την εκσκαφή.....	110
4.4 Μηχανισμοί αστοχίας	112
4.5 Περιπτώσεις μετακινήσεων εδαφικών πρανών σε περιοχές μεγάλων εκσκαφών	114
4.5.1 Λιγνιτωρυχείο Προσήλιο Ν. Κοζάνης.....	115
4.5.2 Λιγνιτωρυχείο Λάβα, Σέρβια στο Ν. Κοζανης	127
5.5.3 Λιγνιτωρυχείο Τομέας 6 στον Ν. Κοζάνης.....	133

5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΕΛΔΑΦΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΗ ΕΚΣΚΑΦΗ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ	138
5.1 Συμπεριφορά νεογενών γύρω από την εκσκαφή	138
5.2 Γεωλογικό μοντέλο της περιοχής έρευνας	151
5.3 Μηχανισμός αστοχίας των μαργαϊκών σχηματισμών περιφερειακά της εκσκαφής	152
5.4 Γενικό μοντέλο της περιοχής Μαυροπηγής	155
6. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ	156
6.1 Περιγραφή χρήσης λογισμικών ανάλυσης ισορροπίας	156
6.2 Ανάλυση ευσταθείας πρανών του ορυχείου με τη μέθοδο της οριακής ισορροπίας	157
6.3 Ανάλυση ευστάθειας με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων	163
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	179
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΩΝ	188
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	194

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην παρούσα εργασία προσδιορίζονται οι παράγοντες που επιδρούν στην ευστάθεια εδαφικών πρανών σε περιοχές εκσκαφών σημαντικού ύψους. Για το σκοπό αυτό μελετήθηκε η ευστάθεια πρανών σε περιβάλλον μάργας, όπου έχουν συμβεί σημαντικές ολισθήσεις και έχουν προσδιοριστεί τα χαρακτηριστικά των σχηματισμών και ο μηχανισμός ολίσθησης. Ο στόχος της έρευνας αυτής εντοπίζεται στον καθορισμό του γεωλογικού μοντέλου, του μηχανισμού αστοχίας και εκείνων των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών χαρακτηριστικών που ορίζουν την ευστάθειά των πρανών αυτών.

Τα στοιχεία που επεξεργάστηκαν στην έρευνα αυτή αφορούν περιπτώσεις μάργας στον ελληνικό χώρο και τις αντίστοιχες γεωτεχνικές τους ιδιότητες καθώς επίσης περιπτώσεις έρευνας (case studies) εκσκαφών σημαντικού ύψους, που αναπτύχθηκαν σε μαργαϊκούς σχηματισμούς και προκλήθηκαν κατολισθήσεις. Για την έρευνα της επίδρασης των τεχνικογεωλογικών παραμέτρων πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις ευστάθειας σε ειδικά λογισμικά. Στόχος είναι η κατανόηση της σημασίας της γεωλογικής πληροφορίας στην ποσοτικοποίηση των υλικών, η επιλογή των κατάλληλων τεχνικογεωλογικών παραμέτρων και της γνώσης του μηχανισμού αστοχίας – συμπεριφοράς του γεωλικού. Ειδικότερα, αναλύθηκαν στοιχεία σημαντικών μετακινήσεων και κατολισθήσεων από τη περιοχή της Μαυροπηγής στην λεκάνη της Πτολεμαΐδας. Η έρευνα επικεντρώθηκε στη δημιουργία ενός τεχνικογεωλογικού μοντέλου. Αφού καθορίστηκε η γεωμετρία των σχηματισμών εκτιμήθηκαν οι τεχνικογεωλογικές ενότητες και οι παράμετροι. Το μοντέλο που δημιουργήθηκε προσομοιώθηκε σε ειδικά λογισμικά γεωτεχνικής ανάλυσης με στόχο την ανάλυση της ευστάθειας των μαργαϊκών και την εξέταση του μηχανισμού αστοχίας. Η εργασία επικεντρώνεται στον καθορισμό των πιθανών παραμέτρων των τεχνικογεωλογικών ενότητων, που δομούν τα συγκεκριμένα εδαφικά πρανή, με τη μέθοδο ανάστροφης ανάλυσης. Ο σκοπός της εργασίας επιτεύχθηκε μέσω ανάδρομων αναλύσεων στα λογισμικά SLIDE και PHASE, όπου προσδιορίστηκε η αποτόνωση των τάσεων και η μορφή των αστοχιών, μετά την σταδιακή εκσκαφή.

1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας θα αναλυθεί η θεωρία πάνω στην οποία βασίστηκε η παρούσα εργασία και βάση της οποίας διεξήχθησαν κάποια λογικά συμπεράσματα. Αναλύονται οι παράμετροι σύμφωνα με τις οποίες ταξινομούνται οι κατολισθήσεις, οι μέθοδοι που εξετάζουν την ευστάθεια των πρανών καθώς επίσης και τα μέτρα παρακολούθησης των αστοχιών και κάποιοι από τους τρόπους αντιμετώπισης των ολισθήσεων. Επειδή τα χαρακτηριστικά της ολισθαίνουσας μάζας έχουν σημαντική αξία στην κατανόηση της ολίσθησης, περιγράφονται οι διαδικασίες με τις οποίες καθορίζονται τα μηχανικά και φυσικά χαρακτηριστικά ενός υπό εξέταση υλικού. Συνδυάζοντας αυτές τις πληροφορίες στην πράξη καταλήγουμε σε συμπεράσματα για τη συμπεριφορά ενός υλικού σε αστοχία και είμαστε σε θέση να διερευνήσουμε τα γεωλογικά και τεχνικογεωλογικά αίτια αυτής της συμπεριφοράς.

1.1 Θεωρητικό υπόβαθρο κατολισθήσεων

Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στα κριτήρια σύμφωνα με τα οποία κατά καιρούς έχουν διαχωριστεί και ταξινομηθεί οι βασικοί τύποι ολισθήσεων. Η ταξινόμηση αυτή έχει γίνει με παραμέτρους που αφορούν το είδος της κίνησης, το υλικό της ολισθαίνουσας μάζας, τα στάδια δράσης τους και την ταχύτητα μετακίνησης.

Βασικά κριτήρια ταξινόμησης κατολισθήσεων.

Κατά καιρούς έχουν προταθεί διάφορες ταξινομήσεις των κατολισθήσεων, οι οποίες στηρίζονται σε ποικίλα κριτήρια, με αποτέλεσμα την διαφοροποίηση των συστημάτων ταξινόμησης.

- Ανάλογα με το είδος της κίνησης, οι κατολισθήσεις διαχωρίζονται σε 5 κατηγορίες: πτώσεις (falls), ανατροπές (topples), ολισθήσεις (slides), εξαπλώσεις (spreads) και ροές (flows).
- Ανάλογα με το υλικό, η μάζα η οποία κατολισθαίνει μπορεί να είναι βράχος ή έδαφος.
- Ανάλογα με το στάδιο δράσης χαρακτηρίζονται ως ενεργές, απενεργοποιημένες, αδρανείς, ανενεργές, αρχαίες ή απολιθωμένες κατολισθήσεις.

Διάφορα συστήματα ταξινόμησης έχουν προταθεί κατά καιρούς για τις κατολισθήσεις και αναφέρονται παρακάτω:

1. Η ταξινόμηση κατά SHARPE KAI VARNES βασίζεται σε τέσσερις παραμέτρους:

- α) τον τύπο κίνησης
- β) την ταχύτητα κίνησης
- γ) τον τύπο του υλικού
- δ) την περιεχόμενη υγρασία.

2. Ο ERSKINE ταξινόμησε τις κατολισθήσεις με βάση την ενεργότητα τους και τις επιπτώσεις που πιθανόν να έχουν στα διάφορα τεχνικά έργα:

- α) Σταθεροποιημένες κατολισθήσεις (δεν έχουν ενδείξεις πρόσφατης ενεργοποίησης)
- β) Πρόσφατα ενεργές κατολισθήσεις (εκδηλώνονται με πρόσφατες κινήσεις)
- γ) Κατολισθήσεις που έδρασαν πρόσφατα (μετά από μια περίοδο σταθεροποίησης)
- δ) Ενεργές κατολισθήσεις (δείχνουν να μην έχουν σταθεροποιηθεί)

3. Ο COATES ταξινομεί τις κατολισθήσεις με βάση δύο παραμέτρους

- α) Το υλικό μετακίνησης i) βραχώδες υπόβαθρο ii) μανδύας αποσάθρωσης - κορήματα iii) εδαφικοί σχηματισμοί
- β) Τον τύπο κίνησης i) ολίσθηση ii) ροή iii) κατάπτωση.

4. Οι ZARUBA- MENCL διακρίνουν τέσσερις κατηγορίες μετακίνησης πρυνών ανάλογα με τη σύσταση των μετακινούμενων υλικών, οι οποίες υποδιαιρούνται ανάλογα με τον χαρακτήρα των πετρωμάτων και κυρίως τον τύπο μετακίνησης:

1) Μετακίνηση επιφανειακών αποθέσεων

- Ερπυσμός κορημάτων και κάμψη της κεφαλής των στρωμάτων
- Ολισθήσεις κορημάτων και μανδύα αποσάθρωσης
- Ροές γαιών

2) Μετακινήσεις στα αργιλικά εδάφη και πετρώματα

- Ολισθήσεις κατά μήκος κυλινδρικών επιφανειών ολίσθησης
- Μετακινήσεις πρυνών από σύνθλιψη μαλακών πετρωμάτων

3) Μετακινήσεις συμπαγών πετρωμάτων

- Ολισθήσεις βράχων κατά μήκος προκαθορισμένων επιφανειών
- Ολισθήσεις βαρύτητας (μακροχρόνιες παραμορφώσεις πρηνών)
- Πτώσεις βράχων

4) Ειδικοί τύποι μετακίνησης

- Εδαφική ροή λόγω παγετού
- Ολισθήσεις σε ευαίσθητες αργίλους
- Υποθαλάσσιες ολισθήσεις

1.1.1. Βασικοί τύποι ολίσθησης πρηνών (ταξινόμηση κατά VARNES)

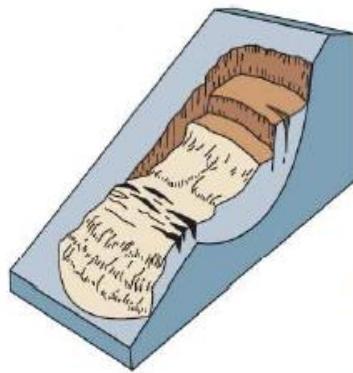
Ο VARNES(1978) περιγράφει όλες τις εδαφικές μετακινήσεις που μπορούν να παρατηρηθούν σε πρηνή εκτός βέβαια των καθιζήσεων. Τα βασικά κριτήρια για την ταξινόμηση είναι ο τύπος της μετακίνησης και το είδος του κινούμενου υλικού, ενώ περιλαμβάνει έξι τύπους μετακίνησης πρηνών οι οποίοι είναι (Πίνακας 1.1.1):

- 1) Καταπτώσεις (falls)
- 2) Ανατροπές (topplings)
- 3) Ολισθήσεις (slides)
- 4) Πλευρικές επεκτάσεις (lateral spreads)
- 5) Ροές (flows)
- 6) Σύνθετες μετακινήσεις (complex)

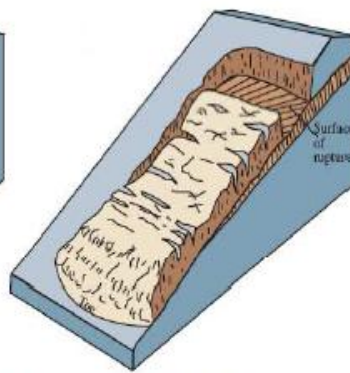
Πίνακας 1.1.1: Ταξινόμηση κατολισθήσεων σύμφωνα με το είδος της μετακίνησης του υλικού των πρηνών (κατά Varnes, in Schuster- Krizek ed, 1978).

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		

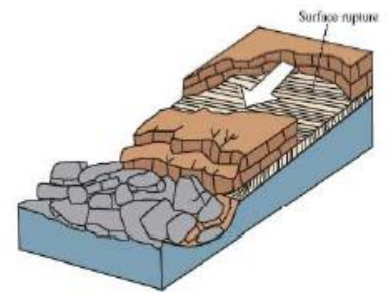
*χονδρόκοκκα κορήματα (bebris) 20-80% >2mm (χαλίκια, κροκάλες, λατύπες, ογκόλιθοι),
 *λεπτόκοκκα Γαίες (earth) >80% >2 mm (αμμος, ιλύς, άργιλος).



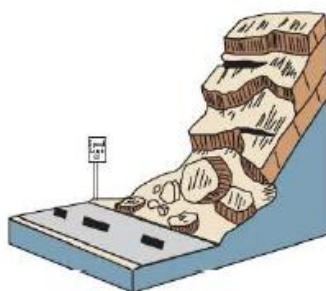
ΠΕΡΟΣΤΡΟΦΙΚΗ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗ



ΜΕΤΑΘΕΤΙΚΗ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗ



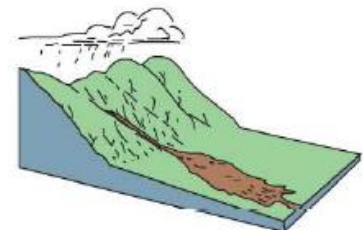
ΟΛΙΣΘΗΣΗ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΤΕΜΑΧΙΩΝ



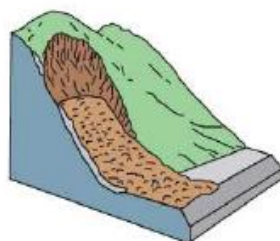
ΠΤΩΣΕΙΣ ΒΡΑΧΩΝ



ΑΝΑΤΡΩΠΗ



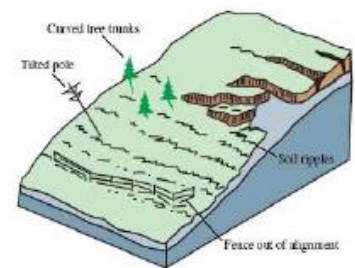
ΔΕΝΔΡΙΤΙΚΗ ΡΟΗ



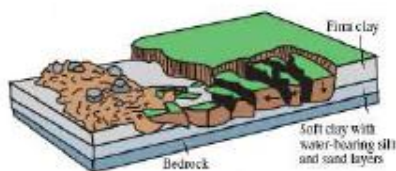
**ΧΙΟΝΟΣΤΟΙΒΑΔΑ
ΑΠΟΣΑΘΡΩΜΑΤΩΝ**



ΡΟΗ ΓΑΙΩΝ



ΕΠΙΓΥΣΜΟΣ



ΠΛΕΥΡΙΚΗ ΕΞΑΠΛΩΣΗ ΓΑΙΩΝ

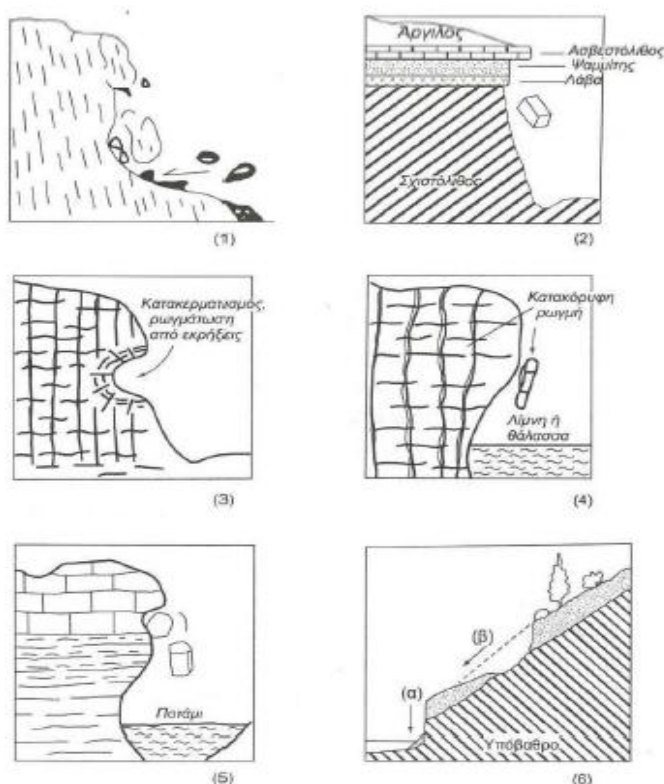
Σχήμα 1.1.1: Σχηματική απεικόνιση της ταξινόμησης των κατολισθήσεων κατά Varnes (1978).

Στη συνέχεια δίνεται συνοπτική περιγραφή κάθε τύπου μετακίνησης:

Καταπτώσεις (falls)

Στις πτώσεις (σχήμα 1.1.2) μια μάζα οποιουδήποτε μεγέθους αποσπάται, από ένα απότομο πρανές, κατά μήκος μιας επιφάνειας με μικρή ή σχεδόν μηδενική διατμητική αντοχή και κατέρχεται, ταξιδεύοντας στον αέρα κυρίως, με απλή πτώση, αναπήδηση ή κύλιση. Η μετακίνηση αυτού του είδους είναι πολύ μέχρι εξαιρετικά γρήγορη και είναι πιθανό να έχουν προηγηθεί μικρότερες μετακινήσεις, οι οποίες οδήγησαν στον προοδευτικό αποχωρισμό της μετακινούμενης μάζας από το μητρικό πέτρωμα. Κύριες αιτίες εκδήλωσης μιας πτώσης είναι η επίδραση της βαρύτητας, η διαφορική διάβρωση, η παρουσία ρευμάτων, και η διάβρωση που προκαλούν αυτά και οι ανασκαφές.

Σ' αυτήν την κατηγορία μετακινήσεων διακρίνουμε τρεις διαφορετικές περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση, **πτώσεις βράχων (rock falls)**, η μάζα που μετακινείται είναι μάζα βράχων που αποσπάστηκε από την απότομη πλαγιά. Στη δεύτερη περίπτωση, **πτώσεις κορημάτων (debris falls)**, η μάζα που μετακινείται είναι κορήματα (δηλαδή θραύσματα που έχουν δημιουργηθεί πριν από την εκδήλωση της κατολίσθησης) ενώ τέλος, οι **πτώσεις γαιών (earth falls)** αποτελούν πολύ σπάνιο φαινόμενο και κατά βάση σχετίζονται με άλλους τύπους μετακίνησης (Varnes, 1978, USGS, 2004, Cruden and Varnes 1996).

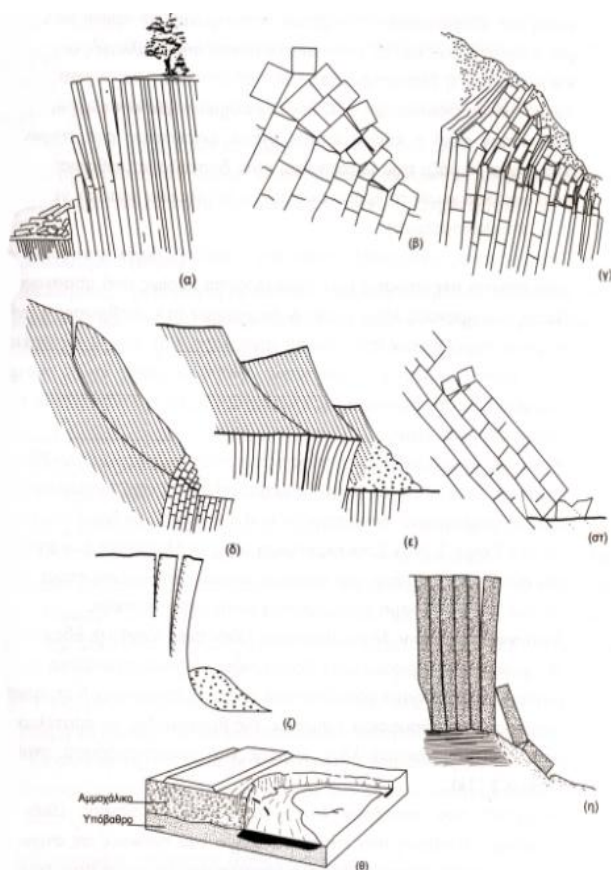


Σχήμα 1.1.2: Καταπτώσεις βράχων, κορημάτων και γαιών: (1) τυλική κατάπτωση βράχων (VARNES 1978), (2) κατάπτωση λόγω διαφορικής αποσάθρωσης (LETOURNEUR and MICHEL 1971), (3) λόγω φυσικού κατακερματισμού ή από εκρήξεις, (4) λόγω ρωγμών και διαφορικής διάβρωσης από το κύμα, (5) λόγω ρωγμών και διαφορικής διάβρωσης από το ποτάμι (VARNES 1978), (6) (α) άμεση κατάπτωση γαιών-εδάφους ή (β) μετά από ολίσθηση (Από ΚΟΥΚΗΣ – ΣΑΜΠΙΑΤΑΚΑΚΗΣ 2007)

Ανατροπές (topples)

Κατά τις ανατροπές (Σχήμα 1.1.3) η κίνηση είναι περιστροφική προς τα εμπρός μίας ή περισσότερων μονάδων γύρω από ένα σημείο περιστροφής, που βρίσκεται χαμηλότερα από το κέντρο βάρους του τεμάχους. Τα αίτια, αυτών των μετακινήσεων, είναι η βαρύτητα και οι δυνάμεις που ασκούνται από τα γειτονικά τεμάχια ή από τα ρευστά μέσα στις ρωγμές.

Το φαινόμενο αυτό μπορεί να προκαλέσει πτώσεις ή ολισθήσεις κατά την εξέλιξή του, ανάλογα με τη γεωμετρία της επιφάνειας αποκόλλησης, τη γεωμετρία της μετακινούμενης μάζας και τον προσανατολισμό των ασυνεχειών. Η ταχύτητα μιας ανατροπής μπορεί να είναι εξαιρετικά αργή μέχρι και εξαιρετικά γρήγορη, ενώ πολλές φορές επιταχύνει κατά τη κίνηση - ως κίνηση εκδηλώνεται κυρίως σε βραχώδη πρανή (rock topples). Αντίθετα, οι ανατροπές κορημάτων (debris topples) και γαιών (earth topples) αποτελούν σπάνιες περιπτώσεις, η εκδήλωση των οποίων οφείλεται κυρίως στις φυσικές διεργασίες (π.χ. διαφορική διάβρωση) και στις ανθρώπινες παρεμβάσεις (π.χ. ανασκαφές) (Varnes, 1978, USGS, 2004, Cruden and Varnes 1996).



Σχ. 1.1.3 Ταξινόμηση των ανατροπών (GOODMAN and BRAY 1976): α) ανατροπή λόγω κάμψης β) ανατροπή τεμαχών γ) ανατροπή τεμαχών λόγω κάμψης. Δευτερογενείς ανατροπές: δ) ανατροπή του πόδα λόγω ολίσθησης των ανώτερων στρωμάτων ε) ανατροπή της βάσης λόγω ολίσθησης στ) ανατροπή λόγω της παρουσίας εφελκυστικών ρωγμών η) κυκλοειδής ολίσθηση και ανατροπή θ) ανατροπή εδαφικών υλικών.

Ολισθήσεις (slides)

Στις ολισθήσεις η μετακίνηση προϋποθέτει κυρίως διατμητική παραμόρφωση και μετατόπιση, θραύση του υλικού κατά μήκος μίας ή και περισσότερων επιφανειών, που μπορεί να είναι ορατές ή όχι και να εκδηλώνονται μέσα σε μία σχετικά στενή ζώνη. Η μετακίνηση μπορεί να είναι προοδευτική, δηλαδή η διατμητική θραύση να μη συμβεί ταυτόχρονα σε όλη την επιφάνεια, που ίσως αποτελέσει τελικά μια καθορισμένη επιφάνεια θραύσης, αλλά να επεκτείνεται διαδοχικά πέρα από την αρχική περιοχή τοπικής θραύσης μάζα που μετατοπίζεται μπορεί να ολισθήσει προς τα κατάντη απομακρυνόμενη από την αρχική επιφάνεια θραύσης.

Ο Varnes (1978), ανάλογα με τη μορφή της επιφάνειας ολίσθησης και με το μηχανισμό μετακίνησης, διαχώρισε τις ολισθήσεις σε περιστροφικές και μεταθετικές.

i. Περιστροφικές ολισθήσεις (Rotational slides)

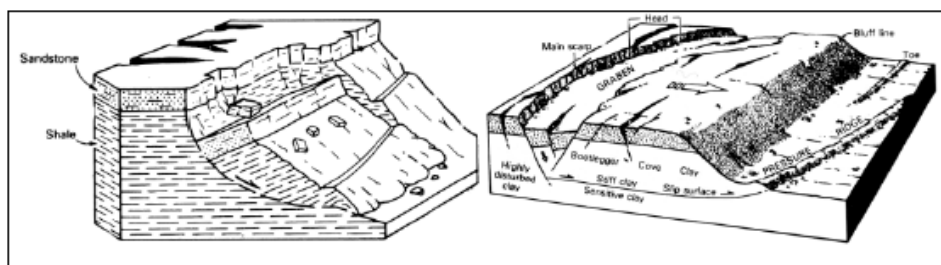
Η πιο συνηθισμένη μορφή περιστροφικής ολίσθησης είναι η *slump* με μικρή παραμόρφωση. Πρόκειται για ολίσθηση κατά μήκος μιας επιφάνειας θραύσης που είναι κοίλη προς τα πάνω (η οποία δεν προϋπήρχε), ενώ η κίνησή της είναι περίπου περιστροφική γύρω από έναν άξονα που είναι παράλληλος προς την επιφάνεια του εδάφους και εγκάρσιος σε όλη την ολίσθηση.

Η ταχύτητα της συγκεκριμένης ολίσθησης χαρακτηρίζεται από εξαιρετικά αργή έως εξαιρετικά γρήγορη και η βασική αιτία εκδήλωσης της είναι η υπερνίκηση της διατμητικής αντοχής του υλικού, κατά μήκος της επιφάνειας θραύσης από την διατμητική τάση που ασκεί το βάρος της μάζας που θα κατολισθήσει (Varnes, 1978, USGS, 2004, Cruden and Varnes 1996). (Σχήμα 1.1.4 α).

ii. Μεταθετικές ολισθήσεις (Translational slides)

Στις μεταθετικές ολισθήσεις η μάζα προχωρεί προς τα έξω ή προς τα κάτω και έξω, κατά μήκος μιας κατά προσέγγιση επίπεδης ή ομαλά κυματοειδούς επιφάνειας, με πολύ μικρή ή καθόλου περιστροφική κάμψη (Σχήμα 1.1.4 β).

Τέλος, οι μεταθετικές βραχώδεις ολισθήσεις (translational rock slides), ανάλογα με την μορφή της αστοχίας που πραγματοποιείται σ' αυτές, χωρίζονται σε ολισθήσεις με αστοχία μορφής σφήνας και σε ολισθήσεις με αστοχία επίπεδης μορφής (Varnes, 1978, USGS, 2004, Cruden and Varnes 1996).

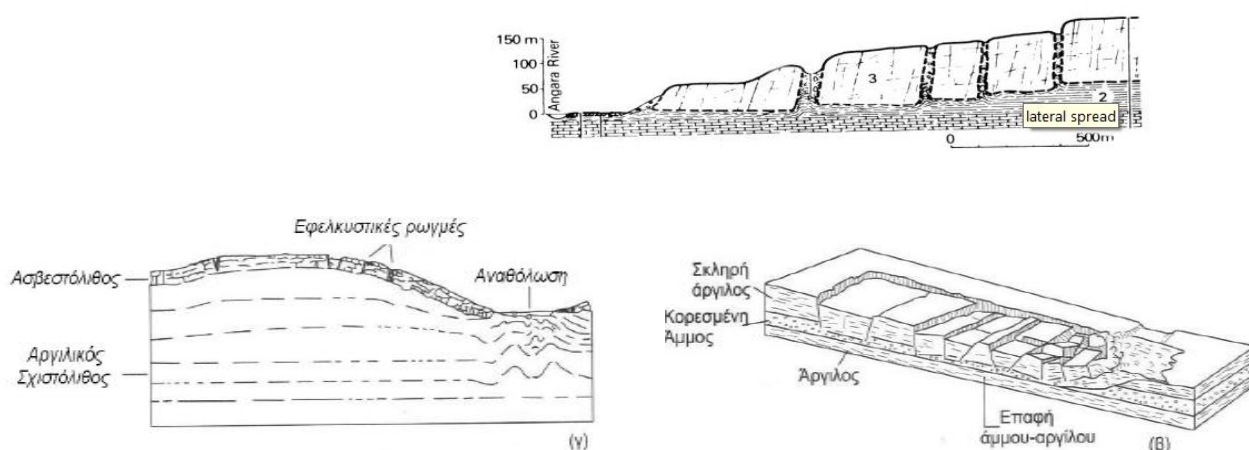


Σχήμα 1.1.4: (α) Περιτροφική ολίσθηση βράχου (β) Μεταθετική ολίσθηση γαιών (Varnes, 1978).

iii) Πλευρικές εξαπλώσεις (Lateral Spreads)

Στις πλευρικές εξαπλώσεις, η κίνηση που επικρατεί είναι η πλευρική διάταση που διευκολύνεται από διατμητικές ή εφελκυστικές ρωγμές. Διακρίνονται τρεις κύριοι τύποι τέτοιων πλευρικών επεκτάσεων:

- εξαπλώσεις μεγάλων τεμαχίων (block spreads), όπου ένα παχύ στρώμα βράχου βρίσκεται πάνω από μαλακότερα υλικά, και οι
- εξαπλώσεις λόγω ρευστοποίησης (liquefaction spreads), που σχηματίζονται σε αργίλους και ιλύες οι οποίες έχουν χάσει την αντοχή τους και έχει καταστραφεί η δομή τους.
- σύνθετες πλευρικές εξαπλώσεις (complex spreads): μετακινήσεις που εκδηλώνονται ως έντονες παραμορφώσεις οριζόντιων σκληρών και διερρηγμένων στρωμάτων, τα οποία υπέρκεινται ρωγματωμένων αργίλων ή μαλακών σχιστόλιθων



Σχήμα 1.1.5: α) Πλευρική εξάπλωση διερρηγμένων ασβεστόλιθων που υπέρκεινται μαλακότερων σχηματισμών (VARNES 1978). β) πολύ γρήγορη πλευρική εξάπλωση αργίλου που υπέρκειται ρευστοποιημένου στρώματος άμμου και ιλύος (VARNES 1978) γ) σύνθετη ολίσθηση (HORSMELL and HORTON 1976)

Ροές (flows)

Εκδηλώνονται κυρίως σε χαλαρά υλικά με την μετακινούμενη μάζα να υφίσταται έντονες παραμορφώσεις, ενώ όταν χαρακτηρίζονται από πολύ έως εξαιρετικά αργή ταχύτητα μετακίνησης, ταξινομούνται στον *ερπυσμό (creep)*.

α. Ροές βραχώδους υποβάθρου (rock flows)

Περιλαμβάνουν παραμορφώσεις που κατανέμονται ανάμεσα σε πολλές και μικρές ή μεγάλες ρωγμές ή ακόμα και μικρορωγμές, χωρίς εντοπισμό της μετατόπισης κατά μήκος μιας ρωγμής. Οι μετακινήσεις είναι γενικώς εξαιρετικά αργές, ενώ είναι περισσότερο ή λιγότερο σταθερές στο χρόνο. Τέτοιες μετακινήσεις προέρχονται από πτυχώσεις, κάμψεις (π.χ. κάμψεις κεφαλών στρωμάτων), διογκώσεις ή άλλες εκδηλώσεις πλαστικής συμπεριφοράς.

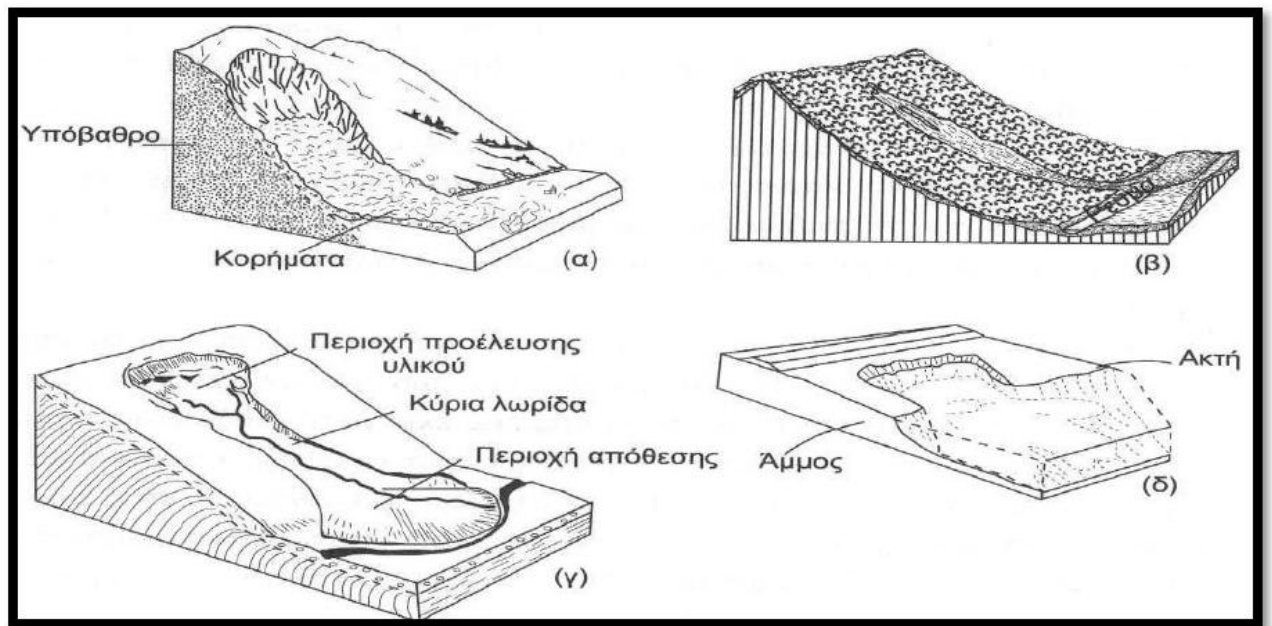
β. Ροές κορημάτων (debris flows)

Αφορούν ροή χονδρόκοκκου υλικού.

Στα υλικά αυτά οι ροές αναγνωρίζονται πιο εύκολα από εκείνες του υποβάθρου, γιατί οι μετατοπίσεις σε αυτά είναι συνήθως μεγαλύτερες και πιο ευδιάκριτες. Οι επιφάνειες ολίσθησης μέσα στη μετακινούμενη μάζα δεν είναι συνήθως ορατές, ή διαρκούν πολύ λίγο, και το όριο ανάμεσα στη μετακινούμενη μάζα και στο υλικό που δεν παίρνει μέρος στη μετακίνηση μπορεί να είναι μια επιφάνεια διαφορικής κίνησης ή μια ζώνη με κατανεμημένη διάτμηση.

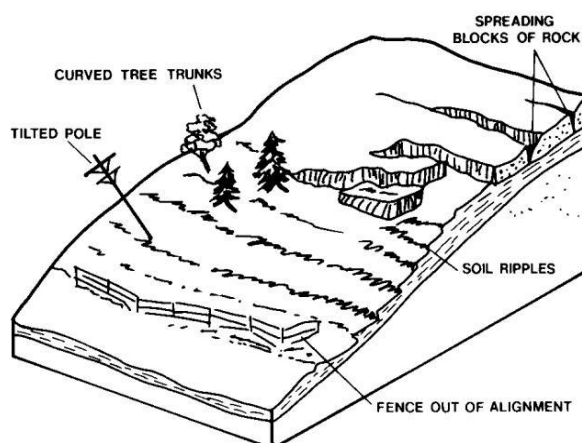
γ. Ροές γαιών (earth flows)

Αφορούν ροή λεπτόκοκκου υλικού. Αναφέρονται σε γαιώδη υλικά αρκετά διαβρεγμένα που ρέουν σχετικά γρήγορα με περιεκτικότητα τουλάχιστον 50% σε άμμο, ιλύ και άργιλο. Η μορφή αυτών των ροών ποικίλει και κυμαίνεται, από πλευράς περιεκτικότητας νερού, από υπερκορεσμένη μέχρι ξηρά κατάσταση και από πλευράς ταχύτητας μετακίνησης, από εξαιρετικά γρήγορη μέχρι εξαιρετικά αργή. Στη μια άκρη της κλίμακας βρίσκεται η *ροή λάσπης*, που είναι το υδαρό μέλος της οικογένειας των ροών λεπτόκοκκων γαιών, και στο άλλο άκρο οι ξερές άμμοι.



Σχήμα 1.1.6: Ροές : α) ροή κορημάτων β) χινοστιβάδα κορημάτων γ) ροή γαιών πολύ αργή ως πολύ γρήγορη (ZARUBA- MENCIA 1963) δ) ροή άμμου ή ιλύος γρήγορη.

Τέλος, όταν οι ροές χαρακτηρίζονται από πολύ έως εξαιρετικά αργή ταχύτητα μετακίνησης τότε ταξινομούνται στον ερπυσμό (creep). Σαν φαινόμενο ο ερπυσμός αναγνωρίζεται από την ύπαρξη κυρτών κορμών δέντρων, λυγισμένων περιφράξεων ή τοίχων αντιστήριξης και κορυφογραμμών (Varnes, 1978, USGS, 2004, Cruden and Varnes 1996).

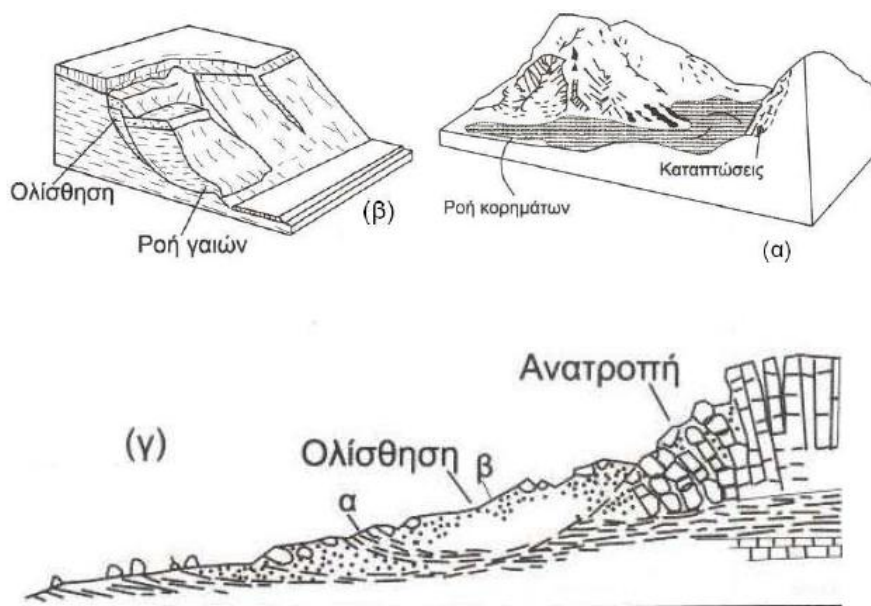


Σχήμα 1.1.7: Ερπυσμός (Πηγή: Geological Survey of Alabama)

Σύνθετες μετακινήσεις πρανών

Κατά κανόνα οι μετακινήσεις των πρανών είναι συνδυασμός περισσότερων κύριων τύπων μετακινήσεων από αυτούς που περιγράφηκαν πιο πάνω, είτε στα διάφορα

τμήματα της μετακινούμενης μάζας, είτε στα διάφορα στάδια της εξέλιξης της μετακίνησης. Μερικά παραδείγματα τέτοιων μετακινήσεων φαίνονται στο σχήμα



Σχήμα 1.1.8: Σύνθετες μετακινήσεις: (α) Καταπτώσεις – Ροή (β) Ολίσθηση – Ροή (γ) Ανατροπή – Ολίσθηση (από ΚΟΥΚΗΣ – ΣΑΜΠΑΤΑΚΑΚΗΣ 2007)

1.1.2. Ταξινόμηση με βάση την ταχύτητα της κατολίσθησης

Η ταχύτητα μιας κατολίσθησης αποτελεί παράμετρο που σχετίζεται άμεσα με τις συνέπειές της. Η πρώτη ταξινόμηση των κατολισθήσεων ανάλογα με την ταχύτητα τους προτάθηκε από τον Varnes (1978). Ο πίνακας που ακολουθεί, παρουσιάζει την τροποποιημένη ταξινόμηση των κατολισθήσεων με βάση την ταχύτητά τους από τους Varnes και Cruden (1996), καθώς και την πιθανή καταστροφική ένταση της κάθε κατηγορίας.

Πίνακας 1.1.2: Ταξινόμηση κατολισθήσεων με βάση την ταχύτητά τους και τις πιθανές βλάβες που προκαλούν (Πηγή: Cruden and Varnes, 1996)

Κατηγορία ταχύτητας μετακίνησης	Περιγραφή	Ταχύτητα (mm/sec)	Τυπική ταχύτητα	Πιθανές βλάβες
7	Εξαιρετικά γρήγορη	$>5 \times 10^3$	>5 m/sec	Καταστροφές κτιρίων λόγω πρόσκρουσης της μετακινούμενης μάζας, πολλοί θάνατοι, απίθανη η ύπαρξη επιζώντων.
6	Πολύ γρήγορη	5×10^1	3 m/min	Μερικοί θάνατοι, περιορισμένος χρόνος για ασφαλή φυγή όλων των κατοίκων.
5	Γρήγορη	5×10^{-1}	1.8 m/hr	Δυνατή η ασφαλής φυγή των κατοίκων. Σπίτια, εγκαταστάσεις και δίκτυα υποδομής με μεγάλες βλάβες ή κατεστραμμένα.
4	Μέτρια	5×10^{-3}	13 m/month	Μερικές προσωρινές και ανθεκτικές εγκαταστάσεις είναι δυνατό να διατηρηθούν.
3	Αργή	5×10^{-5}	1.6 m/year	Δυνατή η λήψη μέτρων προστασίας κατά την ενεργοποίηση. Μερικές φορές καλά σχεδιασμένες εγκαταστάσεις μπορεί να διατηρηθούν με κατάλληλη συντήρηση, αν δεν υπάρξει ξαφνική επιτάχυνση της μετακίνησης.
2	Πολύ αργή	5×10^{-7}	15 mm/year	Μερικές από τις μόνιμες κατασκευές παραμένουν ανέπαφες.
1	Εξαιρετικά αργή	$<5 \times 10^{-7}$	<15 mm/year	Η μετακίνηση προσδιορίζεται μόνο με μετρήσεις από ειδικά όργανα λόγω του μικρού μεγέθους της. Οι κατασκευές δεν υφίστανται βλάβες, όταν λαμβάνονται τα κατάλληλα μέτρα.

1.1.3. Κύριες αιτίες κατολισθήσεων

Ο μηχανισμός εκδήλωσης μιας κατολίσθησης περιλαμβάνει μια αλληλουχία γεγονότων τα οποία αρχίζουν με την επίδραση διαφόρων αιτιών, που επηρεάζουν τις συνθήκες ισορροπίας του πρανούς, και προκαλούν τη διατάραξή του, με τελικό αποτέλεσμα τη θραύση και τη μετακίνηση αυτού.

Ο VARNES (1987) ομαδοποίησε τους παράγοντες που συντελούν στην εκδήλωση των κατολισθήσεων σε τρεις επιμέρους κατηγορίες:

1) Παράγοντες που συμβάλλουν στην αύξηση διατμητικής τάσης

α) Αφαίρεση της πλευρικής υποστήριξης

Η αφαίρεση της πλευρικής υποστήριξης είναι ο πιο συνηθισμένος από όλους τους παράγοντες που οδηγούν σε αστάθεια. Η αφαίρεση της πλευρικής υποστήριξης μπορεί να προκληθεί από τις πιο κάτω δράσεις:

- i) επιφανειακή διάβρωση (ποτάμια, χείμαρροι, παγετώνες, κύματα, παλιρροϊκά ρεύματα, ατμοσφαιρική αποσάθρωση, διαβροχή και ξήρανση.)
- ii) υπόγεια διάβρωση και διάλυση
- iii) σύνθλιψη του υποκείμενου πλαστικού υλικού
- iv) ανθρωπογενείς δραστηριότητες
 - Υποσκαφή στο πόδι των πρανών, ανάπτυξη λατομείων, εκσκαφές ορυγμάτων, καναλιών, δρόμων κλπ.
 - Αφαίρεση ή καταστροφή τοίχων, πασσάλων και άλλων έργων αντιστήριξης,
 - Δημιουργία λιμνών και ταμιευτήρων και κατακόρυφες διακυμάνσεις της στάθμης τους.

β) Επιφόρτιση

Η επιφόρτιση είναι αποτέλεσμα τόσο από τη φυσική όσο και από την ανθρώπινη δράση. Όσο πιο γρήγορη είναι δε η επιφόρτιση, τόσο πιο επικίνδυνη γίνεται.

(i) Επιφόρτιση προκαλούμενη από φυσική δράση, όπως :

- Το βάρος που προσθέτει στα υλικά το νερό γενικά των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων και της απορροής.
- Η συγκέντρωση πλευρικών κορημάτων πάνω σε υλικά που ολισθαίνουν.
- Η κατάρρευση συγκεντρωμένων ηφαιστειακών υλικών που δημιουργούν “χιονοστιβάδες” και ροές αποσαθρωμάτων.
- Η βλάστηση, σε μερικές περιπτώσεις, όπως στα άκρα απότομων πρανών ημισυνεκτικών πετρωμάτων προκαλεί αύξηση του βάρους πέρα από την κρίσιμη φόρτιση, αυξάνοντας έτσι τη διατμητική τάση.
- Οι πιέσεις του διηθούμενου νερού.

(ii) Επιφόρτιση προκαλούμενη από ανθρώπινες δραστηριότητες, όπως:

- Κατασκευή επιχωματώσεων
- Χώρος συγκέντρωσης μεταλλευμάτων ή λατομικών προϊόντων
- Σκουπιδότοποι σε πρανή
- Το βάρος από οικοδομές ή κατασκευές, από τρένα κ.λπ.
- Το βάρος του νερού από απώλειες αγωγών, βόθρων, υπονόμων και δεξαμενών.

γ) Παροδικές γήινες τάσεις

Οι σεισμικές δονήσεις έχουν διεγείρει πολλές μετακινήσεις πρηνών, συχνά καταστροφικών. Η δράση τους είναι σύνθετη:

(i) Προκαλούν αύξηση της διατμητικής τάσης εν οι οριζόντιες επιταχύνσεις μπορεί να μεταβάλλουν σημαντικά το καθεστώς των τάσεων στα υλικά που αποτελούν το πρηνές.

(ii) Σε μερικές περιπτώσεις προκαλούν μείωση της διατμητικής αντοχής, λόγω μείωσης της συνοχής των υλικών.

Οι δονήσεις από εκρήξεις, η λειτουργία βιομηχανικών συγκροτημάτων, η κυκλοφορία βαριών οχημάτων και η θραύση γειτονικών πρηνών προκαλούν επίσης παροδικές γήινες τάσεις.

δ) Τοπική ανύψωση

Σε μερικές περιπτώσεις οι μετακινήσεις των πρηνών προκαλούνται από προοδευτική αύξηση της γωνίας του πρηνούς λόγω τοπικής ανύψωσης, όταν βέβαια η τελευταία βρίσκεται κοντά στο σημείο θραύσης, ώστε να είναι δυνατόν να παίζει ουσιαστικό ρόλο μια τόσο μικρή και αργή μεταβολή.

στ) Πλευρική πίεση

Η πλευρική πίεση μπορεί να προκληθεί από τις πιο κάτω δράσεις:

(i) Παρουσία νερού σε ρωγμές και κοιλότητες.

(ii) Πάγωμα νερού στις ρωγμές.

(iii) Διόγκωση των αργίλων ή του ανυδρίτη σαν συνέπεια της ενυδάτωσής τους.

(iv) Κινητοποίηση της παραμένουσας τάσης.

2) Παράγοντες που συμβάλουν στη χαμηλή διατμητική αντοχή
Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται οι ενδογενείς κυρίως παράγοντες οι οποίοι προέρχονται από την αρχική κατάσταση ή τα συγγενικά χαρακτηριστικά του γεωλογικού υλικού

i) Λιθολογική σύσταση και υφή: Τα υλικά είναι μικρής αντοχής είτε πρωτογενώς, δηλαδή από την κατασκευή τους, είτε δευτερογενώς, δηλαδή να γίνουν ασταθή λόγω μεταβολής της περιεκτικότητάς τους σε νερό ή άλλων μεταβολών. Στην κατηγορία αυτών των υλικών υπάγονται

- τα οργανικά υλικά, οι ιζηματογενείς σχιστόλιθοι, οι άργιλοι, τα αποσαθρωμένα πετρώματα, οι ηφαιστειακοί τόφοι που μπορεί να εξαλλοιωθούν σε αργιλούχα υλικά (μπετονιτοποίηση, καολινιτίωση) και

υλικά που αποτελούνται κατά κύριο λόγο από φυλλώδη ορυκτά (μαρμαρυγίας-τάλκης-σερπεντίνης κ.α.), ιδιαίτερα δε οι μεταμορφωμένοι σχιστόλιθοι, οι οφιόλιθοι και τα πρασινοπετρώματα.

- Η χαλαρή δόμηση και διάταξη μεμονωμένων σωματιδίων σε “ευαίσθητα” υλικά όπως οι άργιλοι και οι άμμοι μικρής πυκνότητας

iii) Δομή των υλικών και γεωμετρία του πρανούς:

Στην κατηγορία αυτή των παραγόντων περιλαμβάνονται :

- Ασυνέχειες, ρήγματα, επίπεδα στρώσης, η φυλλώδης διάταξη των ορυκτών στους σχιστόλιθους, η σχιστότητα, οι ρωγμές, οι κατοπτρικές επιφάνειες των ρηγμάτων και οι ζώνες κατακερματισμού.
- Η παρουσία συμπαγών στρωμάτων πάνω σε ασθενή πλαστικά υλικά.
- Κλίση των στρωμάτων ομόρροπη με το πρανές. Όταν η κλίση των στρωμάτων είναι μικρότερη από την κλίση του πρανούς τα στρώματα στερούνται υποστήριξης στο πόδι τους.
- Η εναλλαγή διαπερατών (π.χ. άμμου ή ψαμμίτη) και λιγότερο διαπερατών (π.χ. άργιλοι, σχιστόλιθοι).
- Ο προσανατολισμός του πρανούς και η κλίση του.

3) Παράγοντες που συμβάλουν στη μείωση της διατμητικής αντοχής. Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται κυρίως εξωγενείς παράγοντες που επιδρούν στα γεωλογικά υλικά και τείνουν να μειώσουν σημαντικά τη διατμητική αντοχή τους

α) Αποσάθρωση και άλλες φυσικοχημικές διαδικασίες

Η αποσάθρωση των υλικών καθώς και διάφορες φυσικοχημικές αντιδράσεις μπορεί να οδηγήσουν στις πιο κάτω μεταβολές:

- Αποσύνθεση αργίλων που έχουν κατακερματιστεί.
- Φυσική αποσύνθεση κοκκωδών πετρωμάτων, όπως οι γρανίτες, οι ψαμμίτες κ.α., κάτω από τη δράση του παγετού ή με θερμική διόγκωση.
- Ενυδάτωση των αργιλικών ορυκτών με τις πιο κάτω διαδικασίες και συνέπειες:

(i) Το νερό απορροφάται από αργιλικά ορυκτά, οπότε η υψηλή περιεκτικότητα του νερού ελαττώνει τη συνοχή του αργιλικού εδάφους.

(ii) Στις μοντμοριλλοντικές αργίλους προκαλείται διόγκωση και χαλάρωση της συνοχής τους.

(iii) Η αιολική γη (ασβεστιτικός πηλός) συμπαγοποιείται κατά τον κορεσμό της, λόγω καταστροφής των δεσμών των αργιλικών σωματιδίων.

- Ιοντοανταλλαγή στις αργίλους (π.χ. ανταλλαγή ιόντων Ca από ιόντα Na), με αποτέλεσμα την επίδραση των ιόντων της ανταλλαγής πάνω στις φυσικές ιδιότητες των αργίλων.
- Μετανάστευση του νερού προς το μέτωπο της αποσάθρωσης κάτω από την επίδραση ηλεκτρικού δυναμικού (ηλεκτρόσμωση).
- Ξήρανση των αργίλων που οδηγεί σε πρόκληση ρωγμών σε αυτές και απώλεια της συνοχής, επιτρέποντας έτσι στο νερό να διηθηθεί προς την κύρια μάζα τους.
- Ξήρανση των σχιστόλιθων που δημιουργούν ρωγμές στη στρώση καθώς και επίπεδα διάτμησης προκαλώντας έτσι την απολέπισή τους.
- Απομάκρυνση λόγω διάλυσης του συνδετικού υλικού.

β) Μεταβολές των ενεργών τάσεων λόγω της περιεκτικότητας νερού και της προκαλούμενης απ' αυτό πίεσης στους πόρους και τις ρωγμές.

Η άνωση στην κορεσμένη κατάσταση ελαττώνει την ενεργό τάση και την τριβή. Η ενεργή τάση ελαχιστοποιείται κατά τον κορεσμό, λόγω της τριχοειδούς τάσης στα υγρά εδάφη. Μεταβολές μπορεί να συμβούν λόγω φυσικής δράσης όπως η βροχόπτωση και το λιώσιμο του χιονιού και λόγω διαφόρων ανθρώπινων δραστηριοτήτων, όπως η εκτροπή υδρορευμάτων, η δημιουργία ταμιευτήρων, η άρδευση και η αποψίλωση.

γ) Μεταβολές της δομής των πετρωμάτων

Τέτοιες μεταβολές μπορεί να προκληθούν από ρωγμάτωση των σχιστόλιθων και προστεροποιημένων αργίλων, καθώς και από ρωγμάτωση και χαλάρωση των πετρωμάτων στα πρανή λόγω της απελευθέρωσής τους από κατακόρυφους ή πλευρικούς περιορισμούς στις πλευρές χαραδρών ή εκσκαφών. Η διαταραχή ή η επαναπόθεση μπορεί να επηρεάσουν τη διατμητική τάση των υλικών που αποτελούνται από σωματίδια μικρού μεγέθους, όπως ο

ασβεστιτικός πηλός, η στεγνή ή κορεσμένη χαλαρή άμμος και οι ευαίσθητες άργιλοι.

δ) Άλλοι παράγοντες

Άλλοι παράγοντες που συντελούν στη μείωση της διατμητικής αντοχής είναι:

- Η εξασθένηση των πετρωμάτων λόγω προοδευτικού ερπυσμού.
- Η δράση του ριζικού συστήματος των δέντρων που συχνά προκαλούν κατακερματισμό των πετρωμάτων.
- Η δράση των ζώων που σκάβουν στο υπέδαφος.

1.2. Προσδιορισμός φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών

Στη συνέχεια θα γίνει μια θεωρητική περιγραφή της διαδικασίας προσδιορισμού των φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών των εδαφών.

1.2.1. Προσδιορισμός φυσικών χαρακτηριστικών

Οι φυσικές ιδιότητες αντιπροσωπεύουν μεγέθη τα οποία είναι απαραίτητα για την αναγνώριση και ταξινόμηση των σχηματισμών, στους οποίους αναφέρονται. Συμπεραίνουμε πως, εκτός από τη βοήθεια ως προς την περιγραφή και ταξινόμηση των σχηματισμών, οι φυσικές ιδιότητες βοηθούν και στον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων τους.

Προσδιορισμός ειδικού βάρους

Ειδικό βάρος ενός πετρώματος ορίζεται ο λόγος του βάρους του σε ξηρή κατάσταση προς τον όγκο των στερεών συστατικών.

Στη συνέχεια θα γίνει περιγραφή της διαδικασίας προσδιορισμού του ειδικού βάρους για **λεπτόκοκκο υλικό** διερχόμενο από το κόσκινο Νο 10 (2mm).

Ο προσδιορισμός του ειδικού βάρους πραγματοποιείται σε λήκυθο όπου τοποθετούνται 25gr ξηρού δείγματος (ή τουλάχιστον 10gr) στη συνέχεια ζυγίζεται η λήκυθος μαζί με το έδαφος. Εφόσον βάλουμε το υλικό στη λήκυθο, με προσοχή χωρίς να έχουμε καμία απώλεια, συμπληρώνουμε με αποσταγμένο νερό έως ότου να καλύψουμε το δείγμα, έπειτα αφήνεται η λήκυθος μέχρι να γίνει πλήρης διαβροχή του υλικού και στη συνέχεια προστίθεται απεσταγμένο νερό μέχρι το μέσο περίπου της λήκυθου. Η λήκυθος με το δείγμα και το νερό τοποθετείται σε θάλαμο κενού για τουλάχιστον 10 λεπτά ούτως ώστε να αφαιρεθεί ο εγκλωβισμένος αέρας ενώ μετά εξάγεται και συμπληρώνεται με αποσταγμένο νερό μέχρι την γραμμή του στομίου, δηλαδή 100ml. Σε αυτό το σημείο μετράται η θερμοκρασία του νερού δοκιμής. Τέλος αδειάζουμε το δείγμα από τη λήκυθο την καθαρίζουμε, στεγνώνουμε και γεμίζουμε

μέχρι το στόμιο (100ml) με νερό ίδιας θερμοκρασίας με τη δοκιμή, την σκουπίζουμε εξωτερικά και την ζυγίζουμε.

Το μέγεθος του ειδικού βάρους προκύπτει από το λόγο του βάρους ορισμένου όγκου εδαφικών κόκκων (W_s) προς το βάρος (W_w) ίσου όγκου αποσταγμένου νερού θερμοκρασίας 4°C , σύμφωνα με την εξίσωση:

$$G_s = (W_s / V) / (W_w / V) = W_s / W_w$$

$$\text{Ειδικό βάρος (20}^{\circ}\text{C)} = w_0 / w_0 + (w_a - w_b)$$

Όπου

w_0 : βάρος ξηρού δείγματος εδάφους, σε gr,

w_a : βάρος πυκνόμετρου με νερό μέχρι τη χαραγή, θερμοκρασίας 20°C , σε gr,

w_b : βάρος πυκνόμετρου ξηρού δείγματος και νερού, μέχρι τη χαραγή, θερμοκρασίας 20°C , σε gr.

Αν οι τιμές w_a και w_b έχουν ληφθεί σε θερμοκρασία TX, διαφορετική από 20°C , τότε η τιμή του ειδικού βάρους στους 20°C , προκύπτει από τη σχέση:

$$\text{Ειδικό βάρος (σε } 20^{\circ}\text{C)} = K \times (\text{ειδικό βάρος σε } TX^{\circ}\text{C)}$$

Όπου

K: συντελεστής διόρθωσης που προκύπτει από τη διαίρεση της σχετικής πυκνότητας του νερού θερμοκρασίας TX με τη σχετική πυκνότητα του νερού στους 20°C .

Οι τιμές του K προκύπτουν από σχετικούς πίνακες.

Για την αναφορά της τιμής του ειδικού βάρους ως προς το νερό θερμοκρασίας 4°C πολλαπλασιάζεται η τιμή του ειδικού βάρους, σε θερμοκρασία 20°C , με τη σχετική πυκνότητα του νερού, σε θερμοκρασία 20°C , την οποία βρίσκουμε από σχετικούς πίνακες.

Η δοκιμή εκτελείται σε 2 δοκίμια από το ίδιο δείγμα ενώ τα αποτελέσματα εκφράζονται με ακρίβεια 0.01 και εάν διαφέρουν μεταξύ τους περισσότερο από 0.03 η δοκιμή επαναλαμβάνεται.

Ο προσδιορισμός του ειδικού βάρους των εδαφικών κόκκων πραγματοποιείται σε ογκομετρική φιάλη 500ml χρησιμοποιώντας ξηρό δείγμα 80g, στο οποίο επιτρέπεται η διαβροχή με κηροζίνη για 24h πριν τη δοκιμή. Το έδαφος που θα χρησιμοποιηθεί για τη δοκιμή του ειδικού βάρους μπορεί ή να περιέχει την φυσική του υγρασία ή να

έχει ξηρανθεί σε κλίβανο. Το δείγμα τοποθετείται μέσα σε πυκνόμετρο και προστίθεται αποσταγμένο νερό μέχρι που να γεμίσει η ογκομετρική φιάλη περίπου κατά τα $\frac{3}{4}$. Λαμβάνεται το βάρος του πυκνόμετρου με το περιεχόμενό του και η θερμοκρασία του περιεχομένου σε °C. Η δοκιμή επαναλαμβάνεται τουλάχιστον δύο φορές για κάθε δείγμα.

Προσδιορισμός φαινόμενου βάρους

Το δείγμα του οποίου θα προσδιοριστεί το φαινόμενο βάρος πρέπει να είναι συνεκτικό, αδιατάρακτο, σε μορφή κανονικού σχήματος ή ακανόνιστης μορφής και βάρους περίπου 100 gr. Στην περίπτωση που το σχήμα είναι κανονικό και καθορισμένο το δείγμα ζυγίζεται και υπολογίζεται ο όγκος του γεωμετρικά. Σε περίπτωση δείγματος ακανόνιστης μορφής το υλικό παραφινώνεται σε όλη την επιφάνεια του με λεπτό στρώμα λιωμένης παραφίνης, ούτως ώστε να μην υπάρχουν κενά. Εφόσον η παραφίνη στερεοποιηθεί το δείγμα ζυγίζεται, με ακρίβεια 0,01 gr, και στη συνέχεια ζυγίζεται και μέσα σε νερό. Γνωρίζοντας το ειδικό βάρος της παραφίνης (0,89 gr/cm³) και την πυκνότητα του νερού (1 gr/cm³) πραγματοποιούνται οι εξής υπολογισμοί:

$V_{\pi} = B_{\pi\delta} - B_{\delta} / G_{S\pi}$, (V_{π} = όγκος παραφίνης, $B_{\pi\delta}$ = βάρος παραφινωμένου δείγματος,

B_{δ} = βάρος δείγματος)

$V_{\delta\pi} = B_{\delta\pi} - B_{\delta\pi\nu}$, ($V_{\delta\pi}$ = όγκος δείγματος με παραφίνη, $B_{\pi\delta}$ = βάρος παραφινωμένου

Δείγματος, $B_{\delta\pi\nu}$ = βάρος δείγματος με παραφίνη στο νερό)

$V_{\delta} = V_{\delta\pi} - V_{\pi}$ (V_{δ} = όγκος δείγματος, $V_{\delta\pi}$ = όγκος δείγματος με παραφίνη,

V_{π} = όγκος παραφίνης)

Γνωρίζοντας το βάρος του δείγματος και υπολογίζοντας και τον όγκο του με την παραπάνω διαδικασία, το φαινόμενο βάρος υπολογίζεται από τον εξής τύπο:

$\Phi.B. = B_{\delta} / V_{\delta}$

Προσδιορισμός περιεχομένης υγρασίας

Η υγρασία μιας εδαφικής μάζας (W_c) καθορίζεται σαν ο λόγος (συνήθως εκφρασμένος επί τοις εκατό) του βάρους του νερού (W_w) προς το βάρος των ξηρών κόκκων του εδάφους (W_d) και εκφράζεται από την παρακάτω σχέση:

$$W_c = W_w / W_d \cdot 100\%$$

Για τον υπολογισμό της περιεχομένης υγρασίας ακολουθούμε την παρακάτω διαδικασία.

Λαμβάνουμε δείγμα εδάφους (25 έως 50 gr), αδιατάρακτο από άποψη περιεκτικότητας υγρασίας. Το δείγμα ζυγίζεται με μεγάλη ακρίβεια όσο το δυνατόν γρηγορότερα μετά την έναρξη της δοκιμής, ώστε να μειωθούν στο ελάχιστο οι επιδράσεις από την επιφανειακή ξήρανση. Στη συνέχεια το τοποθετούμε σε ξηραντήριο, για μερικές ώρες, στους 150°C . Μετά την ξήρανση το δείγμα ζυγίζεται ξανά επακριβώς και τέλος εφαρμόζουμε την παραπάνω σχέση.

Προσδιορισμός κοκκομετρίας

Το μέγεθος και η κατανομή των κόκκων ενός χαλαρού πετρώματος αποτελούν βασικά χαρακτηριστικά που χρησιμοποιούνται στη διάκρισή τους, που μαζί με το σχήμα τους παίζουν σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση της συμπεριφοράς τους.

Τα μεγέθη κατανέμονται σε ομάδες που διαχωρίζονται με την κοκκομετρική ανάλυση. Η κοκκομετρική ανάλυση χωρίζεται σε δύο επιμέρους αναλύσεις, σε αυτήν που χρησιμοποιεί κόσκινα για το διαχωρισμό των επιμέρους μεγεθών κόκκων του εδάφους, που συγκρατείται από το κόσκινο No 10, και σε αυτήν της ιλύος που διαχωρίζει τα λεπτόκοκκα μερίδια του εδάφους, με διάμετρο κάτω από τα 0,063 mm, που συγκρατείται από το κόσκινο No 200, σε αναλογία βάρους >30% του συνολικού δείγματος.

Επειδή τα δείγματα αποτελούνται από λεπτόκοκκα αλλά και αδρομερή πραγματοποιούνται κοκκομετρικές αναλύσεις με χρήση κοσκίων και υδρομέτρου.

Για να πραγματοποιηθεί η διάσπαση των λεπτόκοκκων από τα αδρομερή κλάσματα, τα δείγματα εμποτίζονται με απιονισμένο νερό. Στη συνέχεια το υγρό δείγμα πλένεται

στο κόσκινο No 10 (2 mm) για συγκράτηση των χονδρότερων κόκκων και στο No 16 (1,18mm) με No200 (0,075 μm) για την συγκράτηση των λεπτόκοκκων, όπου ξεπλένονται, μέχρι το διερχόμενο νερό να γίνει διαυγές. Το διερχόμενο υλικό του κοσκίνου No 10 προστίθεται στο λεπτόκοκκο κλάσμα και μετά γίνεται το πλύσιμο στα κόσκινα No 16 (1,18mm) με No200 (0,075 μm).

Η συγκρατούμενη στα προαναφερθέντα κόσκινα ποσότητα δείγματος (συγκρατούμενα στο No 10, 2mm) αναλύεται με τη μέθοδο των κοσκίνων, ενώ το διερχόμενο από το κόσκινο No200 δείγμα ξεραίνεται και μετά τη ζύγισή του, κλάσμα του χρησιμοποιείται για την κοκκομετρική ανάλυση με τη μέθοδο του υδρομέτρου.

Η μέθοδος του υδρομέτρου (stokes) εφαρμόζεται σε εδαφικά υλικά που έχουν ισοδύναμη διάμετρο μικρότερη από 0.2 mm και μεγαλύτερη από 0.0002 mm. Εδαφικοί κόκκοι μεγαλύτεροι από 0.2 mm καθιζάνουν με μεγάλη ταχύτητα και προκαλούν ανατάραξη του αιωρήματος.

Μετά το πλύσιμο τα δείγματα μενουν σε φούρνο στους 110⁰C για 24h.

Μέθοδος κοκκομετρικής ανάλυσης με κόσκινα.

Η μέθοδος κοκκομετρικής ανάλυσης με κόσκινα χρησιμοποιείται για την ταξινόμηση χονδρόκοκκων δειγμάτων εδαφών. Στην ανάλυση χρησιμοποιείται μια σειρά κοσκίνων 3'' (75,00 mm), 2'' (50,00 mm), 1^{1/2} (37,50 mm), 1^{1/4} (31,50mm), 1'' (25,40 mm), 3/4' (19,00 mm)', 1/2'' (12,50 mm), 3/8'' (9,50 mm), No 4 (4,750 mm), και για το λεπτόκοκκο No 10 (2mm), No 40 (0,425mm), No 200 (0,075 mm).

Έτσι για λεπτή έως μέση άμμο απαιτούνται 100 έως 200 gr, για χονδρή άμμο μέχρι λεπτά χαλίκια 500 gr και για χοντρά χαλίκια 5000 gr. Το δείγμα ξηραίνεται στους 105⁰ C και αφού ξηραθεί ζυγίζεται με ακρίβεια 0,5%. Τοποθετείται στο αρχικό άνω κόσκινο (3'', 75mm) και κοσκινίζεται με ηλεκτρικό δονητή. Το υλικό περνάει τα κατώτερα κόσκινα και συγκεντρώνεται σε κάθε ένα από αυτά ανάλογα με τη διάμετρο των κόκκων του. Το υλικό που έχει μείνει σε κάθε κόσκινο ζυγίζεται και μετατρέπεται σε % του συνολικού βάρους του δείγματος. Με τα αποτελέσματα κατασκευάζεται η αθροιστική κοκκομετρική καμπύλη μορφής:



Σχήμα 1.2.1: Αθροιστική κοκκομετρική καμπύλη εδαφικού σχηματισμού. (Κ. Βουδουρης θέματα υδρογεωλογίας και περιβάλλοντος).

Η καλή διαβάθμιση υποδηλώνει σχετική σταθερότητα, αντίσταση στη διάβρωση και μεγάλη αντοχή στη διάτμηση.

Μέθοδος Ιλύος (Μέθοδος Υδρομέτρου – Μέθοδος Stokes)

Η ανάλυση αυτή γίνεται σε υλικά με κόκκους που διέρχονται από το κόσκινο No 10 και συγκρατούνται στο κόσκινο No 200 (0,075 μm), ποσότητα δείγματος 50g τοποθετείται σε κυλινδρικό γυάλινο δοχείο 250ml και προστίθεται παράγοντας διασποράς 125ml (νατριούχο εξαμεταφωσφορικό διάλυμα 45.7 gr σε 1lt νερού, NaPO₃) ενώ ηρεμεί για 12h.

Μετά την ανάμειξη το δείγμα ανακατεύεται με αναδευτήρα και μεταφέρεται ξεπλένοντας το δοχείο στον ογκομετρικό σωλήνα, ενώ κατόπιν συμπληρώνεται με αποσταγμένο νερό μέχρι τη γραμμή των 1000 ml. Έπειτα το διάλυμα τοποθετείται σε υδατόλουτρο για να αποκτήσει ομοιόμορφη θερμοκρασία 20⁰C. Στη συνέχεια αναποδογυρίζουμε το σωλήνα πολλές φορές και αφού το υλικό ανακατευτεί τοποθετείται στο τραπέζι και το διάλυμα τοποθετείται ξανά σε υδατόλουτρο. Με την

έναρξη της καθίζησης καταγράφονται, ανά τακτά χρονικά διαστήματα, η πυκνότητα του με τη βοήθεια αραιομέτρου, βάση της οποίας υπολογίζεται το βάρος των εδαφικών κόκκων που βρίσκονται σε αιώρηση.

Οι ενδείξεις λαμβάνονται κατά χρονικά διαστήματα 5, 15, 30, 60, 250 και 1440min, από την έναρξη της κατακρήμνισης, παράλληλα με τις μετρήσεις του αερομέτρου καταγράφεται και η θερμοκρασία του εδαφικού αιωρήματος, με τη χρήση υδραργυρικού θερμομέτρου. Στην περίπτωση που η θερμοκρασία είναι διαφορετική από 20⁰C τότε η ανάγνωση R του αραιομέτρου διορθώνεται ανάλογα με τη θερμοκρασία, βάσει πινάκων. Όταν το αραιόμετρο τοποθετείται στον κύλινδρο με το εδαφικό αιώρημα, σε χρόνο t από την αρχή της κατακρήμνισης, μετρείται η ποσότητα σε gr του εδάφους που βρίσκεται ακόμα σε αιώρηση, δηλαδή το διερχόμενο σε gr.

Το ποσοστό του διερχόμενου (W %) στο δίνεται από τον τύπο:

$W(\%) = (aR' / W_s) \times 100$ για το αραιόμετρο 152 H, όπου

R' : διορθωμένη ένδειξη του αραιομέτρου,

W_s : βάρος σε gr του δείγματος που χρησιμοποιήθηκε, διορθωμένο ως προς την υγρασιακή του υγρασία

a : συντελεστής διόρθωσης που εξαρτάται από το ειδικό βάρος του δείγματος

$a = (2,65 - 1 G_s) / (2,65 G_s - 1)$

με

G_s : ειδικό βάρος κόκκων, λαμβάνοντας υπόψη ότι τα αραιόμετρα είναι βαθμονομημένα για G_s = 2,65

$a = (2,65 - 1 G_s) / (2,65 G_s - 1)$

Για τη μετατροπή των ποσοστών W (%) του εδάφους "εν αιωρήσει" σε ποσοστό (%) του ολικού προς εξέταση δείγματος, που περιλαμβάνει και το συγκρατούμενο κλάσμα στο κόσκινο No 10, το W % πολλαπλασιάζεται με το συντελεστή W₁₀/100, όπου W₁₀ είναι το ποσοστό % του ολικού δείγματος διερχόμενου από το No 10.

Έτσι έχουμε :

$W \% = W_{10} aR' / 100W_s \times 100 \Rightarrow W \% = W_{10} aR' / W_s$

Με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης με αραιόμετρο κατασκευάζεται η κοκκομετρική καμπύλη στο αντίστοιχο διάγραμμα και καλύπτει την περιοχή μέχρι τα 0,075mm (κόσκινο No 200), ενώ το υπόλοιπο συμπληρώνεται από την ανάλυση με τα κόσκινα.

Προσδιορισμός ορίων Atterberg

Οι φυσικές ιδιότητες και η συμπεριφορά των λεπτόκοκκων υλικών επηρεάζονται σημαντικά από την περιεκτικότητα υγρασίας σε αυτά και από τις χρονικές της μεταβολές. Ένα έδαφος χαρακτηρίζεται πλαστικό, όταν τα λεπτόκοκκά του συστατικά βρίσκονται στην περιοχή της αργίλου και αποτελούνται από πλαστικά ορυκτά της αργίλου. Η κατάσταση και η συμπεριφορά αυτών των εδαφών στις κατασκευές προκύπτει με προσδιορισμό των ορίων Atterberg: του ορίου υδαρότητας (LL) και του ορίου πλαστικότητας (PL).

Ο υπολογισμός του ορίου υδαρότητας γίνεται συσκευή Casagrande, η οποία είναι μηχανική συσκευή που συνίσταται από ένα ορειχάλκινο κύπελλο και μια βάση.



Σχήμα 1.2.2: Συσκευή Casagrande

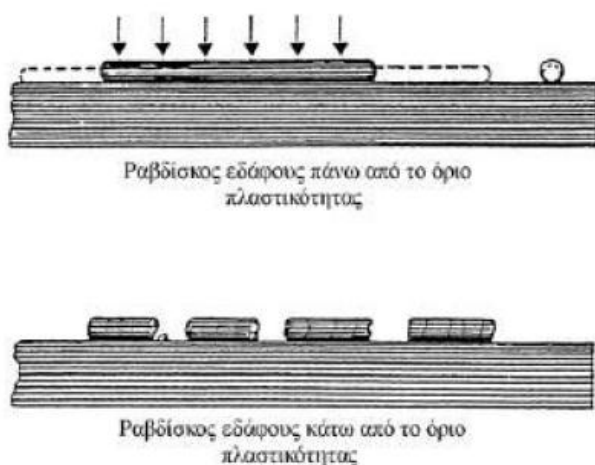
Αρχικά γίνεται λήψη δείγματος βάρους 150 gr περίπου από το οποίο έχουν αφαιρεθεί τα τεμάχια που διέρχονται από το κόσκινο Νο 40 (425μm) και έχει ξηραθεί στους 60° C, τοποθετείται σε κάψα πορσελάνης και προστίθεται απιονισμένο νερό περίπου 15ml. Το δείγμα αναμειγνύεται με σπάτουλα για περίπου δέκα λεπτά μέχρι τη διαμόρφωση ομογενούς μάζας, ζυμώνεται καλά και ωριμάζει σε υγραντήριο για τουλάχιστον 30 λεπτά. Στη συνέχεια λαμβάνεται μέρος της πάστας και τοποθετείται στην πιατέλα της συσκευής Casagrande, έτσι ώστε να έχει πάχος 1 cm. Με τη σπάτουλα χαράσσετε στη μέση μια αυλακιά με βάθος 1 cm και πλάτος χαραγής 2 mm, καθώς το στρόφαλο της συσκευής γυρίζει (δύο γύρους / sec = ένας κτύπος) η λεκάνη πέφτει ρυθμικά πάνω στο βάθρο του οργάνου και η διαδικασία συνεχίζεται μέχρις ότου η αυλακιά που έχει χαραχθεί να κλείσει σε μήκος 12,5 mm. Η διαδικασία αυτή πρέπει να ολοκληρωθεί σε χρόνο < 3 min. Σημειώνονται οι κτύποι της λεκάνης μέχρι τη συνένωση των δύο τμημάτων της χαραγής. Από τη δοκιμασθείσα πάστα γίνεται λήψη δείγματος, στο σημείο όπου ενώθηκαν οι δύο μεριές του δείγματος, και προσδιορίζεται η περιεκτικότητά της σε υγρασία %. Τα αποτελέσματα μεταφέρονται

σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα. Η καμπύλη που προκύπτει είναι λογαριθμική ευθεία. Σαν όριο υδαρότητας ορίζεται το ποσοστό της περιεχόμενης υγρασίας που απαιτείται για να κλείσει η χαραγή, στο μέσο του πυθμένα της, κατά 12,7mm και μετά από 25 χτύπους.

Ο υπολογισμός του ορίου πλαστικότητας γίνεται με την ακόλουθη διαδικασία:

Λαμβάνεται ποσότητα εδάφους περίπου 20 g διερχόμενη από το κόσκινο Νο 40 (0,425 mm). Τοποθετείται το έδαφος, που έχει ξηρανθεί στον αέρα, μέσα σε κάψα από πορσελάνη και αναμιγνύεται καλά με αποσταγμένο νερό, μέχρις ότου η μάζα καταστεί αρκετά πλαστική, ώστε να μορφώνεται εύκολα σε σφαιρική μορφή. Η μάζα αυτή κυλινδρώνεται μεταξύ των δακτύλων, έτσι ώστε ο κύλινδρος να είναι ομοιόμορφης διαμέτρου σε όλο το μήκος του. Όταν το δείγμα καθώς ζυμώνεται στο χέρι αρχίσει να αποκόπτεται σε μικρότερους κυλίνδρους διαμέτρου 3mm, προσδιορίζουμε το όριο πλαστικότητας. Κατά την παραπάνω διεργασία το δείγμα χάνει την υγρασία του και στου πόρους του εισέρχεται αέρας, επομένως η θραύση του σημαίνει ότι στο σημείο αυτό έχει χάσει τις πλαστικές του ιδιότητες. Στη συνέχεια συγκεντρώνονται μαζί τα μέρη του εδάφους και τοποθετούνται μέσα σε προζυγισμένη μεταλλική κάψα. Η κάψα με το έδαφος ζυγίζονται και καταγράφεται το βάρος. Το δείγμα, ξεραίνεται σε κλίβανο μέχρι να αποκτήσει σταθερό βάρος, σε θερμοκρασία 110°C, και ζυγίζεται. Το βάρος αυτό καταγράφεται. Η απώλεια βάρους αντιστοιχεί στο βάρος νερού (υγρασία). Το όριο πλαστικότητας υπολογίζεται σαν το ποσοστό επί της εκατό (%) του νερού κ.β. που περιέχεται στους κυλίνδρους των 3 mm που ξηράνθηκαν στον κλίβανο μέχρις του ξερού βάρους από τη σχέση

PL=(βάρους νερού/ βάρος εδάφους που ξηράνθηκε στον κλίβανο) x 100



Σχήμα 1.2.3: δοκιμή προσδιορισμού ορίου πλαστικότητας (Λαγγιώτης και Σπηλιωτόπουλος από Κούκης & Σαμπατάκης 2002)

Ο δείκτης πλαστικότητας του εδάφους (PI) υπολογίζεται ως η διαφορά μεταξύ του ορίου υδαρότητας (LL) και του ορίου πλαστικότητας (PL)

$$PI=LL-PL$$

Προσδιορισμός πορώδους

Μια από τις σημαντικότερες φυσικές ιδιότητες των πετρωμάτων είναι το πορώδες, δηλαδή ο λόγος του όγκου των κενών (πόρων, μικρορωγμώνκ.α.) προς τον συνολικό όγκο του πετρώματος.

Ολικό πορώδες, ονομάζουμε το πορώδες στο οποίο λαμβάνουμε υπόψη το σύνολο του όγκου των κενών, ανεξάρτητα αν αυτά θεωρούνται μικρά ή μεγάλα, αν επικοινωνούν μεταξύ τους ή είναι τυφλά.

Ενεργό ή ανοικτό πορώδες, ονομάζουμε το πορώδες που εκφράζει τον όγκο του συνόλου των κενών εκείνων που επιτρέπουν τη ροή του νερού υπό την επίδραση της βαρύτητας ή της υδροστατικής πίεσης.

Το πορώδες, όπως και η πυκνότητα, εξαρτώνται από τον τρόπο και τις συνθήκες σχηματισμού των πετρωμάτων, καθώς και από τις διεργασίες που επιτελούνται κατά την γένεσή τους (διαγένεση, αποσάθρωση - εξαλλοίωση).

Η γνώση του πορώδους έχει μεγάλη σημασία, δεδομένου ότι οι τιμές του επηρεάζουν πολλές φυσικές και μηχανικές ιδιότητες.

Η τιμή του πορώδους προσδιορίζεται είτε στην ύπαιθρο είτε στο εργαστήριο. Υπολογίζεται το ειδικό και φαινόμενο βάρος και γίνεται εφαρμογή των τιμών τους στον τύπο

$$n = (\gamma - \gamma_{\phi}) / \gamma \cdot 100\%, (\gamma = \text{είδικό βάρος}, \gamma_{\phi} = \text{φαινόμενο βάρος})$$

Στην ύπαιθρο ο υπολογισμός του επιτυγχάνεται με την βοήθεια υδροστεγανού δοχείου γνωστού όγκου, όπου γεμίζει έως ότου το δείγμα κορεστεί πλήρως, διαιρώντας τον όγκο του νερού που χρησιμοποιήθηκε για τον κορεσμό δια του όγκου του δείγματος λαμβάνουμε το πορώδες.

Προσδιορισμός λόγου κενών e

Ο λόγος κενών ενός πετρώματος ορίζεται ως ο λόγος του όγκου των κενών προς τον όγκο των στερεών συστατικών του :

$$E=V_K/(V- V_K)$$

Όπου V_K είναι ο όγκος των κενών και V είναι ο συνολικός όγκος του δείγματος.

Σχέση μεταξύ λόγου κενών και πορώδους:

$$e = n/(1-n) \quad \text{ή} \quad n = e/(1+e)$$

Προσδιορισμός βαθμού κορεσμού $s(\%)$

Είναι ο λόγος του όγκου του νερού των πόρων προς τον όγκο των κενών και εκφράζει το ποσοστό (συνήθως επί τοις εκατό) του όγκου των πόρων που πληρούται με νερό. Οι πιθανές τιμές του βαθμού κορεσμού ενός εδαφικού υλικού κυμαίνονται μεταξύ 0 και 100%. Ένα ξηρό εδαφικό υλικό έχει βαθμό κορεσμού μηδέν, ενώ ένα εδαφικό υλικό του οποίου το σύνολο των πόρων πληρούνται με νερό (κορεσμένο), έχει βαθμό κορεσμού 1 (100%).

Δίνεται από τον τύπο

$$S_w = n_w / n = V_w / V_v = \gamma_s m / \gamma_w e$$

όπου

S_w : S : βαθμός κορεσμού

n_w : πορώδες κορεσμένου εδάφους

V_w : όγκος νερού

V_v : όγκος κενών : $V_v = V - V_s$

γ_w : ειδικό βάρος νερού

m : φυσική υγρασία

γ_s : ειδικό βάρος στερεών συστατικών

e : δείκτης πόρων

n : πορώδες

Ταξινόμηση εδαφών

Σύμφωνα με τη κοκκομετρική ανάλυση, τα όρια Atterberg και το ποσοστό ανθρακικού ασβεστίου και ανόργανων υλικών, μπορεί να γίνει ταξινόμηση των δειγμάτων με βάση το σύστημα ενιαίας εδαφικής ταξινόμησης

Πίνακας 1.2.1: Ταξινόμηση εδαφών με βάση το σύστημα ενιαίας εδαφικής ταξινόμησης

Περιγραφή		Σύμβολο	Τυπική Ονομασία	
Χονδρόκοκκα Εδάφη	Χαλίκια Ανω του 50% του κλάσματος έχει μέγεθος >4,699 mm	Καθαρά χαλίκια	GW	Καλά διαβαθμισμένα χαλίκια
			GP	Χαλίκια χωρίς διαβάθμιση ή κακά διαβαθμισμένα
		Χαλίκια με λεπτόκοκκες προσμίξεις	GM	Πυομιγή χαλίκια
			GC	Αργιλομιγή χαλίκια
	Άμμοι Ανω του 50% του κλάσματος έχει μέγεθος <4,699 mm	Καθαρές άμμοι	SW	Καλά διαβαθμισμένες άμμοι
			SP	Κακά διαβαθμισμένες άμμοι
		Άμμοι με λεπτόκοκκες προσμίξεις	SM	Πυομιγείς άμμοι
			SC	Αργιούχες άμμοι
Λεπτόκοκκα Εδάφη	Πηλίτες (ΐλύες και Άργιλοι)	LL < 50	ML	Ανόργανες ιλύες και πολύ λεπτόκοκκες άμμοι, ελαφρά πλαστικότητα
			CL	Ανόργανες άργιλοι χαμηλής ως μέτριας πλαστικότητας
			OL	Οργανικές ιλύες και ιλυούχες άργιλοι χαμηλής πλαστικότητας
		LL > 50	MH	Ανόργανες ιλύες, ελαστικές ιλύες
			CH	Ανόργανες ιλύες υψηλής πλαστικότητας
			OH	Οργανικές άργιλοι μέτριας ως υψηλής πλαστικότητας
			PT	Τύρφη και άλλα οργανικά εδάφη

1.2.2 Προσδιορισμός μηχανικών χαρακτηριστικών

Δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης

Με τον όρο αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη εννοούμε τη θραύση μετά από πίεση ενός δείγματος κατά μία μόνο κατεύθυνση (κατακόρυφη), ενώ πλευρικά μπορεί να επεκτείνεται χωρίς κανένα εξωγενή προσδιορισμό.

Η μέθοδος αφορά τον ταχύ προσδιορισμό της ανεμπόδιστης αντοχής αδιατάρακτου δείγματος συνεκτικού εδάφους κατά την εφαρμογή ενός αξονικού φορτίου και αναφέρεται στην αντοχή του πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη.

Η δοκιμή προσδιορισμού αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη πραγματοποιείται με επιβολή θλιπτικού αξονικού φορτίου σε μορφωμένο κυλινδρικό δοκίμιο, χωρίς πλευρική παρεμπόδιση, και συνεχή καταγραφή των παραμορφώσεων του, μέχρι το σημείο αστοχίας ή ώσπου να φτάσει η παραμόρφωση στη τιμή 20%

Για τη δοκιμή χρησιμοποιούνται δοκίμια κυλινδρικού σχήματος με διάμετρο, όχι μικρότερη των 33mm και λόγο ύψος προς διάμετρο μεταξύ 2 και 3, τα δοκίμια σχηματοποιούνται με την βοήθεια μεταλλικής μήτρας με κοφτερές ακμές. Το δείγμα εξάγεται από την μήτρα και ζυγίζεται, ενώ από το υλικό που έμεινε κατά τη διαδικασία σχηματοποίησης του δείγματος λαμβάνεται ποσότητα για προσδιορισμό της υγρασίας του εδάφους. Τα δοκίμια έχουν εγκάρσιο προσανατολισμό μεταξύ τους, το ένα δοκίμιο προσανατολισμένο κάθετα και το άλλο παράλληλα στη στρώση. Σε περίπτωση που το δοκίμιο κατά τη διαμόρφωση του παρουσιάζει επιφάνειες αδυναμίας, λόγω των διαστάσεών του, διαμορφώνεται δοκίμιο μικρότερων διαστάσεων για εξοικονόμηση χρόνου και δείγματος. Το κάθε δοκίμιο είχε καλά μορφοποιημένες παράλληλες, επίπεδες και κάθετες στον άξονα του δοκιμίου έδρες.

Η φυσική υγρασία του δοκιμίου προσδιοριζόταν πριν και μετά τη δοκιμή, με ξήρανση δείγματος μέχρι σταθερής μάζας σε θερμοκρασία όχι μεγαλύτερη από 60⁰C, ώστε να μην συμβεί καύση του οργανικού υλικού.

Για να γίνει η δοκιμή αντοχής ενός δείγματος σε μονοαξονική θλίψη το δοκίμιο τοποθετήθηκε στη βάση της συσκευής μονοαξονικής θλίψης. Στην άνω επιφάνεια εφαρμόζεται πλαστικό κάλυμμα για την εφαρμογή του αξονικού φορτίου και στη συνέχεια ανυψώνεται η βάση της συσκευής μέχρι το κάλυμμα να έρθει σε επαφή με τον κατακόρυφο άξονα και αυτός με το δυναμομετρικό δακτύλιο. Πριν την έναρξη

της δόκιμης και της καταγραφής τιμών μηδενίζονται το μηκυνσιόμετρο που μετρά το φορτίο και το μηκυνσιόμετρο μέτρησης της παραμόρφωσης. Το θλιπτικό αξονικό φορτίο που εφαρμόζεται έχει σταθερό ρυθμό παραμόρφωσης 0.5-2,0% ανά min και ταχύτητα τέτοια, ώστε η συνολική παραμόρφωση του δοκιμίου να φτάσει το 20% του αρχικού ύψους χωρίς η δοκιμή να ξεπερνάει τα 10 min.

Κατά τη διάρκεια της δοκιμής καταγράφονται ζεύγη τιμών φορτίου παραμόρφωσης μέχρι να σημειωθεί μείωση του φορτίου με αυξανόμενη παραμόρφωση ή μέχρι αυτή να φτάσει στο φτάσει το 20% του αρχικού ύψους του δοκιμίου. Η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη είναι η μέγιστη τιμή της τάσης που καταγράφεται ή τάση που αντιστοιχεί σε παραμόρφωση 20%.

Στη συνέχεια υπολογίζεται η ανηγμένη παραμόρφωση που παρουσίαζε το δοκίμιο με τη φόρτιση και η αντίστοιχη διορθωμένη επιφάνεια του δοκιμίου λόγω της μεταβολής του σχήματος του.

Το διορθωμένο εμβαδόν (A) υπολογιζόταν σε συνάρτηση με τη μεταβολή του ύψους του δοκιμίου, με σταθερό όγκο με βάση τη σχέση:

$$A = A_0 / (1 - \Delta L / L_0) = A_0 / (1 - \epsilon)$$

A_0 το αρχικό εμβαδόν της βάσης του δοκιμίου

L_0 το αρχικό ύψος του

ΔL η μεταβολή του ύψους του στο αναφερόμενο στάδιο φόρτισης

Με βάση το διορθωμένο εμβαδόν (A), υπολογιζόταν η αξονική τάση (q) που επιβαλλόταν στο δοκίμιο λόγω της φόρτισης του με φορτίο (P), με βάση τη σχέση

$$q = P/A = P(1 - \epsilon) / A_0$$

Έτσι παίρνουμε μια καμπύλη που μας δίνει την παραμόρφωση του δείγματος σε συνάρτηση με την τάση φόρτισης (την μονοαξονική πίεση). Από το διάγραμμα τάσης παραμόρφωση (καθίζησης) προκύπτει η q_u , δηλαδή η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη, η οποία αντιστοιχεί στο μέγιστο του διαγράμματος ($q_u = (P/F)_{max}$, δηλαδή μέγιστη τιμή πίεσης ανά επιφάνεια), και η αντίστοιχη καθίζηση είναι η καθίζηση θραυσμού.

Με τα αποτελέσματα της δοκιμής κατασκευάζεται κύκλος Mohr με μηδενική πλευρική τάση ($\sigma_3 = 0$).

Δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης (συμπιεστότητας)

Για τη διερεύνηση της συμπιεστότητας των μαργαϊκών οριζόντων πραγματοποιήθηκαν δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης (οιδιμέτρου).

Μονοδιάστατη συμπίεση είναι η φόρτιση ενός εδαφικού στοιχείου κατά την οποία του επιβάλλεται ορθή παραμόρφωση στον κατακόρυφο άξονα (z) με ταυτόχρονη παρεμπόδιση των ορθών παραμορφώσεων στους άξονες (x, y) καθώς και όλων των διατμητικών παραμορφώσεων.

Για την πραγματοποίηση της δοκιμής παρασκευάζεται κυλινδρικό δοκίμιο με οδηγό δακτύλιο στις διαστάσεις της μήτρας της συσκευής και διαμορφώνονται οι δύο επιφάνειες έδρασης ώστε να είναι επίπεδες και παράλληλες. Το δείγμα, μαζί με τη μήτρα, ζυγίζεται και μετράται η υγρασία του υλικού από τα απομείναντα κομμάτια. Κάθε δοκιμή περιλαμβάνει πέντε ως έντεκα στάδια φόρτισης και τρία έως έξη βήματα αποφόρτισης, ενώ κάθε στάδιο φόρτισης θα είναι διπλάσιο του προηγούμενου. Κάθε στάδιο φόρτισης διαρκεί 24h και κατά τη διάρκεια καθενός εξ αυτών θεωρείται ότι ολοκληρωνόταν η πρωτεύουσα στερεοποίηση του δοκιμίου. Η μέγιστη φόρτιση που θα επιβληθεί στο φορτίο θα πρέπει να είναι διπλάσια της προβλεπόμενης πίεσης που θα επιβληθεί επί τόπου στο έδαφος λόγω της κατασκευής του έργου.

Οι δοκιμές πραγματοποιούνται σε επτά ζεύγη δοκιμίων από τα ληφθέντα δείγματα, σε κάθε ζεύγος το ένα δοκίμιο είναι προσανατολισμένο παράλληλα και το άλλο εγκάρσια στη στρώση.

Οι μετρήσεις της αξονικής παραμόρφωσης σε κάθε στάδιο καταγράφονται σε επιλεγμένα χρονικά διαστήματα λογαριθμικής κλίμακας, σε διάγραμμα αθροιστικής παραμόρφωσης σε συνάρτηση με τη τετραγωνική ρίζα του χρόνου, του λόγου κενών συναρτήσεως της εφαρμοζόμενης τάσης, όπως επίσης και την εκτίμηση των παραμέτρων στερεοποίησης.

Μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής το δείγμα ζυγίζεται, ξηραίνεται, ψύχεται και ξαναζυγίζεται.

Αποτέλεσμα της δοκιμής είναι η δημιουργία διαγράμματος πίεσης – καθίζησης.

Παραμένουσα διατμητική αντοχή

Η παραμένουσα διατμητική αντοχή αντιστοιχεί στη διατμητική αντοχή που έχει το έδαφος, το οποίο έχει ολισθήσει και μετακινηθεί (π.χ. υλικά κατολισθαίνουσας μάζας).

Η παραμένουσα διατμητική αντοχή τ_r εξαρτάται από την ορθή στην επιφάνεια διάτμησης τάση σ_n , την συνοχή c_r (η οποία έχει πολύ χαμηλές τιμές ή είναι μηδενική) και από τη παραμένουσα γωνία τριβής ϕ_r σύμφωνα με το νόμο Mohr-Coulomb από τη σχέση

$$\tau_r = c_r + \sigma_n \epsilon\phi \phi_r ,$$

δεδομένου ότι η συνοχή c_r έχει πολύ μικρή ή και μηδενική τιμή, η σχέση μπορεί να πάρει τη μορφή

$$\tau_r = \sigma_n \epsilon\phi \phi_r$$

ο προσδιορισμός της παραμένουσας διατμητικής αντοχής των εδαφών γίνεται με τη δοκιμή περιστροφικής διάτμησης και χρησιμοποιείται η συσκευή που σχεδιάστηκε από τον Bromhead.

Για την πραγματοποίηση της δοκιμής γίνεται λήψη ποσότητα εδάφους περίπου 500 gr, το οποίο θερμαίνεται σε κλίβανο έως ότου ξηρανθεί καλά. Εν συνεχεία, κοσκινίζεται από το κόσκινο Νο 200 και από το διερχόμενο υλικό λαμβάνεται ως δείγμα δοκιμής περίπου 100 gr. Κατόπιν τοποθετείται σε κάψα πορσελάνης και αναμειγνύεται καλά με αποσταγμένο νερό μέχρις ότου η μάζα καταστεί αρκετά πλαστική ώστε να σχηματοποιείται εύκολα. Το δείγμα συμπιέζεται και διαμορφώνεται μέσα στη δακτυλοειδή μήτρα της συσκευής Bromhead όπου ακλουθεί επιπέδωση της εξωτερικής επιφάνειάς του, ώστε να γίνει όσο το δυνατό πιο λεία.



Σχήμα 1.2.4: Τοποθέτηση αναζυμωμένου δείγματος μάργας στη δακτυλοειδή μήτρα. (Ε.Κ. ΣΤΕΙΑΚΑΚΗΣ 2003).

Το δακτυλοειδές δείγμα εδάφους 5 mm, με εσωτερική και εξωτερική διάμετρο 70 mm και 100 mm αντίστοιχα, τοποθετείται μεταξύ δύο πορώδων μεταλλικών πλακών. Στην πάνω πλάκα εφαρμόζεται ορθό φορτίο μέσω συστήματος μοχλών φόρτισης, ενώ η κάτω πλάκα περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα μέσω ηλεκτρικού κινητήρα

Η περιστροφή του κελιού με τη δακτυλοειδή μήτρα προκαλεί διάτμηση στο δοκίμιο κοντά στην επιφάνεια τριβής με την πάνω πλάκα, η οποία είναι αρκετά τραχεία ώστε να αποτρέπει ολίσθηση του εδάφους ως προς την επιφάνεια της, σχηματίζοντας μια επιφάνεια διάτμησης στην πάνω πλάκα του δοκιμίου..

Κατόπιν ο υποδοχέας του δείγματος γεμίζεται με αποσταγμένο νερό και αρχίζει η στερεοποίηση του δοκιμίου κάτω από το πρώτο επιθυμητό φορτίο, το οποίο επιλέγεται σύμφωνα με την επικρατούσα στη πραγματικότητα τάση, λόγω υπερκειμένων.

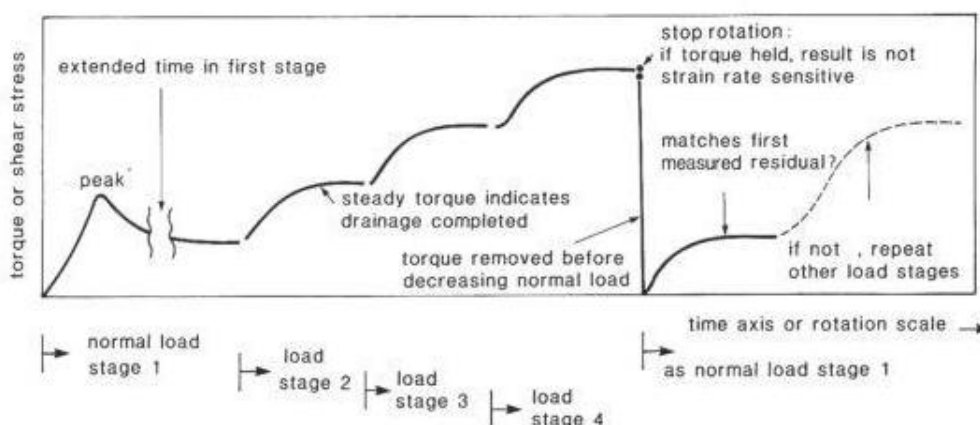
Κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης, μετρήσεις της κατακόρυφης υποχώρησης μπορούν να λαμβάνονται σε κατάλληλα διαστήματα της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου, ώστε να κατασκευαστεί το διάγραμμα υποχώρησης – t .

Εφ' όσον έχει ολοκληρωθεί η στερεοποίηση αρχίζει το στάδιο της διάτμησης κάτω από το ίδιο ορθό φορτίο. Μηδενίζονται τα μηκυνσιόμετρα των δάκτυλων και περιστρέφεται η κάτω πλάκα 1-2 στροφές για την καλύτερη εφαρμογή της επιφάνειας του δείγματος με την πάνω πλάκα. Κατόπιν προσαρμόζεται στο μηδέν και η πλάκα

που μετρά σε μοίρες τη γωνία στρέψης και τίθεται σε κίνηση ο ηλεκτροκινητήρας. Η ταχύτητα περιστροφής επιλέγεται σύμφωνα με βιβλιογραφικές αναφορές και με στόχο να είναι αρκετά μικρή, ώστε να αποφεύγεται η ανάπτυξη πίεσης του νερού των πόρων και να εξασφαλίζεται η στράγγιση του δοκιμίου. Επιλέχθηκε η ταχύτητα 0,048 deg/min (ή 0.036 mm/min). Η διάτμηση του δοκιμίου με το πρώτο ορθό φορτίο διαρκεί 24h, , μετά το τέλος της πρώτης φάσης η τάση αυξάνεται και το δείγμα στερεοποιείται κάτω από νέο φορτίο για άλλες 24h, ενώ μετά την παρέλευση του χρόνου στερεοποίησης συνεχίζεται η διάτμηση για το ίδιο δοκίμιο, προς την ίδια διεύθυνση μετακίνησης, κάτω από αυτό το ορθό φορτίο. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλα τα επόμενα φορτία στο ίδιο δοκίμιο.

Η διαδικασία στερεοποίησης και διάτμησης επαναλαμβάνεται συνήθως για τρία διαφορετικά ορθά φορτία για το ίδιο δοκίμιο. Μία ακολουθία τριών διαφορετικών ορθών φορτίων είναι αρκετή για τον προσδιορισμό της παραμένουσας διατμητικής αντοχής του δοκιμίου.

Μετά το τελευταίο μέγιστο ορθό φορτίο ακολουθεί σειρά διατμήσεων με σταδιακή μείωση του ορθού φορτίου, για την πραγματοποίηση έτσι του σταδίου της επαλήθευσης. Αν οι μετρήσεις είναι περίπου ίδιες με τις αρχικές, τότε η διάτμηση θεωρείται επιτυχής και πλήρης. Μετά το τέλος της δοκιμής εξετάζεται και περιγράφεται η επιφάνεια ολίσθησης, ενώ προσδιορίζεται και η τελική περιεχομένη υγρασία του δείγματος.



Σχήμα 1.2.5: Πρόγραμμα μιας πλήρους δοκιμής στη συσκευή δακτυλόειδους διάτμησης (Bromhead, 1986)

Τριαξονική δοκιμή

Η δοκιμή αυτή καλύπτει τον προσδιορισμό της διατμητικής αντοχής κυλινδρικών δοκιμίων συνεκτικών εδαφών, σε αδιατάρακτη κατάσταση, ή ύστερα από αναζύμωση. Η εφαρμογή του κατακόρυφου φορτίου, που εξασκείται κατά τον άξονα του δοκιμίου, που υπόκειται ταυτόχρονα σε μια πλευρική πίεση, ελέγχεται με τη μέτρηση των παραμορφώσεων του δοκιμίου και των τάσεων που εξασκούνται σ' αυτό.

Η δοκιμή αυτή παρέχει τα δεδομένα για τον προσδιορισμό των διατμητικών ιδιοτήτων και της σχέσεως τάσης - παραμόρφωσης των εδαφών.

Κατά τη δοκιμή αυτή εκφράζεται η κατάσταση των τάσεων σ' ένα κυλινδρικό δοκίμιο εδάφους, όπου κατά την τριαξονική φόρτιση μετά από την στερεοποίηση λαμβάνει χώρα αποστράγγιση του νερού των πόρων του δοκιμίου. Κατά το στάδιο της διάτμησης, η ταχύτητα φόρτισης του δοκιμίου θα πρέπει να είναι τόσο βραδεία, ώστε πρακτικά να μην αναπτύσσεται καμία πίεση του νερού των πόρων στο δοκίμιο ($u=0$).

Για τη πραγματοποίηση της δοκιμής πρέπει να προετοιμαστούν τρία δοκίμια, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για την δοκιμή, έτσι ώστε η διατάραξή τους να μειώνεται στο ελάχιστο. Από τα αρχικά δείγματα του υλικού αποκόπτεται τμήμα σε κατάλληλο μέγεθος για τη συσκευή τριαξονικής θραύσης, με τη βοήθεια μεταλλικής μήτρας, με προσανατολισμό εγκάρσια στη στρώση, ενώ οι επιφάνειες των άκρων διαμορφώνονται ώστε να είναι επίπεδες παράλληλες και κάθετες στον άξονα του δοκιμίου. Το δοκίμιο καλύπτεται με μεμβράνη για τη διατήρηση της υγρασίας του μέχρι την πραγματοποίηση της δοκιμής.

Στην έδρα της βάση τοποθετείται πορώδης δίσκος (πωρόλιθος) και το δοκίμιο τοποθετείται επάνω στον πωρόλιθο στη βάση έδρασης. Στη συνέχεια προσαρμόζεται ελαστική μεμβράνη κάλυψης του δοκιμίου προσεκτικά χωρίς να διαταραχτεί το δείγμα και σφραγίζεται στο βάθρο έδρασης με λαστιχένια δακτυλίδια τα οποία περιβάλλουν την μεμβράνη κάλυψης και δύο πλαστικά δισκάκια, τα οποία βρίσκονται στη βάση και στην κορυφή του δείγματος. Τοποθετείται, έπειτα, ο θάλαμος θραύσης πάνω στη βάση της και βιδώνονται οι κοχλίες, ενώ η βάση ανυψώνεται ώστε η κορυφή του εμβόλου φόρτισης να έρθει σε επαφή με το δυναμομετρικό δακτύλιο και η άκρη του να είναι ελαφρός ψηλότερα από το πάνω δισκάκι. Η κυψέλη γεμίζει με απιονισμένο νερό και στη συνέχεια ρυθμίζεται η θέση του καταδόμενου κελιού φόρτισης ώστε να έρθει σε επαφή με το πλαστικό δισκάκι

του δοκιμίου. Ακολούθως εφαρμόζεται πλευρική πίεση ώστε να προσδιοριστεί ο βαθμός κορεσμού.

Η στερεοποίηση πραγματοποιείται σε ισότροπες συνθήκες και σταθερή πίεση της κυψέλης. Ο χρόνος στερεοποίησης για τη δοκιμή CD διαρκεί είτε μέχρι πλήρους αποστράγγισης του δοκιμίου, για το δεδομένο φορτίο προστερεοποίησης, που ελέγχεται με τη συλλογή του νερού αποστράγγισης, είτε μέχρι μηδενισμού της πίεσης του νερού των πόρων του δοκιμίου.

Μετά το στάδιο στερεοποίησης ακολουθεί προγραμματισμένος κύκλος φόρτισης – αποφόρτισης. Εφ' όσον πρέπει να διερευνηθεί η σχέση τάσης παραμόρφωσης οι δοκιμές πραγματοποιούνται με σταθερό ρυθμό μεταβολής του φορτίου.

Ο προγραμματισμός των δοκιμών περιλαμβάνει αύξηση της αποκλίνουσας τάσης (q) από 0 έως 600 kPa, αποφόρτιση κατά 160 kPa και στη συνέχεια φόρτιση μέχρι θραύσης του δοκιμίου. Η αποκλίνουσα τάση εφαρμόζεται με ρυθμό ενώ η πλευρική τάση παραμένει σταθερή.

Η ταχύτητα διάτμησης του δοκιμίου για τις δοκιμές με αποστράγγιση, όπου ο ρυθμός φόρτισης πρέπει να είναι αρκετά χαμηλός προς αποφυγήν οποιασδήποτε ανάπτυξης πιέσεων του νερού των πόρων, είναι κατάλληλη μία αξονική φόρτιση με ρυθμό παραμόρφωσης μικρότερο των 0.2% .

Επειδή ο συντελεστής στερεοποίησης του υλικού μετράται κατά τη διάρκεια της στερεοποίησεως, μπορούμε να υπολογίσουμε τον χρόνο (t_f) που απαιτείται μέχρι τη θραύση από τη σχέση

$$T_f = 20 h^2 / m C_v$$

Όπου

2h: το ύψος του δοκιμίου

C_v : συντελεστής στερεοποίησης του υλικού

M : συντελεστής που εξαρτάται από τις συνθήκες αποστράγγισης (λαμβάνεται συνήθως $m=0.75$ όταν η αποστράγγιση γίνεται μόνο από τη βάση του δοκιμίου και $m=3$ όταν η αποστράγγιση γίνεται από τη βάση και την κεφαλή).

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ:

Η αξονική παραμόρφωση ϵ , σε οποιονδήποτε χρόνο, βρίσκεται από τη σχέση

$$\epsilon = \Delta L / L_0$$

Όπου

L_0 : αρχικό ύψος του δοκιμίου

ΔL : μεταβολή ύψους του δοκιμίου (ανάγνωση μηκυνσιόμετρου).

Η κύρια διαφορική τάση $\sigma_1 - \sigma_3$ ισούται με τη διαφορά της μέγιστης και ελάχιστης κύριας τάσης, όπου οι κύριες τάσεις μπορεί να είναι είτε οι ολικές σ_1, σ_3 , είτε οι ενεργές σ_1', σ_3' : $\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_1' - \sigma_3' = P/A$

Όπου

P: το φορτίο που εξασκείται αξονικά

A: η ανηγμένη διατομή του δοκιμίου για το αντίστοιχο αξονικό φορτίο

Η διατομή του δοκιμίου για ένα δεδομένο φορτίο δίνεται από τη σχέση

$$A = A_0 / (1 - \varepsilon)$$

όπου:

A_0 = αρχική διατομή του δοκιμίου,

ε = αξονική παραμόρφωση για το δεδομένο αξονικό φορτίο.

Τα αποτελέσματα της τριαξονικής δοκιμής θλίψης παρουσιάζονται σε μία καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων. Τα στοιχεία των δοκιμών συνήθως παριστάνονται σε διάγραμμα $\sigma_2 - \sigma_3$ σε συνάρτηση της αξονικής παραμόρφωσης.

Επίσης η $(\sigma_1 - \sigma_3)$, ή (σ_1) ή ο λόγος (σ_1 / σ_3) μαζί με τη μεταβολή του όγκου, μπορεί να παρουσιαστούν γραφικά σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση.

1.3 Μέθοδοι ανάλυση ευστάθειας πρανών

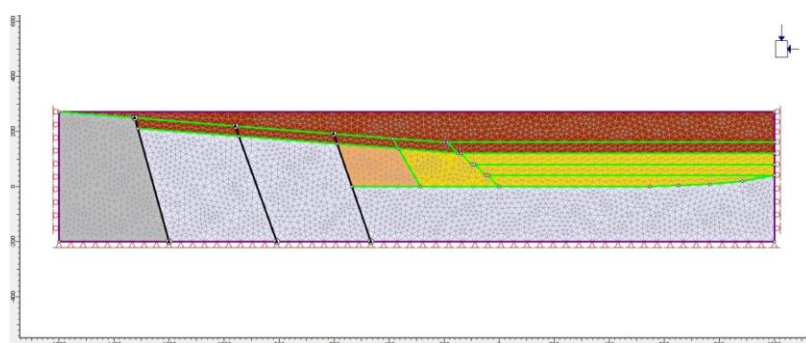
Σε αυτή τη παράγραφο θα γίνει παρουσίαση των συνηθέστερων υπολογιστικών μεθόδων που χρησιμοποιούνται για την επίλυση του γεωτεχνικού προβλήματος της ευστάθειας των πρανών.

1.3.1 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Στη κατηγορία των αριθμητικών αναλύσεων περιλαμβάνονται μέθοδοι, οι οποίες προσπαθούν να ικανοποιήσουν όλες τις θεωρητικές απαιτήσεις, συμπεριλαμβανομένων της ρεαλιστικής προσομοίωσης της συμπεριφοράς εδαφών και των οριακών συνθηκών, οι οποίες προσομοιώνουν συνθήκες πεδίου. Θα πρέπει να καθοριστούν με ακρίβεια οι συνθήκες πεδίου γεωμετρίας, η διαδικασία κατασκευής, οι εδαφικές παράμετροι, οι συνοριακές συνθήκες και επίσης η σχέση τάσης–παραμόρφωσης.

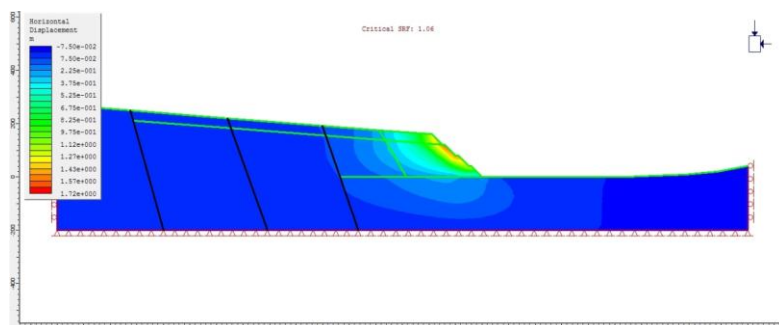
Οι αναλύσεις αυτές συνεπάγονται προσδιορισμό των μετακινήσεων και της

κατανομής των τάσεων στο πρανές, ενώ δεν οδηγούν σε απευθείας μετρήσεις ευστάθειας, όπως γίνεται στη περίπτωση αναλύσεων οριακής ισορροπίας μέσω του συντελεστή ευστάθειας (F). Το βασικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η διακριτοποίηση του χώρου, δηλαδή ο διαχωρισμός του σε μικρών διαστάσεων υποχώρους (πλέγμα). Με τον τρόπο αυτό ένα ανομοιογενές συνεχές μέσο μπορεί να μετατραπεί σε διακριτό μέσο, αποτελούμενο από μικρότερα στοιχεία με διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες το καθένα, τα οποία αλληλεπιδρούν μέσω κοινών κόμβων. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται μέσω προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων όπου δημιουργείται ένα μοντέλο το οποίο προσομοιώνει την υπό εξέταση περιοχή.



Σχήμα 1.3.1: Εικόνα από μοντέλο μίας εκσκαφής και απεικόνιση πλέγματος τριγωνικών στοιχείων τριών κόμβων.

Τα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων ολοκληρώνουν την ανάλυση ευστάθειας, μειώνοντας σταδιακά τις τιμές των χαρακτηριστικών του εδάφους μέχρι την αστοχία. Με τον τρόπο αυτό, προκύπτουν, με κλασικές αναλύσεις, οι αντίστοιχοι συντελεστές ασφαλείας για κάθε στάδιο εκσκαφής.



Σχήμα 1.3.2: Προσομοίωση εκσκαφής και ανάλυση ως προς την ευστάθεια των πρανών, αποτέλεσμα η τιμή του συντελεστή ασφαλείας.

1.3.2 Μέθοδος ανάλυσης οριακής ισορροπίας

Η μέθοδος ανάλυσης οριακής ισορροπίας κατατάσσεται στην κατηγορία απλών αριθμητικών αναλύσεων. Αυτός ο τύπος ανάλυσης υποθέτει ότι το έδαφος βρίσκεται σε κατάσταση αστοχίας και ότι το έδαφος πάνω από την επιφάνεια πιθανής αστοχίας είναι στέρεο (η διάτμηση συμβαίνει κατά μήκος της επιφάνειας αστοχίας). Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται όταν η κατανομή της οριακής διατμητικής τάσης αστοχίας $\tau_f(\alpha)$ επάνω στην επιφάνεια της αστοχίας είναι γνωστή. Η ανάλυση της ευστάθειας βασίζεται στην ανάλυση των δυνάμεων, οι οποίες τείνουν να προκαλέσουν ολίσθηση του πρανούς (π.χ. βαρύτητα) κατά μήκος μιας συγκεκριμένης επιφάνειας ολίσθησης και των δυνάμεων εκείνων που αντιστέκονται στην ολίσθηση αυτή (διατμητική αντοχή εδάφους). Ο προσδιορισμός της ευστάθειας γίνεται λοιπόν μέσω του συντελεστή ευστάθειας (factor of safety), ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος των δυνάμεων που αντιστέκονται στην ολίσθηση ($P_{\text{παθ}}$) προς τις δυνάμεις που τείνουν να την προκαλέσουν ($P_{\text{ενεργητ}}$). Ο συντελεστής ασφαλείας θεωρείται ίσος κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης και είναι ίσος με το λόγο της διατμητικής αντοχής προς την διαθέσιμη διατμητική τάση για την επίτευξη ισορροπίας.

$$F = P_{\text{ΠΑΘ}} / P_{\text{ΕΝΕΡΓΗΤ}} \quad (\text{συντελεστής ασφαλείας})$$

Για να υπάρχει ευστάθεια στο πρανές, πρέπει ο συντελεστής ασφαλείας να είναι μεγαλύτερος της μονάδας ($F > 1$). Όταν ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας ενός πρανούς φτάσει την τιμή του 1.0, η διαθέσιμη διατμητική αντοχή του εδάφους είναι πλήρως κινητοποιημένη σε κάποιες επιφάνειες πιθανών αστοχιών και το πρανές είναι σε εκείνο το σημείο στην αρχή της αστοχίας. Για τιμή του συντελεστή ασφαλείας $F = 1$ επικρατούν συνθήκες οριακής ευστάθειας, ενώ για $F < 1$ το πρανές θεωρείται ασταθές. Ο συντελεστής ασφαλείας θεωρείται σταθερός κατά μήκος της επιφάνειας αστοχίας.

Στην περίπτωση της ανάλυσης ευστάθειας με τη μέθοδο οριακής ισορροπίας δεν μπορεί να γίνει υπολογισμός παραμορφώσεων στα πρανή αλλά μόνο αστοχιών καθώς το έδαφος θεωρείται απόλυτα πλαστικό.

Ανάλογα με τη μορφή της επιφάνειας ολίσθησης και σύμφωνα με την λογική της μεθόδου της οριακής ισορροπίας αναπτύχθηκαν επιμέρους τρόποι ανάλυσης. Σύμφωνα με την μορφή των επιφανειών αστοχίας χωρίζουμε δύο ομάδες μεθοδολογίας μια για παράλληλη επιφάνεια ολίσθησης και μια για καμπύλη.

Στην συνέχεια ακολουθούν οι μέθοδοι οριακής ισορροπίας χωρισμένες σε κατηγορίες ανάλογα με τις παραδοχές που έχουν γίνει για κάθε περίπτωση ανάλυσης.

- i) Επίπεδη επιφάνεια ολίσθησης σχεδόν παράλληλη στο φυσικό έδαφος-πρανές άπειρου μήκους (infinite slope).

Περιγράφει μεταθετικές ολισθήσεις σε μικρά βάθη, όπου το επίπεδο αστοχίας θα είναι παράλληλο στην επιφάνεια ήπιου πρανούς (ακόμα και με κλίση μικρότερη από 15ο). Τα πρανή θα πρέπει εκτείνονται για σχετικά μεγάλη απόσταση και να διατηρούν ένα σταθερό εδαφικό προφίλ (πρανές απείρου μήκους/ infinite slope). Οι συνθήκες που ευνοούν τον σχηματισμό τέτοιου είδους μετακινήσεων, είναι η ύπαρξη ενός συγκριτικά χαλαρού επιφανειακού εδαφικού στρώματος μικρού πάχους. Η ανάλυση προϋποθέτει επιφάνεια ολίσθησης επίπεδη, παράλληλη στο φυσικό έδαφος, με λόγο βάθους ολίσθησης (z) προς μήκος (L) πολύ μικρό ενώ οι επιδράσεις στα άκρα δεν λαμβάνονται υπόψη.

Η ευστάθεια μελετάται θεωρώντας την ισορροπία ενός εδαφικού πρίσματος και όχι ολόκληρης της κινούμενης μάζας.

Ο συντελεστής ασφαλείας δίνεται από τη σχέση

$$F = \frac{c' + (\gamma - m \gamma_w) Z \cos^2 \beta \tan \phi' / \gamma Z \sin \beta \cos \beta}{\gamma Z \sin \beta \cos \beta} \quad (1)$$

Όπου

C' και ϕ' : παράμετροι διατμητικής αντοχής

γ : υγρό φαινόμενο βάρος εδάφους (kN/m^3)

γ_w : φαινόμενο βάρος νερού ($=10 \text{ kN/m}^3$)

Z : βάθος ολίσθησης

β : γωνία κλίσης πρανούς

η πίεση των πόρων (u) δίνεται από τη σχέση $u = \gamma_w Z_w \cos^2 \beta$

$Z_w = m Z$ ή $m = Z_w / Z$, όπου Z_w είναι η άνοδος της στάθμης του υπόγειου νερού πάνω από το επίπεδο ολίσθησης επίπεδο ολίσθησης

- Κοκκώδες έδαφος ($c'=0$) η (1) γίνεται

$$F = [1 - (u / \gamma Z \cos^2 \beta)] (\tan \varphi' / \tan \beta)$$

- Όταν το κοκκώδες έδαφος είναι ξηρό ($u=0$)

$$F = \tan \varphi' / \tan \beta$$

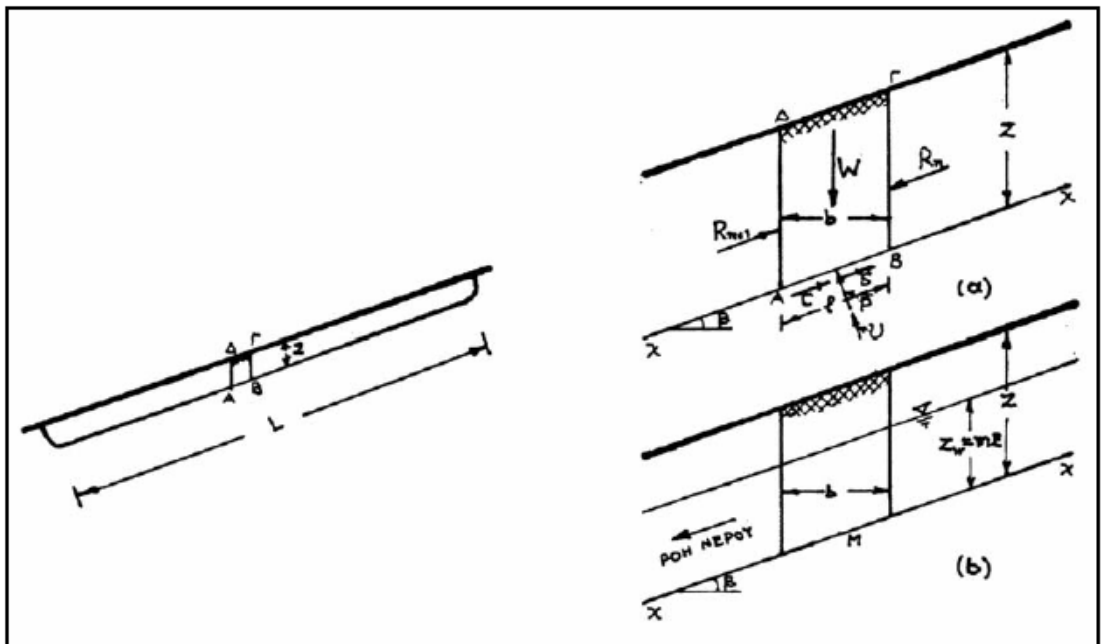
Από αυτή τη σχέση φαίνεται ότι το ξηρό κοκκώδες έδαφος αστοχεί κατά διάφορα επίπεδα παράλληλα στο φυσικό έδαφος και σε διάφορα βάθη Z , όταν η γωνία κλίσης β εξισωθεί με την γωνία τριβής φ'

- Κοκκώδες έδαφος όπου υπάρχει ελεύθερη φρεατική επιφάνεια και ροή παράλληλη στο φυσικό έδαφος

$$F = [1 - (m \gamma_w / \gamma)] (\tan \varphi' / \tan \beta) \quad \text{με } \gamma = \gamma_{\text{κορ.}}$$

- Όταν η φρεατική επιφάνεια συμπίπτει με το φυσικό έδαφος ($m=1$) τότε η σχέση γίνεται:

$$F = \gamma_{\text{αν}} \tan \varphi' / \gamma_{\text{κορ}} \tan \beta$$



Σχήμα 1.3.3: Επίπεδη ολίσθηση σε πρανή απείρου μήκους (infinite slope)

ii) Επίπεδη επιφάνεια ολίσθησης που διέρχεται από το πόδι του πρανούς

Η μεθοδολογία αυτή δίνει αρκετά αξιόλογα αποτελέσματα στην περίπτωση πολύ απότομων πρανών και σχεδόν κατακόρυφων πρανών.

Οι συνθήκες που ευνοούν τέτοιο είδος ολίσθησης συναντώνται κυρίως σε εδάφη που παρουσιάζουν κάποια στρωσιγένεια με ευνοϊκό προσανατολισμό για την εκδήλωση της αστοχίας.

Από την ανάλυση των δυνάμεων που εφαρμόζονται στο πρανές (βάρος ολισθαίνουσας μάζας W , διατμητική αντοχή T και ενεργή διατμητική τάση) προκύπτει:

$$F = [2c' + \gamma H [\sin(i-B)] / \sin i] \cos \beta \tan \varphi' / \gamma H [\sin(i-B)] / \sin i \sin \beta$$

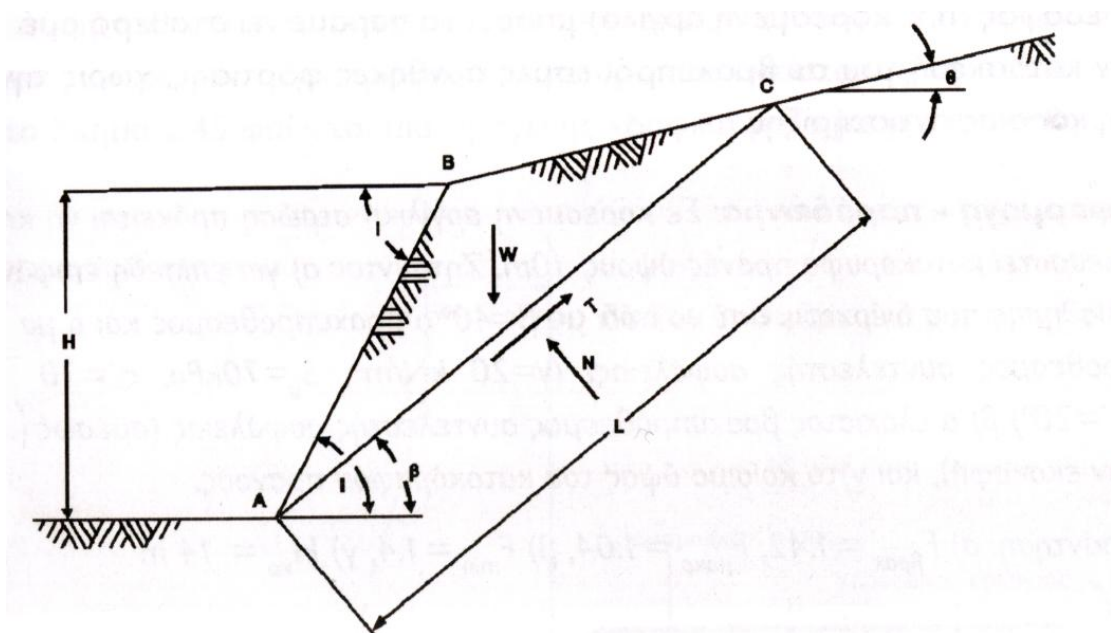
Όπου: c' , φ' : παράμετροι διατμητικής αντοχής του εδάφους σε ενεργές τάσεις

γ : φαινόμενο βάρος

i : γωνία κλίσης του πρανούς

β : γωνία κλίσης του επιπέδου ολίσθησης που στη περίπτωση μη διακριτής επιφάνειας ολίσθησης μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$\beta = (i + \varphi) / 2$$



Σχήμα 1.3.4: Γεωμετρία και επίδραση δυνάμεων σε πρανές με επιφάνεια ολίσθησης που διέρχεται από το πόδι του πρανούς.

- Αν $i = 90^\circ$ (κατακόρυφο πρανές):

$$F = (2C' + \gamma \cos^2 \beta \tan \varphi') / (\gamma H \sin \beta \cos \beta)$$

- Σε περίπτωση ασράγγιστων συνθηκών και πλήρους κορεσμού (καθαρά συνεκτικό έδαφος) ισχύει:

$$F = 2S_u / (\gamma H [\sin(i-\beta) / \sin i] \sin \beta)$$

Όπου S_u η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του συνεκτικού εδάφους

Αν σε αυτή τη περίπτωση $i = 90^\circ$:

$$F = 4S_u / \gamma H \sin 2\beta$$

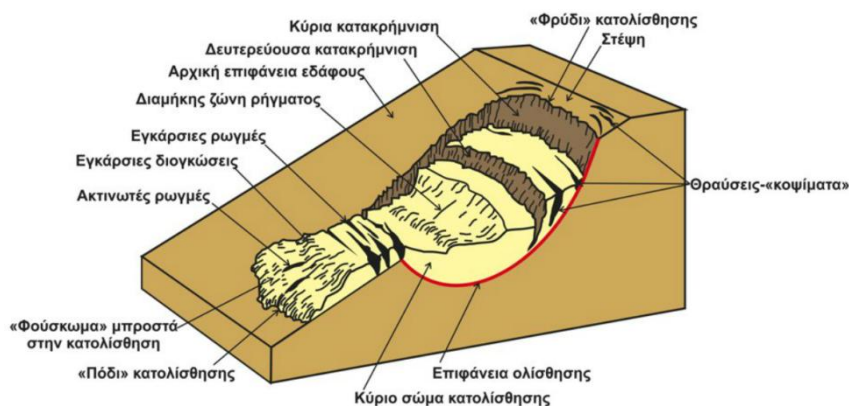
Ο συντελεστής ασφαλείας παίρνει ελάχιστη τιμή ($F=1$) όταν $\sin 2\beta = 1$ και $\beta = 45^\circ$ δηλαδή:

$$F = 4S_u / \gamma H \text{ άρα } H = 4S_u / \gamma$$

H: κρίσιμο ύψος - αποτελεί το μέγιστο ύψος για το οποίο ένα κατακόρυφο πρανές σε καθαρά συνεκτικό έδαφος, μπορεί να παραμείνει σταθερό αμέσως μετά την κατασκευή του σε βραχυπρόθεσμες συνθήκες φόρτισης, χωρίς αντιστήριξη.

iii) Κυκλική επιφάνεια ολίσθησης

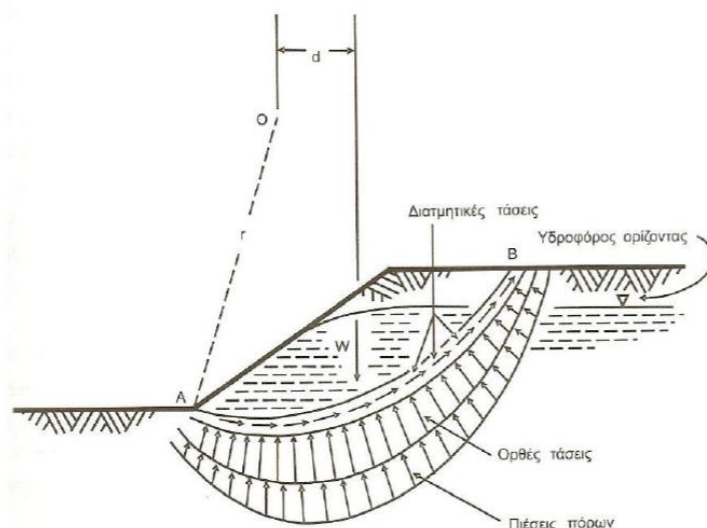
Τυπική μορφή θραύσης εδαφικών πρανών είναι η κυκλική· παρουσιάζει επιφάνεια ολίσθησης κατά προσέγγιση σχήματος κυκλικού τόξου, με την επιφάνεια ολίσθησης να έχει τα άκρα της περισσότερο επίπεδα και το κεντρικό της τμήμα κυκλικό. Η ανάλυση της ευστάθειας πρανών σε αυτή τη περίπτωση γίνεται με δύο βασικές μεθοδολογίες ανάλυσης:



Σχήμα 1.3.5 : Τυπική μορφή περιστροφικής ολίσθησης.

- γενικευμένη μέθοδος ανάλυσης ευστάθειας περιστροφικής ολίσθησης (circular arc analysis)

Σε αυτή τη περίπτωση η ολισθαίνουσα μάζα θεωρείται ομογενής. Η μέθοδος αυτή εξετάζει την εκτίμηση των ροπών περιστροφής και των ροπών αντίστασης της εδαφικής μάζας.



Σχήμα 1.3.6: Κατανομή των τάσεων που εξασκούνται σε εδαφική μάζα με κυκλική επιφάνεια περιστροφής (Cernica 1982).

Οι δυνάμεις που ασκούνται στην ομογενή εδαφική μάζα με κυκλική επιφάνεια ολίσθησης είναι το βάρος W της ολισθίνουσας μάζας, οι ενεργές τάσεις (N), η διατμητική αντοχή που κινητοποιείται στην επιφάνεια ολίσθησης και η συνοχή (C, T), ενώ η πίεση των πόρων (U).

$$F = r(c'_d(AB) + \tan \phi'_d) \sum \sigma_i / Wd$$

r : ακτίνα του κύκλου ολίσθησης

c'_d : η συνοχή που αντιστοιχεί σε μοναδιαίο μήκος τόξου του κύκλου ολίσθησης

(AB) : μήκος τόξου της επιφάνειας ολίσθησης

ϕ'_d : μέση γωνία τριβής

σ_i : ενεργή τάση στο σημείο i

W : συνολικό βάρος ολισθίνουσας μάζας

d : απόσταση από το κέντρο του κύκλου ολίσθησης από τη κατακόρυφη που διέρχεται από το κέντρο βάρους της ολισθίνουσας μάζας.

Σε περίπτωση όπου οι συνθήκες είναι αστράγγιστες ($\phi=0$) η σχέση γίνεται

$$F = M_{\text{ΠΑΘ}} / M_{\text{ενεργ}} = S_u(AB)r/Wd$$

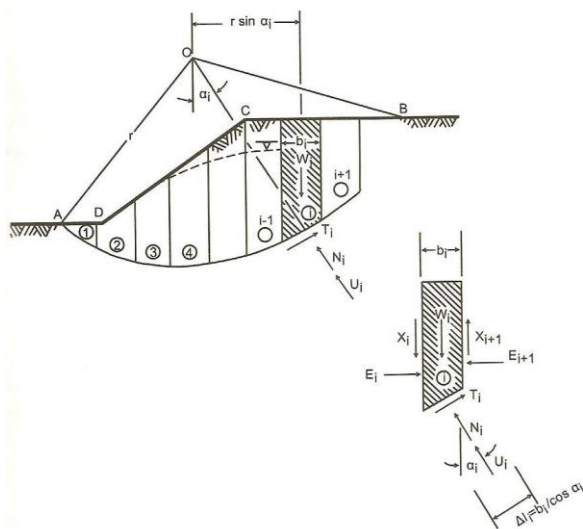
- μέθοδος λωρίδων (method of slices)

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται στη περίπτωση όπου η οριακή διατμητική τάση τ_f (α) είναι συνάρτηση των ορθών ενεργητικών τάσεων που ασκούνται στην επιφάνεια αστοχίας, που δεν είναι άμεσα γνωστές.

Οι μέθοδοι που βασίζονται στην τεχνική του χωρισμού του πρανούς σε φέτες ("methods of slices"), επιτρέπουν να μελετηθεί σχετικά εύκολα η ευστάθεια ανομοιογενών πρανών αποτελούμενων από πολλές εδαφικές στρώσεις, αλλά και γιατί με κατάλληλη προσαρμογή της υπολογιστικής διαδικασίας παρέχουν τη δυνατότητα να εξετασθούν πιο σύνθετες επιφάνειες ολίσθησης.

Εδώ το σώμα ολίσθησης χωρίζεται σε κατακόρυφες λωρίδες (φέτες), όπως φαίνεται στο σχήμα και εξετάζεται η ισορροπία σε κάθε φέτα χωριστά. Οι δυνάμεις που ασκούνται σε κάθε φέτα δίνονται παρακάτω (σχήμα):

W_i είναι το βάρος της φέτας, X_i και E_i η συνισταμένη δύναμη των διατμητικών και ορθών ενεργών τάσεων αντίστοιχα κατά μήκος της πλευράς της κάθε φέτας. T_i ($W_i \cdot \sin\theta_i$) και N_i ($W_i \cdot \cos\theta_i$) είναι η συνισταμένη δύναμη των διατμητικών και ορθονενεργών τάσεων αντίστοιχα κατά μήκος του τόξου του κύκλου ολίσθησης. U_i και U_r είναι η πίεση του νερού των πόρων στις πλευρές της κάθε φέτας, ενώ U ($u_i \cdot \Delta l_i$) είναι η πίεση πόρων στο τόξο του κύκλου ολίσθησης (θεωρείται γνωστή).



Σχήμα 1.3.7: Μέθοδος λωρίδων, υποδιαίρεση ολισθαίνουσας μάζας σε λωρίδες και δυνάμεις που επιδρούν σε μια λωρίδα (CERNICA 1982)

Στη συνέχεια περιγράφονται αναλυτικά οι περισσότερο χρησιμοποιούμενες μέθοδοι ανάλυσης σύμφωνα με τη μέθοδο των λωρίδων:

- Αρχική –Σουηδική μέθοδος (Συμβατική μέθοδος Fellenius)

Με την παραδοχή ότι έχουμε κυλινδρική επιφάνεια ολίσθησης και χωρισμό σε λωρίδες, η μέθοδος αυτή αγνοεί όλες τις δυνάμεις που δρουν μεταξύ των λωρίδων και ικανοποιεί μόνο ισορροπία ροπών για ολόκληρη την ολισθαίνουσα μάζα. Για την αποφυγή του προσδιορισμού των εσωτερικών δυνάμεων, γίνεται η απλόποιητική παραδοχή ότι οι ορθές και οι κατακόρυφες διατμητικές δυνάμεις που δρουν στις πλευρές της λωρίδας δεν επηρεάζουν την ολική ευστάθεια της εδαφικής μάζας, αφού έχουν συνισταμένες με διεύθυνση παράλληλη προς τη βάση της λωρίδας και είναι ίσες και αντίθετες άρα αλληλοεξουδετερώνονται, και γι' αυτό το λόγο μπορούν να παραληφθούν από τους υπολογισμούς.

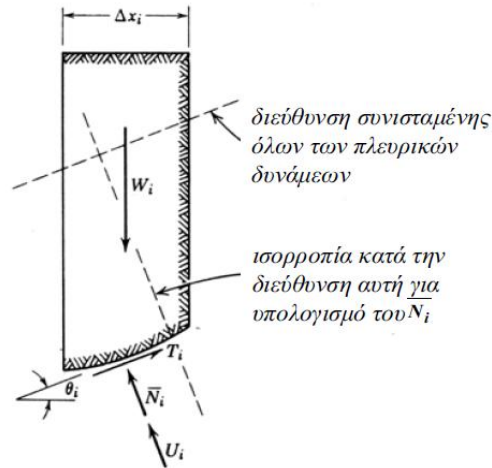
Επίσης η μέθοδος αυτή υιοθετεί ότι το σημείο εφαρμογής της δύναμης N ($W_i \cdot \cos \alpha_i$) στη βάση της λωρίδας είναι το σημείο τομής της βάσεως και του κατακόρυφου διανύσματος του βάρους της λωρίδας. Πιο συγκεκριμένα ο συντελεστής ασφαλείας FS υπολογίζεται τελικά από την ισορροπία του ολισθαίνοντος πρίσματος, λαμβανόμενου ως ενιαίου στερεού. Μία περιστροφική ολίσθηση μπορεί πολύ εύκολα να αναλυθεί με βάση την ισορροπία των ροπών ως κέντρο περιστροφής.

Η γωνία κλίσης α της βάσης της λωρίδας είναι προσημασμένη. Περιορισμός ροπών ανατροπής.

Ο όρος N δεν μπορεί να έχει αρνητικές τιμές. Δεν επιτρέπεται η εκδήλωση φαινομένων υδραυλικής ανύψωσης.

Η συγκεκριμένη μέθοδος δίνει τιμές αυξημένες προς τη μεριά της ασφάλειας κατά 10 έως 15%. Δεν ενδείκνυται για περιπτώσεις με βαθύς κύκλους ολίσθησης και για μεγάλες τιμές υπερπίεσεως των υδάτων των πόρων.

Ως συντελεστής ασφάλειας ορίζεται ο λόγος της ροπής ως προς το κέντρο του κυκλικού τόξου των δυνάμεων που αντιστέκονται στην ολίσθηση, προς την ροπή ολίσθησης.



Σχήμα 1.3.8: Δυνάμεις που επιδρούν σε μια λωρίδα, παραδοχές υπολογισμού δυνάμεων στη μέθοδο λωρίδων fellenius (Lambe and Whitman 1969)

Ο συντελεστής ασφαλείας δίνεται από τη σχέση:

$$F = \frac{\sum [c' \Delta l + (W_i \cos \alpha_i - u_i \Delta l) \tan \phi']}{\sum W_i \sin \alpha_i}, \text{ όπου}$$

c' , ϕ' : οι παράμετροι διατμητικής αντοχής σε ενεργές συνθήκες φόρτισης

W_i : το βάρος της i λωρίδας

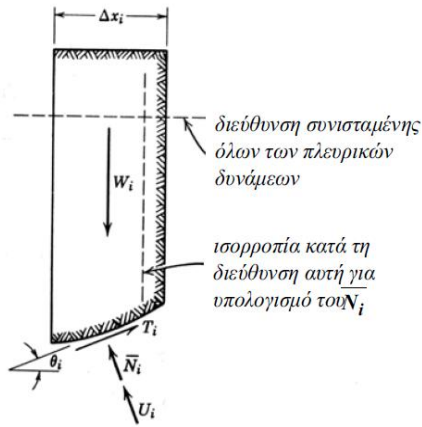
u_i : η πίεση πόρων στη βάση της i λωρίδας

α_i : η γωνία μεταξύ της ακτίνας του κύκλου ολίσθησης που διέρχεται από το μέσο της βάσης κάθε λωρίδας και της κατακόρυφου.

Δl : το μήκος κάθε λωρίδας

- Απλοποιημένη μέθοδος Bishop

Ο Bishop επινόησε μια μέθοδο που περιλαμβάνει τις ορθές αλλά αγνοεί τις διατμητικές δυνάμεις μεταξύ των λωρίδων και ικανοποιεί μόνο την ισορροπία ροπών. Η βασική παραδοχή είναι ότι η συνισταμένη των πλευρικών δυνάμεων που ασκούνται σε κάθε λωρίδα έχει οριζόντια διεύθυνση. Η εισαγωγή των ορθών διαλωριδιακών δυνάμεων έκανε την εξίσωση του συντελεστή ασφαλείας μη γραμμική, με αποτέλεσμα να απαιτείται για τον υπολογισμό του επαναληπτική διαδικασία. Αρχικά, τοποθετείται μία υποθετική τιμή του F και εκτιμάται με την εξίσωση μια νέα, μέχρι να επανέλθει σύγκλιση των τιμών του F .



Σχήμα 1.3.9: Δυνάμεις που επιδρούν σε μια λωρίδα, παραδοχές υπολογισμού των δυνάμεων στην απλοποιημένη μέθοδο bishop (Lambe and Whitman 1969)

Ο συντελεστής ασφαλείας δύνεται από τη σχέση:

$$F = \frac{\sum \{ [c' + (W_i - u_i) \tan \phi'] / m_\alpha \}}{\sum W_i \sin \alpha_i}$$

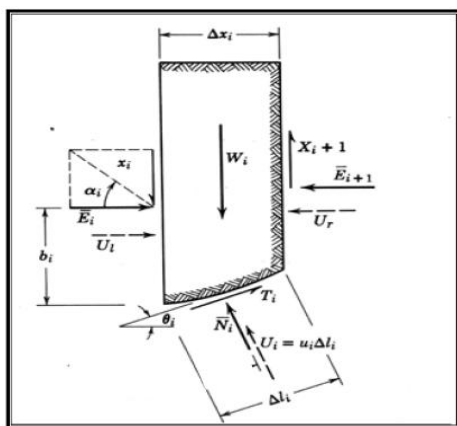
Όπου $m_\alpha = \cos \alpha_i [1 + (\tan \alpha_i \tan \phi' / F)]$

- Απλοποιημένη μέθοδος Janbu

Οι παραδοχές που γίνονται σε αυτή τη μέθοδο είναι

- ότι οι πλευρικές οριζόντιες δυνάμεις που ασκούνται σε κάθε λωρίδα είναι ίσες.
- κατά την υφιστάμενη λειτουργία του πρανούς ικανοποιείται η ισορροπία των οριζόντιων δυνάμεων που ασκούνται στο εξεταζόμενο πρίσμα του αστοχίας.

Επίσης η μέθοδος αυτή δέχεται ότι είναι γνωστή η θέση του σημείου εφαρμογής των διαλωριδικών δυνάμεων.



Σχήμα 1.3.10: Δυνάμεις που επιδρούν σε μια λωρίδα, παραδοχές υπολογισμού των δυνάμεων στην μέθοδο jandu (Lambe and Whitman 1969)

Τρίτη παραδοχή είναι ότι λαμβάνει υπόψη και την επιρροή των οριζόντιων δυνάμεων που ασκούνται μεταξύ των λωρίδων χρησιμοποιώντας ένα εμπειρικό διορθωτικό συντελεστή (f_0)

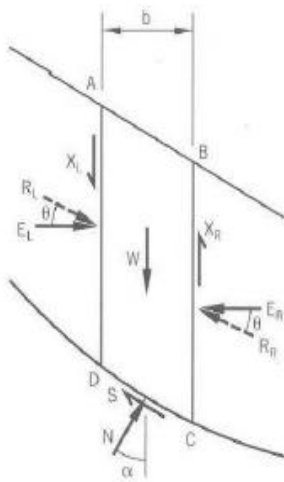
Ο συντελεστής αυτός είναι προκαθορισμένος και οι τιμές του εξαρτώνται από τη συνοχή, τη γωνία εσωτερικής τριβής και το σχήμα της επιφάνειας ολίσθησης.

$$F = f_0 \Sigma [(c' b + (W_i - u_i b) \tan \varphi') / (\cos \alpha_i m_{\alpha})] / \Sigma W_i \tan \alpha_i$$

$$\text{Όπου } m_{\alpha} = \cos \alpha_i [1 + (\tan \alpha_i \tan \varphi' / F)]$$

- Μέθοδος Spencer

Ο Spencer (1967) βασίστηκε στην υπόθεση ότι οι δυνάμεις μεταξύ των λωρίδων είναι παράλληλες και σχηματίζουν γωνία θ με την οριζόντιο. Η υπόθεση αυτή επιτρέπει την ικανοποίηση και της συνθήκης ισορροπίας των ροπών (F_m), αλλά και την αντίστοιχη των δυνάμεων (F_f) .αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την μεταβολή των F_m και F_f με τις τιμές της γωνίας θ .



Σχήμα 1.3.11: Ανάλυση κυκλικού τόξου. Μέθοδος spencer

- Μέθοδος Morgenstern and Price (1965)

Η μέθοδος των Morgenstern και Price (1965) βασίζεται στην υπόθεση ότι οι διατμητικές δυνάμεις (T) μεταξύ των λωρίδων σχετίζονται με τις αντίστοιχες ορθές(E) σύμφωνα με τη σχέση:

$$X = \lambda f(x) E$$

λ : παράγοντας που υπολογίζεται κατά την επίλυση

$f(x)$: συνάρτηση που αναφέρεται στην επίλυση των εσωτερικών δυνάμεων

X και E : διαλωριδιακές δυνάμεις.

Μέθοδοι οριακής ευστάθειας:

Πίνακας 1.3.1: Συγκεντρωτικός πίνακας μεθόδων ανάλυσης οριακής ισορροπίας, καταγράφεται η καταλληλότητα ανάλογα με την επιφάνεια ολίσθησης και οι παραδοχές της κάθε μεθόδου

Μέθοδος	Επιφάνεια ολίσθησης		Παραδοχές σχετικά με τις δυνάμεις T και E μεταξύ των λωρίδων
	κυκλική	Μη κυκλική	
Fellenius (1963)	+	-	Αγνοεί την E και την T
Bishop (1955)	+	(*)	Λαμβάνει υπόψη την E αγνοεί την T
Janbu (1954)	(*)	+	Λαμβάνει υπόψη την E αγνοεί την T
Morgenster-price (1965)	+	+	Ορίζεται από την $f(x)$, $T = f(x) \lambda E$
Spencer (1967)	+	(*)	Σταθερή κλίση ($T = E \tan \varphi$)

(*) Μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για κυκλικές και μη - κυκλικές επιφάνειες ολίσθησης
 $E =$ ορθή δύναμη μεταξύ λωρίδων, $X =$ διατμητική δύναμη μεταξύ λωρίδων

1.4 Όργανα παρακολούθησης κατολισθήσεων

Η επιλογή του τύπου των οργάνων παρακολούθησης, για τη συγκρότηση ενός πλήρους προγράμματος παρακολούθησης ενός πρανούς, εξαρτάται από τον τύπο και το μέγεθος του προβλήματος που θέλουμε να παρακολουθήσουμε. Παρακάτω θα αναλυθούν κάποια από τα συνήθη όργανα παρακολούθησης.

i. Επιφανειακές τεχνικές μέτρησης αναφέρονται σε μεθόδους μέτρησης της μετακίνησης σε συγκεκριμένα σημεία του πρανούς ή σε μεγάλη κλίμακα, δηλαδή συνολικά σε μια μεγάλη περιοχή του πρανούς. Συγκεκριμένα :

- εγκατάσταση μετρητών ρωγμών (crackmeters - jointmeters) για την παρακολούθηση της εξέλιξης των μετακινήσεων στα τοιχώματα των ρωγμών και θραύσεων, καθώς και κλισιομέτρων (surface clinometers- tiltmeters) για τη μέτρηση των μεταβολών της κλίσης, κυρίως σε τεχνικά έργα σε κατολισθαίνουσες περιοχές.
- Συμβατικές τοπογραφικές μετρήσεις - προσδιορισμός των επιφανειακών μετακινήσεων. Γίνεται κατά την επιτόπια τοπογραφική έρευνα, όπου εγκαθίσταται ένα σύστημα (κάνναβος) μαρτύρων εντός και εκτός της κατολισθαίνουσα περιοχής, καθώς και απομακρυσμένα σταθερά σημεία αναφοράς που θα παραμείνουν σταθερά κατά τη διάρκεια της έρευνας αλλά ακόμα και μετά από αυτήν. Τα σταθερά αυτά σημεία πρέπει να αναγνωρίζονται εύκολα στους χάρτες. Η απόσταση του σταθερού σημείου αναφοράς από το πιο γειτονικό σημείο της γνωστής μετακίνησης πρέπει να είναι τουλάχιστον 25% του εύρους της κατολισθαίνουσας ζώνης. Τα σημεία αναφοράς πρέπει να συνδέονται μεταξύ τους με τριγωνισμό και ακριβή χωροστάθμηση (υψόμετρο). Οι μάρτυρες κινηματικής αποτελούνται από ένα σύστημα δεικτών της μετακίνησης (ράβδοι, πάσσαλοι κτλ), γίνεται ακριβής υπολογισμός της θέσης και του υψομέτρου τους (συντεταγμένες) και εν συνεχεία ελέγχεται η θέση των δεικτών κατά διαστήματα (καθημερινά σε διάστημα μερικών μηνών) ανάλογα με τη ταχύτητα μετακίνησης. Κατά την πρόοδο ή την ολοκλήρωση της έρευνας συνήθως σχεδιάζεται «χάρτης διανυσματικών μετακινήσεων» όπου τονίζονται το περίγραμμα της κατολίσθησης, οι θέσεις των μαρτύρων κινηματικής με βάση τους οποίους έγιναν οι μετρήσεις μετακίνησης, καθώς και τα διανύσματα μετακίνησης σε κάθε σημείο. Το αποτέλεσμα μπορεί να επηρεαστεί, με ενδεχόμενο δημιουργίας σφάλματος, από τις ατμοσφαιρικές μεταβολές σε θερμοκρασία ή πίεση καθώς επίσης από τον ανθρώπινω παράγοντα (λάθος οργάνωση καννάβου και τοποθέτηση στόχων).
- Χρήση GPS. Η χρήση των συστημάτων GPS (Global Positioning System) στις μετακινήσεις των πρανών έχει αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια,

καθώς η ακρίβεια της μέτρησης έχει φτάσει σε επίπεδα τέτοια ώστε να είναι εφικτή πλέον η εκτίμηση μετακινήσεων της τάξεως του 1cm ή ακόμα και μικρότερων.

ii. Υπεδαφικές μετρήσεις μετακινήσεων.

- Αποκλισιόμετρα (inclinometers). Χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο και την παρακολούθηση των οριζόντιων μετακινήσεων του εδάφους με το βάθος και η χρήση τους σε θέσεις κατολισθήσεων έχει ως σκοπό τον ακριβή εντοπισμό του βάθους ολίσθησης (επιφάνεια ολίσθησης), την ακριβή μέτρηση της ταχύτητας μετακίνησης, τη λειτουργικότητα και αποτελεσματικότητα των μέτρων προστασίας και αποκατάστασης και τον προληπτικό έλεγχο ασφάλειας και την έγκαιρη προειδοποίηση σε περίπτωση σημαντικής κατολίσθησης. Αποτελείται από σύνολο εύκαμπτων σωλήνων, αποκλισιομετρικοί σωλήνες (inclinometer casing), οι οποίοι τοποθετούνται μετά την περαιώση της δειγματοληπτικής γεώτρησης στο έδαφος όπου αναμένεται η μετακίνηση . Οι σωλήνες αυτοί, καθώς και το ένεμα που πληρώνει το κενό μεταξύ οπής της γεώτρησης και αποκλισιομετρικού σωλήνα, θα πρέπει να είναι εύκαμπτα ώστε να αντέχουν τις παραμορφώσεις λόγω κατολίσθησης. Μέσα από τους αποκλισιομετρικούς σωλήνες διέρχεται όργανο μέτρησης (αποκλισιομετρική βολίδα) και λαμβάνει μετρήσεις ως το επιθυμητό βάθος, το οποίο προσανατολίζεται βάση χαραγών στο εσωτερικό των σωλήνων. Η μετατόπιση των αποκλισιομετρικών σωλήνων, άρα και του περιβάλλοντος εδάφους, μετράται με τον προσδιορισμό της κλίσης της βολίδας σε διάφορα σημεία τις εγκατάστασης. Η τοποθέτηση των κλισιομετρικών σωλήνων πρέπει να γίνεται μέχρι σταθερό υπόβαθρο, τουλάχιστον 5m μέσα σε αυτό, αλλιώς το όργανο θα επιπλέει μέσα στη ζώνη ολίσθησης και θα παίρνουμε λανθασμένες μετρήσεις. Δηλαδή οι σωλήνες πρέπει να πακτώνονται κάτω από την επιφάνεια της ολίσθησης, μέσα στο σχηματισμό ο οποίος δεν συμμετέχει στην κίνηση.

Τα μόνιμα αποκλισιόμετρα. συνιστούν διατάξεις κλισιομέτρων μόνιμης εγκατάστασης μέσα σε γεωτρήσεις (in place inclinometer). Κάθε διάταξη αποτελείται από αριθμό αισθητήρων μόνιμης τοποθέτησης που ενσωματώνονται με την εδαφική κλισιομετρική τορπίλη (βολίδα) και συνδέονται μεταξύ τους με σωλήνες ή ειδικό συρματόσχοινο, ώστε η

επιφάνεια ολίσθησης να βρίσκεται μεταξύ των αισθητήρων. Οι αισθητήρες (από κάθε διάταξη) συνδέονται σε κεντρικό σύστημα συλλογής και αποθήκευσης δεδομένων. Με τον τρόπο αυτό γίνεται συνεχής καταγραφή των οριζόντιων μετακινήσεων και σε περίπτωση που ξεπεραστούν τα όρια, μπορεί να εφαρμοστεί σύστημα έγκαιρης ειδοποίησης.



Σχήμα 1.4.1: Εγκατάσταση κλισιομετρικού σωλήνα και βολίδα

- Εξτενσιόμετρα (extensometers). Τοποθετούνται συνήθως σε γεωτρήσεις και χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση των μετακινήσεων για συγκεκριμένο εύρος βάθους και είναι ένα μέσο για την καταγραφή κάθετων μετατοπίσεων. Η βασική αρχή λειτουργίας τους είναι η μέτρηση της αύξησης ή μείωσης του μήκους ενός σύρματος ή ράβδου, που είναι πακτωμένο με χρήση αγκυρίου και ενέματος στη γεώτρηση. Οι μετρήσεις μεταβολής του μήκους μπορούν να γίνονται απλά ή με τη χρήση ηλεκτρικών μηκυνσιομετρών.



Σχήμα 1.4.2: Εικόνα από εξτενσιόμετρο (κεφαλές) και κάτω πως τοποθετείται στο έδαφος.

iii. Μετρήσεις υπόγειου νερού - πιεζομετρία

Τα πιεζόμετρα έχουν σαν σκοπό τη μέτρηση της στάθμης ή της πίεσης του νερού στο έδαφος και είναι πολύτιμα εργαλεία για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας των προγραμμάτων αποστράγγισης των ορυχείων και την επίδραση των εποχιακών μεταβολών. Μεγάλη πίεση πόρων, ιδιαίτερα η διείσδυση νερού σε γεωλογικά όρια, είναι υπεύθυνα για πολλές αστοχίες πρανών. Στοιχεία σε πιέσεις νερού είναι απαραίτητα για την διατήρηση της ευστάθειας των πρανών εφόσον το νερό πίσω από ένα πρανές θα μειώσει την αντίσταση και θα αυξήσει τη δύναμη ολίσθησης, σε ένα ενδεχομένως ασταθές εδαφικό πρανές. Επομένως οι μεταβολές στο καθεστώς των υπόγειων νερών θα πρέπει να παρακολουθούνται, καθώς πολλές φορές είναι υπαίτιο για φαινόμενα κατολισθήσεων. Παρακάτω διακρίνονται κατηγορίες πιεζομέτρων.

- Πιεζόμετρα ανοικτού σωλήνα (open standpipe piezometers). Αποτελούν τον πιο συνηθισμένο τύπο πεζομέτρων που αποτελούνται από ένα πλαστικό σωλήνα (διάτρητο στο κατώτερο τμήμα του ή σε όποιο βάθος ενδιαφέρει την έρευνα), ο οποίος τοποθετείται στην οπή της γεώτρησης και περιβάλλεται από κοκκώδες υλικό φίλτρου. Οι μετρήσεις της στάθμης στο σωλήνα γίνονται με σταθμήμετρο. Βασικό μειονέκτημα του πιεζομέτρου είναι ο μεγάλος χρόνος που απαιτείται για να ανταποκριθεί η μετρούμενη στάθμη στις μεταβολές της στάθμης στα ημιπερατά κυρίως υλικά. Μια σχετική μείωση χρόνου ανταπόκρισης επιτυγχάνεται με τη μείωση της διαμέτρου του πλαστικού σωλήνα του πιεζομέτρου και αυξάνοντας την εισροή νερού στο μετρούμενο τμήμα του με τη χρήση ενός ειδικού πορώδους φίλτρου.
- Πιεζόμετρο με αισθητήρες πίεσης (pressure sensor piezometers). Τα πιεζόμετρα αυτά έχουν σχεδόν άμεση ανταπόκριση στις μεταβολές των συνθηκών του υπόγειου νερού και κυρίως στις μεταβολές πίεσης των πόρων στις επιθυμητές στάθμες ελέγχου (π.χ. σε επιφάνεια ολίσθησης). Ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής του και τη γενικότερη μεθοδολογία που βασίζεται η λειτουργία τους, χωρίζονται στα παρακάτω είδη:
- Ηλεκτρικά πιεζόμετρα (electrical piezometers). Περιλαμβάνουν ένα διάφραγμα, το οποίο στην εξωτερική του πλευρά πιέζεται και παραμορφώνεται από τη πίεση του νερού των πόρων. Η παραμόρφωση αυτή μετράται από διάφορους τύπους ηλεκτρικών μετατροπέων, όπως ηλεκτρομηκυνσιόμετρα, παλλόμενους αγωγούς κτλ. Τα πιεζόμετρα αυτά έχουν το πλεονέκτημα της μεγάλης ευαισθησίας μετρήσεων, αλλά η χρήση τους συνιστάται για βραχυχρόνια πλαίσιο εγκατάστασης, αφού η λειτουργία τους επηρεάζεται σημαντικά από περιβαλλοντικούς παράγοντες.
- Πνευματοληπτικά πιεζόμετρα (Pneumatic piezometers) που περιέχουν ένα διάφραγμα- βαλβίδα το οποίο ανάλογα με την πίεση ανοίγει ή κλείνει την επικοινωνία δύο σωλήνων που οδηγούν στην επιφάνεια. Η μέτρηση του νερού των πόρων γίνεται ως εξής: εισροή αέρα από τον ένα σωλήνα – άνοιγμα της βαλβίδας και επιστροφή του αέρα από τον άλλον σωλήνα- διακοπή της εισροής αέρα- εξισορρόπησης πίεσης στη βαλβίδα. Η μετρούμενη πίεση τη στιγμή αυτή ισούται με την πίεση του νερού των πόρων. Τα πιεζόμετρα αυτού του τύπου δεν επηρεάζονται από περιβαλλοντικούς παράγοντες και συνιστώνται για μακροχρόνια παρακολούθηση.

Η εγκατάσταση του πιεζομέτρου γίνεται μέσα στην οπή μιας δειγματοληπτικής γεώτρησης και το βάθος του εξαρτάται από τη γεωτεχνική τομή της γεώτρησης όπου φαίνεται η στρωματογραφία στη συγκεκριμένη θέση, το εκτιμώμενο βάθος των υπόγειων νερών, και το εκτιμώμενο βάθος της επιφάνειας ολίσθησης.



Σχήμα 1.4.3: Εικόνα από πιεζόμετρο και τοποθέτηση πιεζομέτρου για λήψη στάθμης

1.5 Μέτρα αντιμετώπισης των κατολισθήσεων

i Μείωση της κλίσης του πρανούς. Η πλέον δημοφιλής μέθοδος βελτίωσης του συντελεστού ασφαλείας ενός πρανούς είναι η εκσκαφή και η διαμόρφωσή του και υλοποιείται με τους εξής τρόπους:

- Διαμόρφωση ενιαίας κλίσης πρανούς, δηλαδή μείωση της μέσης κλίσης του πρανούς. Με μικρές επεμβάσεις στη κλίση πρανούς μπορεί να έχουμε σημαντικές αλλαγές στην ευστάθεια του.
- Απόληψη της ασταθούς περιοχής. Η απόληψη της ασταθούς περιοχής σημαίνει αλλαγή (διεύρυνση) των ορίων εκσκαφής.
- Αποφόρτιση της αστάθειας. Εννοούμε την απομάκρυνση υλικού από τη κορυφή του πρανούς, που υπέρκειται της επιφάνειας ολίσθησης, βελτιώνοντας τη συνολική κλίση του ή μειώνοντας το ύψος του.
- Διεύρυνση του ποδός. Αποτελεί μέθοδο παρόμοια της αποφόρτισης, η οποία εφαρμόζεται στον πόδα του πρανούς αντί για την κορυφή του. Μετατίθεται το

όριο εκσκαφής της τελευταίας βαθμίδας προς το εσωτερικό της εκσκαφής δημιουργώντας έτσι κάποια αντιστήριξη στο μετακινούμενο πρανές.

ii Έλεγχος επιφανειακών και υπόγειων υδάτων.

Τα επιφανειακά ύδατα λειτουργούν δυσμενώς στην ευστάθεια αυξάνοντας, μέσω της κατείσδυσης, το βάρος της εδαφικής μάζας που τείνει να μετακινηθεί και παράλληλα μειώνει τη διατμητική αντοχή των εδαφικών υλικών του πρανούς λόγω αύξησης των υδροστατικών πιέσεων. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η μείωση του συντελεστού ασφαλείας του πρανούς. Τα μέτρα αντιμετώπισης που μπορούν να ληφθούν ώστε να είναι εφικτός ο έλεγχος των επιφανειακών υδάτων είναι:

- Επιφανειακή αποστράγγιση η οποία μπορεί να επιτευχθεί με τάφρους παροχέτευσης, με κατασκευή περιφερειακής τάφρου γύρω από την εκσκαφή, η οποία παραλαμβάνει την επιφανειακή αποστράγγιση της γύρω περιοχής καθώς και τα αντλούμενα ύδατα από την εκσκαφή
- Υπόγεια αποστράγγιση με κατακόρυφες υδρογεωτρήσεις, για τον υποβιβασμό της στάθμης των υπόγειων υδάτων, για την βελτίωση της ευστάθειας του πρανούς. Είναι μέτρο που απαιτεί μακροχρόνιο σχεδιασμό και δεν προσφέρεται όταν μια κατολίσθηση πλησιάζει στη φάση αστοχίας

iii Αύξηση των δυνάμεων που αντιδρούν στην μετακίνηση.

Η εσωτερική απόθεση στείρων υλικών μπορεί να αυξήσει τις δυνάμεις που αντιστέκονται της ολίσθησης, η εκσκαφή μπορεί να δημιουργήσει μεγάλο όγκο στείρων υλικών, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την σταθεροποίηση των πρανών.

iv Υποστήριξη της ασταθούς μάζας με τεχνικές ενίσχυσης-αγκυρώσεις ή πάσσαλοι.

v Έλεγχος δονήσεων από εκρήξεις. Λόγω χρήσης εκρηκτικών υλών για εξόρυξη σκληρών σχηματισμών, οι οποίοι παρεμβάλλονται σε μαλακά ιζήματα. Η επίδραση των δονήσεων έχει δύο σκέλη, εκκίνηση της προοδευτικής αστοχίας λόγω δονήσεων και επίδραση των δονήσεων σε επιφάνεια ολίσθησης που έχει ήδη δημιουργηθεί .

vi Αλλαγή κατεύθυνσης προχώρησης του μετώπου εκσκαφής, ώστε η φαινόμενη γωνία κλίσης των στρωμάτων προς εκείνη της εκσκαφής να είναι σε ανεκτά επίπεδα. Είναι χρήσιμη, ή και απαραίτητη, όταν τα στρώματα έχουν έντονη κλίση προς την

εκσκαφή (άνω των $8 - 10^0$) και όταν οι βαθμίδες είναι παράλληλες προς την διεύθυνση των στρωμάτων.

2 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΜΑΡΓΑΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ

Στο δεύτερο κεφάλαιο θα γίνει μια διερεύνηση στη σύσταση και τη συμπεριφορά των μαργαϊκών σχηματισμών και πως αυτά τα δύο αλληλεπιδρούν. Επίσης στο πλαίσιο αυτής της διερεύνησης έγινε καταγραφή και περιγραφή κάποιων από τους μαργαϊκούς σχηματισμούς που απαντώνται στον ελληνικό χώρο.

2.1 Συμπεριφορά της μάργας σύμφωνα με τα γεωτεχνικά της χαρακτηριστικά

Οι μαργαϊκοί σχηματισμοί καλύπτουν ένα μεγάλο κομμάτι της Ελλάδας και παρουσιάζουν μεγάλο γεωτεχνικό ενδιαφέρον. Είναι κυρίως νεογενείς αποθέσεις λιμναίας ή θαλάσσιας προέλευσης και περιέχουν 35%- 75% ανθρακικό ασβέστιο καθώς επίσης και αργιλικά ορυκτά, ενώ τα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά τους παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία.

Οι μηχανικές ιδιότητες των μαργαϊκών σχηματισμών καθορίζονται από την ορυκτολογική τους σύσταση, το βαθμό συγκόλλησης, τη στρώση αλλά και από το βαθμό αποσάθρωσης και διάρρηξης που υφίστανται. Οι δεσμοί συγκόλλησης μεταξύ των μεμονωμένων τεμαχιδίων είναι αποτέλεσμα της διαδικασίας απόθεσης των ανθρακικών ορυκτών. Επομένως η ανάπτυξη της διατμητικής αντοχής εξαρτάται από την παρουσία του ανθρακικού υλικού, ενώ ενδέχεται να μην αντιστοιχεί με τον επιτόπου λόγο κενών.

Οι ασβεστιτικοί κόκκοι ως πρωτογενές συστατικό με ομοιόμορφη κατανομή στο δομικό σκελετό ισχυροποιούν του δεσμούς και αυξάνουν την αντοχή, όπως προαναφέρθηκε, αντιθέτως η δευτερογενής παρουσία ασβεστίτη, λόγω εξαλλοίωσης, οδηγεί στη δημιουργία επιφλοιώσεων επομένως και στη μείωση της συνοχής. Έτσι, οι γεωτεχνικές τους ιδιότητες δεν ελέγχονται μόνο από τον αρχικό λόγο κενών και την ιστορία φόρτισής τους, καθώς η δομή που παρουσιάζουν συνεισφέρει σημαντικά στην αντοχή και την ακαμψία τους, “ξεθωριάζοντας” τη μνήμη τους σχετικά τόσο με τον αρχικό λόγο κενών, όσο και με την ιστορία φόρτισής τους (Anagnostopoulos et al, 1991). Χαρακτηριστικό είναι ότι οι μάργες ενώ αρχικά παρουσιάζουν μια άκαμπτη συμπεριφορά, δηλαδή δυσκαμψία, αυτή απομειώνεται μόλις ξεπεραστεί το όριο διαρροής (λόγω διάσπασης των δεσμών) με αποτέλεσμα την κατάρρευση των μαργών σε κατάσταση ροής, λόγω σημαντικής μείωσης της διατμητικής τους αντοχής.

Παρατηρούνται διαφορετικοί λιθολογικοί τύποι ανάλογα με την μεταβολή του ανθρακικού και του αμμώδους κλάσματος. Η μεταβολή αυτή διαφοροποιεί την πλαστικότητα υλικού και τη διαγένεσή του, επομένως και τη συνοχή και τη μηχανική αντοχή του πετρώματος.

Σύμφωνα με τον Καβουνίδη (1985) οι μάργες ανήκουν στη κατηγορία αργιλικών ημίβραχων και είναι συνήθως ρηγματωμένες (με μικρορωγματώσεις ή στιλπνές επιφάνειες), με χαμηλή παραμένουσα διατμητική αντοχή, μεγάλη ψαθυρότητα άρα και επικινδυνότητα για προοδευτική αστοχία.

Οι Božinović et al (1993) αναφέρουν ότι εξαιτίας της πολυπλοκότητας της δομής των ρωγματωμένων στιφρών αργίλων και μαργών, παρουσιάζονται συχνά κατολισθήσεις, σε όλες σχεδόν τις λιθοστρωματογραφικές ενότητες, ανεξάρτητα από τη θέση αυτών ή τη κλίση των πρανών.

Ιδιαίτερη επικινδυνότητα επιδεικνύουν οι ανώτερες άργιλοι του Μειοκαίνου, κυρίως όταν βρίσκονται σε εναλλαγές με αμμώδεις ορίζοντες και ιδιαίτερα τα ανώτερα αποσαθρωμένα τμήματα αυτών, τα οποία έχουν αισθητά μειωμένες μηχανικές ιδιότητες. Αυτό οφείλεται στη διακοπή της διαγένεσης για τα ιζήματα αυτά μέσω της διάβρωσης, με αποτέλεσμα την αποσυμπίεση τους (με ταυτόχρονη δράση ρηγμάτων και ρωγματώσεων), που επέδρασε στα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά τους. Οι κατολισθήσεις προκαλούνται κατά βάση στην επιφάνεια του αποσαθρωμένου υλικού - αυτό συμβαίνει γιατί η ζώνη αποσάθρωσης παρουσιάζει μια συγκεκριμένη δομή στην επιφάνεια του ανάγλυφου εξαιτίας των θερμοκρασιακών μεταβολών, ευνοώντας τη συσσώρευση νερού και δημιουργώντας συχνά τις συνθήκες για την εκδήλωση κατολίσθησης.

2.2 Ταξινόμηση της μάργας σύμφωνα με την σύστασή της

Όπως προαναφέρθηκε οι μάργες περιέχουν κυρίως ασβεστιτικό και κλαστικό αργιλικό υλικό. Η περιεκτικότητα των μαργών σε αυτά τα δυο συστατικά έχει αποτελέσει κριτήριο για την ταξινόμησή τους. Στα διάφορα συστήματα ταξινόμησης, που έχουν προταθεί, τα ακραία μέλη της κλίμακας ταξινόμησης καταλαμβάνουν η άργιλος και ο ασβεστόλιθος.

Ο BARTH et al (1939) περιέγραψαν τις μάργες σαν μίγματα ασβεστολιθικού και αργιλικού υλικού με περιεχόμενο ποσοστό ανθρακικού ασβεστίου από 35% ως 65%.

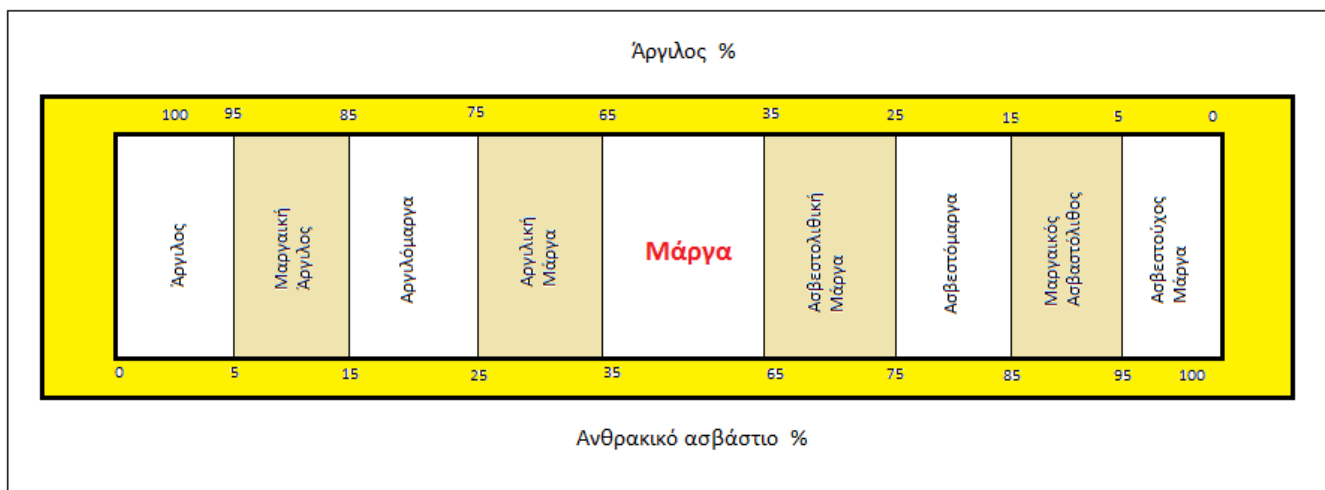
Ανάλογα με το ποσοστό του ανθρακικού ασβεστίου ή των αργιλικών ορυκτών διέκριναν τα παρακάτω μέλη του μίγματος: άργιλος, μαργαϊκή άργιλος, αργιλομάργα, αργιλική μάργα, ασβεστολιθική μάργα, ασβεστομάργα, μαργαϊκός ασβεστόλιθος, και ασβεστόλιθος (Σχήμα 2.2.1)

Ο CHALLINOR (1967), διατύπωσε ότι ενώ η μάργα είναι ένα μίγμα με μεγάλο ποσοστό ανθρακικών, εν τούτης γνωστοί εδαφικοί σχηματισμοί, με μικρό ποσοστό ανθρακικών ορυκτών, έχουν χαρακτηριστεί ως μάργες, όπως συμβαίνει με τον σχηματισμό KEUPER (KEUPER marl). Ο σχηματισμός αυτός είναι στην πραγματικότητα ένας κοκκινωπός αργιλόλιθος. Αντίθετα άλλοι σχηματισμοί, όπως αυτός της Οξφόρδης (Oxford clay), έχουν ταξινομηθεί σαν άργιλοι ενώ πρόκειται για κανονικές μάργες.

Ο JUNG (1969), διέκρινε τα μέλη της σειράς αργίλου- ασβεστολίθου, ανάλογα με το ποσοστό συμμετοχής των αργιλικών ορυκτών, σε ασβεστόλιθο (0-5% αργιλικά ορυκτά), αργιλομιγή ασβεστόλιθο (5- 35%), μάργα (35-65%), ασβεστύχο άργιλο (65-95%), και άργιλο (95-100%).

Η ΔΑΒΗ (1971), διέκρινε τους παρακάτω τύπους στη σειρά των ασβεστολιθικών ιζημάτων: αργιλομιγής ασβεστόλιθος ή αργιλομιγής δολομίτης (ποσοστό αργίλου μέχρι 10%), μαργαϊκός ασβεστόλιθος ή μαργαϊκός δολομίτης (10-20% άργιλος), μάργα (20- 50%άργιλος), αργιλική μάργα (ποσοστό αργιλικού μεγαλύτερο του 50%).

Ο ΦΥΤΡΟΛΑΚΗΣ (1973), τόνισε την ιδιαιτερότητα των μαργών από γεωλογική και γεωτεχνική άποψη. Υποστήριξε ότι η γνώμη που επικρατεί ότι: ‘‘η μάργα είναι μια ασβεστύχος ή ασβεστιτική άργιλος’’ δεν είναι σωστή, διότι η αντικατάσταση των αργιλικών ορυκτών από το ανθρακικό ασβέστιο προκαλεί έντονες μεταβολές στις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες της μάργας . Τέλος πρότεινε την παρακάτω διάκριση των μελών ανάλογα με την περιεκτικότητα σε ανθρακικό ασβέστιο: άργιλος (0-5%), ασβεστύχος άργιλος (6-16%), αργιλώδης μάργα (17-35%), μάργα (36-65%), ασβεστολιθική μάργα (66-75%), μαργαϊκός ασβεστόλιθος (76-90%), και ασβεστόλιθος (91-100%).



Σχήμα 2.2.1: Ταξινόμηση των μαργών ανάλογα με το ποσοστό του ανθρακικού ασβεστίου (BARTH κ.α. 1993)

2.3 Περιπτώσεις μαργαϊκών σχηματισμών στον ελληνικό χώρο

Μάργα του Πειραιά:

Χαρακτηριστικό των μαργών αυτών είναι η παρουσία διάφορων μεταβατικών λιθολογικών τύπων, οι οποίοι προκύπτουν κυρίως από τη μεταβολή του ποσοστού της άμμου και των ανθρακικών κλασμάτων (ασβεστίτη – δολομίτη). Παράλληλα βέβαια εκδηλώνονται και δευτερογενείς μεταβολές, που οφείλονται στη δράση παραγόντων εξαλλοίωσης και αποσάθρωσης (Ανδριανόπουλος, 1985). Επίσης χαρακτηρίζεται από υπερστερεοποίηση, σιμεντοποίηση, μικρή δραστηριότητα και σημαντική δευτερεύουσα διαπερατότητα τοπικά.

Οι μηχανικές τους ιδιότητες και συμπεριφορά επηρεάζονται από τη δευτερογενή, αυξημένη διαγένεση λόγω υπερκειμένων (τεταρτογενείς αποθέσεις), τη δράση του υπόγειου νερού, τη στρωσιγένεια, το αραιό δίκτυο διαρρήξεων και τη παρουσία ενστρώσεων αργιλοϊλύος ή χαλαρής άμμου.

Πιο συγκεκριμένα, η μάργα του Πειραιά εκπροσωπεί ως συνολικός όρος μία ακολουθία εναλλασσόμενων στρώσεων ασβεστιτικής μάργας, μαργαϊκού ασβεστολίθου, ασβεστιτικού ή/και μαργαϊκού ψαμμίτη, κροκαλοπαγούς με ενστρώσεις ιλυολίθου, αργιλοϊλύος, κιμωλίας, αργίλου κλπ.(Κωστόπουλος, 1985).

Οι μαργαϊκοί ψαμμίτες και οι μάργες χαρακτηρίζονται από διαφορές που προέκυψαν κατά την ιζηματογένεση και οφείλονται στην επικράτηση, κατά χρονικά διαστήματα, των περισσότερο ή λιγότερο λεπτομερών υλικών. Αντιθέτως, οι μάργες και οι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι χαρακτηρίζονται από διαφορές που προέκυψαν κατά την αποσάθρωση και οφείλονται στο εναπομένον κατά τη διάλυση ανθρακικό ασβέστιο.

Το ποσοστό του ανθρακικού ασβεστίου παρατηρήθηκε ότι αυξάνεται με το βάθος, κυρίως στα ανώτερα 15 m από την επιφάνεια, ενώ ο βαθμός συγκόλλησης καθώς και ο βαθμός διάλυσης λόγω αποσάθρωσης ελέγχουν τη συμπεριφορά των σχηματισμών αυτών. Στους υψομετρικά ανώτερους ορίζοντες, όπου και η ουσιαστική ζώνη αποσάθρωσης, το υλικό παρουσιάζεται γεωτεχνικά ως ενδιάμεσο μεταξύ «εδάφους» και «βράχου», με μεταβαλλόμενο και τοπικά εξαρτώμενο βαθμό συγκόλλησης και υπερστερεοποίησης.

Σύμφωνα με τα προαναφερθέντα, η μάργα του Πειραιά θα μπορούσε να αντιμετωπίζεται γεωτεχνικά ως μαλακός βράχος, ως υλικό δηλαδή του οποίου η συμπεριφορά δεν ελέγχεται ουσιαστικά από τη δρώσα τάση και με αυξανόμενη τη σημασία των ασυνεχειών, για μία «τιμή σύμβασης» της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη της τάξης των 4 MPa.

Μάργα Αχαΐας:

Τα Πλειο-πλειστοκαινικά λεπτομερή ιζήματα Αχαΐας διαχωρίστηκαν σε δύο διακριτές και στρωματογραφικά επάλληλες γεωτεχνικές ενότητες, την Ανώτερη Γεωτεχνική Ενότητα και την Κατώτερη (Κούκη, 2006).

Χαρακτηριστικό του σχηματισμού αυτού είναι ότι έχει έντονη συνδετική ύλη από άργιλο και ασβεστίτη, η οποία περιβάλλει τους συνήθως μικρού μεγέθους κόκκους των σύνδρομων ορυκτών (Koukis and Rozos και Rozos and Koukis, 1993). Ο τύπος της αργίλου και των ορυκτών, καθώς και η διάταξη στο σκελετό των υλικών φαίνεται να επηρεάζουν τα φυσικά χαρακτηριστικά αυτών, με αποτέλεσμα να χαρακτηρίζονται τόσο σαν πολύ στιφρά έως σκληρά εδάφη, όσο και σαν ασθενείς έως μέτρια σκληροί βράχοι. Ειδικότερα, αυτά της Ανώτερης ενότητας παρουσιάζουν τιμές ανθρακικού ασβεστίου από 4 έως 21,5% περίπου και με βάση αυτές χαρακτηρίζονται ως άργιλοι, μαργαϊκοί άργιλοι και αργιλόμαργες, ενώ της Κατώτερης ενότητας παρουσιάζουν τιμές από 6 έως 38% και χαρακτηρίζονται ως μαργαϊκές άργιλοι, αργιλόμαργες αργλικές μάργες και μάργες.

Μάργα Κορίνθου:

Σύμφωνα με των Αναγνωστόπουλο et al. (1990) πρόκειται για μια ασβεστιτική κυανότεφρη μάργα της οποίας το υλικό έχει ισχυρούς δεσμούς στη δομή του, που οφείλονται στη σιμεντοποίηση μεταξύ των ανεξάρτητων σωματιδίων, λόγω της

απόθεσης μεγάλης ποσότητας ανθρακικού υλικού κατά τη γέννηση του. Σαν συνέπεια τον παραπάνω, παρουσιάζει υψηλή στιφρότητα και μεγάλη συνοχή ($c=300\text{ kPa}$, $\varphi=33^\circ$) γεγονός που δικαιολογεί την ευστάθεια των υψηλών πρανών σε πολύ μεγάλη κλίση ($\sim 75^\circ$, σε ύψος 75m πάνω από το επίπεδο της θάλασσας). Χαρακτηριστικό αυτού του σχηματισμού είναι η μεγάλη περιεκτικότητά του σε ανθρακικό ασβέστιο (73-77%).



Σχ 2.3.1: Φωτογραφία από τη μάργα στον ισθμό της Κορίνθου.

Μάργα Ηρακλείου:

Σύμφωνα με τον Γ. Τσιαμπάο (1990) στην πόλη του Ηρακλείου στην πλειοψηφία δομείται σε θαλλάσιους μαργαϊκούς σχηματισμούς, οι οποίοι αποτελούνται από εναλλαγές στρώσεων ομογενών και μη ομογενών μαργών. Διακρίνονται δύο μαργαϊκοί ορίζοντες, η τεφρή έως κυανότεφρη μάργα και η λευκοκίτρινη έως καστανοκίτρινη μάργα.

Χαρακτηριστικό και των δύο είναι η ύπαρξη μοντμοριλλονίτη σε ποσοστά που φτάνουν το 25%, το στοιχείο αυτό αποτελεί ασφαλές κριτήριο για το χαρακτηρισμό των μαργών ως διογκούμενο έδαφος. Σημειώνουμε ότι η λευκοκίτρινη μάργα έχει μικρότερη τάση διόγκωσης.

Η μάργα του Ηρακλείου παρουσιάζει μεγάλες τιμές διατμητική αντοχής, και στους δύο ορίζοντες, λόγω της ορυκτολογικής της σύστασης (μεγάλο ποσοστό χαλαζία και μικριτικού ασβεστιτικού υλικού), και στη παρουσία κελυφών μικροαπολιθωμάτων.

Μάργα στο λιγνιτωρυχείο Πτολεμαΐδας:

Η γεωλογία της περιοχής χαρακτηρίζεται από την παρουσία των Νεογενών ιζημάτων που αποτελούνται από αμμοαργιλώδεις και μαργαϊκούς σχηματισμούς σε εναλλαγές με ορίζοντες λιγνίτη. Στη περιοχή του Λιγνιτωρυχείου εντοπίζονται τρεις μαργαϊκοί ορίζοντες.

Χαρακτηριστικό των μαργών της περιοχή είναι οι υψηλές τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων, που μπορούν να αποδοθούν στη μεγάλη περιεκτικότητα σε ασβεστιτικό υλικό (88.93- 97.11%).

Λιγνιτωρυχείο προσήλιου Ν. Κοζάνης:

Σύμφωνα με τον Π. Μαρίνο (2012) η μάργα στην περιοχή του Προσηλίου συνίσταται από λιμναίες νεογενείς αποθέσεις και υπόκεινται των τεταρτογενών αποθέσεων. Η σύσταση της είναι ιλυώδης και αμμώδης ενώ μέσα στην μάργα παρεμβάλλονται στρώματα λιγνίτη (ξύλιτη).

Στα ανώτερα στρώματα παρουσιάζεται με εναλλαγές καφεκίτρινη συνεκτική, ιλυώδης μάργα και αμμώδης μάργα ($c= 60 \text{ KPa}$, $\phi=24$, $\gamma=20\text{KN/m}^3$). Σε μεγαλύτερο βάθος (5-6m έως 25m) μεταπίπτουν σε γκριζοπράσινη έως γκρίζα συνεκτική μάργα ($c= 150\text{KPa}$, $\phi=35$, $\gamma=20\text{KN/m}^3$). Το κοίτασμα λιγνίτη βρίσκεται σε βάθη 30 - 70m. Μεταβατικά, απαντώνται λεπτά στρώματα ανθρακομιγούς μάργας ($c= 50\text{KPa}$, $\phi=35$, $\gamma=20 \text{ KN/m}^3$) και κιτρινωπής ιλυώδους μάργας με απολιθώματα. Το πάχος του απολήψιμου λιγνίτη είναι 2m έως 5.5m. Τα στρώματα αυτά έχουν συνολικό πάχος έως 100m.



Σχήμα 2.3.2: Εναλλαγές ιλυωδών και αμμωδών μαργών. Οι ενδιαστρώσεις μπορεί να μην έχουν συνεχή εξάπλωση, καθώς μπορεί να αποσφηνώνονται μέσα στο συνολικό σχηματισμό της μάργας (βλέπε καφεκίτρινη αμμώδημάργα) (Μαρίνος 2012).

Λιγνιτωρυχείο Λάβας, Σερβίων στον Ν. Κοζανης:

Στην περιοχή του λιγνιτωρυχείου η μάργα συναντάται σε πολλούς ορίζοντες ξεκινώντας από των ανώτερο προς των κατώτερο διακρίνουμε:

Την ερυθοκάστανη μάργα σύστασης αργιλοϊλύος τεταρτογενούς ηλικίας, που καλύπτουν επιφανειακά την περιοχή. Το αργιλικό κλάσμα στη σύσταση της μάργας της προσδίδει μεγάλη πλαστικότητα. Στην συνέχεια ακολουθεί σκληρή μάργα νεογενούς ηλικίας, ιλυώδους σύστασης, ανοικτότεφρου χρώματος και χαμηλής πλαστικότητας. Τέλος Μαργαϊκές άργιλοι και ιλύς παρεμβάλλονται ενδιάμεσα των στρώσεων του λιγνίτη (στείρα). Πρόκειται για σκληρές αργίλους χαμηλής πλαστικότητας. Οι ορίζοντες της μάργας μπορεί να χωριστούν σε δύο γεωτεχνικές ενότητες όπου:

- η ανώτερη μάργα εμφανίζεται αλλοιωμένη με απομειωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά ($c=75 \text{ KPa}$, $\phi=23^{\circ}$) και χαρακτηρίζεται ως πλαστική 13 - 25
- Κατώτερη μάργα που χαρακτηρίζεται υγιής και έχει μεγάλα μηχανικά χαρακτηριστικά ($c=200 \text{ KPa}$, $\phi=40^{\circ}$) και προσδιορίστηκε από μη πλαστική έως πλαστική(2-24).

	Ορυκτολογική σύσταση	Κοκκομετρία	Χαρακτηρισμός	Βιβλιογραφία
Μάργα Αχαΐας άνω ζώνη	CaCO ₃ 4-21.5%	4-65% άργιλος, 33-8% ιλύς, 0-48% άμμος, 0-8% χαλίκια.	Άργιλοι, μαργαϊκοί άργιλοι, αργιλομάργες.	Κούκη, Α. (2006). “Τεχνικογεωλογικές-γεωτεχνικές παράμετροι και μηχανική συμπεριφορά σκληρών εδαφών και μαλακών βράχων στο σχεδιασμό υπόγειων τεχνικών έργων”, Διδακτορική διατριβή, πανεπιστήμιο Πατρών.
Μάργα Αχαΐας κάτω ζώνη	CaCO ₃ 6-38%	4-55% άργιλος, 10-87% ιλύς, 0-41% άμμος, 0-7% χαλίκια.	Αργιλομάργες, αργιλικές μάργες, μάργες.	Κούκη, Α. (2006). “Τεχνικογεωλογικές-γεωτεχνικές παράμετροι και μηχανική συμπεριφορά σκληρών εδαφών και μαλακών βράχων στο σχεδιασμό υπόγειων τεχνικών έργων”, διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών.
Μάργα Ηρακλείου Κυανότεφρη	CaCO ₃ 28-82% Μοντμοριλλονίτης, ιλίτης, γλωρίτης. Χαλαζίας, μικριτικός ασβεστόλιθος	4-38% άργιλος, 4-14% άμμος, 65-90% ιλύς.	Ασβεστολιθικές μάργες.	Γ. Τσιαμπάος 1988, τεχνικογεωλογικοί χαρακτήρες των μαργών Ηρακλείου Κρήτης.
Μάργα Ηρακλείου Λευκοκίτρινη ως Καστανοκίτρινη	CaCO ₃ 15-26%, Μοντμοριλονίτης, ιλύτης, γλωρίτης. Χαλαζίας, μικριτικός ασβεστόλιθος	2-34% άργιλος, 2-34% άμμος, 45-62% ιλύς	Αργιλικές μάργες.	Γ. Τσιαμπάος 1988 τεχνικογεωλογικοί χαρακτήρες των μαργών Ηρακλείου Κρήτης.
Μάργα κορίνθου Μπλέ-γκρι	CaCO ₃ 73-77% Ιλύτης, γλωρίτης, μοντμοριλλονίτης.	Άμμος < 12%, ιλύς 75-84%, άργιλος 13-24%	Ασβεστόχος μάργα	Anagnostopoulos, A.G., et al. (1991). “Geotechnical properties of the Corinth Canal marls”. Geotechnical and Geological Engineering, 9, pp.1-26.

Μάργα Πτολεμαΐδας 1^{ος} ορίζοντας	CaCO ₃ 97.11%	12% άργιλος, 73% ιλύς, 15% άμμος,	Κιμωλιώδης ή ασβεστούχος μάργα.	Ε.Κ. ΣΤΕΙΑΚΑΚΗΣ 2003 'Συμπεριφορά ανοικτών εκσκαφών μεγάλου βάθους' έρευνα Γεωτεχνικών παραμέτρων και κινητικότητας εδαφών στο λιγνιτικό πεδίου Πτολεμαΐδας-Αμυνταίου
2^{ος} ορίζοντας	CaCO ₃ 88.93%	30-83% άργιλος, 15-60% ιλύς, 2-10% άμμος	Κιμωλιώδης ή ασβεστούχος μάργα.	Ε.Κ. ΣΤΕΙΑΚΑΚΗΣ 2003 'Συμπεριφορά ανοικτών εκσκαφών μεγάλου βάθους' έρευνα Γεωτεχνικών παραμέτρων και κινητικότητας εδαφών στο λιγνιτικό πεδίου Πτολεμαΐδας-Αμυνταίου
3^{ος} ορίζοντας	CaCO ₃ 95.1%	25-65% άργιλος, 33-70% ιλύς, 2-5% άμμος	Κιμωλιώδης ή ασβεστούχος μάργα.	Ε.Κ. ΣΤΕΙΑΚΑΚΗΣ 2003 'Συμπεριφορά ανοικτών εκσκαφών μεγάλου βάθους' έρευνα Γεωτεχνικών παραμέτρων και κινητικότητας εδαφών στο λιγνιτικό πεδίου Πτολεμαΐδας-Αμυνταίου
Μάργα Πειραιά	CaCO ₃ 60-70%, δολομιτης 3-20%, ιλιτίης 5-10%, χλωρίτης 3-5%, μοντ- μοριλλονίτης <1, χαλαζίας 5-8%.	Άργιλος 7-18%, ιλύς 34-68%, άμμος 17- 60%	Αργιλική- ασβεστολιθική μάργα	'Γεωτεχνικά προβλήματα της μάργας Πειραιά' ΤΕΕ, Αθήνα.

Πίνακας 2.3.1: Πίνακας που συγκεντρώνει στοιχεία για ορυκτολογική σύσταση, την κοκκομετρία και τον χαρακτηρισμό από περιπτώσεις μαργαϊκών σχηματισμών στον ελληνικό χώρο

<u>Φυσικά χαρακτηριστικά</u>	LL %	PL%	PI %	Ενεργότητα	Ξηρό φαινόμενο βάρος (kN/m ³)	Ειδικό βάρος	Λόγος κενών e_0	Πορώδες n %	W%	Βιβλιογραφία
Μάργα Αχαΐας άνω ζώνη	20-65	4-38	5-40	0.13-1.64	14.50- 19.70	2.57-2.72	0.344-0.925	21.5-50.6	2-39	Κούκη, Α. (2006). “Τεχνικογεωλογικές – γεωτεχνικές παράμετροι και μηχανική συμπεριφορά σκληρών εδαφών και μαλακών βράχων στο σχεδιασμό υπόγειων τεχνικών έργων”, διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών.
Μάργα Αχαΐας κάτω ζώνη	19-66	12-36	3-45	0.19-1.23	14.30-20.50	2.40-2.72	0.39-0.865	22.3-53.3	10-35	Κούκη, Α. (2006). “Τεχνικογεωλογικές – γεωτεχνικές παράμετροι και μηχανική συμπεριφορά σκληρών εδαφών και μαλακών βράχων στο σχεδιασμό υπόγειων τεχνικών έργων”, διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών.
Μάργα Ηρακλείου Κυανότεφρη	33.3-100.6	72.4-84.3	9.8-56.6	1.0-9.08	8.0-11.1	1.98-2.29	0.608-1.85		38-78	Γ. Τσιαμπάος 1988 Τεχνικογεωλογικοί χαρακτήρες των μαργών Ηρακλείου Κρήτης.
Μάργα Ηρακλείου Λευκοκίτρινη ως Καστανοκίτρινη	24.2-59.0	28.1-35.8	3.5-36.0	0.35-1.27	13.1-15.4	2.30-2.68	0.73-1.11		25-47	Γ. Τσιαμπάος 1988 Τεχνικογεωλογικοί χαρακτήρες των μαργών Ηρακλείου Κρήτης.
Μάργα κορίνθου Μπλέ-γκρι							0.60			Anagnostopoulos, A.G., et al. (1991). “Geotechnical properties of the Corinth Canal marls”. Geotechnical and Geological Engineering, 9, pp.1-26.
Μάργα Πτολεμαΐδας 1^{ης} Ορίζοντας	73.49-70.15	49.31-56.17	24.19-13.98		9.28-10.39	2.47-2.60	1.69	63	36.72-43.15	Ε.Κ. ΣΤΕΙΑΚΑΚΗΣ 2003 ‘Συμπεριφορά ανοικτών εκσκαφών μεγάλου βάθους’ έρευνα Γεωτεχνικών παραμέτρων και κινητικότητας εδαφών στο λιγνιτικό πεδίο Πτολεμαΐδας-Αμυνταίου

2^{ος} ορίζοντας	35.81-59.32	45.92-69.71	13.40-16.10		9.49-10.28	2.54-2.58	1.43-1.62	58-62	44.02-63.20	Ε.Κ. ΣΤΕΙΑΚΑΚΗΣ 2003 'Συμπεριφορά ανοικτών εκσκαφών μεγάλου βάθους' έρευνα Γεωτεχνικών παραμέτρων και κινητικότητας εδαφών στο λιγνιτικό πεδίο Πτολεμαΐδας-Αμυνταίου
3^{ος} ορίζοντας	55.60-62.47	31.72-52.90	7.81-23.88		9.58-12.19	2.55-2.58	1.07-1.64	52-62	36.97-47.67	Ε.Κ. ΣΤΕΙΑΚΑΚΗΣ 2003 'Συμπεριφορά ανοικτών εκσκαφών μεγάλου βάθους' έρευνα Γεωτεχνικών παραμέτρων και κινητικότητας εδαφών στο λιγνιτικό πεδίο Πτολεμαΐδας-Αμυνταίου
Μάργα Πειραιά	11-82 %	8-51%	1-55%		14-23.8 MN/m ³	22-34 MN/m ³	6.5-48%		6.5-48%	'Γεωτεχνικά προβλήματα της μάργας Πειραιά' ΤΕΕ, Αθήνα.
Λιγνιτωρυχείο Λάβας Σερβίων μαργα εξαλλοιωμένη	-	13-25	-	-	=	=	=	-	-	Προυτζοπουλος, Γ. 'Ανάλυση κατολισθητικών φαινομένων πρανούς λιγνιτωρυχείου σε μαργαϊκούς σχηματισμούς με εξαιρετικά χαμηλή αντοχή'
Λιγνιτωρυχείο Λάβας Σερβίων Υγής μάργα	-	2-24	-	-	=	=	=	-	-	
Προσήλιο μαλακή καφέ ιλύοδης άργιλος με χάλικες						19				Μαρίνος, (2012), Έκθεση επί της ευσταθείας των πρανών κατά την εκμετάλλευση στο λιγνιτωρυχείο προσήλιου Ν. Κοζάνης της εταιρείας ΜΕ.Τ.Ε. Α.Ε.
Προσήλιο εναλλαγές καφεκίτρινης συνεκτικής ιλύοδους και αμμώδους μάργας						20				Μαρίνος, (2012), Έκθεση επί της ευσταθείας των πρανών κατά την εκμετάλλευση στο λιγνιτωρυχείο προσήλιου Ν. Κοζάνης της εταιρείας ΜΕ.Τ.Ε. Α.Ε.

Προσήλιο γκριζοπράσινη έως γκρίζα συνεκτική μάργα						20				Μαρίνος , (2012), Έκθεση επί της ευσταθείας των πτανών κατά την εκμετάλλευση στο λιγνιτωρυχείο προσήλιου Ν. Κοζάνης της εταιρείας ΜΕ.Τ.Ε. Α.Ε.
Προσήλιο Ξυλίτης και ανθρακομιγείς μάργες						20				Μαρίνος , (2012), Έκθεση επί της ευσταθείας των πτανών κατά την εκμετάλλευση στο λιγνιτωρυχείο προσήλιου Ν. Κοζάνης της εταιρείας ΜΕ.Τ.Ε. Α.Ε.

Πίνακας 2.3.2: Φυσικά χαρακτηριστικά από περιπτώσεις μαργαϊκών σχηματισμών στον ελληνικό χώρο

<u>Παράμετροι αντοχής</u>	Αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη q_{max} KPa	Μέτρο ελαστικότητας E MPa	Συντελεστής συμπίεσης - στότητας C_c	Συντελεστής Διαπερατότητας K	Παραμένουσα γωνία τριβής ϕ'	c' KPa	c KPa	ϕ	Βιβλιογραφία
Μάργα Αχαΐας άνω ζώνη	26-1010 MT 312	180	0.057-0.382		21.0	55.33	14-290	7-33	Κούκη, Α. (2006). “Τεχνικογεωλογικές – γεωτεχνικές παράμετροι και μηχανική συμπεριφορά σκληρών εδαφών και μαλακών βράχων στο σχεδιασμό υπόγειων τεχνικών έργων”, διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών.
Μάργα Αχαΐας κάτω ζώνη τεφρές- τεφροκουανές	35-1700 MT 350	200	0.043-0.268		27.62	40.46	65-255	27-39	Κούκη, Α. (2006). “Τεχνικογεωλογικές – γεωτεχνικές παράμετροι και μηχανική συμπεριφορά σκληρών εδαφών και μαλακών βράχων στο σχεδιασμό υπόγειων τεχνικών έργων”, διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών.
Μάργα Ηρακλείου Κυανότεφρη	21-1200 MT 307		0.091-0.326	σχεδόν αδιαπέρατοι σχηματισμοί	30-37		47-150	21-32	Γ. Τσιαμπάος 1988 Τεχνικογεωλογικοί χαρακτήρες των μαργών ηρακλείου Κρήτης. Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών
Μάργα Ηρακλείου Λευκοκίτρινη ως Καστανοκίτρινη	63-1106 MT 376		0.083-0.250	σχεδόν αδιαπέρατοι σχηματισμοί	26-33		6-75	27-41	Γ. Τσιαμπάος 1988 Τεχνικογεωλογικοί χαρακτήρες των μαργών ηρακλείου Κρήτης. Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών
Μάργα κορίνθου Μπλέ-γκρι					26.5		300	33.3	Anagnostopoulos, A.G., et al. (1991). “Geotechnical properties of the Corinth Canal marls”. Geotechnical and Geological Engineering, 9, pp.1-26.

Μάργα Πτολεμαΐδας 1^{ος} Ορίζοντας	38	0.085-0.326	0.067-0.326	$1-2 * 10^{-7}$	22.10-24.13		217	29	Ε.Κ. ΣΤΕΙΑΚΑΚΗΣ 2003 'Συμπεριφορά ανοικτών εκσκαφών μεγάλου βάθους' έρευνα Γεωτεχνικών παραμέτρων και κινητικότητας εδαφών στο ληνιτικό πεδίου Πτολεμαΐδας-Αμυνταίου
2^{ος} ορίζοντας	22-40	0.081-0.215	0.067-0.326	$1-2 * 10^{-7}$	22.29-24.42		102	37	Ε.Κ. ΣΤΕΙΑΚΑΚΗΣ 2003 'Συμπεριφορά ανοικτών εκσκαφών μεγάλου βάθους' έρευνα Γεωτεχνικών παραμέτρων και κινητικότητας εδαφών στο ληνιτικό πεδίου Πτολεμαΐδας-Αμυνταίου Διακτορική διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης
3^{ος} ορίζοντας	25-39	0.067-0.217	0.067-0.326	$1-2 * 10^{-7}$	22.26-23.55		50	23	Ε.Κ. ΣΤΕΙΑΚΑΚΗΣ 2003 'Συμπεριφορά ανοικτών εκσκαφών μεγάλου βάθους' έρευνα Γεωτεχνικών παραμέτρων και κινητικότητας εδαφών στο ληνιτικό πεδίου Πτολεμαΐδας-Αμυνταίου Διακτορική διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης
Μάργα Πειραιά	0.02-2.8 MN/m ²		15-180 MN/m ²	Τάξη του 10^{-4}			0.1-0.3 MN/m ²	10-33	'Γεωτεχνικά προβλήματα της μάργας Πειραιά' ΤΕΕ, Αθήνα.
Προσήλιο μαλακή καφέ ιλύοδης άργιλος με χάλικες					10	30			
Προσήλιο εναλλαγές καφεκίτρινης συνεκτικής ιλύοδους και αμμώδους μάργας					60	24			

Προσήλιο Γκριζοπράσινη έως γκρίζα συνεκτική Μάργα					15	35			
Προσήλιο Ξυλίτης και ανθρακομιγείς μάργες					50	35			
Λιγνιτωρυχείο Λάβας Σερβίων μαργα εξαλλοιωμένη							75	23	Προυντζοπουλος, Γ. 'Ανάλυση κατολισθητικών φαινομένων πρηνούς λιγνιτωρυχείου σε μαργαϊκούς σχηματισμούς με εξαιρετικά χαμηλή αντοχή'
Λιγνιτωρυχείο Λάβας Σερβίων Υγιής μάργα							200	40	

Πίνακας 2.3.3: Μηχανικά χαρακτηριστικά από περιπτώσεις μαργαϊκών σχηματισμών στον ελληνικό χώρο

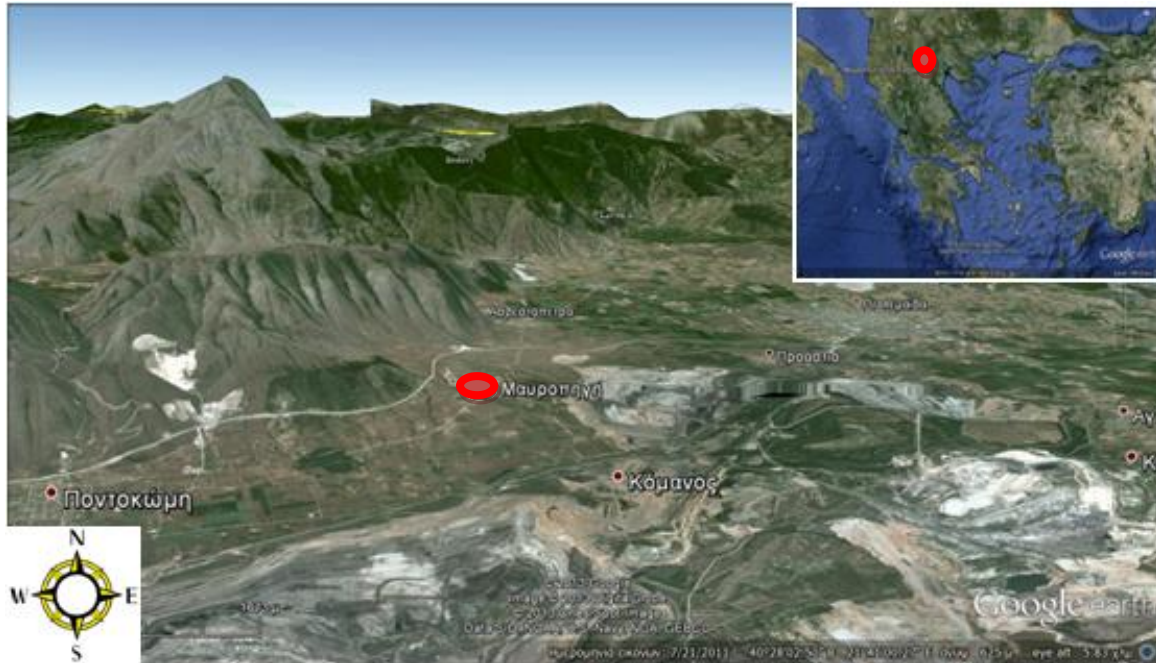
3 ΕΞΕΤΑΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΑΥΡΟΠΗΓΗΣ Ν. ΚΟΖΑΝΗΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα εξεταστούν τα γεωλογικά και τεκτονικά στοιχεία τόσο στην στενή περιοχή του οικισμού της Μαυροπηγής όσο και στην ευρύτερη περιοχή της λεκάνης καθώς επίσης και το υδρογεωλογικό καθεστώς που επικρατεί στην περιοχή. Οι πληροφορίες αυτού του κεφαλαίου θα χρησιμοποιηθούν για την κατανόηση και τη δημιουργία του μοντέλου της περιοχής της Μαυροπηγής το οποίο στη συνέχεια θα εφαρμοστεί σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων.

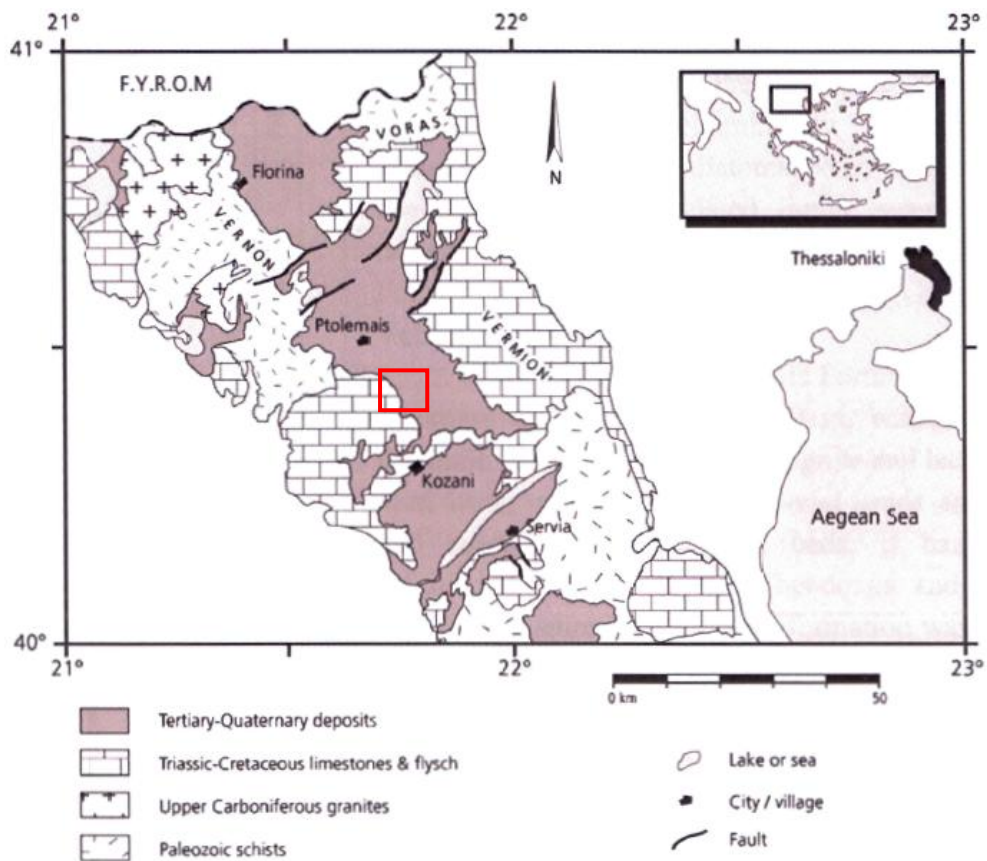
3.1 Γεωγραφική τοποθέτηση και γεωμορφολογία της περιοχής έρευνας.

Η λεκάνη της Πτολεμαΐδας είναι μία επιμήκης λιμναία λεκάνη που τοποθετείται στο βόριο όριο της ανατολικής μεσογείου, 100 km δυτικά της Θεσσαλονίκης, στην βορειοδυτική Ελλάδα. Η λεκάνη τοποθετείται περίπου 700m πάνω από το επίπεδο της θάλασσας. Είναι τμήμα μιας μεγάλης τεκτονικής δομής (τεκτονικής τάφρου) μήκους >120km που εκτείνεται από το Μοναστήρι (πρώην Γιουγκοσλαβική Δημ. Μακεδονίας) μέχρι την Ελασσόνα, νότια του Αλιάκμονα ποταμού και έχει διεύθυνση ΒΒΔ-ΝΝΑ. Η τάφρος δημιουργήθηκε κατά το νεογενές υπό την επίδραση ρηξιγενούς τεκτονικής. Συγκεκριμένα κατά το Ανώτερο Πλειόκαινο, εφελκυστικές τάσεις διεύθυνσης ΒΔ-ΝΑ χώρισαν το αρχικό βύθισμα σε επιμέρους λεκάνες, που οριοθετούνται από ΒΑ-ΝΔ ρήγματα, έτσι δημιουργήθηκαν οι λεκάνες Φλώρινας, Αμυνταίου-Πτολεμαΐδας, Κοζάνης-Σερβίων και Ελασσόνας.

Συγκεκριμένα η Μαυροπηγή ανήκει στην λεκάνη της Πτολεμαΐδας και εκτείνεται στις νοτιοανατολικές παρυφές του λόφου Αγίου Μάρκου, ο οποίος είναι οικισμός που βρίσκεται 21km ΒΔ της πόλης της Κοζάνης σε υψόμετρο 740 μ. του νομού Κοζάνης.



Σχήμα 3.1.1: Τοποθέτηση της περιοχής Μαυροπηγής. (εικόνα από Google earth)



Σχήμα 3.1.2: Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης της λεκάνης Φλώρινας – Πτολεμαΐδας- Σέρβια (IGME και Streenbrink et al., 2000)

3.2 Γεωτεκτονική τοποθέτηση της ευρύτερης περιοχής έρευνας στην Πελαγονική ζώνη

Η ευρύτερη περιοχή μελέτης δομείται από πετρώματα της Πελαγονικής και Υποπελαγονικής γεωτεκτονικής ζώνης. Ο όρος πελαγονική ζώνη καθιερώθηκε από τους Brunn (1956) και Aubouin (1957) στα πλαίσια της διαίρεσης της Ελλάδας αλπικές ισοπικές ζώνες.

Η Πελαγονική ζώνη με διεύθυνση ΒΒΔ –ΝΝΑ εμφανίζεται στις περιοχές της ανατολικής και βόρειας Θεσσαλίας, της δυτικής Μακεδονίας, και συνεχίζεται προς βόρεια στην Αλβανία με το όνομα ζώνη Karab και προς την Π.Γ.Δ.Μ με το όνομα Goliza. Τα βασικά της γνώρισμα είναι ότι οι σχηματισμοί του υποβάθρου της όσο και οι προοφιολιθικοί σχηματισμοί είναι μεταμορφωμένοι. Η πελαγονική ζώνη συγκροτείται από το κρυσταλλοσχιστώδες υπόβαθρο, τους γνευσιωμένους γρανίτες, τα ημιμεταμορφωμένα Περμο-τριάδικα πετρώματα, τα δύο ανθρακικά καλλύματα Τριάδικου- Ιουρασικού, τους οφειόλιθους και τα ανωκριτιδικά επικλυσιγενή ιζήματα.

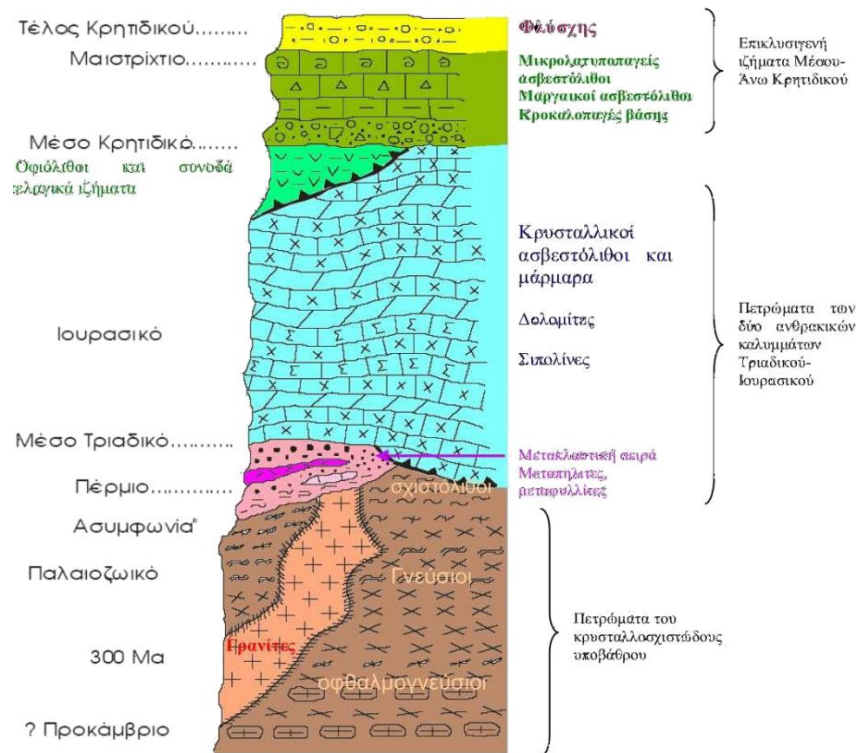
Κατώτερο γεωλογικό υπόβαθρο: τα κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα του υποβάθρου έχουν πολύ μεγάλη εξάπλωση στο χώρο της Πελαγονικής και αποτελούν το κύριο δομικό στοιχείο της ζώνης. Συνίσταται κυρίως από κρυσταλλικούς σχιστολίθους, οφιολίθους, γρανίτες, μαρμαριγιακούς χαλαζίτες και γνευσίους, ενώ χαρακτηρίζονται από έντονη παραμόρφωση και εμφανίζουν εντυπωσιακές πτυχώσεις

Πελαγονική ενότητα: περιλαμβάνει τους παρακάτω σχηματισμούς αναφερόμενοι από τον παλαιότερο προς τον νεώτερο:

- Τριάδικους σχιστολίθους με παρεμβολές ηφαιστειακών πετρωμάτων. Τοποθετούνται ασύμφωνα πάνω στο κρυσταλλοσχιστώδες υπόβαθρο και τους γρανίτες..
- Τεφρούς και κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους και δολομίτες ηλικίας μέσου Τριάδικου έως Λιασίου. Στα ανώτερα μέλη της ακολουθίας παρεμβάλλεται ένας ηφαιστειοϊζηματογενής σχηματισμός (σχιστοψαμμιτοκερατολιθική διάπλαση) που περιλαμβάνει οφιολιθικά τεμάχια.
- Μεσοστρωματώδεις έως λεπτοστρωματώδεις ασβεστόλιθους, με γενική ηλικία άνω Ιουρασικό έως κάτω Κρητιδικό.
- Βασικό κροκαλοπαγές επίκλησης, σε εναλλαγές με μαργαϊκούς ασβεστόλιθους

- Παχυστρωματώδεις ασβεστόλιθους άνω Κρητιδικής ηλικίας.
- Τυπικός φλύσχος που αποτελείται από χονδροκλαστικούς σχηματισμούς, με ηλικία άνω Κρητιδικό – Ηώκαινο.

Οι Μεταλλικοί σχηματισμοί επικάθονται ασύμφωνα στα κρυσταλλισχιστώδη και ασβεστιτικά πετρώματα και περιλαμβάνουν Νεογενή ιζήματα και τεταρτογενείς αποθέσεις.



Σχήμα 3.2.1: Συνοπτική λιθοστρωματογραφική- τεκτονική στήλη της Πελαγονικής ζώνης στη Δυτική Μακεδονία (Μουντράκης 1986)

Πιο συγκεκριμένα οι μετααλπικοί και αλπικοί σχηματισμοί της Πελαγονικής ζώνης αναλύονται παρακάτω:

Μετααλπικοί σχηματισμοί:

Αποθέσεις ανώτερου Πλειστόκαινου- Ολόκαινου

Τα νεότερα ιζήματα ηλικίας ανώτερου πλειοκαινου ολόκαινου είναι κυρίως κώνιοι κορημάτων διαφόρων γενεών (αργιλικά υλικά που περιέχουν ασβεστολιθικές κυρίως λατύπες), υλικά ποτάμιων αναβαθμίδων και σύγχρονες αλλουβιακές προσχώσεις (αργιλικά έως ιλυοαμμώδοι υλικά που περιέχουν χαλίκια και κροκάλες). Πρόκειται για

ασύνδετα κυρίως υλικά που δομούν σε μικρό πάχος τις ευρύτερες κοίτες των ποταμών και χειμάρρων, καθώς και τις χαμηλότερες μορφολογικά περιοχές.

Πλειο-πλειστοκαινικές αποθέσεις.

Οι Πλειο- Πλειστοκαινικές αποθέσεις στην ευρύτερη περιοχή επικάθονται ασύμφωνα στα υποκείμενα Μεσοελληνικά ιζήματα, ενώ η απόθεση των ιζημάτων αυτών φαίνεται να έγινε απευθείας πάνω στο αλπικό υπόβαθρο. Μπορούν να διακριθούν στις λιμναίες - ποταμολιμναίες αποθέσεις της λεκάνης Κοζάνης – Σερβιών και τις ποταμοχειμάρρειες ποταμολιμναίες αποθέσεις της λεκάνης Γρεβενών.

Μεσοελληνική αύλακα.

Τα ιζήματα της Μεσοελληνικής αύλακας έχουν αποτεθεί ασύμφωνα πάνω στο πτυχωμένο αλπικό υπόβαθρο κατά την διάρκεια του Ολιγόκαινου – Μειόκαινου, το υλικό ιζηματογένεσης προερχόταν από της αναδυόμενες οροσειρές Πίνδου και Πελαγονικής που την περιέβαλαν. Πρόκειται για εναλλαγές θαλάσσιων, λιμναίων και ποταμοχειμάρρειων ιζημάτων, που οφείλονται στη συνεχή βύθιση της λεκάνης. Η οροσειρά του Βούρνου και η Βουνάσα αποτελούν το ανατολικό όριο της αύλακας.

Αλπικοί σχηματισμοί:

Μεσο-Άνω κρητιδικά επικλυσιογενή ιζήματα

Πρόκειται για ιζήματα ότι αποτέθηκαν επικλυσιογενώς, κυρίως πάνω στους οφιόλιθους, κατά το Μέσο Άνω κρητικό. Είναι κυρίως ασβεστόλιθοι που έχουν στη βάση τους χαρακτηριστικό κροκαλοπαγές βάσης. Προς τα πάνω τα άνω κρητικά ιζήματα μετατρέπονται σε φλύσχη ηλικίας Μαιστριχτίου- Παλαιοκαίνου.

Ασβεστολιθικά πετρώματα Άνω Ιουρασικού

Οι ασβεστόλιθοι αυτής της ενότητας δεν διαχωρίζονται από τους άνω κρητιδικούς ασβεστόλιθους και συνήθως χαρτογραφούνται ως ενιαίος σχηματισμός. Πρόκειται για μαζώδεις ασβεστόλιθους, σχετικά ρηχού περιβάλλοντος, οι οποίοι βρίσκονται σε επαφή με τα υποκείμενα οφιολιθικά πετρώματα και τα υπερκείμενα ασβεστολιθικά του Κρητιδικού.

Οφιολιθικά και συνοδά ιζήματα βαθιάς θάλασσας

Στη Πελαγονική ζώνη παρατηρούνται επωθημένες οφιολιθικές μάζες μαζί με συνοδά ιζήματα βαθιάς θάλασσας. Στο δυτικό περιθώριο της Πελαγονικής βρίσκεται το οφιολιθικό σύμπλεγμα Βούρνου, που τοποθετείται τεκτονικά πάνω στο Τριαδικοιουρασικό ανθρακικό κάλυμμα του δυτικού περιθωρίου. Τα πετρώματα αυτά αποτελούνται κυρίως από χαρτσβουργίτες, δουνίτες, σερπεντινίτες, γάββρους, πυροξενίτες, διαβάσες, pillow λαβες. Σε κάποιες περιοχές διατηρείται πολύ καλά παρά τεκτονική καταπόνηση που έχει υποστεί και ο σχηματισμός του mélange. Σχηματίζεται από την τοποθέτηση οφιολίθων, περιέχοντας ασβεστολιθικά τεμάχια Τριαδικής και Ιουρασικής ηλικίας, οφιολίθους, κερατολίθους και υλικό πλήρωσης (κυρίως αργιλικό). Τα συνοδά ιζήματα των οφιολίθων αποτελούνται από κερατολίθους, αργιλικούς σχιστολίθους, πελαγικούς ασβεστόλιθους και κλαστικά ιζήματα. Πρόκειται για ιζήματα βαθιάς θάλασσας που αποτέθηκαν στον ωκεάνιο πυθμένα της Νεοτηθύος, τα οποία τοποθετήθηκαν μαζί με τους οφιολίθους κατά την επώθηση τους στο ηπειρωτικό περιθώριο της Πελαγονικής.

Τριαδικά - Ιουρασικά πετρώματα

Πρόκειται για τα ανθρακικά πετρώματα που σχηματίστηκαν κατά την κύρια ιζηματογένεση, που έλαβε χώρα κατά την περίοδο του Τριαδικού- Ιουρασικού. Στη περιοχή του Βουρινού είναι ασβεστόλιθοι κρυσταλλικοί, παχυστρωματώδεις, τεκτονισμένοι με καλή στρώση και παρεμβολές δολομιτών και δολομιτικών ασβεστόλιθων. Αποτελούν το τεκτονικό κάλυμμα πάνω στο οποίο έγινε η τοποθέτηση των οφιολίθων. Οι κλίσεις κυμαίνονται από 30⁰ έως 80⁰ και είναι έντονα πτυχωμένοι.

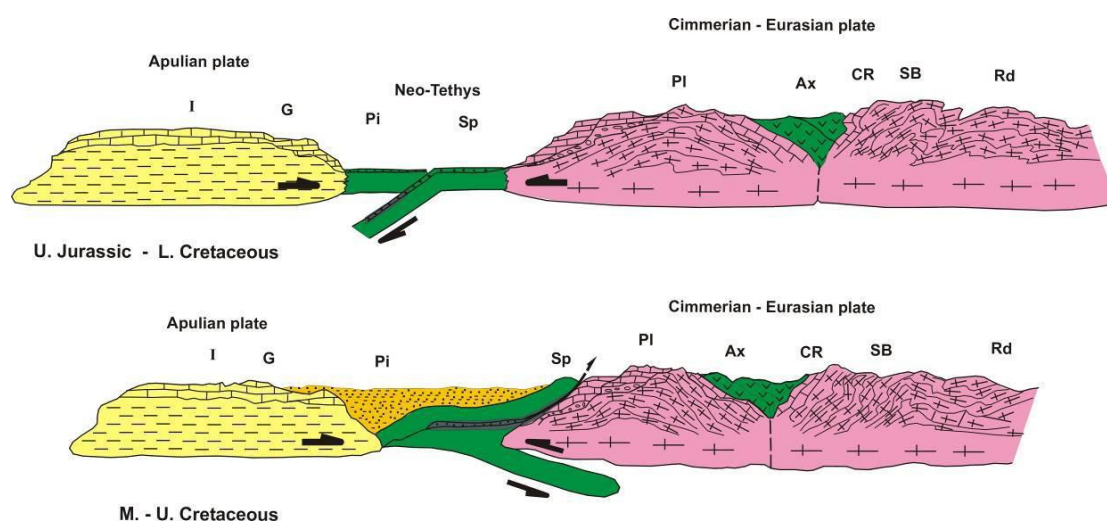
Παλαιοζωικά πετρώματα.

Τα Παλαιοζωικά κρυσταλλωσχιστώδη πετρώματα αποτελούνται από γνευσίους, αμφιβόλους, σχιστολίθους και φυλλίτες, στα οποία έχουν διεισδύσει και μεγάλοι γρανιτικοί όγκοι. Χαρακτηρίζονται από έντονη παραμόρφωση και εμφανίζουν εντυπωσιακές πτυχώσεις.

3.3 Γεωτεκτονική εξέλιξη της ευρύτερης περιοχής μελέτης.

Η ευρύτερη περιοχή Κοζάνης –Γρεβενών της Δυτικής Μακεδονίας έχει υποστεί πολλές τεκτονικές διεργασίες στη διάρκεια της εξέλιξης του γεωλογικού χρόνου οι οποίες προκάλεσαν διάφορες παραμορφώσεις των πετρωμάτων των σχηματισμών της και του ανάγλυφου της.

Πιο συγκεκριμένα κατά τη δεύτερη ορογενετική περίοδο Ανώτερου Ιουρασικού-Κάτω Κρητιδικού οι οφιολιθικές μάζες, των ωκεάνιων περιοχών των ζωνών Αξιού (Ax) και Υποπελαγονικής (Sp) αντίστοιχα, επωθήθηκαν πάνω στα ανθρακικά πετρώματα των περιθωρίων της Πελαγονικής (PI) κατά το μέσο Ιουρασικό γεγονός το οποίο συνδέεται με την καταστροφή των ωκεάνιων περιοχών Αξιού και Υποπελαγονικής – Πίνδου (Pi). Οι παραμορφωτικές φάσεις λόγω των επωθήσεων συνδέονται με τη δημιουργία αντίστοιχων σχιστοτήτων και πτυχώσεων στα πετρώματα, δηλαδή η επώθηση είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία πτυχών υποϊσοκλινών έως ισοκλινών αξονικής διεύθυνσης ΒΔ-ΝΑ (150° - 170°) και συνοδεύονται από σχιστότητα δευτερογενή μεν για το κρυσταλλωσχιστώδες υπόβαθρο αλλά κύρια για τα πετρώματα του Άνω Παλαιοζωικού και Τριαδικοιουρασικού. Συνδέονται επίσης με την ύπαρξη παγιδευμένων τεμαχών συνοδών ωκεάνιων ιζημάτων (σχιστόλιθοι), καθώς και οφιολιθικών μειγμάτων (mélange).

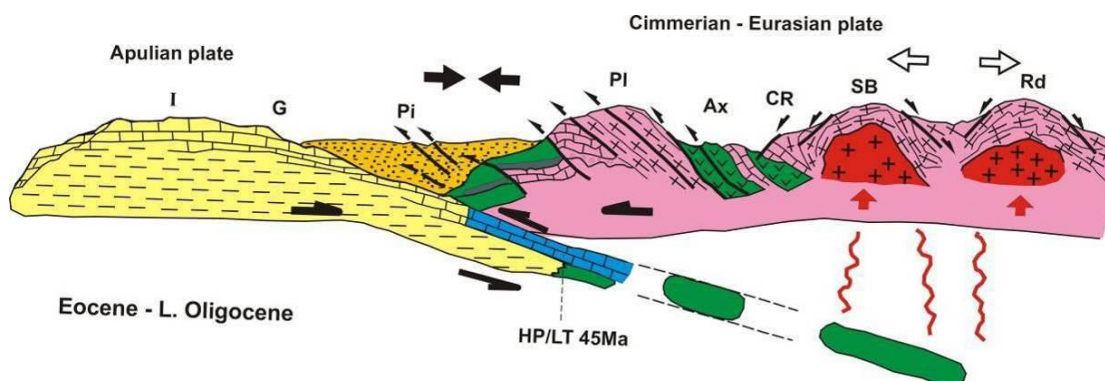


Σχήμα 3.3.1: Αναπαράσταση της γεωδυναμικής εξέλιξης των ελληνίδων κατά τη διάρκεια Α. Ιουρασικού- Κ. Κρητιδικού Μ.-Α. Κρητιδικού, της πρώτης περιόδου της Αλπικής ορογένεσης (Μουντράκης 1988).

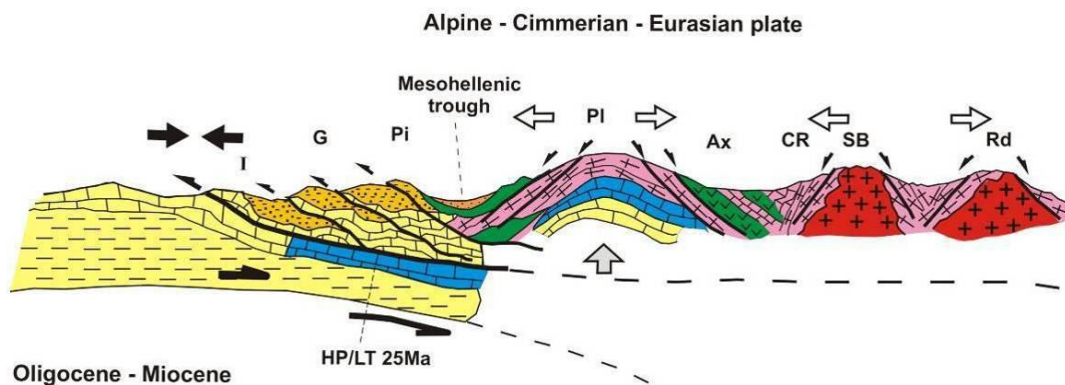
Ακολούθως η Τρίτη ορογενετική περίοδος, τέλη Κρητιδικού- Μέσου Ηωκαίνου , με την οριστική ανάδυση της Πελαγονικής, προκάλεσε πτυχές ανοιχτές ισοπαχείς γενικής αξονικής διεύθυνσης ΒΔ-ΝΑ με απόκλιση προς τα ΝΔ και μια άλλη με πτυχές κλειστές ανοιχτές αξονικής διεύθυνσης ΒΑ-ΝΔ (70⁰-80⁰) και απόκλιση προς τα ΝΑ. Τέλος στην περίοδο Ολιγόκαινου – Μειόκαινου έγινε η τελική παραμόρφωση των σχηματισμών προκαλώντας πτυχές κάμψης πολύ ανοιχτές και τύπου knick γενικής αξονικής διεύθυνσης Β-Ν.

Αποτέλεσμα των πτυχώσεων του τριτογενούς που έδρασαν στην ήδη αναδυόμενη οροσειρά της Πελαγονικής, ήταν η λεπίωση των σχηματισμών και η επώθηση των λεπίων από Α προς Δ. Αποτέλεσμα της λεπίωσης είναι η αναστροφή των σχηματισμών, ακόμα και πλήρης αναστροφή της δομής με τους βαθύτερους ορίζοντες να επιπεύουν προς τα δυτικά τους ανώτερούς τους.

Το σημαντικό εφελκυστικό γεγονός που συνέβη στον ευρύτερο χώρο κατά το Κάτω Ολιγόκαινο και κατά διεύθυνση ΑΒΑ- ΔΝΔ είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία της Μεσοελληνικής αύλακας από τη συνεχή ρηγμάτωση ταφρογένεση, όπου και αποτέθηκαν τα Μεσοελληνικά ιζήματα. Κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης δημιουργήθηκαν μεγάλα κανονικά ρήγματα μικρής γωνίας κλίσης, τα οποία εκτός τη δημιουργία της αύλακας επηρέασαν σε βάθος τις οφιολιθικές μάζες σε συνθήκες πλαστικές - ημιπλαστικές και προκάλεσαν επίσης την τοποθέτησή τους στις θέσεις όπου πλέον βρίσκονται.



Σχ 3.3.2: Τομή που αναπαριστά τη γεωδυναμική εξέλιξη των Ελληνίδων κατά τη διάρκεια Ηωκαίνου-Κάτω Ολιγόκαινου.(Μουντράκης 1988).



Σχήμα 3.3.3: Τομή που αναπαριστά τη γεωδυναμική εξέλιξη των Ελληνίδων κατά τη διάρκεια Ολιγοκαίνου - Μειώκαινο. (Μουντράκης 1988).

3.4 Γεωλογία της περιοχής μελέτης (λεκάνη Φλώρινας – Πτολεμαΐδας- Σερβίων).

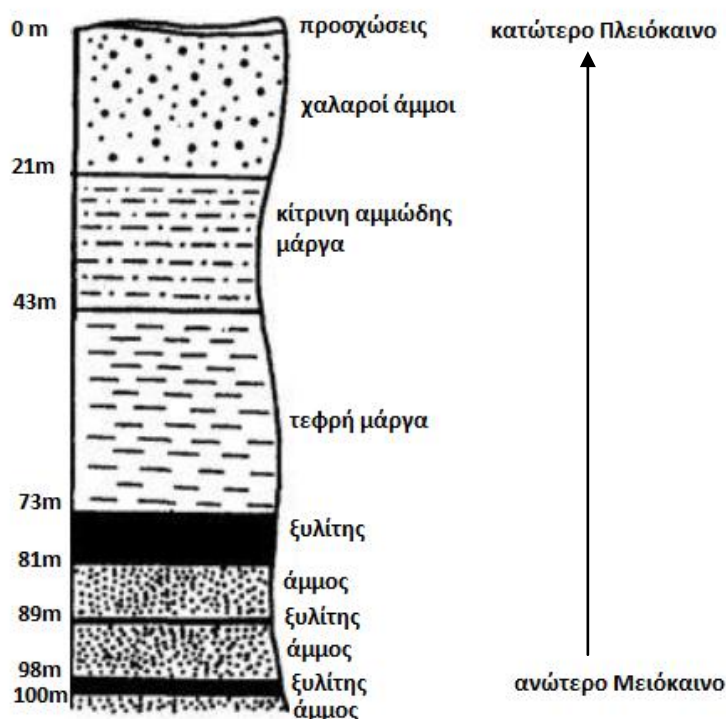
Το υπόβαθρο τη λεκάνης συνίσταται από προμεσοζωικούς και μεσοζωικούς σχηματισμούς μεταμορφωμένους ή μη, ενώ η λεκάνη είναι πληρωμένη με νεογενή και τεταρτογενή ιζήματα. Το υπόβαθρο της λεκάνης στα δυτικά και βόρεια περιθώρια (Άσκιο όρος και πρόβουνι) είναι κρυσταλλοσχιστώδες και εντάσσεται Πελαγονική ζώνη, συγκροτείται από σύστημα παλαιοζωικών κρυσταλλοσχιστώδων πετρωμάτων ποικίλης πετρολογικής σύστασης (γνεύσιοι, κρυσταλλικοί σχιστόλιθοι, χαλαζίτες, φυλλίτες) και ποικίλου βαθμού μεταμόρφωσης (μαρμαρυγιακοί, αμφιβολιτικοί, αργιλικοί, σερικιτικοί και χλωριτικοί σχιστόλιθοι). Τα ανατολικά και νότια περιθώρια (Βέρμιο όρος και πρόβουνι) συγκροτούνται από σχηματισμούς του μεσοζωικού καλύμματος της Πελαγονικής ζώνης και από τα επωθημένα λέπια της ζώνης Αξιού (Αναστασόπουλος και Κούκουζας, 1972). Διακρίνονται κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι και δολομίτες Τριαδικοιουρασικής ηλικίας, σχιστοκερατόλιθοι με οφιόλιθους και μεσοϊουρασικής ηλικίας, απολιθωματοφόροι ασβεστόλιθοι μέσο - άνω κρητιδικής ηλικίας και η σειρά κλίνει προς τα πάνω με το μαιστρίχτιο φλύσχη (Αναστασόπουλος και Μπρούσουλης, 1973, Κούκουζας κ.α. 1979).

Στη συνέχεια ακολουθούν τα νεογενή ιζήματα που επικάθονται ασύμφωνα επάνω στα μεσοζωικά πετρώματα του υποβάθρου και είναι σχεδόν αποκλειστικά λιμναίας προέλευσης, μάργες, άργιλοι, άμμοι κ.α. που περικλείουν τους λιγνίτες και συνοδεύονται από ποταμοχειμάρριες ή χερσαίες αποθέσεις. (Παυλίδης, 1985). Η ηλικία τους τοποθετείται γενικά στο Ανώτατο Μειόκαινο –Πλειόκαινο. Κατά το νεογενές στις αβαθείς λίμνες που είχαν δημιουργηθεί, λόγω της τεκτονικής που

έδρασε στην περιοχή, δημιουργήθηκε κατάλληλο περιβάλλον για τον σχηματισμό λιγνίτη. Ο πυθμένας των ελών ακολουθούσε αργή, συνεχή βύθιση όπου συγκεντρώθηκαν μεγάλες ποσότητες φυτών και λειψάνων, με αποτέλεσμα να προκύψουν λιγνιτικά στρώματα. Κατά περιόδους η βύθιση του πυθμένα άλλαζε ρυθμό βύθισης με αποτέλεσμα την διακοπή του σχηματισμού λιγνίτη και την δημιουργία μαργών και άλλων στείρων ιζημάτων.

Οι νεότερες αποθέσεις της λεκάνης σύμφωνα με τον Παυλίδη (1985) χωρίζονται σε τρεις σχηματισμούς:

- i) Τον σχηματισμό της βάσης, όπου ανήκουν τα βαθύτερα στρώματα των νεογενών ιζημάτων της λεκάνης, τα οποία και δεν εμφανίζονται επιφανειακά. Ο σχηματισμός αυτός αποτελείται κυρίως από κλαστικά ιζήματα.
- ii) Τον σχηματισμό Βεγόρας, ο οποίος χαρακτηρίζεται από τη λιγνιτοφορία τύπου ξυλίτη που φιλοξενεί. Στην στρωματογραφική στήλη που ακολουθεί βλέπουμε την λιθολογία του σχηματισμού, οποίος αποτελείται από άμμο, ξυλίτη και μάργα.



Σχήμα 3.4.1: Λιθολογική στήλη του σχηματισμού Βεγόρας στο λιγνιτωρυχείο Βεγόρα (Παυλίδης 1985)

iii) Τέλος τον σχηματισμό Πτολεμαΐδας, όπου σύμφωνα με τον Παυλίδη (1985), τα λιγνιτικά στρώματα τύπου γαιώδους λιγνίτη Πτολεμαΐδας και τα συνοδά του λιμναία ιζήματα, τόσο εκείνα που βρίσκονται σε εναλλασσόμενα διάταξη όσο και εκείνα που υπόκεινται ή υπέρκεινται του λιγνίτη, συγκροτούν τον σχηματισμό της Πτολεμαΐδας.

Ο σχηματισμός της Πτολεμαΐδας, με πάχος περίπου 110m, αποτελείται από εναλλαγές στρωμάτων λιγνίτη, μαργών, λιγνιτών, άμμων, μαργαϊκών ασβεστόλιθων και όλων των ενδιάμεσων λιθολογικών τύπων και σύμφωνα με τον Παυλίδη (1985) έχει υποδιαιρεθεί στα μέλη Κύριο πεδίο, Καρδίας και Νότιο.

Τα υποκείμενα των λιγνιτικών στρωμάτων ιζήματα και η κατώτερη λιγνιτοφόρα στιβάδα συγκροτούν το **Κατώτερο Μέλος** του σχηματισμού (ή μέλος Κύριου Πεδίου), το οποίο αποτελείται από ρυθμικές εναλλαγές λιγνίτη και μάργας που δημιουργούν τριάντα λιθολογικά ζεύγη με μέσω πάχος 2m. (Δελόγκος 2011)

- Προς τα πάνω ακολουθεί το **ενδιάμεσο μέλος** (μέλος Καρδίας), που αποτελείται από δύο παρεμβολές μαργών που διαχωρίζονται από λιγνιτικά στρώματα.
- Τέλος το **ανώτερο Μέλος** (Νότιου Πεδίου), το οποίο περιλαμβάνει τα ανώτερα στρώματα του λιγνίτη και τα υπερκείμενα του. Τα στρώματα του ανώτερου μέλους εμφανίζονται επιφανειακά σε πολλά σημεία τις λεκάνης . έχουν ποικίλη σύσταση και υφή και αποτελούνται από άμμους, αργίλους, μάργες, χαλαρά κροκαλοπαγή, ψαμμιτικούς κόκκους και λεπτές στρώσεις μαργαϊκού ασβεστόλιθου, που κάθονται σύμφωνα στα ανώτερα λιγνιτικά στρώματα. Χαρακτηριστικός είναι ο σχετικά εκτεταμένος ορίζοντας μαργαϊκού ασβεστόλιθου πάχους από μερικά εκατοστά έως λίγα μέτρα (Παυλίδης 1985).

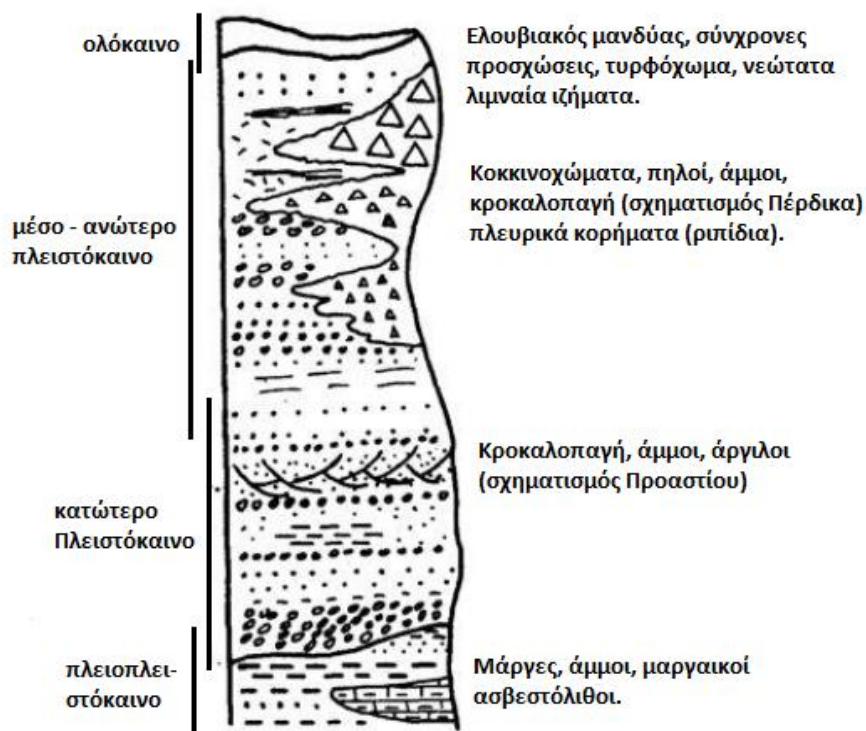
Το σύνολο σχεδόν της λεκάνης καλύπτεται από τεταρτογενείς αποθέσεις, οι οποίες κάθονται ασύμφωνα πάνω στα Πλειοκαινικά στρώματα λόγω τεκτονισμού Ανώτερου Πλειόκαινου- Κατώτερου Πλειστόκαινου και αλλαγών στις κλιματολογικές και περιβαλλοντικές συνθήκες. Η προέλευσή τους είναι λιμνοδελταική, ποταμοχειμάρρια και χερσαία (Παυλίδης, 1985)

Στην **Τεταρτογενή σειρά** διακρίνονται από κάτω προς τα πάνω οι ακόλουθες ενότητες, σύμφωνα με Κούκουζα κ.α 1979, Manridoy et al, 2003).

Ο σχηματισμός Προαστίου (ποταμοχειμάρριες αποθέσεις), ο οποίος αποτελείται από χονδρόκοκκες έως μεσόκοκκες άμμους, ψαμμίτες χαλαρούς έως συνεκτικούς και κροκαλοπαγή. Η σειρά αυτή δεν εξαπλώνεται με ομοιόμορφο πάχος.

Ακολουθεί ο σχηματισμός Πέρδικα (ποταμολιμναίες αποθέσεις), ο οποίος συνίσταται από ενστρώσεις λεπτόκοκκων άμμων με εναλλαγές αμμούχων αργίλων και μαργών και από φακοειδείς ενστρώσεις ψηφιδοπαγών και χαλαρών κροκαλοπαγών με κροκάλες μικρού μεγέθους. Κατά θέσεις απαντώνται συστήματα εναλλαγής μαργαϊκών, αργιλικών και λιγνιτικών στρωμάτων. Τα ιζήματα αυτού του σχηματισμού αποτέθηκαν σε όλη τη λεκάνη.

Τέλος και το ανώτερο σημείο καταλαμβάνουν οι σύγχρονες αποθέσεις, όπου κατατάσσονται ο παχύς ελουβιακός μανδύας, που αποτελείται από τα προϊόντα αποσάθρωσης των προϋπαρχόντων σχηματισμών, οι σύγχρονες ποτάμιες προσχώσεις, οι κόνιοι κορημάτων και τα συνάγματα των περιθωρίων της λεκάνης.



Σχήμα 3.4.2: Σύνθετη στρωματογραφική στήλη των Τεταρτογενών σχηματισμών της λεκάνης Πτολεμαΐδας.(Παυλίδης 1985)

Γεωλογικός χάρτης της λεκάνης

Φλώρινας- Πτολεμαΐδας - Σερβίων

(τροποποιημένος από Μπουρνόβα και Ροντογιάννη-Τσιαμπάου, 1983)

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

Νεογενή και Τεταρτογενή ιζήματα

- al Αλλουβιακές αποθέσεις (Ολόκαινο)
- σα₁ Λιμανίες και χερσαίες αποθέσεις (Πλειστόκαινο)
- P Κροκαλοπαγή, άμμοι, άργιλοι, μάρμας, μαργαίτοι ασβεστόλιθοι και συχνά στρώματα ληνίτη (Πλειόκαινο)
- mp Κροκαλοπαγή, άμμοι, μάρμας και άργιλοι (Άνω Μειόκαινο - Πλειόκαινο)
- m_{1,2} Κροκαλοπαγή και ψαμίτες (Ακουϊτάνο - Τορτόνο)

Πελαγονική Ζώνη

- fg Φύλσηης (Άνω Κρητιδικό - Παλαιογενές)
- c₁ Ασβεστόλιθοι (Άνω Κρητιδικό)
- F Ιζήματα μεταμορφωμένα σε φυλλίτες και σχιστόλιθους (Άνω Κρητιδικό)
- η Ασβεστόλιθοι και δολομίτες (Τριαδικό - Κάτω Ιουρασικό)

Ζώνη Λεζού

- Fa Φύλσηης

Προαλπικές Σειρές

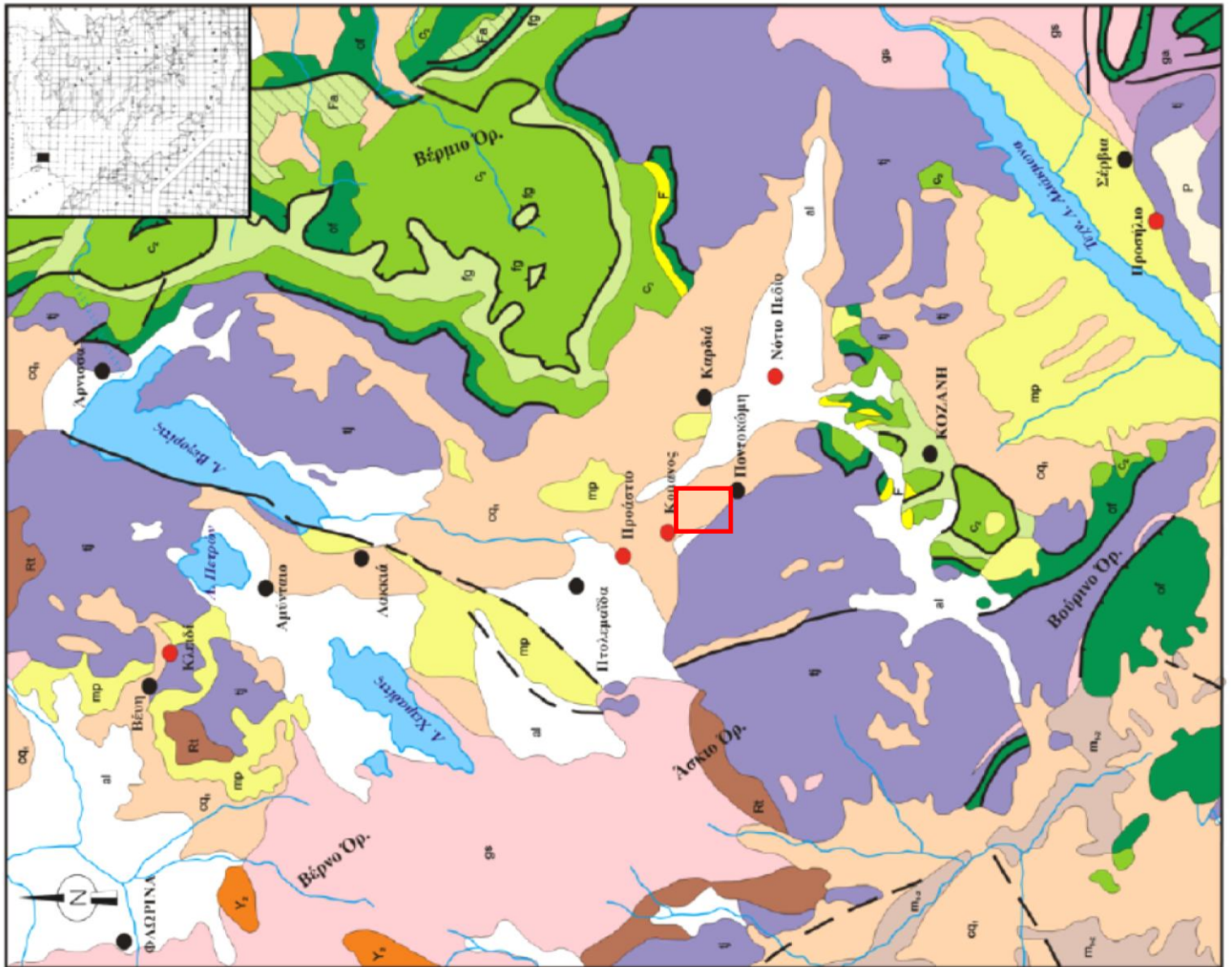
- Rt Ανθρακικοί γραουβιάκες, σχιστόλιθοι, ηρωσιτικά πετρώματα (Παριγοτριάδικό)

Μεταμορφωμένα πετρώματα

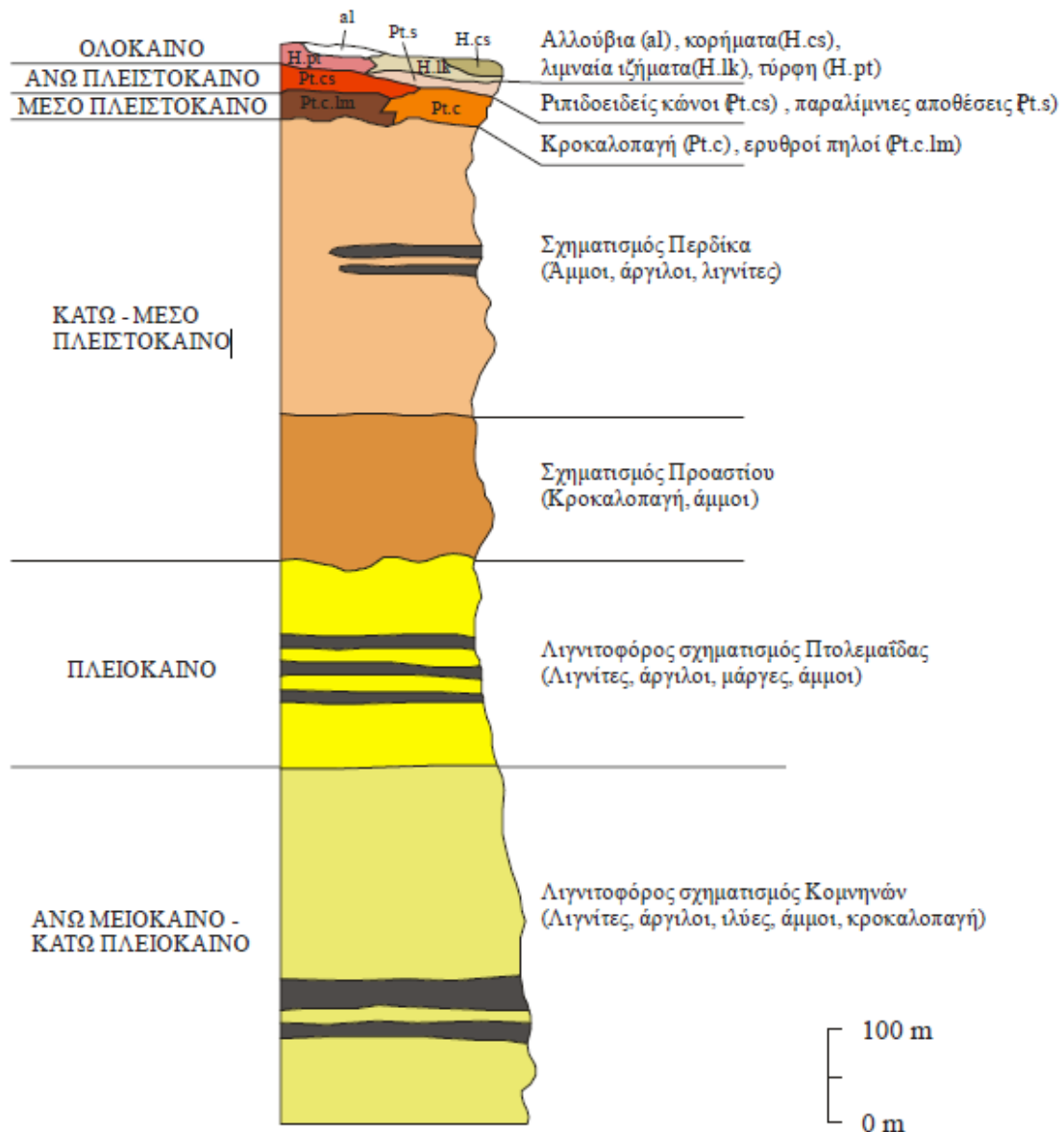
- gs Γενέσιοι, σχιστόλιθοι και αμφιβολίτες
- ga Αμφιβολίτες και γενέσιοι

Πυριγενή Πετρώματα

- γ₁ Γρανίτες, γρανοδιορίτες
- σφ Οφιόλιθοι
- Ρήγμα
- Πιθανό ρήγμα
- Εφίπτευση
- Λίμνη / Ποτάμι



Σχήμα 3.4.3: Γεωλογικός χάρτης της λεκάνης Φλώρινας- Πτολεμαΐδας – Σερβίων , στο πλαίσιο είναι η τοποθέτηση της περιοχής μελέτης (τροποποιημένος από Μπουρνόβα και Ροντογιάννη –Τσιαμπάου, 1983)



Σχήμα 3.4.4: Απλοποιημένη συνθετική στρωματογραφική στήλη των μετααλπικών σχηματισμών Φλώρινας- Πτολεμαΐδας- Σερβίων (τροποποιημένη από Κούκουζα, 1997)

Γεωλογία στον οικισμό της Μαυροπηγής

Πιο συγκεκριμένα ο οικισμός της Μαυροπηγής είναι δομημένος επάνω σε δύο κυρίως γεωλογικές μονάδες (Εικόνα 1):

1. **Πετρώματα υποβάθρου.** Σε αυτά βρίσκεται δομημένο το ΔΝΔ μέρος του οικισμού. Αποτελούνται από τεφρούς, ανακρυσταλλωμένους ασβεστολίθους του Μ. Τριαδικού – Κ. Λιασίου (T3-J5.k), οι οποίοι επικάθονται στο κρυσταλλικό υπόβαθρο των μαρμαρυγιακών/διμαρμαρυγιακών σχιστολίθων (sch) του Παλαιοζωικού.

2. **Σχηματισμός Προαστίου.** Περιλαμβάνει κυρίως πολυγενετικά κροκαλοπαγή

ποτάμιας προέλευσης μεγάλου πάχους του Κατ. Βιλλαφραγκίου. Στο σχηματισμό αυτό είναι θεμελιωμένο το μεγαλύτερο μέρος του οικισμού.

Οι παραπάνω γεωλογικοί σχηματισμοί καλύπτονται κατά θέσεις από μικρού γενικά πάχους αλλουβιακές και κολουβιακές αποθέσεις, κώνους κορημάτων, πλευρικά κορήματα, εδαφικό μανδύα και ανθρωπογενείς επιχώσεις

3.5 Τεκτονική της περιοχής έρευνας.

Η Τάφρος δημιουργήθηκε από τη ρηξιγενή τεκτονική του Νεογενούς. Κατά το Ανώτερο Μειόκαινο επικράτησαν εφελκυστικές τάσεις με διεύθυνση ΒΒΑ-ΝΝΔ, που δημιούργησαν το κύριο βύθισμα με ρήγματα ΒΔ – ΝΑ διεύθυνσης. Κατά το Ανώτερο Πλειόκαινο και το Τεταρτογενές εφελκυστικές τάσεις ΒΔ – ΝΑ διεύθυνσης χώρισαν το αρχικό βύθισμα σε επιμέρους λεκάνες, που οριοθετούνται από ΒΑ – ΝΔ ρήγματα. Σχηματίστηκαν έτσι οι λεκάνες Φλώρινας, Αμυνταίου - Πτολεμαΐδας, Κοζάνης – Σερβίων και Ελασσόνας.

Η οριοθέτηση της λεκάνης γίνεται από δύο συστήματα ρηγμάτων, τα οποία μπορούν να συνδεθούν με δύο επεισόδια εφελκυσμού (Παυλίδης και Μουντράκης 1987 , Mercier et al., 1989). Το πρώτο εφελκυστικό επεισόδιο κατά το ανώ Μειόκαινο είχε ως αποτέλεσμα στον προσανατολισμό της λεκάνης ΒΑ- ΝΔ, η οποία στη συνέχεια υπέστη το δεύτερο εφελκυστικό γεγονός, έναν ΒΔ-ΝΑ εφελκυσμό κατά το τεταρτογενές, με αποτέλεσμα την δημιουργία ρηγμάτων ΒΑ- ΝΔ διεύθυνσης τα οποία συνδέουν έναν αριθμό υπολεκανών, συμπεριλαμβανομένων των λεκανών Φλώρινας, Πτολεμαΐδας, και Σερβίων (Παυλίδης και Μουντράκης 1987).

Εξαιτίας της τεκτονικής η γεωμορφολογία της λεκάνης της Φλώρινας – Πτολεμαΐδας υποδιαιρείται από κοιλάματα και λόφους σε πολλές υπολεκάνες τάσης ΒΑ-ΝΔ, σχεδόν κάθετα στην κυρίως κατεύθυνση της μεγάλης λεκάνης (Παυλίδης 1985). Καθώς επίσης από την τεκτονική εξαρτάται και η συμμετρική θέση των τεσσάρων λιμνών στην περιοχή (Βεγορίτιδα, Πετρον, Ζαζαρη Τσιμαντίτης), Κάποια πολύ σημαντικά κανονικά ρήγματα, ΒΑ-ΝΔ και μήκους 30Κm δημιούργησαν τις υπολεκάνες του τεταρτογενούς. (Παυλίδης και Μουντράκης 1987).

Τα μεγάλα ρήγματα που είναι τοποθετημένα ΒΔ-ΝΑ ως ΒΒΔ-ΝΝΑ είναι δύσκολο να εντοπιστούν καθώς είναι καλυμμένα από τα ιζήματα της λεκάνης και μπορούν να εντοπιστούν κυρίως από γεωτρήσεις ή γεωφυσική έρευνα. Αντιθέτως τα ρήγματα διεύθυνσης ΒΑ-ΝΔ κυριαρχούν στην τοπογραφία και επιδεικνύουν τυπικά γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά πρόσφατων νεοτεκτονικά ή ενεργών ρηγμάτων. Κάποια ρήγματα διεύθυνσης ΒΑ-ΝΔ ενεργοποιήθηκαν πρόσφατα από ασθενείς (Παυλίδης και Σιμεάκης, 1988) και ισχυρούς σεισμούς (Παυλίδης et al. 1995, Μουντράκης et al., 1988)

Σύμφωνα με τους Παυλίδη και Μουντράκη (1987) στη δομή της περιοχής κυριαρχούν οι παρακάτω τεκτονικές γραμμές:

Το ρήγμα Αχλάδας- σκοπού Παπαδιάς που βρίσκεται στη Δυτική πλευρά του Βόρρα παρά τα Ελληνογιουγκοσλαβικά σύνορα με ΒΑ-ΝΔ διεύθυνση, το μήκος του ξεπερνά τα 10Κm και είναι ένα κανονικό ρήγα. Ηλικιακά τοποθετείται πριν το νεογενές ενώ διαπιστώθηκε επαναδραστηριοποίηση του τόσο κατά το νεογενές όσο και κατά το τεταρτογενές.

Το ρήγμα Κέλλης - Αγίου Αθανασίου, που βρίσκεται στη νοτιοδυτική πλευρά του Βόρρα, έχει μήκος περίπου 12Κm, διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ και χαρακτηρίζεται ως τυπικό κανονικό ρήγμα. Αναπτύσσεται σε ασβεστόλιθους τριαδικοιουρασικής ηλικίας ενώ υπάρχουν αποδείξεις για επαναδραστηριοποίηση του κατά το τεταρτογενές.

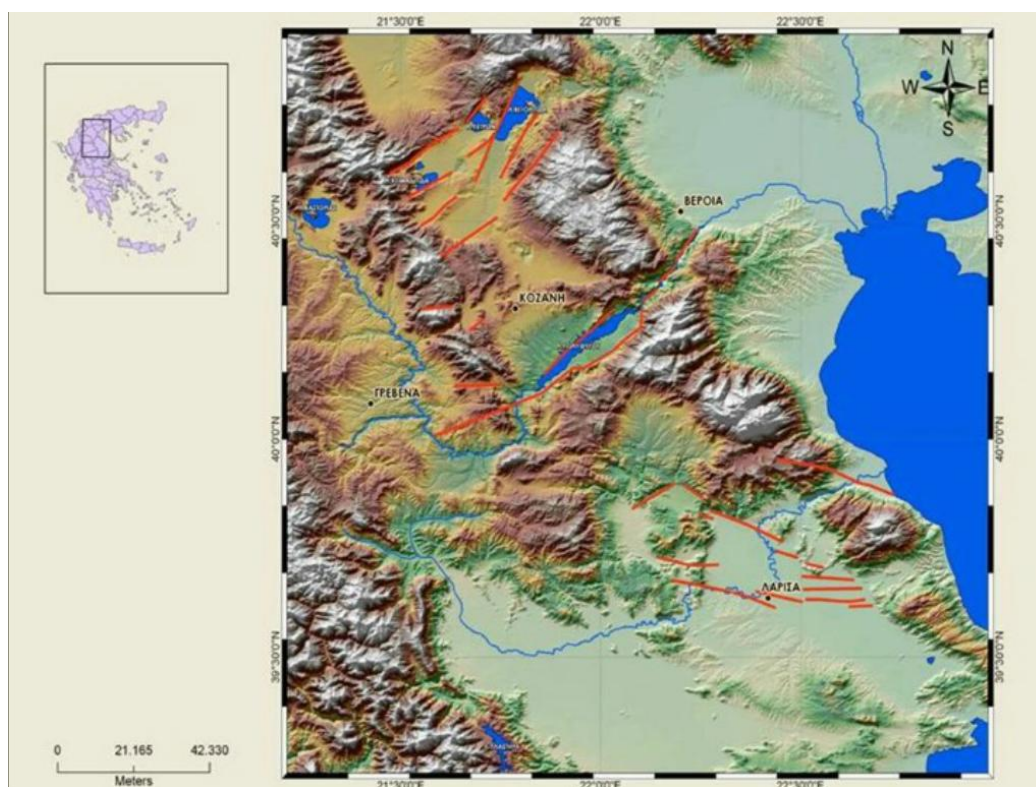
Η μεγάλη τεκτονική γραμμή Πετρών – Ξινού Νερού- Αετών –Νυμφαίου με διεύθυνση Β 30⁰ Α, βυθίζεται ΝΑ, έχει μήκος μεγαλύτερο από 30 km, και μετατοπιστικό χαρακτήρα.

Το μεγάλο ρήγμα της Βεγορίτιδας με διεύθυνση Β 40⁰ Α, βυθίζεται ΝΑ ξεκινάει από το χωριό Άγιος Σπυρίδων, συνεχίζει στον Άγιο Παντελεήμονα και φτάνει στη Βεγόρα και είναι περίπου 20 Km σε μήκος, πρόκειται για τυπικά κανονικό ρήγμα νεοτεκτονικής δράσης.

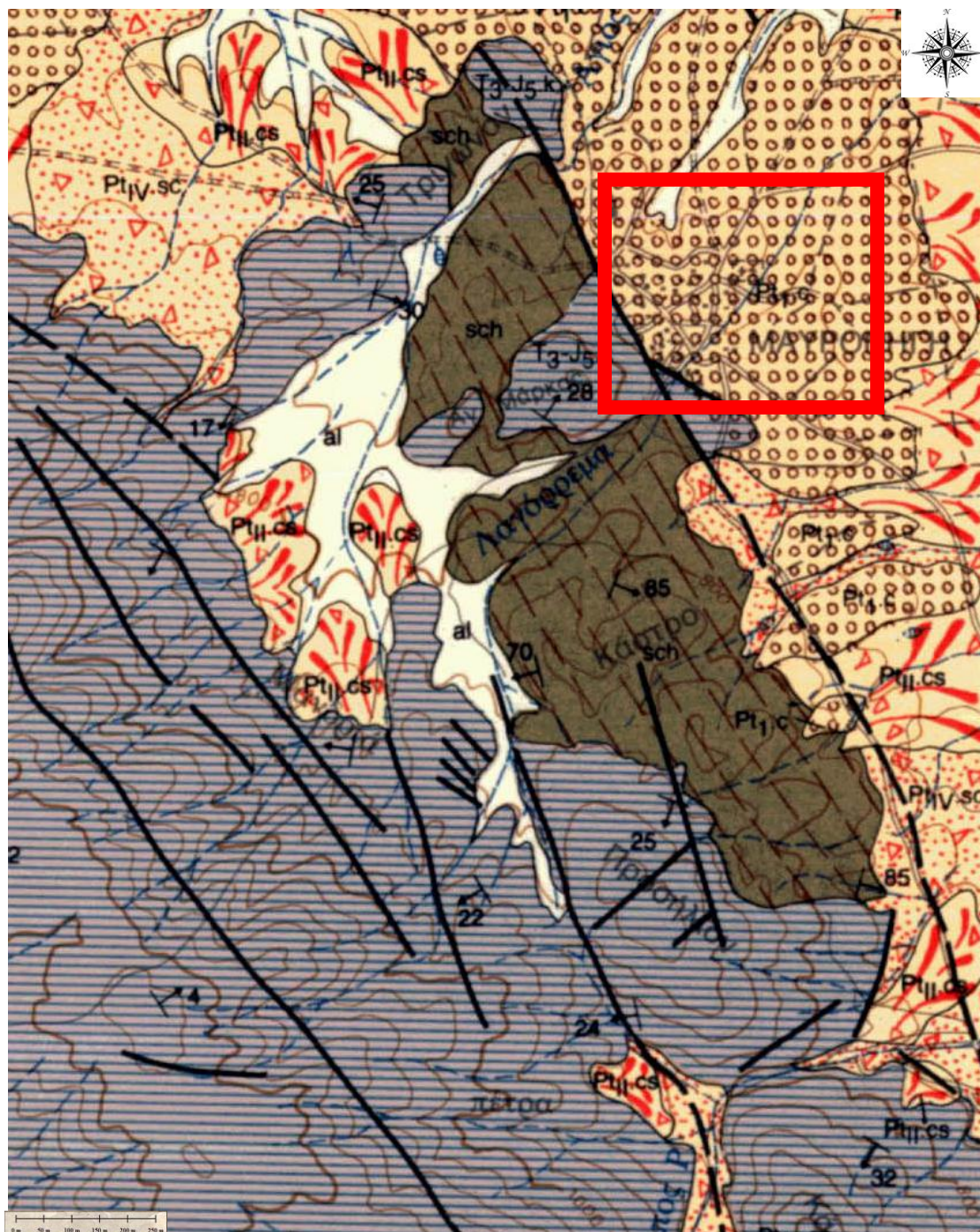
Το ρήγμα Χημαδίτης – Ανάργυροπου βρίσκεται δίπλα στην ομώνυμη λίμνη, είναι κανονικό ρήγμα με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ, βυθίζεται ΒΔ και είναι περισσότερο από 10 Km μήκος. Αναπτύσσεται τόσο στο κρυσταλλοσχιτώδες υπόβαθρο όσο και στα ιζήματα οπότε διαπιστώνεται και η πρόσφατη δράση του (Παυλίδης 1985).





Τέλος η ομάδα παράλληλων, κανονικών ρηγμάτων της κοιλάδας Βέρμιο – Κορινιά και η Πτολεμαΐδα – Προάστιο , η οποία εκτείνεται πάνω από 10 Km (Παυλίδης , Μουντράκης, 1987).

Τα ρήγματα που επηρεάζουν τα ιζήματα νεογενούς - Τεταρτογενούς της λεκάνης συμπίπτουν με αυτά ή έχουν παρόμοιες διευθύνσεις με τα ρήγματα που επηρεάζουν τα προ- Νεογενή πετρώματα, κυρίως τους Μεσοζωικούς Ασβεστόλιθους στα περιθώρια της λεκάνης. Κάποια από τα κανονικά ρήγματα επηρεάζουν τους μεσοζωικούς Ασβεστόλιθους παλαιοζωικά μεταμορφωμένα πετρώματα στα περιθώρια της λεκάνης συνεχίζουν μέσα στα ιζήματα της λεκάνης. Αρχικά έχουν δημιουργηθεί κατά την προνεογενή περίοδο (Μουντράκης, 1982 και 1984) και πιθανώς απενεργοποιήθηκαν από Νεοτεκτονικές παραμορφώσεις.



Σχήμα 3.5.1: Χάρτης της τεκτονικής τάφρου και τοποθέτηση ρηγμάτων (Α. Χατζηπέτρος)



Σχήμα 3.5.3: . Απόσπασμα του δημοσιευμένου γεωλογικού χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε. (Φύλλο Σιάτιστα Ι.Γ.Μ.Ε., 1982) στην περιοχή της Μαυροπηγής ( Pt II.cs κόνιοι,  Pt I.c Κροκαλοπαγές προαστίου,  T3J5k ασβεστόλιθοι,  Sch, σχιστόλιθοι)

3.6 Εκδήλωση σεισμικότητας στην περιοχή έρευνας

Η περιοχή της δυτικής Μακεδονίας σε γενικές γραμμές θεωρείται από τις πιο ασφαλείς περιοχές του Ελληνικού χώρου από άποψη σεισμικής επικινδυνότητας καθώς δεν είχε σημειωθεί κάποιο σημαντικό καταστροφικό σεισμικό γεγονός τα σύγχρονα και ιστορικά χρόνια. Οι μοναδικές περιπτώσεις που αποτελούν εξαίρεση, είναι το επεισόδιο του 896 πΧ που κατέστρεψε την πόλη της Βέροιας οι δύο σεισμοί στην περιοχή των Μετεώρων στα τέλη του 18^{ου} αιώνα, καθώς και ο μοναδικός σύγχρονος σημαντικός σεισμός στη περιοχή της Κοζάνης το 1995, με Μέγεθος Ms=6,4Richter. Οι υπόλοιποι σεισμοί που έχουν καταγραφεί στην ευρύτερη περιοχή με μέγεθος μεγαλύτερο ή ίσο 4,5 Richter είναι οι εξής :

1958 Καστοριά Ms=5,4

1966 Φλώρινα Ms=4,5

1967 Φλώρινα Ms=4,5

1968 Καστοριά Ms=4,9

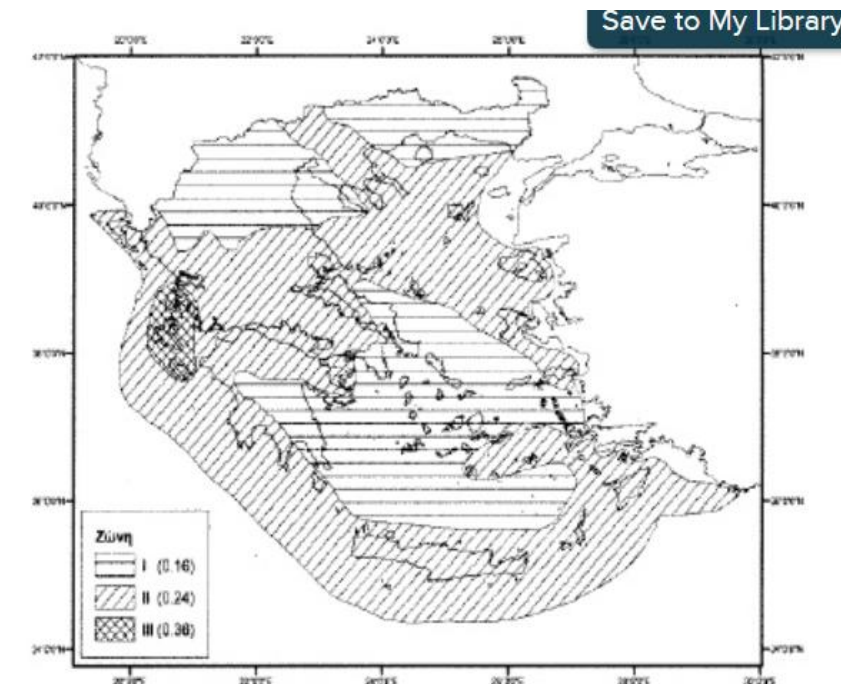
1975 Καστοριά Ms=4,9

1979 Κοζάνη Ms=4,5

1984 Πτολεμαΐδα Ms=4,9

Σύμφωνα με τον ΕΑΚ -2000 και την τροποποίηση του με την Απόφαση ΥΠΕΧΩΔΕ η περιοχή μελέτης κατατάσσεται στη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας (χαμηλή επικινδυνότητα).

Ο συντελεστής σεισμικής επιτάχυνσης (A) για τη ζώνη I είναι: $A = \alpha * g$, όπου g η επιτάχυνση της βαρύτητας, και $\alpha=0,16$.



Σχήμα 3.6.1: (ΔΕΗ Α.Ε. μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων ορυχείων Πτολεμαΐδας, Ν. Κοζάνης, 2005)

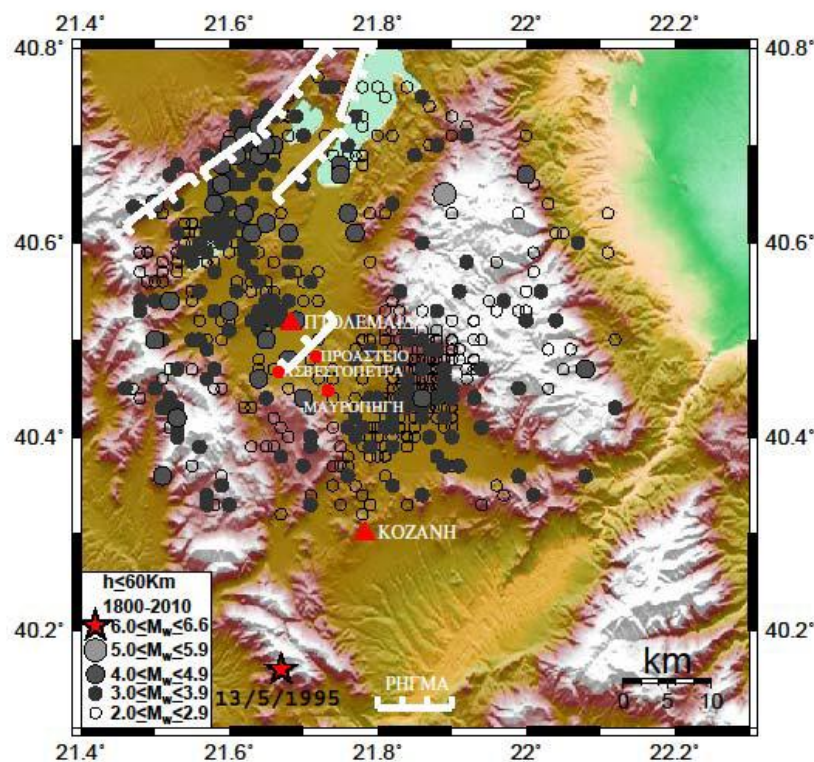
Σύμφωνα με την σεισμολογική μελέτη της ευρύτερης περιοχής του Δ.Δ. Μαυροπηγής του Δ. Πτολεμαΐδας από την εξαμηνιαία έκθεση που πραγματοποιήθηκε από τον τομέα Γεωφυσικής και το Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (Θ. Τσάπανος, Γ. Κόραβος, Β. Καρακώστας & Χ. Καραμάνος)

Για να μελετηθεί η περιοχή επεξεργάστηκαν όλοι οι καταγεγραμμένοι σεισμοί που περικλείονται σε ακτίνα 30 Km γύρω από την θέση μελέτης. Στην περιοχή καταγράφονται τρία ενεργά ρήγματα, τα οποία δεν έχουν δώσει μέχρι το παρόν κάποιο μεγάλο σεισμό, το δυναμικό τους προδιαθέτει την γένεση σεισμών με μεγέθη από 6.3 μέχρι 6.5. Συγκεκριμένα αυτά είναι: (1) το ρήγμα Βεγόρας-Βεγορίτιδας, (2) το ρήγμα Νυμφαίου-Πετρών και (3) το ρήγμα Προαστίου - Ασβεστόπετρας. Το κοντινότερο στην περιοχή της Μαυροπηγής είναι το ρήγμα Προαστίου- Ασβεστόπετρας σε απόσταση 7 Km.

Στον χάρτη που ακολουθεί απεικονίζονται τα επίκεντρα των σεισμών με διαφορετικά σύμβολα, ανάλογα με το μέγεθός τους, καθώς επίσης η θέση του οικισμού Μαυροπηγής και τα ρήγματα που προαναφέρθηκαν.

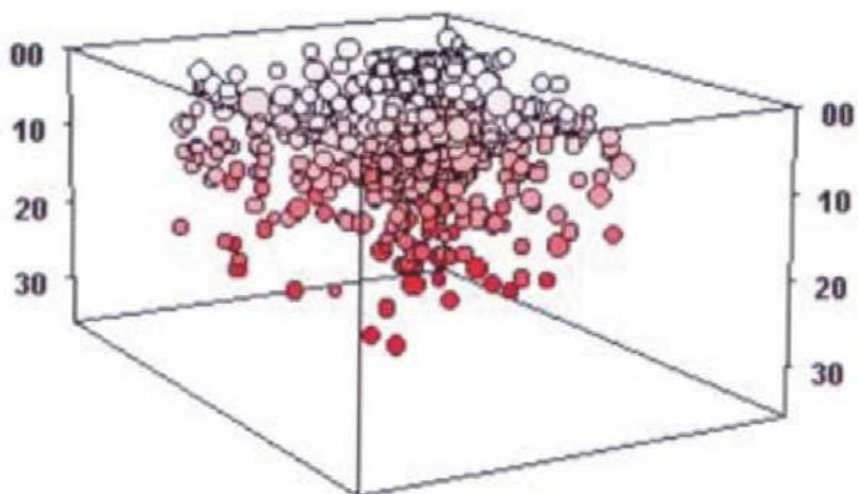
Οι σεισμοί που έχουν καταγραφεί στην περιοχή και απεικονίζονται στο σχήμα είναι επιφανειακοί με μέσο εστιακό βάθος 9 Km. Ενώ η πλειονότητα των σεισμών συμβαίνει μέχρι το βάθος των 20 Km, πρόκειται για μικρούς έως μεσαίου μεγέθους σεισμούς. Ο αριθμός των σεισμών που απεικονίζονται στο σχήμα (1) είναι 796, με μέγεθος $M > 2.0$. Το 67% αυτών καταγράφονται με μέγεθος μεταξύ 2.0 – 3.0, το 29% για μεγέθη μεταξύ του 3.0 – 4.0, ενώ μόλις το 3.9% αφορά μεσαίου μεγέθους σεισμούς μεταξύ

4.0 – 5.0 Richter. Μόνο ένας σεισμός καταγεγραμμένος στην περιοχή έχει μέγεθος $M=5.2$ και σημειώθηκε το 1984 παρόλα αυτά η απόστασή του από την Μαυροπηγή (≈ 25 Km) δεν μπορούσε να έχει επιπτώσεις στο χωριό. Επίσης το επίκεντρο του σεισμού του 1995 απέχει 32 Km από την Μαυροπηγή (σε ευθεία γραμμή). Αυτό σημαίνει ότι η εδαφική επιτάχυνση στη Μαυροπηγή από αυτόν τον σεισμό ήταν $a < 0.16g$, δηλαδή ήταν σε συμφωνία με την αντίστοιχη επιτάχυνση που δίνει ο Αντισεισμικός Κανονισμός για την περιοχή. Η ακτίνα εξέτασης της σεισμικής δραστηριότητας καθορίστηκε 30Km, καθώς αυτή είναι η μεγαλύτερη απόσταση της Μαυροπηγής από τα τρία ενεργά ρήγματα, και καθορίζεται στο μέσο του ρήγματος Βεγόρας- Βεγορίτιδας που απέχει σε ευθεία περίπου 30Km.



Σχήμα 3.6.2: Επίκεντρα σεισμών με μέγεθος $M > 2.0$. (Ερευνητική ομάδα ΑΠΘ, 2011, τομέας Γεωφυσικής, Τμήμα Γεωλογίας, Θ. Τσάπανος, Γ. Κόραβος, Β. Καρακώστας & Χ. Καραμάνος)

Συσχετίζοντας την σεισμική δράση με την επιφανειακή εκδήλωση και τη δημιουργία ρωγμών στο έδαφος η ερευνητική ομάδα κατέληξε ότι τα μεγέθη είναι τόσο μικρά ώστε είναι αδύνατον να έχουν επιφανειακή εκδήλωση ακόμα και αν έχουν μικρό εστιακό βάθος. Έχει καταγραφεί ότι το μικρότερο εστιακό βάθος που έχει παρατηρηθεί είναι 0.3 Km και τα μεγέθη των σεισμών βρίσκονται μεταξύ 2.0 - 3.7 Richter. Ποιο αναλυτικά το μεγαλύτερο πλήθος σεισμών εντοπίζεται σε τρία εστιακά βάθη τα οποία είναι από 0.3 έως 1 Km, από 2 έως 3 Km και από 9 έως 10 Km.



Σχήμα 3.6.3 : Τρισδιάστατη απεικόνιση των σεισμών της ευρύτερης περιοχής μελέτης, μέσου εστιακού βάθους 9 Km. Η πλειονότητα των σεισμών συμβαίνει μέχρι το βάθος των 20 Km. (Ερευνητική ομάδα ΑΠΘ, 2011, τομέας Γεωφυσικής, Τμήμα Γεωλογίας, Θ. Τσάπανος, Γ. Κόραβος, Β. Καρακώστας & Χ. Καραμάνος)

Οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις σεισμών ανά χιλιόμετρο βάθους εμφανίζονται, μέχρι τα 15 Km, ενώ κάποιοι από τους σεισμούς εμφανίζονται σχετικά κοντά στη Μαυροπηγή, κάτι που φαίνεται και από το σχήμα με ένα πλήθος σεισμών να κατανέμονται νότια και ανατολικά της Μαυροπηγής. Οι σεισμοί που παρατηρούνται κοντά στη Μαυροπηγή και ιδιαίτερα αυτοί που συμβαίνουν μεταξύ 8-12 Km, ή και σε μικρότερες αποστάσεις έχουν μικρά μεγέθη, από 2.0 μέχρι 3.5 Richter. Σεισμοί τέτοιου μεγέθους δεν θεωρούνται επικίνδυνοι για μία κατοικημένη περιοχή ακόμα και αν πραγματοποιούνται κοντά σε αυτήν.

Καταλήγοντας και λαμβάνοντας υπόψη την εργασία της ερευνητικής ομάδας του τμήματος γεωφυσικής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης συμπεραίνουμε ότι οι επιφανειακές ρωγμές που παρουσιάστηκαν στο χωριό δεν είναι δυνατόν οφείλονται σε σεισμούς.

3.7 Υδρογεωλογικές συνθήκες στην περιοχή έρευνας

Σε αυτή την παράγραφο θα γίνει περιγραφή των υδρογεωλογικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή της Μαυροπηγής και θα περιγραφούν οι υδραυλικές ιδιότητες γεωλογικών σχηματισμών.

3.7.1 Περαιτότητα των γεωλογικών σχηματισμών στην ευρύτερη περιοχή έρευνας

Η τροφοδοσία της υπόγειας υδροφορίας γίνεται μέσω κατείσδυση του νερού της βροχής και διήθηση του νερού των χειμάρρων. Στις **νεογενείς αποθέσεις** της περιοχής έρευνας η υδροφορία είναι σχετικά φτωχή και χαρακτηριστικό είναι ότι δεν υπάρχει συνέχεια και ομοιομορφία σε αυτήν, γεγονός που επιβεβαιώνεται καθώς στην περιοχή ανορύχθηκαν γεωτρήσεις που είχαν πολύ μικρή παροχή και στη συνέχεια εγκαταλείφθηκαν (Κ. Βουδουρη και Χρ. Μάττα, 2011)

Οι γεωτρήσεις που έχουν ανορυχθεί μέσα στα **σχιστολιθικά πετρώματα** μαρτυρούν μία πολύ φτωχή υδροφορία, η οποία οφείλεται κυρίως στο δευτερογενές πορώδες που έχουν αναπτύξει οι σχηματισμοί αυτοί, λόγω τεκτονικών αιτιών που δημιουργούν ευνοϊκές διευθύνσεις για την κίνηση του υπόγειου νερού. Η φτωχή υδροφορία στους σχιστόλιθους διαπιστώνεται από την παρουσία βαρέων μετάλλων (Fe, Mn) στα δείγματα νερού που ελήφθησαν από τις γεωτρήσεις αυτές (Κ. Βουδουρη και Χρ. Μάττα, 2011)

Το βάθος των γεωτρήσεων της περιοχής, με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα, κυμαίνεται από 30 m μέχρι 237 m. Η μέση παροχή για όσες γεωτρήσεις εμφανίζουν υδροφορία και υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία (MA8, MA10 Σχήμα 3.7.1) ανέρχεται σε 35 m³/h περίπου (Κ. Βουδούρη και Χρ. Μάττα, 2011)

Η υδρογεωλογική συμπεριφορά των γεωλογικών σχηματισμών που απαντούν στην περιοχή έρευνας καθορίζεται κυρίως από τα υδρολιθολογικά τους χαρακτηριστικά. Με βάση αυτά οι σχηματισμοί της περιοχής διακρίνονται σε **περατούς, ημιπερατούς** και πρακτικά **αδιαπέρατους**.

Στην ευρύτερη περιοχή έρευνας αναπτύσσεται υδροφορία τόσο στο καρστικό υπόβαθρο (καρστικό υδροφόρο σύστημα) όσο και στα νεότερα Νεογενή ιζήματα και στις Τεταρτογενείς αποθέσεις (υδροφόρα συστήματα χαλαρών ιζημάτων). Από τους σχηματισμούς που συγκροτούν τα περιθώρια της λεκάνης, ως **αδιαπέρατοι** μπορούν να χαρακτηριστούν αυτοί του οφιολιθικού συμπλέγματος και οι κρυσταλλοσχιστώδεις σχηματισμοί του υποβάθρου.

Στην πρώτη ομάδα δεν αποκλείεται κάποια υδροφορία, εξαιτίας πιθανής ρηγμάτωσης και αποσάθρωσης (δευτερογενές πορώδες). **Υδατοπερατοί**, λόγω καρστικότητας, θεωρούνται οι Τριαδικοί, Ιουρασικοί και Κρητιδικοί ασβεστόλιθοι. Στους Τριαδικούς κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους, η καρστική διεργασία παρουσιάζεται κατά περιοχές ιδιαίτερα προχωρημένη, ενώ άλλες περιοχές φαίνονται ανεπηρέαστες. Η εικόνα αυτή είναι αποτέλεσμα της κρυσταλλικότητας, του σποραδικά δολομιτικού χαρακτήρα και της διαφορετικής, κατά θέσεις, παλαιογεωμορφολογικής και τεκτονικής εξέλιξης. Στους Κρητιδικούς ασβεστόλιθους η καρστική διεργασία παρουσιάζεται περισσότερο ομοιόμορφη.

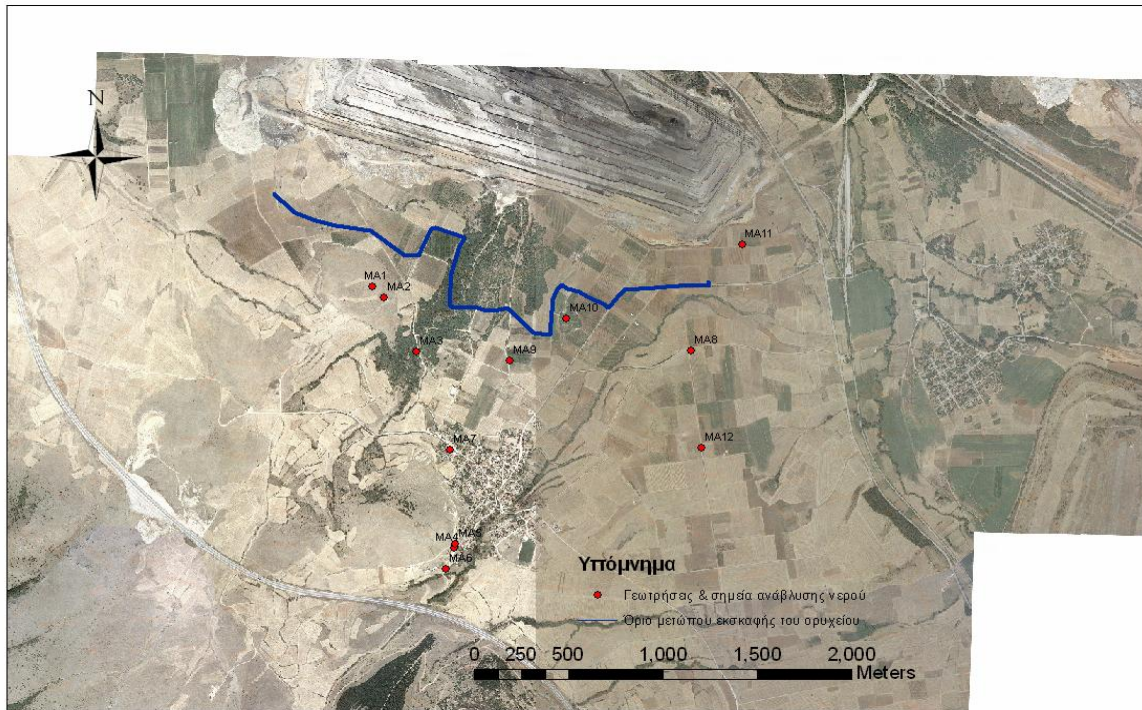
Ως **ημιπερατοί** θεωρούνται οι υπερκείμενοι του λιγνίτη Πλειστοκαινικοί και Νεογενείς σχηματισμοί, ανάλογα με το ποσοστό συμμετοχής της αργίλου. Τέλος, υδροφορία παρουσιάζουν και τα υποκείμενα της λιγνιτοφόρου στοιβάδας στρώματα. Επίσης, σύμφωνα με στοιχεία της ΔΕΗ, από τα χαλαρά ιζήματα που πληρούν τη λεκάνη, η λιγνιτοφόρος στοιβάδα, δηλαδή τα λιγνιτικά στρώματα με τα ενδιάμεσα άγωνα, μπορούν να θεωρηθούν επίσης ως πολύ **λίγο διαπερατοί** σχηματισμοί που δεν ευνοούν την κατείδυση και την κυκλοφορία των υπογείων νερών, ενώ οι υποκείμενες της λιγνιτοφόρας στοιβάδας μάργες χαρακτηρίζονται ως πολύ **λίγο διαπερατές – πρακτικά αδιαπέρατες** (υδροπερατότητα της τάξεως των 10-8 έως 10-9 m/sec).

Διεύθυνση κίνησης του υπόγειου νερού στην περιοχή της Μαυροπηγής:

Σύμφωνα με τους Κ. βουδούρη και Χρ.Μάττα (2011), η στάθμη του υπόγειου νερού στη περιοχή της μαυροπηγής μετρήθηκε σε τέσσερις (4) γεωτρήσεις τις MA2, MA12, MA10 η στάθμη μετρήθηκε την ίδια ημέρα (2/12/2010), ενώ στη γεώτρηση MA8 μετρήθηκε άλλη ημέρα (14/9/2010). Τα αποτελέσματα των μετρήσεων καθώς και η θέση των γεωτρήσεων παρατίθενται στα σχήματα 3.6.1 και 3.6.2 αντίστοιχα.

Πίνακας 3.7.1: Απόλυτη στάθμη του υπόγειου νερού και βάθος από την επιφάνεια εδάφους (Κ. Βουδούρης και Χρ. Μάττας, ερευνητική ομάδα Α.Π.Θ 2011)

Κωδικός γεώτρησης	Βάθος α.ε.ε	Απόλυτο υψόμετρο στάθμης
MA2	28.48m(21/12/2010)	+693.22m(21/12/2010)
MA8	84.74m(14/9/2010)	+590.14m(14/9/2010)
MA10	111.67m (2/12/2010)	+589.25m (21/12/2010)
MA12	73.23m (2/12/2010)	+602.28m (2/12/2010)

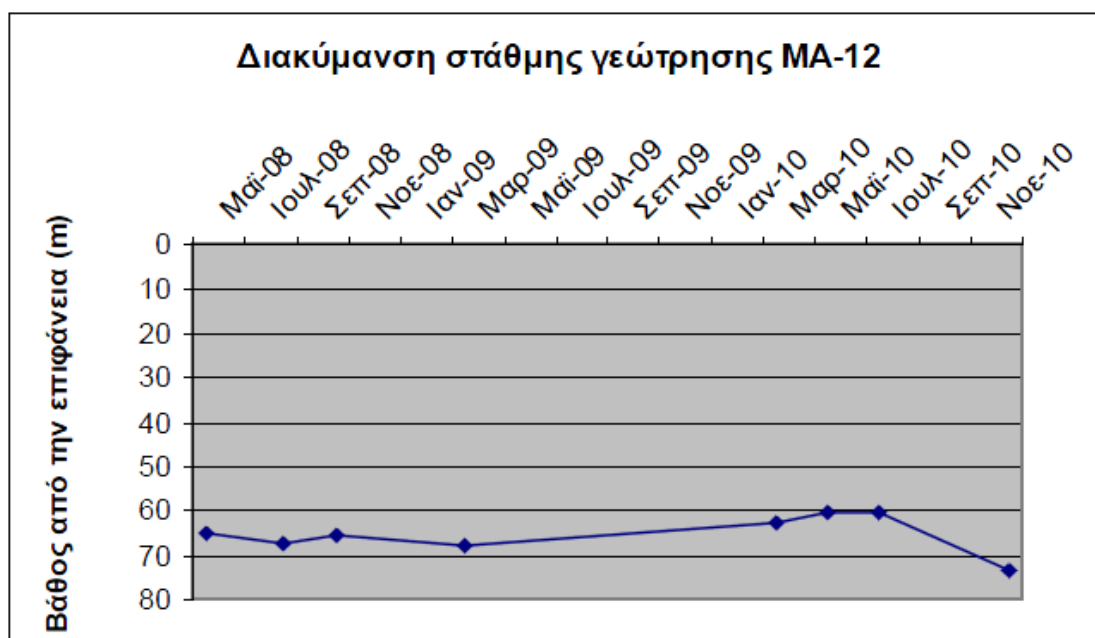


Σχήμα 3.7.1 : Θέση γεωτρήσεων που απογράφησαν (Κ. Βουδούρης και Χρ. Μάττας, ερευνητική ομάδα Α.Π.Θ 2011)

Επιλέγοντας ζεύγη γεωτρήσεων για τα οποία υπάρχουν μετρήσεις (MA12-MA8, MA12-MA10, MA2-MA10) η κίνηση του υπόγειου νερού φαίνεται να έχει διεύθυνση N-B στο τμήμα της λεκάνης ανατολικά του οικισμού Μαυροπηγής, ενώ στο τμήμα της λεκάνης δυτικά του οικισμού φαίνεται να έχει διεύθυνση Δ-Α. από την παρατήρηση των στάθμων σύμφωνα με τους Κ. Βουδούρης και Χρ. Μάττας, (2011) συμπεραίνουμε ότι η κίνηση του υπόγειου νερού είναι προς την εκσκαφή του ορυχείου, με αποτέλεσμα την αποστράγγιση των υδροφόρων στρωμάτων που αναπτύσσονται στην περιοχή. Οι γεωτρήσεις MA8 και MA10 στις οποίες μετρήθηκε στάθμη έχουν ανορυχθεί μέσα στα ιζήματα και είναι μεγάλου βάθους. Η MA8 έχει βάθος 237 m, ενώ η MA10 έχει βάθος 200 m. Το βάθος των γεωτρήσεων αυτών ξεπερνά το βάθος του δαπέδου της εκσκαφής του ορυχείου. Ίσως για το λόγο αυτόν, ενώ βρίσκονται πολύ κοντά στο μέτωπο της εκσκαφής (MA8≈80 m και MA10≈370 m) εμφανίζουν υδροφορία. Οι γεωτρήσεις MA8 και MA7 είναι οι μόνες ενεργές γεωτρήσεις που απογράφηκαν στην περιοχή. Η γεώτρηση MA7 βρίσκεται εντός του οικισμού και χρησιμοποιείται για οικιακή χρήση. Στο νότιο τμήμα του οικισμού της Μαυροπηγής απογράφηκε και ένα σημείο (MA6) όπου παλαιότερα υπήρχε πηγαία ανάβλυση του υπόγειου νερού και χρησιμοποιούνταν για την κάλυψη μέρους των κτηνοτροφικών αναγκών της περιοχής. Το σημείο αυτό βρίσκεται κοντά στην επαφή των ασβεστολίθων με τα σχιστολιθικά πετρώματα του υποβάθρου. Η πηγή αυτή

σήμερα έχει στερέψει. Επίσης οι γεωτρήσεις MA4 και MA5, οι οποίες βρίσκονται πολύ κοντά στο σημείο MA6, ενώ έχουν ανορυχθεί σε επιφανειακή εμφάνιση ασβεστολίθων δεν είχαν επαρκή υδροφορία, ενώ στα δείγματα νερού που εξετάστηκαν διαπιστώθηκε η παρουσία Μαγγανίου (Mn). Αυτό υποδηλώνει ότι κατά την ανόρυξη διέτρησαν τα σχιστολιθικά πετρώματα του υποβάθρου, καθώς βρίσκονται πολύ κοντά στην επαφή των δύο σχηματισμών.

Με βάση παλαιότερα δεδομένα της γεώτρησης MA12 (τοποθεσία Ντούκα, Σχ.1) σε απόσταση 900 m από το μέτωπο της εκσκαφής φαίνεται να έχει πτώση στάθμης **8,23 m** από το 2008 μέχρι το 2010 (Σχήμα 3.7.3).



Σχ. 3.7.2: Διακύμανση του βάθους από την επιφάνεια του εδάφους, της στάθμης του υπόγειου νερού στη γεώτρηση MA-2. (Κ. Βουδούρης και Χρ. Μάττας, ερευνητική ομάδα Α.Π.Θ 2011)

3.7.2. Υδροφόρα συστήματα στην περιοχή έρευνας

Καρστικά υδροφόρα συστήματα

Η καρστική υδροφορία στην περιοχή αναπτύσσεται κυρίως στους Ιουρασικούς και Κρητιδικούς ασβεστόλιθους και λιγότερο στους Τριαδικούς. Σύμφωνα με τα διαθέσιμα στοιχεία και δεδομένης της λιθολογικής φύσης των καρστικών σχηματισμών (καρστικοποιημένοι ασβεστόλιθοι), αναμένονται υψηλές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας, παροχής, υδαταγωγιμότητας και συντελεστή εναποθήκευσης. Σύμφωνα με τους Groba et al. (1985), στους Τριαδικούς

ασβεστόλιθους του Βέρμιου αναπτύσσονται δυο μεγάλα καρστικά συστήματα, σχεδόν ανεξάρτητα μεταξύ τους:

- Το Βόρειο καρστικό υδροφόρο σύστημα με την πιεζομετρική του επιφάνεια να διαμορφώνεται στο απόλυτο υψόμετρο των +525m περίπου.
- Το Νότιο καρστικό υδροφόρο σύστημα με την πιεζομετρική του επιφάνεια να διαμορφώνεται στο απόλυτο υψόμετρο των +280m.

Σύμφωνα με τους Τσουφλίδου και Δημητρακόπουλο (2005), οι υδρογεωλογικές ενότητες διαχωρίζονται στις εξής:

- Υδρογεωλογική ενότητα νότιου Βερμίου που περιλαμβάνει και ορισμένες περιοχές του Άσκιου και εκφορτίζεται στις πηγές της Νεράιδας.
- Υδρογεωλογική ενότητα των ασβεστολιθικών κροκαλοπαγών του ανατολικού Βερμίου, που εκφορτίζεται στις πηγές του ανατολικού Βερμίου.
- Υδρογεωλογική ενότητα βόρειου Βερμίου με τμήμα του νότιου Βόρα, η οποία εκφορτίζεται στις πηγές Νησιού.
- Υδρογεωλογική ενότητα δυτικού και βορειοδυτικού Βερμίου η οποία συνδέεται με τη Βεγορίτιδα.

Όσον αφορά την υδραυλική επικοινωνία μεταξύ των ως άνω καρστικών συστημάτων με τα υδροφόρα συστήματα των χαλαρών ιζημάτων της περιοχής, η επικρατούσα άποψη είναι ότι δεν υπάρχει υδραυλική επικοινωνία.

Υδροφόρα συστήματα χαλαρών ιζημάτων

Σύμφωνα με τον Λουλούδη *et al.* (2008), όσον αφορά την υδροφορία στα συστήματα χαλαρών ιζημάτων, από τις ερευνητικές εργασίες που έχουν εκπονηθεί για την ευρύτερη περιοχή προκύπτει ότι αναπτύσσεται υδροφορία στους παρακάτω σχηματισμούς:

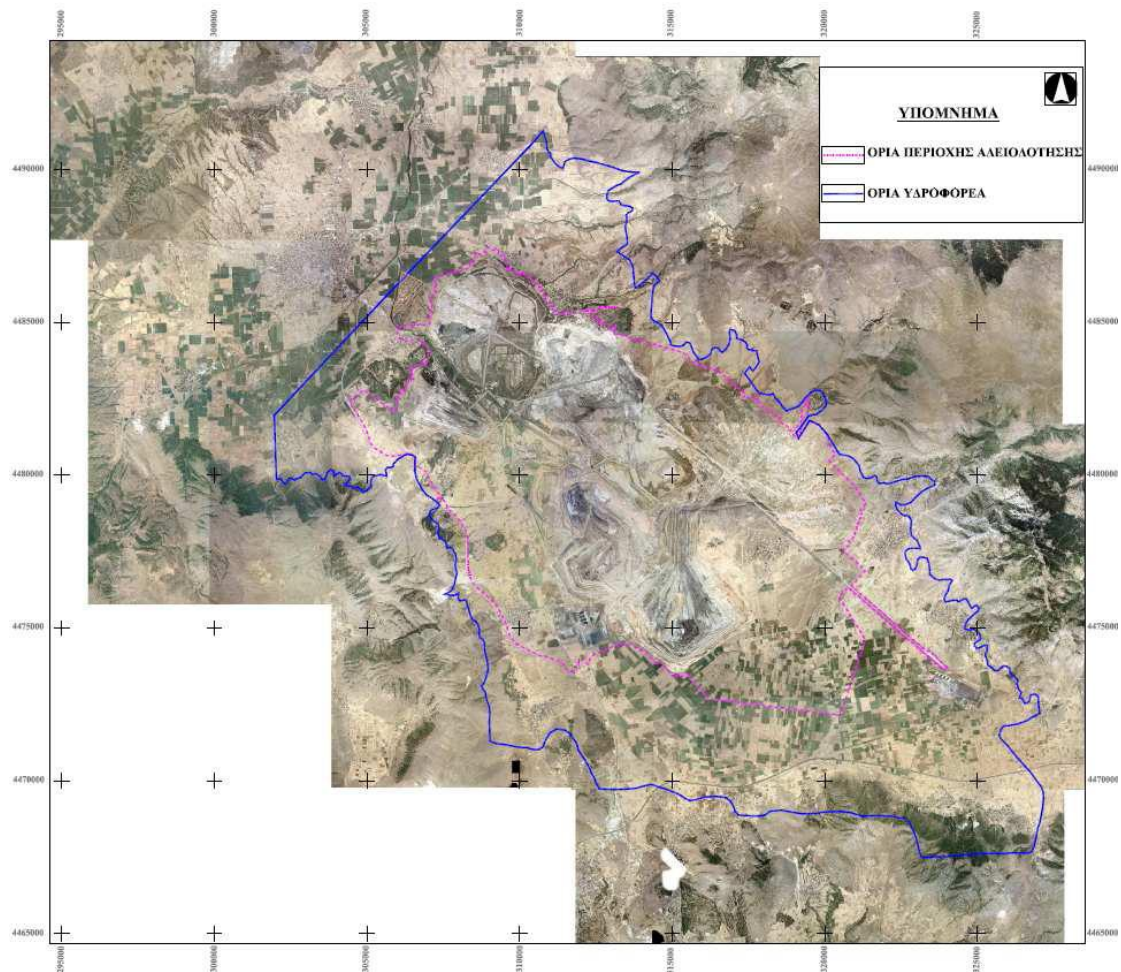
- Πλευρικά κορήματα και κώνους κορημάτων της λεκάνης.
- Υπερκείμενα της λιγνιτοφόρου στοιβάδας ιζήματα.
- Υποκείμενα της λιγνιτοφόρου στοιβάδας ιζήματα.

Με την ανάπτυξη των εξής υδροφόρων

- υδροφορέας υπερκειμένων, αναπτύσσεται στα υπερκείμενα της λιγνιτοφόρου στοιβάδας Νεογενή ιζήματα, εδώ εντάσσεται και η υδροφορία των Τεταρτογενών αποθέσεων και

- υδροφορέας υποκειμένων, αναπτύσσεται στα υποκείμενα της λιγνιτοφόρου στιβάδας ιζήματα.

Ο υδροφορέας υπερκειμένων έχει περιορισμένη ανάπτυξη του στη βόρεια του Νοτίου Πεδίου περιοχή ενώ καλύπτει οριζόντια επιφάνεια 271km². Τα όριά του, τα οποία αντιστοιχούν στα όρια της υδρογεωλογικής λεκάνης των Ορυχείων Πτολεμαΐδας (Σχήμα 3.7.4), όπως εκτιμήθηκαν στην Ειδική Υδρογεωλογική Μελέτη Ορυχείων Πτολεμαΐδας (Τσουφλίδου και Δημητρακόπουλος, 2005).



Σχήμα 3.7.3: Όρια υδροφόρου υπερκειμένων (ΔΕΗ Α.Ε., μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων ορυχείων Πτολεμαΐδας, Ν. Κοζάνης, 2005)

Ο υδροφόρος των υπερκειμένων συνεχίζεται και στην περιοχή του ορυχείου Μαυροπηγής, η οποία καλύπτεται από το σχηματισμό κροκαλοπαγούς προαστίου που παρουσιάζει πλούσια υδροφορία, εδώ πιεζομετρική επιφάνεια του υδροφορέα των υπερκειμένων κυμαίνεται από +700m έως +640m, με κλίση από Ν.ΝΔ προς Β.ΒΑ.

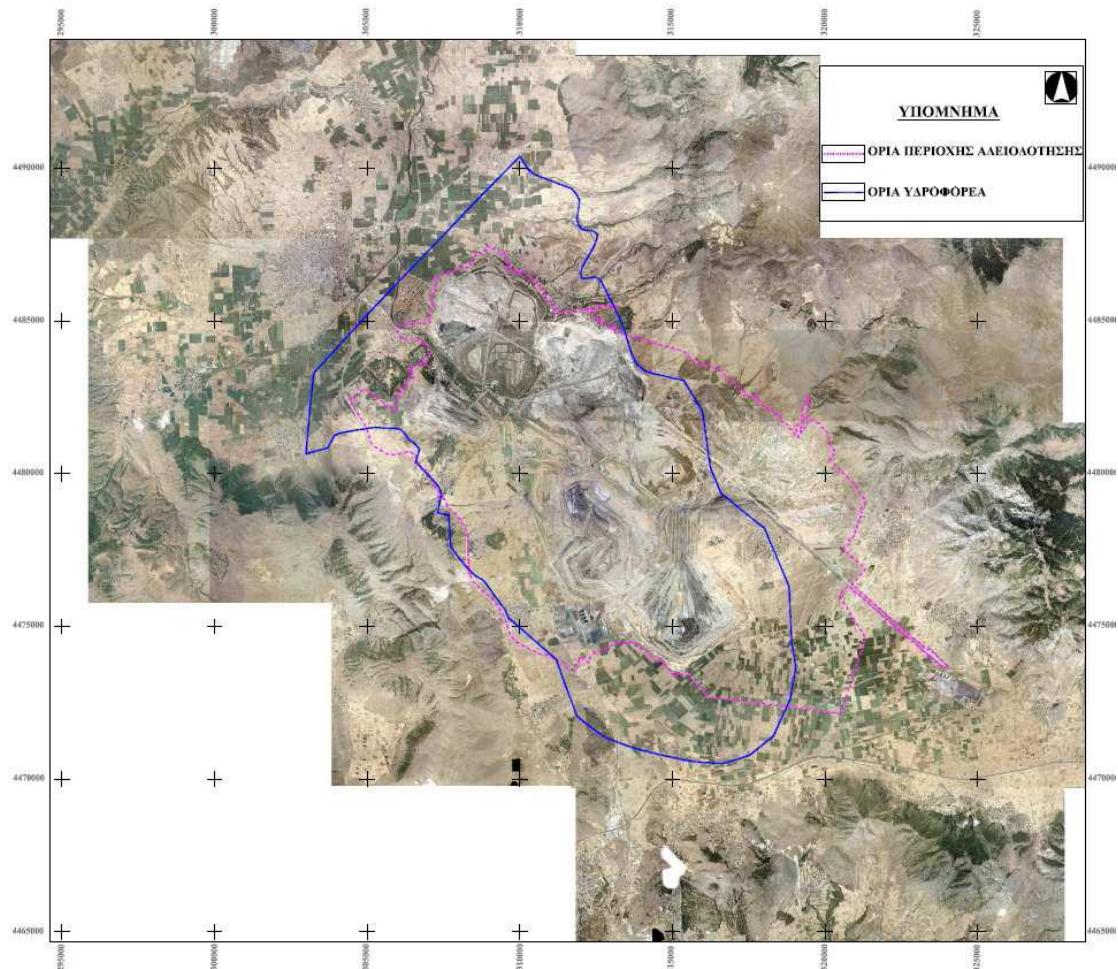
Στην περιοχή του Ορυχείου Μαυροπηγής σύμφωνα με την ΜΠΕ ορυχείων Πτολεμαΐδας, Ν. Κοζάνης, 2005 της ΔΕΗ Α.Ε προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα σε σχέση με την υδραυλική αγωγιμότητα:

- Η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας (k) του υδροφορέα υπερκειμένων εκτιμήθηκε σε 5×10^{-5} m/s. Δυτικά του ορυχείου παρατηρούνται χαμηλότερες τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας που κυμαίνονται μεταξύ 10^{-5} και 10^{-6} m/s. Το όριο αυτό λειτουργεί ως υδραυλικό φράγμα προς τα ΒΔ της περιοχής. Στο δυτικό άκρο, όπου το πάχος του υδροφορέα ανέρχεται σε 300m, η διαπερατότητα παρουσιάζει τη μέγιστη τιμή των 9×10^{-5} m/s. Βορειοανατολικά του ορυχείου της Μαυροπηγής, ο υδροφορέας μεταβάλλει τις υδραυλικές του συνθήκες και παρουσιάζει πολύ χαμηλές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας της τάξης των 10^{-9} m/s. Σύμφωνα με στοιχεία της ΔΕΗ/ΔΜΑΟΡ και την επεξεργασία των δεδομένων δοκιμαστικής άντλησης σε υδρογεώτρηση τη περιοχής, προέκυψε ότι η τιμή της υδαταγωγιμότητας είναι $T = 1,75 \times 10^{-3}$ m²/sec, ενώ από την επεξεργασία των δεδομένων της επαναφοράς η τιμή που υπολογίστηκε είναι $T = 1,15 \times 10^{-3}$ m²/sec.
- Σε γεωτρήσεις που πραγματοποιήθηκαν εντός του χώρου εξόρυξης (βαθμίδες) του Ορυχείου Μαυροπηγής, στο πλαίσιο της μελέτης των Δημητρακόπουλου Δ., Χατζησάββα Κλ. Και Ηλία Ι. (2010), η υδραυλική αγωγιμότητα της λιγνιτικής στρώσης, η οποία περιλαμβάνεται στον υδροφορέα υπερκειμένων, προσδιορίστηκε σε τάξη του 10^{-6} έως 10^{-8} m/s. Παρατηρήθηκε επίσης το φαινόμενο μείωσης της υδραυλικής αγωγιμότητας της λιγνιτικής στρώσης συναρτήσει του βάθους, με αποτέλεσμα η εν λόγω στρώση να θεωρείται ως πολύ λίγο διαπερατή, που δεν ευνοεί την κατείσδυση και την κυκλοφορία υπογείων νερών.
- Σύμφωνα με την ίδια μελέτη, η τελική μάργα, η οποία αποτελεί το «δάπεδο» του ορυχείου, βρέθηκε να έχει υδραυλική αγωγιμότητα της τάξεως του 10^{-8} έως 10^{-9} m/s, με αποτέλεσμα να θεωρείται από πολύ λίγο διαπερατή έως πρακτικά αδιαπέρατη.

Στα υποκείμενα της λιγνιτοφόρου στοιβάδας ιζήματα, αναπτύσσεται ένα δεύτερο υδροφόρο σύστημα, ο υδροφορέας υποκειμένων, η τροφοδοσία του πιθανολογείται ότι πραγματοποιείται από τα κράσπεδα της λεκάνης. Στην περιοχή της Μαυροπηγής

– Κομάνου υδροφορέας εμφανίζεται ελεύθερος, όπου και αντλείται, ενώ η κύρια περιοχή τροφοδοσίας του υδροφορέα υποκειμένων βρίσκεται στο ΝΑ άκρο του Ορυχείου Μαυροπηγής.

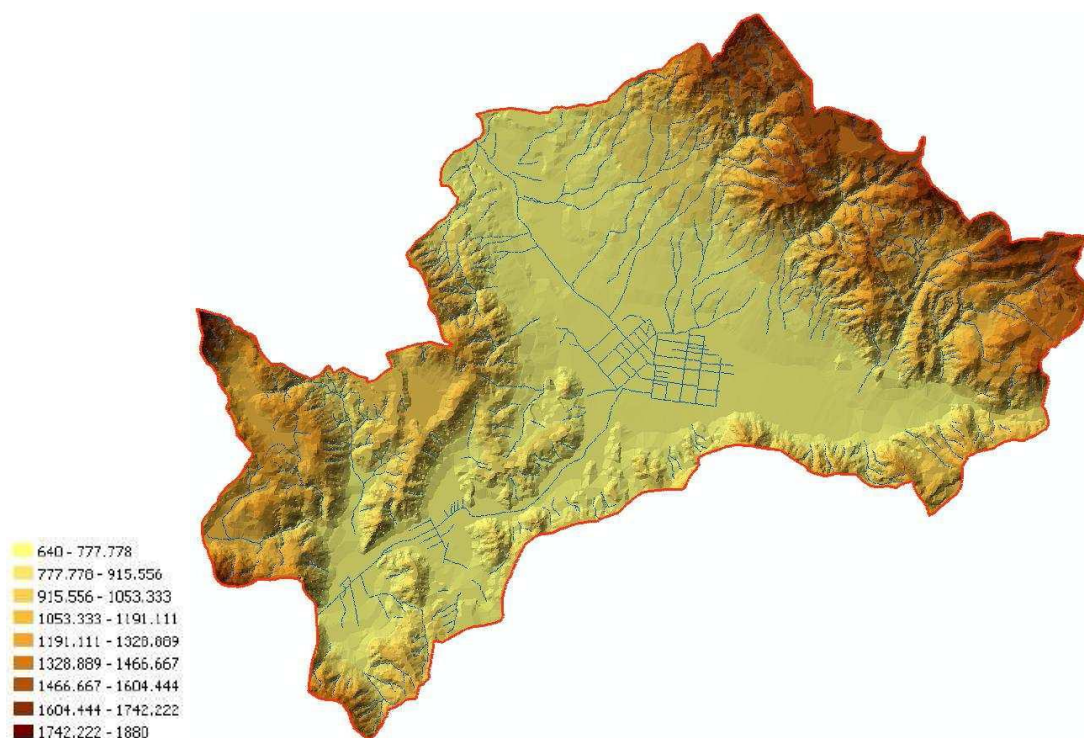
Τα όρια ανάπτυξης του υδροφορέα υποκειμένων, όπως περιλαμβάνονται στην Ειδική Υδρογεωλογική Μελέτη Ορυχείων Πτολεμαΐδας (Τσουφλίδου και Δημητρακόπουλος, 2005) (Σχήμα 3.7.5)



Σχήμα 3.7.4: Όρια υδροφόρου υποκειμένων (ΔΕΗ Α.Ε. μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων ορυχείων Πτολεμαΐδας, Ν. Κοζάνης)

Η υδραυλική αγωγιμότητα των σχηματισμών σύμφωνα με μελέτη των *Voigt J. and Schwarzenberg T. (2004)* είναι $k=10^{-5}$ m/s, με σημαντικό ρυθμό ροής προς ένα κώνο ταπείνωσης στο κεντρικό τμήμα. Καθώς οι αντλήσεις στην περιοχή δεν είναι σημαντικές, εκτιμάται ότι υπάρχει ροή προς βαθύτερους υδροφόρους ορίζοντες. Στα ΝΔ η ροή κατευθύνεται επίσης προς τον κώνο ταπείνωσης. Στο δυτικό και νότιο άκρο της περιοχής του μοντέλου οι διαπερατότητες κυμαίνονται μεταξύ 5×10^{-5} m/s και

$8 \times 10^{-5} \text{ m/s}$. Σύμφωνα με στοιχεία της ΔΕΗ/ΔΜΑΟΡ και την επεξεργασία των δεδομένων δοκιμαστικής άντλησης σε υδρογέωση της περιοχής, προέκυψε ότι η τιμή της υδαταγωγιμότητας είναι $T = 1,85 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$ ενώ από την επεξεργασία των δεδομένων της επαναφοράς η τιμή που υπολογίστηκε είναι $T = 1,22 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$.



Σχήμα 3.7.5: Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους λεκάνης απορροής Ορυχείων Πτολεμαΐδας (ΔΕΗ Α.Ε. μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων ορυχείων Πτολεμαΐδας, Ν. Κοζάνης, 2005).

Στις αναλύσεις ευστάθειας που πραγματοποιήθηκαν για την περιοχή της Μαυροπηγής έγινε προσομοίωση της πτώσης στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα. Η διαδικασία της προσομοίωσης της πτώσης στάθμης έγινε σε μοντέλο της περιοχής που εφαρμόστηκε σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Ζητούμενο της διαδικασίας αυτής είναι ο συνυπολογισμός του υδροφόρου ορίζοντα στην συμπεριφορά των μαργαϊκών σχηματισμών.

4 ΚΙΝΗΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΤΑ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΑ ΕΔΑΦΙΚΑ ΠΡΑΝΗ ΕΚΣΚΑΦΩΝ ΜΕΓΑΛΟΥ ΒΑΘΟΥΣ ΚΑΙ ΠΛΑΤΟΥΣ

Με την έναρξη μιας εκσκαφής αλλά και κατά την εξέλιξή της, προκαλείται συνεχής ανακατανομή τάσεων και διατάραξη τους από την κατάσταση ισορροπίας που είχαν αρχικά. Η γεωμετρία της εκσκαφής μπορεί να επιδράσει σημαντικά στην ευστάθεια του τελικού πρανούς, ή του προσωρινού πρανούς κατά την εξέλιξη της εκσκαφής, καθώς μπορεί να ελέγχει την κατανομή των τάσεων στο πρανές κατά την εξέλιξη της εκσκαφής.

Αποτέλεσμα της ανακατανομής των τάσεων είναι η δημιουργία ζωνών αποτόνωσης τάσεων όπως φαίνεται και στο σχήμα.



Σχήμα. 4.1 Ζώνες μειωμένης οριζόντιας τάσης σε μια μεγάλη εκσκαφή.

Σημαντικό ρόλο παίζουν τα χαρακτηριστικά του ίδιου του εδαφικού υλικού (νεογενή, τεταρτογενή) που θα υποστεί την εκσκαφή, τα οποία ελέγχουν την αντίδραση του εδάφους στην αλλαγή των ασκούμενων τάσεων αλλά και των εξωτερικών παραγόντων γενικά.

Επομένως η ανακατανομή των τάσεων σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά του εδάφους έχουν σαν αποτέλεσμα την διαταραχή της ισορροπίας του ορύγματος και την ανάπτυξη κινητικότητας στα εδαφικά πρανή. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η εκτεταμένη παραμόρφωση και η διατμητική αστοχία.

4.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την παραμόρφωση

Οι εκσκαφές προκαλούν παραμορφώσεις στους γεωλογικούς σχηματισμούς στους οποίους αναπτύσσονται. Στη συνέχεια θα δούμε τα αίτια των παραμορφώσεων, αίτια λόγω εκσκαφής αλλά και αίτια γεωλογικά και τεχνικογεωλογικά:

- Η Αρχική κατανομή των τάσεων (αρχική εντατική κατάσταση) (Κ₀) και μεταβολή τους με την εκσκαφή
- Γεωλογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή και με αυτό εννοούμε:
 - τη δομή
 - τους γεωλογικούς σχηματισμούς που επικρατούν στην περιοχή
 - την τεκτονική που έχουν υποστεί οι γεωλογικοί σχηματισμοί
- Τεχνικογεωλογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή και με αυτό εννοούμε:
 - τα μηχανικά χαρακτηριστικά των γεωλογικών σχηματισμών
 - τις επιφάνειες ολίσθησης που αναπτύσσονται μεταξύ των στρώσεων.
- Η επίδραση του νερού (πίεση πόρων και η μεταβολή της)
- Η γεωμετρία εκσκαφής και εννοούμε το βάθος της εκσκαφής (ύψος), το πλάτος της και την διαμορφούμενη γωνία του πρανούς.
- Δονήσεις φυσικές και τεχνητές που παρατηρούνται κατά την εξέλιξη της εκσκαφής.

4.2 Σχέση χρόνου - μετακίνησης

Σε μια εκσκαφή η εξέλιξη της παραμόρφωσης σχετίζεται με τον χρόνο. Η συνήθης εκδήλωση της εξάρτησης μεταξύ του χρόνου και της παραμόρφωσης είναι η παρατήρηση ρωγμών πίσω από τη στέψη του πρανούς, οι ρωγμές επί των πρανών και η ανύψωση στο πόδι του πρανούς.

Μπορούμε να ξεχωρίσουμε τρεις φάσεις χρονοεξαρτώμενης παραμόρφωσης:

1. Αρχική αντίδραση. Είναι αποτέλεσμα της ελαστικής αποτόνωσης του εδάφους, της χαλάρωσης και της διαστολής των σχηματισμών. Τα αίτια της υποβόσκουν στην αλλαγή των τάσεων λόγω εκσκαφής. Συμβαίνει χωρίς την ανάπτυξη συγκεκριμένης επιφάνειας αστοχίας ή μηχανισμού αστοχίας, αλλά με επέκταση κατά μήκος υπαρχόντων ρωγμών και ασυνεχειών ενώ εξαρτάται από την ποιότητα του υλικού. Η αρχική αντίδραση μειώνεται με τον χρόνο έως και σταματάει

Σύμφωνα με τον Martin (1993) η σχέση αυτή εκφράζεται

$$R=A e^{-br}$$

Όπου R βαθμός μετακίνησης

t χρόνος

A και b Σταθερές που σχετίζονται με τις ιδιότητες του υλικού, τη γεωμετρία του πρανούς (ύψος και γωνία), τον βαθμό τη εκσκαφής, τις εξωτερικές επιδράσεις και τον κύριο μηχανισμό αστοχίας.

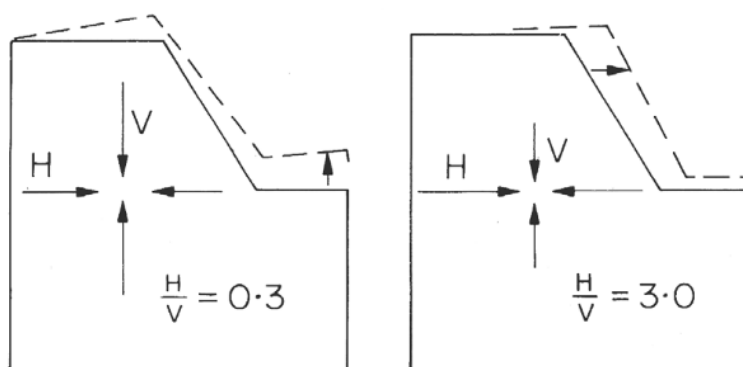
2. Μειούμενη αστοχία παρουσιάζει προσωρινά επιβραδυνόμενες μετατοπίσεις, αν πάψουν να δρουν στο πρανές εξωτερικοί παράγοντες που επιβαρύνουν την ευστάθειά του. Προκαλούνται από παροδικά γεγονότα όπως εκρήξεις, σεισμούς, μεταβαλλόμενη πίεση πόρων.
3. Προοδευτική αστοχία παρουσιάζει μετατοπίσεις με αυξητική τάση μέχρι το σημείο κατάρρευσης.

4.3 Κινήσεις περιφερικών εδαφικών πρανών μετά την εκσκαφή

Μετά τη πραγματοποίηση μιας εκσκαφής στο πρανές του ορύγματος αναμένουμε να έχουμε μετακινήσεις των γεωλογικών σχηματισμών, οι κινήσεις αυτές ελέγχονται από τη γεωλογία (δηλαδή τους γεωλογικούς σχηματισμούς που θα υποστούν την εκσκαφή και τη δομή τους), τις μηχανικές ιδιότητες των γεωλογικών σχηματισμών, την κατανομή των τάσεων (τασικό πεδίο), τις συνθήκες της υδρογεωλογίας, την τεχνική που εφαρμόζεται κατά την εκσκαφή (δηλ. τη γεωμετρία, το χρόνο και τις διαστάσεις).

Επομένως η διαδικασία της εκσκαφής επηρεάζει την κατανομή των τάσεων στο πρανές του ορύγματος. Με κάθε βήμα εξέλιξης της εκσκαφής η ισορροπία των δυνάμεων που ασκούνται στο πρανές αλλάζει και οι τάσεις ανακατανέμονται στη προσπάθεια του συστήματος να ισορροπήσει.

Ο λόγος μεταξύ των οριζόντιων και κατακόρυφων τάσεων που αναπτύσσονται στο πεδίο ορίζουν το μέγεθος της ανοδικής κίνησης του δαπέδου σε σχέση με τη παραμόρφωση των πρανών. Άρα η διεύθυνση κίνησης σε ομογενές γεωλογικό πρανές ελέγχεται από την κατανομή των τάσεων και την αναλογία κατακόρυφων προς οριζόντιες τάσεις ($K_0 = H/V$).



Σχήμα 4.3.1 Κινητικότητα εκσκαφής που αναπτύσσεται σε ομογενή εδαφικό σχηματισμό (Blyth and de Freitas, 1984 από Yu and Coates, 1979), όπου V είναι η κάθετη τάση και H η οριζόντια τάση.

Σε ένα τεχνητό πρανές διακρίνουμε τις παρακάτω πιθανές κινήσεις:

1. Ανύψωση στη βάση του πρανούς δηλαδή κάθετη προς τα πάνω διόγκωση του γεωλογικού υλικού στο δάπεδο της εκσκαφής, που οφείλεται στην μείωση του φορτίου με την αφαίρεση εδάφους. Ο βαθμός της ανύψωσης εξαρτάται από την ελαστικότητα και στρωσιγένεια του σχηματισμού του δαπέδου.
2. Κύρτωση δαπέδου, λόγω συμπίεσης και σύνθλιψης και μικρού εύρους κάμψης μαλακών σχηματισμών, που μπορεί να βρίσκονται σε στρώση με στιφρούς και αποκαλύπτονται στο δάπεδο κατά την εκσκαφή.
3. Οριζόντια μετακίνηση πρανών (παραμόρφωση). Κίνηση των πρανών του ορύγματος προς το εσωτερικό της εκσκαφής λόγω αφαίρεσης της αντιστήριξης κατά τη διαδικασία λήψης των εκσκαπόμενων υλικών με αποτέλεσμα την αποτόνωση των πλευρικών σχηματισμών.
4. Καθίζηση ανάντη της στέψης. Οι παραμορφώσεις των πρανών και η ανύψωση του δαπέδου εκσκαφής συνοδεύονται από μια καθίζηση περιφερειακά του

ορύγματος. Επίσης ο υποβιβασμός του υδροφόρου ορίζονται και η επακόλουθη στερεοποίηση μπορούν να επιφέρουν καθίζηση.



Σχήμα 4.3.2: Τυπική γεωμετρία πρηνούς και κύριες μετακινήσεις

4.4 Μηχανισμοί αστοχίας

Το καινούριο καθεστώς τάσεων που επικρατεί στο πρηνές μετά την εκσκαφή (αλλαγή αναλογίας ορθών και κατακόρυφων τάσεων) έχει σαν αποτέλεσμα την παραμόρφωση των γεωλογικών σχηματισμών, αν οι τάσεις που ενεργούν στο εδαφικό υλικό ξεπερνούν την αντοχή του το πρηνές θα αστοχήσει.

Επομένως θα καταγράψουμε τους πιθανούς μηχανισμούς ολίσθησης σε εδαφικά πρηνή.

Η **Περιστροφική** ολίσθηση συμβαίνει σε εδαφικά υλικά με πολύ μικρή συνοχή (τεταρτογενή) ή σε περίπτωση νεογενών υλικών διαρρηγμένων από πολλές ασυνέχειες, λόγω της αποτόνωσης τους από την έλλειψη αντιστήριξης. Αναπτύσσεται με κυκλική επιφάνεια ολίσθησης, με τη δημιουργία διαδοχικών κύκλων ολίσθησης με ρηχές επιφάνειες θραύσης κατά μήκος μη προδιαγεγραμμένων επιφανειών θραύσης. Η επιφάνεια θραύσης αναπτύσσεται με διεύθυνση από το πόδι του πρηνούς προς τα εσωτερικό.

Σε περίπτωση σχηματισμών που βρίσκονται σε στρωματογραφική ακολουθία, η εκτόνωση που προκαλείται με την εκσκαφή έχει σαν αποτέλεσμα την κίνηση των στρωμάτων με διαφορετικό ρυθμό, εφόσον έχουν διαφορετικές ιδιότητες και τη δημιουργία ασυνεχειών πάνω σε προϋπάρχουσες επιφάνειες αδυναμίας. Στη περίπτωση των μαργαϊκών σχηματισμών οι επιφάνειες ολίσθησης αναπτύσσονται σε

στρώματα με αργιλικά υλικά υψηλής πλαστικότητας τα οποία παρεμβάλλονται σε πρακτικά μη διαπερατά στρώματα πάχους δεκάδων μέτρων.

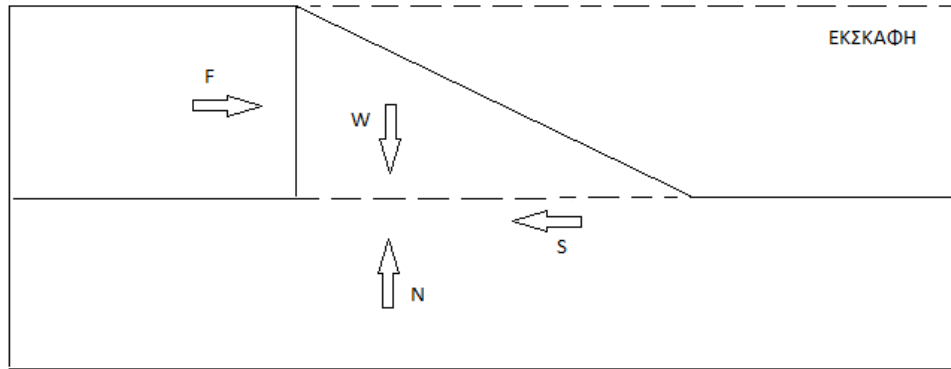
Σε τέτοιες περιπτώσεις η μέγιστη διατμητική δύναμη μπορεί να μην κινητοποιείται ταυτόχρονα σε όλα τα σημεία στην επιφάνεια της αστοχίας. Όταν η δύναμη που καταπονεί το πρανές φτάσει την μέγιστη τιμή της, τότε η διαθέσιμη διατμητική αντίσταση θα προσεγγίσει την παραμένουσα αντοχή, με αποτέλεσμα τη δημιουργία επιφάνειας ασυνέχειας, πάνω στην οποία η αντοχή συνεχώς θα πέφτει, ώστε τελικά να μεταπέσει σε παραμένουσα διατμητική αντοχή.

Με τη διαδικασία της προοδευτικής θραύσης τα εδαφικά πρανή αστοχούν σε μία επιφάνεια επίπεδης αστοχίας, όπως σε επίπεδο διάστρωσης ή σε υφιστάμενη ασυνέχεια. Η αρχική εντατική κατάσταση (λόγω μεγάλων αρχικά τάσεων) την οποία υφίστανται οι εδαφικοί σχηματισμοί μπορεί να είναι καθοριστική για την έναρξη προοδευτικής αστοχίας. Όσο η αναδιανομή των τάσεων συνεχίζεται, λόγω της εκσκαφής και της αστάθειας, η ζώνη της αστοχίας μπορεί να μεγαλώνει μέχρι ολόκληρο το πρανές να γίνει ασταθές. Η επιφάνεια ασυνέχειας κατά μήκος της οποίας πραγματοποιείται η αστοχία αναπτύσσεται με διεύθυνση από το πόδι του πρανούς προς το εσωτερικό των νεογενών.

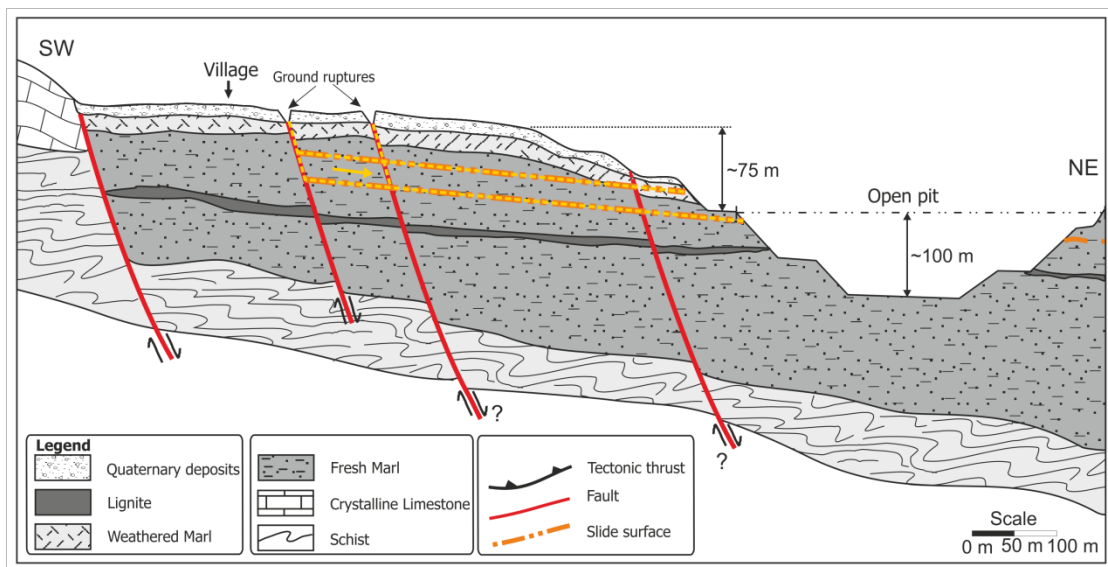
Από τη παραοριζόντια επιφάνεια ολίσθησης (παράλληλα με τη στρώση) και υπό γωνία (μέσω της θραύσης στη μάργα) μέσα στο σώμα της μάργας αναπτύσσεται μια δευτερογενής επιφάνεια ολίσθησης, η οποία θα καταλήξει στην επιφάνεια του πρανούς σαν ρωγμή (κατά μήκος κάποιου προϋπάρχοντος ρήγματος). Η δευτερογενής αυτή επιφάνεια ολίσθησης δημιουργείται με τη μείωση της πλευρικής στήριξης, την ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων και επομένως την ανάπτυξη εφελκυστικών ρωγμών. Οι επιμέρους επιφάνειες ολίσθησης ενώνονται με θραύση στο σώμα της μάργας.

Ο μηχανισμός ολίσθησης χαρακτηρίζεται ως **πολυεπίπεδη ολίσθηση** καθώς αποτελείται από επιμέρους επιφάνειες που ενώνονται μεταξύ τους με ένα κομμάτι όπου η μάργα θα υποστεί θραύση.

Η επιφάνεια ασυνέχειας είναι προδιαγεγραμμένη σε αυτή τη περίπτωση αστοχίας. Συμβαίνει, λοιπόν, κατά μήκος επιφανειών με ήδη χαμηλά μηχανικά χαρακτηριστικά (χαμηλά c και ϕ) όπως είναι προϋπάρχοντα ρήγματα και επιφάνειες στρώσης.



Σχήμα 4.4.1: Μηχανισμός προοδευτικής θράυσης (σύμφωνα με Καβουνίδη), όπου W είναι το βάρος και N είναι η ορθή τάση και τα δύο εξαρτώνται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και την πυκνότητα του εδάφους, S συνολική διατμητική αντοχή, F ώθηση γαιών που βρίσκονται πίσω από το πρανές



Σχήμα 4.4.2: Τύπος κατολίστησης και ανάπτυξης της επιφάνειας ολίσθησης.

4.5 Περιπτώσεις μετακινήσεων εδαφικών πρανών σε περιοχές μεγάλων εκσκαφών

Για την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς των εδαφικών σχηματισμών και συγκεκριμένα της μάργας έγινε συλλογή και μελέτη από στοιχεία, από υπάρχουσες εργασίες και μελέτες, για εκσκαφές που έχουν αναπτυχθεί σε μαργαϊκούς σχηματισμούς στο λιγνιτικό πεδίο της Πτολεμαΐδας. Τα στοιχεία αυτά αφορούν στην γεωλογία, την τεκτονική, και τη γεωμετρία των εκσκαφών και πως αυτά οδηγούν σε

συγκεκριμένους μηχανισμούς αστοχίας, οι οποίοι προσομοιώθηκαν σε προγράμματα ευστάθειας στην εκάστοτε μελέτη και απέδωσαν τους πιθανούς συντελεστές ασφαλείας.

4.5.1 Λιγνιτωρυχείο Προσήλιο Ν. Κοζάνης

Το λιγνιτωρυχείο του Προσηλίου βρίσκεται στο Ν. Κοζάνης, έξω από τον οικισμό Προσήλιο, στην περιοχή των Σερβίων. Η εκσκαφή ξεκίνησε το 1995 και συνεχίζεται μέχρι σήμερα, με μια ενδιάμεση παύση εργασιών το 2000 -2005. Το Σεπτέμβριο του 2008 παρατηρήθηκαν ρωγμές στην ανατολική επιφάνεια του ορυχείου και επομένως οι πρώτη εκδήλωση μετακίνησης, η οποία συνεχίστηκε αργά αλλά σταθερά. Τον χειμώνα του 2010-2011 παρατηρήθηκε αύξηση ρυθμού των μετακινήσεων, παρά την τοποθέτηση πλευρικού αντίβαρου που έγινε προς αντιμετώπιση του φαινομένου, με αποτέλεσμα την κατολίσθηση στις 27/2/2011.

Σημειώνεται ότι το τεχνητό πρανές του ορυχείου στο οποίο εκδηλώθηκε η αστοχία στις 27/02/2011 είχε μέγιστο ύψος 70.0m και πλάτος 130.0. Με βάση την τοπογραφική αποτύπωση μετά την κατολίσθηση το μέγιστο πλάτος της επιφάνειας ολίσθησης ήταν περίπου 240.0m.

Γεωλογικοί σχηματισμοί στον χώρο του ορυχείου

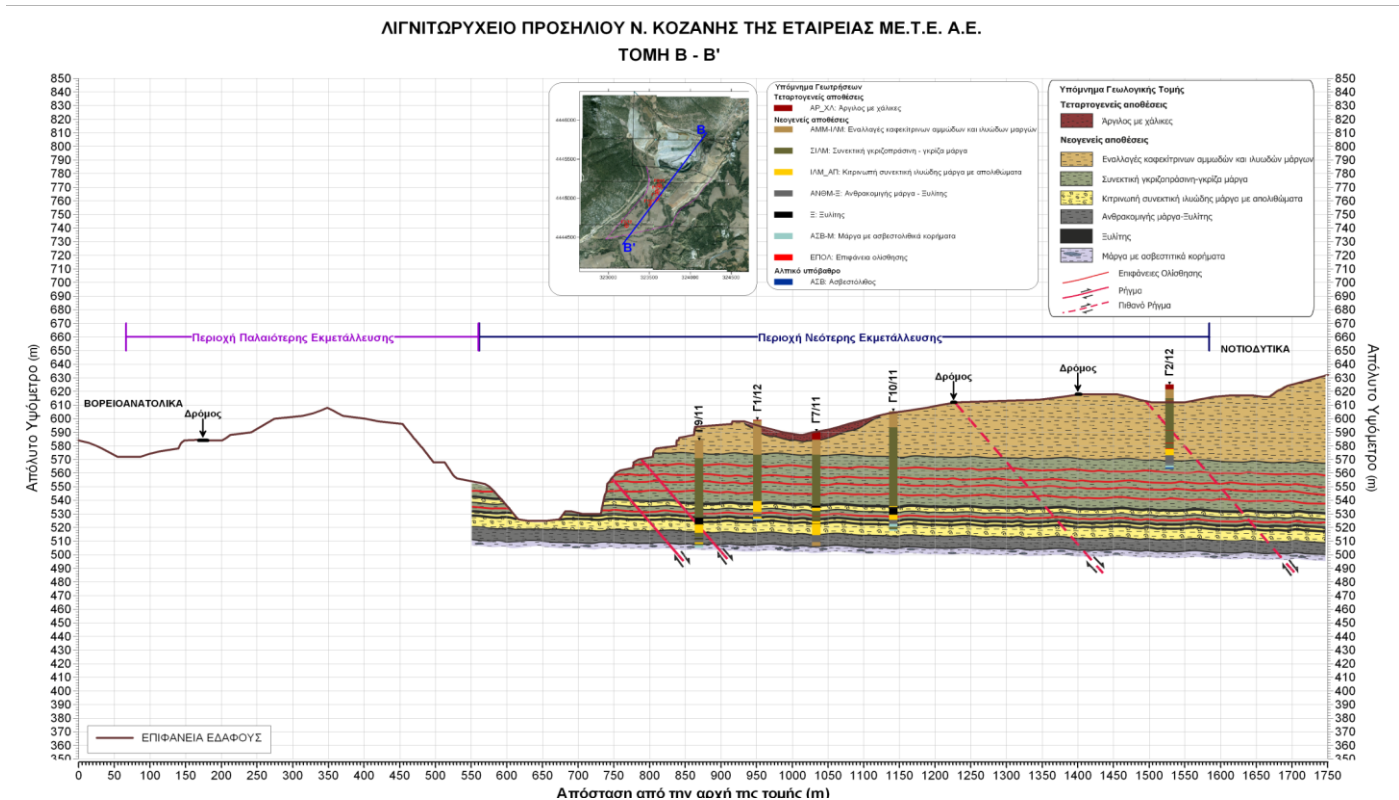
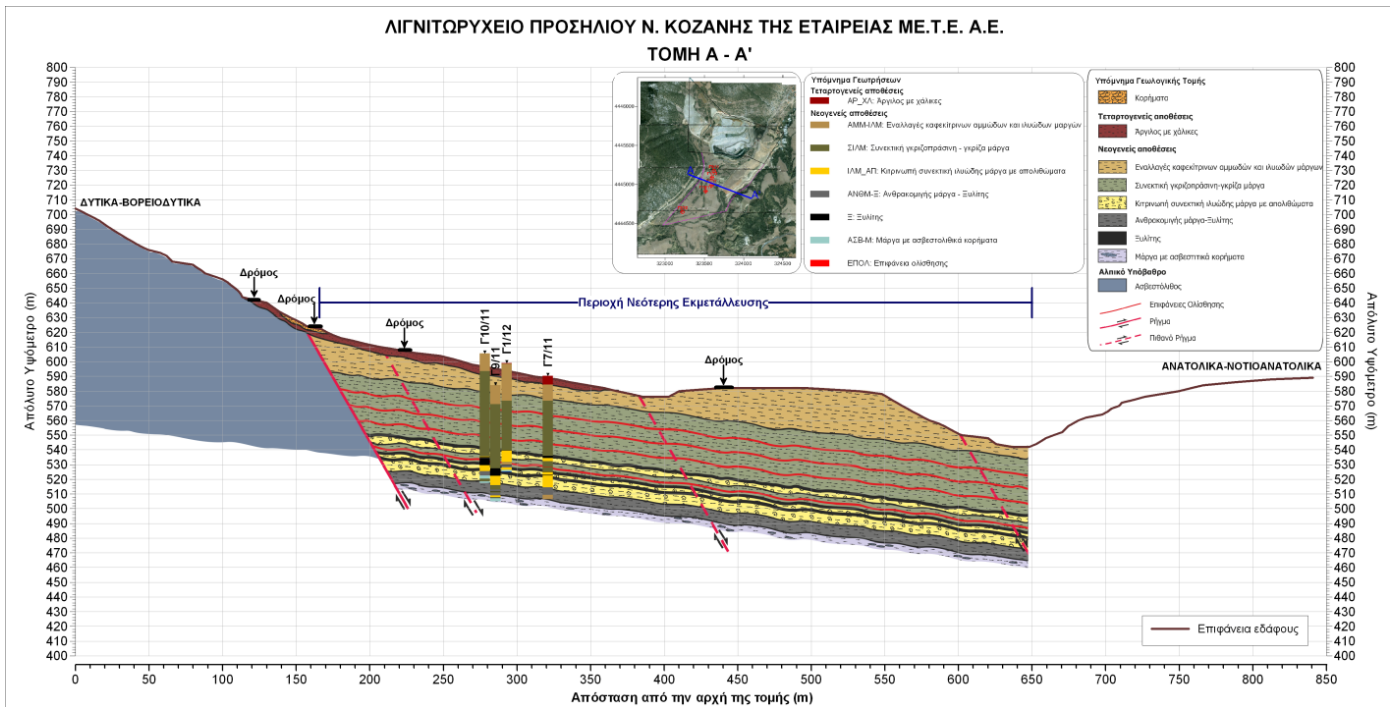
Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που απαντώνται στη περιοχή του ορυχείου παρατίθενται στον ακόλουθα πίνακα καθώς επίσης το μέσο βάθος στο οποίο εντοπίζονται και το μέσο πάχος τους. διερευνητικές κοιτασματολογικές γεωτρήσεις που εκτελέστηκαν το 2011 από τη μελέτη «Γεωτεχνική έρευνα και εδαφομηχανική μελέτη ασφαλούς και οικονομικής θεμελίωσης του έργου Παράκαμψη Ε.Ο. Προσηλίου - Τρανοβάλτου για λογαριασμό της ΜΕ.Τ.Ε. Α.Ε. (Τσιρέκας Αθανάσιος, Δεκέμβριος 2007)».



Σχήμα: 4.5.1 Απεικόνιση της στρωματογραφίας των σχηματισμών στη θέση του ορυχείου Προσηλίου στο Ν. Κοζάνης (Μαρίνος 2012)

Πίνακας 4.5.1 Περιγραφή των γεωλογικών σχηματισμών στο ορυχείο Προσηλίου Ν. Κοζάνης, προσδιορισμός βαθους εμφάνισής τους και πάχους τους

ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΙΣ ΑΠΟΘΕΣΕΙΣ	Άργιλοι, χαλίκια, λατύπες ασβεστολίθων	0-6m	Από λίγα έως 15-20m
ΝΕΟΓΕΝΕΙΣ ΑΠΟΘΕΣΕΙΣ	Καφεκίτρινες- καστανές αμμώδεις μάργες και ιλυώδεις μάργες	6-17m	11m
	Γκριζοπράσινες- γκριζές συνεκτικές ιλυώδεις μάργες	6 -25m	
	Λιγνίτης	30-70m	2-5.5m(συνολικά 100)
	Λεπτά στρώματα ανθρακομιγούς μάργας και κιτρινωπης υλιώδους μάργας με απολιθώματα	Μεταβατικά στρώματα	2-3m
ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΣΤΟ ΣΩΜΑ ΤΩΝ ΜΑΡΓΑΪΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ			
ΣΥΜΠΑΓΕΙΣ ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟΙ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΙ	ΥΠΟΒΑΘΡΟ		



Περιγραφή του Μαργαϊκού σχηματισμού στο λιγνιτωρυχείο Προσηλίου

Γεωμετρία μαργαϊκών σχηματισμών: Παρουσιάζουν παραοριζόντια ανάπτυξη μικρής κλίσης περίπου 5° - 10° ενώ βύθιζονται προς Α.ΝΑ., η κλίση αυτή είναι ομόρροπη με τα δυτικά πρηνή εξόρυξης και ελαφρά αντίρροπη με τα νότια πρηνή.

Τεκτονική καταπόνηση: τα νεογενή τεκτονικά ρήγματα που έδρασαν στη περιοχή επέδρασαν και στην εσωτερική γεωμετρία και κατά θέσεις στην αντοχή των νεογενών σχηματισμών. Έτσι λόγω τεκτονισμού δημιουργήθηκαν επιφάνειες διάτμησης, με μειωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά, κατά μήκος των ήδη υπαρχουσών επιφανειών στρώσης και των ρηγμάτων, οι επιφάνειες ολίσθησης εμφανίζονται στα πρηνή περίπου ανά 10m με την ίδια γεωμετρία. Αν οι επιφάνειες αυτές έχουν δυσμενή προσανατολισμό σε σχέση με τη κλίση των πρηνών τότε μπορεί να οδηγήσουν σε ολίσθηση κατά μήκος τους.

Η τεκτονική καταπόνηση δεν δημιούργησε εμμονή στην ασυνέχεια ή σημαντικό κερματισμό στη βραχώμαζα.

Γεωμετρία και Μηχανισμοί αστοχίας

Η ευστάθεια των πρηνών στην περιοχή μελέτης ελέγχεται κυρίως είτε από τις επιφάνειες αδυναμίας (ασυνεχειών ή ρηγμάτων μειωμένης διατμητικής αντοχής) όταν αυτές έχουν ευμενή προσανατολισμό σε σχέση με τα εκσκαπτόμενα ορύγματα, είτε από την αντοχή των άρρηκτων μαργών, είτε από συνδυασμό των ανωτέρω.

Η ευστάθεια των πρηνών της περιοχής ελέγχεται κυρίως από

- i) την αντοχή των άρρηκτων μαργών όπου μπορεί να υπάρξει θραύση και περιστροφική επιφάνεια ολίσθησης. Στην περίπτωση αυτή η πιθανότητα αστοχίας εξαρτάται από το ύψος και τις κλίσεις των πρηνών και όχι από τη διεύθυνσή τους. Η περιστροφική ολίσθηση εκδηλώνεται κυρίως στις τεταρτογενείς αποθέσεις των αργίλων, που είναι μικρότερης έκτασης. Συνεπώς ένας πιθανός μηχανισμός αστοχίας είναι μία περιστροφική ολίσθηση μέσα από τις μάργες ανεξάρτητα από την γεωμετρία των επιφανειών ολίσθησης και των πρηνών
- ii) τις επιφάνειες αδυναμίας (ή επιφάνειες μειωμένης διατμητικής αντοχής). Εδώ η μορφή αστοχίας είναι η ολίσθηση κατά μήκος επιφανειών μειωμένης διατμητικής αντοχής εντός της μάργας, παράλληλα στη στρώση (επιφάνειες στρώσης και ρηγμάτων) οι οποίες μπορεί να «καθοδηγήσουν» μια πιθανή ολίσθηση. Όταν στους

μηχανισμούς αστοχίας που περιλαμβάνονται προϋπάρχουσες επιφάνειες μειωμένης διατμητικής αντοχής, πρέπει να ελεγχθεί πρώτα η γεωμετρία τους σε σχέση με τη γεωμετρία των πρανών.

iii) τον συνδυασμό των παραπάνω, ολίσθηση με τη μορφή πρίσματος επί των επιφανειών αδυναμίας σε συνδυασμό με ρήγματα της περιοχής.

Τονίζεται ότι και για τους δύο τελευταίους αυτούς μηχανισμούς ολίσθησης πρέπει να υπάρχει παραλληλία της διεύθυνσης κλίσης των πρανών και των δυνητικών προϋπαρχουσών επιφανειών ολίσθησης. Το υπόγειο νερό, στη περίπτωση που απαντηθεί πάνω στις επιφάνειες ολίσθησης ή γενικότερα μέσα στις μάργες θα δημιουργήσει πιέσεις πόρων και δυσμενέστερες συνθήκες ευστάθειας.

Χαρακτηριστικό στις επιφάνειες ολίσθησης που επηρεάζουν τη γεωμετρία της αστοχίας είναι ότι εμφανίζονται ανά 10m, είναι παράλληλα στη στρώση, έχουν ίδια γεωμετρία και τέλος περιέχουν λεπτό αργιλικό υμένα.



Σχ. 4.5.4 Οι παράλληλες επιφάνειες ασυνέχειας που εμφανίζονται στο μέτωπο της εκσκαφής.(Μαρίνος 2012)

Γεωτεχνικές συνθήκες

Τα εδαφικά υλικά, που συναντώνται στο ορυχείο σύμφωνα με τον Μαρίνο (2012) χωριστήκαν σε επτά ενότητες σύμφωνα με τα γεωτεχνικά τους χαρακτηριστικά. Συνολικά οι γεωτεχνικές ενότητες αυτές χαρακτηρίζονται από χαμηλά μηχανικά

χαρακτηριστικά, με εξαίρεση την υγιή μάργα της οποίας οι παράμετροι διατμητικής αντοχής εμφανίζονται ικανοποιητικές.

Πίνακας 4.5.2: Γεωτεχνικές παράμετροι γεωτεχνικών ενοτήτων και διεπιφανειών.(Μαρίνος 2012)

ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΟ ΜΕΛΟΣ	ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΕΝΩΤΗΤΑ	γ (KN/m ³)	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ	
			c (MPa)	ϕ (⁰)
G1	Μαλακή καφέ ιλυώδης άργιλος με χάλικες (τεταρτογενή)	19	10	30
G2	Εναλλαγές καφεκίτρινης συνεκτικής ιλώδους και αμμώδους μάργας (αποσαθρωμένη ζώνη)	20	60	24
G3	Γκριζοπράσινη έως γκριζα συνεκτική μάργα (μη αποσαθρωμένη ζώνη)	20	150	35
G4	Ξυλίτης και ανθρακομιγής μάργα	20	50	35
G5	Ασβεστόλιθοι ασβεστιτική μαργα(υπόβαθρο)	Δεν λαμβάνεται υπ' όψιν στις αναλύσεις		
O	Ολισθηρές διεπιφάνειες κατά μήκος των στρώσεων μέσα στη μάργα	5	5	18
F	Επιφάνειες ρηγμάτων	5	5	18

Εξέλιξη κατολίσθησης

Το φαινόμενο της κατολίσθησης ξεκίνησε λόγω επίδρασης περιβαλλοντικών παραγόντων, κυρίως κατά το διάστημα όπου είχαν σταματήσει η εργασία, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι σε έργα τέτοιας κλίμακας (μεγάλο ύψος ορυγμάτων) οι μικρομετακινήσεις είναι αναπόφευκτες. Η ύπαρξη της επιφάνειας αδυναμίας στην επαφή υγιούς ασθενούς μάργας είναι επιβαρυντική για την ευστάθεια και σε συνδυασμό με τον ερπυσμό οδήγησε σε ολίσθηση, οι οποίες με τη σειρά τους οδήγησαν σε διάνοιξη ρωγμών γύρω από το όριο της εκσκαφής. Αποτέλεσμα των ρωγματώσεων ήταν η είσοδος νερού, στον μέχρι τώρα αδιαπέρατο σχηματισμό, που λόγω της πίεσης προκάλεσε περεταίρω διεύρυνση των ρωγμών και η μικρή μείωση της αντοχής της μάργας.

Η παραπάνω διεργασία συνεχίστηκε με αυξητικό ρυθμό μέχρι τη τελική αστοχία κάτω από συνθήκες υψηλής πίεσης πόρων και παραμένουσας, πλέον, διατμητικής αντοχής.

Ανάλυση ευσταθείας

Οι αναλύσεις ευστάθειας σε δύο διαστάσεις πραγματοποιήθηκαν σε κρίσιμη διατομή, δηλαδή σε επιφάνεια που έχει δυσμενή σχέση κλίσης επιφανειών αδυναμίας με τα πρανή. Για την πραγματοποίηση των αναλύσεων έγιναν κάποιες α priori παραδοχές Η τιμή του συντελεστή πείσεων πόρων R_u εξετάστηκε παραμετρικά θεωρήθηκαν τιμές $R_u=0.10, 0.15, 0.20$ και 0.25 , ώστε να εξετάζεται η ευστάθεια ανάλογα με την εποχή (καλοκαίρι, χειμώνας κτλ) και την αναμενόμενη κατάσταση πίεσης πόρων στους σχηματισμούς. Και τέλος στις επιφάνειες αδυναμίας και ρηγμάτων δόθηκε πολύ χαμηλή διατμητική αντοχή.

Ο προσδιορισμός της ευστάθειας, δηλ. του συντελεστή ασφαλείας έγινε μέσω του λογισμικού slide v.6 της εταιρείας RocScience, σαν πρανές απείρου μήκους χωρίς να λαμβάνεται υπόψη ο παράγοντας πλάτους στην ευστάθεια, (δισδιάστατη ανάλυση).

Για να εξεταστούν όλες οι πιθανές γεωμετρικές επιφανειών ολίσθησης, στη συγκεκριμένη διατομή πραγματοποιήθηκαν τέσσερις ομάδες αναλύσεων, με δεδομένη την προσωρινή φύση του έργου, θεωρήθηκε ελάχιστη αποδεκτή τιμή του συντελεστή ασφαλείας ίση με 1.10:

- 1^η ομάδα: Ανάλυση σε κυκλικές επιφάνειες ολίσθησης, εξετάζεται αστοχία που πραγματοποιείται στη κύρια μάζα του γεωυλικού. Δεν λαμβάνονται υπόψη οι επιφάνειες αδυναμίας και τα ρήγματα εντός του μαργαϊκού σχηματισμού
 $F < 1.10$ αστοχία
- 2^η ομάδα: Πρισματικές επιφάνειες ολίσθησης, εδώ ελέγχεται η ανάπτυξη ολίσθησης πολυγωνικής μορφής η οποία μπορεί τμηματικά να περιλαμβάνει μέρος των ζωνών αδυναμίας εντός του μαργαϊκού σχηματισμού και των ρηγμάτων, διατρέχουν λοιπόν μέρος των επιφανειών αδυναμίας και πιθανών ρηγμάτων
 $F < 1.10$ αστοχία
- 3^η ομάδα: Επιφάνεια ολίσθησης τύπου δίδρου, όπου διέρχονται από τις επιφάνειες αδυναμίας εντός μαργαϊκού σχηματισμού και από τα πιθανά ρήγματα. Οι επιφάνειες τύπου δίδρου είναι καθορισμένες από τον χρήστη.

F<1.10 αστοχία

- 4^η ομάδα: Πολυγωνικής μορφής, διέρχονται από τις επιφάνειες αδυναμίας εντός άρρηκτου μαργαϊκού σχηματισμού και μέσα από την άρρηκτη αρχικά κύρια μάζα των επικρατούντων γεωυλικών (περίπτωση μη επιρροής ρηγμάτων). Οι επιφάνειες ολίσθησης είναι καθορισμένες από τον χρήστη.

F<1.10 αστοχία

Αποτελέσματα ευστάθειας (συνοψίζονται στους ακόλουθους πίνακες):

Πίνακας 4.5.3 Αποτελέσματα συντελεστή ασφαλείας για κυκλικές επιφάνειες ολίσθησης (Μαρίνος 2012)

Συντελεστής πίεσης πόρων R_u	Συντελεστής ασφαλείας F_{2D}		
	Bishop	GLE- Price	Morgernstern Spencer
0.10	1.031	1.034	1.034
0.15	0.962	0.966	0.968
0.20	0.890	0.895	0.897
0.25	0.818	0.824	0.825

Σχήμα 4.5.4: Αποτελέσματα συντελεστή ασφαλείας για πρισματικές επιφάνειες (Μαρίνος 2012)

Συντελεστής πίεσης πόρων R_u	Συντελεστής ασφαλείας F_{2D}		
	Bishop	GLE- Price	Morgernstern Spencer
0.10	0.724	0.872	0.865
0.15	0.680	0.787	0.791
0.20	0.644	0.736	0.743
0.25	0.573	0.684	0.692

Πίνακας 4.5.5 Αποτελέσματα συντελεστή ασφαλείας σε επιφάνειες ολίσθησης τύπου δίδρου (Μαρίνος 2012)

Συντελεστής πίεσης πόρων R_u	Συντελεστής ασφαλείας F_{2D}		
	Bishop	GLE- Price	Morgernstern Spencer
0.10	0.721	0.870	0.874
0.15	0.670	0.814	0.817
0.20	0.621	0.758	0.761
0.25	0.571	0.704	0.707

Πίνακας 4.5.6: Αποτελέσματα συντελεστή ασφαλείας πολυγωνικής μορφής που διέρχονται από τις επιφάνειες αδυναμίας εντός του μαργαϊκού σχηματισμού και από τη κύρια μάζα των επικρατέστερων υλικών (Μαρίνος 2012)

Συντελεστής πίεσης πόρων R_u	Συντελεστής ασφαλείας F_{2D}		
	Bishop	GLE- Price	Morgernstern Spencer
0.10	1.038	1.057	1.054
0.15	0.969	0.986	0.991
0.20	0.898	0.914	0.909
0.25	0.825	0.842	0.838

Συμπερασματικά κρίνοντας από τους συντελεστές ασφαλείας μπορούμε να πούμε ότι κρισιμότερη περίπτωση είναι η είναι η ολίσθηση σε επιφάνειες τύπου δίδρου, όπου οι συνθήκες ευστάθειας γίνονται τόσο δυσμενέστερες. Οι συνθήκες γίνονται πιο δυσμενείς:

- όσο βαθύτερα βρίσκεται η παραοριζόντια επιφάνεια αδυναμίας, όσο μικρότερη είναι η απόσταση από τον πόδα του ορύγματος
- όσο μικρότερη είναι η απόσταση του ρήγματος από την επιφάνεια του διαμορφωμένου πρανούς
- με την αύξηση του δείκτη πίεσης πόρου του οπίου η αύξηση επηρεάζει αρνητικά την ευστάθεια, εφόσον καθώς αυξάνεται η τιμή R_u παρατηρείται και
- μείωση του συντελεστή ασφαλείας, όπως φαίνεται στους παραπάνω πίνακες.

Ανάλυση ευσταθείας με την έννοια της τρίτης διάστασης

Μέχρι τώρα στην η ανάλυση ευστάθειας γινόταν δισδιάστατα, δηλαδή λαμβάνοντας υπόψη το ύψος και την κλίση του πρανούς. Θα μπορούσαμε να προσομοιώσουμε και να υπολογίσουμε την ευστάθεια της εκσκαφής και στην τρίτη διάσταση λαμβάνοντας υπόψη τη διάσταση του πλάτους εκσκαφής στους υπολογισμούς μας. Το όφελος αυτής της προσέγγισης είναι μια πιο ρεαλιστική ανάλυση ευσταθείας χρησιμοποιώντας ένα ακόμα εργαλείο για τον έλεγχο του συντελεστή ευστάθειας των πρανών εκμετάλλευσης.

Ζητούμενο είναι η διαμόρφωσης ορυγμάτων με μέγιστο πλάτος διάνοιξης και με σημαντικές κλίσεις, με αποτέλεσμα ευστάθειας, και με στόχο τη μεγαλύτερη δυνατή εκμετάλλευση του κοιτάσματος.

Αν το εύρος διάνοιξης αναλογικά με το ύψος του πρανούς είναι μεγάλο (πρανές απείρου μήκους - παραδοχή δισδιάστατων μεθόδων οριακής ισορροπίας), η διατμητική αντοχή στα όρια του ορύγματος είναι αμελητέα σε σχέση με τη διατμητική αντοχή που αναπτύσσεται κατά μήκους της επιφάνειας ολίσθησης, άρα δεν λαμβάνεται υπόψη στην ανάλυση ευστάθειας καθώς δεν είναι ένας από τους παράγοντες που ελέγχουν τον συντελεστή ευστάθειας του πρανούς. Αντίθετα όταν το πλάτος της εξεταζόμενης επιφάνειας είναι μικρό σε σχέση με το ύψος της, τότε η επιρροή της τρίτης διάστασης στην ευστάθεια των πρανών γίνεται σημαντική και το πλάτος γίνεται ένας από τους παράγοντες που ελέγχουν τον συντελεστή ευστάθειας του πρανούς. Ο συντελεστής F3D (ο οποίος υπολογίζεται με βάση τις πραγματικές γεωλογικές συνθήκες) δεν προσδιορίζεται μόνον από την κλίση και τις ιδιότητες του εδάφους, αλλά και από το πλάτος και τη μορφή (τα όρια) της τρισδιάστατης επιφάνειας ολίσθησης.

Ακολουθεί η διαδικασία προσδιορισμού F σε σχέση με το πλάτος του ορύγματος, στόχος είναι ο προσδιορισμός του μέγιστου πλάτους εξόρυξης που εξασφαλίζει τον επιθυμητό συντελεστή ασφαλείας.

Εφαρμογή μεθόδου οριακής ισορροπίας και προσδιορισμός κρίσιμης επιφάνειας ολίσθησης. Ο συντελεστής F_{2MIN} είναι ο μικρότερος δυνατός συντελεστής βάση μιας μεθόδου (δεδομένης της γεωμετρίας και των εδαφικών ιδιοτήτων είναι μοναδικός).

Επίσης σύμφωνα με τον Καβουνίδη (2010) ο F_{2MIN} είναι μικρότερος από κάθε αντίστοιχο συντελεστή ασφαλείας της κρίσιμης τρισδιάστατης επιφάνειας.

Στη συνέχεια η μέθοδος εκτίμησης του τρισδιάστατου συντελεστή ασφαλείας εφαρμόζεται για επιφάνειες ολίσθησης τύπου δίδεδρου.

Πρέπει να υπολογιστούν οι δυνάμεις που προστίθενται λόγω θεώρησης τρισδιάστατου πλέον μοντέλου στη κατολίσθηση μας. Θεωρούμε κυλινδρική επιφάνεια ολίσθησης όπου στο άνω και κάτω τμήμα του κυλίνδρου αναπτύσσονται διατμητικές τάσεις, οι οποίες έχουν μια συνιστώσα τριβής και μια συνιστώσα συνοχής άρα ισχύει:

$$\tau_i = c + \sigma' \tan \varphi$$

Όπου τ_i : διατμητική τάση αντοχής

c : η συνιστώσα συνοχής- σταθερή

$\sigma' \tan \varphi$: η συνιστώσα τριβής – μεταβαλλόμενη με το βάθος

σ_i : ορθή τάση στο συγκεκριμένο επίπεδο

φ : γωνία εσωτερικής τριβής του σχηματισμού στο συγκεκριμένο σημείο

Η ορθή ενεργός τάση που ασκείται στην επιφάνεια είναι ουσιαστικά η οριζόντια ενεργός τάση που ασκείται στην κατακόρυφη τάση.

Για τον υπολογισμό των δυνάμεων που δρουν στην ολισθαίνουσα μάζα, χωρίζουμε την κατολίσθηση σε οριζόντιες λωρίδες στις οποίες υπολογίζουμε τη διατμητική αντοχή στο μέσον τους, ενώ στη συνέχεια η τιμή αυτή υπολογίζεται με το εμβαδόν τους. Έτσι υπολογίζονται οι δυνάμεις που αντιτίθενται στην ολίσθηση που δρουν μέσα στο ολισθαίνον σώμα.

Η ροπή που αναπτύσσεται στην επιφάνεια και ανήκει στις δυνάμεις ολίσθησης, υπολογίζεται ως το γινόμενο της ολικής δύναμης και της ροπής εμβαδού της επιφάνειας ως προς τον θεωρούμενο άξονα περιστροφής

ο τρισδιάστατος συντελεστής ασφαλείας F_{3D} μπορεί να εκφραστεί ως:

$$F_{3D} = M_{st, 2D} * s + 2 M_{st, side} / M_{dst, D} * s$$

Όπου

$M_{st,2D}$: Ροπή ευστάθειας από διδιάστατη ανάλυση

$M_{st,side}$: Ροπή ευστάθειας λόγω διατμητικών τάσεων παράπλευρης επιφάνειας

$M_{dst,2D}$: Ροπή που τείνει να προκαλέσει ολίσθηση από διδιάστατη ανάλυση

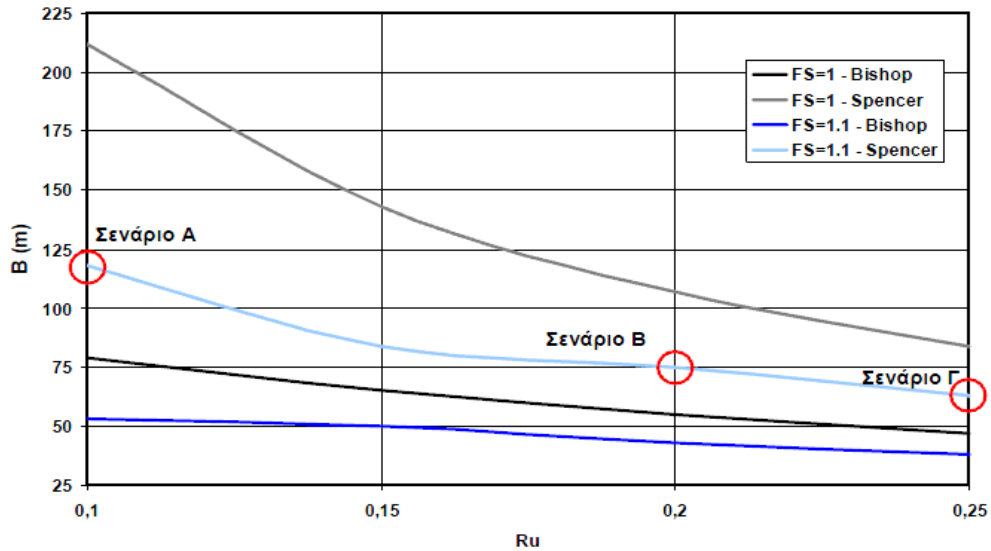
s: Πλάτος πρανούς

Η παραπάνω ανάλυση εφαρμόστηκε για επιφάνειες τύπου δίδεδρου και μελετήθηκε η μεταβολή του τρισδιάστατου συντελεστή ασφαλείας, συναρτήσει του πλάτους ορύγματος (λαμβάνοντας υπ' όψιν τη μεταβολή του R_u), με βάση τα αποτελέσματα αναλύσεων ευστάθειας με τη μέθοδο Spencer. Συμπερασματικά διαπιστώνεται ότι με την μείωση του πλάτους εκσκαφής αρχικά ο συντελεστής ασφαλείας αυξάνεται συντηρητικά, ενώ μετά από μια τιμή (~100μ) η αύξησή του γίνεται με μεγάλο ρυθμό, λόγω της συνεισφοράς της διατμητικής αντοχής στα πλευρικά όρια της ολισθαίνουσας μάζας, η οποία πλέον γίνεται σημαντική και συμμετέχει στη συνολική διατμητική αντοχή του σώματος.

Τα αποτελέσματα παρατίθενται στον επόμενο πίνακα, εξετάστηκαν τιμές για $R_u=0.10$, $R_u=0.20$, $R_u=0.25$ και τέλος εξετάστηκε η περίπτωση ύπαρξης ρήγματος με δυσμενή προσανατολισμό σε πολύ μικρή απόσταση από το μέτωπο του πρανούς ($R_u=0.10$ & 0.20).

Πίνακας 4.5.7: Αποτελέσματα για την απαιτούμενη γεωμετρία εκσκαφής. σε κάθε περίπτωση (Μαρίνος 2012)

Συντελεστής πίεσης πόρων	Πλάτος μετώπου εκμετάλλευσης πρανούς m	κλίση
$R_u = 0.10$	120 m	43^0
$R_u = 0.20$	75 m	43^0
$R_u = 0.25$	50-55 m	43^0
$R_u=0.10$ & 0.20 ρήγμα με δυσμενή προσανατολισμό σε πολύ μικρή απόσταση από το μέτωπο του πρανούς	45-50 m	$<40^0$



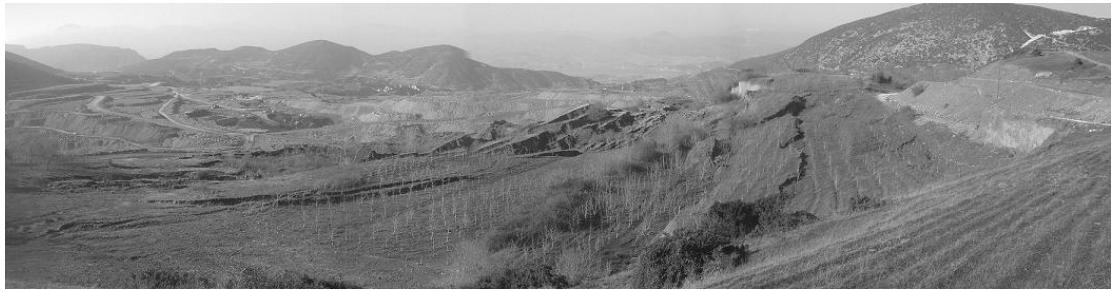
Σχ. 4.5.5 Σχέση μεταξύ F , πλάτους εκσκαφής και πίεσης πόρων (Μαρίνος 2012)

4.5.2 Λιγνιτωρυχείο Λάβα, Σέρβια στο Ν. Κοζανης

Το λιγνιτωρυχείο βρίσκεται στο ανατολικό τμήμα της λεκάνης της Λάβας, 4 km νότια των Σερβίων του νομού Κοζάνης. Τον Νοέμβριο του 2007 σημειώθηκε κατολίσθηση σε πρανές εκμετάλλευσης, στον κεντρικό τομέα του ορυχείου, ενώ στη συνέχεια εκδηλώθηκαν ρωγμές εντός των τεταρτογενών σχηματισμών ως αποτέλεσμα της ολίσθησης του πρανούς.



Σχήμα 4.5.6 Γενική άποψη του ορυχείου και της περιοχής της κατολίσθησης (Προυντζόπουλος et.al. 2010)



Σχήμα 4.5.7 Συνολική εικόνα του ανώτερου τμήματος του πρανούς που ολισθαίνει (εντός των τεταρτογενών αποθέσεων) (Προυντζόπουλος et.al. 2010)

Γεωλογικοί σχηματισμοί στην περιοχή του ορυχείου

Η περιοχή καλύπτεται επιφανειακά από τεταρτογενή χαλαρά ιζήματα (επιφανειακά) μεγάλης πλαστικότητας που αποτελούνται από ερυθροκάστανες αργιλοίλιες (συχνά μαργαϊκές), υλικά πλευρικών κορημάτων και προϊόντα παλιών κατολισθήσεων (κυρίως περιμετρικά της λεκάνης). Το συνολικό πάχος των τεταρτογενών είναι 20-25μ, κατά τόπους ίσως περισσότερο. Στη συνέχεια ακολουθούν τα νεογενή όπου από τους υψηλότερους ορίζοντες προς τα κάτω διακρίνονται οι ακόλουθοι σχηματισμοί

- Σκληρές μαργαϊκές ιλιές, ανοικτότεφρου χρώματος, χαμηλής πλαστικότητας, που καλύπτουν τα λιγνιτοφόρα στρώματα. έχουν πάχος 40 έως 100 μ.
- Ανώτερη ζώνη ξυλιτη, ανώτερη ζώνη λιγνίτη και κατώτερη στρώση ξυλίτη, τα οποία αποτελούν την κύρια εκμετάλλευση με συνολικό πάχος 15μ. Βρίσκεται στο κέντρο της λεκάνης, σε βάθος 755 έως 770μ.
- Μαργαϊκές άργιλοι και ιλιές παρεμβάλλονται ενδιάμεσα των στρώσεων του λιγνίτη (στείρα). Πρόκειται για σκληρές αργίλους χαμηλής πλαστικότητας

Γεωτεχνικές ενότητες και τα χαρακτηριστικά τους

Τα τεταρτογενή παρουσιάζουν υψηλή πλαστικότητα, ενώ παρουσιάζουν σχεδόν μηδενική συνοχή και πολύ χαμηλή γωνία εσωτερικής τριβής, λόγω της φύσης τους, των μετακινήσεων και του νερού που απομειώνει τις μηχανικές του ιδιότητες.(G1)

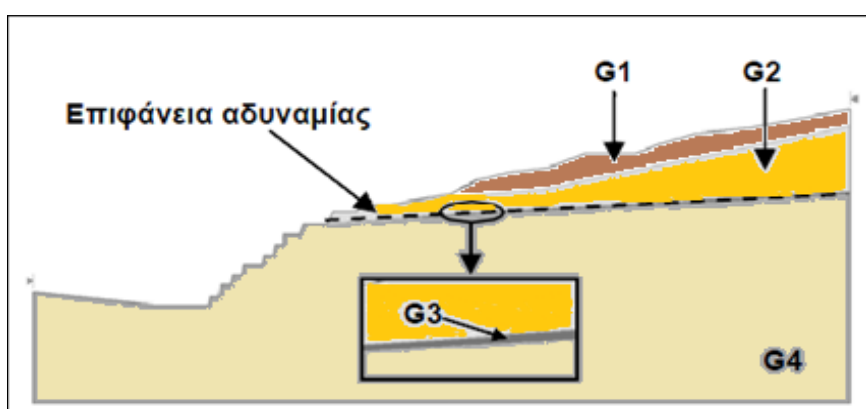
Όσον αφορά τα Νεογενή η μάργα μπορεί να χωριστεί σε δύο γεωτεχνικές ενότητες, το ανώτερο τμήμα (εξαλλοιωμένο) και το κατώτερο (υγείες). Ο διαχωρισμός

συμβαίνει λόγω της εξαλλοίωσης της ανώτερης μάργας εξαιτίας της κίνησης του νερού που επιδρά αρνητικά στα μηχανικά χαρακτηριστικά, κάτι που δεν συνέβη στην υγιή μάργα, που αποτελεί το κατώτερο μέρος του σχηματισμού. Κατά συνέπεια η μάργα χωρίζεται σε δύο γεωτεχνικές ενότητες: την εξαλλοιωμένη μάργα (G3) (ανώτερο τμήμα) και την υγιή μάργα (κατώτερο τμήμα) (G4).

Πίνακας 4.5.8: Γεωτεχνικά χαρακτηριστικά της εξαλλοιωμένης και υγιούς μάργας (Προυντζόπουλος et.al. 2010)

ΓΕΩΥΛΙΚΑ	PL (%)	c kPa	ϕ ($^{\circ}$)
Εξαλλοιωμένη μάργα	13-25	75	23
Υγιής μάργα	2-24	200	40

Μέσα στον σχηματισμό της μάργας, συγκεκριμένα στο άνω τμήμα της υγιούς μάργας και κάτω από την εξαλλοιωμένη μάργα, εντοπίζεται μια ζώνη ασυνέχειας παράλληλη με τη στρώση των ιζημάτων της περιοχής. Πάνω στην επιφάνεια αυτή πραγματοποιείται η ολίσθηση και αποτελεί μια γεωτεχνική ενότητα με μηδενική συνοχή και μικρή ϕ , ενώ είναι γεμάτη με υλικό πτωχής ποιότητας και μεγάλης υγρασίας, λόγω διάτμησης, κάτι που μειώνει σημαντικά τη διατμητική αντοχή της (G3).

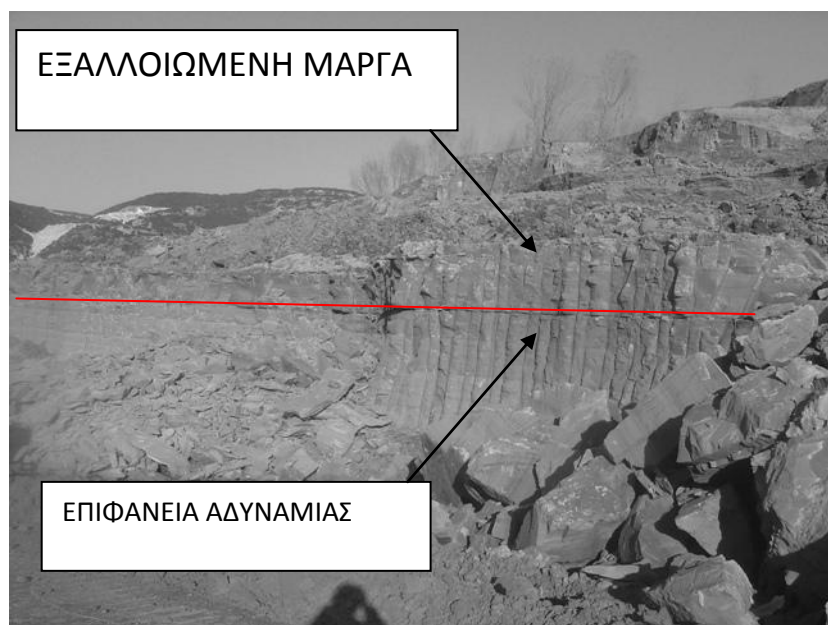


Σχήμα 4.5.8: Γεωτεχνικό προσομοίωμα πρηνούς στο ορυχείο. (Προυντζόπουλος et.al. 2010)

Μηχανισμός αστοχίας

Ο τύπος της κατολίσθησης είναι πολύπλοκος και αποτελείται από επί μέρους μηχανισμούς ολίσθησης οι οποίοι αλληλεπιδρούν.

Η πρώτη επιφάνεια αστοχίας τοποθετείται κατά μήκος της επίπεδης επιφάνεια ολίσθησης (στην επιφάνεια αδυναμίας) του υλικού, σε παραοριζόντιο επίπεδο παράλληλο με τη στρώση. Η επιφάνεια παρουσιάζει χαμηλές τιμές αντοχής, όπου η διατμητική αντοχή μεταπίπτει σε παραμένουσα διατμητική αντοχή και δίνει προοδευτική αστοχία. Στη συνέχεια η δεύτερη επιφάνεια αστοχίας εντοπίζεται σε καμπύλο τμήμα, που ενώνεται με την παραοριζόντια επιφάνεια αδυναμίας υπό γωνία, περνά από το σώμα των μαργών και εμφανίζεται στην επιφάνεια των τεταρτογενών σαν εφελκυστική ρωγμή.

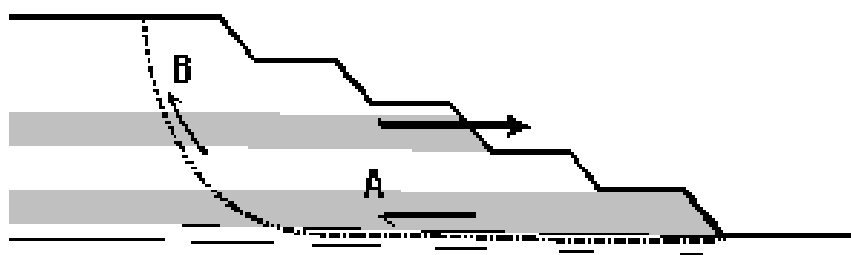


Σχ 4.5.9 Εμφάνιση των μαργών στο μέτωπο εξόρυξης που υπόκεινται των τεταρτογενών σχηματισμών και εμφάνιση της επιφάνειας αδυναμίας (Προυντζόπουλος et.al. 2010)



Σχήμα 4.5.10: Κοντινή όψη της επιφάνειας αδυναμίας πάνω στην οποία πραγματοποιείται η κύρια ολίσθηση, με το υλικό πλήρωσης, πολύ πτωχών μηχανικών χαρακτηριστικών, που διευκολύνει τις μετακινήσεις κατά μήκος της (Προυντζόπουλος et.al. 2010)

Εντός των τεταρτογενών παρουσιάζονται δευτερογενείς επιφάνειες ολίσθησης, λόγω διάτμησης και αναπτύσσονται μικρομετακινήσεις με αποτέλεσμα ενεργοποίησης μηχανισμού «ντόμινο», με διαδοχικούς κύκλους με ρηχές επιφάνειες ολίσθησης, καθώς η ολίσθηση των κατάντη τμημάτων έχει σαν αποτέλεσμα την αφαίρεση της αντιστήριξης της ανάντη εδαφικής μάζας, με αποτέλεσμα της διαδοχικές ολισθήσεις.



Σχήμα 4.5.11 Μηχανισμός αστοχίας, τύπος κατολίσθησης και ανάπτυξης της επιφάνειας ολίσθησης από το σημείο A προς το σημείο B (Λεονάρδος, Μ)

Η επίδραση του νερού στην αστοχία

Το επιφανειακό νερό κατεισδύει από τις επιφανειακές ρωγματώσεις και προκαλεί περαιτέρω διεύρυνση τους. Αποτέλεσμα της παρουσίας του νερού είναι απομείωση

των ιδιοτήτων των γεωυλικών και η ανάπτυξη υδατικών πιέσεων με αποτέλεσμα την πτώση της διατμητικής αντοχής και τη δημιουργία αστάθειας.

Λόγω έλλειψης στοιχείων για τη στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα εντός των τεταρτογενών σχηματισμών και του σχηματισμού της μάργας και καθώς δεν υπήρχαν διαθέσιμες μετρήσεις πιεζόμετρων, πραγματοποιήθηκαν τρεις ομάδες αναλύσεων:

1. Χωρίς υδατικές πιέσεις
2. Υδατικές πιέσεις με τη μορφή υδροφόρου ορίζοντα κοντά στην επιφάνεια του εδάφους
3. Παραμετρική εξέταση της επίδρασης του νερού μέσω του συντελεστή R_u (όπου $R_u = 0.1$ έως 0.4).

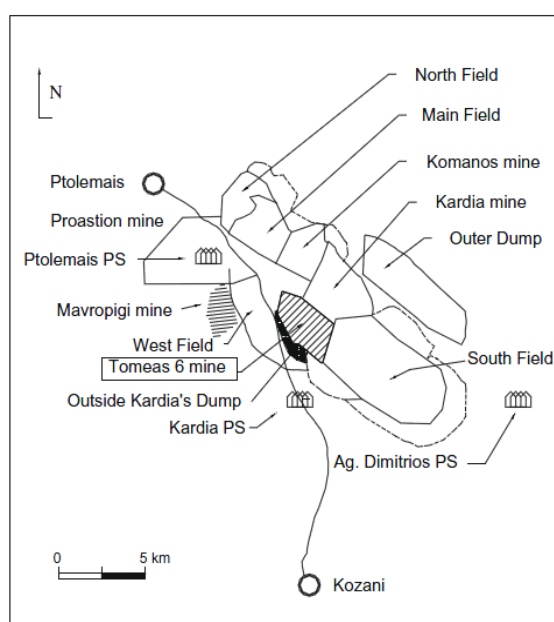
Αποτελέσματα συντελεστή ασφαλείας μέσω ανάστροφων αναλύσεων:

- Για ρηχές επιφάνειες ολίσθησης με $R_u = 0.2$, με ενεργοποίηση δορυφορικών ασυνεχειών μέσα στους τεταρτογενείς σχηματισμούς ($G1$, $c = 0$ kpa, $\varphi = 15^0$). Ο συντελεστής ασφαλείας είναι από 0.95 έως 1.05 (οριακή ισορροπία ως αστοχία).
- Για βαθιές επιφάνειες ολίσθησης με $R_u = 0.2$, με όρια τις εφελκυστικές ρωγμές και τη διεπιφάνεια ολίσθησης ($G2$ $c = 0$ kpa, $\varphi = 17^0$, $G3$ $c = 0$ kpa, $\varphi = 12^0$), Ο συντελεστής ασφαλείας είναι 1.01 (οριακή ισορροπία).
- Για ρηχές επιφανειακές ολισθήσεις, με θεώρηση του υδροφόρου ορίζοντα κοντά στην επιφάνεια ο μηχανισμός ολίσθησης παραμένει ο ίδιος αλλά υπάρχει μεγάλη πτώση της τιμής των ενεργών τάσεων και αντίστοιχη αύξηση των τιμών αντοχής των γεωυλικών. ($G1$, $c = 0$ kpa, $\varphi = 15^0$), ο συντελεστής ασφαλείας είναι από 0.95 έως 1.05 (οριακή ισορροπία ως αστοχία).
- Για βαθιές επιφάνειες ολίσθησης και με θεώρηση του υδροφόρου ορίζοντα κοντά στην επιφάνεια, με όρια τις εφελκυστικές ρωγμές και τη διεπιφάνεια ολίσθησης ($G2$ $c = 0$ kpa, $\varphi = 17^0$, $G3$ $c = 0$ kpa, $\varphi = 12^0$), ο συντελεστής ασφαλείας είναι 0.98 (οριακή ισορροπία ως αστοχία).

Οι τιμές που προκύπτουν για το γεωυλικό $G3$ δίχως υδροφόρο ορίζοντα και για $R_u = 0.1$, κρίνονται πολύ χαμηλές και θεωρούνται μη αντιπροσωπευτικές για την υπό μελέτη περιοχή.

4.5.3 Λιγνιτωρυχείο Τομέας 6 στον Ν. Κοζάνης

Ο τομέας 6 τοποθετείται στο δυτικό λιγνιτικό κέντρο της Μακεδονίας, στη λεκάνη Πτολεμαΐδας Αμύνταιου και για την εκσκαφή του χρησιμοποιείται συνεχόμενη μέθοδος εξόρυξης. Η γεωμετρία της εκσκαφής χαρακτηρίζεται από μεγάλες γωνίες κλίσεις των πρανών, αφού το επιτρέπουν οι γεωτεχνικές ιδιότητες των σχηματισμών. Το δάπεδο εκσκαφής φτάνει στα 510μ ενώ το υψόμετρο της επιφάνειας είναι 670μ, επομένως το ύψος των πρανών είναι 160μ.



Σχ. 4.5.12 Τοποθέτηση του τομέα 6 στο λιγνιτικό πεδίο Πτολεμαΐδας (E. Steiakakis, Z. Agioutantis 2010)

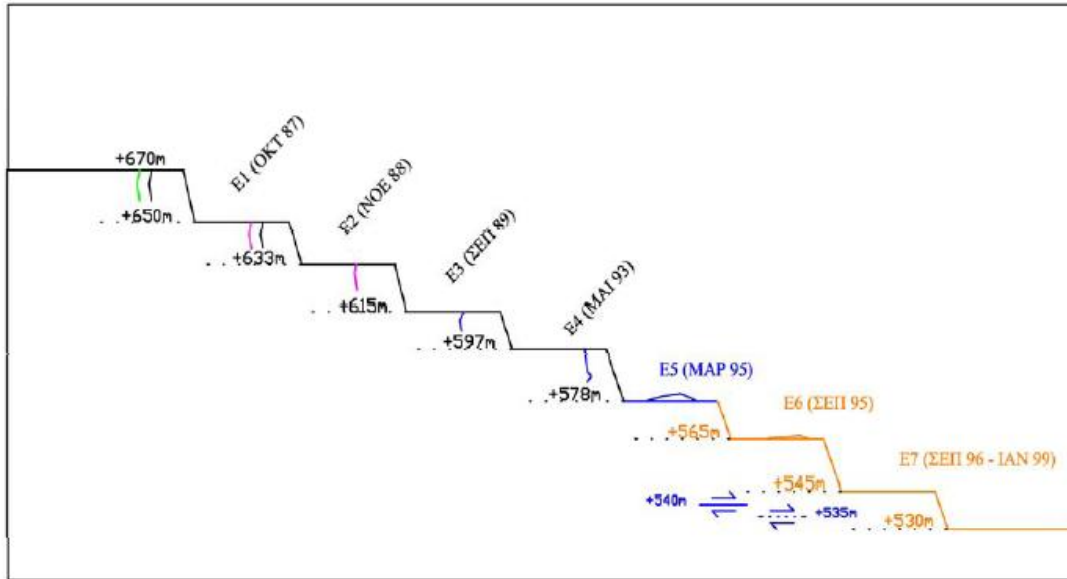
Συμπεριφορά των εδαφικών πρανών με την εξέλιξη της εκσκαφής

Τέλος 1994- ενώ η εκσκαφή βρίσκεται στα 570μ παρατηρούνται ρωγμές στο επίπεδο επιφάνειας του βόρειου και δυτικού πρανούς στην περιοχή του ορυχείου.

Μάρτιος 1995- η εκσκαφή βρίσκεται στα 578μ και εμφανίζεται ανύψωση στο ύψος αυτό και στους δύο πιο πάνω αναβαθμούς ύψους 597μ και 615μ.

Αύγουστος 1995- παρατηρούνται νέες ρωγμές στην επιφάνεια του εδάφους, σε απόσταση 20μ πίσω από το όριο εκσκαφής της δυτικής πλαγιάς. Οι ρωγμές καλύπτουν έκταση 75% του συνολικού μήκους του πρανούς.

Σεπτέμβριος 1995- κατασκευάζεται καινούριος πάγκος σε υψόμετρο 565μ και παράλληλα εμφανίζεται καινούργια ανύψωση μικρότερου ανοίγματος από αυτή του Μαρτίου.



Σχήμα 4.5.13: Εξέλιξη του ορυχείου τομέα 6 με το βάθος και κινητική συμπεριφορά των δυτικών πρανών. (E. Steiakakis, Z. Agioutantis 2010)

Οι οριζόντιες μετατοπίσεις μετρήθηκαν στο δυτικό πρανές σε ύψος 645-650μ και στο βόρειο πρανές σε ύψος 627-632μ με διάρκεια μετρήσεων τεσσάρων μηνών (Ιούλιος - Οκτώβριος 1995). Το εύρος των μετατοπίσεων υπολογίστηκε 6-21μ με κύρια τιμή 15μ.

Οι μετρήσεις από τα κλισίμετρα, που τοποθετήθηκαν στο δυτικό πρανές, έδωσαν μετακινήσεις σε βάθος 550μ (πάτωμα λιγνίτη και μεταξύ στρώματος λιγνίτη και μάργας), ενώ δεν δόθηκε διεύθυνση ολίσθησης και οι μετακινήσεις ήταν οριζόντιες.

Γεωλογικοί σχηματισμοί στην περιοχή του ορυχείου

Στην περιοχή του λιγνιτωρυχείου η διαδοχή των στρωμάτων στον τομέα 6 (από τους ανώτερους προς τους κατώτερους ορίζοντες (Μπαρμπας κ.α. 1995) αποτελείται από

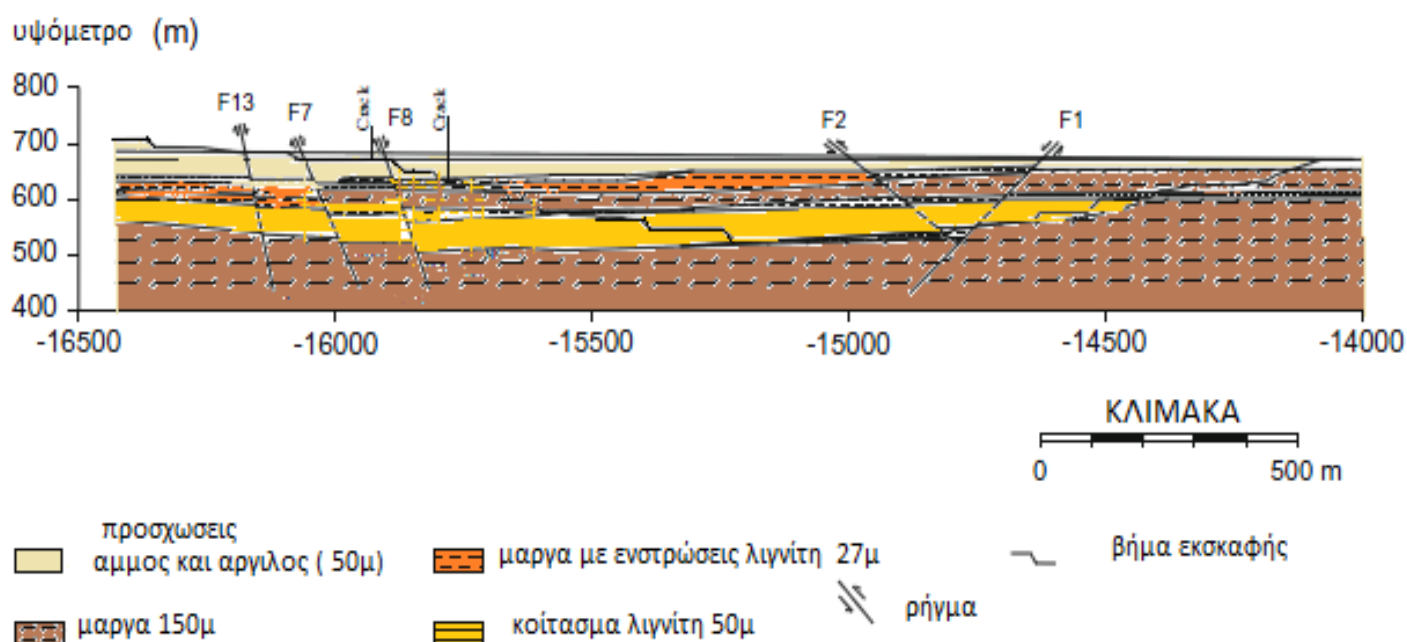
- Αλλούβια, άργιλοι και άμμοι(καστανέρυθρη σειρά).
- Λιγνιτοφόρος στοιβάδα (εναλλαγές μαργαϊκών ενστρώσεων και λιγνίτη). Αποτελείται κατά μέσο όρο από 21 λιγνιτικά στρώματα, που εναλλάσσονται με αντίστοιχο αριθμό ενδιάμεσων στείρων (μάργα), ποικίλου πάχους.
- Αργιλούχος τελική μάργα (υποκείμενη μάργα).

Τεκτονικές συνθήκες στην περιοχή του ορυχείου

Επικρατούν δύο συστήματα ρηγμάτων, το πρώτο με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ (παράλληλη με τα δυτικά πρηνή του ορυχείου) και συνολικό άλμα 90m, χωρίζει τον τομέα 6 από το λιγνιτωρυχείο της Καρδίας, ενώ το δεύτερο με διερεύνηση περίπου Δ-Α βυθίζει το νότιο πεδίο προς το έλος Σαριγκόλ (νότια). Πιο αναλυτικά:

- Τα κύρια ρήγματα F1 και F5 με άλματα 25-20m, σε συνδυασμό με τα δευτερεύοντα F3 και F6 (άλματος 5-10m) δημιουργούν τεκτονικό βύθισμα.
- Τα ρήγματα F2 και F4 με άλμα 20m περίπου, σχηματίζουν επιμέρους τεκτονικά βυθίσματα.
- Τα ρήγματα F8 και F13 με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ και διάταξη παράλληλη με τα δυτικά πρηνή τέμνουν τα προαναφερόμενα ρήγματα και βυθίζουν την περιοχή προς τα ανατολικά, δηλαδή προς το ορυχείο.

Η μέση κλίση των σχηματισμών είναι γενικά υποοριζόντιες (0° - 5°) και οφείλονται κυρίως στις διαφορετικές κινήσεις ή κάμψεις των τεκτονικών τεμαχίων.



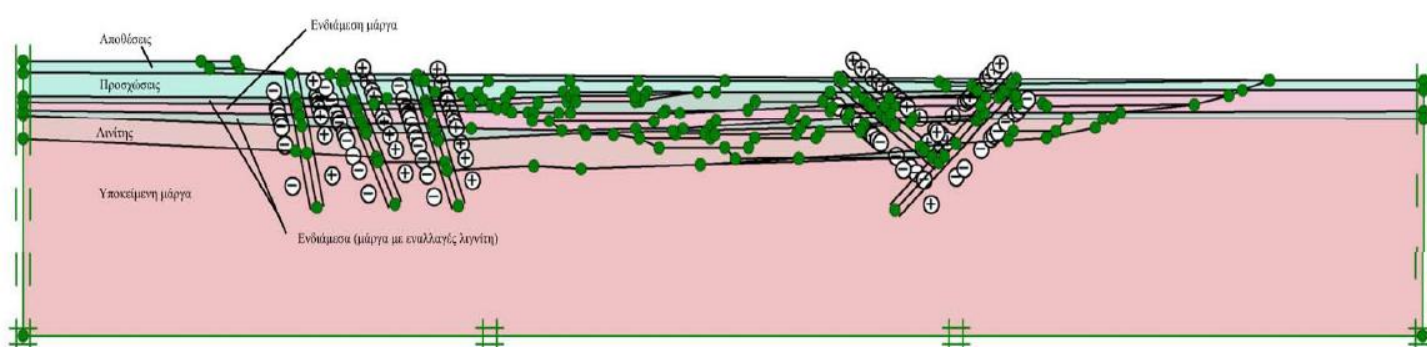
Σχήμα 4.5.14: Γεωλογικό μοντέλο που απεικονίζει τη γεωλογία και την τεκτονική του ορυχείου (E. Steiakakis * & Z. Agioutantis 2010)

Γεωτεχνικές ενότητες και χαρακτηριστικά αυτών

Οι σχηματισμοί που συναντήθηκαν κατά την εκσκαφή χωρίστηκαν σε πέντε ενότητες και εκτιμήθηκαν τα γεωτεχνικά τους χαρακτηριστικά, καθώς επίσης γεωτεχνικοί παράμετροι δόθηκαν και στις ζώνες ρηγμάτωσης, οι οποίες θεωρήθηκαν σαν ποσοστό των τιμών των αντίστοιχων στρωμάτων από τα οποία διέρχονται.

Πίνακας 4.5.9: Γεωτεχνικές παράμετροι των γεωλογικών σχηματισμών του ορυχείου (Steiakakis *Z. Agioutantis 2010)

Γεωτεχνικές παράμετροι	Επιφανειακές προσχώσεις	Μάργα με ενστρώσεις λιγνίτη	Ενδιάμεση μάργα	Λιγνίτης	Υποκείμενη μάργα
c KPa	100	150	217	200	102
Φ	20°	29°	29°	35°	37°



Σχήμα 4.5.15: Γεωτεχνικές ενότητες- γεωμετρία, στρωματογραφία, τεκτονική, οριακές συνθήκες. (Steiakakis * & Z. Agioutantis (2010))

Διαδικασία ανάλυσης ευσταθείας πεπερασμένων στοιχείων και αποτελέσματα συντελεστή ασφαλείας

Για την πραγματοποίηση της ανάλυσης ευστάθειας πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις της εκσκαφής με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Από τις αναλύσεις αυτές προέκυψαν πληροφορίες σχετικά με τις τασικές συνθήκες και την κινητική συμπεριφορά γύρω από την εκσκαφή. Προκύπτει ότι οι μεγαλύτερες μετακινήσεις εκδηλώθηκαν στα στρώματα των ενδιάμεσων (μάργα με ενστρώσεις λιγνίτη), της

ενδιάμεσης μάργας και του κοιτάσματος. Επίσης προκύπτει μετακίνηση στα δυτικά πρηνή καθώς επίσης και στην ανατολική πλευρά του ορυχείου.

Πιο συγκεκριμένα για τη διερεύνηση τη ευστάθειας εξετάστηκαν τρεις περιπτώσεις:

- **Ολίσθηση σε κύκλο**, τέμαχος που εφάπτεται στη ζώνη μετάβασης κοιτάσματος - υποκείμενης μάργας (περίπτωση μη πιθανή)
- **Αποκομμένο τέμαχος**, που ορίζεται από την επιφάνεια διάτμησης σε βάθος 140 m και την ζώνη ρήγματος που τέμνει το πρηνές.
- **Ενιαία εδαφική ζώνη μειωμένης διατμητικής αντοχής**, περιλαμβάνει την επιφάνεια διάτμησης μεταξύ λιγνίτη(+160m-130m) - υποκείμενης μάργας και της ζώνης ρήγματος.

Οι μέθοδοι ανάλυσης Bishop και Janbu επιλέγηκαν και χρησιμοποιήθηκαν ανάλογα με τα υλικά που λαμβάνουν μέρος στην ολίσθηση και τον μηχανισμό ολίσθησης.

Από τις αναλύσεις διαπιστώθηκε η ασφάλεια του πρηνούς, καθώς με βάση τους συντελεστές ασφαλείας μια συνολική αστοχία του πρηνούς δεν είναι πιθανή.

Πίνακας 4.5.10 Αποτελέσματα συντελεστή ασφαλείας μέσα από την ανάλυση ευστάθειας. (Steiakakis * & Z. Agioutantis 2010)

Τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά ανάλυσης	Συντελεστής ασφαλείας (F)	Μέθοδος ανάλυσης
Ολίσθηση σε κύκλο (εφάπτεται στη ζώνη κοιτάσματος - υποκείμενης μάργας) μη πιθανή	1.13	Bishop*
Αποκομμένο τέμαχος (ορίζεται από επιφάνεια διάτμησης σε βάθος 140 m -ζώνη ρήγματος)	1.11	Janbu*
Ενιαία εδαφική ζώνη μειωμένης διατμητικής αντοχής (επιφάνεια διάτμησης μεταξύ λιγνίτη(+160m-130m) - υποκείμενης μάργας και ζώνη ρήγματος)	1.11	Bishop
	1.18	Janbu

5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΗ ΕΚΣΚΑΦΗ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει μία εκτενής αναφορά στο φαινόμενο των εδαφικών ρωγματώσεων που έχουν εμφανιστεί στον οικισμό της Μαυροπηγής από τον Ιούλιο του 2010. Γίνεται μία έρευνα για τον ρυθμό και τη φορά κίνησης των εδαφικών σχηματισμών με τη συγκέντρωση κλισιομετρικών και γεωφυσικών δεδομένων, τα οποία έχουν συγκεντρωθεί από την ερευνητική ομάδα του ΑΠΘ στην εξαμηνιαία έκθεση που συνέταξαν το 2011. Στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζεται το μοντέλο της περιοχής που απεικονίζει τη γεωλογία την τεκτονική αλλά και τους μηχανισμούς αστοχίας που είναι υπεύθυνοι για την εκδήλωση του υπό εξέταση φαινομένου.

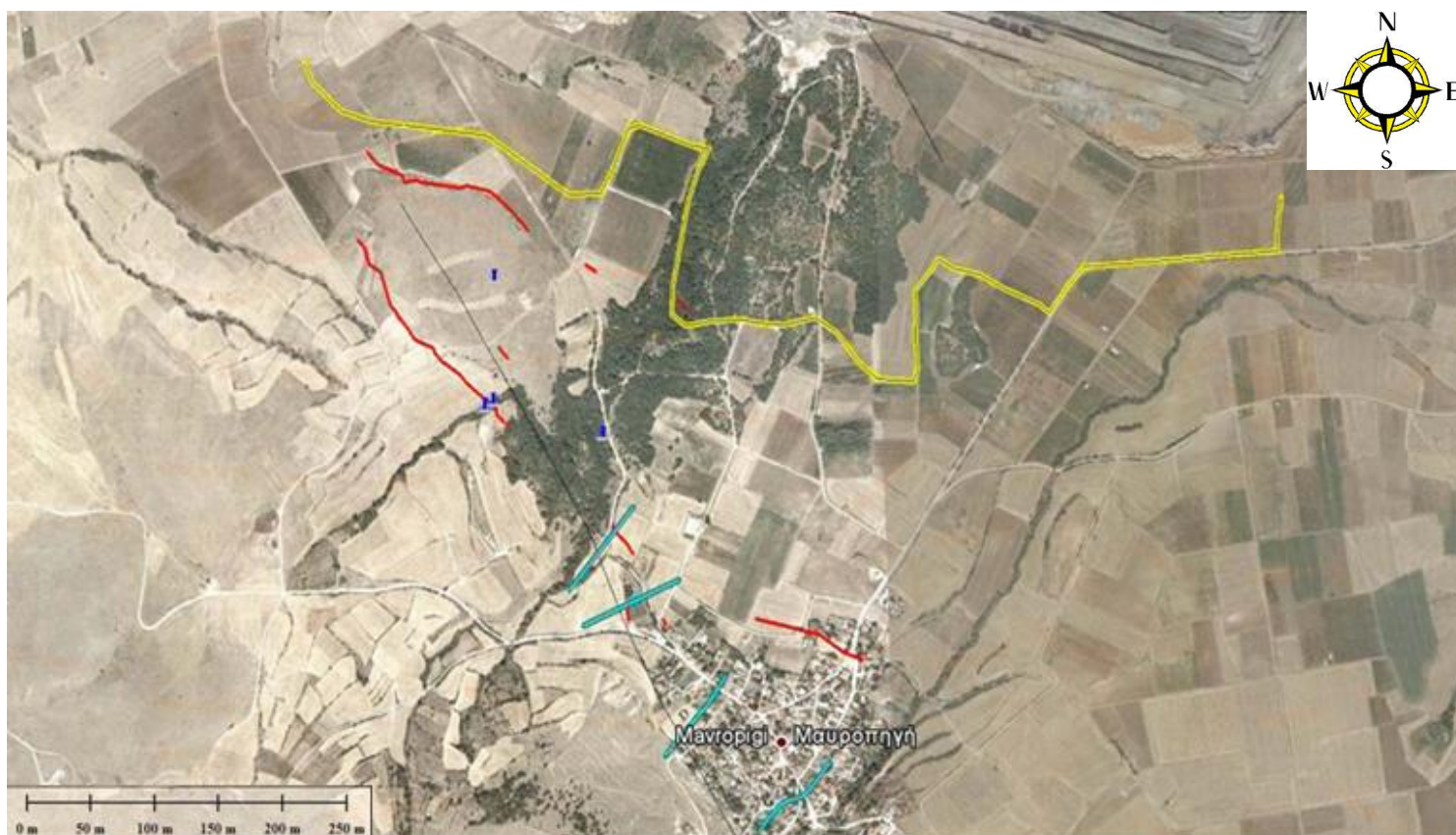
5.1 Συμπεριφορά μαργαϊκών σχηματισμών γύρω από την εκσκαφή

Αρχικά παρατηρήθηκε κύρτωση μετά την αποκάλυψη του δαπέδου με ταυτόχρονη εμφάνιση ρωγματώσεων στα επίπεδα δύο βαθμίδων του δυτικού πρανούς (+597 και +615), και στη συνέχεια του ίδιου έτους παρατηρήθηκαν και επιπλέον ρωγματώσεις στα +650m.

Το φαινόμενο συνεχίστηκε με την εκδήλωση ρωγμών ανάμεσα στο χωριό και στο λιγνιτωρυχείο σε απόσταση 20-30m από το λιγνιτωρυχείο. Οι ρωγμές (εδαφικές διαρρήξεις) αυτές αντιπροσωπεύουν την εκδήλωση παραμόρφωσης και κίνησης των εδαφικών πρανών στην περιοχή της εκσκαφής. Η πρώτη εδαφική διάνοιξη παρατηρήθηκε στις 7/07/2010 και εντοπίζεται στη ΒΔ μεριά του οικισμού της Μαυροπηγής, απέχει 700m από το μέτωπο εκσκαφής του ορυχείου ενώ έχει άνοιγμα μερικά mm έως 35 cm και αναπτύσσεται με διεύθυνση παράταξης Β-Ν. Η δεύτερη εδαφική διάρρηξη παρατηρήθηκε σε σύντομο χρονικό διάστημα στις 1/09/2010, βρίσκεται κοντά στο ορυχείο της Μαυροπηγής σε απόσταση 100m από το μέτωπο εκσκαφής, έχει συνεχές μήκος 300m ενώ το άνοιγμά της κυμαίνεται από μερικά mm έως 35 cm και έχει διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ.

Στη συνέχεια παρατηρήθηκαν επιπλέον ρωγμές προς τη περιοχή της Μαυροπηγής, καθώς επίσης λίγο αργότερα σημειώθηκε και μεγάλη κατολίσθηση, η οποία δημιούργησε ρήγμα, ενώ τα φαινόμενα συνεχιστήκαν με καινούρια κατολίσθηση έπειτα από κάποιους μήνες. Η εκδήλωση και εξέλιξη των ρωγματώσεων και των κατολισθήσεων οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το φαινόμενο είναι υπό εξέλιξη.

Η ερμηνεία του παραμορφωτικού φαινομένου που περιγράφηκε παραπάνω, δείχνει ότι ο όγκος των νεογενών και τεταρτογενών κινείται προς τη διεύθυνση των ορυχείων της Μαυροπηγής και συγκεκριμένα προς το εσωτερικό της εκσκαφής. Αποτέλεσμα της κίνησης αυτής είναι η δημιουργία ρωγματώσεων πίσω από το μέτωπο της εκσκαφής και την εκδήλωση ασταθειών στα περιφερειακά πρανή της εκσκαφής. Η πορεία των γεγονότων δηλώνει ότι υπάρχει μια συνεχόμενη ολίσθηση με αργό ρυθμό που μπορεί να χαρακτηριστεί ως ερπυσμός.



Σχήμα 5.1.1: Προβολή σε ορθοφωτογραφία των στοιχείων που προέκυψαν από χαρτογράφηση. Με κόκκινη γραμμή παρουσιάζονται οι επιφανειακές ρωγμάσεις, με μαύρη το χαρτογραφημένο γεωλογικό ρήγμα, με γαλάζια οι γεωφυσικές τομές που πραγματοποιήθηκαν, με κίτρινη το όριο του ορυχείου Μαυροπηγής (Σεπτέμβριος 2010) και με μπλε σημεία σημειώνονται οι θέσεις των πρόσφατων γεωτρήσεων της Δ.Ε.Η.(Ερευνητική ομάδα Α.Π.Θ. , 2011)



Σχήμα 5.31 Επιφανειακές ρωγμές ανάμεσα στον οικισμό και το ορυχείο, ΒΔ του οικισμού και στον προαύλιο χώρο από το εκκλησάκι του Αγίου Νικολάου.



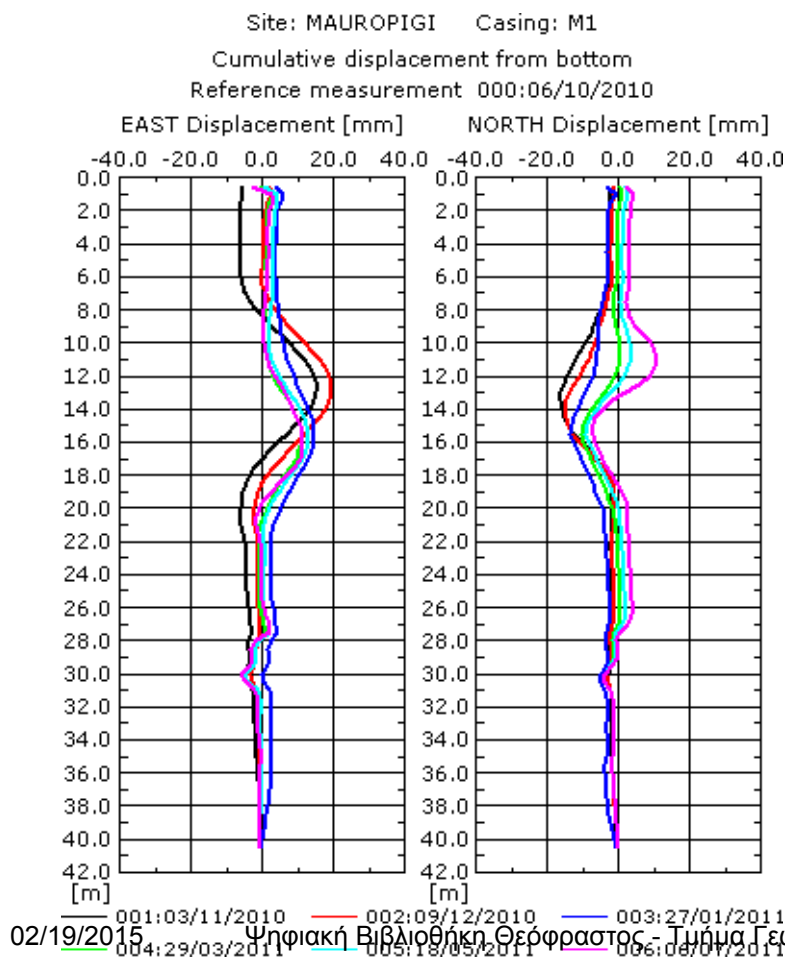
Σχήμα 5.1.2 Επιφανειακές ρωγμές ανάμεσα στον οικισμό και το ορυχείο κοντά στο μέτωπο του ορυχείου

Αξιολόγηση μετρήσεων των κλισιομέτρων:

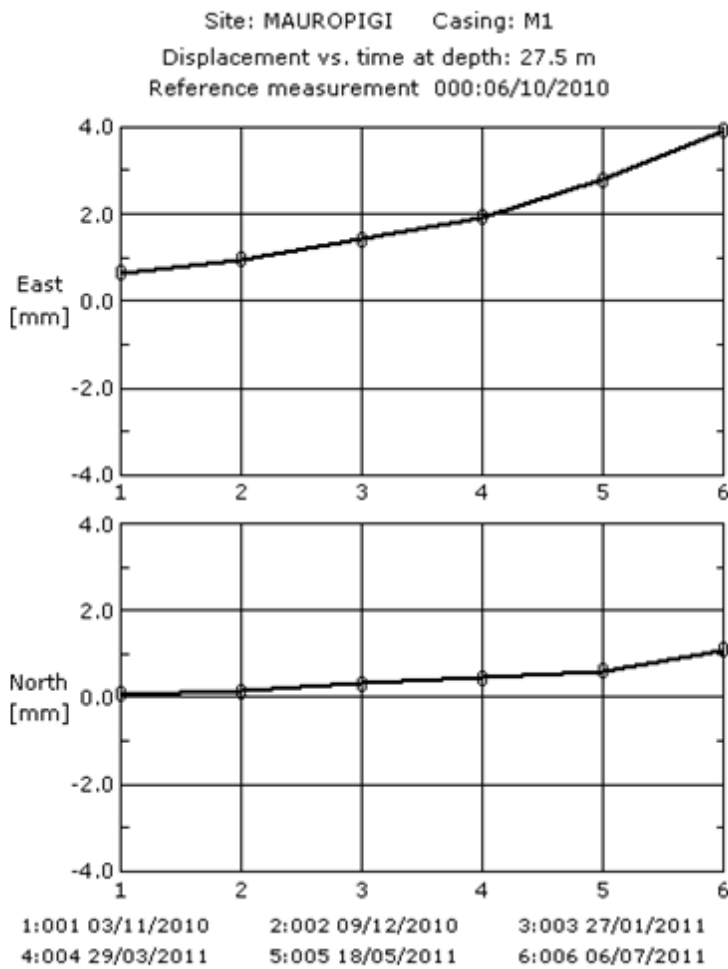
Με βάση τα δεδομένα που επεξεργάστηκαν από τις έξι (6) μετρήσεις κλισιομέτρων, που πραγματοποιήθηκαν από το Ι.Γ.Μ.Ε., στις δύο γεωτρήσεις, οι οποίες ανορύχθηκαν στο Δ.Δ. Μαυροπηγής, προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα για την συμπεριφορά και μετακίνηση των εδαφικών σχηματισμών στην περιοχή.

Τα δεδομένα των μετακινήσεων συλλέχτηκαν από τις γεωτρήσεις M1 και M2 για διάστημα εννέα μηνών κατά τους οποίους πραγματοποιήθηκαν έξι (6) μετρήσεις, ενώ η αυτοψία πραγματοποιήθηκε στις 06-07-2011 από το Ι.Γ.Μ.Ε.

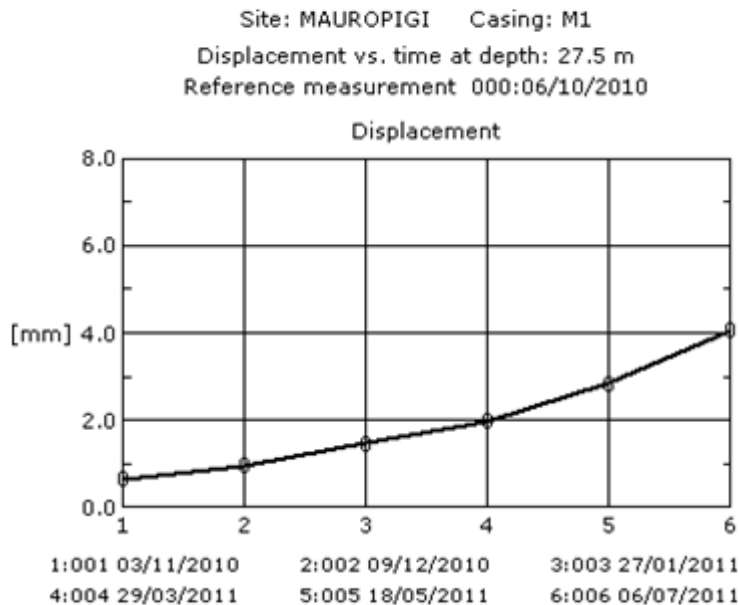
Από τα διαγράμματα αθροιστικών και τμηματικών μετακινήσεων της γεώτρησης **M1** παρατηρείται ότι για την περίοδο που αυτή μετρήθηκε, κατεγράφησαν μικρές μετατοπίσεις του εδάφους, της τάξης των 2-4 χιλιοστών τοπικά και 1-2 εκατοστών αθροιστικά στα βάθη των 13μ., 27.5μ. και 29.5μ. Από αυτές τις καταγραφές μόνο οι μετρήσεις στην περίπτωση των 27.5 μέτρων μπορούν να θεωρηθούν οριακά συστηματικές και άρα αξιόπιστες, υποδεικνύοντας αργή εδαφική κίνηση ΒΑ/κής διεύθυνσης. Στο βάθος αυτό (27.5 m) παρατηρείται μικρή μετακίνηση (4.2mm) προς τα ΒΑ/κά (4.0 mm προς τα Α/κά και 1.2mm προς τα βόρεια) με ρυθμό που παρουσίασε μικρή αύξηση κατά το χρονικό διάστημα Μαΐου – Ιουλίου 2011.



Σχήμα 5.1.3 : Διαγράμματα αθροιστικών μετακινήσεων της γεώτρησης M1 σε σχέση με το βάθος, για κάθε ημερομηνία μέτρησης, κατά τις διευθύνσεις Α-Δ και Β-Ν (Ι.Γ.Μ.Ε., 2011)

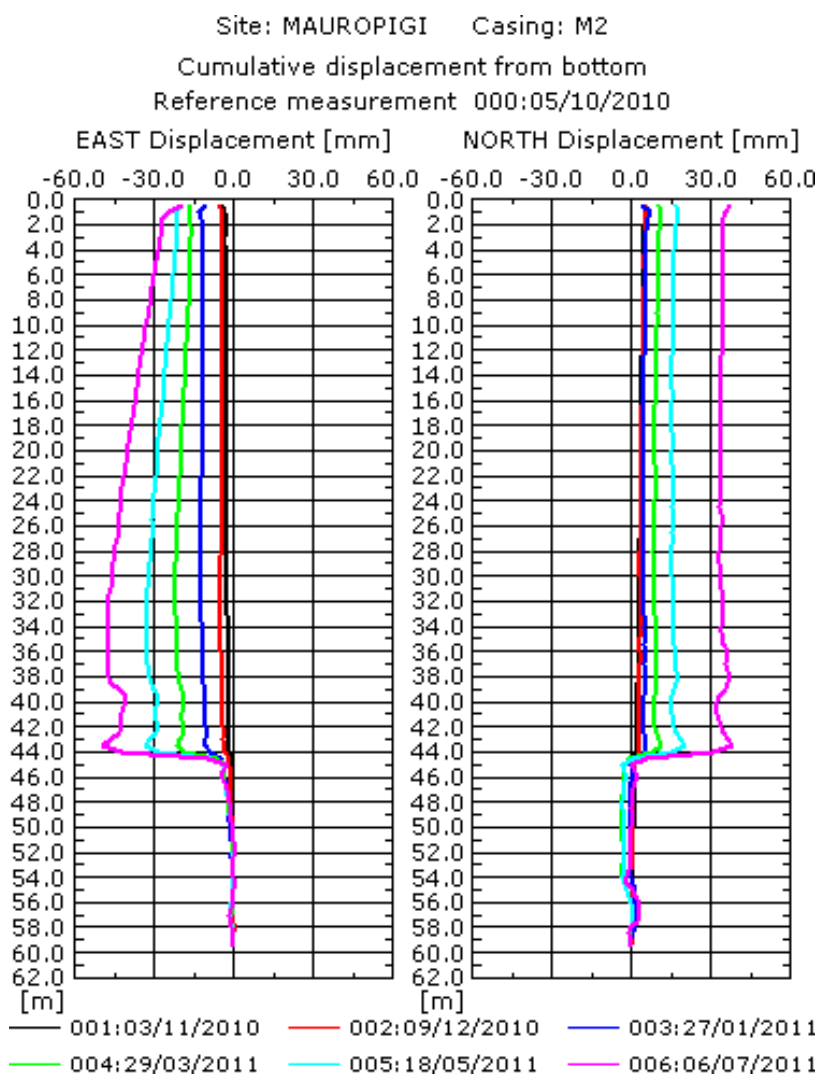


Σχήμα 5.1.6
 Διαγράμματα μετατοπίσεων σε σχέση με το χρόνο, για τη γεώτρηση M1, σε βάθος 27.50μ., κατά τις διευθύνσεις Α-Δ και Β-Ν.(Ι.Γ.Μ.Ε, 2010).

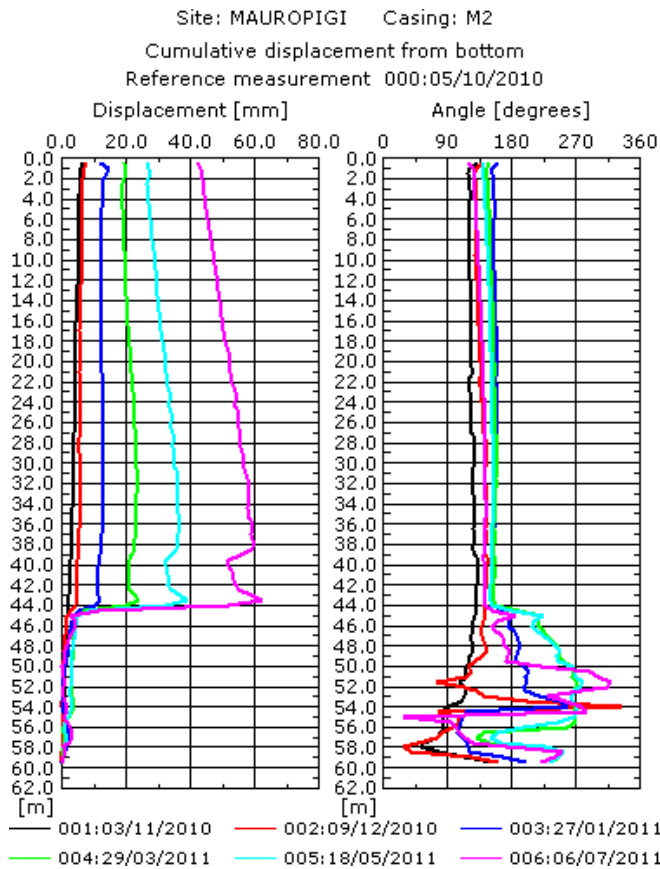


Σχήμα 5.1.7
 Διαγράμματα μετατοπίσεων σε σχέση με το χρόνο, για τη γεώτρηση M1, σε βάθος 27.50μ., κατά τη διεύθυνση της μέγιστης μετακίνησης (Ι.Γ.Μ.Ε., 2010)

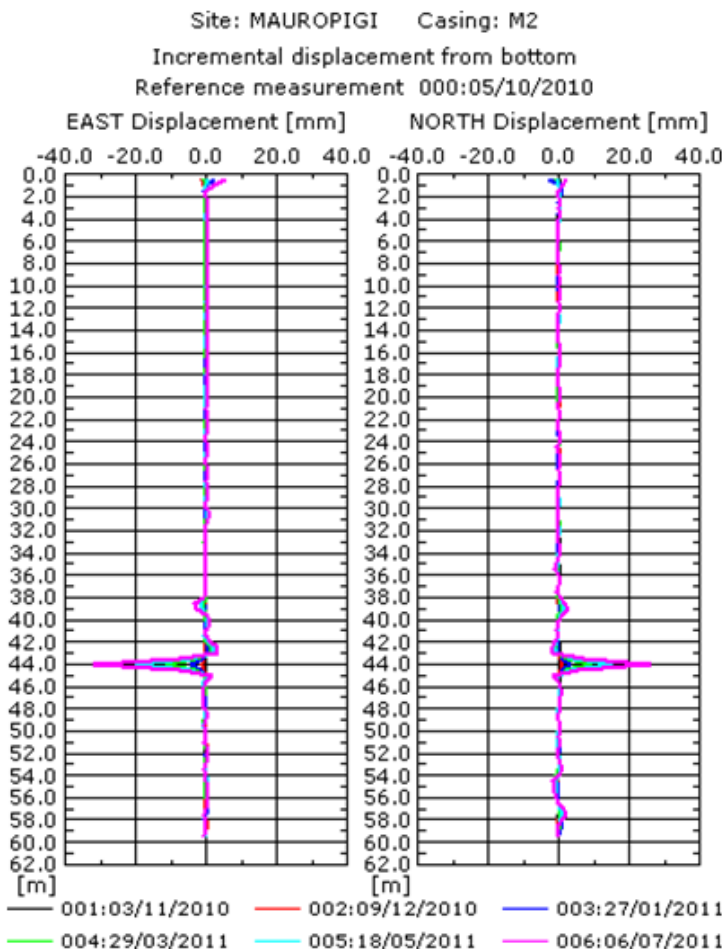
Από τα διαγράμματα αθροιστικών και τμηματικών μετακινήσεων της γεώτρησης **M2** παρατηρείται ότι για την περίοδο που αυτή μετρήθηκε, κατεγράφησαν μετατοπίσεις του εδάφους, της τάξης των 40 χιλιοστών (4 cm) τοπικά (32 mm προς τα Δ/κά και 28mm προς τα βόρεια) σε βάθος 44μ. και των 62 χιλιοστών (6.2 cm) αθροιστικά (50 mm προς τα Δ/κά και 38mm προς τα βόρεια), που υποδηλώνουν εδαφική κίνηση ΒΔ/κής διεύθυνσης. Η παρατηρούμενη μετατόπιση είναι συστηματική και προοδευτική, ενώ ο ρυθμός εκδήλωσης των μετακινήσεων στο βάθος των 44μ παρουσιάζεται εμφανώς αυξανόμενος κατά το διάστημα Ιανουαρίου – Ιουλίου 2011.



Σχήμα 5.1.8: Διαγράμματα αθροιστικών μετακινήσεων της γεώτρησης M2, κατά τις διευθύνσεις A-Δ και B-N (Ι.Γ.Μ.Ε., 2011)

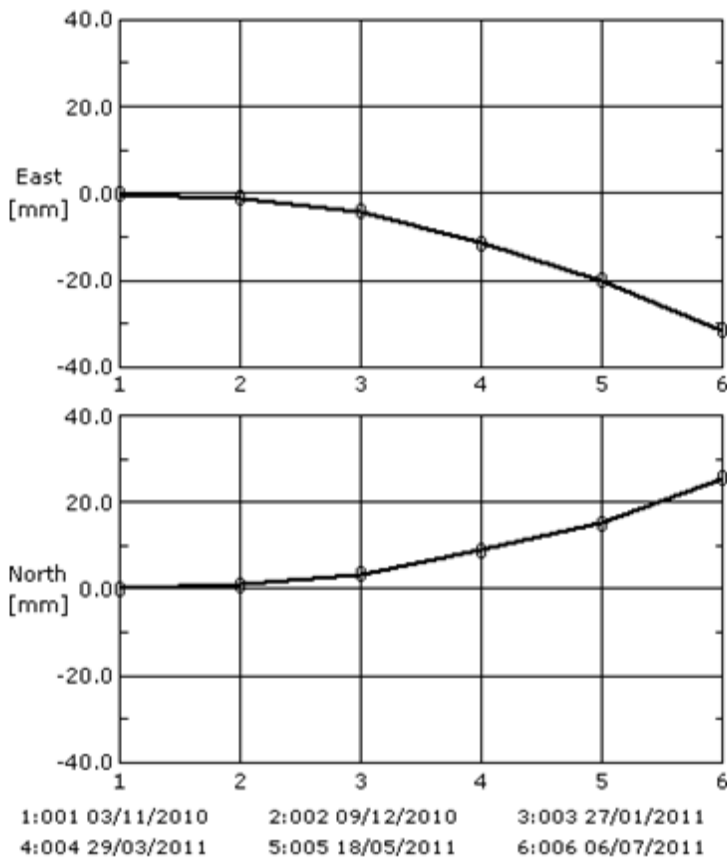


Σχήμα 5.1.9 Διάγραμμα αθροιστικών μετακινήσεων της γεώτρησης M2, κατά τη διεύθυνση της μέγιστης μετατόπισης (αριστερά) και αζιμούθιο των αποκλίσεων του σωλήνα σε σχέση με το βάθος (δεξιά) (Ι.Γ.Μ.Ε., 2011)



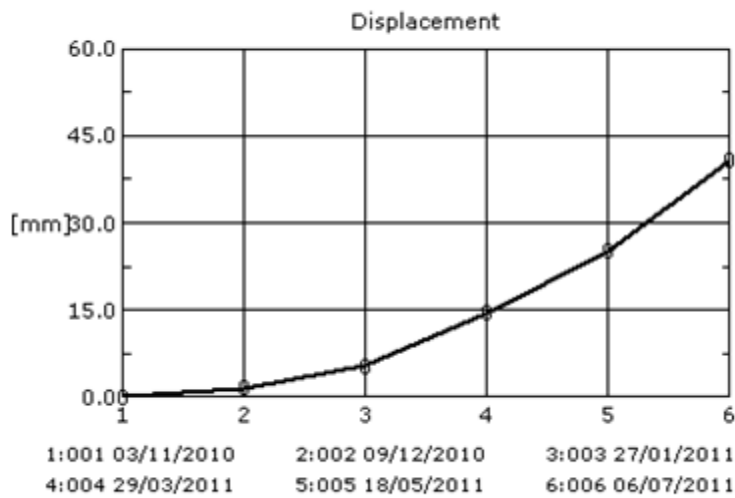
Σχήμα 5.1.10 Διαγράμματα τμηματικών μετακινήσεων της γεώτρησης M2 σε σχέση με το βάθος, για κάθε ημερομηνία μέτρησης, κατά τις διευθύνσεις A-Δ & B-N (Ι.Γ.Μ.Ε., 2011)

Site: MAUROPIGI Casing: M2
 Displacement vs. time at depth: 44 m
 Reference measurement 000:05/10/2010



Σχήμα 5.1.11 Διαγράμματα μετατοπίσεων σε σχέση με το χρόνο, για τη γεώτρηση M2, σε βάθος 44μ., κατά τις διευθύνσεις A-Δ και B-N (Ι.Γ.Μ.Ε., 2011)

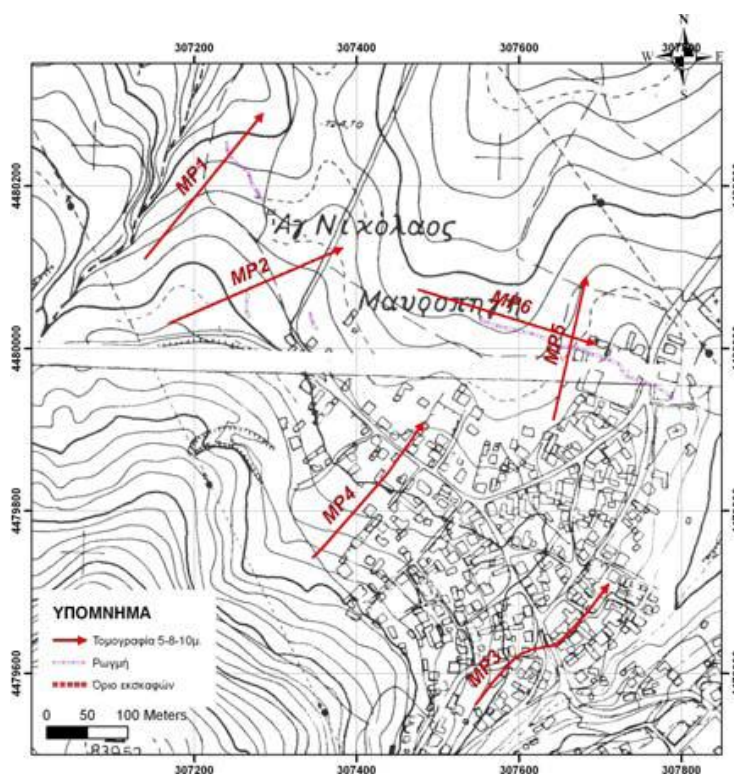
Site: MAUROPIGI Casing: M2
 Displacement vs. time at depth: 44 m
 Reference measurement 000:05/10/2010



Σχήμα 5.1.12 Διαγράμματα μετατοπίσεων σε σχέση με το χρόνο, για τη γεώτρηση M2, σε βάθος 44.00μ., κατά τη διεύθυνση της μέγιστης μετακίνησης (Ι.Γ.Μ.Ε., 2011)

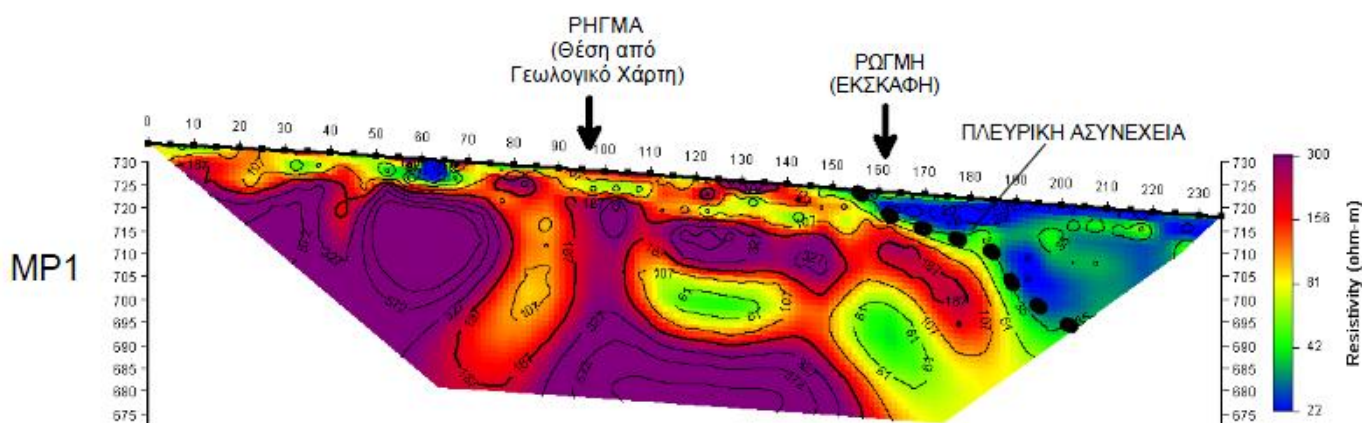
Από τα διαγράμματα που παρατέθηκαν παραπάνω σε σχέση με το βάθος μετακίνησης και τον ρυθμό μετακίνησης, δύο είναι τα βάθη στα οποία σημειώθηκαν αξιοσημείωτες μετακινήσεις στα 27.5m και στα 44m. Το κλισιόμετρο στη γεώτρηση M1 παρουσιάζει μικρές μετακινήσεις σε διάφορα βάθη, εκ των οποίων σημαντικότερη και συστηματική παρουσιάζεται σε βάθος 27.5μ. με διεύθυνση ΒΑ/κή, ενώ στη γεώτρηση M2 παρουσιάζει συστηματικές και προοδευτικές μετακινήσεις σε βάθος 44 μέτρων, οι οποίες αποκαλύπτουν εδαφική κίνηση ΒΔ/κής διεύθυνσης. Συνδυάζοντας τα δεδομένα των κλισιομέτρων με τις υπό εξέλιξη εδαφικές διαρρήξεις συμπεραίνουμε ότι όχι μόνο σημειώθηκε μετακίνηση εντός των εδαφικών σχηματισμών, αλλά η μετακίνηση αυτή είναι ακόμα σε εξέλιξη και μάλιστα έχει αυξανόμενο ρυθμό. Η εκδήλωση νέων εδαφικών ρωγματώσεων και την επέκταση παλαιότερων πλησίον της οικιστικής περιοχής του Δ.Δ. Μαυροπηγής είναι η επιφανειακή έκφραση της μετακίνησης των εδαφικών σχηματισμών που σύμφωνα με τα κλισιόμετρα έχει διεύθυνση κίνησης προς την εκσκαφή.

Αξιολόγηση γεωφυσικών μετρήσεων



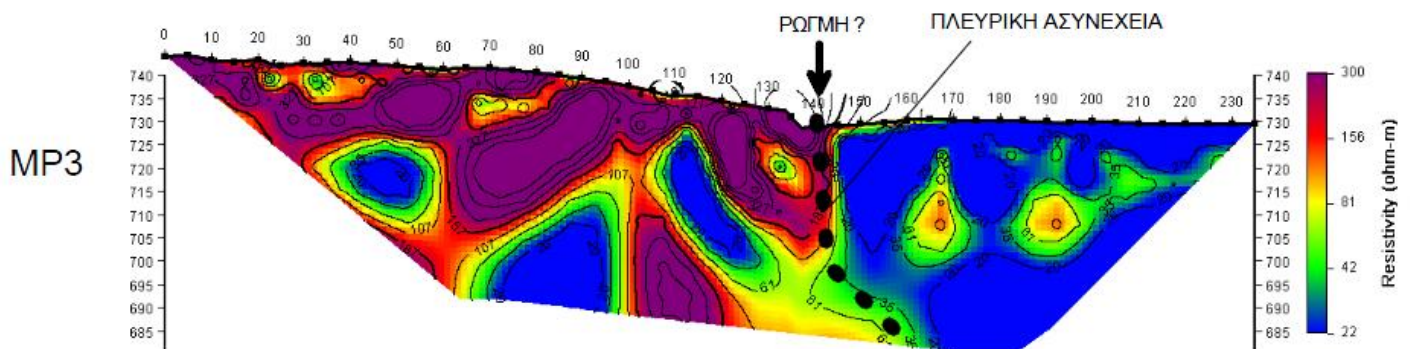
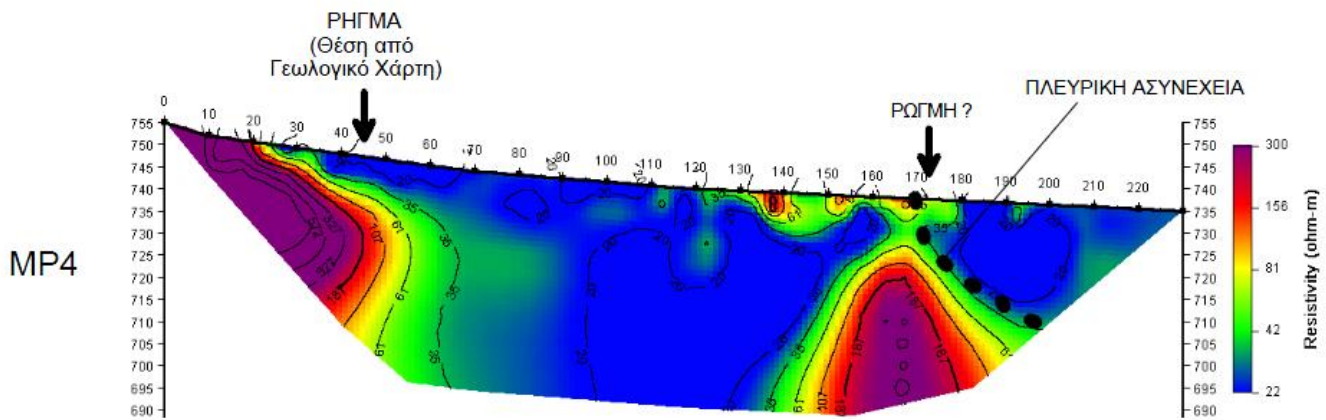
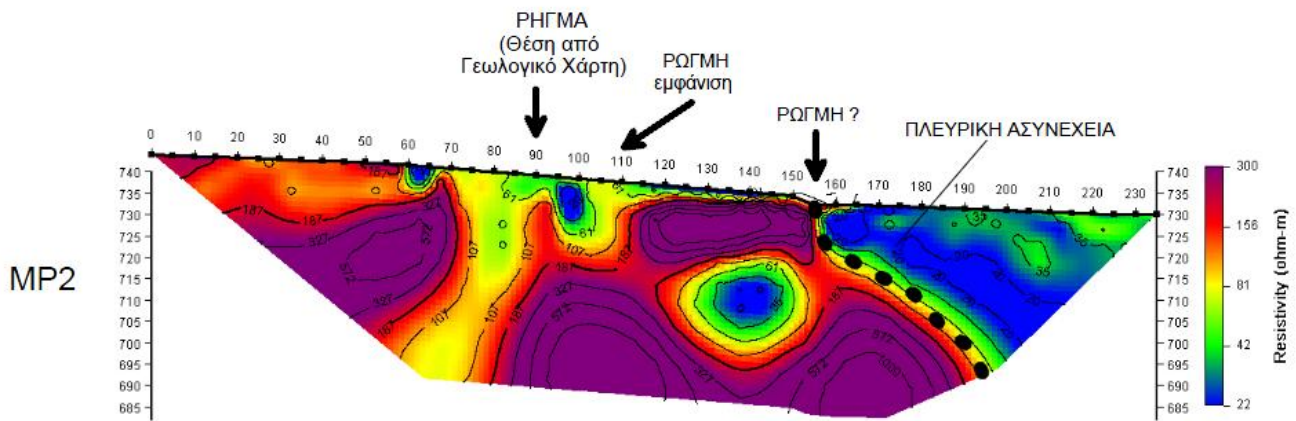
Σχ. 5.1.13 Θέση των τομών ηλεκτρικής τομογραφίας υψηλής ανάλυσης με υπόβαθρο τον Τοπογραφικό χάρτη (ερευνητική ομάδα Α.Π.Θ. 2011)

Στην τομή M1, η οποία πραγματοποιήθηκε δίπλα στην ανοικτή εκσκαφή, παρατηρείται πλευρική διαφοροποίηση των αντιστάσεων στο σημείο όπου επιφανειακά εντοπίζεται η επιφανειακή διάρρηξη (σημείο 150m της τομής M1), όπως φαίνεται και στον τοπογραφικό χάρτη (σχήμα 5.1.13). Συμπεραίνουμε ότι η διαφοροποίηση αυτή των αντιστάσεων δηλώνει την ύπαρξη ρήγματος και πρόκειται για μετάβαση από ασβεστιτικό σύγκριμα σε χαλαρά ιζήματα (άμμοι-άργιοι). Επίσης στην τομή επιβεβαιώνεται η θέση του κύριου γεωλογικού ρήγματος της περιοχής, το οποίο φαίνεται να συνδέεται με μια σχεδόν κατακόρυφη ζώνη διάρρηξης (75-95m στην τομή M1)



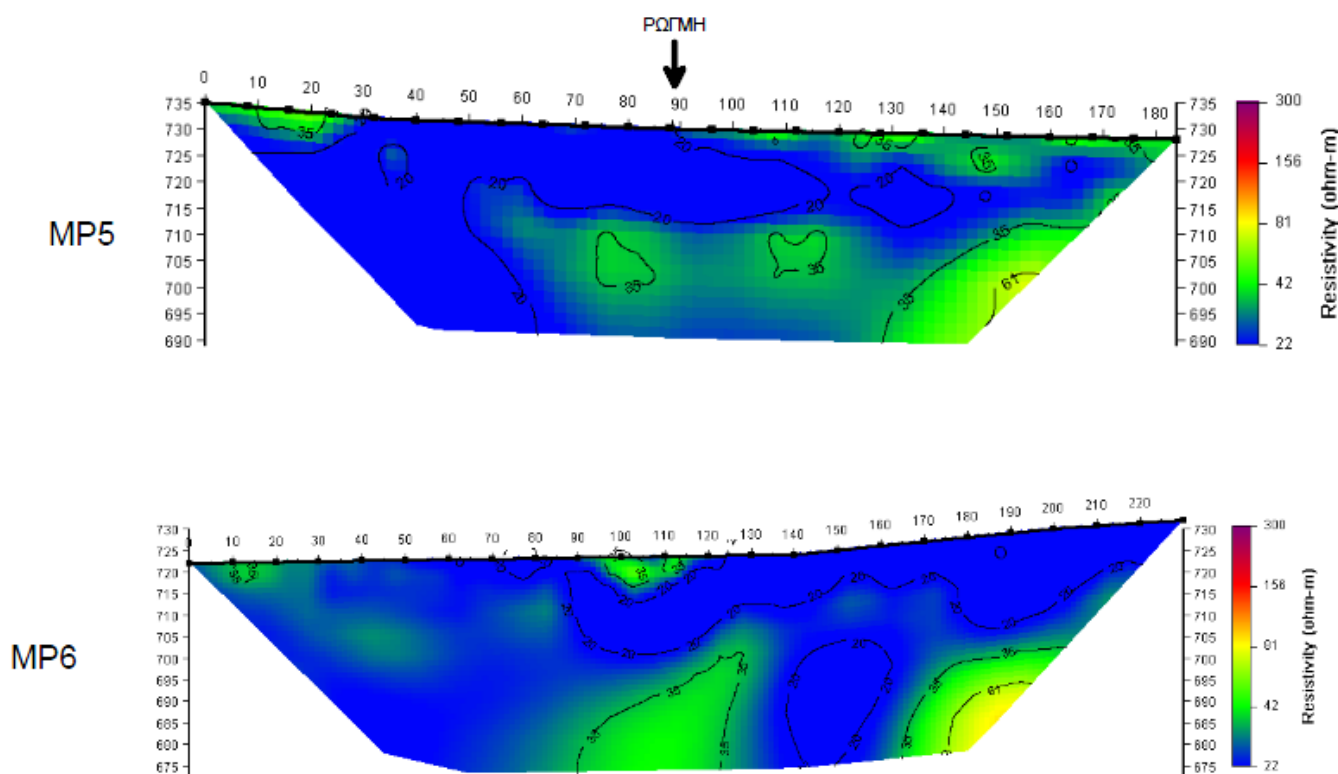
Σχήμα 5.1.14 Αποτελέσματα της αντιστροφής για την τομή MP1 (ερευνητική ομάδα ΑΠΘ 2011)

Στη συνέχεια αναλύοντας τις τομές M2-3-4, οποίες προέκυψαν επίσης από τη γεωφυσική έρευνα, παρατηρείται παρόμοια εικόνα σε όλες τις τομές όπου είναι εμφανής η πλευρική διαφοροποίηση των σχηματισμών που σχετίζεται με τις ρωγμές. Οι τομές αυτές πραγματοποιήθηκαν στην εδαφική διάρρηξη που τοποθετείται πλησίον του οικισμού της Μαυροπηγής. Συγκεκριμένα η τομή MP3 που μετρήθηκε στο Νότιο τμήμα του οικισμού, φαίνεται σχεδόν κατακόρυφη ασυνέχεια στα 140 m της τομής κάτι που φαίνεται να σχετίζεται με σημαντικές ζημιές στα γειτονικά κτίσματα.



Σχήμα: 5.1.15 Αποτελέσματα γεωφυσικών μετρήσεων τομές ΜΡ2-4-3, όπου διαπιστώνεται το γεωλογικό ρήγμα και εντοπίζονται οι εδαφικές ρωγμές (ερευνητική ομάδα ΑΠΘ 2011)

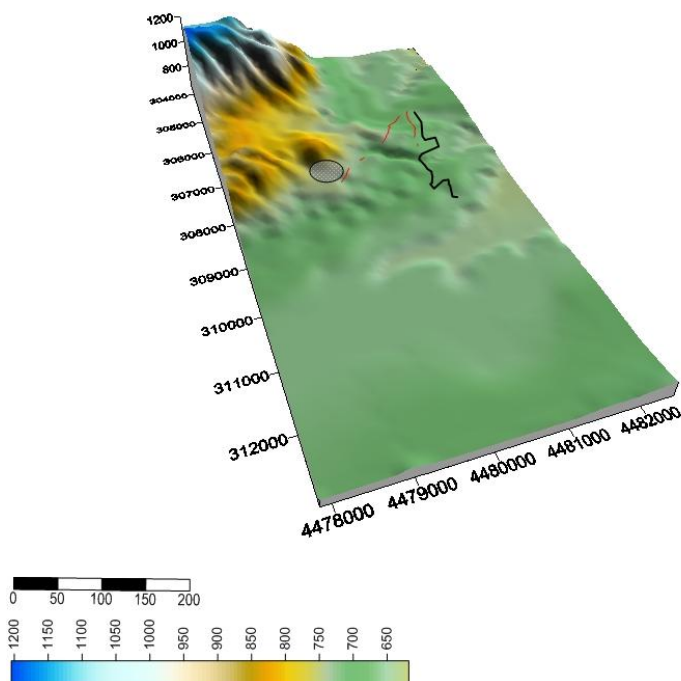
Η επιφανειακή διάρρηξη που εντοπίζεται κοντά στο ορυχείο της Μαυροπηγής, στο δυτικό τμήμα της περιοχής, εξετάζεται με τις τομές MP5 και MP6. Στην τομή MP5 διαπιστώνεται η ρωγή στα 90m της τομής στην περιοχή του νηπιαγωγείου. Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι οι εδαφικές διαρρήξεις (ρωγμές), που εντοπίζονται στο οικισμό της Μαυροπηγής, συνδέονται με έντονες, σχεδόν κατακόρυφες λιθολογικές ασυνέχειες, οι οποίες πιθανά αντιπροσωπεύουν ρήγματα ενώ κατά τόπους ταυτίζονται με ρήγματα που παρατηρήθηκαν στην γεωλογική αναγνώριση. Τέλος γίνεται αντιληπτό ότι τα αποτελέσματα της ηλεκτρονικής τομογραφίας, εξηγούν τη δημιουργία ρωγμών στα συγκεκριμένα σημεία ως εκδήλωση του διαφορικού βαθμού μετατόπισης των υλικών.



Σχήμα: 5.1.16: Αποτελέσματα γεωφυσικών μετρήσεων τομές MP5-6. Διαπιστώνεται η ρωγή στα 90m της τομής στην περιοχή του νηπιαγωγείου (ερευνητική ομάδα ΑΠΘ 2011)

5.2 Γεωλογικό μοντέλο της περιοχής έρευνας

Η μορφολογία της περιοχής χαρακτηρίζεται ήπια από τον οικισμό ως το κέντρο της λεκάνης, ενώ οι εξάρσεις τοποθετούνται πίσω από τον οικισμό.



Σχήμα 5.2.1 Μορφολογικό ανάγλυφο της ευρύτερης περιοχής του οικισμού Μαυροπηγής. Φαίνεται η θέση των επιφανειακών διαρρήξεων (κόκκινες γραμμές) και του ορίου της εκσκαφής (μαύρη γραμμή) καθώς και η θέση του οικισμού (κύκλος)

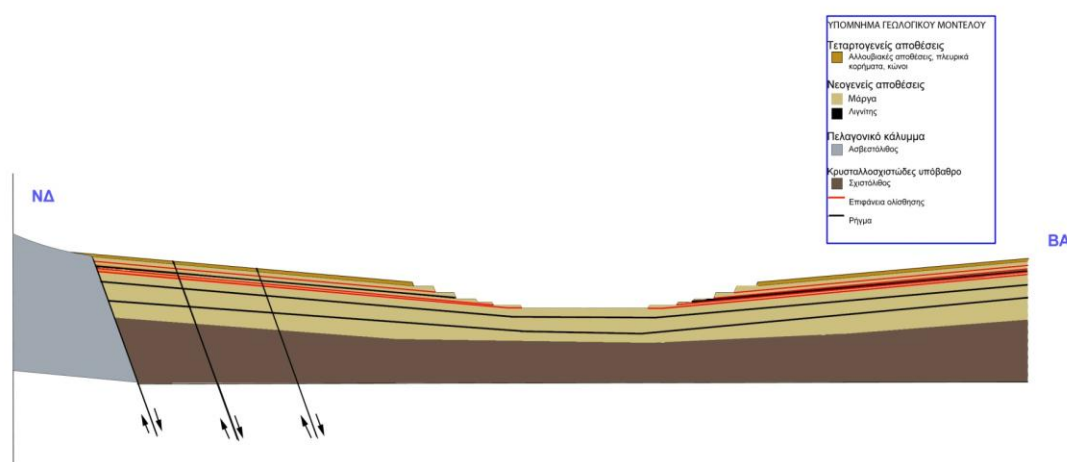
Η γεωλογία της περιοχής χαρακτηρίζεται από την παρουσία των Νεογενών ιζημάτων που αποτελούνται από αμμο-αργιλώδεις και μαργαϊκούς σχηματισμούς οι οποίοι εναλλάσσονται με οριζόντες λιγνίτη. Το πάχος των σχηματισμών αυτών στην περιοχή υπερβαίνει τα 200m. Τους σχηματισμούς αυτούς υπέρκεινται αργιλικές Τεταρτογενείς αποθέσεις πάχους έως 50m. Το υπόβαθρο της περιοχής αποτελείται από κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους και σχιστολίθους. Οι ασβεστόλιθοι τοποθετούνται στα όρια της λεκάνης και είναι τεκτονικά τοποθετημένοι πάνω στους σχιστόλιθους της περιοχής.

Η επαφή των ασβεστολίθων με τα νεογενή ιζήματα είναι τεκτονική και συγκεκριμένα πρόκειται για το κύριο ρήγμα της στενής περιοχής έρευνας που εκτείνεται από τα Βόρεια μέσα στους ασβεστολίθους και συνεχίζει ΝΑ μέσα στον οικισμό της Μαυροπηγής. Παράλληλα με το κύριο ρήγμα αναπτύσσονται και επιμέρους μικρότερες διαρρήξεις οι οποίες συνδέονται με τις επιφανειακές ρωγματώσεις που

έχουν εμφανιστεί στον οικισμό της Μαυροπηγής η τοποθέτηση του ρήγματος αλλά και τον επιμέρους διαρρήξεων διαπιστώθηκε και με γεωφυσικές έρευνες που πραγματοποιήθηκαν από την ερευνητική ομάδα του ΑΠΘ (2011).

Σύμφωνα με τους Κ. Βουδούρη και Χρ. Μάττα (2011) όσον αφορά τις υδρογεωλογικές συνθήκες υδροφορία αναπτύσσεται στα ανθρακικά πετρώματα και εμφανίζεται περιορισμένη στις νεογενείς αποθέσεις και τα κρυσταλλοσχιστώδη σχιστολιθικά πετρώματα. Η κίνηση του υπόγειου νερού είναι προς την εκσκαφή του ορυχείου και η στάθμη του υπόγειου νερού από την επιφάνεια του εδάφους κυμαίνεται από 28,48 m έως 111,67 m.

σύμφωνα με της παραπάνω πληροφορίες δημιουργήθηκε ένα πρόχειρο γεωλογικό μοντέλο που απεικονίζεται στο σχήμα 5.2.3.



Σχ.5.2.3: Απλοποιημένο γεωλογικό μοντέλο.

5.3 Μηχανισμός αστοχίας των μαργαϊκών σχηματισμών περιφερικά της εκσκαφής

Ο τύπος της αστοχίας που λαμβάνει χώρα στο Λιγνιτωρυχείο της Μαυροπηγής είναι σύνθετος: αποτελείται από ένα επίπεδο σχεδόν οριζόντιο τμήμα και ένα καμπύλο τμήμα κοντά στην κορυφή του πρανούς. Η μορφή αυτή οφείλεται στη σύσταση των νεογενών υλικών που πληρούν την λεκάνη της Πτολεμαΐδας όπου τοποθετείται η εκσκαφή και ο οικισμός. Η διαδικασία της ιζηματογένεσης κατά τη δημιουργία των μαργαϊκών σχηματισμών προσδίδει ιδιότητες σε αυτός που συντελούν στον έλεγχο της αστοχίας. Η χαρακτηριστική στρώση που αναπτύσσεται μέσα στους μαργαϊκούς

σχηματισμούς συνιστά οδηγό για τη δημιουργία επιφανειών διάτμησης, ενώ η εναλλαγή λιθολογικών τύπων με διαφορετικά φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά οδηγούν το σώμα της μάργας να παρουσιάζει μια ανισότροπη συμπερά με την επιβολή τάσεων. Επίσης στις περιπτώσεις λιγνιτορυχείων αργιλικά στρώματα μεγάλης πλαστικότητας (μαργαϊκοί ορίζοντες) παρεμβάλλονται ανάμεσα σε πρακτικά μη υδατοπερατά στρώματα πάχους δεκάδων μέτρων (Λιγνίτη), αυτή η εναλλαγή στρωμάτων οδηγεί στη δημιουργία οριζόντιας επιφάνειας ολίσθησης κατά μήκος των παραοριζώντιων αργιλικών υλικών. Η επίπεδη επιφάνεια ολίσθησης αναπτύσσει μια προοδευτική θραύση, και παρουσιάζει διατμητική αντοχή ιδιαίτερα χαμηλή που τίνει να ταυτιστεί με την παραμένουσα τιμή της. η διαδικασία της προοδευτικής θράυσης οφείλεται σε επίδραση της αρχικής εντατικής κατάστασης, λόγω προστερεοποίησης των υλικών (Καβουνίδης, 1988). Η δημιουργία της επιφάνειας ολίσθησης εκτείνεται από τον πόδα του πρανούς και προωθείται προς το εσωτερικό (Μ. Λέανδρος). Από τη παραοριζόντια αυτή επιφάνεια υπό γωνία, ξεκινά μια καμπύλη επιφάνειας ολίσθησης, η οποία επίσης ακολουθεί μια προδιαγεγραμμένη επιφάνεια ασυνέσιας την οποία παρέχουν τα ρήγματα της περιοχής. Η καμπύλη αυτή επιφάνεια τελικά εμφανίζεται στην κορυφή του πρανούς υπό μορφή ρωγμής στην περιοχή της Μαυροπηγής (αποτέλεσμα εφελκυσμού - εφελκυστικές ρωγμές). Οι δύο επιφάνειες αδυναμίας ενώνονται μεταξύ του με θραύση στο σώμα της μάργας, αποτέλεσμα αυτού του συστήματος επιφανειών ολίσθησης και θραύσης είναι η δημιουργία μίας πολυεπίπεδης ολίσθησης.

Με την εξέλιξη της εκσκαφής η πλευρική στήριξη μειώνεται, με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται εφελκυστικές τάσεις που προκαλούν τη ανάπτυξη ρωγμών και την διεύρυνση αυτών που ήδη υπάρχουν, μέσω των οποίων επιφανειακά ύδατα θα εισέρχονται στο στρώμα της μάργας και θα μειώνουν περεταίρω τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά της ενώ παράλληλα αυξάνουν την πίεση των πόρων. Αν λοιπόν οι αναπτυσσόμενες αυτές τάσεις υπερβούν την αντοχή του σχηματισμού θα επέλθει κατάρρευση.

Η τεκτονική της περιοχής και τα ρήγματα που αναπτύσσονται παίζουν ιδιαίτερο ρόλο στην εξέλιξη του μηχανισμού καθώς από τις γεωφυσικές μετρήσεις που έγιναν από την ερευνητική ομάδα του ΑΠΘ στην περιοχή, διαπιστώθηκε ότι υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των κύριων ρωγμών που διέρχονται από τον οικισμό της Μαυροπηγής με έντονες, σχεδόν κατακόρυφες λιθολογικές ασυνέχειες (πιθανά ρήγματα).

Ένας διαφορετικός και πιο απλός μηχανισμός αστοχίας, που αναπτύσσεται στο μέτωπο της εκσκαφής του ορυχείου είναι η περιστροφική ολίσθηση όπου χαρακτηρίζεται από κυκλική επιφάνεια ολίσθησης με διαδοχικούς κύκλους ολίσθησης, ρηχές επιφάνειες θραύσης σε μη προδιαγεγραμμένες επιφάνειες θραύσης. Οι σχηματισμοί των τεταρτογενών και νεογενών όπου κυρίως παρατηρούνται οι κυκλικές ολισθήσεις είναι χαλαροί με χαμηλά χαρακτηριστικά (c και ϕ) ή με μεγαλύτερη συνοχή (c) αλλά πυκνό σύστημα διαρρήξεων (τεταρτογενή ή μάργα με χαμηλά χαρακτηριστικά)



Σχήμα 5.3.1: Κατολίσθηση που περιλαμβάνει τους τεταρτογενείς σχηματισμούς και τη μάργα, φαίνονται τα άρρηκτα τεμάχια μάργας, προκλήθηκε στο ορυχείο Μαυροπηγής στις 14-01-2014.



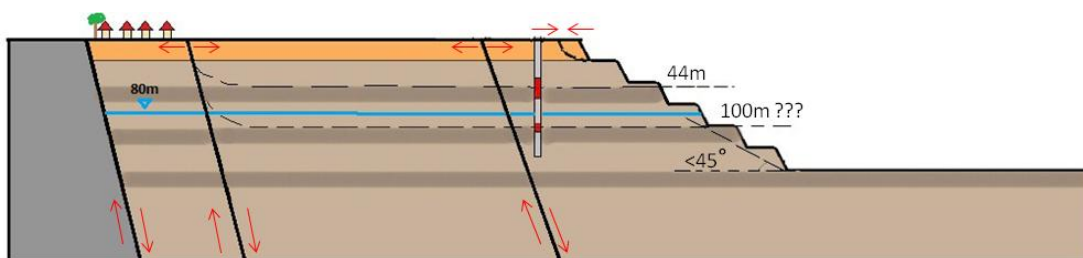
Σχήμα 5.3.2: Περιστροφικές ολισθήσεις, εντός των τεταρτογενών, στη θέση του ορυχείου Μαυροπηγής.

5.4 Γενικό μοντέλο της περιοχής Μαυροπηγής

Συνοψίζοντας όσα αναφέρθηκαν σε αυτό το κεφάλαιο οδηγούμαστε σε ένα γενικό μοντέλο της περιοχής έρευνας στο οποίο απεικονίζονται οι πληροφορίες που συλλέχθηκαν για την κατανόηση της συμπεριφοράς των εδαφικών σχηματισμών της περιοχής όσο αφορά την εκδήλωση των ρωγμών και των κατολισθήσεων. Οι πληροφορίες στη συνέχεια θα εφαρμοστούν σε προγράμματα ανάλυσης ευσταθείας για την προσομοίωση των κινήσεων των εδαφικών σχηματισμών και την κατανόηση και συσχέτιση των χαρακτηριστικών των εδαφών με τη συμπεριφορά που εκδηλώσανε (παραμορφώσεις και αστοχίες).

στο σχήμα 5.4.1 απεικονίζονται:

- η θέση του οικισμού της Μαυροπηγής
- Οι επιφάνειες διάτμησης εντός των νεογενών
- Το τεκτονικό ρήγμα μεταξύ ασβεστολιθών και νεογενών
- Τα επιμέρους ρήγματα που πιθανόν συνδέονται με τις επιφανειακές ρωγμές
- Η επιφανειακή εκδήλωση των ρωγμών και η θέση εφελκυσμού
- Το βάθος ολίσθησης στα 44m που καταγράφηκε από το κλισιόμετρο της γεώτρησης M2
- Το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα
- Ο χώρος της εκσκαφής
- Οι περιστροφικές ολισθήσεις στο μέτωπο της εκσκαφής, σημείο συμπιεστικών τάσεων
- Ο πολυεπίπεδος μηχανισμός ολίσθησης που συμβαίνει μέσα στα νεογενή



Σχήμα 5.4.1: Γενικό μοντέλο της περιοχής Μαυροπηγής

6. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ

Η συνολική ευστάθεια των πρανών στην περιοχή μελέτης ελέγχεται κυρίως από τις επιφάνειες μειωμένης διατμητικής αντοχής, δηλαδή των ασυνεχειών και των ρηγμάτων, οι οποίες όταν παρουσιάζουν δυσμενή προσανατολισμό ως προς τα εκσκαπτόμενα ορύγματα επιβαρύνουν την ευστάθειά τους. Επίσης την ευστάθεια των εκσκαπτόμενων πρανών επηρεάζουν η αντοχή των άρρηκτων μαργών και η πίεση των πόρων (υδρογεωλογικές συνθήκες).

Για τη διερεύνηση της τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς των μαργών, στα πρανή περιφερειακά της εκσκαφής, στη περιοχή της Μαυροπηγής χρησιμοποιήθηκαν δυο υπολογιστικές μέθοδοι ανάλυσης ευστάθειας η μέθοδος οριακής ισορροπίας και η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων.

6.1 Περιγραφή χρήσης λογισμικών ανάλυσης ισορροπίας

Η εκτίμηση ευστάθειας των πρανών του ορυχείου της Μαυροπηγής έχει ως στόχο την αξιολόγηση της κινητικότητας των πρανών, για αυτό το σκοπό εφαρμόστηκαν οι μέθοδοι ανάλυσης οριακής ισορροπίας και πεπερασμένων στοιχείων με την χρήση των αντίστοιχων λογισμικών:

- το λογισμικό slide v 5.0 της εταιρίας Rocscience σε δισδιάστατο γεωλογικό προσομοίωμα για την ανάλυση ευστάθειας στις περιπτώσεις της κυκλικής ολίσθησης
- το λογισμικό phase2 v 0.6 της εταιρίας Rocscience σε δισδιάστατο γεωλογικό προσομοίωμα για την ανάλυση των παραμορφώσεων στα πρανή

Η ευστάθεια των πρανών στη περιοχή εξαρτάται από επιφάνειες με μειωμένη διατμητική αντοχή (επιφάνειες αδυναμίας, ρήγματα) και από την αντοχή των μαργών ή και από συνδυασμό των παραπάνω. Επομένως σύμφωνα με τους πιθανούς μηχανισμούς αστοχίας θα πραγματοποιηθούν δύο ομάδες αναλύσεων:

1^η ομάδα: ανάλυση σε κυκλικές επιφάνειες (περιστροφική ολίσθηση) η οποία θα πραγματοποιηθεί με το λογισμικό slide v 5.0 της εταιρίας Rocscience. Αστοχία λόγω θραύσης της μάργας, ή/και αστοχίας των τεταρτογενών υλικών με περιστροφική ολίσθηση πάνω σε μη προδιαγεγραμμένη κυκλική επιφάνεια, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι επιφάνειες αδυναμίας.

2^η ομάδα: ανάλυση παραμορφώσεων (πολυεπίπεδη ολίσθηση) η οποία θα πραγματοποιηθεί στο λογισμικό phase της εταιρίας Rocscience. Θα αναλυθούν οι αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις εντός των μαργαϊκών σχηματισμών που προκαλούνται από τον μηχανισμό της πολυεπίπεδης ολίσθησης.

Λόγω των δυνατοτήτων των προγραμμάτων και του περιορισμένου αριθμού στοιχείων έγιναν κάποιες εκ των προτέρων παραδοχές στη δημιουργία του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε προς ανάλυση της ευστάθειας. Οι παραδοχές αυτές αφορούν στην απλοποίηση της αποτύπωσης της γεωλογίας της περιοχής, ώστε να δημιουργηθεί ένα απλοποιημένο γεωλογικό μοντέλο, συνεπώς όσο αφορά τη στρωματογραφία τα γεωλογικά στρώματα μειώθηκαν και θεωρήθηκαν ομογενή, καθώς επίσης απλοποιήθηκε και η τεκτονική της περιοχής, τοποθετώντας στο μοντέλο μόνο τρία ρήγματα κοντά στον οικισμό της Μαυροπηγής.

6.2 Ανάλυση ευσταθείας πρανών του ορυχείου με τη μέθοδο της οριακής ισορροπίας

Η ανάλυση ευστάθειας πρανούς βασίζεται στην ανάλυση οριακής ευστάθειας (limited equilibrium method), όπου για συγκεκριμένη επιφάνεια ολίσθησης ο συντελεστής ασφαλείας υπολογίζεται μέσω της σύγκρισης της υπάρχουσας διατμητικής αντοχής και της διατμητικής αντοχής που απαιτείται για την διατήρηση της ισορροπίας.

Η ανάλυση οριακής ισορροπίας γίνεται σε δισδιάστατη ανάλυση (2D) όπου η επιφάνεια αστοχίας θεωρείται απείρου μήκους, συνεπώς η πλευρική αντίσταση (3D αντίσταση) θεωρείται αμελητέα σε σύγκριση με την ολική δύναμη αντίστασης.

Στόχος είναι ο προσδιορισμός τέτοιων παραμέτρων των γεωυλικών ώστε να επικρατούν συνθήκες οριακής ισορροπίας στη περιοχή της εκσκαφής , δηλαδή να επιτύχουμε τον απαιτούμενο συντελεστή ασφαλείας που θα ισούται περίπου με τη μονάδα. Για την αξιολόγηση και τον προσδιορισμό των γεωτεχνικών παραμέτρων των υλικών που διαμορφώνουν τα εδαφικά πρανή (εφόσον δεν πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακές αναλύσεις) πραγματοποιήθηκαν ανάστροφες αναλύσεις μέσω του λογισμικού Slide.

Πρόγραμμα ανάλυσης οριακής ευστάθειας SLIDE προσομοίωση μοντέλου

Στη διαδικασία της προσομοίωσης ελήφθησαν υπόψη ο μηχανισμός αστοχίας, τα σημεία εμφάνισης επιφάνειας αδυναμίας και ρηγμάτων (ασυνεχειών) , τα γεωμετρικά

δεδομένα των πρυνών εκμετάλλευσης και τα αποτελέσματα των διαθέσιμων εργαστηριακών δοκιμών και των εκσκαφών που έχουν πραγματοποιηθεί σε γειτονικές περιοχές και παρόμοια γεωλικά..

Λόγω των δυνατοτήτων του προγράμματος και του περιορισμένου αριθμού στοιχείων έγιναν κάποιες παραδοχές στη δημιουργία του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε προς ανάλυση της ευστάθειας. Οι παραδοχές αυτές αφορούν στην απλοποίηση της αποτύπωσης της γεωλογίας της περιοχής ώστε να δημιουργηθεί ένα απλοποιημένο γεωλογικό μοντέλο, συνεπώς όσο αφορά τη στρωματογραφία, τα γεωλογικά στρώματα μειώθηκαν και θεωρήθηκαν ομογενή καθώς επίσης μειώθηκε ο αριθμός των ρηγμάτων του πρυνού.

Η εκτίμηση των παραμέτρων αντοχής των γεωλικών πραγματοποιήθηκε έτσι ώστε να παρουσιάζονται οι ρηχές- κυκλικές επιφάνειες ολίσθησης, οι οποίες αναπτύσσονται μέσα στο σώμα των τεταρτογενών.

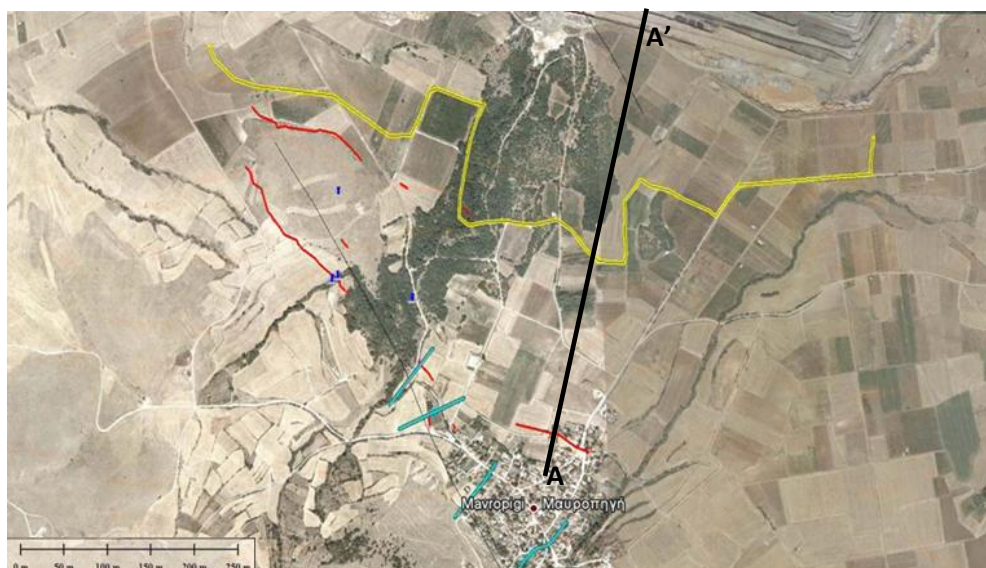
Σύμφωνα με τη μεθοδολογία της ανάλυσης ακολουθήθηκαν τρία βήματα, αρχικά καθορίστηκε και σχεδιάστηκε η γεωμετρία των γεωλικών στρωμάτων ενώ στη συνέχεια ορίστηκαν οι γεωλογικοί σχηματισμοί, τέλος πραγματοποιήθηκαν ανάστροφες αναλύσεις για τον προσδιορισμό των παραμέτρων αντοχής των γεωλικών.

Τα υλικά που θεωρήθηκαν για την πραγματοποίηση των αναλύσεων, σύμφωνα με απλοποιημένο μοντέλο είναι:

- Οι τεταρτογενείς σχηματισμοί (10μ)
- Η αποσαθρωμένη μάργα, μέσα στην οποία και σε βάθος 44m παρατηρήθηκε μετακίνηση σύμφωνα με τις ενδείξεις των κλισιομέτρων. (30μ)
- Η υγιής μάργα(100μ)
- Ο ασβεστόλιθος
- Οι επιφάνειες αδυναμίας
- Τα ρήγματα

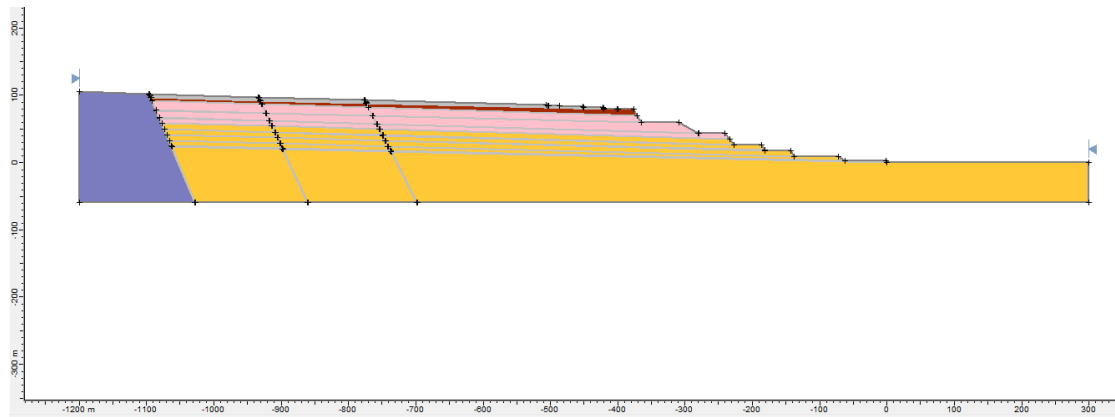
Η γεωμετρία των πρυνών καθορίστηκε με βάση τη στρωματογραφία της περιοχής και των τοπογραφικό χάρτη της περιοχής του οικισμού Μαυροπηγής όπου αποτυπώνεται η εκσκαφή του ορυχείου και ο οικισμός. Σύμφωνα με τον τοπογραφικό χάρτη εξετάζεται η τομή A-A', η οποία σχεδιάστηκε κάθετα στις ισοϋψείς. Σύμφωνα με την τομή A- A' καθορίστηκαν τα εξωτερικά όρια του μοντέλου, καθώς και η

τοποθέτηση της εκσκαφής κατά μήκος της τομής. Με τον ίδιο τρόπο καθορίστηκε και η γεωμετρία εντός της εκσκαφής (βήμα εκσκαφής). Η κλίση των γεωλογικών στρωμάτων προσδιορίστηκε σύμφωνα με τη γεωλογία της περιοχής από όπου γνωρίζουμε ότι τα στρώματα αναπτύσσονται παράλληλα με κλίση περίπου πέντε μοιρών και με αυτό τον τρόπο σχεδιάστηκαν οι εδαφικοί σχηματισμοί και στο μοντέλο του προγράμματος.



Σχήμα 6.2.1 απεικόνιση τομής A-A' σε ορθοφωτογραφία (ερευνητική ομάδα ΑΠΘ, 2011)

Τα τεκτονικά στοιχεία (ρήγματα) τοποθετήθηκαν σε σημεία που συμφωνούν με την τεκτονική της περιοχής και με βάση τα στοιχεία από τη γεωφυσική διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε στην περιοχή από την ερευνητική ομάδα του ΑΠΘ, ενώ δηλώθηκαν σαν διεπιφάνειες πάχους 1m. Τέλος οι επιφάνειες αδυναμίας που υπάρχουν μέσα στους μαργαϊκούς σχηματισμούς ξεκινάνε σε κάθε βήμα εκσκαφής και προσδιορίζονται σαν διεπιφάνειες επίσης, μικρότερου όμως εύρους από τα ρήγματα.



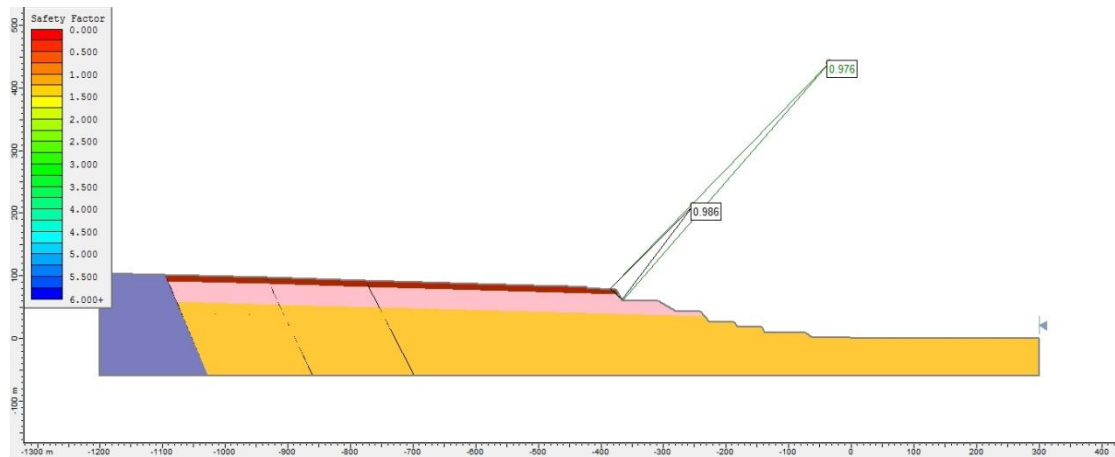
Σχήμα 6.2.2: Εικόνα μοντέλου στο πρόγραμμα slide. Με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται τα τεταρτογενή, με ροζ η αποσαθρωμένη μάργα, με κίτρινο η υγιής μάργα και με μπλε ο ασβεστόλιθος, οι παραοριζόντιες γραμμές είναι οι επιφάνειες ασυνέχειας ενώ οι τρεις σχεδόν κάθετες γραμμές απεικονίζουν τα ρήγματα

Πρόγραμμα ανάλυσης οριακής ευστάθειας SLIDE αναλύσεις

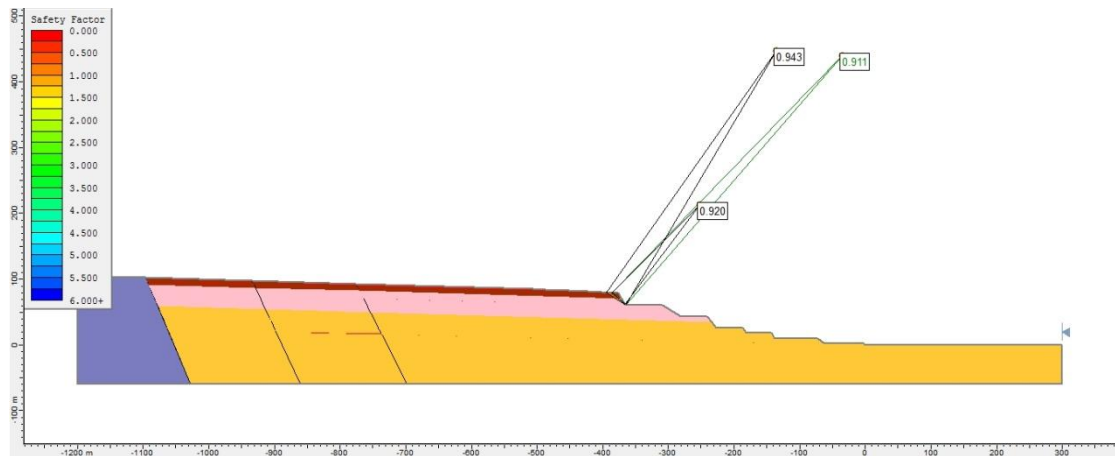
Για την αξιολόγηση των γεωτεχνικών παραμέτρων πού επιλέχθηκαν πραγματοποιήθηκαν ανάστροφες αναλύσεις στα υφιστάμενα πρανή, των οποίων η γεωμετρία προσομοιώθηκε σε ένα μοντέλο σύμφωνα με την τοπογραφική αποτύπωση της περιοχής εκσκαφή. Οι ανάστροφες αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με παραμετρική εξέταση των υδρογεωλογικών συνθηκών, δηλαδή της πίεσης των πόρων (R_u). Η παραμετρική εξέταση του νερού αντιπροσωπεύει τρεις διαφορετικές συνθήκες υπόγειου ύδατος, η πρώτη περίπτωση ($R_u = 0$) αφορά μηδενική παρουσία υπόγειου νερού, η δεύτερη περίπτωση ($R_u = 0.1$) αφορά χαμηλή παρουσία υπόγειου νερού (καλοκαιρινοί μήνες) και τέλος η τρίτη περίπτωση αφορά σε υψηλότερες συνθήκες υπόγειου νερού (χειμερινοί μήνες).

Αρχικά εξετάστηκε η ομάδα αναλύσεων, όπου ελέγχεται το ενδεχόμενο περιστροφικής ολίσθησης. Η ανάστροφη ανάλυση γίνεται σε συνθήκες οριακής ισορροπίας, όπου ο συντελεστής ασφαλείας είναι πολύ κοντά στη μονάδα ($\Sigma F = 1$). Στα πρανή της εκσκαφής έχουν σημειωθεί περιστροφικές ολισθήσεις στους τεταρτογενείς σχηματισμούς και στο σώμα της μάργας, οπότε στόχος είναι ο προσδιορισμός των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών των σχηματισμών ώστε σε συνθήκες οριακής ισορροπίας να προσομοιώνονται αυτού του είδους τις αστοχίες για πίεση πόρων με τιμές $R_u = 0, 0.1, 0.2$.

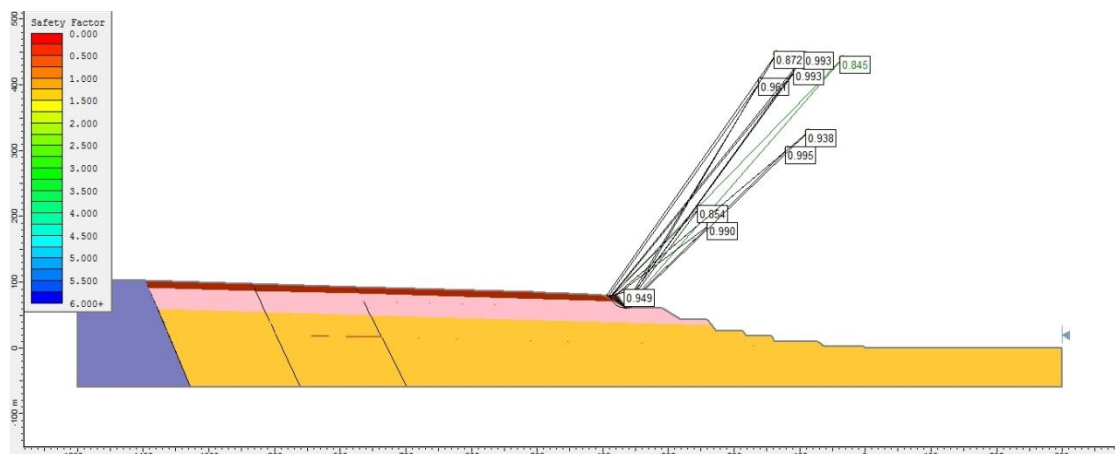
Οι κυκλικές επιφάνειες ολίσθησης είναι πιθανότερο να πραγματοποιηθούν μέσα στις τεταρτογενείς αποθέσεις, οι οποίες καλύπτουν τη μάργα στη περιοχή.



Σχήμα 6.2.3: Γραφικά αποτελέσματα ανάλυσης ευστάθειας στη διατομή A-A', για κυκλικές επιφάνειες ολίσθησης και συντελεστή πιέσεων πόρων $Ru=0$



Σχήμα 6.2.4: Γραφικά αποτελέσματα ανάλυσης ευστάθειας στη διατομή A-A', για κυκλικές επιφάνειες ολίσθησης και συντελεστή πιέσεων πόρων $Ru=0.1$



Σχήμα 6.2.5: Γραφικά αποτελέσματα ανάλυσης ευστάθειας στη διατομή A-A', για κυκλικές επιφάνειες ολίσθησης και συντελεστή πιέσεων πόρων $Ru=0.2$

Στον πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά που αποδόθηκαν στους σχηματισμούς με τη διαδικασία των ανάστροφων αναλύσεων.

Πίνακας 6.2.1: Γεωτεχνικά χαρακτηριστικά που αποδόθηκαν στους σχηματισμούς κατά τη διαδικασία των ανάστροφων αναλύσεων.

	$\gamma(\text{KN/m}^3)$	$c(\text{KN/m}^2)$	ϕ^0
Ασβεστόλιθος	25	1700	34
Τεταρτογενή	18	25	18
Αποσαθρωμένη μάργα	22	30	18
Υγιής μάργα	23	150	34
Επιφάνεια ολίσθησης	22	0	14
Ρήγμα	22	5	10

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων σε δύο διαστάσεις για πρανές απείρου μήκους συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί, όπου φαίνονται οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας που προκύπτουν επίσης δίνονται γραφικά αποτελέσματα με τη γεωμετρία των κρίσιμων κύκλων ολίσθησης, από το λογισμικό Slide v.6 της εταιρείας RocScience που χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς.

Πίνακας 6.2.2: Αποτέλεσμα ανάλυσης ευστάθειας με ελάχιστο μέγεθος συντελεστή ασφαλείας για $R_u = 0, 0.1, 0.2$ σύμφωνα με τις αναλύσεις για τις μεθόδους bishop και janbu

Συντελεστής πίεσης πόρων R_u	Συντελεστής ασφαλείας Σf (bishop)	Συντελεστής ασφαλείας Σf (Janbu)
0	0.976	0.975
0.1	0.911	0.909
0.2	0.845	0.843

Από τις δοκιμές ανάστροφης ανάλυσης καταλήξαμε στις τιμές γεωτεχνικών παραμέτρων. Από τη προσομοίωση διαπιστώνονται οι κυκλικές αστοχίες που έχουν σημειωθεί στα εδαφικά πρανή του ορύγματος, των οποίων οι κύκλοι ολίσθησης τείνουν να ταυτιστούν στο μοντέλο.

Με την παραμετρική εξέταση της πίεσης των πόρων διαπιστώθηκε η σημαντικότητα του ρόλου του νερού, εφόσον η μεταβολή της τιμής R_u επηρεάζει αισθητά τα αποτελέσματα των αναλύσεων. Για τη μεταβολή του R_u εντός των τιμών 0 - 0.2 υπάρχει αντίστοιχα μεταβολή του συντελεστή ασφαλείας σε τιμές από 0.976-0.845.

6.3 Ανάλυση ευστάθειας με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

Η ανάλυση που θα ακολουθήσουμε έχει σαν στόχο την διερεύνηση προβλημάτων των παραμορφώσιμων σωμάτων στις δύο διαστάσεις. Μέσα από αυτή τη μέθοδο ανάλυσης θα προσδιοριστεί η γεωτεχνική συμπεριφορά των μαργών μέσα από τη προσομοίωση των τάσεων, των παραμορφώσεων και των μετακινήσεων του εδαφικού πρανούς. Το πρόγραμμα PHASE της εταιρίας Rockscience είναι ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με το οποίο είναι δυνατή η ανάλυση των παραμορφώσεων και τάσεων που κατανέμονται γύρω από την εκσκαφή, ως μέσο πρόγνωσης της κινητικής συμπεριφοράς του πρανούς.

Πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων PHASE - Μοντέλο προσομοίωσης

Στο λογισμικό εφαρμόστηκε μοντέλο προσομοίωσης που δημιουργήθηκε για την περιοχή τα εκσκαφής της Μαυροπηγής. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα επιλέχθηκε λόγω της επιθυμίας υπολογισμού των τάσεων που κατανέμονται γειτονικά της εκσκαφής (εφόσον η ισορροπία των τάσεων διαταράχθηκε μετά την πραγματοποίηση της), προς την κατανόηση της κινητικής συμπεριφοράς των εδαφικών σχηματισμών των πρανών μπροστά και πίσω από το όρυγμα. Το αποτέλεσμα θα αφορά στη διαπίστωση των οριζόντιων μετατοπίσεων που πραγματοποιούνται από το μέτωπο της εκσκαφής ως το χωριό της Μαυροπηγής σε διάφορες αποστάσεις, συσχετίζοντας τις εδαφικές μετακινήσεις με τις ρωγματώσεις που έχουν εμφανιστεί ανάμεσα στον οικισμό και το ορυχείο.

Γνωρίζοντας τον μηχανισμό ολίσθησης που μπορεί να εκδηλώσουν οι μαργαϊκοί σχηματισμοί στην περιοχή της Μαυροπηγής συγκεντρώνοντας στοιχεία από

- τις γεωφυσικές μετρήσεις,
- τις ενδείξεις των κλισιομέτρων
- την μελέτη παρόμοιων μετακινήσεων στη γύρω περιοχή

Προσδιορίστηκε ο σύνθετος μηχανισμός ολίσθησης (πολυεπίπεδη επιφάνεια ολίσθησης) καθώς και τα όρια της παραμόρφωσης και της κίνησης γύρω από την περιοχή της εκσκαφής.

Για τη δημιουργία του μοντέλου προς προσομοίωση χρειάστηκε ο καθορισμός τεσσάρων παραγόντων:

- της γεωμετρίας του μοντέλου (στρωματογραφία, κλίσεις εδαφικών σχηματισμών, γεωμετρία εκσκαφής, τοποθέτηση ρηγμάτων), η γεωμετρία καθορίστηκε με τον ίδιο τρόπο που έγινε στο προσομοίωμα του λογισμικού slide
- της διαδικασίας της εκσκαφής, η οποία απλοποιημένα καθορίστηκε σε τέσσερα βήματα εκσκαφής,
- των εδαφικών γεωτεχνικών παραμέτρων
- και τέλος των συνοριακών συνθηκών.

Το μοντέλο που προσομοιώνει την περιοχή έρευνας εκτίνεται 1400 μέτρα πίσω από την εκσκαφή και το βάθος εκτίνεται 200 μέτρα κάτω από το δάπεδο της εκσκαφής. Οι διαστάσεις του μοντέλου επιλέχθηκαν, ώστε τα όρια του να μην επηρεάζουν τις τάσεις και τις μετακινήσεις των γεωλογικών σχηματισμών γύρω από την εκσκαφή. Η γεωμετρία των εξωτερικών ορίων καθορίζεται από την τομή Α-Α' που χαράχτηκε στον τοπογραφικό χάρτη της περιοχής, έτσι ώστε να προσδιορίζεται η τοποθέτηση της εκσκαφής και των ρημάτων καθώς και η γεωμετρία της εκσκαφής. Καθώς στην ανάλυση έγινε και προσομοίωση της πτώσης στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα, για πιο ρεαλιστικό αποτέλεσμα, προστέθηκε και το απέναντι πρανές της εκσκαφής εικονικά για την ταπείνωση της στάθμης χωρίς να συμμετάσχει στην ανάλυση ευστάθειας του μοντέλου. Συνεπώς οι εικόνες από τις αναλύσεις, οι οποίες έγιναν στο πρόγραμμα Phase, που θα ακολουθήσουν, επικεντρώνονται στο δυτικό πρανές της εκσκαφής όπου τοποθετείται και η περιοχή έρευνας.

Μετά τον ορισμό της γεωμετρίας των οριακών συνθηκών ακλούθησε ο ορισμός των ορίων των υλικών μέσα στο μοντέλο, η γεωμετρία τους καθορίστηκε με βάση τη στρωματογραφία της περιοχής και τοποθετήθηκαν υποπαράλληλα (κλίση $\sim 5^\circ$). Εφόσον καθορίστηκαν τα όρια των σχηματισμών, ορίστηκε και το υλικό που αντιστοιχεί σε κάθε ένα όριο. Οι σχηματισμοί της περιοχής χωρίστηκαν σε έξι γεωτεχνικές ενότητες

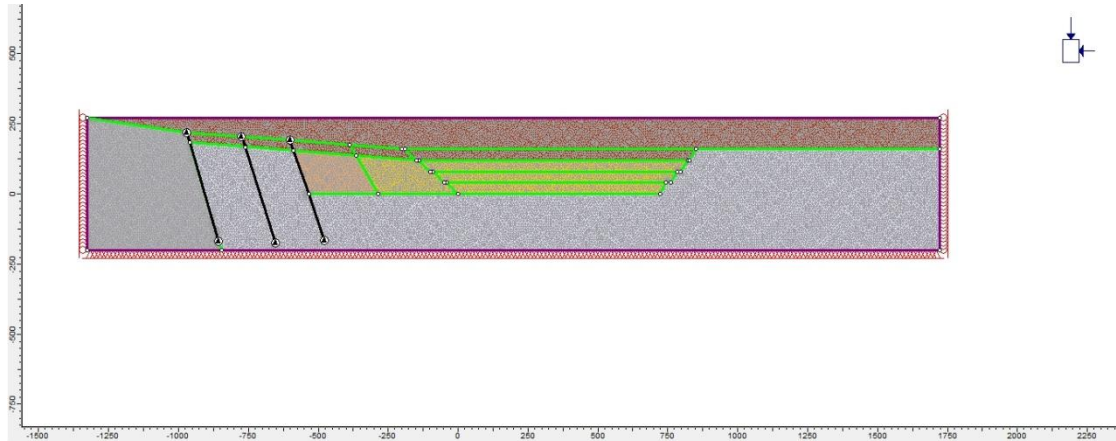
- τεταρτογενή
- νεογενή
 - αποτονωμένη μάργα,
 - αποσαθρωμένη μάργα,

- υγιής μάργα,
- ρήγμα
- ασβεστόλιθος

και τα γεωτεχνικά τους χαρακτηριστικά προσδιορίστηκαν μέσω βιβλιογραφικής έρευνας. Στη συνέχεια δημιουργήθηκε μία βάση δεδομένων για τις γεωτεχνικές ενότητες που παίρνουν μέρος στις αναλύσεις και ορίστηκαν τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά τους στο μοντέλο.

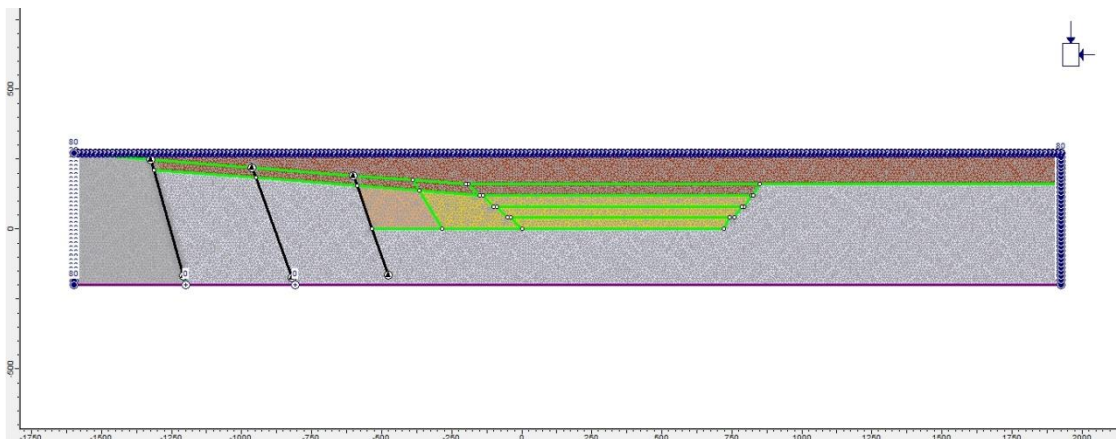
Μετά την προσομοίωση της περιοχής έρευνας, δημιουργήθηκε ένας κάνναβος πεπερασμένων στοιχείων, η έκταση του οποίου φτάνει ως τα σημεία επιρροής της εκσκαφής. Η περιοχή έρευνας διαιρείται σε επιμέρους τμήματα (πεπερασμένα στοιχεία), όπου το κάθε στοιχείο είναι τριγωνικό και αποτελείται από τρεις κόμβους. ακολουθεί η διακριτοποίηση του καννάβου σε επιμέρους τμήματα (πεπερασμένα στοιχεία), τα οποία είναι τριγωνικά στοιχεία με τρεις κόμβους, που ενώνονται μεταξύ του στους κόμβους. Με αυτόν τον τρόπο ένα ανομοιογενές συνεχές μέσο μπορεί να μετατραπεί σε διακριτό μέσο αποτελούμενο από μικρότερα στοιχεία με διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες το καθένα, τα οποία αλληλεπιδρούν μέσω των κοινών κόμβων. Η μέθοδος εξασφαλίζει τη συνολική ισορροπία του κάθε στοιχείου καθώς και την ισορροπία των δράσεων στους κόμβους. Για την περιγραφή της συμπεριφοράς των στοιχείων που προκύπτουν από την διακριτοποίηση του συνεχούς μέσου, χρησιμοποιούνται μαθηματικά προσομοιώματα που βασίζονται σε διάφορες θεωρίες.

Στην συνέχεια στα όρια του μοντέλου καθορίστηκαν οι επικρατούσες συνθήκες, οι επιτρεπόμενες κινήσεις. Έτσι οι συνοριακές συνθήκες στο κάτω όριο ορίζονται στο πρόγραμμα ως άρθρωση, δηλαδή απαγόρευση της κατακόρυφης αλλά και οριζόντιας κίνησης (άκαμπτο) και στα πλάγια/κατακόρυφα όρια ορίστηκε κύλιση όπου απαγορεύεται η οριζόντια κίνηση.



Σχήμα 6.3.1 : Μοντέλο της περιοχής έρευνας στην Τομή Α-Α', όπου απεικονίζονται οι γεωτεχνικές ενότητες (μαζί και τα ρήγματα), ο κάναβος πεπερασμένων στοιχείων και οι οριακές συνθήκες σε στάδιο πριν την εκσκαφή (ανάγλυφο)

Κατά τη προσομοίωση της εκσκαφής πραγματοποιήθηκε και προσομοίωση της πτώσης στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα σε τέσσερα στάδια εκσκαφής. Εφόσον στο μοντέλο ενσωματώθηκε ο υδροφόρος ορίζοντας ήταν αναγκαίο να οριστούν οριακές συνθήκες για την κίνηση του υπόγειου νερού. Σύμφωνα με την καταγραφή της γεώτρησης MA8 η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα κοντά στη εκσκαφή είναι περίπου 80m, συνεπώς στην αριστερή και δεξιά μεριά του μοντέλου ορίζεται στάθμη υδροφόρου ορίζοντα 80m, ενώ το πάνω όριο του μοντέλου ορίζεται ως άγνωστο (όπου $P=0, Q=0$). Όπως προαναφέρθηκε η προσομοίωση έγινε για κάθε βήμα εκσκαφής, συνεπώς το πάνω όριο του μοντέλου σε κάθε βήμα αλλάζει και παράλληλα αλλάζει η επιφάνεια που χαρακτηρίζεται ως άγνωστη ($P=0, Q=0$). Τέλος το κάτω όριο του μοντέλου χαρακτηρίζεται με το υδραυλικό όριο που δεν επιτρέπει καμία ροή.



Σχήμα 6.3.2 : Εικόνα από το λογισμικό Phase. Απεικόνιση συνοριακών υδραυλικών συνθηκών στο στάδιο πριν την εκσκαφή, ανάγλυφο

Γεωτεχνική ανάλυση του μοντέλου

Για την μελέτη των μετακινήσεων στην περιοχή ανάντη της εκσκαφής στη Μαυροπηγή και τον συσχετισμό της εκσκαφής με την ανάπτυξη ρωγμών στην περιοχή του οικισμού καθίσταται απαραίτητος ο διαχωρισμός των υλικών, που συμμετέχουν στις αναλύσεις, σε γεωτεχνικές ενότητες.

Οι ανώτεροι σχηματισμοί στην περιοχή μελέτης, που αποτελούνται κυρίως από κροκαλοπαγή και κορήματα, χαρακτηρίζονται ως η ενότητα των τεταρτογενών και αποδίδονται σχετικά χαμηλά γεωτεχνικά χαρακτηριστικά. Τα τεταρτογενή λαμβάνουν μέρος στις αναλύσεις εφόσον καλύπτουν όλη την περιοχή έρευνας, όμως δεν θα γίνει διερεύνηση των τάσεων – παραμορφώσεων μέσα σε αυτά.

Οι νεογενείς σχηματισμοί της περιοχής, των οποίων η συμπεριφορά θα αναλυθεί στην παρούσα εργασία καθώς μέσα σε αυτούς αναπτύσσονται και οι μετακινήσεις, χωρίζονται σε τρεις επιμέρους γεωτεχνικές ενότητες την υγιή μάργα (neogenh stiff), την αποτονωμένη μάργα (neogenh medium stiff) και την αποσαθρωμένη μάργα (neogenh weak).

- Οι υγιείς μάργες τοποθετούνται πίσω από την εκσκαφή σε απόσταση 400m και εκτείνονται μέχρι τους ασβεστόλιθους στο ΔΝΔ μέρος του οικισμό ενώ η εκσκαφή τους συναντά στο τέταρτο και τελευταίο στάδιο της. Τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά λαμβάνονται υπόψη αρκετά υψηλά, καθώς μέσα σε αυτούς τους σχηματισμούς άρχισε η διάνοιξη του ορυχείου με πολύ μεγάλες κλίσεις (70°) και μεγάλο βάθος. Παρόλα αυτά τα πρηνή στο μέτωπο της εκσκαφής παρουσίασαν ευστάθεια. Συνεπώς οι γεωτεχνική ενότητα των υγιών μαργών συνίσταται από νεογενείς εδαφικούς σχηματισμούς που χαρακτηρίζονται από υψηλά γεωτεχνικά χαρακτηριστικά και μεγάλο μέτρο ελαστικότητας.
- Η απομονωμένη μάργα τοποθετείται δίπλα στην υγιή μάργα, μετά τη ζώνη του ρήγματος, και στην ουσία αποτελεί μια συνέχειά της· τοποθετείται 400m από την εκσκαφή και φτάνει 200 m πριν το μέτωπο. Πρόκειται για τον ίδιο εδαφικό σχηματισμό με την υγιή μάργα με την διαφορά ότι έχει υποστεί τις δυνάμεις αποτόνωσης της κοντινής εκσκαφής. Επομένως οι τιμές γεωτεχνικών χαρακτηριστικών που δίνονται σε αυτή την ενότητα είναι ίδιες με τις υγιείς

μάργες, όμως το μέτρο ελαστικότητας μειώνεται και πέφτει στο $1/3$ τις αρχικής τιμής

- Η αποσαθρωμένη μάργα τοποθετείται από το μέτωπο της εκσκαφής ως τη θέση της αποτονωμένης μάργα (200m πίσω). Πρόκειται επίσης για τα ίδια εδαφικά υλικά με την διαφορά ότι οι τάσεις αποσυμπίεσης έχουν δράσει πολύ έντονα σε αυτά τα εδαφικά υλικά, που είναι τόσο κοντά στην εκσκαφή, ώστε τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά να έχουν μειωθεί πάρα πολύ καθιστώντας τα επικίνδυνα για αστοχία.
- Επόμενη γεωτεχνική ενότητα , η οποία επίσης δεν λαμβάνει μέρος στο αποτέλεσμα των αναλύσεων, είναι ο ασβεστόλιθος, ο οποίος παρουσιάζει πολύ υψηλά γεωτεχνικά χαρακτηριστικά.
- Τέλος οι ζώνες ρηγμάτων οι οποίες περάστηκαν σαν γραμμικά στοιχεία κατά τη δημιουργία του μοντέλου, καταχωρήθηκαν με τα απομειωμένα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του σχηματισμού στον οποίον αναπτύσσονται. Στην προκειμένη περίπτωση τοποθετούνται μέσα στην υγιή μάργα και χαρακτηρίζονται με το $1/4$ της συνοχής της και λιγότερο από το $1/2$ της γωνίας εσωτερικής τριβής.

Είναι σαφές ότι οι επιφάνειες ασυνέχειας που χαρακτηρίζουν τα νεογενή υλικά στην περιοχή της εκσκαφής δυσχεράνουν πιο πολύ τη γεωτεχνική συμπεριφορά των εδαφών αυτών, καθώς κινούμαστε από την υγιή προς την αποσαθρωμένη μάργα. Οι νεογενείς σχηματισμοί όπως περιγράφηκαν παραπάνω τοποθετήθηκαν και στο μοντέλο

Σε αυτό το σημείο να αναφέρουμε ότι η γεωλογία της περιοχής μέσω των γεωτεχνικών ενοτήτων απλουστεύτηκε για να μπορέσει να εφαρμοστεί στο μοντέλο, καθώς στην περιοχή έρευνας τα νεογενή αποτελούνται από εναλλαγές λιγνιτικών οριζόντων και μαργών που εδώ ονομάζουμε απλά μάργες.

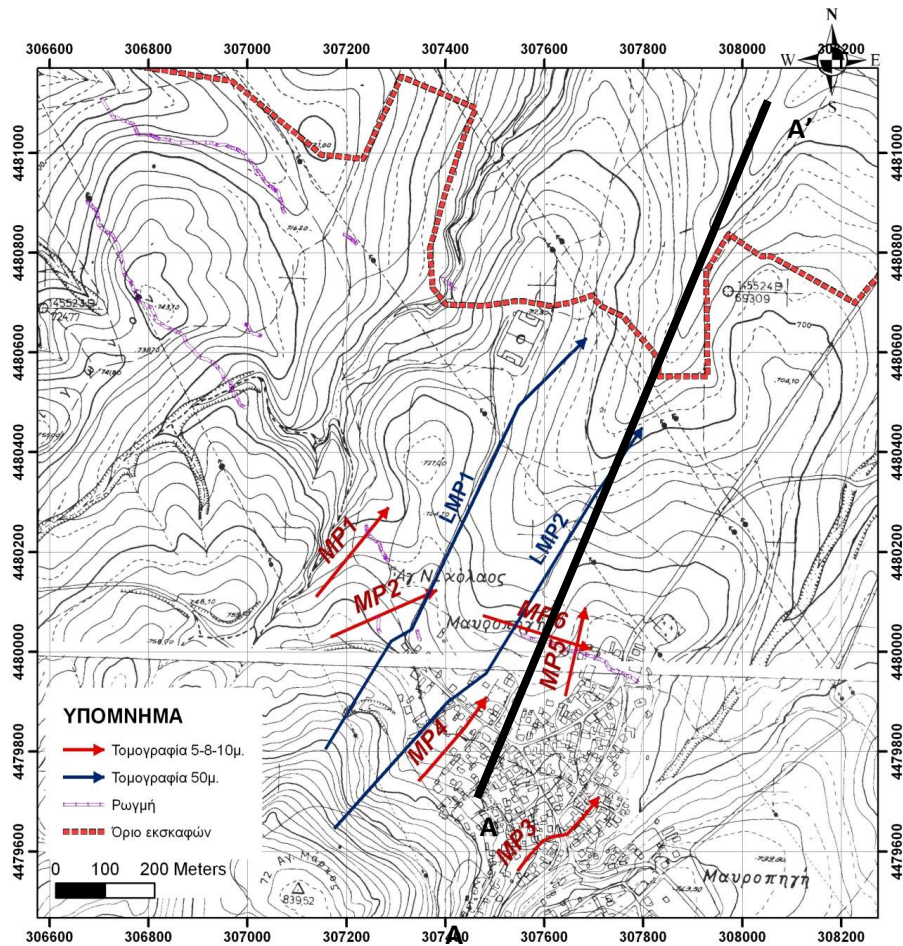
Οι γεωτεχνικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στην διαδικασία της ανάλυσης παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα.(Πίνακας 6.3.1)

Πίνακας 6.3.1: Γεωτεχνικές ιδιότητες που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Phase

	E (MPa)	ϕ	c(MPa)	γ (MN/m ³)
Ασβεστόλιθος	3700	34	1.7	0.025
Υγιής μάργα	1000	34	0.15	0.023
Αποσαθρωμένη μάργα	350	24	0.06	0.022
Αποτονωμένη μάργα	350	34	0.15	0.023
Τεταρτογενή	100	25	0.1	0.018
Ρήγμα		18	0.05	

Πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων PHASE αναλύσεις

Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για την τομή A-A' (σχήμα 6.2.1) στην ευθεία της οποίας η εκσκαφή απέχει περίπου 900 μέτρα από τον οικισμό, καθώς επίσης και από τη ρωγμή που διαπιστώθηκε κοντά στον οικισμό. Η τομή A-A' για την οποία έγιναν οι αναλύσεις ξεκινά από τον ασβεστόλιθο (στο άκαμπτο όριο και περιλαμβάνει το τεκτονικό ρήμα στο όριο του ασβεστολίθου με τους εδαφικούς σχηματισμούς σε απόσταση 1100 μέτρα από το μέτωπο της εκσκαφής. Επίσης κατά μήκος της τομής απεικονίζονται δύο ρήγματα μέσα στο σώμα της μάργας σε απόσταση 400 μέτρα και 770 μέτρα αντίστοιχα, τα οποία συνδέονται με τις ρωγμές που παρουσιάστηκαν ανάμεσα λιγνιτωρυχείο και τον οικισμό.



Σχήμα 6.3.3 : Τοπογραφικός χάρτης όπου απεικονίζεται η τομή A-A' (Ερευνητική ομάδα ΑΠΘ, 2011)

Οι αναλύσεις της εκσκαφής στον οικισμό της Μαυροπηγής με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων είχαν ως αποτέλεσμα πληροφορίες για τις τασικές μεταβολές και την μετακίνηση των εδαφικών σχηματισμών γύρω από την εκσκαφή. Τα αποτελέσματα της επίλυσης παρουσιάζονται για την τομή A-A' σε μοντέλο με χρωματική διαβάθμιση, όπου απεικονίζεται η κατανομή των τάσεων και των οριζόντιων μετακινήσεων. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα δεδομένα μετακινήσεων από τα κλισιόμετρα, τις γεωφυσικές έρευνες καθώς επίσης και με την εμφάνιση του φαινομένου στην επιφάνεια του έδαφος.

Στα επιμέρους στοιχεία του καννάβου προσδιορίζονται τα μεγέθη των τάσεων, η εκσκαφή προσομοιώνεται με απομάκρυνση των στοιχείων πάνω από το όρια εκσκαφής και οι προκαλούμενες τασικές μεταβολές εφαρμόζονται στο όριο που αποκαλύπτεται. Οι τασικές μεταβολές οδηγούν σε μετακινήσεις και επιφέρουν διαφοροποίηση στο τασικό πεδίο του υπεδάφους. Η διαφοροποίηση συνεκτιμάται και συνυπολογίζεται για να προσδιοριστούν οι τελικές τάσεις και οι μετακινήσεις μετά την εξέλιξη της εκσκαφής.

Καθώς το μοντέλο καθορίστηκε να έχει τέσσερα στάδια εκσκαφής, οι αναλύσεις ακολούθησαν αυτή τη διαδικασία και προέκυψαν στοιχεία για την κινητικότητα των νεογενών σε κάθε βήμα της εκσκαφής.

Από το πρώτο στάδιο εκσκαφής υπάρχει εκδήλωση οριζόντιας μετατόπισης, με διεύθυνση προς το εσωτερικό της εκσκαφής, ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζονται και εφελκυστικές τάσεις στη θέση του ρήγματος με αποτέλεσμα την δημιουργία συμπιεστικών τάσεων ανάντη της εκσκαφής. Κατά την προσομοίωση της σταδιακής εκσκαφής του λιγνιτωρυχίου, παρατηρούνται οριζόντιες μετατοπίσεις που φτάνουν ως την περιοχή του οικισμού της Μαυροπηγής και παρουσιάζονται αυξανόμενες μετά από το ρήγμα που τοποθετείται κοντά στην εκσκαφή. Το μέγεθος οριζόντιας μετατόπισης στο μέτωπο της εκσκαφής είναι 2 m, προχωρώντας προς τα πίσω στη θέση του πρώτου ρήγματος (400m πίσω από το μέτωπο) το μέγεθος μετατόπισης είναι φτάνει τα 0.11 m. Μετά το τέταρτο στάδιο εκσκαφής η μέγιστη οριζόντια μετατόπιση είναι 2.23m. Από την ανάλυση του μοντέλου φαίνεται ότι η οριζόντια μετατόπιση των εδαφών κινείται προς το εσωτερικό της εκσκαφής, ενώ η απεικόνιση των τάσεων δηλώνει εφελκυστικές τάσεις στη θέση του ρήγματος και στο μέτωπο της εκσκαφής και κατά συνέπεια συμπιεστικές τάσεις μετά το ρήγμα και προς την εκσκαφή.

Το αποτέλεσμα της ανάλυσης δίνει ελάχιστο συντελεστή ασφαλείας , περίπου μονάδα (SRF=1.06) γεγονός που δηλώνει ότι δεν παρατηρείται αστοχία στα περιφερειακά πρανή της εκσκαφής.

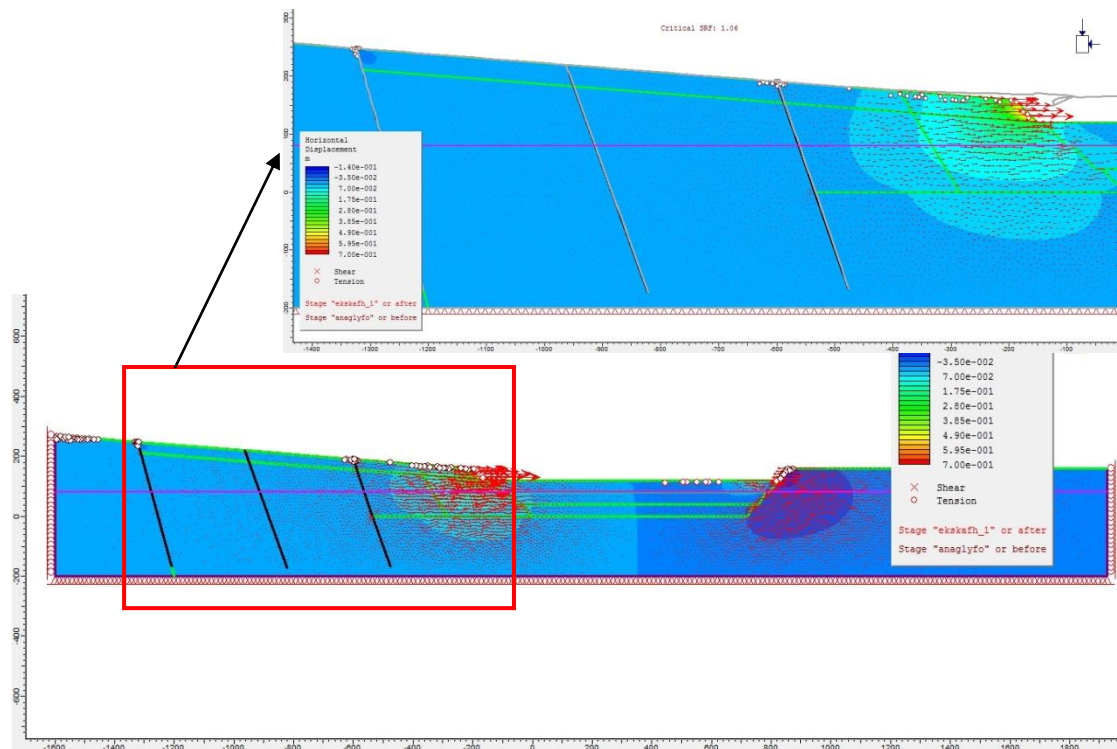
Ακολουθεί πίνακας όπου συγκεντρώνονται οι οριζόντιες μετατοπίσεις σε διάφορες αποστάσεις ανάντη του μετώπου εκσκαφής. Οι μετακινήσεις αναφέρονται στο τελευταίο στάδιο εκσκαφής και διαπιστώθηκε ότι καθώς μετακινούμαστε από το μέτωπο εκσκαφής προς τον οικισμό το μέγεθος της οριζόντιας μετατόπισης μειώνεται.

Πίνακας 6.3.2: συγκεντρωτικός πίνακας οριζόντιων μετατοπίσεων σε διάφορες αποστάσεις ανάντη του μετώπου εκσκαφής

Βήμα εκσκαφή	Απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής (m)					
	0 (m)	50 (m)	100 (m)	200 (m)	300 (m)	400 (m)
1 ^η εκσκαφή	0.55	0.20	0.16	0.05	0.03	0.02
2 ^η εκσκαφή	0.87	0.43	0.27	0.14	0.08	0.04
3 ^η εκσκαφή	1.13	0.63	0.42	0.23	0.12	0.07
4 ^η εκσκαφή	1.40	0.83	0.52	0.30	0.16	0.09
Μετά την 4 ^η εκσκαφή	2.0	1.17	0.73	0.37	0.2	0.11

Στη συνέχεια θα εξεταστεί η συμπεριφορά των εδαφικών πρυνών σε κάθε ένα από τα τέσσερα βήματα εκσκαφής και μετά το πέρας της, επίσης θα σχολιαστεί η συμπεριφορά των διαφορετικών εδαφικών ενότητων.

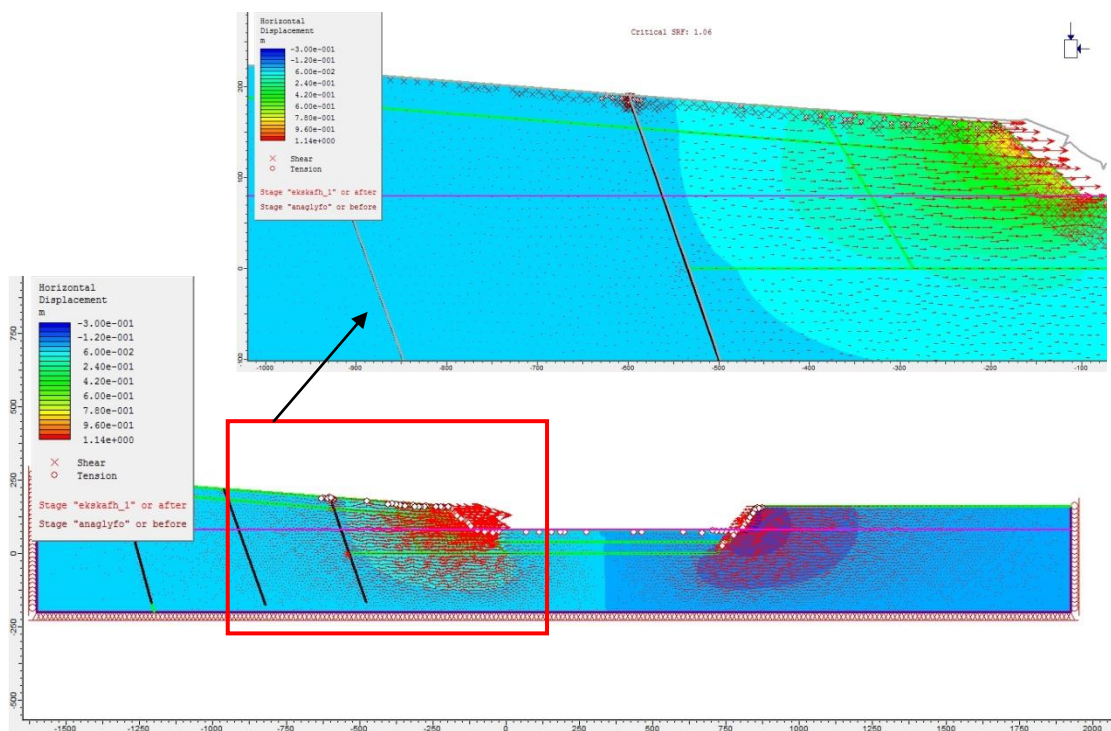
Από το **1^ο στάδιο** εκσκαφής παρουσιάζονται εφελκυστικές τάσεις στη θέση του ρήγματος με αποτέλεσμα τη δημιουργία συμπιεστικών τάσεων ανάντη της εκσκαφής. Κατά συνέπεια των εφελκυστικών τάσεων, παρατηρείται εκδήλωση οριζόντιας μετατόπισης με διεύθυνση προς το εσωτερικό της εκσκαφής με τιμές που φτάνουν στο μέτωπο της εκσκαφής τα 0.55m και στη θέση του ρήγματος φτάνουν μόλις το 0.03m. Οι μετατοπίσεις δεν έχουν ακόμα υψηλές τιμές, αλλά είναι εμφανές ότι κάθε γεωτεχνική ενότητα ανταποκρίνεται διαφορετικά στην εκσκαφή και παρουσιάζει διαφορετική τιμή οριζόντιας μετατόπισης. Η μικρότερη μετατόπιση αντιστοιχεί στην υγιή μάργα πίσω από τη θέση του ρήγματος (< 0.02), ενώ μέσα στην ενότητα της αποτονωμένης μάργας αυξάνεται με τάξη κάποιων χιλιοστών. Στην ενότητα της αποσαθρωμένης μάργας, η οποία έχει τα χαμηλότερα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά, εμφανίζονται οι μεγαλύτερες μετατοπίσεις για αυτό το στάδιο



Σχήμα 6.3.4: Εικόνα από Phase για την τομή A-A'. Αποτελέσματα αναλύσεων phase με χρωματική διαβάθμιση, για το 1^ο στάδιο εκσκαφής, απεικονίζονται οι οριζόντιες μετατοπίσεις, τα σημεία εφελκυσμού οι παραμορφώσεις και η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα

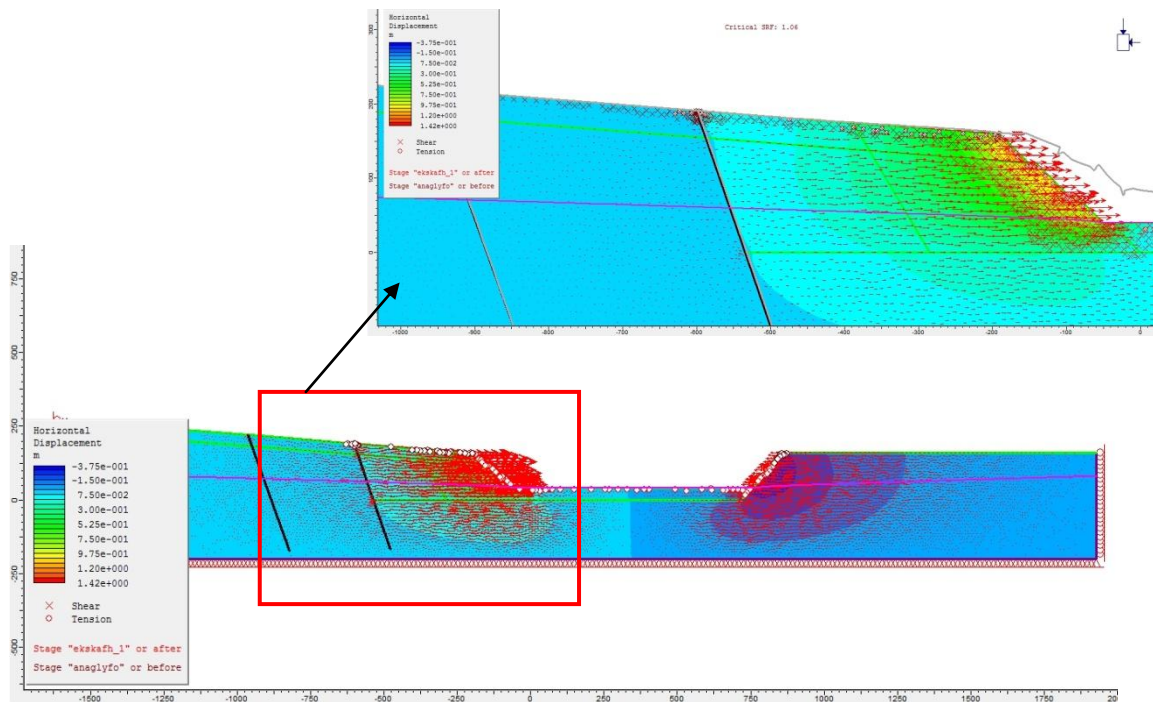
Προχωρώντας στα επόμενα στάδια της εκσκαφής οι μαργαϊκοί σχηματισμοί παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά με αυξανόμενο μέγεθος εφελκυστικών τάσεων και μετατοπίσεων.

Στο 2^ο στάδιο της εκσκαφής η συμπεριφορά των τεχνικογεωλογικών ενοτήτων εξελίσσεται παρόμοια με το 1^ο στάδιο, με τις μετακινήσεις να αυξάνονται για όλους τους σχηματισμούς. Τις μεγαλύτερες μετατοπίσεις παρουσιάζει και πάλι η αποσαθρωμένη μάργα με μέγεθος 0.16 εως 0.80m ενώ στη συνέχεια μειώνονται καθώς περνάμε στην αποτονωμένη. Η τιμή των μετατοπίσεων κυμαίνεται από 0.14m εως 0.05m στην θέση του ρήγματος, στη θέση αυτή αρχίζει να εκδηλώνεται και παραμόρφωση της επιφάνειας το ρήγματος. Τέλος στην υγιή μάργα έχουμε μετατοπίση της τάξης 0.04 με 0.03 m. Σε αυτή τη φάση της εκσκαφής το κάτω όριο της έχει φτάσει το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα στα 80m.



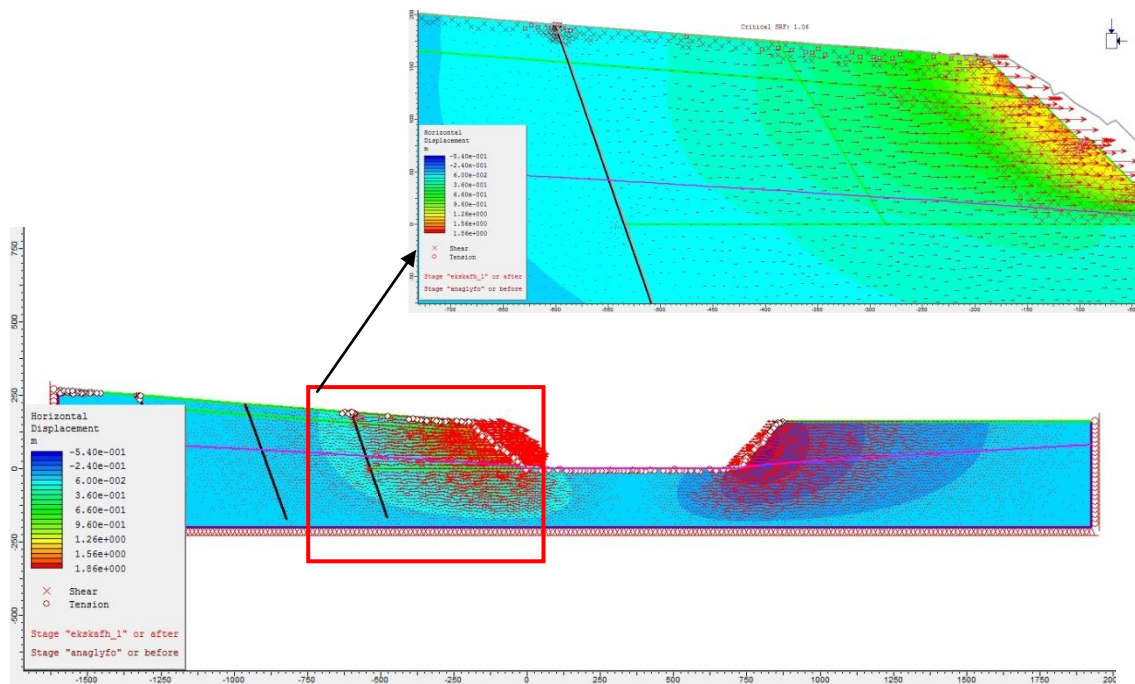
Σχήμα 6.3.5: Εικόνα από Phase για την τομή Α-Α'. Αποτελέσματα αναλύσεων Phase με χρωματική διαβάθμιση, για το 2^ο στάδιο εκσκαφής, απεικονίζονται οι οριζόντιες μετατοπίσεις, τα σημεία εφελκυσμού και συμπίεσης, οι παραμορφώσεις και η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα

Κατά το **3^ο στάδιο** της εκσκαφής παρατηρείται πτώση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα στα 50m με την αρχή της δημιουργίας κώνου πτώσης στάθμης. Οι εφελκυστικές τάσεις κατανέμονται στη θέση του ρήγματος, στο όριο της υγιούς μάργας, δημιουργώντας ζώνες συμπίεσης πίσω από το μέτωπο στις ενότητες της μάργας που παρουσιάζουν απομειωμένα χαρακτηριστικά, δημιουργώντας συνθήκες επικίνδυνες για την εκδήλωση κατολισθήσεων. Οι μετατοπίσεις των εδαφικών σχηματισμών συνεχίζουν να αυξάνονται καθώς επίσης και η παραμόρφωση της επιφάνειας του ρήγματος. Οι τιμές των μετατοπίσεων έχουν αυξηθεί μετά τη ζώνη του ρήγματος, στην ενότητα της αποσαθρωμένης μάργα βρίσκονται στο εύρος 1,13-0.23m, στην αποτονωμένη μάργα 0.23-0.07m και στην υγιή μάργα <0.07m.



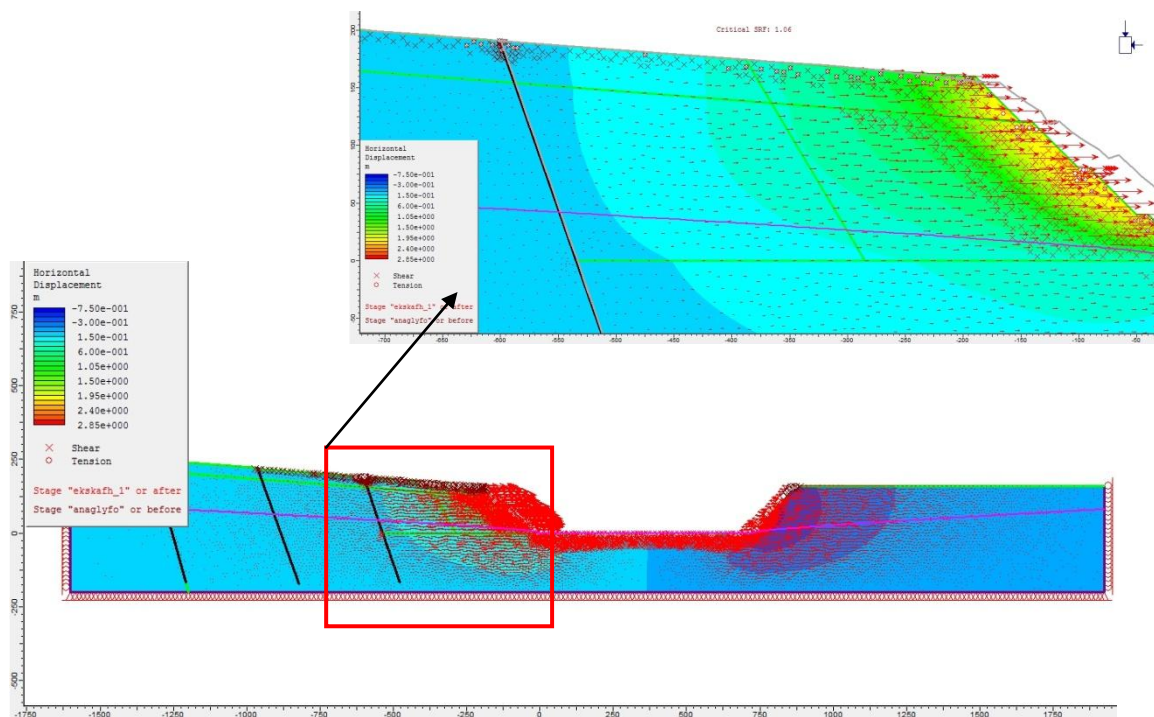
Σχήμα 6.3.6 : Εικόνα από Phase για την τομή A-A' .Αποτελέσματα αναλύσεων Phase με χρωματική διαβάθμιση, για το 3^ο στάδιο εκσκαφής, απεικονίζονται οι οριζόντιες μετατοπίσεις, τα σημεία εφελκυσμού και συμπίεσης, οι παραμορφώσεις και η στάθμη του υδροφόρου οριζόντα

Στο **4^ο και τελευταίο στάδιο** της εκσκαφής οι οριζόντιες μετατοπίσεις έχουν φτάσει στις τιμές 1.40-0.30m για την αποσαθρωμένη μάργα η οποία και πάλι παρουσιάζει τις μεγαλύτερες τιμές, μειώνονται στις τιμές 0.30-0.10m για την αποτονωμένη μάργα και στην υγιή μάργα συνεχίζονται με τιμές μικρότερες των 0.10m. Η γενική κίνηση του πρανούς προς το εσωτερικό της εκσκαφής έχει αυξηθεί σημαντικά σε αυτό το στάδιο εκσκαφής. Η παραμόρφωση αυξάνεται μετά την ζώνη του ρήγματος μέσα στους νεογενείς σχηματισμούς, κάτι που φαίνεται από την παραμόρφωση της επιφάνειας του ρήγματος . Οι εφελκυστικές τάσεις συνεχίζουν να αναπτύσσονται στην θέση του ρήγματος δημιουργώντας συμπιεστικές τάσεις προς το μέτωπο της εκσκαφής. Η στάθμη του υδροφόρου σε αυτό το στάδιο έχει φτάσει στο δάπεδο της εκσκαφής δημιουργώντας έναν κώνο πτώσης.



Σχήμα 6.3.7: : Εικόνα από Phase για την τομή A-A'. Αποτελέσματα αναλύσεων Phase με χρωματική διαβάθμιση, για το 4^ο στάδιο εκσκαφής, απεικονίζονται οι οριζόντιες μετατοπίσεις, τα σημεία εφελκυσμού και συμπίεσης, οι παραμορφώσεις και η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα

Στο στάδιο της ανάλυσης μετά το 4^ο βήμα της εκσκαφής που αντιστοιχεί σε **SRF= 1** οι εξεταζόμενες παράμετροι εμφανίζονται αυξημένες. Οι μετατοπίσεις αυξάνονται σημαντικά μετά τη ζώνη του ρήγματος προς το μέτωπο, παρουσιάζουν τιμές 0.11m στη θέση του ρήγματος, αυξάνονται έως 0.30m στην αποτονωμένη μάργα και έως 1.0m στην αποτονωμένη μάργα. Οι εφελκυστικές τάσεις συγκεντρώνονται στη περιοχή του ρήγματος οδηγώντας σε μετακινήσεις και παραμορφώσεις προς το εσωτερικό της εκσκαφής καθώς και σε φαινόμενα συμπίεσης

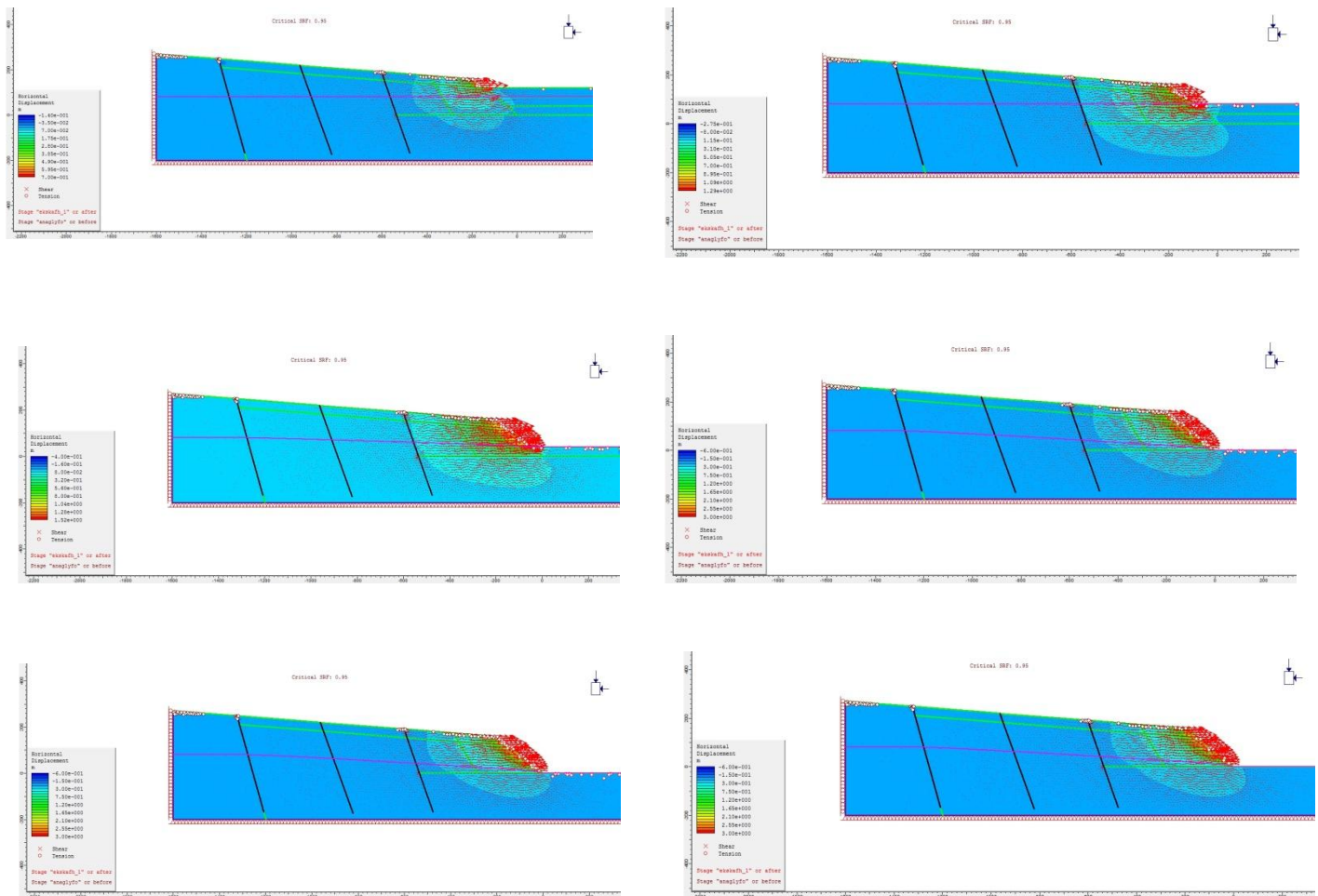


Σχήμα 6.3.8: : Εικόνα από Phase για την τομή A-A'. Αποτελέσματα αναλύσεων Phase με χρωματική διαβάθμιση, για το στάδιο ανάλυσης όπου $SRF=1$, απεικονίζονται οι οριζόντιες μετατοπίσεις, τα σημεία εφελκυσμού και συμπίεσης, οι παραμορφώσεις και η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα

Η προσομοίωση του γεωλογικού μοντέλου αποδίδει της αναμενόμενες μετακινήσεις εδαφών, λαμβάνοντας υπόψη τις εφελκυστικές ρωγμές που εμφανίζονται στο χώρο μεταξύ του οικισμού και της εκσκαφής, σύμφωνα και με τα δεδομένα των γεωφυσικών ερευνών και τα δεδομένα των κλισιομέτρων. Το μοντέλο συμφωνεί με τη παρουσία τάσεων εφελκυσμού πίσω από την εκσκαφή και τη παρουσία τάσεων συμπίεσης στο μέτωπο της εκσκαφής. Κατά την ανάλυση δεν προέκυψε αστοχία των πρανών εκσκαφής καθώς ο συντελεστής ασφαλείας υπολογίστηκε $SRF=1,06$.

Ανακεφαλαιώνοντας ως προς τη κινητική συμπεριφορά του πρανούς διαπιστώνουμε ότι ενώ οι γεωτεχνικές ιδιότητες των νεογενών εκτιμώνται γενικά πολύ υψηλές, αν σκεφτούμε την διάνοιξη των πρανών σε μεγάλες κλίσειν και μεγάλα βάθη και την ευστάθεια που έχουν επιδείξει, παρατηρείται μία κινητικότητα του πρανούς μετά την θέση του ρήγματος. Η μικρότερη παραμόρφωση που επιδεικνύουν τα νεογενή πίσω από τη ζώνη του ρήγματος (υγιής μάργα) οφείλεται στις αυξημένες γεωτεχνικές παραμέτρους και στο υψηλό μέτρο ελαστικότητας του σχηματισμού. Εφόσον οι μεγαλύτερες παραμορφώσεις παρατηρούνται από τη θέση του ρήγματος προς την εκσκαφή αναπτύσσονται μέσα στα νεογενή πλησίον της εκσκαφής (αποτονωμένη

μάργα, αποσαθρωμένη μάργα) που παρουσιάζουν μικρότερο μέτρο ελαστικότητας άρα και μεγαλύτερη επιρρέπεια προς την παραμόρφωση. Από την κατανομή των παραμορφώσεων επιβεβαιώνεται η θεωρία της πολυεπίπεδης ολίσθησης σε εκσκαφές μεγάλου βάθους που αναπτύσσονται σε νεογενή, καθώς οι παραμορφώσεις σχεδόν οριοθετούνται από το ρήγμα και τους νεογενείς σχηματισμούς με μειωμένα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά δημιουργώντας μία νοητή πολυεπίπεδη επιφάνεια αστοχίας. Η τοποθέτηση των εφελκυστικών τάσεων συνδέεται με την διαφοροποίηση των χαρακτηριστικών των μαργαϊκών σχηματισμών, καθώς το σημείο που τοποθετείται ο εφελκυσμός συνδέεται με το εύρος επιρροής της αποτόνωσης των τάσεων από την εκσκαφή του μέτωπο. Τα σημεία εφελκυσμού στη προσομοίωση της εκσκαφής λοιπόν τοποθετούνται στα όρια των νεογενών σχηματισμών (θέση ρήγματος), που δεν έχουν επηρεαστεί από την αποτόνωση των τάσεων, και τα μηχανικά τους χαρακτηριστικά και ο συντελεστής ελαστικότητας είναι σε υψηλές τιμές, με τα όρια των νεογενών σχηματισμών που έχουν υποστεί την επίδραση των τάσεων της εκσκαφής και έχουν μειωθεί τα χαρακτηριστικά τους όπως έχει μειωθεί και το μέτρο ελαστικότητας. Συνεπώς η κατανομή των τάσεων και επομένως των οριζόντιων μετατοπίσεων μεταβάλλεται για διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας μέσα στα νεογενή. Η αποτονωμένη μάργα αν και διατηρεί την συνοχή και τη γωνία τριβής της υγιούς μάργας έχει απομειωμένη τιμή για το μέτρο ελαστικότητας με αποτέλεσμα να έχει αυξημένες παραμορφώσεις και μετατοπίσεις. Ομοίως και η αποσαθρωμένη μάργα παρουσιάζει απομειωμένο μέτρο ελαστικότητας, αλλά και μειωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά, που την καθιστούν επιρρεπή τόσο σε μεγαλύτερες παραμορφώσεις όσο και σε πιθανές αστοχίες στο μέτωπο της εκσκαφής. Λόγω της παρουσίας εφελκυσμού στη θέση του ρήγματος μέσα στους σχηματισμούς με μειωμένο μέτρο ελαστικότητας και κυρίως στο μέτωπο της εκσκαφής αναπτύσσονται ζώνες συμπίεσης. Οι τιμές της παραμόρφωσης επίσης συμφωνούν με την τοποθέτηση των εφελκυστικών και συμπίεστικών τάσεων. Δεξιά από τη ζώνη του ρήγματος η παραμόρφωση εμφανίζεται πιο μικρή από ότι αριστερά του (παραμόρφωση πάνω στη ζώνη του ρήγματος προς την εκσκαφή) με αποτέλεσμα την διαφορά οριζόντιας μετατόπισης μέσα στους νεογενείς σχηματισμούς και τη δημιουργία εφελκυσμών στη θέση του ρήγματος και συμπίεσεων στο πίσω από το μέτωπο.



Σχήμα 6.3.9: Εικόνες αναλύσεων από τη 1^η εκσκαφή έως και μετά από την 4^η. Απεικονίζεται η πτώση στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα, οι οριζόντιες μετατοπίσεις και οι εφελκυστικές τάσεις.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η έρευνα της τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς των μαργαϊκών σχηματισμών και του μηχανισμού ολίσθησης και μετακίνησης των πρानών σε περιβάλλον μεγάλων εκσκαφών.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την πραγματοποίηση της παρούσας εργασίας χωρίζεται σε δύο μέρη. Αρχικά έγινε βιβλιογραφική αναζήτηση και ορίστηκε το θεωρητικό υπόβαθρο, στο οποίο βασίστηκε η εργασία, ενώ στην συνέχεια ακολούθησε το πρακτικό μέρος στο οποίο πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις ευστάθειας για την περιοχή έρευνας.

Από τη διαδικασία της βιβλιογραφικής αναζήτησης συλλέχθηκαν πληροφορίες που αφορούν:

- την εξέταση των μαργαϊκών σχηματισμών ως προς τη γεωλογία, δηλαδή τη δομή τους, τους λιθολογικούς τύπους και την τεκτονική
- την εξέταση της τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς ως προς τις ασυνέχειες που αναπτύσσουν και τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους
- τη συμπεριφορά των εδαφικών πρानών γύρω από μια μεγάλη εκσκαφή και την κατανομή των τάσεων σε αυτά
- τους μηχανισμούς αστοχίας που αναπτύσσονται σε περιπτώσεις μεγάλων εκσκαφών, οι οποίες πραγματοποιούνται σε περιβάλλον μάργας
- τον γεωμετρικό ορισμό μιας μεγάλης εκσκαφής

Οι παραπάνω πληροφορίες συλλέχθηκαν από προϋπάρχουσες έρευνες που έχουν γίνει σε μαργαϊκούς σχηματισμούς στον ελληνικό χώρο και από μελέτες που πραγματοποιήθηκαν σε εκσκαφές λιγνιτωρυχείων στην λεκάνη της Πτολεμαΐδας.

Με τις πληροφορίες αυτές πρόέκυψαν διαπιστώσεις που οδήγησαν στην δημιουργία ενός μοντέλου για την περιοχή ειδικότερης έρευνας. Με το μοντέλο αυτό κατέστη δυνατή η διερεύνηση της τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς των μαργαϊκών σχηματισμών και του μηχανισμού ολίσθησης και μετακίνησης των πρानών γύρω από την εκσκαφή. Για τη δημιουργία του μοντέλου έγινε:

- Καθορισμός γεωλογικού μοντέλου (γεωλογίας και τεκτονικής)

- Αξιολόγηση μετρήσεων και παρατηρήσεων πεδίου
- Καθορισμός των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών χαρακτηριστικών
- Καθορισμός της γεωμετρίας των μεγάλων εκσκαφών
- Καθορισμός του μοντέλου κίνησης των πρανών.

Στο πρακτικό μέρος της εργασίας τα στοιχεία που συλλέχθηκαν χρησιμοποιήθηκαν και το μοντέλο που δημιουργήθηκε εφαρμόστηκε σε λογισμικά ανάλυσης ευστάθειας, για την προσομοίωση της εκσκαφής, με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και την μέθοδο οριακής ισορροπίας.

Κατά τη διερεύνηση των μηχανικών χαρακτηριστικών και της συμπεριφοράς των μαργών διαπιστώθηκε ότι ο σχηματισμός της μάργας έχει τις ακόλουθες ιδιαιτερότητες και χαρακτηριστικά:

1. Λόγω της διαδικασίας της ιζηματογένεσης σχηματίζονται επιφάνειες στρώσης, οι οποίες συνιστούν επιφάνειες αδυναμίας και εν δυνάμει μπορεί να εξελιχτούν σε επιφάνειες ολίσθησης. Επίσης, λόγω της ιζηματογένεσης και πάλι, οι μαργαϊκοί σχηματισμοί παρουσιάζουν ποικιλία λιθολογικών τύπων ανάλογα με την περιεκτικότητα σε ανθρακικό ασβέστιο και αργιλικό κλάσμα, όπου η αυξημένη περιεκτικότητα σε ανθρακικό υλικό προσδίδει μεγαλύτερη διατμητική αντοχή εξαιτίας των δεσμών που αναπτύσσονται στη δομή του υλικού.
2. Συνήθως παρουσιάζονται ρηγματωμένοι, λόγω τεκτονικής καταπόνησης, με χαμηλή παραμένουσα διατμητική αντοχή, ενώ εκδηλώνουν επικινδυνότητα ως προς την προοδευτική αστοχία, κατά μήκος επιφανειών ασυνέχειας. Επίσης οι μαργαϊκοί σχηματισμοί συχνά εμφανίζονται αποσαθρωμένοι λόγω αλλαγής του μεγέθους φόρτισης, κατά τη διαδικασία της διαγένεσης ή λόγω της παρουσίας και της κυκλοφορίας νερού. Στην περίπτωση που η μάργα είναι αποσαθρωμένη αυξάνεται η επικινδυνότητα για την εκδήλωση κατολισθήσεων.
3. Οι μηχανικές ιδιότητες των μαργών ελέγχονται από την στρωσιγένεια, το δίκτυο διαρρήξεων, την δράση του νερού, τη σύστασή τους, την ιστορία της φόρτισης και τον βαθμό αποσάθρωσης που έχουν υποστεί.

Κάνοντας μία ανασκόπηση σε μαργαϊκούς σχηματισμούς του ελληνικού χώρου διαπιστώθηκε πως οι παράγοντες που προαναφέραμε ελέγχουν όντως τη συμπεριφορά των μαργών, με αποτέλεσμα την αλλαγή στη μηχανική συμπεριφορά τους. Ακραία παραδείγματα είναι αυτά της ασβεστούχου μάργας Κορίνθου, η οποία εμφανίζεται με πολύ υψηλά μηχανικά χαρακτηριστικά και άριστη συμπεριφορά, και των αργιλικών μαργών της Αχαΐας και του Ηρακλείου με χαμηλά μηχανικά χαρακτηριστικά

Εφόσον η εργασία αναφέρεται σε μεγάλες εκσκαφές, κατέστη αναγκαίος ο διαχωρισμός ως προς την έννοια των μεγάλων εκσκαφών και των χαρακτηριστικών τους, έτσι αναλύθηκαν εκσκαφές που αναπτύσσονται σε μεγάλα βάθη (160m) και μήκη. Τέτοιου είδους εκσκαφές χαρακτηρίζονται από μεγάλη αποτόνωση τάσεων και την έντονη ανακατανομή τους, η οποία σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά των εδαφών έχει ως αποτέλεσμα την παραμόρφωση, την μετατόπιση, ενώ αν οι τάσεις που ενεργούν στο πρηνές ξεπεράσουν την αντοχή του υλικού, τότε υπάρχει το αποτέλεσμα της αστοχίας. Οι μετατοπίσεις που αναπτύσσονται στα εδαφικά πρηνή των μεγάλων εκσκαφών ελέγχονται από την αρχική κατανομή τάσεων και την μεταβολή τους, από τις γεωλογικές συνθήκες, από τις τεχνικογεωλογικές συνθήκες, την επίδραση του νερού, την γεωμετρία της εκσκαφής και τις φυσικές ή τεχνητές δονήσεις. Οι πιθανές περιπτώσεις αστοχιών σε τέτοιου είδους εκσκαφές είναι κυρίως η περιστροφική ολίσθηση εντός εδαφικών υλικών με μικρή συνοχή, αλλά και η προοδευτική αστοχία κατά μήκος επιφανειών ασυνέχειας (προδιαγεγραμμένες επιφάνειες αστοχίας) σχηματίζοντας μια πολυεπίπεδη επιφάνεια ολίσθησης.

Κατά τη διαδικασία έρευνας της τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς των μαργαϊκών σχηματισμών σε περιοχές μεγάλων εκσκαφών εξετάστηκαν περιοχές λιγνιτωρυχείων, που αναπτύσσονται στην λεκάνη της Πτολεμαΐδας, προς συλλογή γεωλογικών και τεχνικογεωλογικών πληροφοριών για το σχηματισμό της μάργας. Από αυτές τις περιπτώσεις εκσκαφών πραγματοποιήθηκε συλλογή πληροφοριών που αφορούν:

- τις γεωλογικές συνθήκες της περιοχής, η οποία χαρακτηρίζεται από την παρουσία μαργαϊκών σχηματισμών, με εναλλαγές λιθολογικών τύπων, που έχουν υποστεί τεκτονική καταπόνηση και επομένως παρατηρείται ανάπτυξη κανονικών ρηγμάτων, μέσα σε αυτούς.

- τις τεχνικογεωλογικές συνθήκες της περιοχής, που αφορούν τα μηχανικά χαρακτηριστικά των μαργαϊκών σχηματισμών και τις επιφάνειες ολίσθησης που αναπτύσσονται κατά μήκος των στρώσεων τους.
- την γεωμετρία των εκσκαφών, η οποία εμφανίζεται με πρηνή μεγάλου βάθους (160m) και μήκους και με αρκετά μεγάλες κλίσεις.
- τη γεωμετρία των σχηματισμών και των επιφανειών ασυνέχειας, οι οποίες έχουν παραοριζόντια ανάπτυξη με μικρές κλίσεις ($\sim 5^{\circ}$ - 7°)
- τις γεωτεχνικές ενότητες στις οποίες διαχωρίζεται η μάργα καθώς εμφανίζεται υγιής, με μεγάλα μηχανικά χαρακτηριστικά σε μεγαλύτερα βάθη, και αποσαθρωμένη, με μειωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά σε μικρότερα βάθη. Οι δύο αυτές ενότητες συνήθως χωρίζονται από επιφάνεια ασυνέχειας με σχεδόν μηδενικά χαρακτηριστικά και κατά μήκος αυτής πραγματοποιείται ολίσθηση.
- την παρουσία του νερού και την επίδραση του στην ευστάθεια των πρηνών της εκσκαφής, η οποία διαπιστώνεται πως αποτελεί έναν αρνητικό παράγοντα όσο αφορά στην διατήρηση της ισορροπίας
- την τεχνικογεωλογική συμπεριφορά των σχηματισμών, που ελέγχεται από την ανάπτυξη ασυνεχειών κατά μήκος των στρώσεων και από τα μηχανικά χαρακτηριστικά των άρρηκτων μαργών. Διαπιστώνεται ότι η τοποθέτηση των ρηγμάτων, σε σχέση με την κλίση των επιφανειών ασυνέχειας και την κλίση των πρηνών της εκσκαφής παίζει σημαντικό ρόλο στην ευστάθεια των εδαφικών πρηνών.
- τους μηχανισμούς αστοχίας που αφορούν είτε σε κυκλικές επιφάνειες ολίσθησης, που ανατάσσονται κυρίως με ρηχές επιφάνειες ολίσθησης εντός των τεταρτογενών, είτε σε πολυεπίπεδες επιφάνειες ολίσθησης που αναπτύσσονται κατά μήκος παραοριζόντιων επιφανειών ασυνέχειας (στρώση – επιφάνειες ολίσθησης) και ρηγμάτων
- την συσχέτιση της εκσκαφής με την παρουσία εφελκυστικών ρωγμών στην επιφάνεια του εδάφους και των παραμορφώσεων των εδαφικών σχηματισμών και την εκδήλωση αστοχιών στο μέτωπο των πρηνών

Η περιοχή της Μαυροπηγής είναι η ειδικότερη περιοχή έρευνας και τοποθετείται κοντά στην περιοχή εκσκαφής του γειτονικού λιγνιτωρυχείου, που αναπτύσσεται σε μαργαϊκούς σχηματισμούς στην λεκάνη της Πτολεμαΐδας. Η περιοχή ερευνάται λόγω

της εκδήλωσης εδαφικών διαρρήξεων στην επιφάνεια του εδάφους στη βορειοδυτική μεριά του οικισμού Μαυροπηγής και σε πολύ κοντινή απόσταση από το όριο του ορυχείου της Μαυροπηγής. Εξαιτίας αυτού του φαινομένου γίνεται έρευνα επί των μετακινήσεων των νεογενών σχηματισμών πάνω στους οποίους δομείται ο οικισμός της Μαυροπηγής.

Από το ερευνητικό έργο της ομάδας του ΑΠΘ, που εξέτασαν το φαινόμενο το 2011, προέκυψαν στοιχεία που βοήθησαν στην εξέταση του φαινομένου. Από το ερευνητικό αυτό έργο προσφέρονται στοιχεία:

- Χαρτογράφησης των επιφανειακών διαρρήξεων και τοποθέτησης αυτών με ακρίβεια στον χώρο πίσω από την εκσκαφή
- Κλισιομέτρων που υποδεικνύουν μια πιθανή επιφάνεια ολίσθησης να τοποθετείται σε βάθος 44m μέσα στους μαργαϊκούς σχηματισμούς.
- Γεωφυσικών μετρήσεων, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν ανάμεσα στον οικισμό και την εκσκαφή και διαπιστώνουν την παρουσία ρηγμάτων που τοποθετούνται σε σημεία, τα οποία ταυτίζονται με τις εδαφικές διαρρήξεις.
- Γεωτρήσεων, βάσει των οποίων πραγματοποιήθηκε υδρογεωλογική μελέτη, σύμφωνα με τα οποία ο υδροφόρος ορίζοντας τοποθετείται στα 80m κοντά την περιοχή της εκσκαφής.
- Σεισμολογικά στοιχεία, που δείχνουν ότι ο βαθμός της σεισμικής δραστηριότητας δεν μπορεί να έχει επηρεάσει την εκδήλωση των επιφανειακών διαρρήξεων
- Για τις τεχνικογεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες της περιοχής

Η ευστάθεια των πρανών και η διερεύνηση των μετακινήσεων, στην περιοχή της Μαυροπηγής, εξετάστηκε με μεθόδους ανάλυσης ευστάθειας. Η πρώτη ομάδα αναλύσεων έγινε με τη μέθοδο ανάλυσης της οριακή ισορροπίας με το λογισμικό slide v 5.0 της εταιρίας Rocscience σε διδιάστατο γεωλογικό προσομοίωμα για την περίπτωση δημιουργίας κυκλικών επιφανειών ολίσθησης. Για την ανάλυση όμως της κατανομής τάσεων και παραμορφώσεων, για την εξέταση των μετακινήσεων που αναπτύσσονται στο μαργαϊκούς σχηματισμούς, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Phase2 v 0.6 της εταιρίας Rocscience με διδιάστατο γεωλογικό προσομοίωμα.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την πραγματοποίηση των αναλύσεων είναι ο καθορισμός των τεχνικογεωλογικών ενοτήτων στις οποίες χωρίζονται τα γεωυλικά, ο καθορισμός των παραοριζόντιων επιφανειών ασυνέχειας και ρηγμάτων που εμφανίζονται μέσα στους μαργαϊκούς σχηματισμούς, καθώς επίσης ο καθορισμός των μηχανικών χαρακτηριστικών και της γεωμετρίας που τους αντιστοιχούν. Επίσης ορίστηκαν η γεωμετρία της εκσκαφής, η διαδικασία δημιουργίας της, με προσδιορισμό των βημάτων της, και οι οριακές συνθήκες που επικρατούν στα όρια του μοντέλου προσομοίωσης. Ο ρόλος του νερού εξετάστηκε είτε παραμετρικά ως πίεση πόρων, στην μέθοδο οριακής ισορροπίας, είτε ως παρουσία υδροφόρου ορίζοντα, στην περίπτωση ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για τις αναλύσεις συλλέχτηκαν από αξιολόγηση μετρήσεων, που προϋπήρχαν, και από παρατηρήσεις πεδίου.

Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευστάθειας με τη μέθοδο της οριακής ισορροπίας, μέσω του λογισμικού slide, διαπιστώθηκαν κυκλικές επιφάνειες ολίσθησης στο μέτωπο της εκσκαφής, οι οποίες τείνουν ταυτιστούν μεταξύ τους.

Εξετάζοντας παραμετρικά την πίεση των πόρων με συντελεστή πίεσης πόρων r_u να παίρνει τις τιμές 0, 0.1, 0.2, διαπιστώθηκε η αρνητική επιρροή της παρουσίας του νερού στην ευστάθεια των γεωυλικών. Για τις εξεταζόμενες κυκλικές επιφάνειες ολίσθησης που διαπιστώθηκαν, ο συντελεστής ασφαλείας υπολογίστηκε σε τιμή που προσδίδει οριακή ευστάθεια, για απουσία νερού ($F=0.976$), όπως επίσης και για την περίπτωση πίεσης πόρων $r_u = 0.1$ ($F=0.911$). Αντίθετα για τιμή πίεσης πόρων $r_u = 0.2$ ο συντελεστής ασφαλείας παρουσιάζει ακόμα μεγαλύτερη πτώση και δηλώνει αστοχία ($F= 0.845$).

Επίσης με τη μέθοδο ανάλυσης οριακής ισορροπίας, ανάστροφες αναλύσεις για τον καθορισμό των παραμέτρων των γεωτεχνικών ενοτήτων σε κατάσταση οριακής ισορροπίας. Διαπιστώνονται μεγάλα μηχανικά χαρακτηριστικά για την γεωτεχνική ενότητα της υγιούς μάργας (βάθος < 44m), ενώ αντιθέτως στην ενότητα της αποσαθρωμένης μάργας (βάθος > 44m) αντιστοιχούν απομειωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά. Οι επιφάνειες ασυνέχειας, που τοποθετούνται σε κάθε βήμα εκσκαφής, και τα ρήγματα, που τοποθετούνται ανάμεσα στον οικισμό και την εκσκαφή, παρουσιάζουν σχεδόν μηδενική συνοχή και πολύ μικρή γωνία εσωτερικής τριβής.

Στην περίπτωση των περιστροφικών ολισθήσεων δεν παίζει ρόλο η παρουσία των ρηγμάτων, ενώ οι κύκλοι ολίσθησης αναπτύσσονται κυρίως στου τεταρτογενείς σχηματισμού και την αποσαθρωμένη μάργα.

Από την εξέταση των μετακινήσεων με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, μέσω του λογισμικού Phase, διαπιστώθηκε η κατανομή των τάσεων στο εδαφικό πρηνές με εφελκυσμό στη θέση του ρήγματος και αντίστοιχα συμπίεση στο μέτωπο της εκσκαφής. Οι παραμορφώσεις αναπτύσσονται από την θέση του ρήγματος ως την εκσκαφή, ενώ η διεύθυνση των μετατοπίσεων κινείται προ το εσωτερικό της εκσκαφής, με αποτέλεσμα τη δημιουργία μετατοπίσεων της τάξης των 2m στο μέτωπο της και 0.11m σε απόσταση 400m πίσω από αυτή (στη θέση του ρήγματος).

Από την προσομοίωση της πτώσης στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα σε τέσσερα στάδια εκσκαφής, παρατηρήθηκε η δημιουργία του κώνου πτώσης στάθμης από το τρίτο βήμα της, ενώ στο τέταρτο βήμα ο κώνος ξεκινάει από το δάπεδο της εκσκαφής και επανέρχεται στη στάθμη των 80m σε περίπου 300m πίσω από αυτή.

Από την κατανομή των παραμορφώσεων επιβεβαιώνεται η θεωρία της πολυεπίπεδης ολίσθησης, σε εκσκαφές μεγάλου βάθους που αναπτύσσονται σε νεογενή, καθώς οι παραμορφώσεις σχεδόν οριοθετούνται από το ρήγμα και τους νεογενείς σχηματισμούς, που εμφανίζουν μειωμένα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά, δημιουργώντας μία νοητή πολυεπίπεδη επιφάνεια αστοχίας. Στην ανάλυση με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, σύμφωνα με τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά που αποδόθηκαν στις γεωτεχνικές ενότητες, δεν παρατηρείται κάποια αστοχία στο μέτωπο της εκσκαφής ή μαζική κατάρρευση στο σώμα της μάργα καθώς ο συντελεστής αστοχίας έχει τιμή μεγαλύτερη της μονάδας ($SRF=1.06$).

Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων διαπιστώνεται ότι:

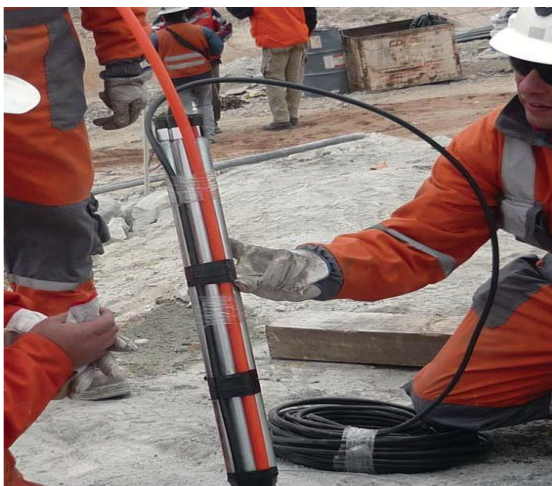
- Κατά τη διαδικασία της σταδιακής εκσκαφής το λιγνιτωρυχείου προκύπτουν σημαντικές οριζόντιες μετατοπίσεις, της τάξης των 0.11m, σε απόσταση από το μέτωπο της εκσκαφής έως και 400m
- Οι μετατοπίσεις αυτές αυξάνουν σημαντικά μετά τη ζώνη του ρήγματος και φτάνουν σε μέγιστη τιμή στο μέτωπο της εκσκαφής, με τιμές της τάξης των 2m

- η διεύθυνση των οριζόντιων μετατοπίσεων κατευθύνεται προς το εσωτερικό της εκσκαφής και η δημιουργία τους οφείλεται στην εκτόνωση των τάσεων
- η παρουσία ρωγμών συνδέεται με την κατανομή εφελκυστικών τάσεων πίσω από την εκσκαφή, οι οποίες συγκεντρώνονται στη θέση το ρήγματος.
- η εκδήλωση των ρωγματώσεων στην επιφάνεια του εδάφους ανάντη της εκσκαφής συνδέεται άμεσα με την γειτονική εκσκαφή
- η άρρηκτη μάργα παρουσιάζει μεγάλα μηχανικά χαρακτηριστικά, γεγονός που επιβεβαιώνεται από την ευστάθεια των απότομων πρανών, τα οποία απομειώνονται με την επίδραση του νερού.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΩΝ



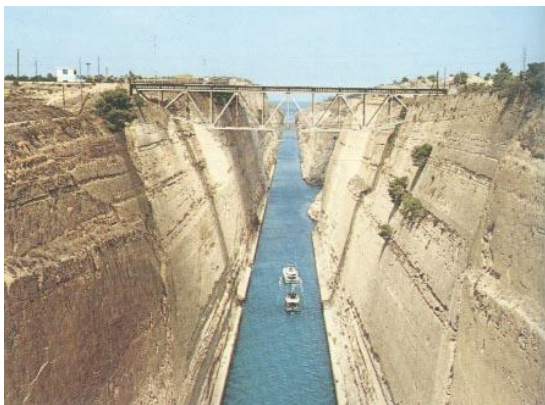
Τοποθέτηση αναζυμωμένου δείγματος μάργας στη δακτυλοειδή μήτρα. (Ε.Κ. ΣΤΕΙΑΚΑΚΗΣ 2003).



Εικόνα από εξτενσιόμετρο (κεφαλές) και κάτω πως τοποθετείται στο έδαφος



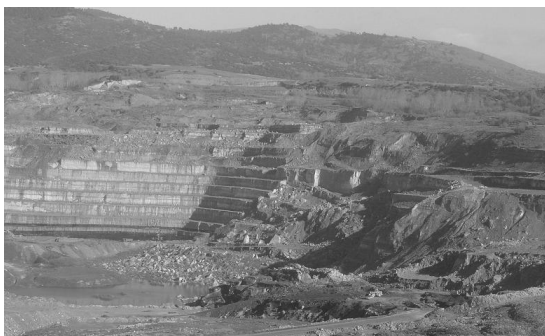
Εικόνα από πιεζόμετρο και τοποθέτηση πιεζομέτρου για λήψη στάθμης



Φωτογραφία από τη μάργα στον ισθμό της Κορίνθου.



Απεικόνιση της στρωματογραφίας των σχηματισμών στη θέση του ορυχείου Προσηλίου στο Ν. Κοζάνης (Μαρίνος 2012)



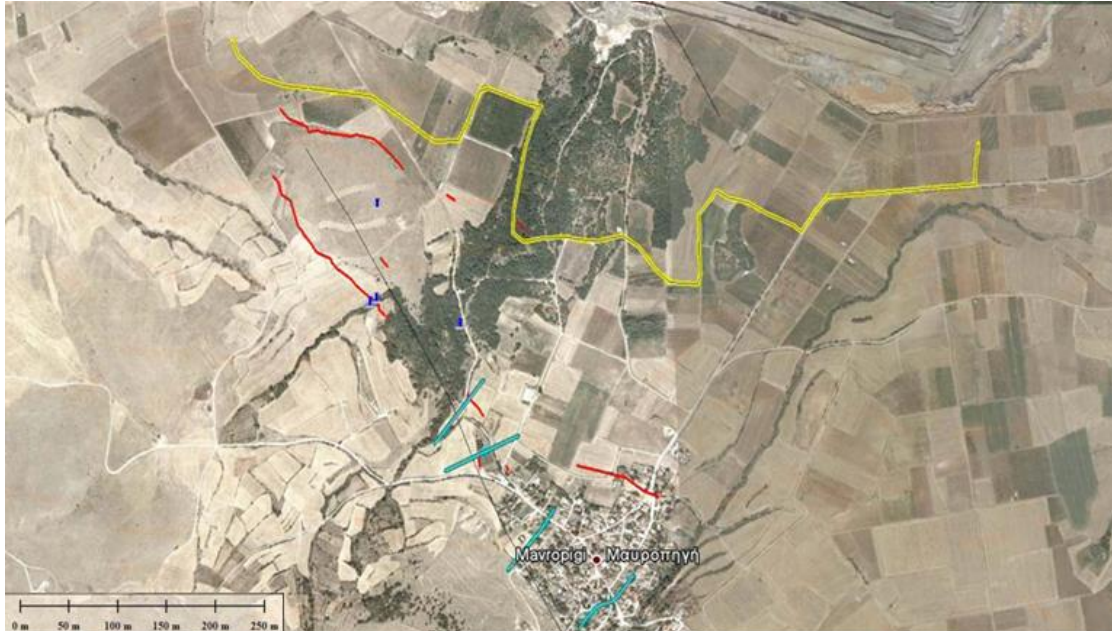
Γενική άποψη του ορυχείου και της περιοχής της κατολίσθησης (Προυντζόπουλος et.al. 2010)



Εμφάνιση των μαργών στο μέτωπο εξόρυξης που υπόκεινται των τεταρτογενών σχηματισμών και εμφάνιση της επιφάνειας αδυναμίας (Προυντζόπουλος et.al. 2010)



Κοντινή όψη της επιφάνειας αδυναμίας πάνω στην οποία πραγματοποιείται η κύρια ολίσθηση, με το υλικό πλήρωσης, πολύ πτωχών μηχανικών χαρακτηριστικών, που διευκολύνει τις μετακινήσεις κατά μήκος της (Προυντζόπουλος et.al. 2010)



Προβολή σε ορθοφωτογραφία των στοιχείων που προέκυψαν από χαρτογράφηση. Με κόκκινη γραμμή παρουσιάζονται οι επιφανειακές ρωγμές, με μαύρη το χαρτογραφημένο γεωλογικό ρήγμα, με γαλάζια οι γεωφυσικές τομές που πραγματοποιήθηκαν, με κίτρινη το όριο του ορυχείου Μαυροπηγής (Σεπτέμβριος 2010) και με μπλε σημεία σημειώνονται οι θέσεις των πρόσφατων γεωτρήσεων της Δ.Ε.Η.(Ερευνητική ομάδα Α.Π.Θ. , 2011)



Επιφανειακές ρωγμές ανάμεσα στον οικισμό και το ορυχείο, ΒΔ του οικισμού και στον προαύλιο χώρο από το εκκλησάκι του Αγίου Νικολάου.



Επιφανειακές ρωγμές ανάμεσα στον οικισμό και το ορυχείο κοντά στο μέτωπο του ορυχείου



Ζημιές σε κτίρια του οικισμού της Μαυροπηγής



Επιφανειακές διαρρήξεις κοντά στην περιοχή του οικισμού της Μαυροπηγής

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- A.G. Anagnostopoulos, N. Kalteziotis, G.K. Tsiambaos, M. Kavvadas, Geotechnical properties of the Corinth Canal Marls, *Geotechnical and Geological Engineering* 9 (1991) 1–26.
- Γάκης, & Τσότσος, ΣΤ. (2010), Συγκριτική θεώρηση Δισδιάστατων και Τρισδιάστατων Αναλύσεων Ευστάθειας Πρανών, 6ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, Βόλος
- Γάκης, & Τσότσος, ΣΤ., (2010), Μελέτη των μετακινήσεων των πρανών ορυγμάτων πριν από την αστοχία, 6ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, Βόλος.
- Δελόγκος Ε., (2011), Ποσοτική ανάλυση της γεωμετρικής εξέλιξης των ρηξιγενών ζωνών στο λιγνιτωρυχείο της Μαυροπηγής στη λεκάνη Πτολεμαΐδας (Δυτ. Μακεδονία, Ελλάδα). Μεταπτυχιακή διατριβή ειδίκευσης. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, τμήμα γεωλογίας.
- ΔΕΗ Α.Ε., (2005), Μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων ορυχείων Πτολεμαΐδας, Ν. Κοζάνης.
- Ερευνητική ομάδα ΑΠΘ, τμήμα Γεωλογίας, (2011), ερευνα επί του φαινομένου που προκαλεί τις επιφανειακές διαρρήξεις στην ευρύτερη περιοχή του Δ.Δ. Μαυροπηγής του Δ. Πτολεμαΐδας
- Καβουνίδης Σ., (1988), Περί της προοδευτικής αστοχίας αργιλικών πρανών, 1^ο πανελλήνιο συνέδριο Γεωτεχνικής μηχανικής, ΤΕΕ, Αθήνα, 1, 213-218
- Καβουνίδης, Σ. (2010), Για την Τρίτη Διάσταση στην Ευστάθεια Πρανών, 6ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, Βόλος.
- Kalogirou, E.M., Tsapanos, T.M., Karakostas, V.G, Marinou, V.P. and Chatzipetros, A. “Ground fissures in the area of Mavropigi village (N. Greece): seismotectonics or mining activity?” (accepted in *Acta Geophysica*), 2014.
- Κούκη Α., & Σαμπατακάκης, Ν. (2002), Τεχνική γεωλογία (τόμος 1)
- Κούκη Α., & Σαμπατακάκης, Ν. (2007), Γεωλογία τεχνικών έργων(τόμος 2)

- Κούκη Α., & Σαμπατακάκης, Ν. (2010), Διερεύνηση της Μηχανικής Συμπεριφοράς των Μαργαϊκών Σχηματισμών Αχαΐας με βάση Εργαστηριακές και Επιτόπου δοκιμές, 6ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, Βόλος.
- Λέανδρος, Μ., Η κινηματική κατολισθήσεων στα περιφερειακά πρανή των βαθιών ελληνικών λιγνιτικών εκμεταλλεύσεων.
- Μαρίνος, Π., (2012), έκθεση επί της ευσταθείας των πρανών κατά την εκμετάλλευση στο λιγνιτωρυχείο Προσηλίου Ν. Κοζάνης της εταιρείας ΜΕ.Τ.Ε. Α.Ε.
- Μουντράκης Δ.Μ., (1958), Γεωλογία της Ελλάδος.
- Παυλίδης Σ., (1985), Νεοτεκτονική εξέλιξη της λεκάνης Φλώρινας-Βεγορίτιδας- Πτολεμαΐδας (Δ. Μακεδονία). Διδακτορική διατριβή. Αριστοτέλειο πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
- Pavlides S. and Mountrakis D.M., (1987), extentional tectonics of northwestern Macedonia, Greece, since late Minocen. J stuct. Geol. 9 (4), 385-392.
- ΠΡΟΥΝΤΖΟΠΟΥΛΟΣ, Γ., κ.ά., (2010), Ανάλυση κατολισθητικών φαινομένων πρανούς λιγνιτωρυχείου σε μαργαϊκούς σχηματισμούς με εξαιρετικά χαμηλή αντοχή, 6ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, Βόλος.
- Στειακάκης Ε.Α, (2003)., Συμπεριφορά ανοικτών εκσκαφών μεγάλου βάθους έρευνα γεωτεχνικών παραμέτρων και κινητικότητας εδαφών στο λιγνιτικό πεδίο Πτολεμαΐδας – Αμύνταιου. Διδακτορική διατριβή. Πολυτεχνείο Κρήτης, τμήμα μηχανικών ορυκτών πόρων. Χανιά.
- Steiakakis * E. , & Z. Agioutantis(2010), A kinetic behavior model at a surface lignite mine, based on geotechnical investigation. Simulation Modelling Practice and Theory, 18, 558–573.
- Tsiambaos, G. (1991), Correlation of mineralogy and index propertiew with residual strength of Iraklion marls, Engineering Geology 30, 357-369., Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam.

