



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**‘ΜΕΛΕΤΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΒΑΘΕΙΑΣ
ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΣΤΟ ΟΡΥΧΕΙΟ ΤΗΣ ΜΑΥΡΟΠΗΓΗΣ ΤΟΥ Λ.Κ.Δ.Μ. ΜΕ ΤΗ
ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ’**

ΚΟΥΡΚΟΥΤΗΣ ΣΠΥΡΟΣ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

**ΖΑΧΑΡΙΑΣ ΑΓΙΟΥΤΑΝΤΗΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ – ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ
ΣΤΕΙΑΚΑΚΗΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ, ΕΕΔΙΠ
ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΕΞΑΔΑΚΤΥΛΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

ΧΑΝΙΑ, 2007

Αφιερωμένο
στους γονείς μου,
Θεόδωρο και Αικατερίνη.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση ευστάθειας πρανούς, σε τομή της εκσκαφής του νέου λιγνιτωρυχείου της Μαυροπηγής, στο νοτιοδυτικό τμήμα του Λιγνιτικού Κέντρου Δυτικής Μακεδονίας.

Η ανάλυση πραγματοποιείται με την αριθμητική μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και συγκεκριμένα με το λογισμικό πακέτο PLAXIS, και βασίζεται σε μια γεωλογική τομή εγκάρσια προς τα πρανή.

Πραγματοποιείται επίσης, μία σύγκριση μεταξύ δύο διαφορετικών μοντέλων συμπεριφοράς υλικού (Mohr – Coulomb model και Hardening soil model), και προτείνεται η διεύρυνση της εκμετάλλευσης με σκοπό την αύξηση της παραγωγής λιγνίτη. Πρέπει να αναφερθεί ότι οι παράμετροι των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν, βασίζονται στη γεωλογική περιγραφή της τομής και σε βιβλιογραφικά δεδομένα.

Τέλος, σχολιάζεται η σπουδαιότητα της κλίμακας με την οποία είναι σχεδιασμένο ένα μοντέλο στο λογισμικό πακέτο PLAXIS και πώς επηρεάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών από αυτή.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η οργάνωση και επεξεργασία της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ξεκίνησε το 2004, και στο χρονικό διάστημα μέχρι την ολοκλήρωσή της, παρουσιάστηκαν αρκετά προβλήματα, ακολουθώντας βέβαια τους νόμους του Murphy. Ξεκινώντας από μη ικανά για επεξεργασία γεωτρητικά δεδομένα, δυσλειτουργίες προσωπικών υπολογιστών και μη εύρεση ανταλλακτικών εξαρτημάτων, καταλήξαμε σε ετήσια αφαίρεση από το αντικείμενο λόγω στρατιωτικής θητείας. Εντούτοις, η ολοκλήρωση της εργασίας πραγματοποιήθηκε, αν και καθυστερημένα, και θα ήθελα να ευχαριστήσω ορισμένα πρόσωπα με την βοήθεια των οποίων η διπλωματική αυτή ολοκληρώθηκε.

Οφείλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Ζαχαρία Αγιουτάντη για την συμμετοχή και την καθοδήγηση του, τον Δρ Εμμανουήλ Στειακάκη για την παροχή πολύτιμων πληροφοριών και συνεργασία του, τον καθηγητή κ. Γεωργιο Εξαδάκτυλο για την συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή, τον κ. Παύλο Σκυλίτζη για την παροχή πληροφοριών και χαρτών από την τεχνική υπηρεσία της Δ.Ε.Η.

Ευχαριστώ την συμφοιτήτριά μου Τσαμάνδουρα Καλλιόπη για τη ψυχολογική υποστήριξη καθ'όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας, τον συμφοιτητή μου Αλευρά Νικόλαο, για την βοήθεια και την υπέροχη φιλοξενία του, τον συμφοιτητή μου Κούκνη Επαμεινώνδα για την τεχνική υποστήριξη σε ορισμένες δύσκολες ώρες.

Ευχαριστώ, ειλικρινά πολύ, την κ. Ειρήνη Καλογήρου για την βοήθεια και καθοδήγηση της, τους γονείς και την αδερφή μου για την ψυχολογική και οικονομική υποστήριξη.

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν και στάθηκαν δίπλα μου καθ'όλη τη διάρκεια των σπουδών μου στο Πολυτεχνείο Κρήτης.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1.....	7
Εισαγωγή	7
Κεφάλαιο 2.....	9
Το ορυχείο της Μαυροπηγής.....	9
2.1 Εισαγωγή	9
2.2 Τεκτονισμός και Γεωλογικά χαρακτηριστικά.....	12
2.3 Η Γεωλογική τομή ΔΔ' του ορυχείου Μαυροπηγής.....	14
Κεφάλαιο 3.....	16
Κατολισθήσεις και Συντελεστές Ασφάλειας.....	16
3.1 Κατολισθήσεις	16
3.1.1 Ορισμός κατολίσθησης	16
3.1.2 Ιστορική αναδρομή	16
3.1.3 Τύποι κατολισθήσεων	17
3.1.4 Μηχανική των κατολισθήσεων	18
3.1.5 Αίτια των κατολισθήσεων.....	19
3.1.6 Μέτρα αντιμετώπισης των κατολισθήσεων.....	19
3.2.Μέθοδοι Ανάλυσης Σταθερότητας Πρανών και Συντελεστές Ασφάλειας.....	21
3.2.1 Εισαγωγή	21
3.2.2 Μέθοδοι Ανάλυσης.....	21
3.2.3 Συντελεστές Ασφάλειας.....	22
Κεφάλαιο 4.....	24
Τα Πεπερασμένα Στοιχεία και το Λογισμικό Πακέτο PLAXIS..	25
4.1 Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων	25
4.1.1 Περιγραφή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων	25
4.1.2 Διακριτοποίηση.....	26
4.1.3 Χαρακτηριστικά της διαίρεσης του πεδίου.....	27
4.1.4 Φόρτιση των υλικών και συνοριακές συνθήκες.....	28
4.1.5 Μοντέλα συμπεριφοράς των υλικών	29
4.1.6 Κριτήρια αστοχίας των γεωϋλικών	30
4.1.7 Ανάλυση ευστάθειας πρανών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων	30
4.2 Το λογισμικό πακέτο PLAXIS	32
4.2.1 Εισαγωγή.....	32
4.2.2 Πρόγραμμα εισαγωγής δεδομένων	32
4.2.3 Υπολογισμοί	38
4.2.4 Πρόγραμμα εξαγωγής αποτελεσμάτων	44
4.2.5 Πρόγραμμα σχεδιασμού καμπυλών	45
Κεφάλαιο 5.....	46
Μοντελοποίηση και Επίλυση της Τομής ΔΔ'	46
5.1 Ψηφιοποίηση της τομής	46
5.2 Ομογενοποίηση στρωμάτων	46
5.3 Παράμετροι υλικών	47
5.4 Συνοριακές Συνθήκες.....	50
5.5 Εισαγωγή των παραμέτρων των ρηγμάτων	50
5.6 Δοκιμή κλίμακας.....	51

5.7 Τελικό μοντέλο τομής $\Delta\Delta'$	56
5.8 Στάδια εκσκαφής	58
5.9 Επίλυση του μοντέλου με το μοντέλο συμπεριφοράς Mohr – Coulomb σε όλους τους γεωλογικούς σχηματισμούς	60
5.9.1 Μετατοπίσεις και συντελεστές ασφάλειας	60
5.9.2 Αναπτυσσόμενες τάσεις στην τομή	65
5.10 Επίλυση σύμφωνα με το μοντέλο συμπεριφοράς σκλήρυνσης εδάφους.....	67
Κεφάλαιο 6.....	74
Συμπεράσματα και προτάσεις.....	74
6.1 Συμπεράσματα απο την επίλυση του μοντέλου της τομής $\Delta\Delta'$	74
6.1.1 Οι συντελεστές ασφάλειας.....	74
6.1.2 Οι οριζόντιες και οι κατακόρυφες παραμορφώσεις.....	74
6.2 Προτάσεις μετά την επίλυση του μοντέλου.....	76

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Η παρούσα διπλωματική εργασία αναφέρεται στην ανάλυση της μηχανικής συμπεριφοράς του εδάφους σε ανοιχτή εκσκαφή εκμετάλλευσης λιγνίτη, με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων, και συγκεκριμένα, των πεπερασμένων στοιχείων.

Η υπό εξέταση περιοχή της Μαυροπηγής, ανήκει στο νοτιοδυτικό τμήμα του Λιγνιτικού Κέντρου Δυτικής Μακεδονίας (Λ.Κ.Δ.Μ.). Η εκμετάλλευση του νέου αυτού τμήματος όρυξης λιγνίτη, ξεκίνησε το 2001 και η διάρκεια ζωής του έχει υπολογιστεί σε 35 χρόνια. (Διαμαντόπουλος)

Η ανάλυση που παρουσιάζεται σε αυτή την εργασία, αφορά την ευστάθεια του εδάφους, λόγω εκσκαφής, μέσω της προσομοίωσης μιας γεωλογικής τομής της περιοχής, με τη χρήση του λογισμικού πακέτου PLAXIS, έκδοση 7. Στο χάρτη της γεωλογικής τομής που παραχωρήθηκε από την τεχνική υπηρεσία της Δ.Ε.Η., ήταν ορισμένο μόνο το τελικό στάδιο εκμετάλλευσης, και έτσι ήταν αναγκαίος ο ορισμός των ενδιάμεσων σταδίων εκσκαφής. Για κάθε στάδιο εκσκαφής υπολογίζεται ο συντελεστής ασφάλειας και η αναθόλωση, λόγω ‘ανακούφισης’ του εδάφους με την απομάκρυνση των υπερκειμένων στρωμάτων, η οποία υπολογίζεται συνολικά μέχρι το τελικό στάδιο εκμετάλλευσης.

Η μελέτη που πραγματοποιήθηκε, αφορά τρία μοντέλα της ίδιας τομής. Τα δύο πρώτα διαφέρουν μόνο όσον αφορά τα μοντέλα συμπεριφοράς ορισμένων πετρωμάτων, ενώ το τρίτο ως προς τη γεωμετρία της εκσκαφής. Στο πρώτο μοντέλο, έχει εφαρμοστεί η θεωρία του γραμμικού μοντέλου συμπεριφοράς υλικού Mohr – Coulomb, σε καθένα απο τα εδαφικά υλικά που αποτελούν την τομή. Στο δεύτερο μοντέλο, μελετάται η συμπεριφορά της τομής κατά την εκσκαφή χρησιμοποιώντας το υπερβολικό μοντέλο συμπεριφοράς σκλήρυνσης υλικού (hardening soil model), στις στρώσεις του λιγνίτη και της μάργας, ενώ στα υπόλοιπα υλικά έχουν διατηρηθεί οι ίδιες ιδιότητες με το πρώτο μοντέλο. Η τρίτη περίπτωση αποτελεί μία δοκιμή διεύρυνσης της εκσκαφής με σκοπό την αύξηση της αποληψιμότητας λιγνίτη, και λειτουργεί σαν πρόταση για περαιτέρω μελέτη. Σε αυτή την

περίπτωση έχουν χρησιμοποιηθεί οι ίδιες παράμετροι υλικών με το πρώτο μοντέλο προσομοίωσης. Σε όλες τις παραπάνω επιλύσεις των μοντέλων της γεωλογικής τομής, οι παράμετροι των υλικών όπως το μέτρο ελαστικότητας – παραμορφωσιμότητας, η συνοχή, η εσωτερική γωνία τριβής κλπ, δεν έχουν προσδιοριστεί βάση πειραματικών μετρήσεων αλλά, ορίστηκαν με βάση τη γεωλογία και την περιγραφή της περιοχής και τη βοήθεια του Δρ. Ε. Στειακάκη και με βάση σχετική βιβλιογραφία.

Η γεωλογική τομή που προσομοιώνεται, παραχωρήθηκε από την τεχνική υπηρεσία της Δ.Ε.Η. σε έντυπη μορφή. Για την μοντελοποίηση της τομής ήταν αναγκαία η μετατροπή της σε ψηφιακή μορφή. Η ψηφιοποίηση του σχεδίου τομής, πραγματοποιήθηκε σε ειδικό σχεδιαστήριο και αποτυπώθηκαν βασικά χαρακτηριστικά της τομής όπως η επιφάνεια του εδάφους, τα ρήγματα και οι γεωτρήσεις σε σχέδιο του λογισμικού AutoCAD, καθώς επίσης ορίστηκε ως επίπεδο μηδενικού υψομέτρου το κατώτερο τμήμα του σχεδίου. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η δημιουργία του σχεδίου AutoCAD πραγματοποιήθηκε σε κλίμακα 1:10. Η σπουδαιότητα του σχεδιασμού σε κλίμακα, αναλύεται με τη μελέτη δύο διαφορετικών, απλούστερων μοντέλων. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε απλούστευση της τομής, με άθροιση των επιμέρους λεπτότερων στρωμάτων που παρατηρήθηκαν στο αρχικό σχέδιο. Ο σκοπός αυτής της απλούστευσης καθώς και ορισμένων άλλων παραδοχών που έγιναν, ήταν η ελάχιστη επιβάρυνση του λειτουργικού PLAXIS με λεπτομερείς και μικρές επιφάνειες που θα είχαν ως αποτέλεσμα τη δυσλειτουργία του προγράμματος. Οι παραδοχές αυτές επηρεάζουν όπως είναι φυσικό την τελική εκτίμηση της αναθόλωσης αλλά όχι σε μεγάλο βαθμό.

Κεφάλαιο 2

Το ορυχείο της Μαυροπηγής

2.1 Εισαγωγή

Το ορυχείο της Μαυροπηγής είναι ένα νέο ορυχείο λιγνίτη που βρίσκεται στο δυτικό τμήμα της λεκάνης της Πτολεμαΐδας, μέσα στο νομαρχιακό διαμέρισμα της Κοζάνης, στη δυτική Μακεδονία.

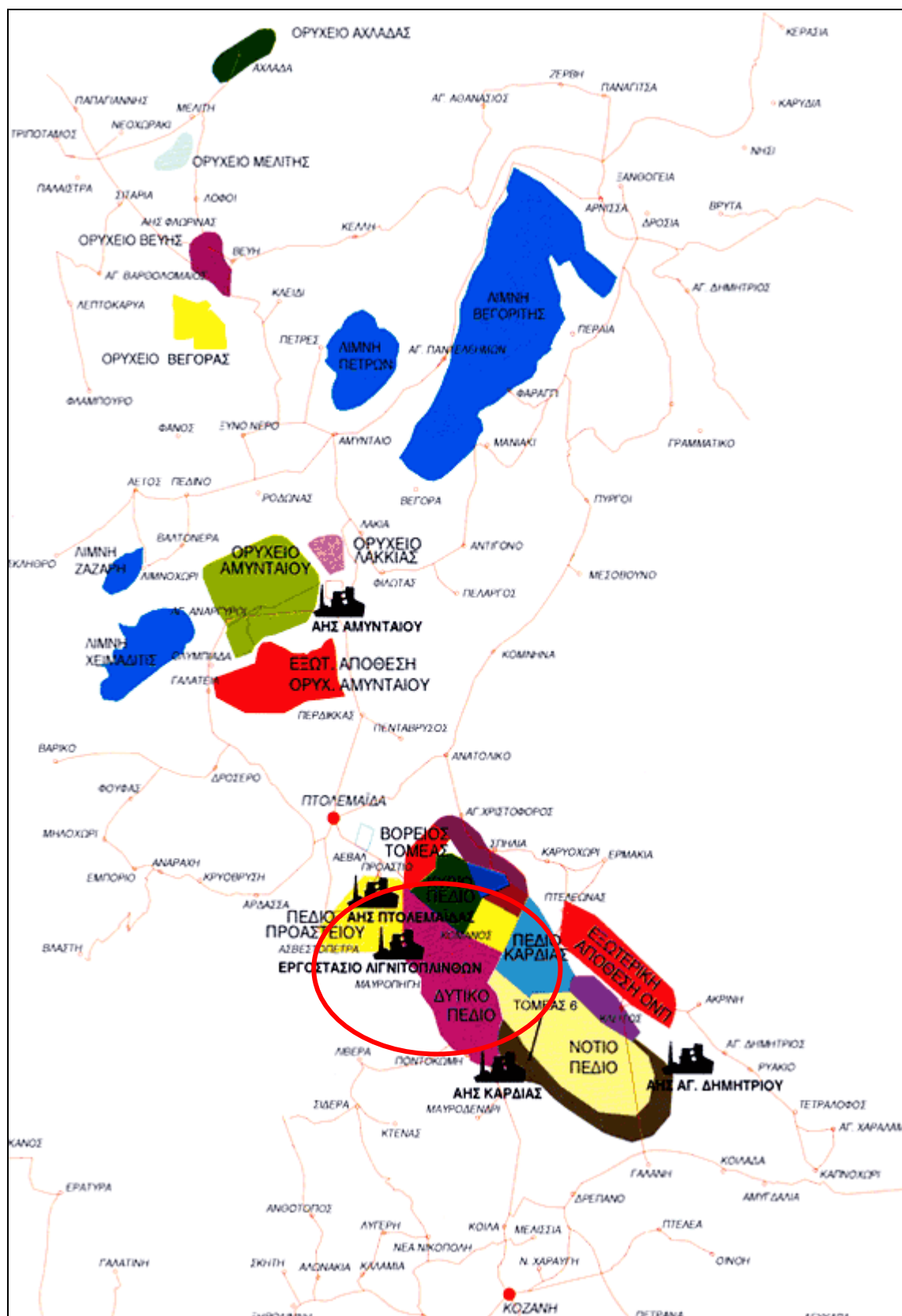
Με μια κοινή υπουργική απόφαση (έγκριση των περιβαλλοντικών περιορισμών για τα μεταλλεία, του Υπουργείου Δημοσίων Έργων και Περιβάλλοντος και του Υπουργείου Ανάπτυξης, 5.9.2001) ζητήθηκε να οριστούν οι γεωτεχνικές και υδρογεωλογικές έρευνες σχετικά με την προστασία του χωριού της Μαυροπηγής.

Το ορυχείο θα κρατήσει μια ασφαλή απόσταση 500 m από το χωριό της Μαυροπηγής, αν και η απόσταση που απαιτείται από τον Κανονισμό Μεταλλείων και Λατομικών Έργων (Κ.Μ.Λ.Ε.), είναι μόνο 250 m.

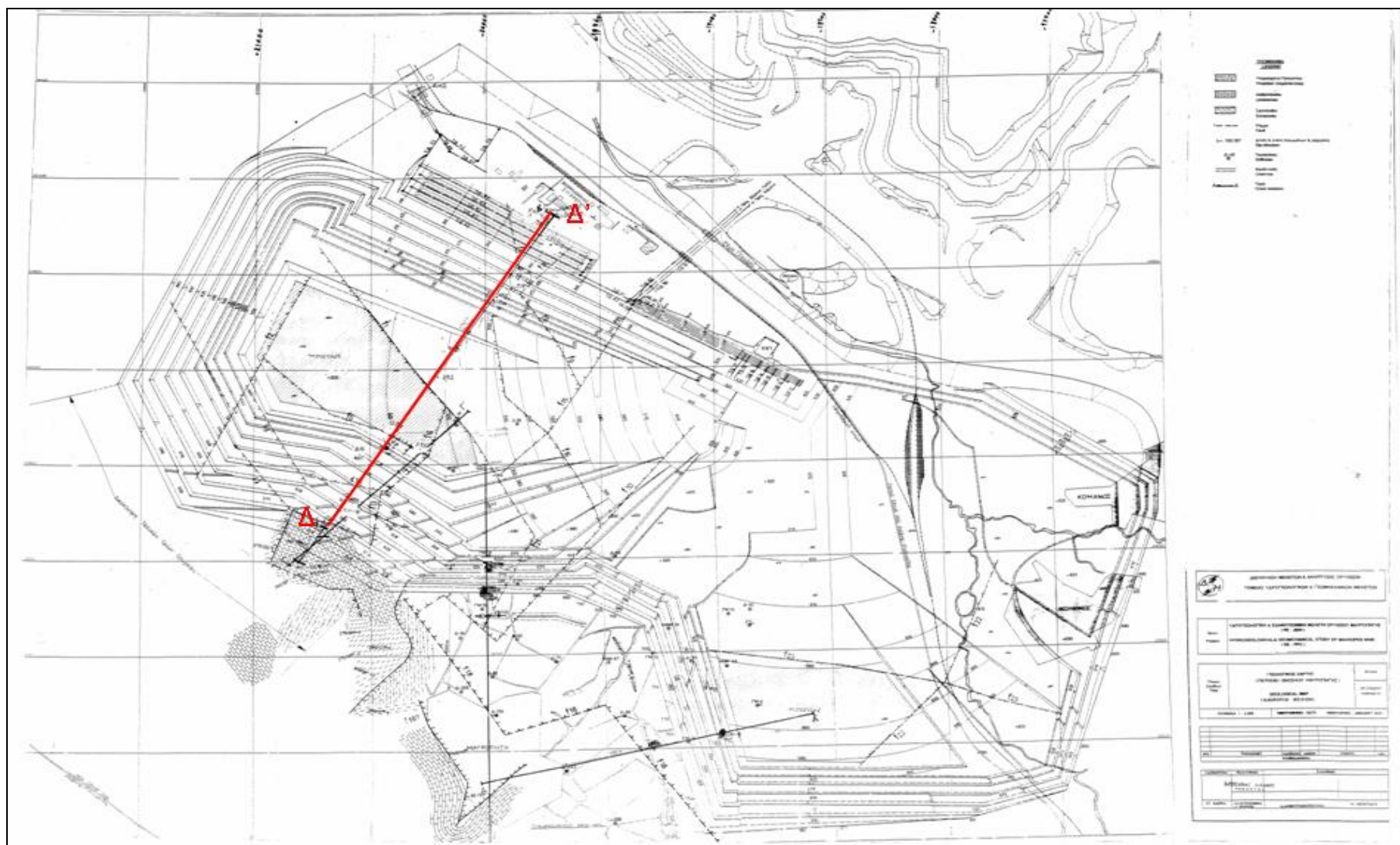
Το ορυχείο της Μαυροπηγής ανήκει στο Λιγνιτικό Κέντρο Δυτικής Μακεδονίας (Λ.Κ.Δ.Μ.) (Εικ. 2.1) και έχει αποθέματα 220 Mt εξορυσσόμενου λιγνίτη. Συνολικά θα εξορυχθούν $715 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ (συμπεριλαμβανομένου του λιγνίτη), σε μια περίοδο 35 ετών, με μια γενική αναλογία εξόρυξης περίπου $3,2 \text{ m}^3$ /τόνο λιγνίτη.

Η τυπική ετήσια παραγωγή θα είναι 9,5 Mt για τα 35 έτη, επί του συνόλου των 55 Mt που παράγονται ετησίως στο Λ.Κ.Δ.Μ. Η αρχική οριοθέτηση του ορυχείου πραγματοποιήθηκε το 2001. Πρέπει να αναφερθεί ότι ο λιγνίτης που παράγεται στο Λ.Κ.Δ.Μ. καλύπτει περίπου το 60% της συνολικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας.

Η εξόρυξη θα αρχίσει το έτος 2009, μετά την εξόφληση των κοιτασμάτων του Βορείου Τομέα και του ορυχείου του Κομανού. Θα ξεκινήσει από το βορειοδυτικό μέρος του ορυχείου και μετά από μια αντίθετη προς τη φορά των δεικτών του ρολογιού εκσκαφή, θα φθάσει στο χωριό Μαυροπηγή σε περίπου 15-20 χρόνια, σε μια ασφαλή απόσταση 500 m, και τελικά, στο νοτιοανατολικό όριο σε 35 έτη. Το ορυχείο της Μαυροπηγής επεκτείνεται σε μια έκταση περίπου 11 km^2 , με ένα βάθος μεταξύ 50 έως 200 m (Εικ. 2.2).



Εικ. 2.1 Χάρτης περιοχής Πτολεμαΐδας - Αμυνταίου



Εικ. 2.2 Χάρτης Ορυχείου Μαυροπηγής και Τομή ΔΔ'

2.2 Τεκτονισμός και Γεωλογικά χαρακτηριστικά

Η λεκάνη της Μαυροπηγής χαρακτηρίζεται από ρήγματα με διεύθυνση νοτιοδυτική – βορειοανατολική, καθώς και ορισμένα κάθετα σε αυτά, που διαχωρίζουν την περιοχή σε υπολεκάνες (Εικ. 2.3).

Το χαρακτηριστικό αυτών των ρηγμάτων είναι ότι οι μετακινήσεις του εδάφους δεν είναι σταθερές καθ'όλο το μήκος του ρήγματος. Αυτό οφείλεται στην πλαστικότητα των πρηνών καθώς αυτά παραμορφώνονται υπό την επίδραση των καμπτικών δυνάμεων. Αυτή η τεκτονική διαταραχή έχει προκαλέσει πτυχώσεις κατά το μήκος των ρηγμάτων.

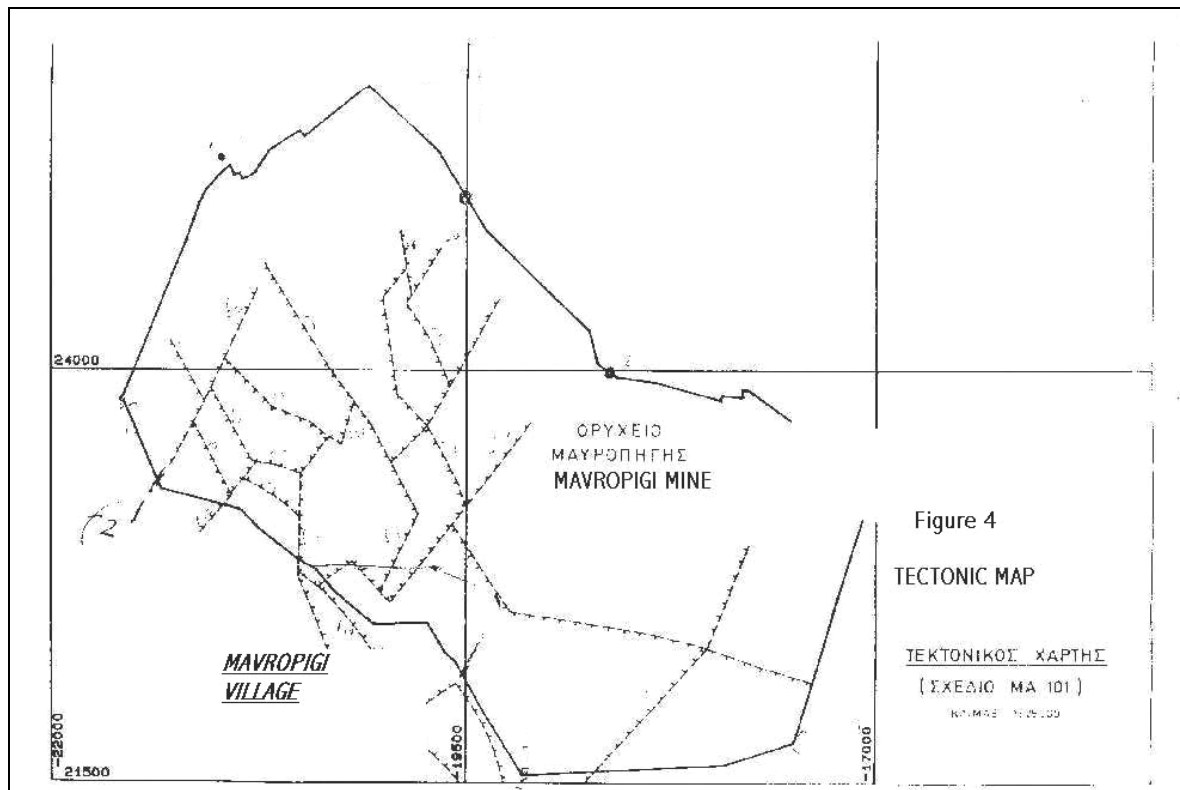
Το κοίτασμα λιγνίτη της περιοχής της Μαυροπηγής, παρουσιάζει μεταβολές στο πάχος του. Στα βόρεια του κοιτάσματος, το πάχος κυμαίνεται μεταξύ 50 και 150 m, ενώ στα σύνορα με το κοίτασμα του Προαστείου φτάνει τα 250 m. Αύξηση του πάχους παρατηρείται και κατά τη διεύθυνση Ανατολής – Δύσης. Οι μεταβολές του πάχους του στρώματος του λιγνίτη, οφείλονται κατά βάση στο ανάγλυφο του υποβάθρου και στις τεκτονικές δραστηριότητες της περιοχής.

Τα στρώματα λιγνίτη εμφανίζονται μεταξύ γκριζοπράσινων χουμικών μαργών, αμμωδών αργίλων, λεπτόκοκκων άμμων, συμπεριλαμβανομένης και της 'χαρακτηριστικής' άμμου, καθώς και κιτρινοπράσινων μαργών με φακοειδής στρώσεις μαργαϊκού ασβεστόλιθου.

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που υπάρχουν στην περιοχή της Μαυροπηγής χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Στους σχηματισμούς της προ – Αλπικής και Αλπικής περιόδου (pre – rift) που αποτελούν το υπόβαθρο της λεκάνης, και τους σχηματισμούς της Πλειοκαινικής εποχής (syn – rift) που περιλαμβάνουν τα ιζηματογενή πετρώματα της περιοχής.

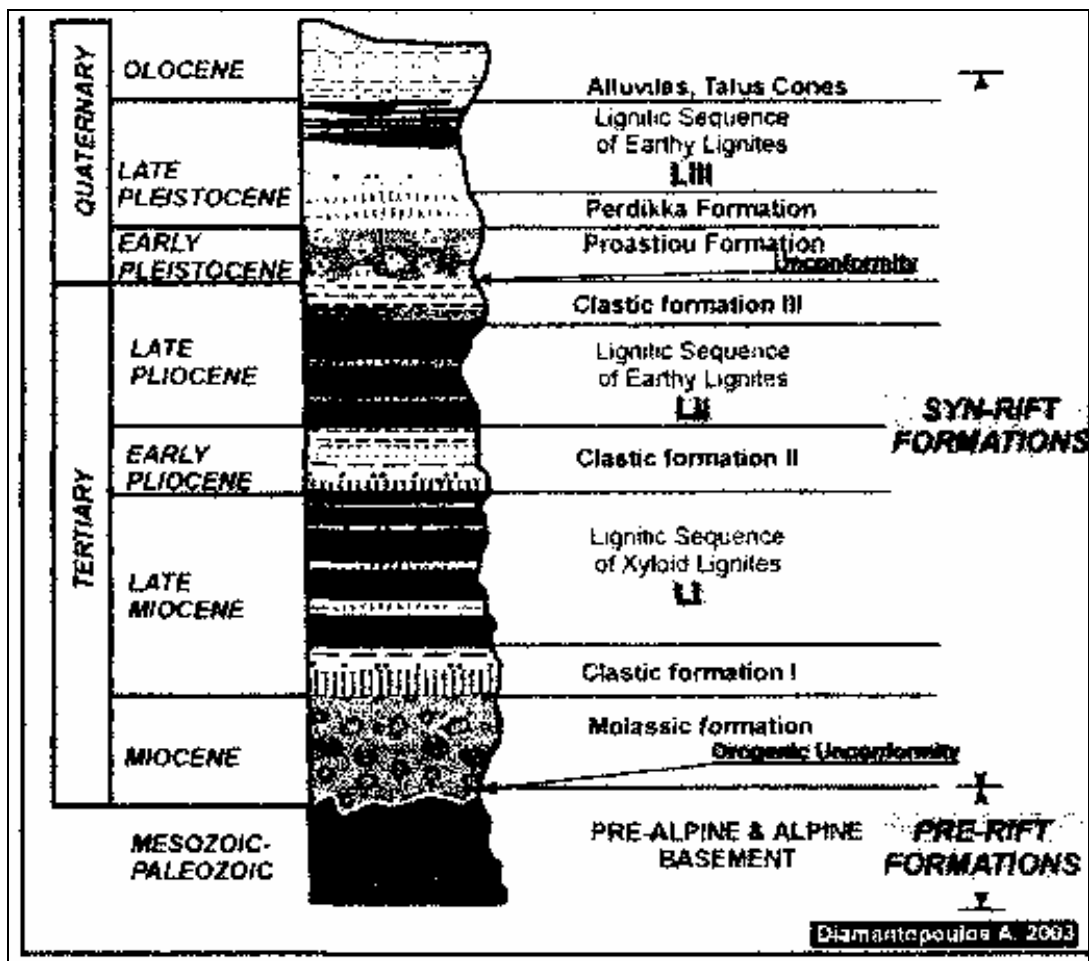
Ολόκληρη η περιοχή χαρακτηρίζεται από έντονη τεκτονική δράση, τόσο για τους σχηματισμούς του υποβάθρου, όσο και για τους μετέπειτα ιζηματογενείς σχηματισμούς, με αποτέλεσμα τη μεταμόρφωση και παραμόρφωση των πετρωμάτων. (Α. Διαμαντόπουλος)

Οι σχηματισμοί της μετά – Πλειοκαινικής εποχής, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.4 περιλαμβάνουν έναν κλαστικό σχηματισμό (CF II) της νεώτερης Πλειοκαινικής περιόδου, μία λιγνιτική σειρά (LII) και έναν κλαστικό σχηματισμό (CF III) της ύστερης Πλειοκαινικής περιόδου, τον σχηματισμό Προαστείου της νεώτερης Πλειστοκαινικής περιόδου και τα αλλούβια της Ολοκαινικής περιόδου. Αυτός ο σχηματισμός χαρακτηρίζεται από δύο ασυνέχειες: την ασυνέχεια βάσης κατά την Πλειοκαινική περίοδο και την ανώτερη ασυνέχεια των Πλειστοκαινικών χρόνων.



Εικ. 2.3 Τεκτονικός Χάρτης Μαυροπηγής

Οι σχηματισμοί της προ – Αλπικής και Αλπικής περιόδου χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, όσον αφορά την δομή τους: στην κατηγορία του προ – Αλπικού Πελαγονικού υποβάθρου και στην κατηγορία Αλμωπία. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει σχηματισμούς που αποτελούνται κυρίως από αμφιβολιτικούς και λευκούς mica σχιστόλιθους καθώς και λευκούς γνεύσιους. Στη δεύτερη κατηγορία παρατηρούνται μεταμορφωμένα ανθρακικά πετρώματα όπως κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι και μάρμαρα που συσχετίζονται με την Τριαδική – Ιουρασική περίοδο.

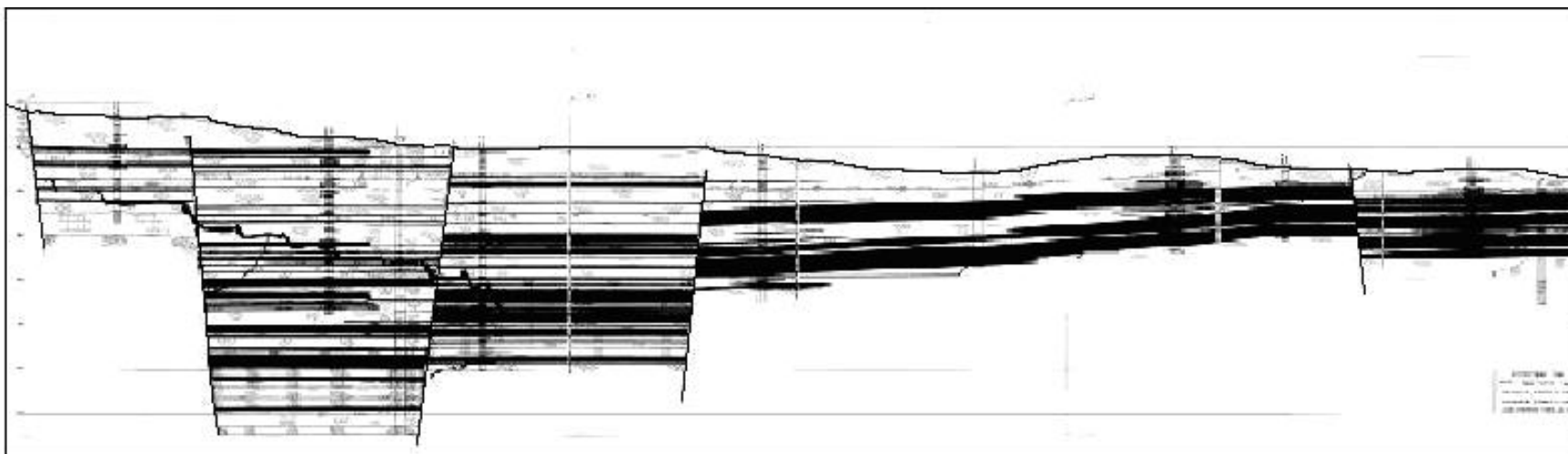


Εικ. 2.4 Χαρακτηριστική γεωλογική τομή της περιοχής της Μαυροπηγής (Α. Διαμαντόπουλος)

2.3 Η Γεωλογική τομή ΔΔ' του ορυχείου Μαυροπηγής

Ο σχεδιασμός του ορυχείου της Μαυροπηγής περιλάμβανε τη μελέτη ενός πλήθους γεωλογικών τομών με σκοπό τη μεγαλύτερη αποληψιμότητα λιγνίτη. Η παρούσα διπλωματική αφορά μία από αυτές τις τομές. Η επιλογή της συγκεκριμένης γεωλογικής τομής, έγινε λόγω της θέσης της και λόγω του ότι το ένα άκρο της πλησιάζει σε εργοστασιακή εγκατάσταση της Δ.Ε.Η., πράγμα που κάνει πιο ενδιαφέρουσα τη μελέτη του εδάφους όσον αφορά την κινητική συμπεριφορά.

Η γεωλογική τομή ΔΔ', όπως παρατηρείται και στην Εικόνα 2.2 εκτείνεται σε νοτιοδυτική – βορειοανατολική διεύθυνση από τη μέση σχεδόν του μεταλλείου προς το βορειοανατολικό όριο του. Στην Εικόνα 2.5 φαίνεται η τομή αυτή όπως παραδόθηκε από την τεχνική υπηρεσία της Δ.Ε.Η.



Εικ. 2.5 Γεωλογική Τομή ΔΔ' (Διεύθυνση Μελετών Ανάπτυξης Ορυχείων, Δ.Ε.Η., Ελ.Γκρέκα, Κλ. Χατζησάββας)

Κεφάλαιο 3

Κατολισθήσεις και Συντελεστές Ασφάλειας

3.1 Κατολισθήσεις

3.1.1 Ορισμός κατολίσθησης

Με τον όρο κατολίσθηση εννοείται η καθοδική αργή ή γρήγορη μετακίνηση μιας εδαφικής μάζας λόγω της βαρύτητας. Αυτή η μετακίνηση συνοδεύεται από κάποιο βαθμό διατάραξης της φυσικής δομής του εδάφους. Μια κατολίσθηση ενεργοποιείται όταν οι διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται στο εσωτερικό του εδάφους, υπερβαίνουν τη διατμητική αντοχή του εδάφους. Οι κατολισθήσεις είναι ένα φαινόμενο, με τεράστιες κοινωνικές και οικονομικές συνέπειες, αφού εκτός από την οικονομική επιβάρυνση λόγω της κατάρρευσης ενός τεχνικού έργου ή της διακοπής της συγκοινωνίας, συνοδεύονται σε ορισμένες περιπτώσεις, από την απώλεια ανθρώπινων ζώων (Λοϊζος, 1964).

3.1.2 Ιστορική αναδρομή

Η μετακινήσεις των γαιών αποτέλεσαν την αιτία ανάπτυξης του κλάδου της εδαφομηχανικής. Από την εποχή του Rankine και του Coulomb γύρω στα 1800 μελετήθηκαν οι ωθήσεις των γαιών και άρχισε να αναπτύσσεται η θεωρία της πλαστικότητας. Στη συνέχεια, με την ανάπτυξη του σιδηροδρόμου και των επικουρικών του έργων (επιχώματα, εκχώματα, σήραγγες) δόθηκε αφορμή για περαιτέρω ανάπτυξη της επιστήμης. Το 1870 ο Σουηδός μηχανικός Fellenius εισήγαγε την τεχνική του κύκλου ολίσθησης, η οποία αποτέλεσε την πρώτη σοβαρή προσπάθεια στον τομέα της εδαφομηχανικής. Στη συνέχεια και ο Terzaghi - ο οποίος θεωρείται ο θεμελιωτής της εδαφομηχανικής – περί το 1940, ασχολήθηκε με τη μελέτη ευστάθειας πρανών, όπου επισημάνθηκε ο σημαντικός ρόλος του νερού όσον αφορά την επενέργειά του στην αντοχή του εδάφους. Από αυτή την εποχή οι γνώσεις πάνω στο θέμα συστηματοποιούνται και διευρύνεται ο κύκλος των ερευνών. Ερευνητές όπως οι Bjerrum, Bishop, Peck, Taylor κ.α προσθέτουν νέα στοιχεία και προσπαθούν να δώσουν ταχύτερες λύσεις στην ανάλυση της ευστάθειας. Οι λύσεις αυτές μπορεί να απλουστεύουν την επίπονη διαδικασία της ανάλυσης, αλλά δεν δίνουν ακριβή αποτελέσματα, αφού το κάθε πρόβλημα έχει την ιδιαιτερότητά του. Γι' αυτό το λόγο εισάγεται η χρήση του ηλεκτρονικού υπολογιστή

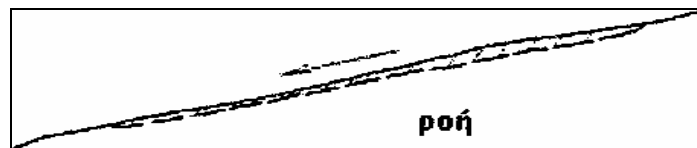
(Η.Π.Α. και Σοβιετική Ένωση) για τον υπολογισμό της ισορροπίας των πρανών (Λοϊζος, 1964).

3.1.3 Τύποι κατολισθήσεων

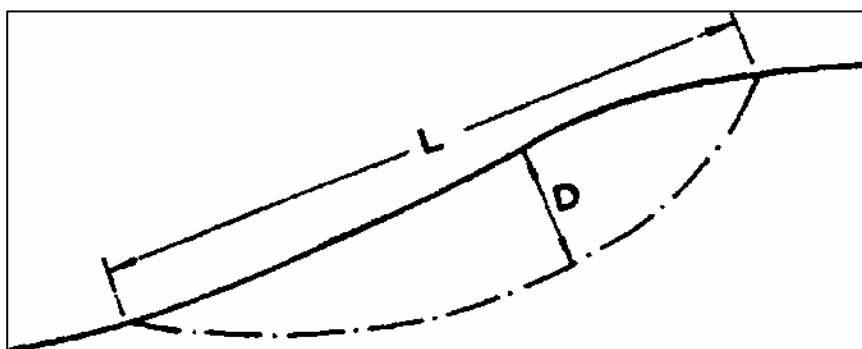
Στα επόμενα δίνεται μια γενική κατηγοριοποίηση των κατολισθήσεων, ενώ στα σχήματα 3.1 και 3.2 φαίνονται μερικές από αυτές (Λοϊζος, 1964).

- Απλή κατολίσθηση, η οποία είναι περιορισμένης έκτασης και έχει σαφές περίγραμμα. Σ' αυτή την κατηγορία εμφανίζεται ρήγμα στην κορυφή και διόγκωση στο πόδι, ενώ η επιφάνεια ολίσθησης βρίσκεται σε μικρό σχετικά βάθος. Επίσης, στην απλή ολίσθηση, υπάγονται όλες οι διαταράξεις ισορροπίας του εδάφους που οφείλονται στην ανθρώπινη παρέμβαση, όπως για παράδειγμα η αποκοπή πρανών. Αιτία της απλής ολίσθησης είναι η για οποιοδήποτε λόγο διατάραξη της ισορροπίας του υλικού υπό την επίδραση εξωτερικών δυνάμεων, όπως είναι οι σεισμοί και οι βροχοπτώσεις. Τέλος, οι κατολισθήσεις της κατηγορίας αυτής επέρχονται σε σύντομο χρονικό διάστημα.
- Ερπυσμός. Στην περίπτωση του ερπυσμού, δεν υπάρχει σαφές περίγραμμα όπως στην απλή κατολίσθηση, δηλαδή δεν διακρίνονται η κορυφή και το πόδι αυτής. Κύριο χαρακτηριστικό του ερπυσμού είναι η μεγάλη έκταση της μετακίνησης και η μεγάλη χρονική διάρκεια αυτής. Στις περιοχές όπου εμφανίζεται ερπυσμός μπορεί να εμφανιστούν δευτερογενώς απλές ολισθήσεις, σε θέσεις στις οποίες η αντοχή του εδάφους είναι μικρή.
- Μετακίνηση με ροή. Στις περιπτώσεις που το έδαφος αποτελείται από μαλακή άργιλο μικρής συνοχής και κορεσμένη, η μετακίνηση γίνεται με τη μορφή ροής όπως σε ένα υγρό με μεγάλο ιξώδες. Όπως και στον ερπυσμό, η μετακίνηση είναι μακροχρόνια και δεν υπάρχει σαφές περίγραμμα ολίσθησης. Η βασική διαφορά μεταξύ ροής και ερπυσμού είναι ότι για την πρώτη, η έκταση της μετακίνησης και το πάχος των μετακινούμενων εδαφών, είναι περιορισμένο και ίσο με το πάχος της μαλακής αργίλου.

Οι κατολισθήσεις μπορούν να κατηγοριοποιηθούν επίσης ανάλογα με το βάθος της επιφάνειας ολίσθησης, (επιφανειακές έως βαθιές), την ταχύτητα (εξαιρετικά αργή έως εξαιρετικά ταχεία) και τον όγκο του μετακινούμενου υλικού.



Εικ. 3.1 Κατολίσθηση ροής (Bromhead 1986)



Εικ. 3.2 Κυκλική επιφάνεια ολίσθησης D = Βάθος της επιφάνειας ολίσθησης, L = μήκος της επιφάνειας ολίσθησης (Skempton 1969)

3.1.4 Μηχανική των κατολισθήσεων

Το φαινόμενο των κατολισθήσεων εξετάζεται με διαφορετικό τρόπο προσέγγισης από τους γεωλόγους και τους μηχανικούς. Κατά την επιστήμη της γεωλογίας εξετάζεται το φαινόμενο της μετακίνησης μιας εδαφικής μάζας στην οποία δεν έχει παρέμβει ο ανθρώπινος παράγοντας. Στη μηχανική όμως των κατολισθήσεων εξετάζεται η επίδραση των τεχνικών έργων στην ισορροπία των εδαφών και αυτό καθορίζει το διαχωριστικό όριο μεταξύ των δύο επιστημών (Λοΐζος, 1964).

Η μηχανική των κατολισθήσεων αναφέρεται στην από στατικής πλευράς διερεύνηση της μετακίνησης εδαφών μέσω της ανάλυσης της ισορροπίας των εξωτερικών δυνάμεων που προκαλούν τη μετακίνηση, προς τις εσωτερικές δυνάμεις που αντιστέκονται σ' αυτή. Η ανάλυση αυτή αναφέρεται σε ένα πολύπλοκο σύστημα δυνάμεων, οι οποίες ενεργούν σε ανισότροπο και ανομοιογενές υλικό, ακανόνιστου σχήματος, γεγονός που καθιστά το πρόβλημα δύσκολο. Η απλούστερη μορφή ανάλυσης μετακίνησης εδάφους, είναι η ισορροπία πρανούς εδάφους το οποίο έχει σαφή γεωμετρικά και σταθερά μηχανικά

χαρακτηριστικά. Η απλοποιημένη αυτή μορφή ανάλυσης χρησιμοποιείται στα τεχνικά έργα, για την εύρεση των αιτιών και τη λήψη μέτρων για την ανάσχεση της κατολίσθησης (Βαλαλάς, 1975).

3.1.5 Αίτια των κατολισθήσεων

Τα αίτια που προκαλούν τις κατολισθήσεις, μπορούν να διαχωριστούν σε μηχανικά και φυσικοχημικά. Τα μηχανικά αίτια, ως επί των πλείστων, οφείλονται σε ανθρώπινη δράση επί των πρανών και σε σεισμικές δονήσεις, ενώ τα φυσικοχημικά στη δράση του εδαφικού νερού και την αποσάθρωση των πετρωμάτων. Τα αίτια αυτά είναι:

1. Μεταβολές στην κλίση των πρανών
2. Μεταβολές στο ύψος του πρανούς
3. Επιφορτίσεις από επιχωματώσεις, μπάζα και χωματερές
4. Σεισμοί και δονήσεις
5. Μεταβολές στην εδαφική υγρασία
 - αύξηση της υδροστατικής πίεσης => αύξηση βάρους
 - αύξηση της πίεσης των πόρων => μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων του πετρώματος
 - ηλεκτρο-οσμωτικά φαινόμενα (διαφορές στην λιθολογία εκατέρωθεν ασυνεχειών)
 - μεταβολές στον όγκο του πετρώματος => ρωγματώσεις αποξήρανσης διαβροχής (συρρίκνωση-διόγκωση).
6. Υπόγεια νερά
 - Απόπλυση διαλυτών ορυκτολογικών στοιχείων ή και της ορυκτής κόλλας
 - Φαινόμενα εσωτερικής διάβρωσης των λεπτομερέστερων στοιχείων.
 - Υδραυλική κλίση — υδραυλικό φορτίο — διαφορικές πιέσεις => εξώθηση σε κατολίσθηση (ιδιαίτερη μνεία στα υπό πίεση υπεδαφικά νερά).
7. Παγετός
8. Αποσάθρωση (μηχανική-χημική)-Ενυδάτωση αργίλων
9. Συνδυασμός των παραπάνω

3.1.6 Μέτρα αντιμετώπισης των κατολισθήσεων

Το πρόβλημα των μετακινούμενων εδαφών μπορεί να αντιμετωπιστεί με τις παρακάτω μεθόδους (Λοΐζος, 1964).

1. Μέθοδοι 'απεμπλοκής' από την περιοχή ολίσθησης.
2. Μέθοδοι ελέγχου της ολίσθησης με έργα ανάσχεσης.

Στη πρώτη κατηγορία περιλαμβάνονται οι εξής μέθοδοι:

- Εγκατάλειψη της θέσεως κατασκευής, κατά την οποία η κατασκευή μεταφέρεται σε πιο ασφαλή θέση.
- Ολική άρση της κατολίσθησης, όπου το υλικό (η κινούμενη μάζα που προξενεί την κατολίσθηση) σκάβεται και απορρίπτεται.
- Μερική άρση της κατολίσθησης στο πόδι.
- Πλήρης σταθεροποίηση του χαλαρού υλικού. Το χαλαρό υλικό γίνεται ευσταθές με την χρήση τσιμεντενέσεων στην περιοχή ολίσθησης, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η διατμητική του αντοχή. Στα συνεκτικά εδάφη οι τσιμεντενέσεις δημιουργούν κατακόρυφους στύλους, οι οποίες ενεργούν σαν σύστημα πασσάλων.
- Γεφύρωση όπου η ολισθαίνουσα περιοχή αποφεύγεται με γέφυρα, η οποία συνδέει τα δύο σταθερά άκρα της μετακινούμενης μάζας. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η θεμελίωση της γέφυρας να βρίσκεται σε σταθερό και αμετακίνητο έδαφος.

Στη δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνονται οι εξής μέθοδοι (Λοϊζος, 1964):

- Κατασκευές αντιστήριξης, όπως ποδαρικά, φράκτες, τοίχοι αντιστήριξης, κοχλιώσεις και πασσαλώσεις (χαλύβδινες, τσιμεντένιες ή ξύλινες).
- Αύξηση του λόγου των δυνάμεων που αντιστέκονται στην κατολίσθηση προς τις δυνάμεις που την προξενούν. Με τα μέτρα αυτά επιδιώκεται η ελάττωση του παρανομαστή του παραπάνω λόγου και η μείωση του αριθμητή. Ορισμένα από αυτά είναι τα εξής:
 - Αποστράγγιση (Επιφανειακή ή υπόγεια)
 - Αφαίρεση υλικών στο πόδι του πρανούς
 - Αντικατάσταση του υλικού με ελαφρύ επίχωμα
 - Διαμόρφωση ήπιας κλίσης στην κορυφή
 - Σταθεροποίηση με χημική επεξεργασία

3.2.Μέθοδοι Ανάλυσης Σταθερότητας Πρανών και Συντελεστές Ασφάλειας

3.2.1 Εισαγωγή

Η ανάλυση ευστάθειας πραγματοποιείται ώστε να εκτιμηθεί η ασφάλεια και η λειτουργικότητα της εκσκαφής ενός πρανού ή / και οι οριακές συνθήκες (equilibrium conditions) ενός φυσικού πρανού. Η επιλογή της τεχνικής με την οποία θα πραγματοποιηθεί η ανάλυση εξαρτάται τόσο από τις συνθήκες που βρίσκεται το πρανές, όσο και από τον τρόπο που αστοχεί (mode of failure) και γίνεται με προσεκτική θεώρηση των αδυναμιών και των περιορισμών της κάθε μεθόδου.

Μέχρι και πριν από 25 χρόνια, οι περισσότερες μέθοδοι ανάλυσης είτε γινόντουσαν γραφικά είτε με τη βοήθεια υπολογιστή τσέπης, με εξαίρεση κάποιες πολύπλοκες για την εποχή αναλύσεις (για παράδειγμα η εύρεση του κρίσιμου κύκλου ολίσθησης σε πρόγραμμα Fortran). Στις μέρες μας ο μηχανικός διαθέτει ένα ευρύ φάσμα μεθόδων για την ανάλυση ευστάθειας πρανών. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιήσει πολύ εύκολα, υπολογιστικά προγράμματα, τα οποία δίνουν σχετικά γρήγορα αποτελέσματα για σύνθετα προβλήματα. (Ε. Καβουσάνος)

3.2.2 Μέθοδοι Ανάλυσης

Η ανάλυση ευστάθειας πρανών εμπίπτει στη γενικότερη κατηγορία των γεωμηχανικών προβλημάτων, η επίλυση των οποίων μπορεί να γίνει με τις εξής μεθόδους (Αγιουτάντης 2002):

1. Εμπειρικές μέθοδοι, όπου οι λύσεις βασίζονται σε συσχετίσεις αιτιών και αποτελεσμάτων που έχουν παρατηρηθεί.
2. Αναλυτικές μέθοδοι των προβλημάτων, όπου προϋποθέτουν την ύπαρξη αναλυτικής λύσης των εξισώσεων που διέπουν το πρόβλημα (καταστατικές εξισώσεις) για τις ίδιες συνοριακές συνθήκες.
3. Αριθμητικές μέθοδοι όπου γίνεται αριθμητική επίλυση των εξισώσεων που διέπουν το πρόβλημα. Το κύριο πλεονέκτημα αυτών των μεθόδων σε σχέση με τις αναλυτικές μεθόδους είναι ότι λαμβάνουν υπόψη τις παραμορφώσεις των υλικών εξαιτίας των δυνάμεων.
4. Συνδυασμός των παραπάνω

Με βάση τον Nash (1987), οι αναλυτικές μέθοδοι ταξινομούνται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

1. Στις μεθόδους εκείνες όπου η επίλυση γίνεται με πρώτου βαθμού εξισώσεις με μονοσήμαντη τιμή του αγνώστου (γραμμικές μέθοδοι) και οι οποίες περιλαμβάνουν:
 - Την απειροστική ανάλυση (μέθοδο πρηνούς μεγάλου μήκους)
 - Την ανάλυση σφηνοειδούς τεμάχους
 - Τη μέθοδο $\varphi_u = 0$
 - Τη Σουηδική μέθοδο
2. Στις μεθόδους εκείνες, όπου η λύση προκύπτει από εξισώσεις με διαδοχικές επαναλήψεις για διάφορες τιμές του αγνώστου με σκοπό τη προσέγγιση του συντελεστή ασφάλειας (μη γραμμικές μέθοδοι) και οι οποίες περιλαμβάνουν:
 - Τη μέθοδο Bishop
 - Την απλοποιημένη μέθοδο Janbu
 - Τη μέθοδο Spencer
 - Τη μέθοδο Morgenstern and Price

Οι κυριότερες αριθμητικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την επίλυση γεωτεχνικών προβλημάτων είναι (Αγιουτάντης, 2002):

1. Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (finite element method).
2. Μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών (finite difference method).
3. Μέθοδος των συνοριακών στοιχείων (boundary element method).
4. Μέθοδος των διακριτών στοιχείων (distinct element method).
5. Υβριδικές μέθοδοι (hybrid methods), οι οποίες συνδυάζουν χαρακτηριστικά από δύο ή περισσότερες μεθόδους.

3.2.3 Συντελεστές Ασφάλειας

Αυτή την περίοδο, οι δύο κύριες κατηγορίες μεθόδων στατικής ανάλυσης σταθερότητας πρηνών είναι οι αναλύσεις των οριακών συνθηκών ισορροπίας (equilibrium analyses) και οι αναλύσεις τάσης – παραμόρφωσης (stress – deformation analyses).

Οι αναλύσεις οριακών συνθηκών ισορροπίας είναι οι συνηθέστερα χρησιμοποιημένες μέθοδοι για τη σταθερότητα των πρηνών, κυρίως χάρη στη σχετική απλότητά τους και την οικειότητα των μηχανικών με αυτές. Η θεμελιώδης υπόθεσή τους είναι ότι η αστοχία

εμφανίζεται μέσω της ολίσθησης ενός τεμαχίου ή μιας μάζας κατά μήκος μιας επιφάνειας ολίσθησης, ενώ η κύρια ανεπάρκειά τους είναι ότι παραμελούν τη συμπεριφορά των υλικών σύμφωνα με την καταστατική εξίσωση τάσης – παραμόρφωσης. Η σταθερότητα πρηνών εκφράζεται συνήθως από την άποψη ενός παράγοντα ασφάλειας (FS) που καθορίζεται ως εξής:

$$FS = \frac{\text{διατμητική αντοχή του εδάφους ή της βραχώμαζας}}{\text{διατμητική τάση στην πιθανή επιφάνεια ολίσθησης}}$$

όπου ο παρονομαστής συμπίπτει με την ελάχιστη διατμητική αντοχή που απαιτείται για να αποτρέψει την αστοχία. Χωρίς τη γνώση της ακριβούς θέσης και της μορφής της επιφάνειας ολίσθησης, η πιθανή επιφάνεια αποτυχίας υποτίθεται ότι συχνά είναι κυκλική ή ελλειψοειδής για να διευκολύνει την ανάλυση. Η τελική αξιολόγηση της σταθερότητας πρηνών ολοκληρώνεται με την επανάληψη του υπολογισμού για διάφορες επιφάνειες ολίσθησης, με σκοπό τον προσδιορισμό του ελάχιστου παράγοντα της ασφάλειας (Lambe και Whitman, 1969).

Από την άλλη, οι αναλύσεις τάσης - παραμόρφωσης επιτρέπουν την εκτίμηση της συμπεριφοράς των υλικών σύμφωνα με την καταστατική εξίσωση τάσης – παραμόρφωσης, και συνηθέστερα εφαρμόζονται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο πεπερασμένων - στοιχείων. Η ευρέως εφαρμοζόμενη μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων στη μηχανική έχει διαδοθεί λόγω της δυνατότητας της μεθόδου να αντιμετωπίσει τυχόν ανώμαλη γεωμετρία, σύνθετες συνοριακές συνθήκες, μη γραμμική συμπεριφορά τάσης - παραμόρφωσης, και συνδυασμό τάσεων – πίεσης πόρων. Εντούτοις, ένας ‘δείκτης της αστοχίας’ (όπως ο συντελεστής ασφάλειας που καθορίζεται στις αναλύσεις οριακών συνθηκών ισορροπίας) έπρεπε να ενσωματωθεί στο γεωτεχνικό λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων.

Ο καθορισμός αυτού του ‘δείκτη αστοχίας’, βασίστηκε στον προηγούμενο συντελεστή ασφάλειας, ο οποίος μπορεί εναλλακτικά να οριστεί ως "ο παράγοντας κατά τον οποίο η διατμητική αντοχή πρέπει να μειωθεί ώστε να φέρει ένα πρηνές στα πρόθυρα της αστοχίας" (Duncan 1996). Αυτός ο καθορισμός αναφέρεται συνήθως ως τεχνική μείωσης διατμητικής αντοχής (ΜΔΑ), ή τεχνική μείωσης $\phi(\varphi)$ -c (φ-εσωτερική γωνία τριβής, c- συνοχή του υλικού) όπως εφαρμόζεται συνήθως στα ελαστοπλαστικά - Mohr-Coulomb υλικά (Brinkgreve και Bakker, 1991). Με τη χρήση αυτής της μεθοδολογίας, η διατμητική αντοχή του υλικού μειώνεται σταδιακά έως ότου προκληθεί η κατάρρευση του πρηνούς.

Οι τιμές που μπορεί να πάρει ο συντελεστής ασφάλειας είναι μεγαλύτερες του μηδέν. Για τιμές αυτού κοντά στη μονάδα η ισορροπία του πρηνούς βρίσκεται σε οριακά επίπεδα, ενώ για τιμές μεγαλύτερες του 1.5 μπορεί να θεωρηθεί ότι το πρηνές είναι σταθερό.

Γενικά, όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής ασφάλειας, τόσο ο μηχανικός, με όποια μέθοδο κι αν έχει πραγματοποιήσει την ανάλυση ενός πρανούς, μπορεί να θεωρήσει ασφαλή την κατασκευή που μελετά.

Κεφάλαιο 4

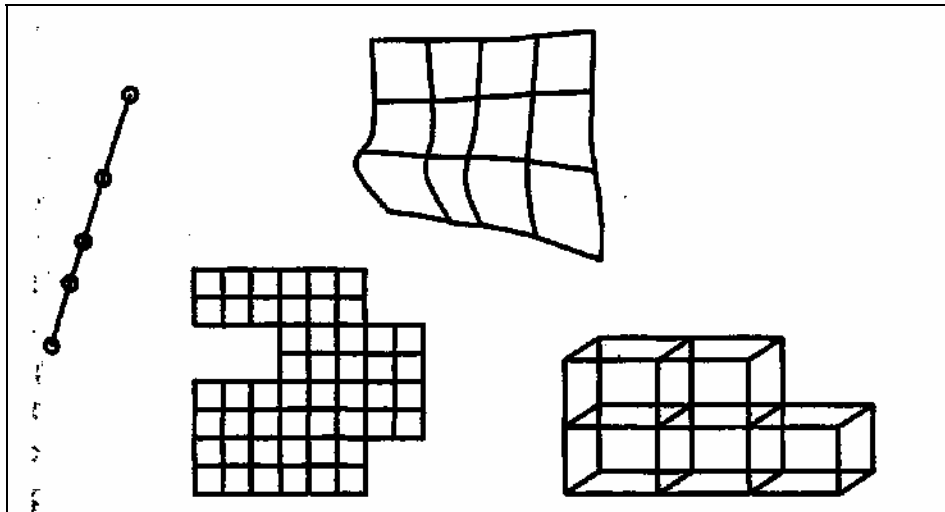
Τα Πεπερασμένα Στοιχεία και το Λογισμικό Πακέτο PLAXIS

4.1 Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων

4.1.1 Περιγραφή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων

Στη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (ΜΠΣ) υπολογίζονται τα άγνωστα μεγέθη σε κόμβους οι οποίοι δημιουργούνται από τη διαίρεση του πεδίου σε στοιχεία. Στη συνέχεια, με τη θεώρηση κατάλληλων συναρτήσεων είναι δυνατόν να υπολογιστεί η τιμή των μεγεθών αυτών σε κάθε σημείο του πεδίου με τους κόμβους του στοιχείου αυτού. Η εφαρμογή της ΜΠΣ σε προβλήματα ελαστικότητας σε δύο ή τρεις διαστάσεις περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια (Αγιουτάντης, 2002):

1. Διαίρεση του πεδίου που εξετάζεται σε κατάλληλης γεωμετρίας στοιχεία (διακριτοποίηση) (Εικόνα 4.1).
2. Επιλογή των συναρτήσεων για την κατανομή των μεταβλητών σε κάθε στοιχείο.
3. Προσδιορισμό των συναρτήσεων που συνδέουν την ανηγμένη παραμόρφωση με τη μετατόπιση και των συναρτήσεων που συνδέουν την τάση με την ανηγμένη παραμόρφωση, ώστε να συνδεθεί το αίτιο (τάση, δύναμη) με το αποτέλεσμα (μετατόπιση) που αποτελεί και το άγνωστο μέγεθος.
4. Άθροιση σε κάθε κόμβο των εξισώσεων των στοιχείων για τον προσδιορισμό του τελικού συστήματος και εισαγωγή των συνοριακών συνθηκών.
5. Υπολογισμό της εντατικής κατάστασης κάθε στοιχείου ως συνάρτηση των μετατοπίσεων στους κόμβους του στοιχείου.
6. Υπολογισμός των δευτερογενών μεγεθών που προκύπτουν από την επίλυση.
7. Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.



Εικ. 4.1 Είδη στοιχείων για τον διαχωρισμό πεδίου (Αγιουτάντης, 2002)

4.1.2 Διακριτοποίηση

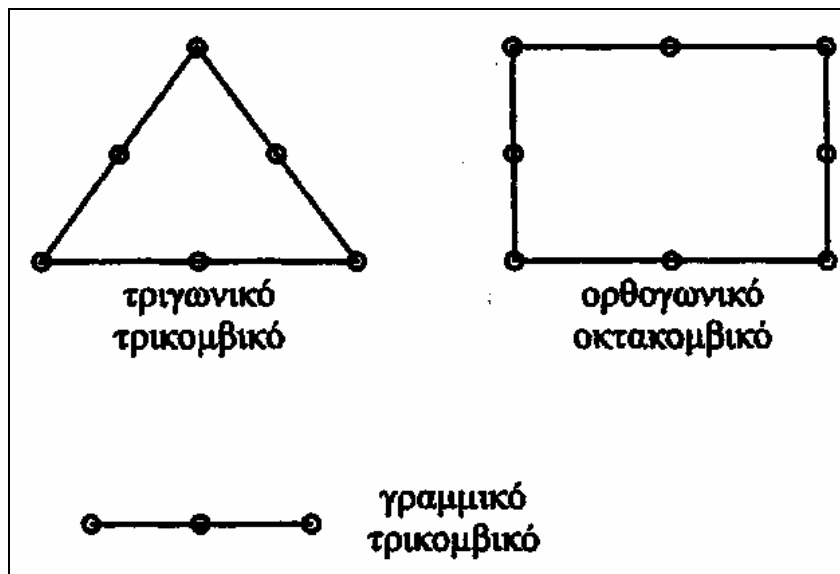
Απαραίτητο στοιχείο για την εφαρμογή της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων είναι η διακριτοποίηση, δηλαδή η διαίρεση του μέσου σε στοιχεία ή τμήματα με τη βοήθεια ιδεατών γραμμών ή επιφανειών. Τα στοιχεία αυτά αποτελούνται από δύο ή περισσότερους κόμβους, οι οποίοι συνδέονται με καμπύλα ή ευθύγραμμα τμήματα. Οι κορυφές των στοιχείων ορίζουν τους κόμβους του πλέγματος ή καννάβου. Χαρακτηριστικές μορφές στοιχείων είναι τα:

- μονοδιάστατα ή γραμμικά,
- τα τριγωνικά και τα
- ορθογωνικά ή γενικότερα τετραπλευρικά (quadrilateral)

όσον αφορά τις δύο διαστάσεις, ενώ για τρισδιάστατη δομή του μέσου:

- πυραμιδοειδή και
- πρισματικά.

Οι απλούστερες μορφές στοιχείων είναι αυτές που χαρακτηρίζονται από το ότι ο αριθμός των κόμβων των στοιχείων είναι ίσος με τον αριθμό των πλευρών όπως για παράδειγμα τριγωνικά και τρικομβικά στοιχεία, τετραπλευρικά και τετρακομβικά (επίπεδα) στοιχεία, πυραμιδοειδή και τετρακομβικά (στερεά) στοιχεία, κλπ. Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις, όπου ένα στοιχείο περιγράφεται από παραπάνω κόμβους και προκύπτουν τριγωνικά εξακομβικά στοιχεία, τετραπλευρικά και οκτακομβικά (επίπεδα) στοιχεία κλπ (Εικόνα 4.2) (Αγιουτάντης, 2002).



Εικ. 4.2 Είδη στοιχείων (Αγιουτάντης, 2002)

4.1.3 Χαρακτηριστικά της διαίρεσης του πεδίου

Ένας σημαντικός παράγοντας για τη σωστή και επιτυχημένη προσομοίωση της συμπεριφοράς ενός σώματος με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, είναι η κατάλληλη διαίρεση του σώματος (πεδίου) σε επιμέρους τμήματα (στοιχεία). Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει τις ακόλουθες παραμέτρους (Αγιουτάντης, 2002):

- Την επιλογή της γεωμετρικής μορφής του στοιχείου.
- Την επιλογή του αριθμού κόμβων του στοιχείου.
- Την επιλογή των συναρτήσεων μορφής κάθε στοιχείου.
- Την επιλογή της πυκνότητας του καννάβου.

Η συνήθης πρακτική όσον αφορά την επιλογή των διαστάσεων και τη μορφή των στοιχείων είναι ότι χρησιμοποιούνται μικρότερα στοιχεία εκεί που αναμένονται μεγάλες μεταβολές των υπολογιζόμενων μεταβλητών. Η διαίρεση του πεδίου γίνεται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε το μέγεθος των στοιχείων να είναι μικρό στα σημεία όπου απαιτείται μεγάλη ακρίβεια στους υπολογισμούς, ή εκεί που αναμένεται έντονη μεταβολή του ζητούμενου μεγέθους, ενώ το μέγεθος των στοιχείων είναι μεγαλύτερο στις υπόλοιπες περιοχές του πεδίου (Αγιουτάντης, 2002).

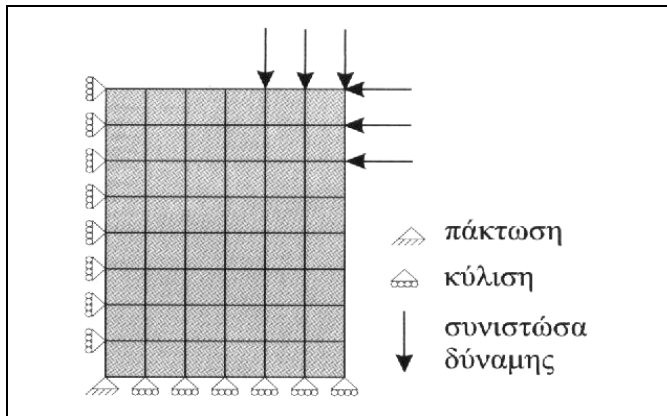
4.1.4 Φόρτιση των υλικών και συνοριακές συνθήκες

Από τη θεωρητική ανάπτυξη των προβλημάτων ελαστικότητας, προκύπτει ότι η φόρτιση των υλικών (αίτιο) ή η φόρτιση αντίστοιχα του διαιρεμένου πεδίου που αντιπροσωπεύει το υλικό, είναι δυνατό να επιτευχθεί με τους ακόλουθους τρόπους (Αγιουτάντης, 2002):

- Επιβολή δυνάμεων πεδίου στη μάζα του στοιχείου (π.χ. βαρυτικές δυνάμεις).
- Επιβολή σημειακών δυνάμεων στους κόμβους του στοιχείου.
- Επιβολή κατανεμημένων δυνάμεων στις πλευρές του στοιχείου.
- Επιβολή μετατοπίσεων στους κόμβους των στοιχείων.

Η εισαγωγή συνοριακών συνθηκών (Εικόνα 4.3) είναι απαραίτητη για την επίλυση του προβλήματος και συνήθως εκφράζεται με τις συνθήκες ισορροπίας του πεδίου (π.χ. αγκύρωση των κατώτερων ή/και πλευρικών κόμβων). Η φόρτιση του υλικού αποτελεί επίσης κατά κάποιο τρόπο μια συνοριακή συνθήκη, καθώς σε αντίθετη περίπτωση, η υπολογιζόμενη παραμόρφωση είναι μηδενική. Στην περίπτωση που φορτιστεί ένα σώμα και όλοι οι κόμβοι του είναι ελεύθεροι να μετακινηθούν, τότε δεν υφίσταται παραμόρφωση, αλλά απλή μετακίνηση. Όπως φαίνεται και από τα προηγούμενα υπάρχουν τρεις τύποι συνοριακών συνθηκών (Αγιουτάντης, 2002):

1. Προσδιορισμός της ζητούμενης παραμέτρου (μετατόπισης). Οι συνθήκες αυτές ονομάζονται γεωμετρικές και είναι γνωστές και ως συνθήκες Dirichlet.
2. Προσδιορισμός της μεταβολής της ζητούμενης παραμέτρου (παράγωγος της μετατόπισης). Οι συνθήκες αυτές ονομάζονται φυσικές συνοριακές συνθήκες και είναι γνωστές ως συνθήκες Newman.
3. Προσδιορισμός και των δύο παραμέτρων ή μικτές συνθήκες.



Εικ. 4.3 Συμβολισμός συνοριακών συνθηκών
(Αγιουτάντης, 2002)

4.1.5 Μοντέλα συμπεριφοράς των υλικών

Η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου συμπεριφοράς του υλικού, καθώς και η επιλογή των τιμών των σταθερών του μοντέλου αυτού, συνιστά έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες για την επιτυχημένη προσομοίωση της συμπεριφοράς φυσικών υλικών. Το απλούστερο μοντέλο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι το γραμμικά ελαστικό μοντέλο (παρόλο που το μοντέλο αυτό δεν θεωρείται το πλέον κατάλληλο για την περιγραφή της συμπεριφοράς πετρωμάτων και εδαφικών υλικών) σε μια, ή περισσότερες διαστάσεις. Το υλικό θεωρείται ότι παραμορφώνεται γραμμικά και ισότροπα, όπως δίνεται από την ακόλουθη σχέση (Αγιουτάντης, 2002):

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \left[\varepsilon_{ij} + \frac{\nu}{1-2\nu} \varepsilon_{kk} \delta_{ij} \right]$$

Για την περίπτωση της παραμόρφωσης σε μια διάσταση, είναι:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

όπου, σ = η τάση που επιβάλλεται στο υλικό,

E = το μέτρο ελαστικότητας του,

ε = η ανηγμένη παραμόρφωση που αυτό επιδέχεται.

4.1.6 Κριτήρια αστοχίας των γεωϋλικών

Στις περιπτώσεις όπου λόγω της φόρτισης του υλικού, αυτό είναι δυνατόν να αστοχήσει, θα πρέπει μαζί με την καταστατική συμπεριφορά του, να οριστεί και το αντίστοιχο κριτήριο αστοχίας. Τα μοντέλα αστοχίας ενός υλικού είναι δυνατόν να επιδράσουν με δύο τρόπους (Αγιουτάντης, 2002) :

- Με τη θεώρηση ότι ένα στοιχείο αστοχεί, όταν η εντατική κατάσταση υπερβαίνει το όριο αντοχής του υλικού και να εμποδίσει το στοιχείο αυτό να υποβληθεί σε μια μεγαλύτερη εντατική κατάσταση.
- Με τη θεώρηση ότι το υλικό αστόχησε στην παραπάνω εντατική κατάσταση, να μειώσουν κατάλληλα τις ελαστικές ή πλαστικές σταθερές των στοιχείων, ώστε να προσομοιώσουν την αστοχία.

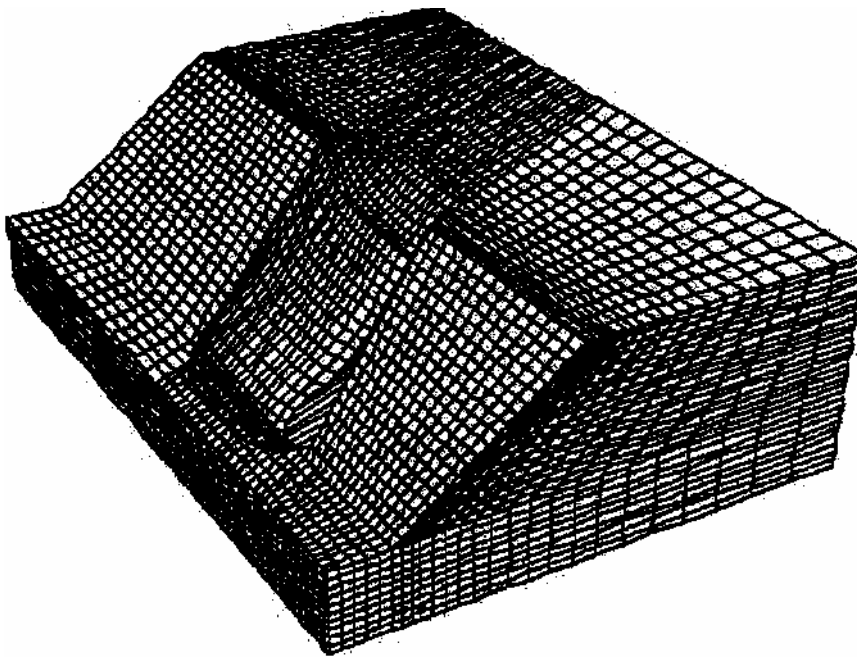
Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται συχνότερα για πετρώματα και εδαφικά υλικά είναι τα εξής :

- Mohr - Coulomb
- Tresca
- von Mises
- Drucker - Prager

4.1.7 Ανάλυση ευστάθειας πρανών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

Οι συμβατικές μέθοδοι της ανάλυσης της ευστάθειας πρανών που βασίζονται στη θεωρία της οριακής ισορροπίας, έχουν χρησιμοποιηθεί ευρύτατα στο παρελθόν λόγω της απλότητας και της εφαρμοστικότητάς τους. Παρόλα αυτά όμως αυτές οι μέθοδοι δεν παρέχουν στοιχεία για το μηχανισμό ολίσθησης, δεν κάνουν θεώρηση του επί τόπου τασικού πεδίου και δεν λαμβάνουν υπόψη τις παραμορφώσεις του υλικού (Stead, 2001).

Αντίθετα στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, παρέχεται ανάλυση της παραμόρφωσης και της κατανομής των τάσεων σε ένα υλικό. Σε αντίθεση με τις απλουστευμένες μεθόδους, η προσέγγιση με τη βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να αντιμετωπίσει σύνθετες ακολουθίες φόρτισης, όπου ο μηχανισμός και η επιφάνεια ολίσθησης μπορούν να προσδιοριστούν (Εικόνα 4.4) (Stead, 2001).



Εικ. 4.4 Τρισδιάστατο μοντέλο όπου φαίνεται η επιφάνεια ολίσθησης (Stead, 2001)

4.2 Το λογισμικό πακέτο PLAXIS

4.2.1 Εισαγωγή

Το λογισμικό πακέτο PLAXIS είναι ένα πρόγραμμα ειδικευμένο στην ανάλυση παραμορφώσεων και ανάλυση ευστάθειας σε γεωτεχνικά προβλήματα. Οι γεωτεχνικές εφαρμογές απαιτούν υψηλής ακρίβειας μοντέλα για την προσομοίωση της μη γραμμικής συμπεριφοράς και της χρονικά μεταβαλλόμενης συμπεριφοράς των εδαφών. Το PLAXIS διαθέτει τη δυνατότητα να επιλύσει πολύπλοκα γεωτεχνικά προβλήματα όπως καθιζήσεις, ευστάθεια πρανών, τοίχους αντιστήριξης και άλλα με ακρίβεια και σε σύντομο χρονικό διάστημα. Είναι αρκετά εύκολο στη χρήση, με φιλικό περιβάλλον και δουλεύει σε περιβάλλον Windows (95, 98, 2000, NT και XP). Αποτελείται από τα τέσσερα υποπρογράμματα :

- Το υποπρόγραμμα εισαγωγής δεδομένων
- Το υποπρόγραμμα υπολογισμών
- Το υποπρόγραμμα αποτελεσμάτων
- Το υποπρόγραμμα σχεδιασμού καμπυλών

Στη συνέχεια περιγράφονται εν συντομία τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους.

4.2.2 Πρόγραμμα εισαγωγής δεδομένων

Γενικές ρυθμίσεις

Το παράθυρο διαλόγου των γενικών ρυθμίσεων (general settings) εμφανίζεται στην αρχή κάθε νέου προβλήματος (Εικόνα 4.5). Σε αυτό το πρώτο στάδιο καθορίζονται:

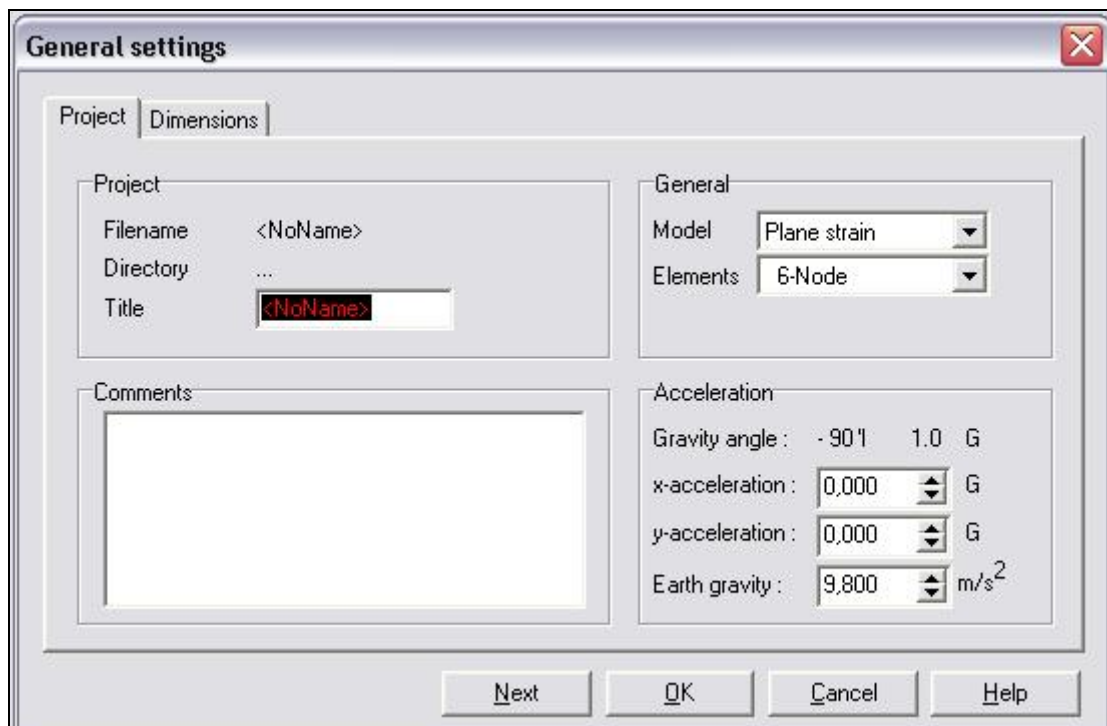
A. Υποπαράθυρο μοντέλου (Project)

1. Το όνομα του μοντέλου.
2. Ο τύπος της ανάλυσης (αξονοσυμμετρική ή επίπεδη παραμόρφωση).

3. Ο τύπος του στοιχείου (εξακομβικό ή δεκαπεντακομβικό).
4. Η επιτάχυνση της βαρύτητας.

B. Υποπαράθυρο διαστάσεων (Dimensions)

1. Μονάδες (μήκος - δύναμη - χρόνος).
2. Διαστάσεις περιοχής σχεδίασης.
3. Κάνναβος περιοχής σχεδίασης (πυκνότητα).



Εικ. 4.5 Παράθυρο γενικών ρυθμίσεων του μοντέλου

Γεωμετρία του μοντέλου

Η δημιουργία ενός μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων ξεκινάει με τη κατασκευή του γεωμετρικού προτύπου, το οποίο είναι αντιπροσωπευτικό του προβλήματος. Ένα γεωμετρικό πρότυπο αποτελείται από σημεία, γραμμές και επιφάνειες. Παράλληλα, μπορούν να εισαχθούν κατασκευαστικά αντικείμενα όπως αγκύρια και δοκοί, αλλά και ειδικές κατασκευές όπως για παράδειγμα σήραγγες.

Φορτία και συνοριακές συνθήκες

Το υπο-μενού των φορτίσεων περιέχει τις επιλογές έτσι ώστε να εισαχθούν τα καταναμεημένα φορτία, οι σημειακές δυνάμεις και οι προκαθορισμένες μετατοπίσεις στο γεωμετρικό μοντέλο.

- Κυλίσεις και πακτώσεις. Οι κυλίσεις και πακτώσεις (fixities), όπου οι πακτώσεις είναι συνδυασμός κυλίσεων, είναι προδιαγεγραμμένες μετατοπίσεις ίσες με μηδέν. Αυτές οι συνθήκες μπορούν να εφαρμοστούν στις γεωμετρικές γραμμές καθώς επίσης και στα γεωμετρικά σημεία στις κατευθύνσεις x και y .
- Προδιαγεγραμμένες μετατοπίσεις: Οι προδιαγεγραμμένες μετατοπίσεις είναι ειδικές συνθήκες που μπορούν να επιβληθούν στις γεωμετρικές γραμμές για να ελέγξουν τις μετατοπίσεις αυτών των γραμμών.
- Τυποποιημένες συνοριακές συνθήκες: Υπάρχει μια κατάλληλη επιλογή για να εφαρμοστούν οι συνοριακές συνθήκες που ισχύουν στις περισσότερες περιπτώσεις. Αυτές οι συνοριακές συνθήκες παράγονται σύμφωνα με τους ακόλουθους κανόνες:
 - Στο κατακόρυφο δεξί και αριστερό όριο του μοντέλου εφαρμόζεται κύλιση ως προς τον y -άξονα ($u_x=0$).
 - Στο κάτω οριζόντιο όριο του μοντέλου, εφαρμόζεται πάκτωση ($u_x=u_y=0$).
- Φορτία: Δύο ανεξάρτητα συστήματα φόρτισης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εφαρμογή σημειακών δυνάμεων και ελκτικών φορτίων.
 - Σημειακές Δυνάμεις: Οι σημειακές δυνάμεις (point forces) μπορούν να εφαρμοστούν σε οποιαδήποτε γεωμετρικό σημείο. Οι μονάδες των σημειακών δυνάμεων είναι δύναμη ανά μήκος.
 - Φορτία επιφάνειας: Τα φορτία επιφάνειας μπορούν να εφαρμοστούν σε οποιαδήποτε γεωμετρική γραμμή, όχι μόνο σε αυτές του περιγράμματος της γεωμετρίας. Οι μονάδες στις οποίες εισάγονται είναι μονάδες τάσης.

Ιδιότητες υλικών

Στο σημείο αυτό εισάγονται οι ιδιότητες των υλικών (material properties) και οι παράμετροι των εδαφικών στρώσεων του μοντέλου (Εικόνα 4.6).

The image shows a software dialog box titled "Mohr-Coulomb - marga". It has three tabs: "General", "Parameters", and "Interfaces". The "General" tab is selected. Inside the dialog, there are several input fields and sections:

- Material Set:**
 - Identification: marga
 - Material model: Mohr-Coulomb (dropdown menu)
 - Material type: Drained (dropdown menu)
- General properties:**
 - γ_{dry} : 15,000 kN/m³
 - γ_{wet} : 18,000 kN/m³
- Permeability:**
 - k_x : 8,640E-05 m/day
 - k_y : 8,640E-05 m/day
- Comments:** A large empty text area.
- Buttons:** "Next", "Ok", "Cancel", "Help", and an "Advanced..." button.

Εικ. 4.6 Παράθυρο εισαγωγής γενικών χαρακτηριστικών του υλικού

Μοντέλο υλικού

Το PLAXIS έχει τη δυνατότητα προσομοίωσης της συμπεριφοράς των εδαφικών στρώσεων με πέντε διαφορετικά μοντέλα (material models). Αυτά είναι:

1. Γραμμικά ελαστικό μοντέλο.
2. Μοντέλο Mohr – Coulomb.
3. Μοντέλο σκλήρυνσης εδάφους (Hardening soil model).
4. Μοντέλο μαλακού εδάφους (soft soil model).
5. Μοντέλο ερπυσμού μαλακού εδάφους (soft soil creep model).

Στην παρούσα διπλωματική μελετάται η συμπεριφορά των γεωυλικών της τομής ΔΔ', σύμφωνα με δύο μοντέλα συμπεριφοράς των υλικών. Στη πρώτη περίπτωση με το μοντέλο Mohr – Coulomb, σε κάθε εδαφικό υλικό που απαντάται στην τομή, ενώ στη δεύτερη περίπτωση με το μοντέλο σκλήρυνσης εδάφους (Hardening soil model). Το μοντέλο σκλήρυνσης εδάφους αφορά υλικά ελαστοπλαστικής – υπερβολικής συμπεριφοράς και συνήθως χρησιμοποιείται για την προσομοίωση υλικών όπως άμμοι, αμμοχάλικα και οι άργιλοι. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ο λιγνίτης και η μάργα έχουν οριστεί να συμπεριφέρονται σύμφωνα με αυτό το μοντέλο ενώ τα υπόλοιπα πετρώματα με το Mohr – Coulomb.

Όσον αφορά τον τύπο συμπεριφοράς του υλικού σχετικά με την αποστράγγιση μπορεί να επιλεγεί:

- Στραγγιζόμενη (drained) συμπεριφορά, κατά την οποία δεν δημιουργούνται υπερπίεσεις πόρων. Αυτό συμβαίνει στην περίπτωση ξηρών εδαφών, καθώς και όταν γίνεται πλήρης αποστράγγιση λόγω υψηλής διαπερατότητας των υλικών (άμμος).
- Μη στραγγιζόμενη (undrained) συμπεριφορά, όπου γίνεται πλήρης ανάπτυξη της πίεσης πόρων.
- Non – porous συμπεριφορά για την άκρως μη πορώδη δομή ενός υλικού. Αυτός ο τύπος υλικού εφαρμόζεται συνήθως στις διεπαφές, προκειμένου να εμποδιστεί εντελώς η ροή νερού μέσω των τοίχων ή άλλων αδιαπέραστων δομών.

Στη συνέχεια εισάγονται οι γενικές ιδιότητες του υλικού, δηλαδή το ξηρό και υγρό φαινόμενο βάρος (γ_{dry} και γ_{wet}), καθώς και η διαπερατότητα k . Το πρόγραμμα έχει την δυνατότητα να διαχωρίζει την οριζόντια διαπερατότητα (k_x) από την κατακόρυφη (k_y), αφού σε ορισμένους τύπους εδαφών έχει μεγάλη διαφορά.

Στο υποπαράθυρο των παραμέτρων εισάγονται τα χαρακτηριστικά ακαμψίας και αντοχής του υλικού. Αυτά είναι:

- Το μέτρο ελαστικότητας του Young (E), το οποίο χρησιμοποιείται σαν βασική σταθερά του ελαστικού μοντέλου και του μοντέλου Mohr - Coulomb ενώ αυτόματα υπολογίζονται κάποιες εναλλακτικές σταθερές όπως είναι το μέτρο ελαστικότητας G

και το μέτρο ελαστικότητας E_{oed} (Hoek), το οποίο προκύπτει από τη δοκιμή μονοδιάστατης στερεοποίησης. Η επιλογή του E για τα εδαφικά μοντέλα θα πρέπει να γίνεται με προσοχή, δεδομένου ότι πολλά γεωϋλικά παρουσιάζουν μη γραμμική συμπεριφορά από την έναρξη της φόρτισης.

- Ο λόγος Poisson ν , ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της εγκάρσιας προς την αξονική ανηγμένη παραμόρφωση σε μονοαξονική θλίψη (Αγιουτάντης, 2002).
- Η συνοχή του υλικού c , για την οποία το PLAXIS μπορεί να χρησιμοποιήσει και μηδενικές τιμές. Αυτό βέβαια θα πρέπει να αποφεύγεται καθώς μια τέτοια τιμή δημιουργεί δυσκολίες στην εκτέλεση των υπολογισμών. Για αυτό το λόγο θα πρέπει να εισάγεται μια ελάχιστη τιμή για τη συνοχή ($c > 0,2 \text{ kPa}$).
- Η γωνία εσωτερικής τριβής ϕ . Η εισαγωγή υψηλών τιμών της γωνίας εσωτερικής τριβής δυσκολεύει την προσπάθεια επίλυσης πλαστικής συμπεριφοράς υλικού και για αυτό θα πρέπει να αποφεύγονται τιμές μεγαλύτερες των 35 μοιρών.

Δημιουργία δικτύωματος στοιχείων

Για να πραγματοποιηθούν οι απαραίτητοι υπολογισμοί με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, απαιτείται η διαίρεση του γεωμετρικού μοντέλου σε στοιχεία (τα οποία, όπως έχει αναφερθεί, είναι τριγωνικά εξακομβικά ή τριγωνικά δεκαπεντακομβικά). Το PLAXIS παρέχει τη δυνατότητα αυτόματης δημιουργίας του δικτύωματος (mesh generation) και στη συνέχεια μπορεί να γίνει τοπική πύκνωση ανάλογα με το εξεταζόμενο πρόβλημα. Για την πραγματοποίηση ικανοποιητικών υπολογισμών θα πρέπει να γίνεται μια προκαταρκτική ανάλυση με αραιό δίκτυωμα και στη συνέχεια το δίκτυωμα να πυκνώνεται τοπικά ανάλογα με τις ανάγκες του προβλήματος.

Αρχικές συνθήκες

Μόλις δημιουργηθεί το γεωμετρικό μοντέλο και το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων έχει παραχθεί, πρέπει να οριστεί και η αρχική κατάσταση όσο αφορά την πίεση πόρων και τις τάσεις (initial conditions). Αυτό γίνεται στο στάδιο ορισμού των αρχικών συνθηκών που αποτελείται από δύο τμήματα:

α) Δημιουργία υδατικών συνθηκών: Με αυτή την επιλογή παράγονται οι αρχικές πιέσεις πόρων.

β) Δημιουργία αρχικών τάσεων: Με αυτή την επιλογή δημιουργούνται οι αρχικές τάσεις σε συνάρτηση με την αρχικά διαμορφωμένη γεωμετρία.

Το PLAXIS χρησιμοποιείται γενικά για την απεικόνιση της κατανομής των τάσεων στις οποίες γίνεται μια σαφής διάκριση μεταξύ των ενεργών πιέσεων πόρων, p_{active} , και των ενεργών τάσεων, σ' . Στις ενεργές πιέσεις πόρων γίνεται μια περαιτέρω διάκριση μεταξύ των πιέσεων πόρων σταθερής κατάστασης, (p_{steady}), και υπερπιέσεων πόρων (p_{excess}):

$$p_{active} = p_{steady} + p_{excess}$$

Η υπερπίεση των πόρων είναι η πίεση που εμφανίζεται λόγω της φόρτισης στο μοντέλο και ειδικότερα για εκείνα τα υλικά ο τύπος της συμπεριφοράς των οποίων (όσο αφορά την στράγγιση) θεωρείται μη στραγγιζόμενος.

Όταν δεν υπάρχουν πληροφορίες για την ύπαρξη υδροφορίας στο μοντέλο, τότε το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα σχεδιάζεται στο κατώτατο σημείο του γεωμετρικού μοντέλου και όλες οι πιέσεις πόρων λαμβάνονται ίσες με το μηδέν.

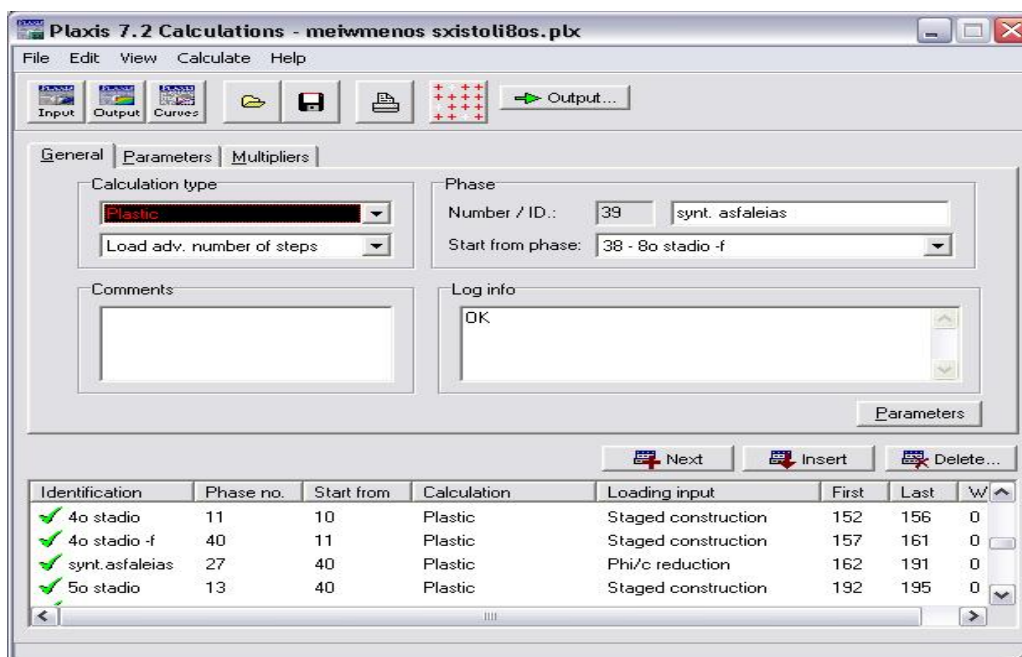
4.2.3 Υπολογισμοί

Μετά τη δημιουργία του μοντέλου των πεπερασμένων στοιχείων και τον καθορισμό των αρχικών συνθηκών, μπορεί να ξεκινήσει η διαδικασία των υπολογισμών (calculations). Το πρόγραμμα κάνει ανάλυση επίπεδης παραμόρφωσης (plane strain) και διαχωρίζει τους τύπους των υπολογισμών σε :

1. Ανάλυση πλαστικής συμπεριφοράς (plastic calculations).
2. Ανάλυση στερεοποίησης (consolidation analysis).
3. Ανάλυση ανανεωμένου καννάβου (update mesh analysis).

Στην Εικόνα 4.7 φαίνεται το παράθυρο ορισμού των υπολογισμών όπου καθορίζεται ο τύπος ανάλυσης. Επίσης ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει τον αριθμό των βημάτων και τον αλγόριθμο που θα χρησιμοποιηθεί. Οι αλγόριθμοι αυτοί είναι:

- Αλγόριθμος προοδευτικής φόρτισης τελικού σταδίου (load advancement ultimate level), όπου χρησιμοποιούνται αυτόματες διαδικασίες για τον καθορισμό του αριθμού των βημάτων επίλυσης της φάσης. Ο αλγόριθμος, χωρίς απαραίτητα να πραγματοποιήσει το συνολικό αριθμό των βημάτων επίλυσης, τερματίζει τους υπολογισμούς όταν επιτυγχάνεται ένα καθορισμένο επίπεδο φόρτισης ή κάποια φόρτιση οδηγεί σε αστοχία και ταυτόχρονα το σφάλμα διαδοχικών βημάτων, είναι μικρότερο του ορισμένου ($< 0,03$ ως προεπιλογή). Ο αριθμός των επιπλέον βημάτων καθορίζεται από τον χρήστη.
- Αλγόριθμος προοδευτικών βημάτων φόρτισης (load advancement number of steps), όπου ορίζεται ο αριθμός των βημάτων υπολογισμών ανά φάση. Αυτή η παράμετρος παίζει σημαντικό ρόλο μια και χρησιμοποιείται ο συνολικός αριθμός των βημάτων επίλυσης. Η επιλογή αυτή είναι κατάλληλη για περιπτώσεις όπου αναμένεται αστοχία κατά τη διάρκεια της ανάλυσης. Η ανάλυση ευστάθειας πρανών που γίνεται με τη διαδικασία μείωσης των παραμέτρων αντοχής, γίνεται μ' αυτή την επιλογή.

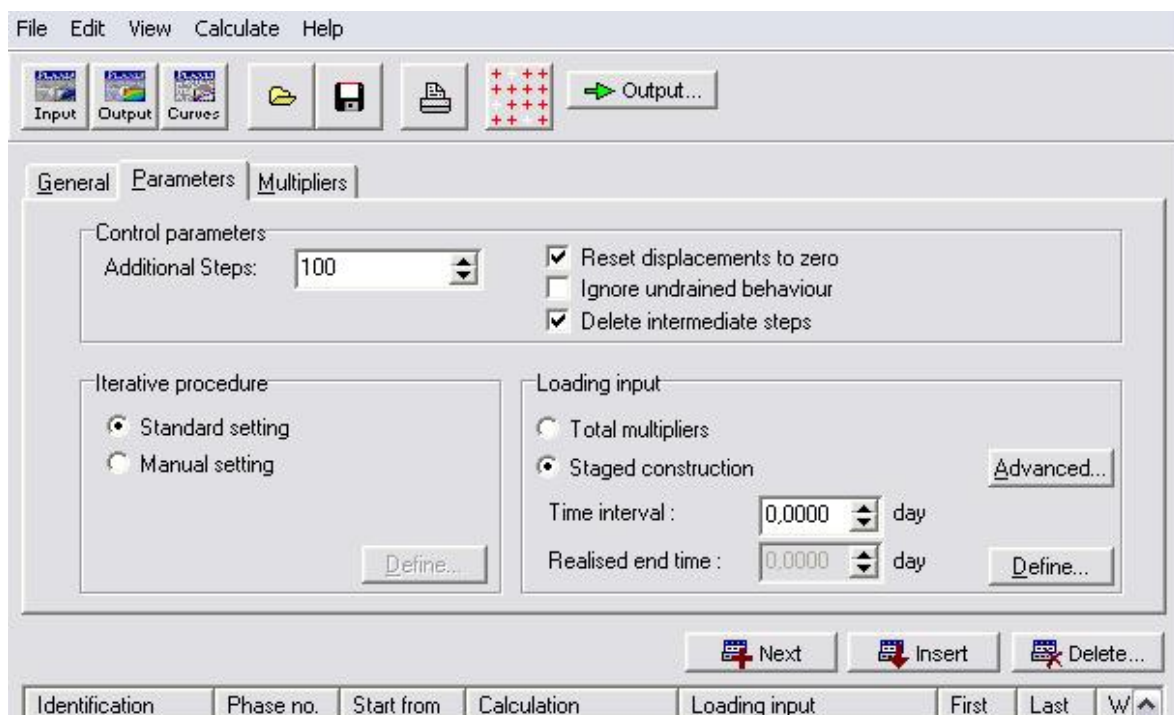


Εικ. 4.7 Παράθυρο υπολογισμών (γενικά στοιχεία)

Παράμετροι υπολογισμών

Σε αυτό το σημείο καθορίζονται οι παράμετροι υπολογισμού και παρέχονται οι εξής επιλογές:

- Επιπλέον βήματα (additional steps), όπου καθορίζεται ο μέγιστος αριθμός βημάτων που θα πραγματοποιηθούν σε μια φάση υπολογισμών.
- Μηδενισμός παραμορφώσεων (reset displacements to zero), όπου οι παραμορφώσεις που προέκυψαν σε μια προηγούμενη φάση δεν μας ενδιαφέρουν και η καινούρια φάση ξεκινάει με μηδενικές παραμορφώσεις.
- Αγνόηση της μη στραγγιζόμενης συμπεριφοράς (ignore undrained behavior), όταν είναι επιθυμητός ο προσωρινός αποκλεισμός τέτοιας συμπεριφοράς π.χ. όταν υπάρχουν μη στραγγιζόμενα υλικά.
- Διαγραφή ενδιάμεσων βημάτων (delete intermediate steps), όπου οι πληροφορίες – δεδομένα για όλα τα πρόσθετα βήματα υπολογισμών στη δεδομένη φάση διαγράφονται (εκτός από το τελευταίο) και αφού η φάση έχει ολοκληρωθεί με επιτυχία.
- Επαναληπτική διαδικασία (iteration procedure), όπου υπάρχει η δυνατότητα χρησιμοποίησης των καθορισμένων από το πρόγραμμα ρυθμίσεων (standard settings), ή της αλλαγής αυτών των ρυθμίσεων από το χρήστη (manual setting).
- Εισαγωγή φορτίσεων (loading input) που χρησιμοποιείται για να διευκρινίσει ποιος τύπος φόρτισης εξετάζεται στη συγκεκριμένη υπολογιστική φάση. Στην ανάλυση της πλαστικής συμπεριφοράς των υλικών, το PLAXIS διαθέτει τους ακόλουθους τύπους φορτίσεων:
 1. Φορτίσεις που εφαρμόζονται με αύξηση ή μείωση εξωτερικών δυνάμεων, που ενεργοποιούνται από τους μεταβαλλόμενους πολλαπλασιαστές για κάθε στάδιο φόρτισης (Incremental multipliers) ή τους συνολικούς πολλαπλασιαστές (total multipliers).
 2. Φορτίσεις που εφαρμόζονται με τη μεταβολή του βάρους, της δύναμης ή της ακαμψίας των στοιχείων και ενεργοποιούνται με την αλλαγή της γεωμετρίας ή της θέσης του επιπέδου του υδροφόρου του μοντέλου στη σταδιακή κατασκευή (stage construction).
 3. Φορτίσεις με σταδιακή μείωση των παραμέτρων αντοχής, ϕ και c για ανάλυση ευστάθειας, που ενεργοποιείται με ορισμό του πολλαπλασιαστή ΣMsf .



Εικ. 4.8 Παράθυρο υπολογισμών (παράμετροι)

Πιο συγκεκριμένα κατά τη σταδιακή κατασκευή είναι δυνατό να προσομοιωθούν οι διαδικασίες κατασκευής και εκσκαφής με την ενεργοποίηση και την απενεργοποίηση τμημάτων του μοντέλου. Αυτή η διαδικασία επιτρέπει την αξιολόγηση των δημιουργούμενων τάσεων και παραμορφώσεων π.χ. λόγω της εκσκαφής ενός ορύγματος. Η επιλογή “stage construction” χρησιμοποιείται επίσης για τον υποβιβασμό ή την άνοδο του επιπέδου του υδροφόρου ορίζοντα.

Η μείωση των παραμέτρων αντοχής (c και ϕ) είναι μια επιλογή που διαθέτει το PLAXIS για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφάλειας. Αυτή η επιλογή είναι διαθέσιμη μόνο στην περίπτωση που έχει επιλεγεί η ανάλυση της πλαστικής συμπεριφοράς του μοντέλου. Κατά τη διαδικασία της μείωσης των παραμέτρων αντοχής, οι παράμετροι $\tan\phi$ και c του εδάφους μειώνονται διαδοχικά μέχρι το μοντέλο να οδηγηθεί στην αστοχία.

Όπως είναι γνωστό, στη μηχανική των κατασκευών και των θεμελιώσεων, ο συντελεστής ασφάλειας ορίζεται πάντοτε ως ο λόγος του φορτίου που αντιτίθεται στην αστοχία προς το φορτίο που οδηγεί σε αυτή. Για εδαφικά σώματα όπως είναι οι επιχωματώσεις δρόμων / ποταμών ή και τα χωμάτινα φράγματα, η κατάσταση διαφέρει. Στην περίπτωση αυτή, το φορτίο που επικρατεί δεν προέρχεται άμεσα από μια εξωτερική δύναμη αλλά από το ίδιο το βάρος του εδάφους, επομένως ο ορισμός του συντελεστή

ασφάλειας στην εδαφομηχανική εκφράζεται πλέον από τη σχέση (Brinkgreve and Bakker, 1991):

$$\text{Συντελεστής ασφάλειας} = \frac{S}{S_c} = \frac{c + \sigma' \tan \phi}{c_c + \sigma' \tan \phi_c} \quad [4.1]$$

όπου: S = η διατμητική αντοχή, όπως ορίζεται από το κριτήριο Mohr-Coulomb,

S_c = η διατμητική τάση,

ϕ = η γωνία εσωτερικής τριβής του υλικού,

c = η συνοχή του υλικού,

σ' = η ορθή τάση στο θεωρούμενο επίπεδο αστοχίας.

Η σ' είναι η ενεργή τάση ενώ οι ϕ και c αποτελούν ενεργές παραμέτρους αντοχής του υλικού. Ο δείκτης c υποδεικνύει ότι πρόκειται για τιμές οριακής αντοχής για τις παραμέτρους για τις οποίες χρησιμοποιείται. Στην περίπτωση που $c = c_c$ και $\phi = \phi_c$ ο συντελεστής ασφάλειας της σχέσης [4.1] γίνεται ίσος με τη μονάδα και η ισορροπία εξασφαλίζεται οριακά. Ο παραπάνω ορισμός ταυτίζεται με τον κλασικό ορισμό όπως αυτός χρησιμοποιείται στην περίπτωση της ανάλυσης με κυκλική επιφάνεια ολίσθησης (Brinkgreve and Bakker, 1991).

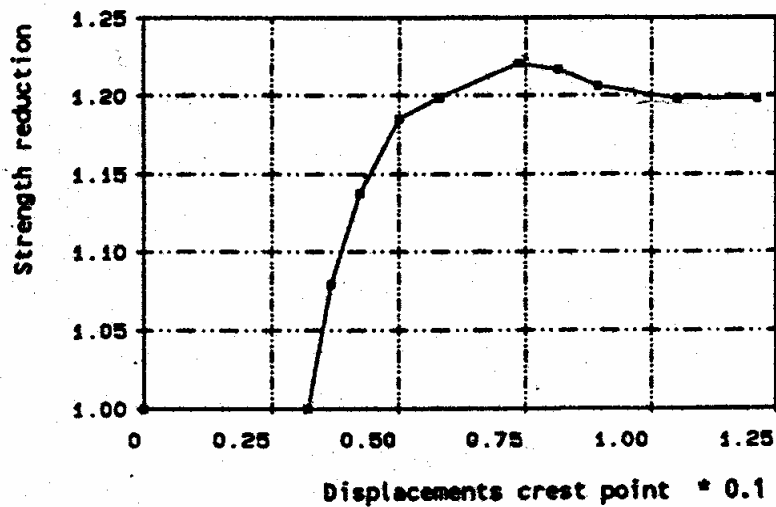
Με βάση τους Brinkgreve and Bakker (1991), ο συντελεστής ασφάλειας του εδαφικού πρανούς προκύπτει από την καμπύλη του συντελεστή ΣMsf που καθορίζει το ποσοστό της τάσης διάτμησης ως προς την διατμητική αντοχή του εδάφους συναρτήσει του μέτρου της μετατόπισης, για το σημείο που βρίσκεται πάνω στο φρύδι του πρανούς. Η μορφή της καμπύλης που σχηματίζεται είναι αυτή που απεικονίζεται στην Εικόνα 4.9.

Με τη σταδιακή μείωση των παραμέτρων της αντοχής των υλικών που συμμετέχουν στο πρότυπο του εδαφικού πρανούς, μειώνεται ο παρονομαστής του πηλίκου της σχέσης [4.1], επομένως αυξάνεται ο συντελεστής ΣMsf μέχρι μιας μέγιστης τιμής, σε σχετικά μικρές τιμές της αντίστοιχης παραμόρφωσης. Με περαιτέρω μείωση, η τιμή του συντελεστή αυτού πέφτει ελάχιστα, έως ότου η καμπύλη που σχηματίζεται επιπεδώνεται.

Πρακτικά λοιπόν μειώνονται οι παράμετροι αντοχής των υλικών έως ότου επιτευχθεί εκείνη η τιμή η οποία θα οδηγήσει το εδαφικό πρότυπο σε αστοχία. Η τιμή αυτή προκύπτει από την καμπύλη που εξετάζεται και αντιστοιχεί στην περιοχή επιπέδωσής της, εφόσον αναμένεται ο συντελεστής ασφάλειας να αποκτήσει μια σταθερή τιμή μετά την αστοχία και να μην μειώνεται περαιτέρω βάση του τύπου [4.2]:

$$SF = \frac{\text{διαθέσιμη αντοχή}}{\text{αντοχή κατά την αστοχία}} = \text{Τιμή του } \Sigma Msf \text{ στην αστοχία} \quad [4.2]$$

Ο λόγος της διατμητικής αντοχής προς την διατμητική τάση που οδηγεί σε αστοχία είναι ο συντελεστής ασφάλειας του συγκεκριμένου εδαφικού πρανούς που εξετάζεται.



Εικ. 4.9: Καμπύλη ΣMsf συναρτήσει της μετατόπισης του σημείου που βρίσκεται στο φρύδι του εδαφικού πρανούς (Brinkgreve and Bakker, 1991).

Με βάση λοιπόν τους Brinkgreve and Bakker (1991), η τιμή του συντελεστή ΣMsf η οποία αντιστοιχεί στην επιπέδωση της καμπύλης είναι ο συντελεστής ασφάλειας που αντιπροσωπεύει το δεδομένο πρότυπο. Ειδικότερα είναι:

$$\sum Msf = \frac{\tan \phi_{input}}{\tan \phi_{reduced}} = \frac{c_{input}}{c_{reduced}} \quad [4.3]$$

όπου ϕ_{input} και c_{input} οι τιμές των παραμέτρων αντοχής του υλικού που εισάγονται στην αρχή της διαδικασίας επίλυσης ενός προβλήματος και $\phi_{reduced}$ και $c_{reduced}$ οι κρίσιμες τιμές των παραμέτρων αυτών κατά την αστοχία.

Εκτέλεση διαδικασίας υπολογισμών

Στη συνέχεια ακολουθεί η διαδικασία εκτέλεσης των υπολογισμών, αφού πρώτα έχουν επιλεγεί κάποια σημεία για τη δημιουργία των γραφημάτων. Οι πληροφορίες που παρέχονται είναι οι εξής:

- Αριθμός βήματος και επανάληψης
- Συνολικό σφάλμα
- Ανεκτικότητα
- Σημεία αστοχίας
- Σημεία αστοχίας διεπιφανειών

- Ανακριβή τασικά σημεία
- Σημεία εφελκυσμού

4.2.4 Πρόγραμμα εξαγωγής αποτελεσμάτων

Οι κύριες ποσότητες που υπολογίζονται από το PLAXIS και παρουσιάζονται στο πρόγραμμα αποτελεσμάτων (output) είναι οι παραμορφώσεις στους κόμβους των στοιχείων και οι τάσεις στα τασικά σημεία. Μόλις τελειώσει ο υπολογισμός μίας ή περισσότερων φάσεων το πρόγραμμα παρέχει την δυνατότητα στο χρήστη να ελέγξει αυτά τα αποτελέσματα τα οποία είναι:

1. Οι παραμορφώσεις που έχουν επέλθει στο μοντέλο (strains). Οι ποσότητες των παραμέτρων απεικονίζονται σε μεγαλύτερη διάσταση από τη πραγματική ώστε τα τελικά διαγράμματα να είναι περισσότερο κατανοητά. Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζονται:
 - Παραμορφωμένο δικτύωμα στοιχείων
 - Συνολικές μετατοπίσεις
 - Συνολικές παραμορφώσεις
2. Οι τάσεις που αναπτύσσονται, όπου και εδώ απεικονίζονται σε μεγαλύτερη διάσταση από τη πραγματική και πιο συγκεκριμένα:
 - Ενεργές τάσεις
 - Σχετική διατμητική τάση (relative shear stress)
 - Συνολικές τάσεις
 - Σημεία αστοχίας
 - Ενεργή πίεση πόρων
 - Υπερπίεση πόρων
3. Κατασκευές και διεπιφάνειες που είχαν οριστεί στην αρχική γεωμετρία του μοντέλου, παρουσιάζονται με τις παραμορφώσεις που έχουν υποστεί λόγω της εφαρμογής των τάσεων.

4. Πίνακες αποτελεσμάτων, όπου τα αριθμητικά δεδομένα όλων των αποτελεσμάτων εξάγονται σε πίνακες.
5. Διαγράμματα τομών (cross sections) της κατανομής μιας παραμέτρου κατά μήκος μιας γραμμής που βρίσκεται στο σώμα του προτύπου.

4.2.5 Πρόγραμμα σχεδιασμού καμπυλών

Το PLAXIS διαθέτει την δυνατότητα γραφικής απεικόνισης της μεταβολής των τάσεων και των παραμορφώσεων που υπολογίστηκαν στα σημεία που επιλέχθηκαν πριν την έναρξη της φάσης των υπολογισμών. Πιο συγκεκριμένα μπορούν να ληφθούν :

- Καμπύλες φορτίου – μετατόπισης.
- Καμπύλες χρόνου – μετατόπισης.
- Καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης.
- Τασικές διαδρομές (stress paths) και διαδρομές παραμορφώσεων (strain paths).

Τέλος ο χρήστης μπορεί να τροποποιήσει την παρουσίαση των διαγραμμάτων και να τα προσαρμόσει στις ανάγκες του.

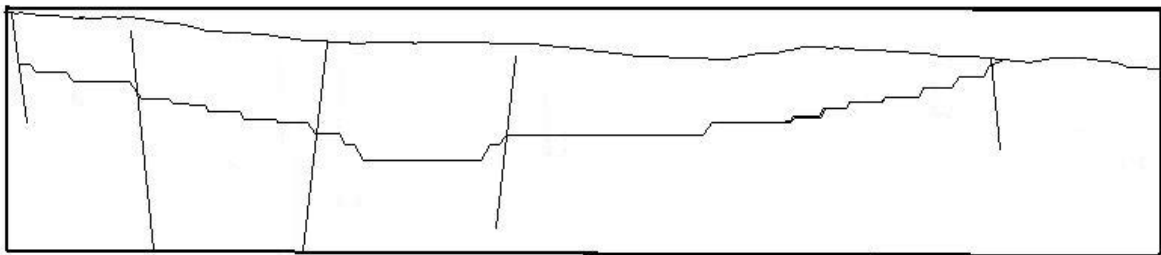
Κεφάλαιο 5

Μοντελοποίηση και Επίλυση της Τομής ΔΔ΄

5.1 Ψηφιοποίηση της τομής

Το σχέδιο της τομής ΔΔ΄ που παραδόθηκε από τη Δ.Ε.Η. ήταν σε κλίμακα 1:1000. Για την περαιτέρω εργασία πάνω στην τομή, ήταν αναγκαία η ψηφιοποίησή της. Η μετατροπή αυτή πραγματοποιήθηκε σε ηλεκτρονικό ψηφιοποιητή (digitizer) ένα ειδικό σχεδιαστήριο πάνω στο οποίο τοποθετήθηκε το αρχικό σχέδιο και με τη βοήθεια ενός επιλογέα αποτυπώθηκαν τα κύρια σημεία της τομής σε ένα τυπικό σχέδιο του AutoCAD 4.

Τα κύρια αυτά σημεία είναι η φυσική επιφάνεια του εδάφους, οι τελικές βαθμίδες εκμετάλλευσης και τα ρήγματα που ήταν σχεδιασμένα στην τομή. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι οι αριθμητικές διαστάσεις του σχεδίου που εμφανίστηκε στο AutoCAD μετά την ψηφιοποίηση ήταν υποδεκακάσιες. Έτσι, ενώ η τομή ΔΔ΄ έχει πραγματικό μήκος περί τα 2000 m, στην κλίμακα του AutoCAD εμφανιζόταν 200 m.

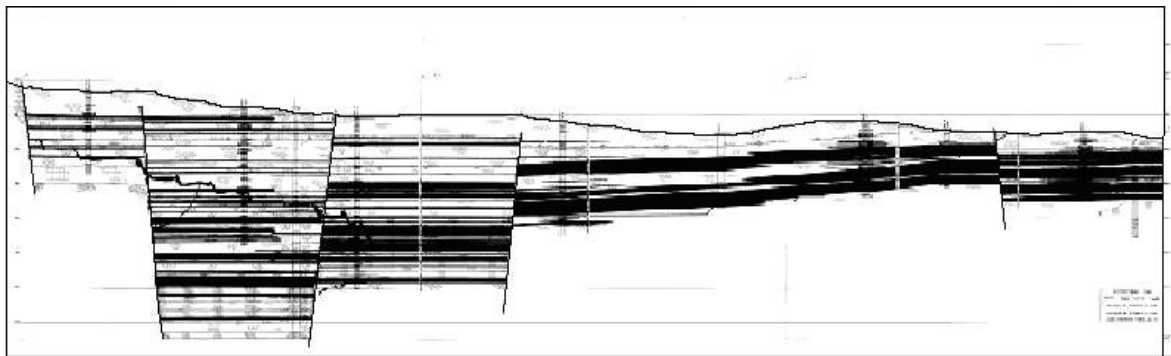


Εικ.5.1 Αποτύπωση κύριων σημείων της τομής ΔΔ΄

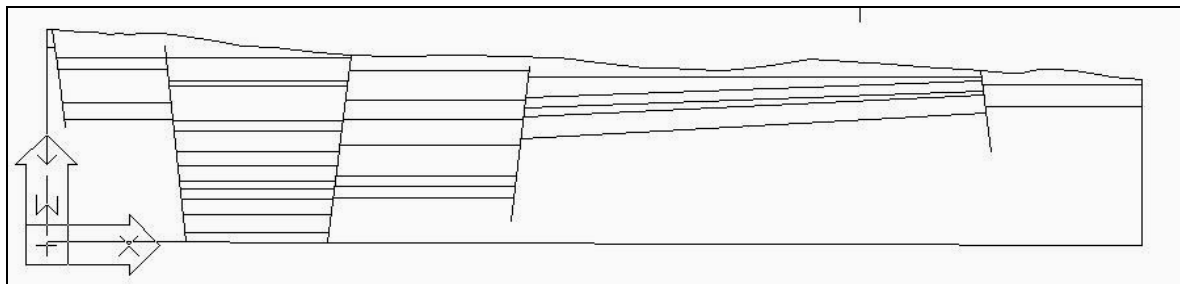
5.2 Ομογενοποίηση στρωμάτων

Όπως είναι φανερό από το σχέδιο της τεχνικής υπηρεσίας της Δ.Ε.Η., η γεωλογική τομή ΔΔ΄ χαρακτηρίζεται από πολλαπλές εναλλαγές λεπτών στρωμάτων λιγνίτη, μάργας και αργίλων. Ο σχεδιασμός αυτών των στρωμάτων αποφεύχθηκε λόγω της επιβάρυνσης που θα επερχόταν στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων, με έναν ασύλληπτα μεγάλο αριθμό σημείων αλλαγής της γεωμετρίας (το λογισμικό δέχεται μέγιστο αριθμό τέτοιων

σημείων, 200) και διακριτών στοιχείων, πράγμα που θα καθιστούσε την επίλυση του προβλήματος αδύνατη. Γι' αυτό το λόγο πραγματοποιήθηκε μια ομογενοποίηση σε αυτά τα λεπτά στρώματα, προσθέτοντας ανά τμήματα, τα μικρά πάχη προς τη δημιουργία μεγαλύτερων, πιο ευδιάκριτων στρωμάτων κάθε πετρώματος. Έτσι, το σχέδιο της τομής μετά την ψηφιοποίησή του, επεξεργάστηκε με το λογισμικό AutoCAD 2000, για την εισαγωγή των αδρότερων στρωμάτων που προέκυψαν από την πρόσθεση. Στη συνέχεια, για την εισαγωγή του σχεδίου στο λογισμικό πακέτο PLAXIS, και πιο συγκεκριμένα στο υποπρόγραμμα PLAXIS INPUT, όπου καθορίζεται η γεωμετρία του μοντέλου, ήταν αναγκαία η μετατροπή του αρχείου AutoCAD σε μορφή geo.



Εικ.5.2 Το σχέδιο της τομής ΔΔ' από την τεχνική υπηρεσία της Δ.Ε.Η.



Εικ.5.3 Ομογενοποιημένα στρώματα των πετρωμάτων της τομής

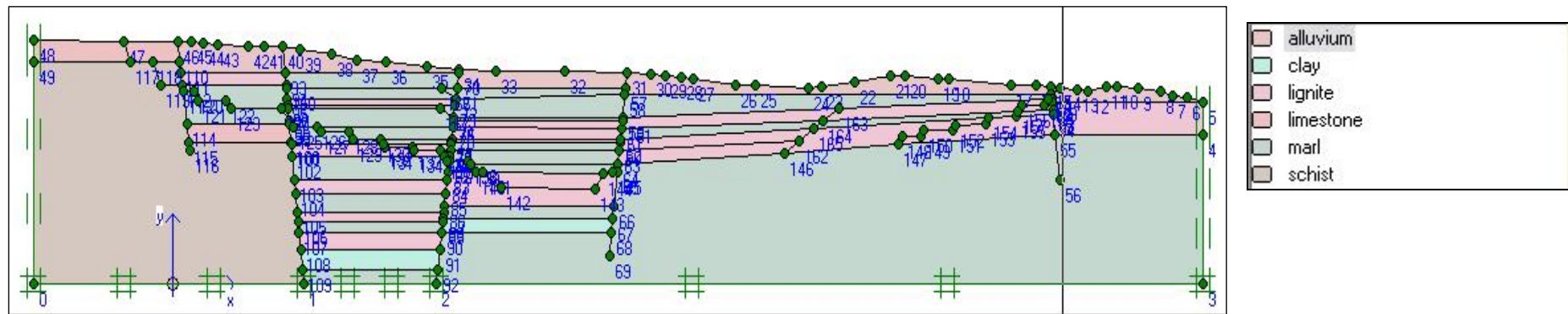
5.3 Παράμετροι υλικών

Σύμφωνα με τα δεδομένα της γεωλογικής τομής της Δ.Ε.Η. οι σχηματισμοί που απαρτίζουν το συγκεκριμένο τμήμα του ορυχείου (Εικ. 5.4), πέραν του λιγνίτη για την εκμετάλλευση του οποίου γίνεται η όλη μελέτη, εμφανίζονται ενότητες μάργας, σχιστολίθου, ασβεστόλιθου και κάποιες προσχωσιγενείς σχηματισμοί.

Οι παράμετροι των εδαφικών υλικών ορίστηκαν σύμφωνα με ορισμένα γεωλογικά δεδομένα που συνόδευαν τα σχέδια της Δ.Ε.Η., βάσει των οποίων προσδιορίστηκαν οι τιμές των παραμέτρων που είναι απαραίτητες για την επίλυση του προβλήματος με το λογισμικό πακέτο PLAXIS. Οι παράμετροι αυτές, είναι: το ειδικό βάρος του πετρώματος, ξηρό (γ_{dry}) και κορεσμένο με νερό (γ_{wet}), η διαπερατότητα κατά την οριζόντια και την κατακόρυφη διεύθυνση (k_x και k_y), ο λόγος Poisson (ν), το μέτρο ελαστικότητας (E_{ref}), η συνοχή (c_{ref}), και η γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ). Στον πίνακα 5.1 παραθέτονται οι τιμές των παραμέτρων κάθε πετρώματος αντίστοιχα.

Πίνακας 5.1 Οι τιμές των απαιτούμενων μηχανικών παραμέτρων των γεωυλικών της τομής ΔΔ'

Πέτρωμα	Εδαφική υγρασία	γ_{dry} [kN/m ³]	γ_{wet} [kN/ m ³]	k_x [m/day]	k_y [m/day]	ν [-]	E_{ref} [kN/m ²]	c_{ref} [kN/m ²]	ϕ [°]
Άργιλος (clay)	ξηρό	18	20	$8,64 \cdot 10^{-5}$	$8,64 \cdot 10^{-5}$	0,25	100000	110	23
Μάργα (marl)	ξηρό	15	18	$8,64 \cdot 10^{-5}$	$8,64 \cdot 10^{-5}$	0,3	200000	450	22
Λιγνίτης (lignite)	ξηρό	12	15	$8,64 \cdot 10^{-6}$	$8,64 \cdot 10^{-6}$	0,18	96000	400	20
Προσχώσεις (alluvium)	ξηρό	18,5	19,5	864	864	0,27	100000	120	22
Ασβεστόλιθος (limestone)	ξηρό	26	28	0,00864	0,00864	0,25	450000	200	27
Σχιστόλιθος (schist)	ξηρό	25	26	$8,64 \cdot 10^{-6}$	$8,64 \cdot 10^{-6}$	0,23	50000000	3500	33



Εικ. 5.4 Το σχέδιο της τομής στο υποπρόγραμμα PLAXIS Input και τα πετρώματα που την αποτελούν

αυτής της μείωσης της αντοχής των πετρωμάτων στη διεπιφάνεια των εδαφικών υλικών σε ένα ρήγμα, πραγματοποιείται μέσω ενός συντελεστή ($R_{interface} - R_{inter}$) ο οποίος επιλέγεται να είναι μικρότερος της μονάδας, για την πλειοψηφία των περιπτώσεων. Ο συντελεστής αυτός είναι ο πολλαπλασιαστής της συνοχής και της γωνίας εσωτερικής τριβής καθενός πετρώματος, με σκοπό τον συνυπολογισμό της μειωμένης μηχανικής ιδιότητας των πετρωμάτων στην περιοχή του ρήγματος για την επίλυση του προβλήματος.

$$c_i = R_{inter} * c_{soil}$$

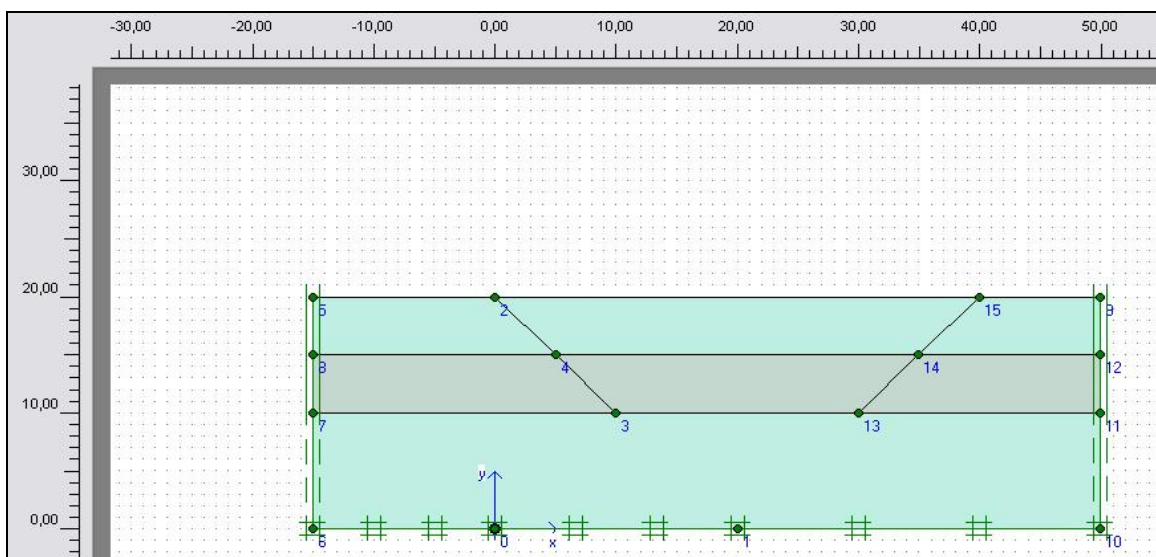
$$\tan\varphi_i = R_{inter} * \tan\varphi_{soil}$$

όπου c_{soil} , $\tan\varphi_{soil}$, η αρχική συνοχή και η εσωτερική γωνία τριβής του πετρώματος, ενώ c_i , $\tan\varphi_i$, οι μειωμένες τιμές των παραμέτρων στην επιφάνεια του ρήγματος αντίστοιχα. Στο συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιήθηκαν δύο τιμές για τον συντελεστή R_{inter} . Οι τιμές αυτές ήταν οι 0,8 και 0,7 για τις οποίες όμως το μοντέλο δεν παρουσίασε κάποια ουσιαστική διαφορά κατά την επίλυσή του.

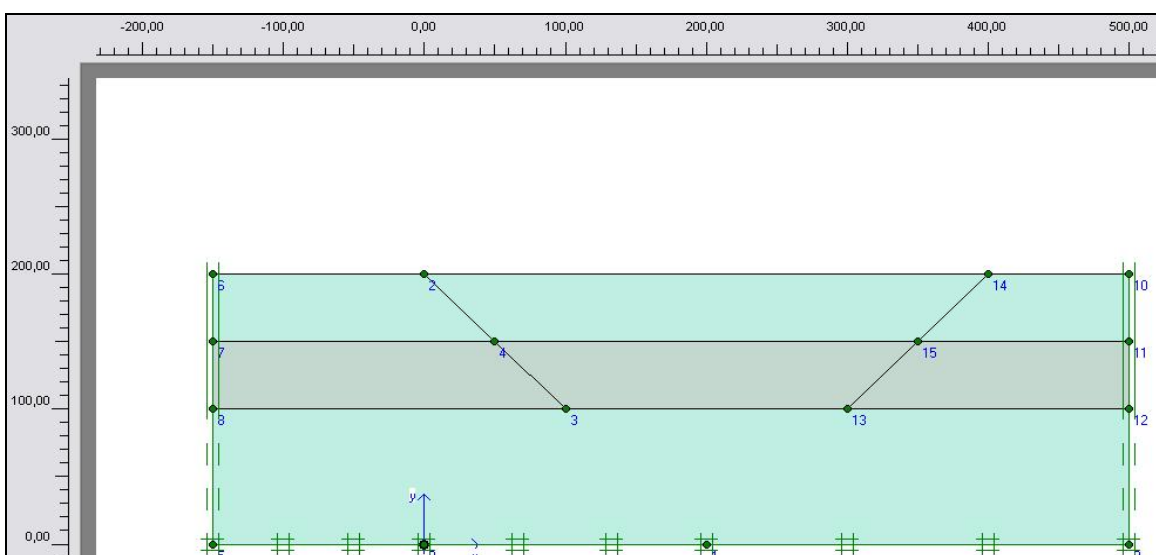
5.6 Δοκιμή κλίμακας

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η ψηφιοποίηση της τομής πραγματοποιήθηκε σε υποδεκαπλάσια της αρχικής, κλίμακα. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα τον υποδεκαπλασιασμό των μεγεθών της γεωμετρίας της τομής. Με την εισαγωγή όλων των παραμέτρων και την επίλυση του προβλήματος, ορισμένα αποτελέσματα, ήταν μη αποδεκτά. Οι μικρές τιμές των ορθών και διατμητικών τάσεων στο υπόβαθρο της τομής, οι μεγάλες τιμές μετακίνησης του εδάφους λόγω της αναθόλωσης καθώς και οι υπερβολικά μεγάλοι συντελεστές ασφάλειας που προέκυψαν, δεν είχαν καμία σχέση με τις αναμενόμενες τιμές.

Έτσι, δημιουργήθηκαν υποψίες ότι η κλίμακα με την οποία είχε εισαχθεί η γεωμετρία του μοντέλου, δημιουργούσε αυτές τις αποκλίσεις. Γι' αυτό το λόγο, πραγματοποιήθηκε μια δοκιμή κλίμακας με δύο εφαρμογές στο λειτουργικό PLAXIS, δύο όμοιων μοντέλων που η μόνη τους διαφορά ήταν το μέγεθος. Στην ουσία εξετάστηκε ένα απλό, γεωμετρικά και κατασκευαστικά, μοντέλο με διαστάσεις 650 x 200 m, και ένα αντίστοιχο με διαστάσεις 65 x 20 m .



Εικ. 5.6 Το μοντέλο δοκιμής κλίμακας, υποδεκαπλάσιων διαστάσεων



Εικ. 5.7 Το μοντέλο δοκιμής κλίμακας 650 x 200 m

Στις Εικόνες 5.6 και 5.7 φαίνεται η ομοιότητα της γεωμετρίας του μοντέλου καθώς και η διαφορά στο μέγεθος. Το “μεγάλο” μοντέλο έχει συνολικό μήκος 650 m και ύψος 200 m. Το υπό κλίμακα 1:10, σχέδιο έχει μήκος 65 m και ύψος 20 m. Χρησιμοποιήθηκε δηλαδή η διαφορά διαστάσεων που είχε και η τομή ΔΔ’ κατά την ψηφιοποίηση.

Τα μοντέλα που κατασκευάστηκαν αποτελούνται από τρία στρώματα, δύο γεωυλικών με παραμέτρους που φαίνονται στον πίνακα 5.2 χωρίς να αποτελούν τις παραμέτρους κάποιου συγκεκριμένου πετρώματος.

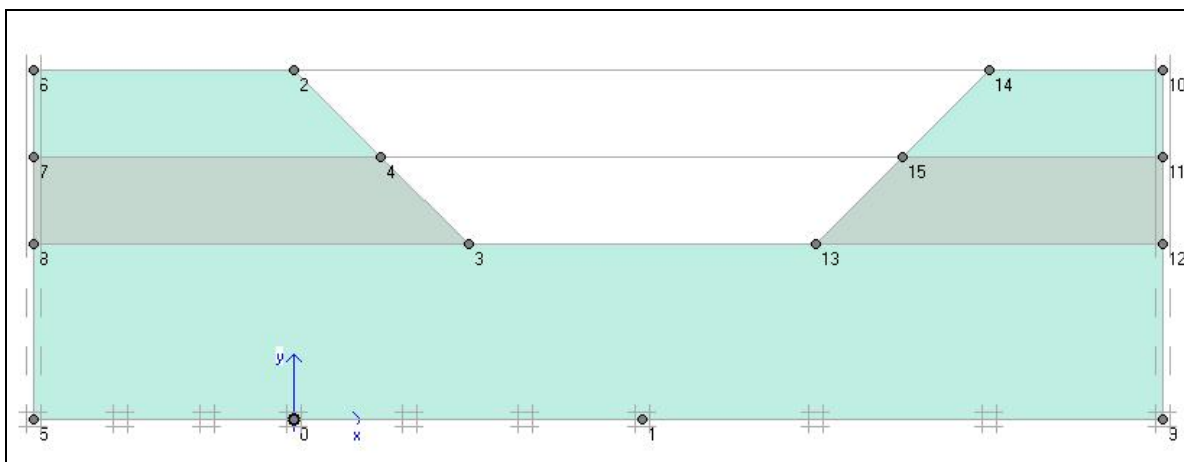
Πίνακας 5.2 Μηχανικοί παράμετροι των γεωλικών των μοντέλων δοκιμής κλίμακας

Πέτρωμα	Εδαφική υγρασία	γ_{dry} [kN/m ³]	γ_{wet} [kN/ m ³]	k_x [m/day]	k_y [m/day]	ν [-]	E_{ref} [kN/m ²]	c_{ref} [kN/m ²]	ϕ [°]
Πέτρωμα 1	Ξηρό	26	28	0	0	0,25	5000000	400	40
Πέτρωμα 2	Ξηρό	28	32	0	0	0,25	400000	400	40

Τα δύο μοντέλα κατασκευάστηκαν με το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα στο κατώτερο όριο τους, και για αυτό δεν ήταν αναγκαία η θεώρηση της διαπερατότητας τους.

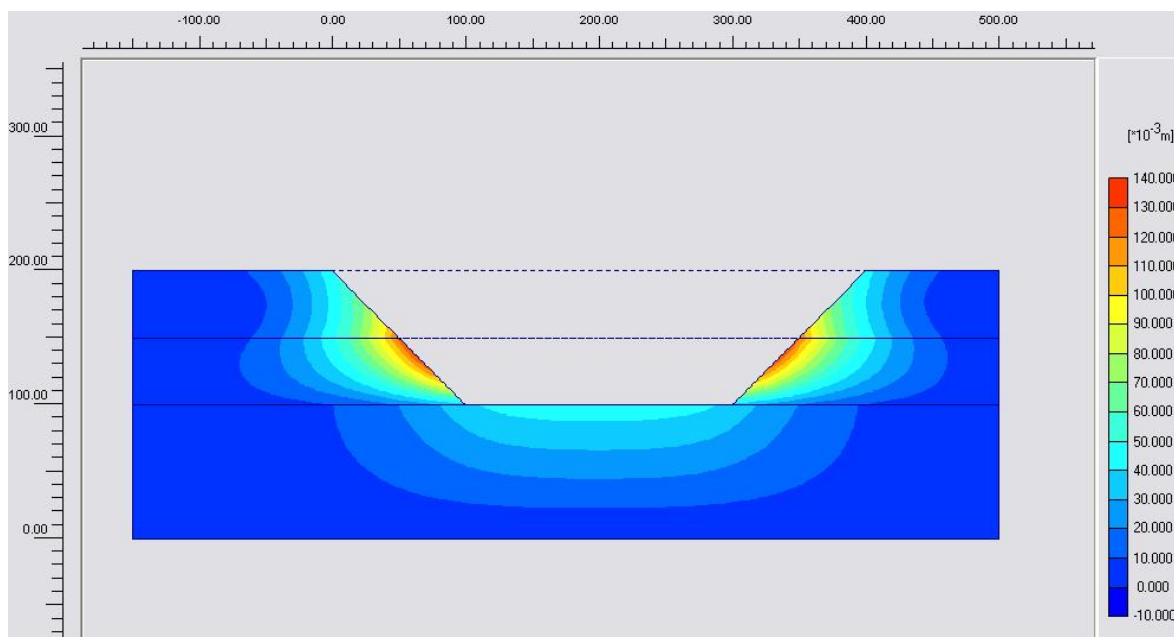
Οι συνοριακές συνθήκες καθώς και ο τρόπος φόρτισης των μοντέλων ορίστηκαν όπως και στην τομή ΔΔ'.

Το κατασκευαστικό μέρος αποτελείται από ένα στάδιο εκσκαφής και στις δύο περιπτώσεις, γεγονός που συμβάλει στην απλότητα των δύο μοντέλων.

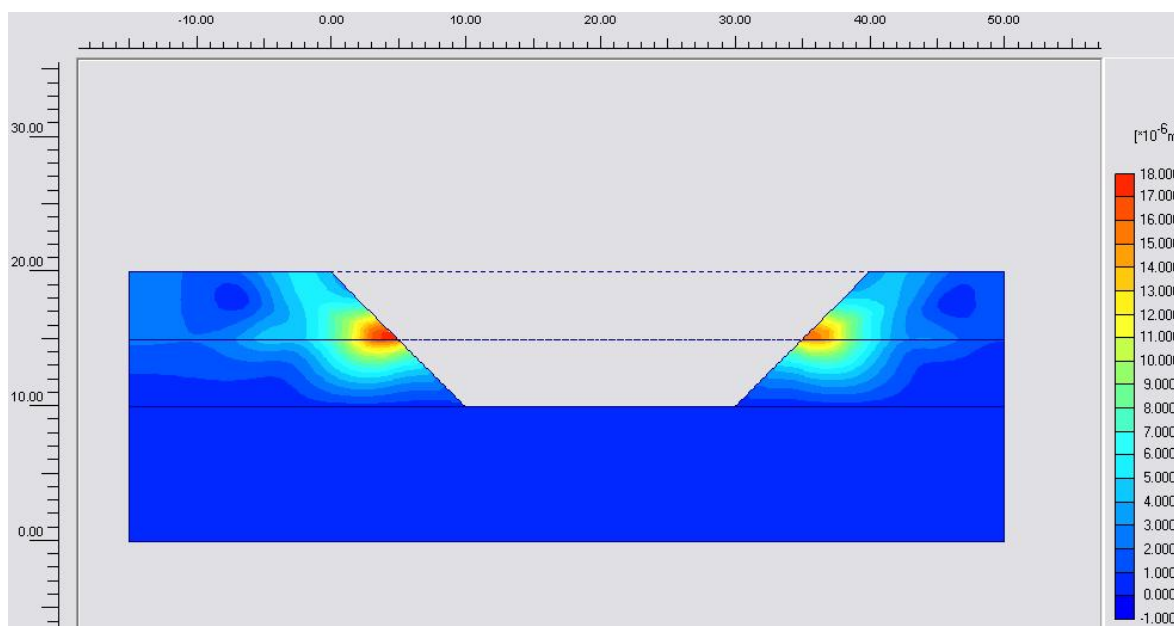


Εικ. 5.8 Το μοναδικό στάδιο εκσκαφής στα μοντέλα δοκιμής κλίμακας

Μετά την επίλυση των μοντέλων δοκιμής κλίμακας τα αποτελέσματα όσον αφορά τις παραμορφώσεις και τους συντελεστές ασφάλειας ήταν πολύ διαφορετικά. Συγκεκριμένα, το μοντέλο 650 x 200 m, παρουσίασε μέγιστη μετατόπιση κατά την ανακούφιση του εδάφους, 0.14 m, με συντελεστή ασφάλειας 2.299. Παράλληλα, το μοντέλο υπό κλίμακα 1:10 είχε μέγιστη παραμόρφωση 18×10^{-6} m και συντελεστή ασφάλειας 10.357.



Εικ.5.9 Παραμορφώσεις του μοντέλου 650 x 200 m με συντελεστή ασφάλειας 2.299 και μέγιστη μετατόπιση $140 \cdot 10^{-3}$ m.



Εικ.5.10 Παραμορφώσεις του μοντέλου κλίμακας 1:10 με συντελεστή ασφάλειας 10.375 και μέγιστη μετατόπιση $18 \cdot 10^{-6}$ m.

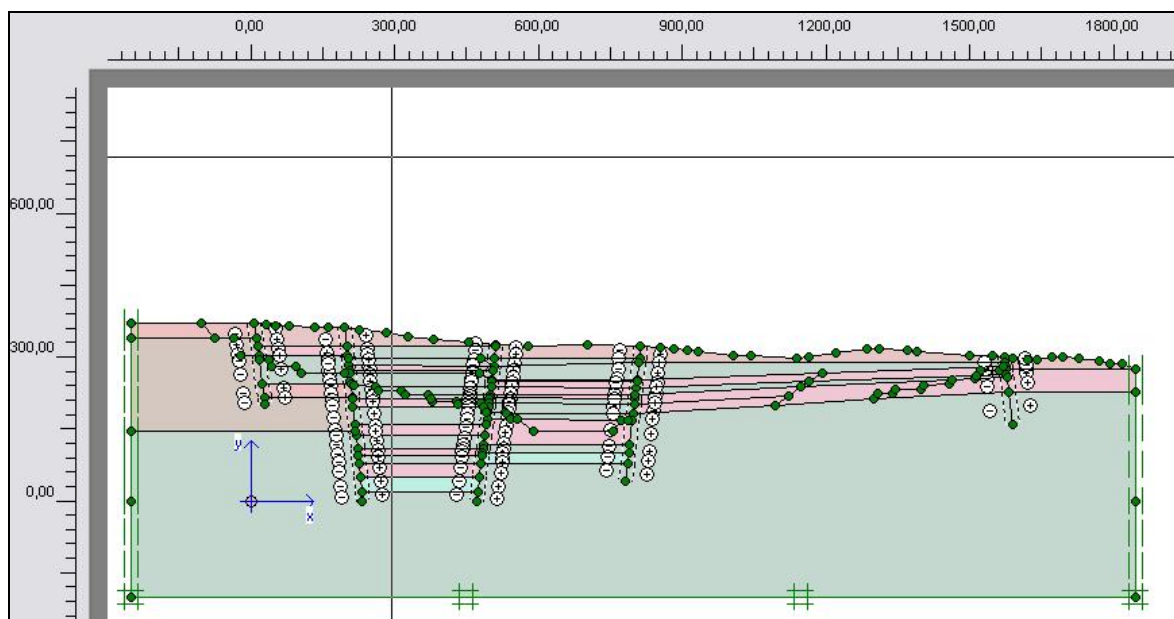
Τα αποτελέσματα αυτής της δοκιμής έδειξαν ότι δεν υπάρχει κάποια αναλογία ανάμεσα στην κλίμακα, τις παραμορφώσεις και τους συντελεστές ασφάλειας, πράγμα που φανερώνει ότι η επίλυση της τομής ΔΔ' υπό κλίμακα θα οδηγούσε σε εσφαλμένα

συμπεράσματα. Η αναλογία θα ήταν ολοφάνερη αν τα υλικά που εμφανίζονται στη περιοχή ήταν γραμμικά ελαστικά όσον αφορά την εξίσωση τάσης – παραμόρφωσης. Επίσης, για να προκύπτουν ίδια αποτελέσματα, χωρίς δηλαδή ο υποδεκαπλασιασμός της κλίμακας να δημιουργούσε αποκλίσεις κατά την επίλυση, θα έπρεπε λόγω του διαφορετικού όγκου υλικών να γινόταν χρήση διαφορετικών παραμέτρων αυτών, όπως αύξηση του μέτρου ελαστικότητας. Για αυτό το λόγο, κρίθηκε αναγκαίος ο επανασχεδιασμός της τομής, με διαστάσεις ίσες με τις πραγματικές, και στη συνέχεια επίλυση του νέου μοντέλου.

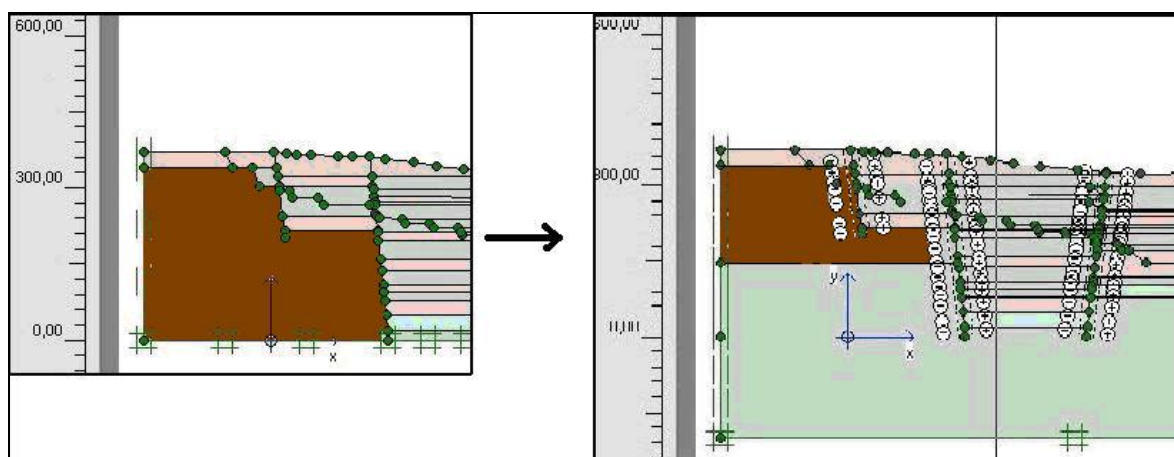
5.7 Τελικό μοντέλο τομής ΔΔ'

Το τελικό μοντέλο της τομής που σχεδιάστηκε, βασίστηκε στη συλλογή των συντεταγμένων των κομβικών σημείων που απαρτίζουν το σχέδιο υπό κλίμακα, τον δεκαπλασιασμό των τιμών των συντεταγμένων και την εισαγωγή τους στο υποπρόγραμμα PLAXIS Input. Στη συνέχεια όμως, για τη βέλτιστη κατανομή των τάσεων, πραγματοποιήθηκαν ορισμένες τροποποιήσεις σε σχέση με το αρχικό σχέδιο της τομής ΔΔ'.

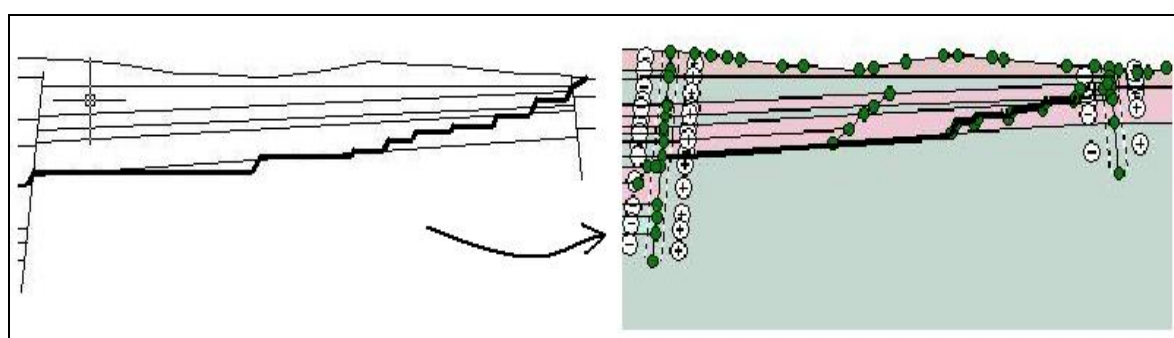
Οι αλλαγές αυτές είναι: α) η αύξηση του βάθους της τομής κατά 200 m, θεωρώντας ότι το υπόβαθρο αποτελείται από μάργα (Εικ. 5.11), β) η μείωση του ύψους του σχιστόλιθου (Εικ. 5.12). Οι αλλαγές αυτές πραγματοποιήθηκαν για τη μείωση της επίδρασης των ορίων του μοντέλου στην κατανομή των τάσεων στην περιοχή ενδιαφέροντος και για την αποφυγή σφαλμάτων από σημεία απότομης αλλαγής της γεωμετρίας. γ) Η αλλαγή των βαθμίδων της τελικής φάσης εκμετάλλευσης σε μορφή κεκλιμένου με κλίση 2%, παράλληλο με στρώμα λιγνίτη, έτσι ώστε να μην δημιουργηθούν σφηνοειδή τμήματα που κατά την διακριτοποίηση θα έδιναν τρίγωνα στοιχεία με οξείες γωνίες, τα οποία θα οδηγούσαν σε εσφαλμένη επίλυση (Εικ. 5.13).



Εικ. 5.11 Τελικό σχέδιο του μοντέλου της τομής ΔΔ'



Εικ. 5.12 Μείωση του ύψους του σχιστόλιθου (καφέ χρώμα)



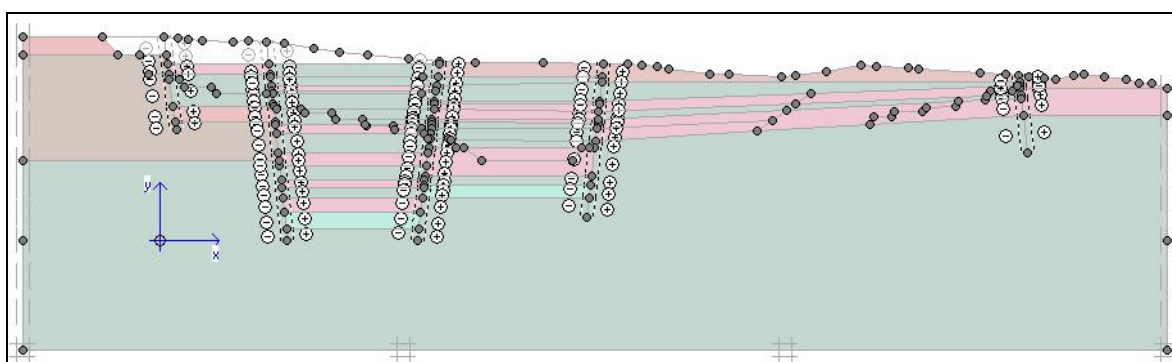
Εικ. 5.13 Μετατροπή των τελικών βαθμίδων εκμετάλλευσης σε κεκλιμένο επίπεδο

Πρέπει να αναφερθεί ότι θεωρήθηκε πως καθένα από τα στρώματα αυτά αποτελείται από ένα μόνο είδος υλικού, είναι δηλαδή ομογενούς σύστασης, συνεχή και ελαστικά ή

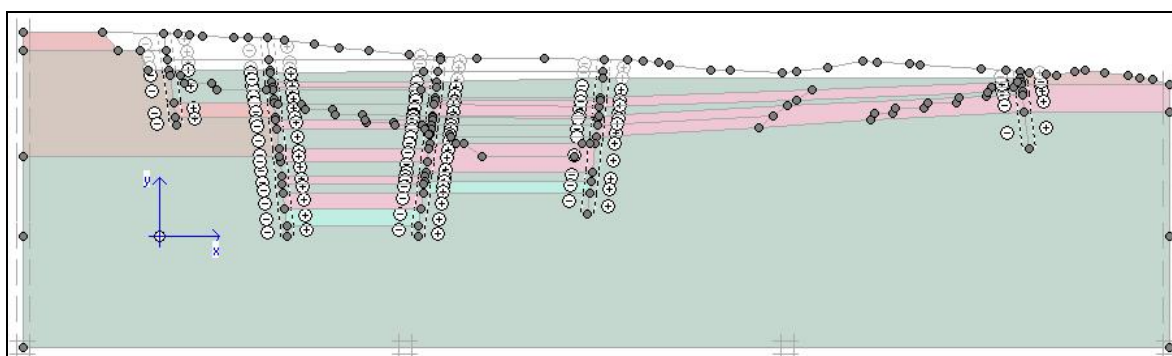
ελαστοπλαστικά, ανάλογα με το μοντέλο συμπεριφοράς που έχει επιλεγεί για το αντίστοιχο υλικό. Επίσης, το πάχος της υποκείμενης μάργας θεωρείται αρκετά μεγάλο, χωρίς όμως να υπάρχουν στοιχεία τεκμηρίωσης. Είναι λοιπόν πολύ πιθανό η αναθόλωση που υπολογίζεται παρακάτω να είναι ίσως μεγαλύτερη της πραγματικής, αφού θεωρείται ότι συμβάλλει σε αυτή στρώμα μάργας μεγαλύτερου πάχους από το πραγματικό.

5.8 Στάδια εκσκαφής

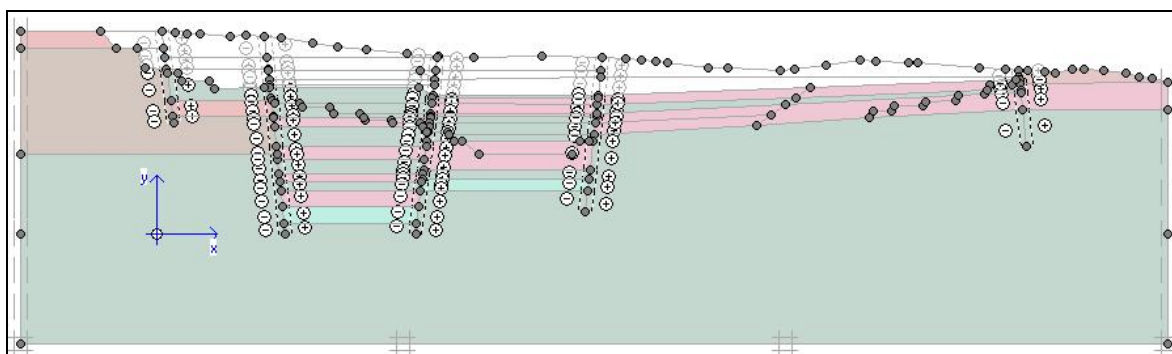
Το αρχικό σχέδιο της τομής ΔΔ' που παραδόθηκε από την τεχνική υπηρεσία της Δ.Ε.Η. είχε σχεδιασμένες τις βαθμίδες της τελικής φάσης εκμετάλλευσης. Η εκμετάλλευση αυτή έχει βάθος από την επιφάνεια του εδάφους περίπου 200 m. Για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφάλειας και της αναθόλωσης του εδάφους για αυτήν την τελική φάση εκμετάλλευσης δεν ήταν δυνατό να αφαιρεθεί μονομιάς αυτός ο όγκος πετρωμάτων. Η λειτουργία του λογισμικού PLAXIS δεν θα ήταν ομαλή και τα αποτελέσματα ανακριβή. Γι' αυτό κρίθηκε αναγκαίος ο διαχωρισμός της αφαίρεσης αυτού του όγκου σε οκτώ στάδια εκσκαφής, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι για την εκμετάλλευση του λιγνίτη δεν πρόκειται να χρειαστούν περισσότερα ή διαφορετικά στάδια. Τα οκτώ στάδια που παρουσιάζονται στις Εικόνες 5.14 - 5.21 συμπίπτουν κυρίως με τους στρωματογραφικούς ορίζοντες των πετρωμάτων και κατά τους υπολογισμούς θεωρείται ότι το φορτίο του καθενός από τα στρώματα που διαδοχικά παίρνουν τη θέση των υπερκειμένων, απομακρύνεται ακαριαία, πράγμα που δεν συμβαίνει στην πραγματικότητα.



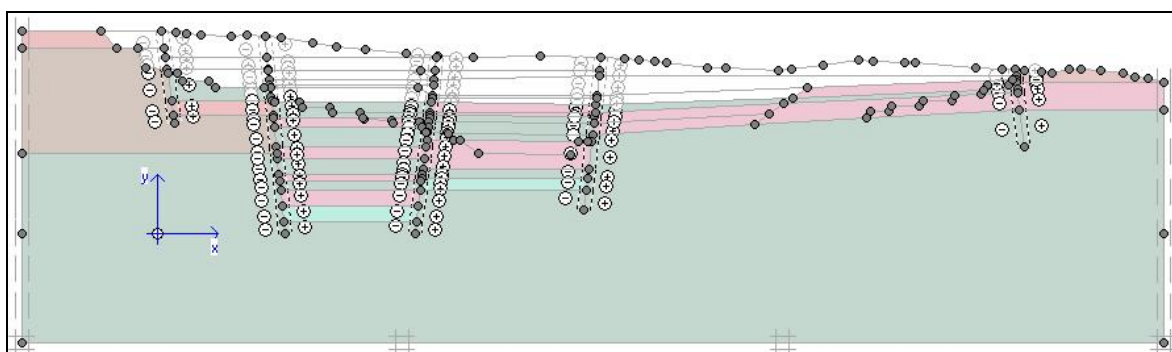
Εικ. 5.14 Το 1^ο στάδιο εκμετάλλευσης



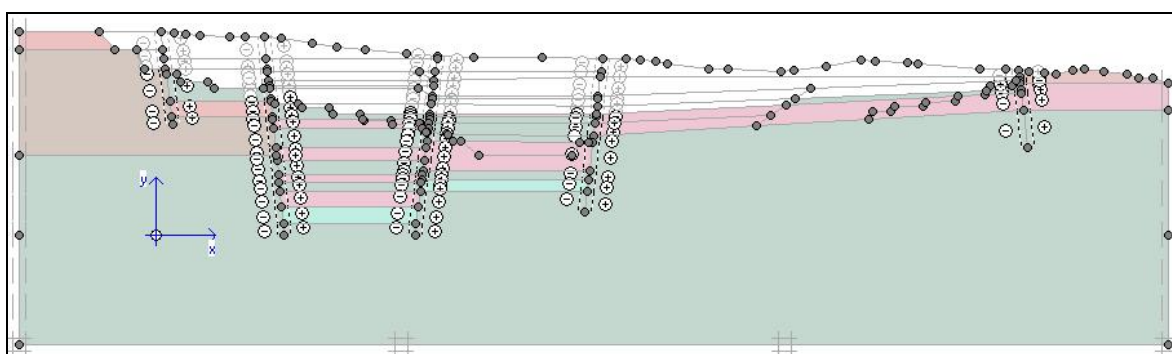
Εικ. 5.15 Το 2^ο στάδιο εκμετάλλευσης



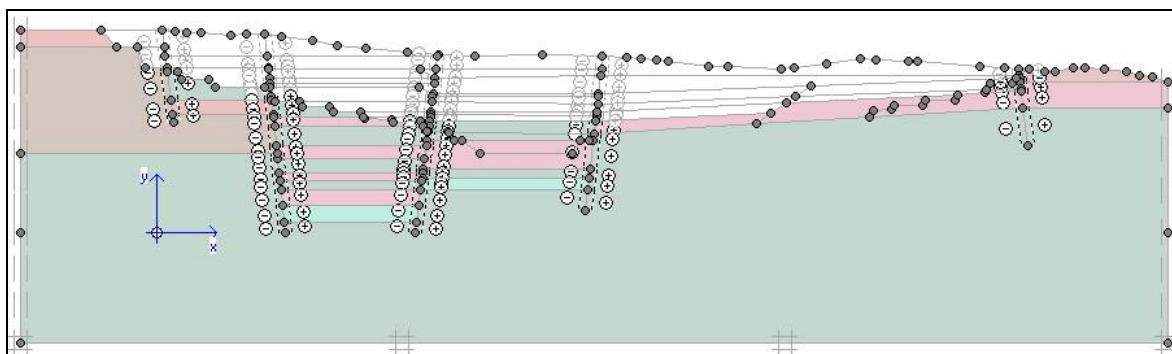
Εικ. 5.16 Το 3^ο στάδιο εκμετάλλευσης



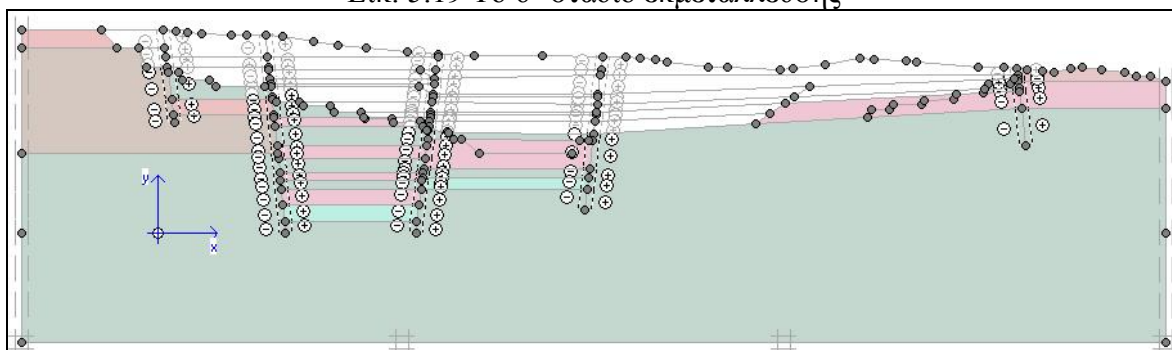
Εικ. 5.17 Το 4^ο στάδιο εκμετάλλευσης



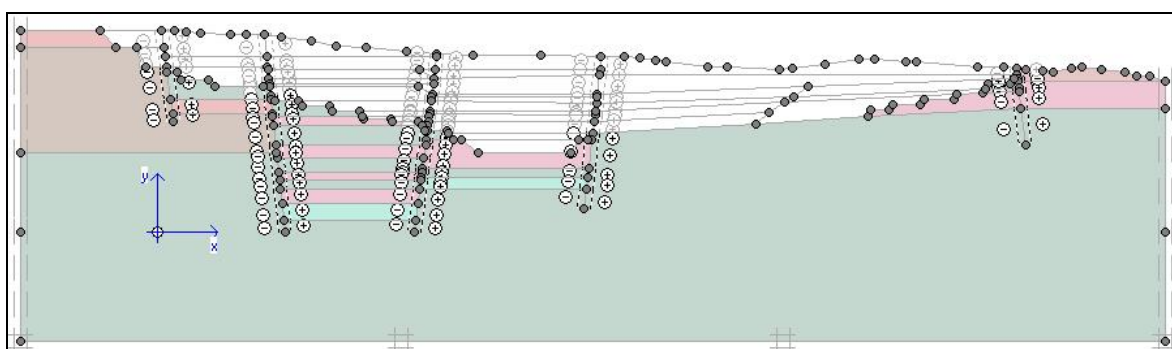
Εικ. 5.18 Το 5^ο στάδιο εκμετάλλευσης



Εικ. 5.19 Το 6^ο στάδιο εκμετάλλευσης



Εικ. 5.20 Το 7^ο στάδιο εκμετάλλευσης



Εικ. 5.21 Το 8^ο και τελικό στάδιο εκμετάλλευσης

5.9 Επίλυση του μοντέλου με το μοντέλο συμπεριφοράς Mohr – Coulomb σε όλα τα πετρώματα

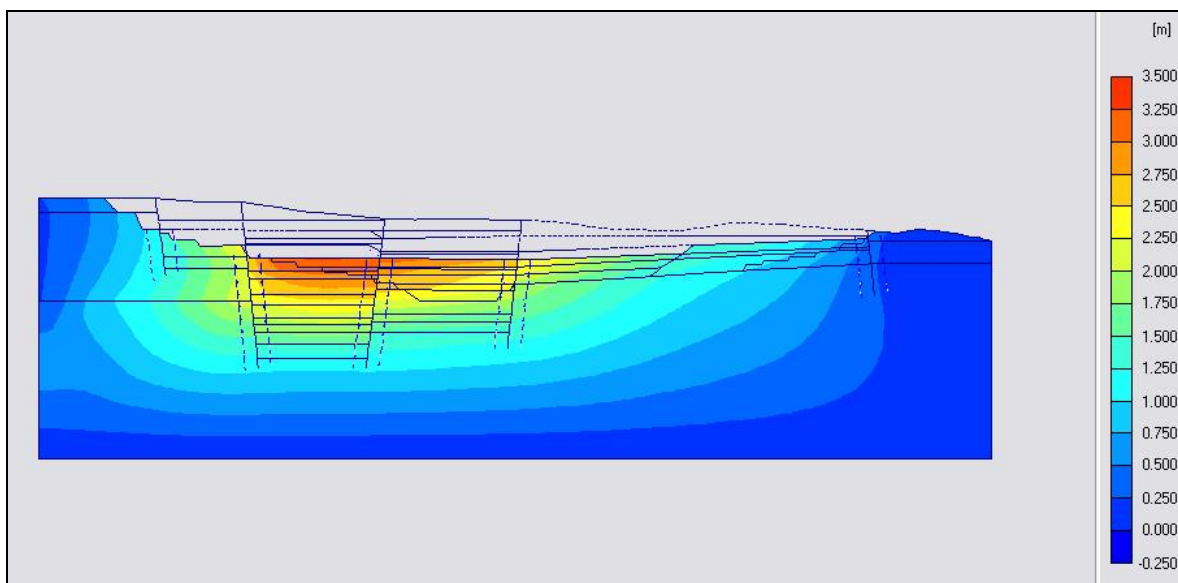
5.9.1 Μετατοπίσεις και συντελεστές ασφάλειας

Κατά την επίλυση του μοντέλου, στο τέλος κάθε σταδίου εκσκαφής υπολογιζόταν ο συντελεστής ασφάλειας καθώς και η μετατόπιση του εδάφους λόγω της αναθόλωσης και της καθίζησης του αριστερού και δεξιού άκρου της τομής. Στον πίνακα 5.3 φαίνονται οι συντελεστές ασφάλειας κάθε σταδίου καθώς και οι τιμές της οριζόντιας, της κατακόρυφης και οι συνολικές μετατοπίσεις τόσο ανά στάδιο όσο και οι αθροιστικές μετατοπίσεις μετά από κάθε εκσκαφή.

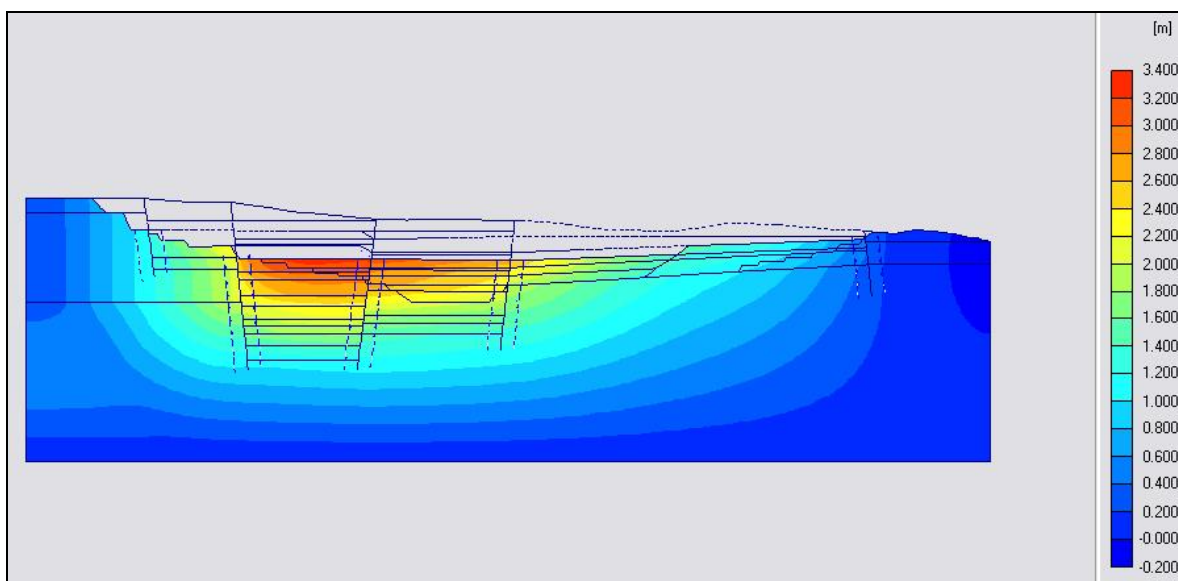
Οι τιμές αυτές της μετατόπισης αναφέρονται στο κατά πόσο τα υποκείμενα στρώματα που αποκαλύπτονται κατά την εκσκαφή, μετατοπίζονται καθώς αποφορτίζονται από το βάρος των υπερκειμένων. Τα νούμερα αυτά αναφέρονται στις μέγιστες τιμές της παραμόρφωσης ενώ στη συνέχεια παραθέτονται οι Εικόνες 5.22 – 5.29, που εμφανίζουν την κατανομή οριζόντιας, κατακόρυφης και συνολικής μετατόπισης, όπως και τη σχετική διατμητική τάση, ενός ενδιάμεσου (4^ο στάδιο) και του τελικού σταδίου (8^ο στάδιο) εκμετάλλευσης σε μορφή χρωματικής κλίμακας. Επίσης, εικονίζεται το διάγραμμα υπολογισμών του συντελεστή ασφάλειας κάθε σταδίου της εκμετάλλευσης (Εικ. 5.30), σύμφωνα με τη μέθοδο της σταδιακής μείωσης της συνοχής και της εσωτερικής γωνίας τριβής στα κλάσματα $c_{input} / c_{reduced}$ και $\tan\phi_{input} / \tan\phi_{reduced}$, μέχρι το στάδιο της αστοχίας του υπό εξέταση μοντέλου.

Πίνακας 5.3 Χαρακτηριστικά των σταδίων εκμετάλλευσης κατά την επίλυση του μοντέλου Mohr - Coulomb

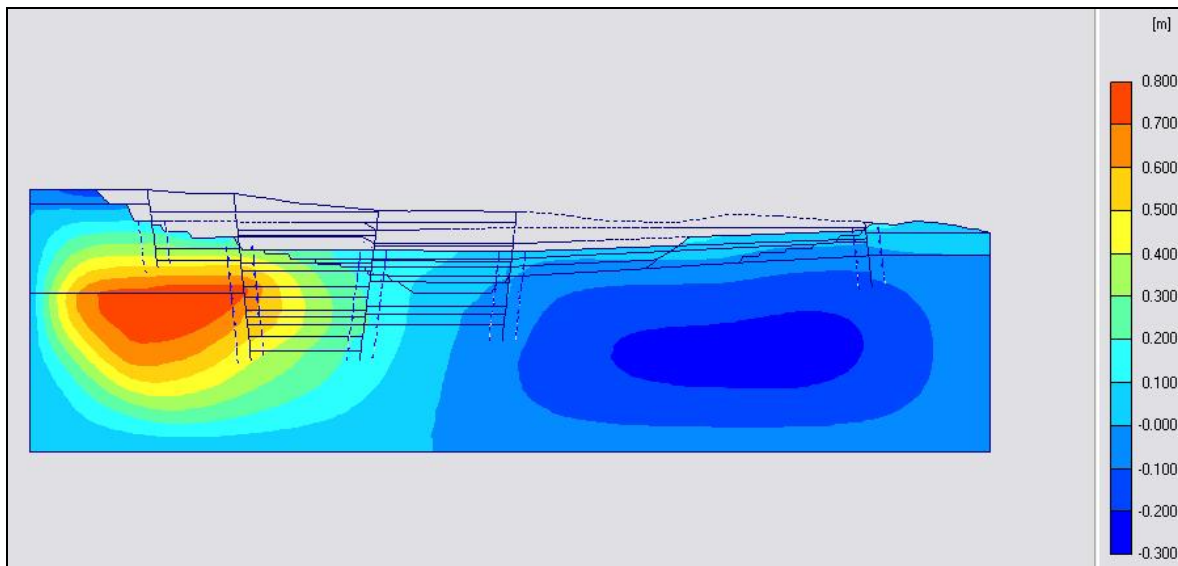
Αριθμός σταδίου	Συντελεστής ασφάλειας	Οριζόντιες Μετατοπίσεις ($\times 10^{-3}$ m)	Αθροιστικές Οριζόντιες ($\times 10^{-3}$ m)	Κατακόρυφες Μετατοπίσεις (m)	Αθροιστικές Κατακόρυφες (m)	Συνολικές μετατοπίσεις (m)	Αθροιστικές Συνολικές (m)
1	3.4	238.87	238.87	1.35	1.35	1.37	1.37
2	3.1	134.18	373.05	0.59	1.94	0.58	1.95
3	2.9	296.65	669.70	0.76	2.70	0.76	2.71
4	2.8	118.06	787.76	0.58	3.28	0.59	3.29
5	2.6	110.27	898.03	0.42	3.70	0.41	3.70
6	2.6	11.66	909.69	0.22	3.92	0.22	3.92
7	2.6	7.32	917.01	0.15	4.07	0.15	4.07
8	2.6	9.40	926.41	0.20	4.27	0.20	4.27



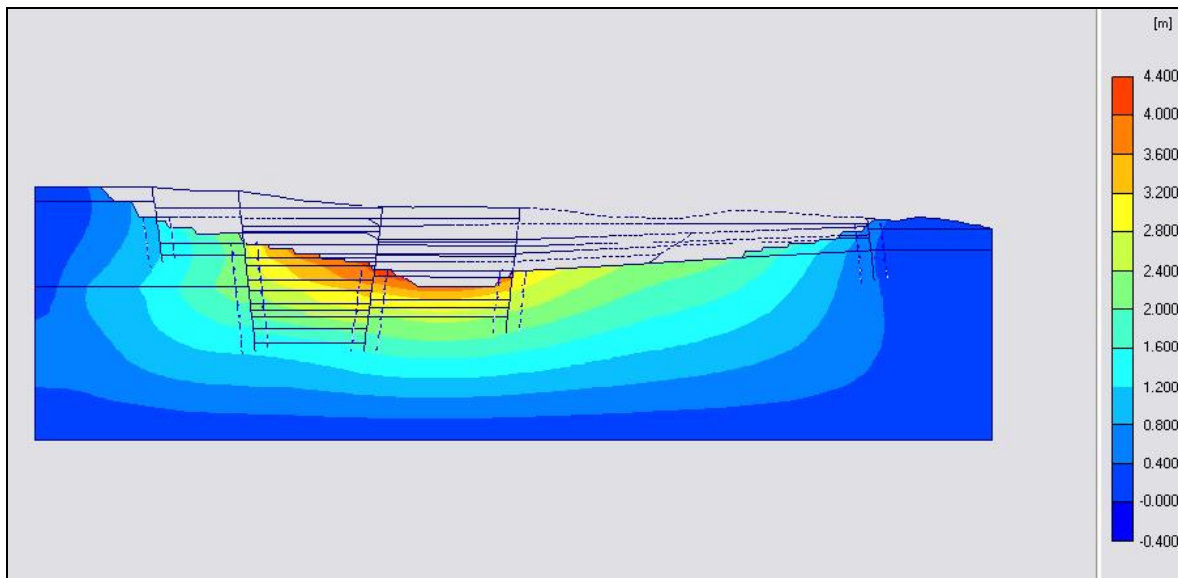
Εικ. 5.22 Συνολικές Μετατοπίσεις 4^{ου} Σταδίου (Ενδιάμεσο Στάδιο)



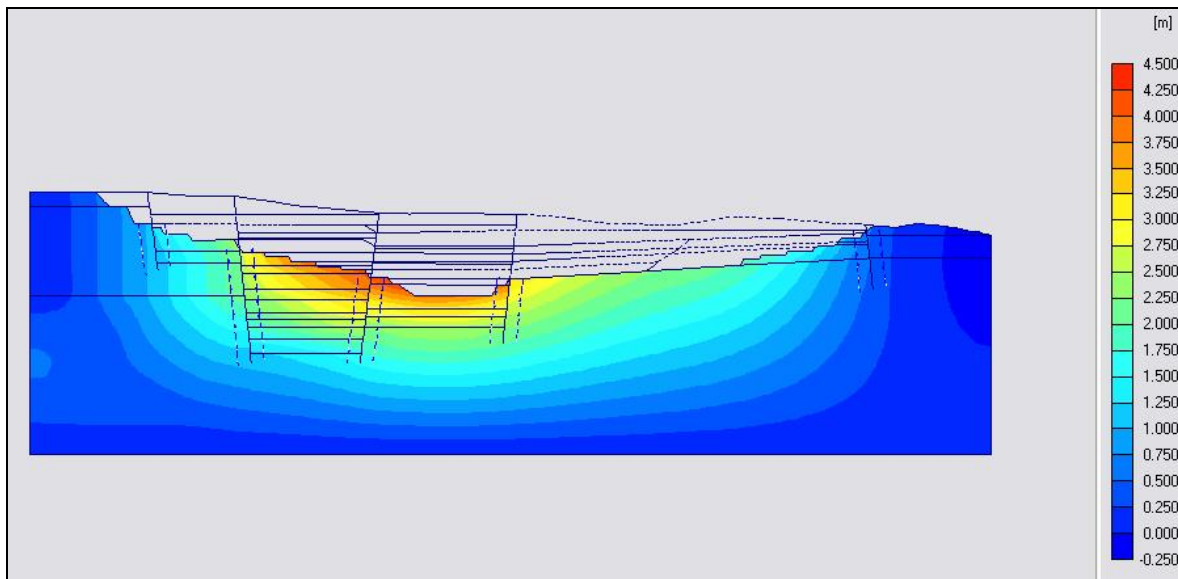
Εικ. 5.23 Κατακόρυφες Μετατοπίσεις 4^{ου} Σταδίου (Ενδιάμεσο Στάδιο)



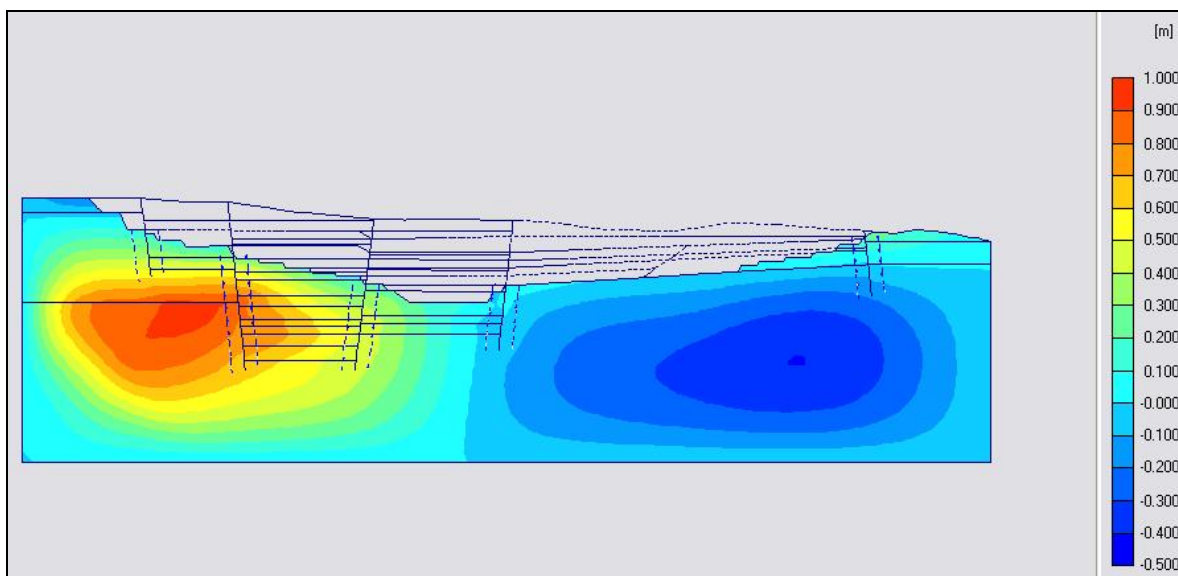
Εικ. 5.24 Οριζόντιες Μετατοπίσεις 4^{ου} Σταδίου (Ενδιάμεσο Στάδιο)



Εικ. 5.25 Συνολικές Μετατοπίσεις 8^{ου} και Τελικού Σταδίου εκμετάλλευσης



Εικ. 5.26 Κατακόρυφες Μετατοπίσεις 8^{ου} και Τελικού Σταδίου εκμετάλλευσης



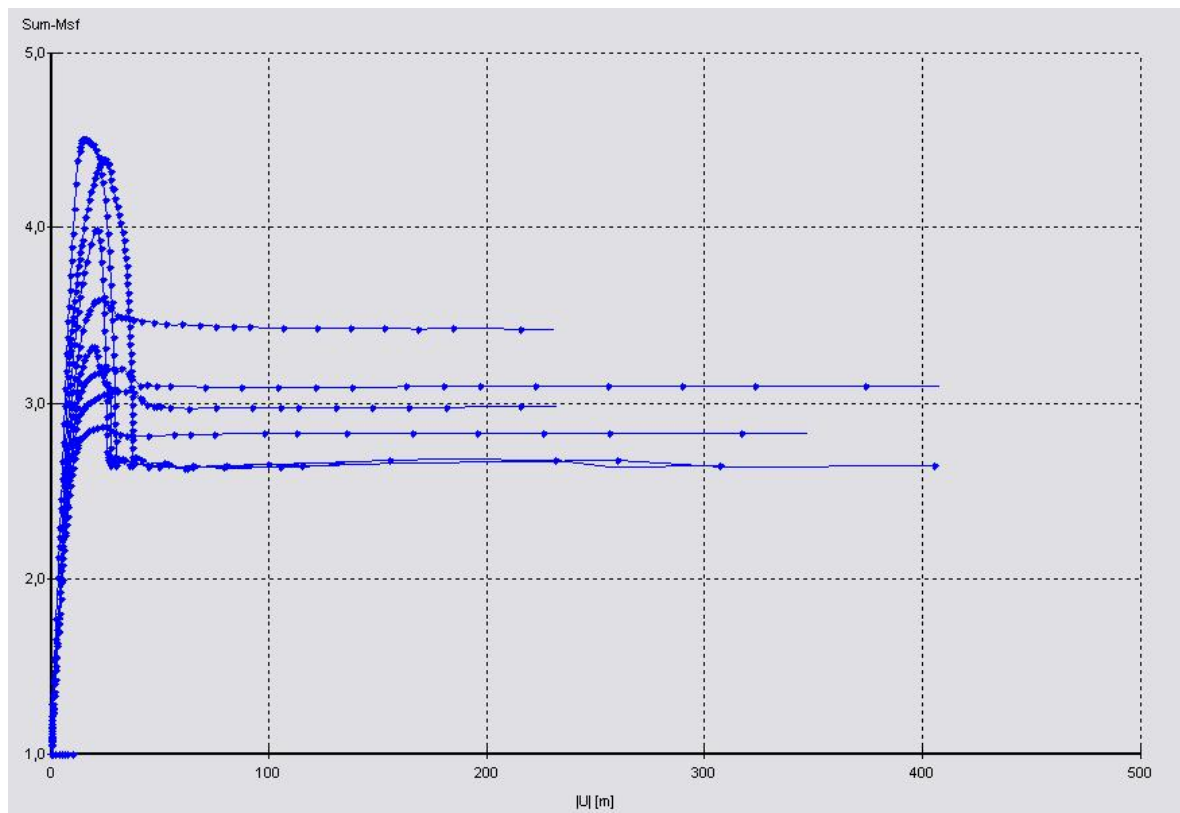
Εικ. 5.27 Οριζόντιες Μετατοπίσεις 8^{ου} και Τελικού Σταδίου εκμετάλλευσης

5.9.2 Αναπτυσσόμενες τάσεις στην τομή

Οι τάσεις που αναπτύσσονται κατά την εφαρμογή των βαρυτικών δυνάμεων στην τομή ΔΔ' και η ανάλογη συμπεριφορά των γεωυλικών μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί από τον συντελεστή σχετικής διατμητικής τάσης (relative shear stress) τ_{relative} , ο οποίος ισούται με το λόγο της εφαρμοζόμενης διατμητικής τάσης τ , προς τη διατμητική αντοχή του πετρώματος τ_{max} .

$$\tau_{\text{relative}} = \frac{\tau}{\tau_{\text{max}}}$$

Ο λόγος αυτός παίρνει τιμές από 0 μέχρι 1 και όσο περισσότερο τείνει να πάρει τη μέγιστη τιμή του, τόσο η καταπόνηση του υλικού πλησιάζει το όριο διαρροής του.



Εικ. 5.30 Καμπύλες υπολογισμού του συντελεστή ασφάλειας κάθε σταδίου εκμετάλλευσης ορισμένες για συγκεκριμένο σημείο στο πρώτο αριστερό φρύδι που δημιουργείται κατά την εκσκαφή, για το μοντέλο συμπεριφοράς Mohr - Coulomb

5.10 Επίλυση σύμφωνα με το μοντέλο συμπεριφοράς σκλήρυνσης εδάφους

Στη δεύτερη αυτή περίπτωση εξετάζεται η συμπεριφορά της τομής, όσον αφορά τη παραμόρφωση του εδάφους λόγω της ανακούφισής του κατά την εκσκαφή και απομάκρυνση των στείρων και του λιγνίτη ανά στάδιο, ορίζοντας ως μοντέλο συμπεριφοράς υλικού, στα στρώματα του λιγνίτη και της μάργας, το μοντέλο σκλήρυνσης εδάφους (hardening soil model). Λόγω της διαφορετικής αυτής συμπεριφοράς, ήταν αναγκαία η αλλαγή των τιμών των παραμέτρων των σχηματισμών αυτών (Πίνακας 5.4), ενώ στα υπόλοιπα δεν πραγματοποιήθηκε καμία αλλαγή.

Πίνακας 5.4 Παράμετροι υλικών με συμπεριφορά σκλήρυνσης

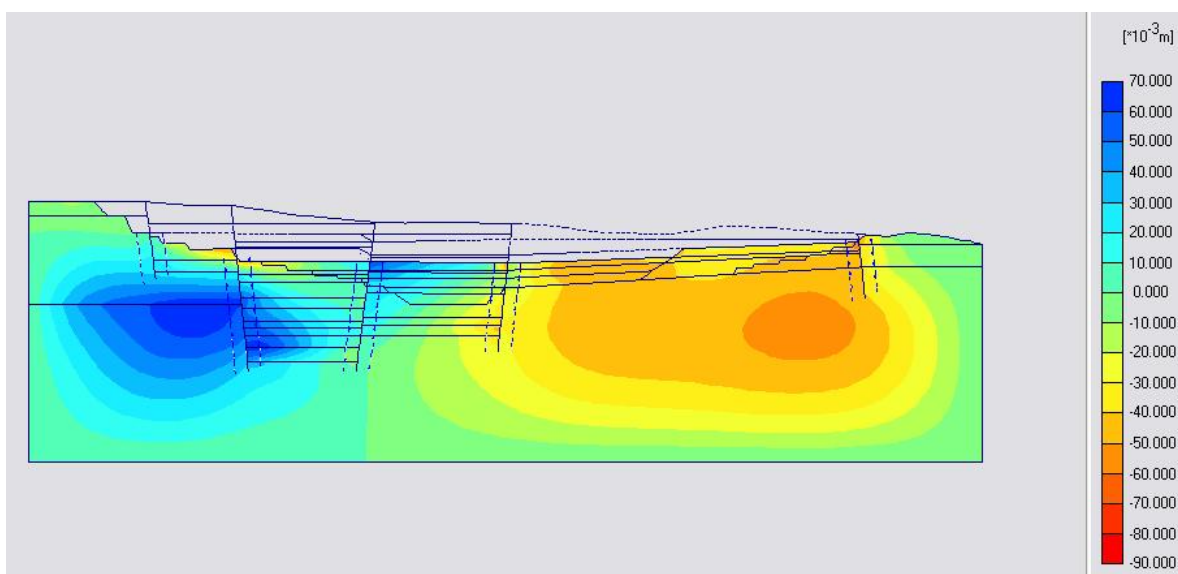
Πέτρωμα	Μάργα	Λιγνίτης
Υγρασία	Ξηρό	Ξηρό
γ_{dry} [kN/m ³]	9,5	5
γ_{wet} [kN/m ³]	14,98	12
k_x [m/day]	0,051	0,035
k_y [m/day]	0,051	0,035
E_{50}^{ref} [kN/m ²]	168500	50000
E_{oed}^{ref} [kN/m ²]	226900	146200
E_{urref} [kN/m ²]	496000	200000
c_{ref} [kN/m ²]	217	200
ϕ [°]	29	35

Στον Πίνακα 5.5, φαίνονται οι συντελεστές ασφάλειας σε κάθε στάδιο εκσκαφής καθώς και οι τιμές της οριζόντιας, της κατακόρυφης και οι συνολικές μετατοπίσεις τόσο ανά στάδιο όσο και οι αθροιστικές μετατοπίσεις που αθροίζονται διαδοχικά

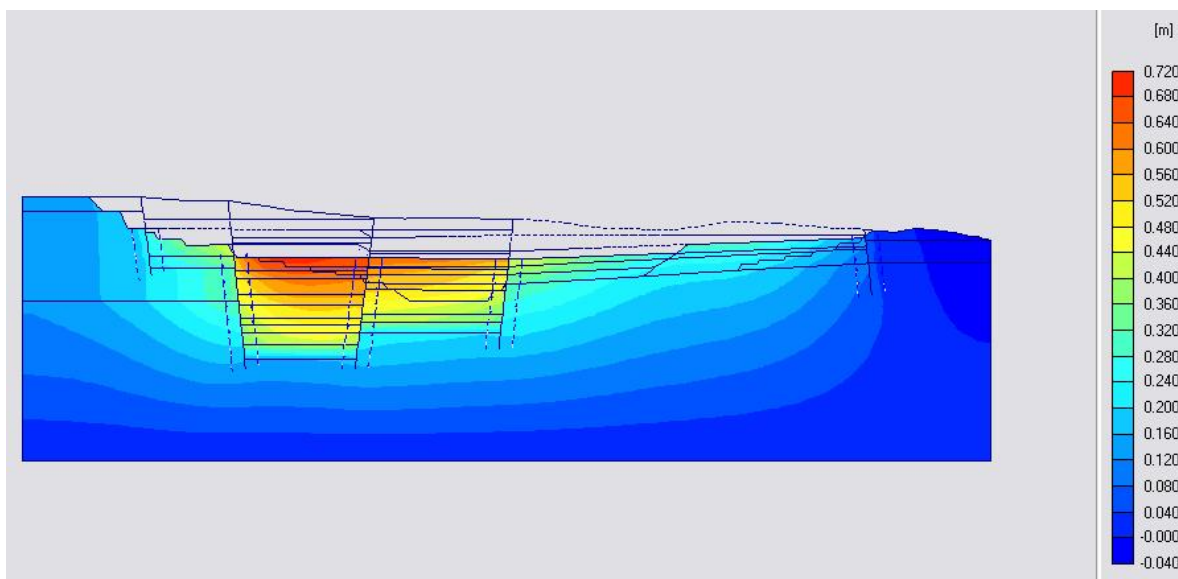
Οι Εικόνες 5.31 – 5.38, εμφανίζουν τις οριζόντιες, κατακόρυφες και συνολικές μετατοπίσεις, καθώς και τη σχετική διατμητική τάση (relative shear stress), σε χρωματική κλίμακα, του ίδιου ενδιάμεσου (4^{ου}) και του τελικού (8^{ου}) σταδίου εκσκαφής. Επίσης, εμφανίζεται και το διάγραμμα υπολογισμών του συντελεστή ασφάλειας κάθε σταδίου (Εικ. 5.39).

Πίνακας 5.5 Χαρακτηριστικά των σταδίων εκμετάλλευσης κατά την επίλυση του μοντέλου σκλήρυνσης εδάφους (soil hardening)

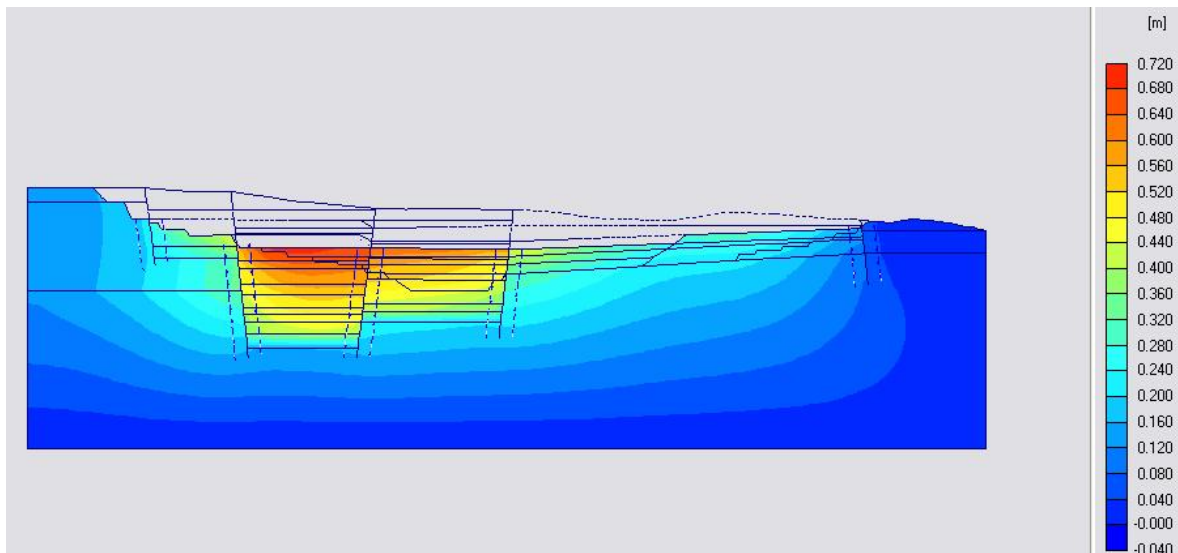
Αριθμός σταδίου	Συντελεστής ασφάλειας	Οριζόντιες Μετατοπίσεις ($\times 10^{-3}$ m)	Αθροιστικές Οριζόντιες ($\times 10^{-3}$ m)	Κατακόρυφες Μετατοπίσεις ($\times 10^3$ m)	Αθροιστικές Κατακόρυφες ($\times 10^3$ m)	Συνολικές μετατοπίσεις ($\times 10^3$ m)	Αθροιστικές Συνολικές ($\times 10^3$ m)
1	3.6	60.82	60.82	340.95	340.95	341.22	341.22
2	3.4	-6.28	54.50	106.63	447.58	107.98	449.20
3	3.3	26.14	80.64	140.55	588.13	139.91	589.11
4	3.1	3.36	84.00	113.32	701.45	112.55	701.66
5	2.8	34.41	118.41	73.74	775.19	73.64	775.30
6	2.8	9.86	128.27	40.46	815.65	40.57	815.87
7	2.7	10.68	138.95	12.51	828.16	17.42	833.29
8	2.6	113.92	252.87	55.99	884.15	85.01	918.30



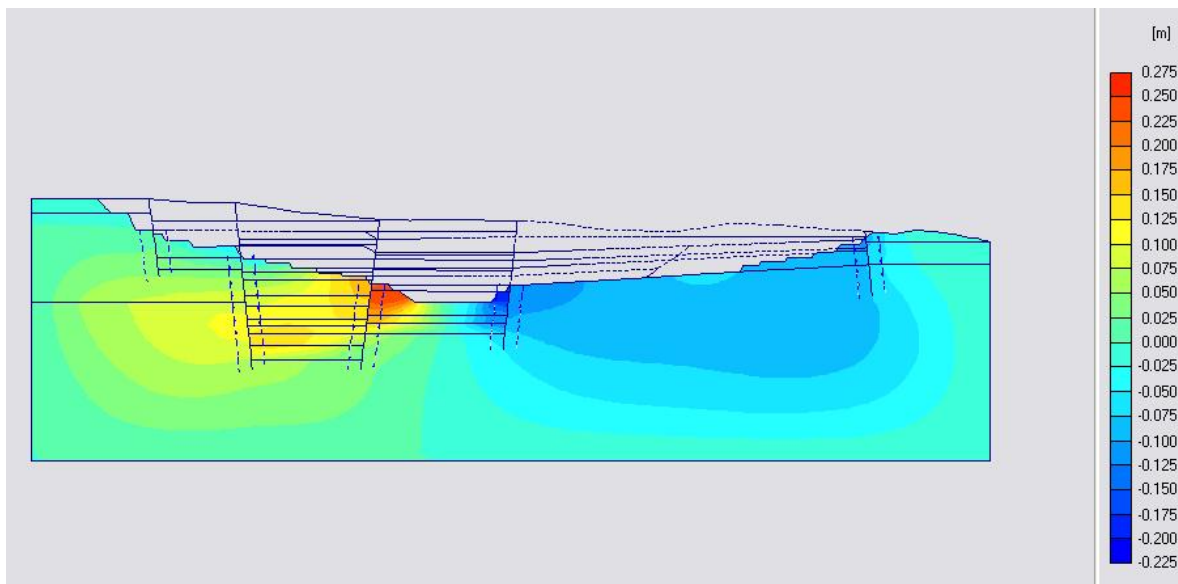
Εικ. 5.31 Οριζόντιες μετατοπίσεις 4^{ου} σταδίου του μοντέλου σκλήρυνσης εδάφους



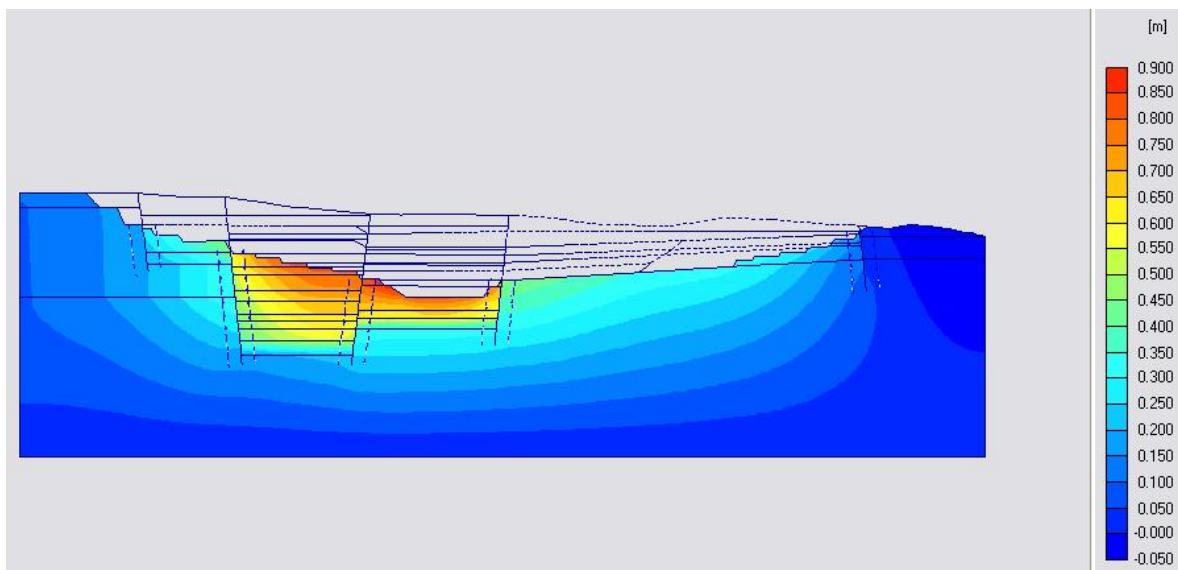
Εικ. 5.32 Κατακόρυφες μετατοπίσεις 4^{ου} σταδίου του μοντέλου σκλήρυνσης εδάφους



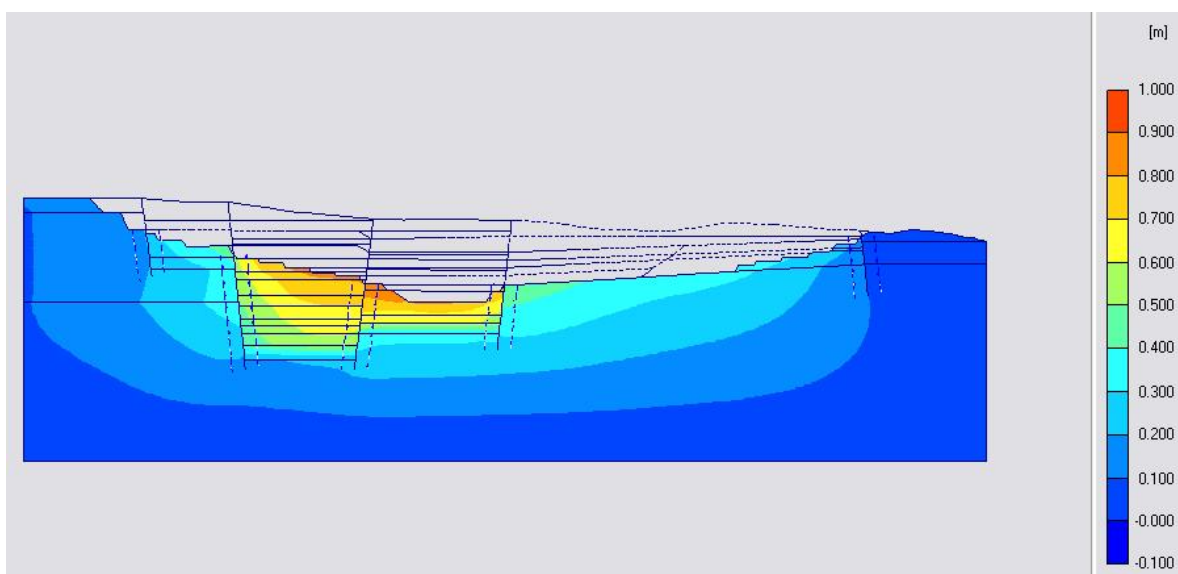
Εικ. 5.33 Συνολικές μετατοπίσεις 4^{ου} σταδίου του μοντέλου σκλήρυνσης εδάφους



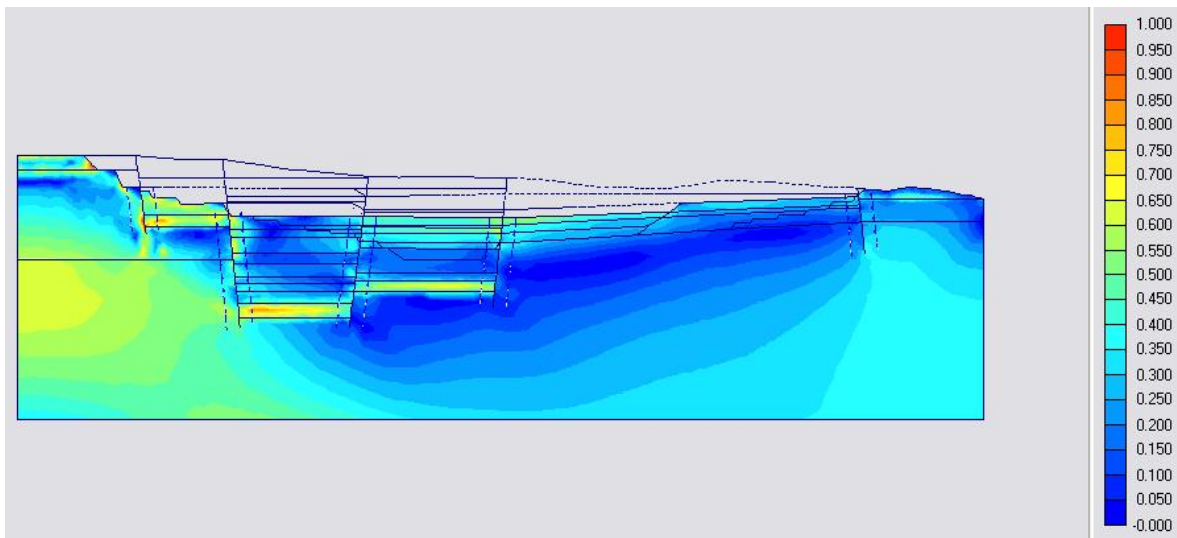
Εικ. 5.34 Οριζόντιες μετατοπίσεις 8^{ου} και τελικού σταδίου του μοντέλου σκλήρυνσης εδάφους



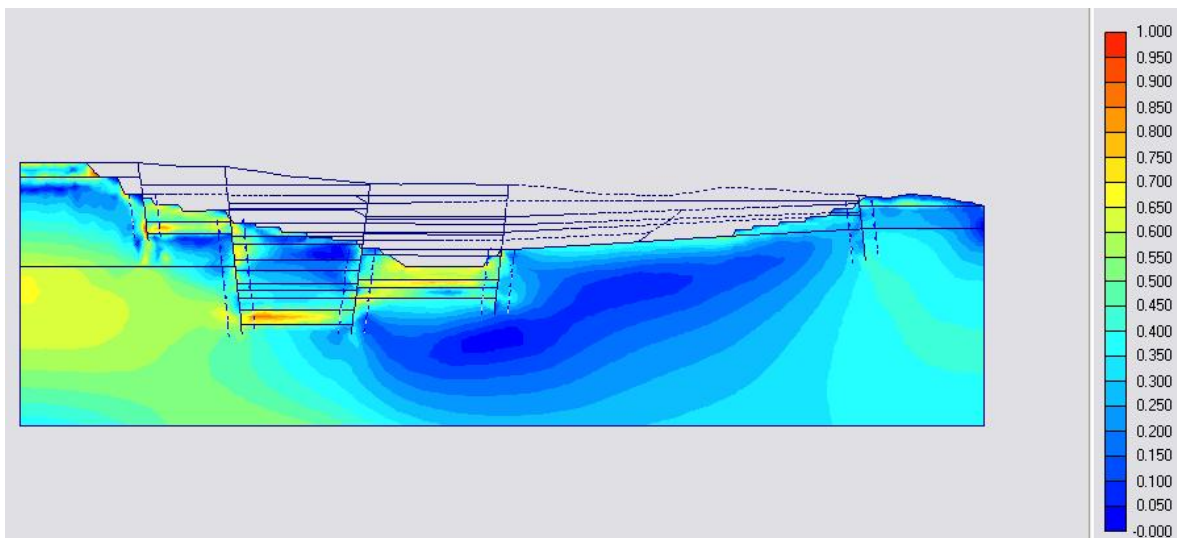
Εικ. 5.35 Κατακόρυφες μετατοπίσεις 8^{ου} και τελικού σταδίου του μοντέλου σκλήρυνσης εδάφους



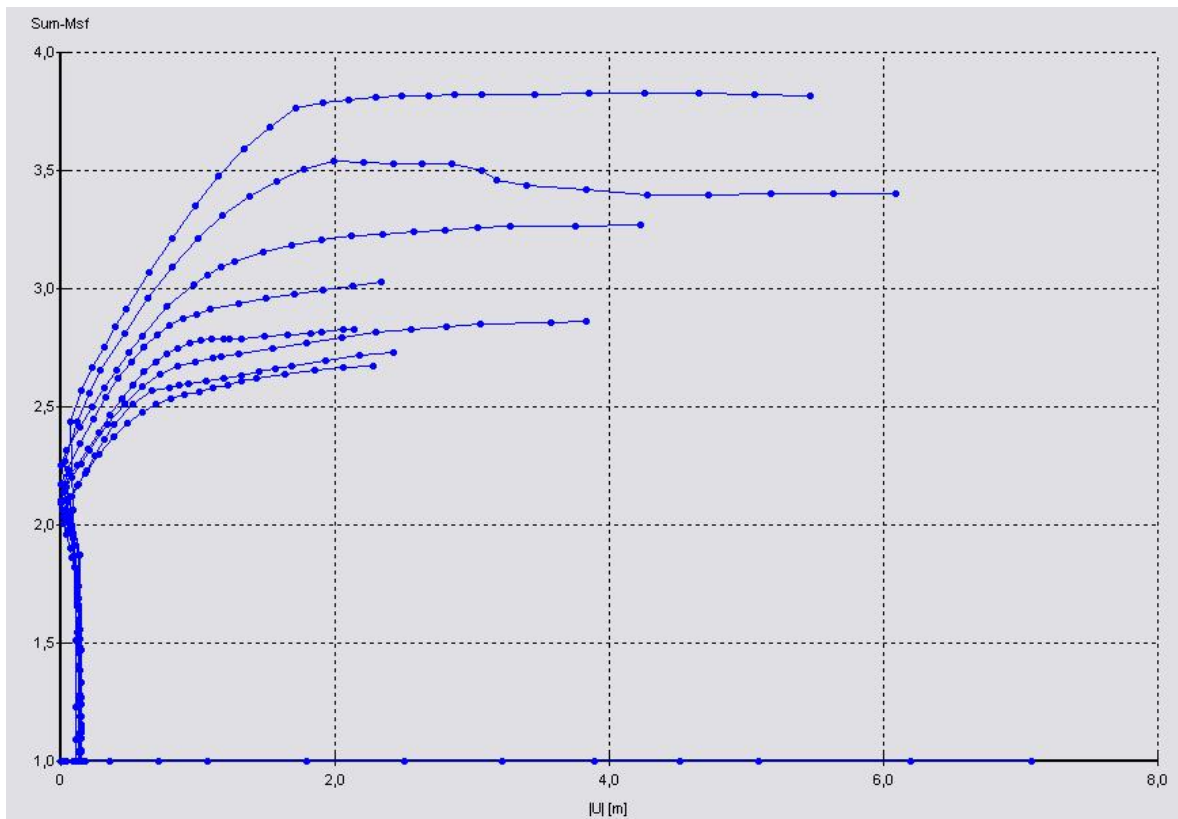
Εικ. 5.36 Συνολικές μετατοπίσεις 8^{ου} και τελικού σταδίου του μοντέλου σκλήρυνσης εδάφους



Εικ. 5.37 Κατανομή σχετικής διατμητικής τάσης στο 4^ο στάδιο του μοντέλου σκλήρυνσης εδάφους



Εικ. 5.38 Κατανομή σχετικής διατμητικής τάσης στο 8^ο και τελικό στάδιο του μοντέλου σκλήρυνσης εδάφους



Εικ. 5.39 Καμπύλες υπολογισμού του συντελεστή ασφάλειας κάθε σταδίου εκμετάλλευσης ορισμένες για το ίδιο σημείο του πρώτου αριστερου φρυδιού, για το μοντέλο συμπεριφοράς σκλήρυνσης εδάφους στα πετρώματα του λιγνίτη και της μάργας.

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα και προτάσεις

6.1 Συμπεράσματα απο την επίλυση του μοντέλου της τομής ΔΔ'

6.1.1 Οι συντελεστές Ασφάλειας

Όπως παρατηρείται στο κεφάλαιο 5, κατά την επίλυση του μοντέλου υπολογίζεται ο συντελεστής ασφάλειας, σε κάθε στάδιο εκσκαφής της τομής ΔΔ', για δύο περιπτώσεις. Στην μεν πρώτη εφαρμόζοντας το ελαστοπλαστικό μοντέλο συμπεριφοράς Mohr – Coulomb σε όλα τα υλικά που συνθέτουν την τομή, ενώ στη δεύτερη περίπτωση εφαρμόζοντας το ελαστοπλαστικό μοντέλο συμπεριφοράς σκλήρυνσης εδάφους (hardening soil model) στις στρώσεις λιγνίτη και μάργας ενώ παράλληλα διατηρήθηκαν οι ίδιες (σύμφωνα με την προηγούμενη περίπτωση) παράμετροι στα υπόλοιπα πετρώματα.

Η πρώτη περίπτωση χαρακτηρίζεται απο συντελεστές ασφάλειας που κυμαίνονται ανάμεσα στις τιμές 2,6 και 3,4. Το τελικό στάδιο εκμετάλλευσης υπολογίζεται να έχει τιμή του συντελεστή αυτού, 2,5.

Στη δεύτερη περίπτωση, οι τιμές αυτές κλιμακώνονται ανάμεσα στους αριθμούς 2,6 και 3,6, με αντίστοιχη τιμή του τελικού σταδίου 2,6.

Οι προσδιορισμένες τιμές αυτές των συντελεστών ασφαλείας και των δύο περιπτώσεων είναι ικανά μεγάλοι ώστε η εκμετάλλευση μέχρι το τελικό στάδιο που έχει ήδη σχεδιαστεί απο την τεχνική υπηρεσία της Δ.Ε.Η., να χαρακτηρίζεται ευσταθής. Εφόσον, και τα 'αυθαίρετα' διαμορφωμένα ενδιάμεσα στάδια, δεν παρουσιάζουν κανένα κίνδυνο κατολίσθησης ή κάποια υπέρμετρη παραμόρφωση, θα ήταν ενδιαφέρουσα η εξέταση μιας πιθανής διεύρυνσης (εκβάθυνση) της εκμετάλλευσης με σκοπό την αύξηση της αποληψιμότητας του λιγνίτη, θέμα που εξετάζεται στη συνέχεια του κεφαλαίου.

6.1.2 Οι οριζόντιες και οι κατακόρυφες παραμορφώσεις

Κατά την σταδιακή εκμετάλλευση της τομής, κάθε στάδιο εκσκαφής περιλαμβάνει και την παραμόρφωση των υποκείμενων στρώσεων λόγω αποφόρτισης τους απο το βάρος των υπερκειμένων. Η παραμόρφωση αυτή έχει ως αποτέλεσμα την μετατόπιση του εδάφους

τόσο κατά τον οριζόντιο, όσο και τον κατακόρυφο άξονα, στη περιοχή απο όπου εκσκάπτονται τα πετρώματα ανά στάδιο. Για τις δύο περιπτώσεις επίλυσης του μοντέλου, οι οριζόντιες και οι κατακόρυφες μετατοπίσεις παρουσιάζουν διαφορές στις τιμές τους αλλά όχι στη γεωμετρική κατανομή τους. Οι διαφορές αυτές οφείλονται στις διαφορετικές τιμές των μηχανικών παραμέτρων του λιγνίτη και της μάργας.

Έτσι, η οριζόντια μετατόπιση της πρώτης περίπτωσης στο τελικό στάδιο εκσκαφής έχει μέγιστη τιμή 0,9 m ενώ στη δεύτερη περίπτωση 0,2 m αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές προκύπτουν απο την άθροιση των μέγιστων οριζόντιων μετατοπίσεων ανά στάδιο μέχρι την τελική φάση εκμετάλλευσης. Στις Εικόνες 5.27 και 5.34 είναι εμφανής η ομοιότητα της κατανομής των οριζόντιων παραμορφώσεων και στις δύο περιπτώσεις καθώς χαρακτηρίζονται από έναν άξονα συμμετρίας περί το κέντρο της τομής, πράγμα που φανερώνει τη μετακίνηση του εδάφους προς το μεγαλύτερο κενό που δημιουργείται, (ο κύριος όγκος πετρωμάτων εκσκάπτεται απο το κέντρο της τομής).

Παρομοίως και στις κατακόρυφες μετατοπίσεις, παρατηρούνται διαφορές στις τιμές αναθόλωσης και ομοιότητες στη γεωμετρική κατανομή αυτής ανάμεσα στις δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση, η συνολική μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση, μέχρι και το τελευταίο στάδιο, έχει τιμή 4,27 m, ενώ στη δεύτερη 0,9 m. Εδώ η διαφορά των τιμών είναι μεγαλύτερης κλίμακας καθώς κατά τον κατακόρυφο άξονα πραγματοποιείται η βασική εμφάνιση της αναθόλωσης και έτσι η διαφορά ανάμεσα στις ιδιότητες του λιγνίτη και της μάργας των δύο περιπτώσεων επίλυσης, δημιουργεί μεγαλύτερες διαφοροποιήσεις. Και πάλι στις Εικόνες 5.26 και 5.35 είναι εμφανής η ομοιότητα της γεωμετρικής κατανομής των παραμορφώσεων κατά την αναθόλωση.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι λόγω ελλειπών στοιχείων των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών που απαρτίζουν την τομή ΔΔ', δεν υπάρχει κανένας λόγος να χαρακτηριστεί κάποια απο τις δύο περιπτώσεις επίλυσης του μοντέλου, ως καλύτερη προσομοίωση της πραγματικότητας. Καθώς οι παράμετροι των υλικών που έχουν εισαχθεί στο λογισμικό επίλυσης, βασίζονται στη βιβλιογραφία, και όχι σε πειραματικά δεδομένα, είναι πιθανό να υπάρχουν αποκλίσεις στις τιμές αναθόλωσης μετά την έναρξη της εξόρυξης στη περιοχή. Αποκλίσεις όμως που δεν πρόκειται να ξεπεράσουν τις τιμές αναθόλωσης της πρώτης περίπτωσης, καθώς τόσο η οριζόντια, όσο και η κατακόρυφη μετατόπιση αυτής της περίπτωσης, θεωρείται ότι έχει υπερβολικά μεγάλη τιμή σε σύγκριση με εμπειρικές παρατηρήσεις παρόμοιων σχηματισμών και εκμεταλλεύσεων. Παρ' όλα αυτά, σύμφωνα με τους υπολογισμούς, η ευστάθεια του πρानούς είναι δεδομένη.

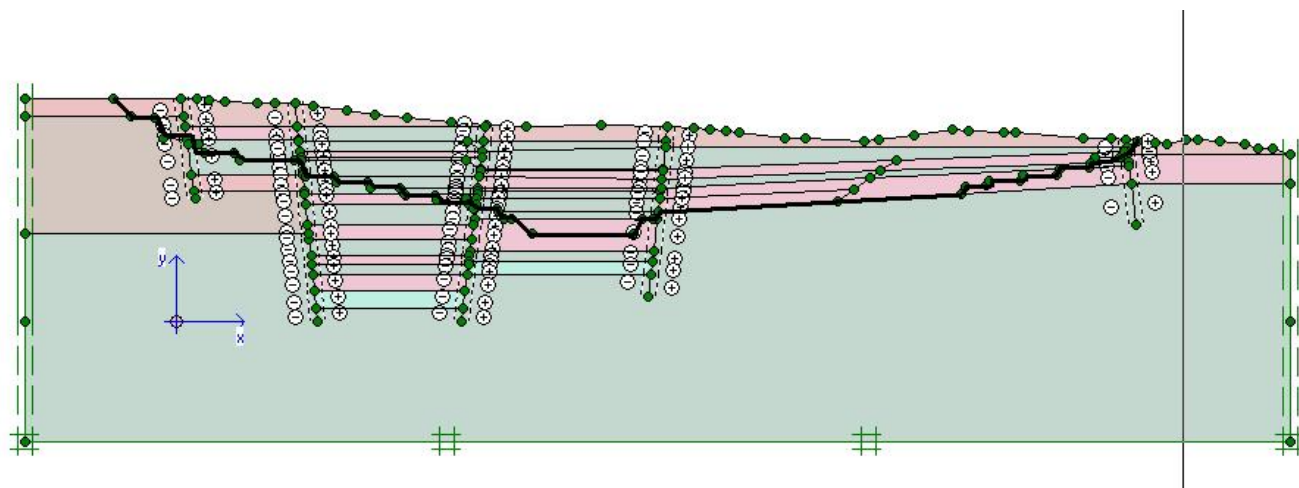
6.2 Προτάσεις

Μετά την εξέταση των δύο περιπτώσεων επίλυσης του μοντέλου της τομής ΔΔ', η βασικότερη πρόταση, με σκοπό την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων, είναι η περισσότερη εργαστηριακή έρευνα των σχηματισμών που εμφανίζονται στην περιοχή της εκσκαφής. Με δειγματοληψία μέσω πυρηνοληπτικών γεωτρήσεων, είναι δυνατόν να προσδιοριστούν με μεγάλη ακρίβεια οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών, το βέλτιστο μοντέλο συμπεριφοράς τους, καθώς και το ποσοστό μείωσης της συνοχής των σχηματισμών στην διεπιφάνεια του ρήγματος. Όλα αυτά έχουν σκοπό την βέλτιστη προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς της τομής κατά την εκσκαφή, γεγονός που συντελεί στην καλύτερη επιβεβαίωση της ευστάθειας του λιγνιτωρυχείου της Μαυροπηγής. Τον ίδιο σκοπό θα έχει ο ακριβής προσδιορισμός των ενδιάμεσων σταδίων εκμετάλλευσης, και η πιθανή εφαρμογή διαφορετικής απλούστευσης της στρωματογραφίας, πάντα σε συνεργασία με την τεχνική υπηρεσία της Δ.Ε.Η. για την επίτευξη όσον το δυνατόν ακριβέστερων αποτελεσμάτων.

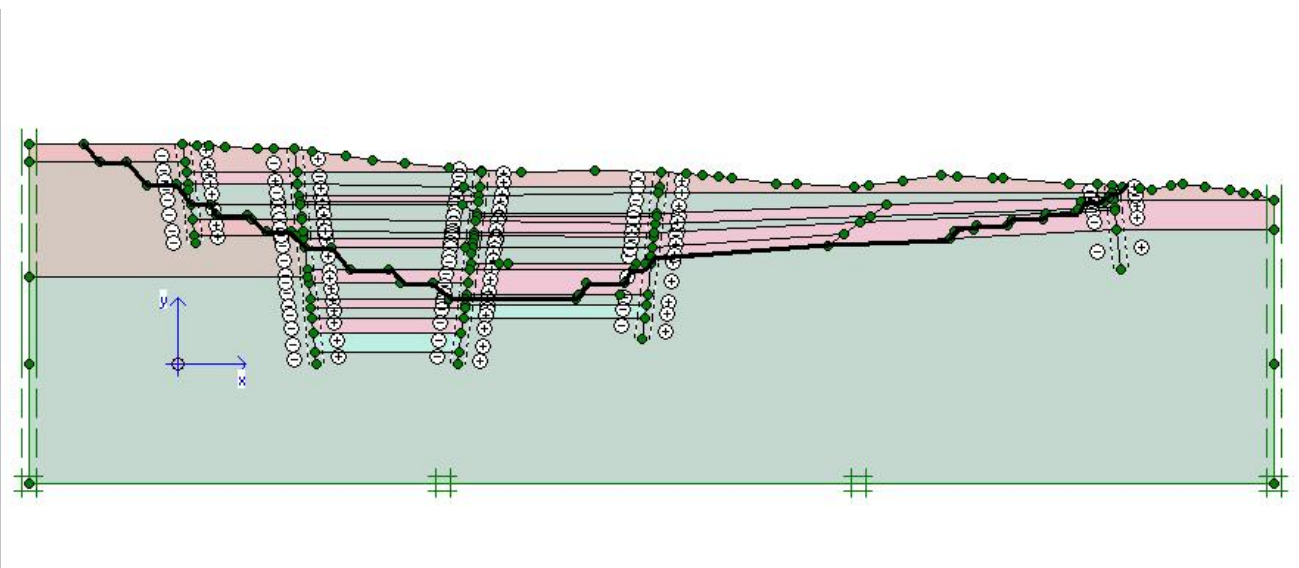
Όσον αφορά τη διεύρυνση της εκμετάλλευσης, μελετήθηκε η εκβάθυνση της εκσκαφής κατά περίπου 35 m, με σκοπό τη μεγαλύτερη απόληψη λιγνίτη. Η εκβάθυνση αυτή είχε ως αποτέλεσμα τη μετατόπιση της πρώτης βαθμίδας κατά 50 m πιο αριστερά, διατηρώντας όμως ασφαλή απόσταση από το χωριό της Μαυροπηγής. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι Εικόνες 6.1 και 6.2 όπου εμφανίζεται η διαφορετική τελική φάση εκμετάλλευσης και ο Πίνακας 6.1 με τις επιμέρους οριζόντιες, κατακόρυφες, και συνολικές μετατοπίσεις των σταδίων εκμετάλλευσης, καθώς και ο συντελεστής ασφάλειας καθενός από αυτά.

Πρέπει να αναφερθεί ότι το μοντέλο επιλύθηκε σύμφωνα με τις παραμέτρους και το μοντέλο συμπεριφοράς υλικών της προηγούμενης πρώτης περίπτωσης επίλυσης, και ότι τα στάδια εκμετάλλευσης έχουν ελάχιστες διαφορές όσον αφορά τη γεωμετρία ανάμεσα στις δύο θεωρήσεις.

Στη συνέχεια εμφανίζονται οι Εικόνες 6.3 – 6.8 της χρωματικής κλίμακας των ίδιων μετατοπίσεων για τα ίδια στάδια εκσκαφής όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, η σχετική διατμητική τάση των σταδίων αυτών, καθώς και το διάγραμμα υπολογισμών των συντελεστών ασφάλειας ανά στάδιο (Εικ. 6.9).



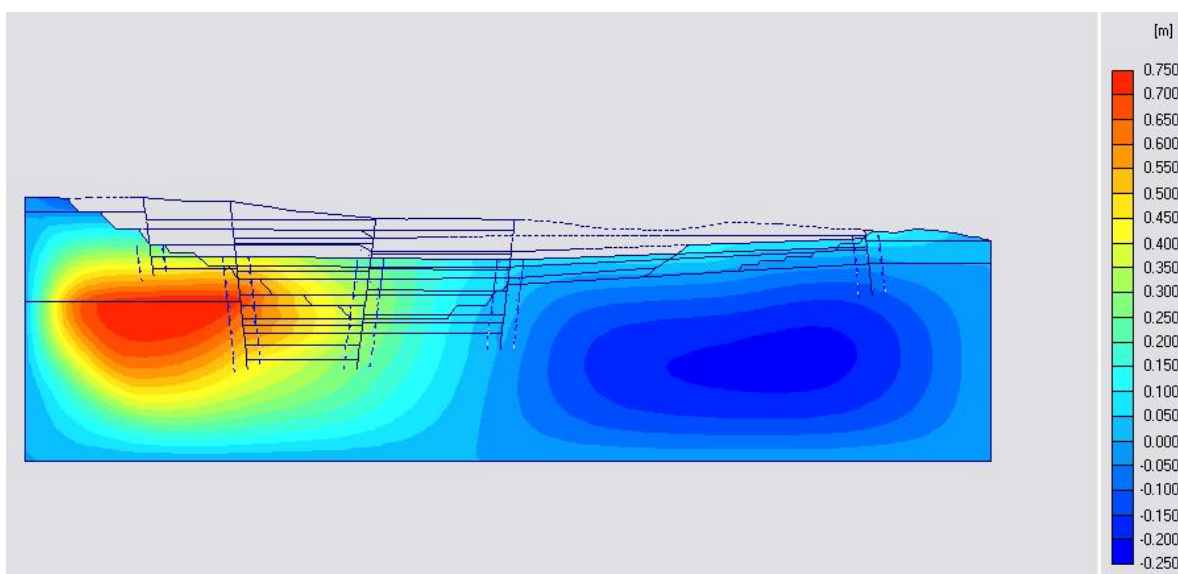
Εικ. 6.1 Οι βαθμίδες της τελικής φάσης εκμετάλλευσης σχεδιασμένες από την τεχνική υπηρεσία της Δ.Ε.Η.



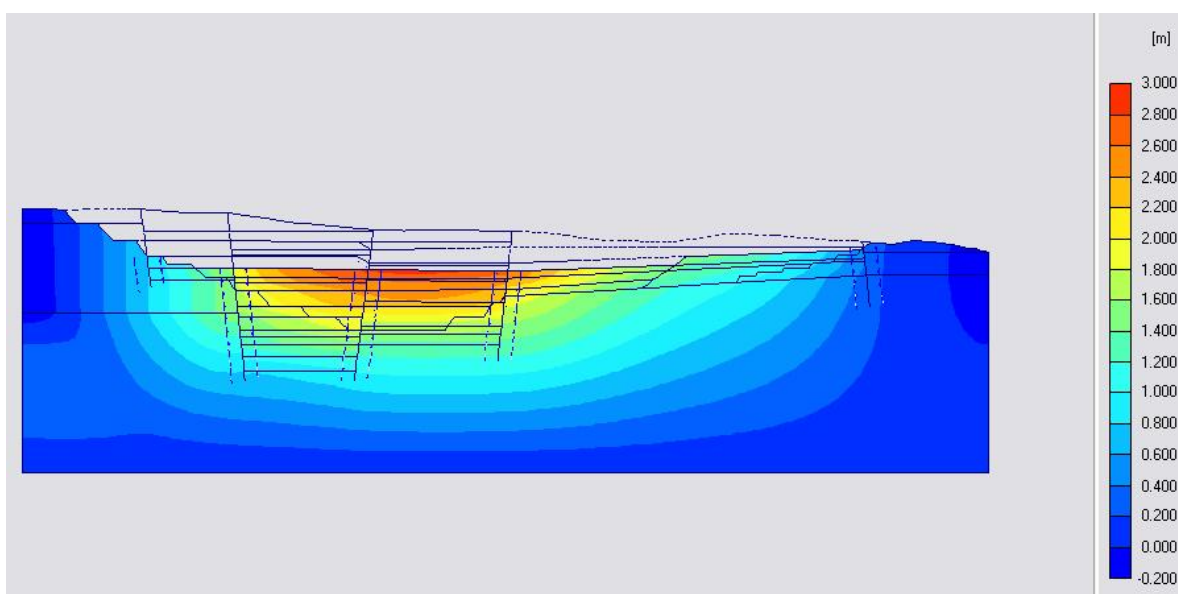
Εικ. 6.2 Διευρυμένη εκμετάλλευση της τομής ΔΔ'

Πίνακας 6.1 Χαρακτηριστικά (μέγιστες τιμές) των σταδίων εκμετάλλευσης κατά την επίλυση του μοντέλου διεύρυνσης εκμετάλλευσης

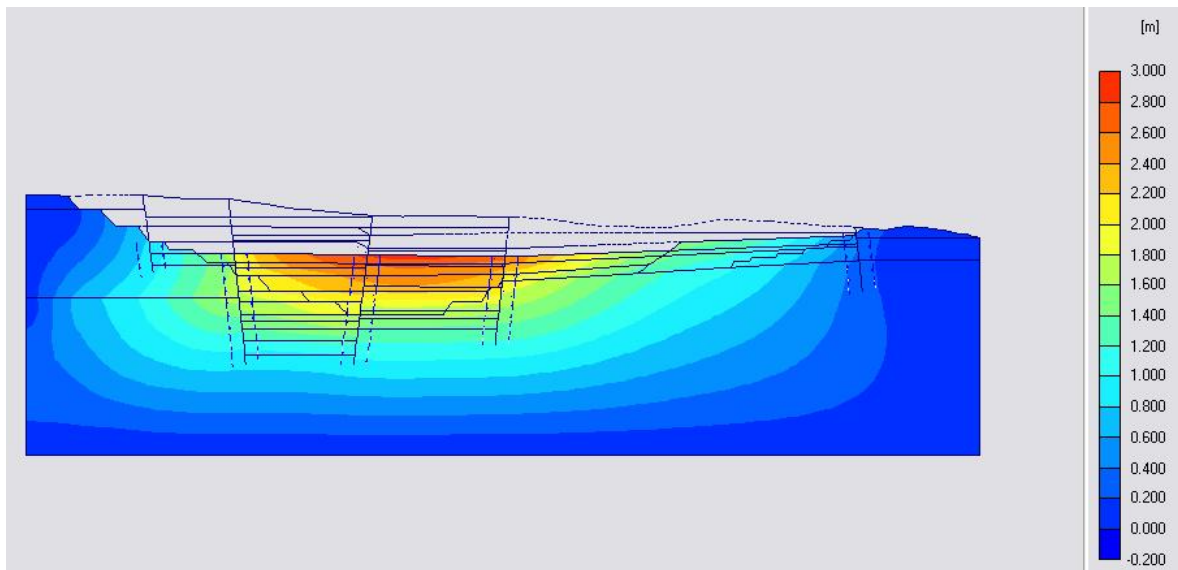
Αριθμός σταδίου	Συντελεστής ασφάλειας	Οριζόντιες Μετατοπίσεις (m)	Αθροιστικές Οριζόντιες (m)	Κατακόρυφες Μετατοπίσεις (m)	Αθροιστικές Κατακόρυφες (m)	Συνολικές μετατοπίσεις (m)	Αθροιστικές Συνολικές (m)
1	5,5	$6,32 \cdot 10^{-3}$	$6,32 \cdot 10^{-3}$	$4,60 \cdot 10^{-3}$	$4,60 \cdot 10^{-3}$	$7,44 \cdot 10^{-3}$	$7,44 \cdot 10^{-3}$
2	4,8	$225,54 \cdot 10^{-3}$	$231,86 \cdot 10^{-3}$	1,525	1,53	1,522	1,53
3	4,0	$305,02 \cdot 10^{-3}$	$536,88 \cdot 10^{-3}$	1,03	2,56	1,04	2,57
4	3,7	$211,01 \cdot 10^{-3}$	$747,89 \cdot 10^{-3}$	0,37	2,93	0,37	2,94
5	3,4	$189,58 \cdot 10^{-3}$	$937,47 \cdot 10^{-3}$	0,40	3,33	0,40	3,34
6	3,0	$162,53 \cdot 10^{-3}$	1,10	0,38	3,71	0,38	3,72
7	2,6	$150,00 \cdot 10^{-3}$	1,25	0,71	4,42	0,71	4,43
8	2,4	$40,00 \cdot 10^{-3}$	1,29	-0,13	4,29	-0,11	4,32



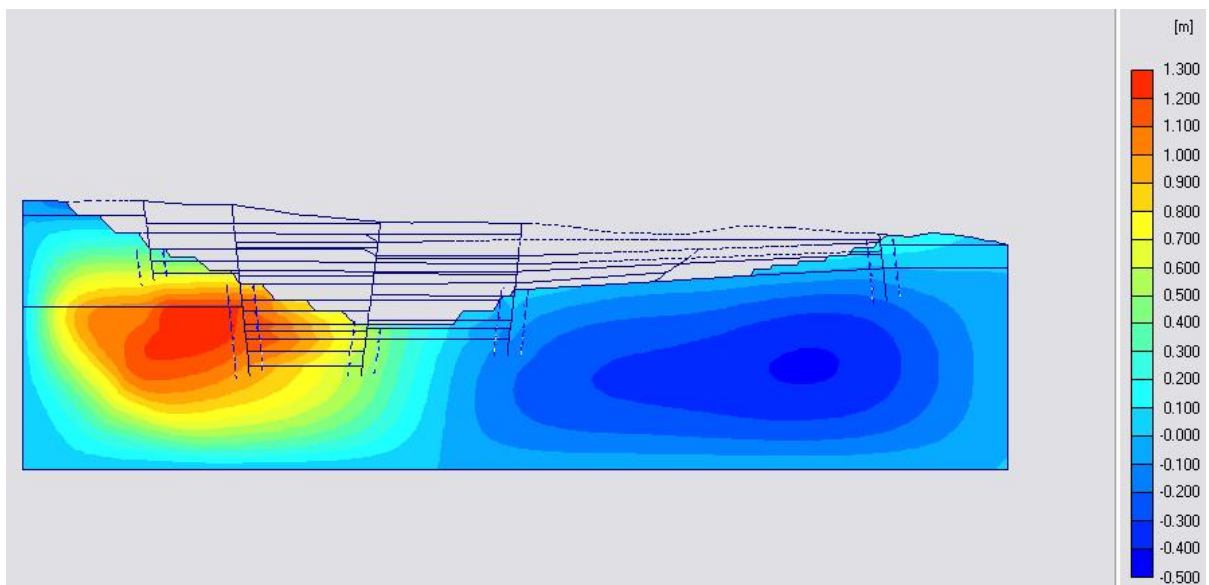
Εικ. 6.3 Οριζόντιες μετατοπίσεις ενδιάμεσου (4^ο) σταδίου εκσκαφής του μοντέλου διευρυμένης εκμετάλλευσης



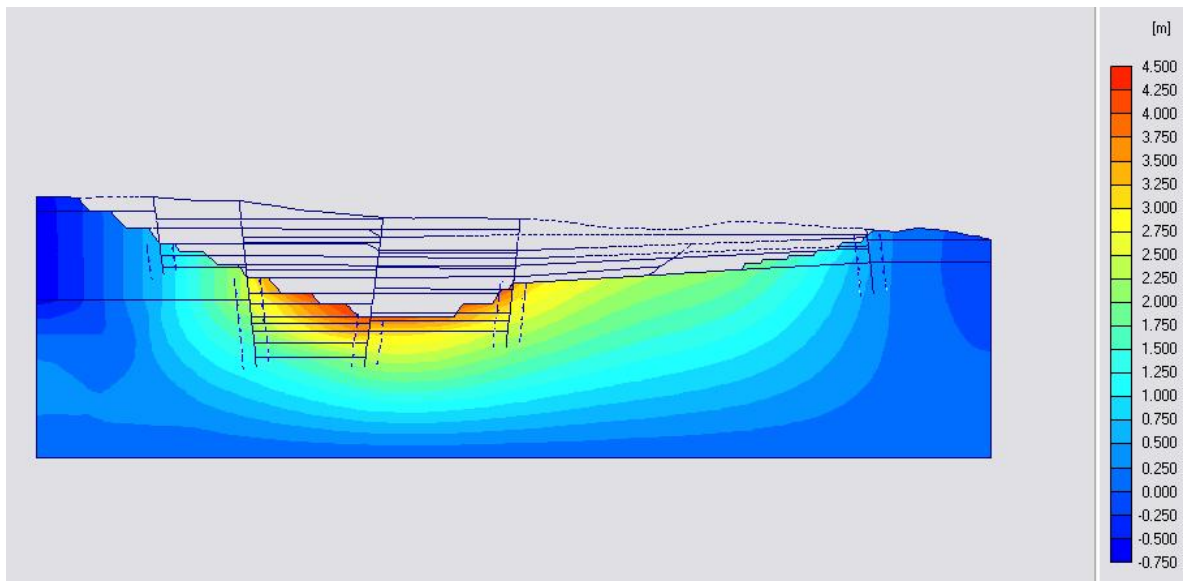
Εικ. 6.4 Κατακόρυφες μετατοπίσεις ενδιάμεσου (4^ο) σταδίου εκσκαφής του μοντέλου διευρυμένης εκμετάλλευσης



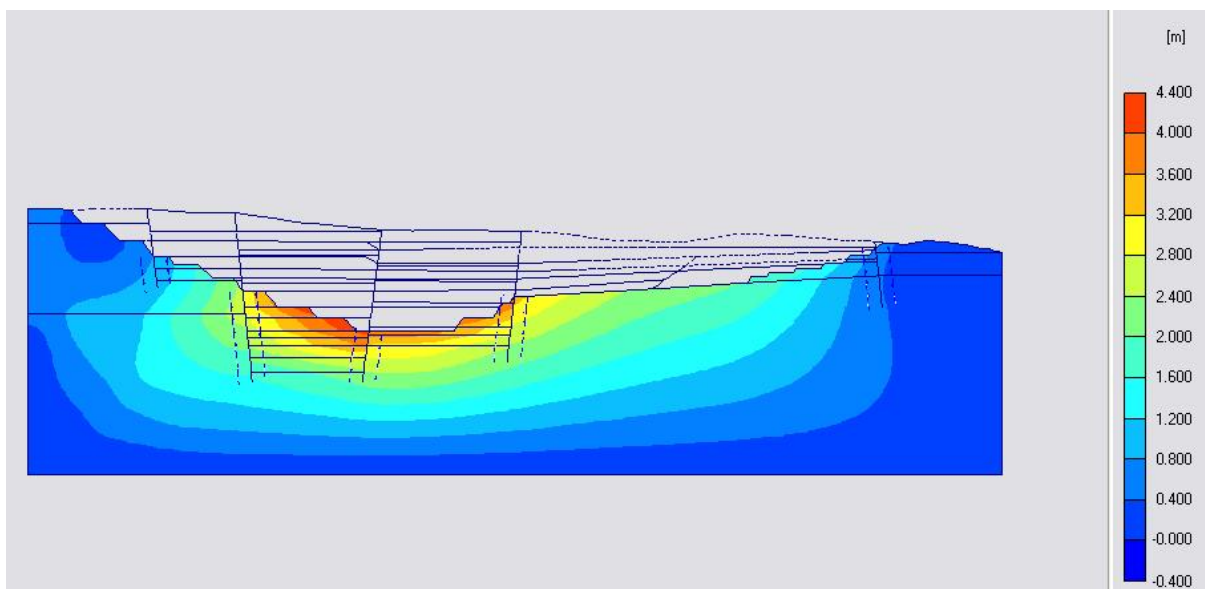
Εικ. 6.5 Συνολικές μετατοπίσεις ενδιάμεσου (4^ο) σταδίου εκσκαφής του μοντέλου διευρυμένης εκμετάλλευσης



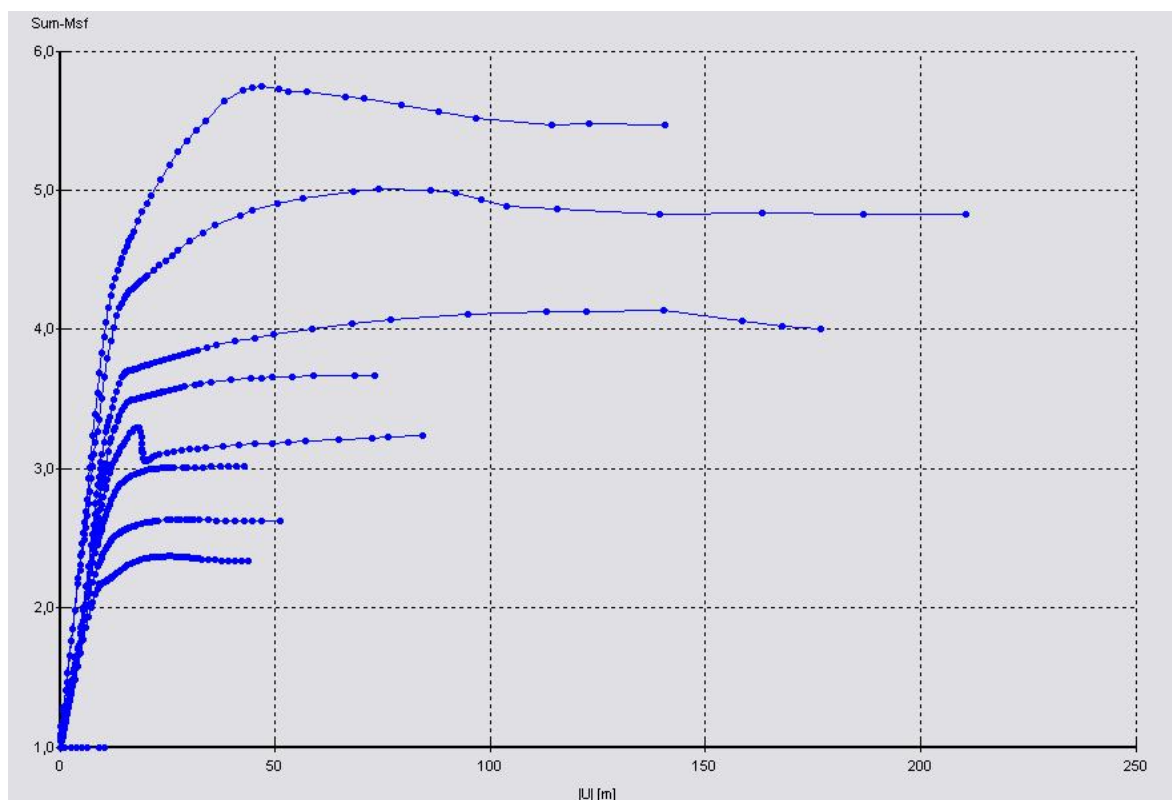
Εικ. 6.6 Οριζόντιες μετατοπίσεις τελικού (8^ο) σταδίου εκσκαφής του μοντέλου διευρυμένης εκμετάλλευσης



Εικ. 6.7 Κατακόρυφες μετατοπίσεις τελικού (8^ο) σταδίου εκσκαφής του μοντέλου διευρυμένης εκμετάλλευσης



Εικ. 6.8 Συνολικές μετατοπίσεις τελικού (8^ο) σταδίου εκσκαφής του μοντέλου διευρυμένης εκμετάλλευσης



Εικ. 6.9 Καμπύλες υπολογισμού του συντελεστή ασφάλειας κάθε σταδίου εκμετάλλευσης ορισμένες από πάνω προς τα κάτω για κάθε στάδιο διαδοχικά, για το μοντέλο διευρυμένης εκμετάλλευσης.

Όπως γίνεται αντιληπτό από τις τιμές του συντελεστή ασφάλειας κάθε σταδίου, η εκβάθυνση της εκμετάλλευσης, μπορεί να γίνει, θεωρώντας τη διαμόρφωση αυτή ευσταθή. Σίγουρα όμως είναι αναγκαίος ο εργαστηριακός προσδιορισμός των παραμέτρων των υλικών της τομής για μεγαλύτερη ακρίβεια και συνεπώς βεβαιότητας της ευστάθειάς. Αναγκαία κρίνεται επίσης και η οικονομική ανάλυση αυτής της περαιτέρω εκμετάλλευσης για τον καθορισμό του νέου ποσοστού αποληψιμότητας λιγνίτη και για το αν είναι συμφέρουσα μια τέτοια αύξηση του βάθους εκσκαφής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική

- Αγιουτάντης Ζ. (2002), 'Στοιχεία Γεωμηχανικής, Μηχανικής Πετρωμάτων', Εκδόσεις Ίων, Αθήνα
- Βαλαλάς Θ. (1985), 'Εδαφομηχανική', Εκδόσεις Αφοί Κυριακίδη, Θεσσαλονίκη
- Διαμαντόπουλος Α. 'Γεωλογική και Τεκτονική Δομή της Μαυροπηγής', Τεχνική Υπηρεσία Δ.Ε.Η.
- Καβουσάνος Εμ. (2003), 'Αξιολόγηση γεωτρητικών δεδομένων και εξαγωγή γεωτεχνικών παραμέτρων για την αριθμητική προσομοίωση ευστάθειας πρανών', Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά
- Καλογήρου Ειρ. (2000), 'Εργαστηριακή εκτίμηση της παραμορφωσιμότητας εδαφών και υπολογισμός της αναθόλωσης του δαπέδου της εκσκαφής του Τομέα 6 (Λιγνιτωρυχεία Πτολεμαΐδας)', Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά
- Λοΐζος Α. (1964), 'Διαλέξεις Εδαφομηχανικής και Θεμελιώσεων – Κατολισθήσεις Πρανών', Τ.Ε.Ε., Αθήνα
- Σαρρής Ερν., Ξηρουδάκης Γ., Τσομπανάκης Γ., Ψαρρόπουλος Π. (2005), 'Stability of tailing dams', International Workshop in 'Geoenvironment and Geotechnics', Milos island, Greece

Ξένη

- Brinkgrvee R.B.J., Bakker H.L. (1991), 'Non linear finite element analysis of safety factors', Computer methods and advances in Geomechanics, Balkema , Rotterdam
- Lambe W., Whitman R. (1979), 'Soil Mechanics', M.I.T.
- Plaxis (1998), 'User's Manual for version 7.0', Balkema , Rotterdam