

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΔΙΑΔΟΧΙΚΩΝ ΟΡΟΦΩΝ ΜΕ ΚΕΝΑ
ΜΕΤΩΠΑ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ – ΕΚΤΟΝΩΣΗΣ ΤΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΣΕΦΕΡΙΑΔΗ ΕΥΓΕΝΙΑ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Γ. ΕΞΑΔΑΚΤΥΛΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)

Ζ. ΑΓΙΟΥΤΑΝΤΗΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Ε. ΣΤΕΙΑΚΑΚΗΣ, ΕΠΙΚ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΧΑΝΙΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2015

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο, εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις των εξεταστών.

αφιερώνεται

στην οικογένειά μου

Ε. Σ.

Περίληψη

Έως και σήμερα ο σχεδιασμός των υπογείων εκμεταλλεύσεων γίνεται συνήθως με εμπειρικό τρόπο, ενώ στις περιπτώσεις που εφαρμόζονται αναλυτικές μέθοδοι, ή πιο συχνά αριθμητικά μοντέλα (πρότυπα), γίνονται οι παραδοχές της επίπεδης παραμόρφωσης συνεχών και ισοτρόπων ελαστικών, και μερικές φορές ανελαστικών, πετρωμάτων. Η εφαρμογή τρισδιάστατων αριθμητικών μοντέλων είναι εξαιρετικά σπάνια, λόγω του απαγορευτικού μεγέθους του μοντέλου, στο οποίο περιλαμβάνονται όλα τα παραγωγικά μέτωπα και η μεταβολή της γεωμετρίας της εκμετάλλευσης συν τω χρόνω, καθώς και η γεωλογική πληροφορία.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η εξαγωγή συμπερασμάτων από την εφαρμογή της θεωρίας «σύγκλισης ανοιγμάτων – εκτόνωσης των τάσεων» για την ανάλυση των τάσεων-παραμορφώσεων κατά την εφαρμογή της μεθόδου υπόγειας εκμετάλλευσης διαδοχικών ορόφων με κενά μέτωπα (sublevel open stoping). Η θεωρία (προσέγγιση) της Σύγκλισης- Εκτόνωσης (Σ-Ε) επιλέχθηκε διότι μπορεί να εφαρμοσθεί στις δύο διαστάσεις (κατά την έννοια της επίπεδης τομής), λαμβάνοντας όμως ταυτόχρονα υπόψιν την απόσταση του μετώπου, ή των μετώπων, από την επίπεδη τομή. Στην εν λόγω τομή γίνεται ανάλυση η οποία αφορά τη δράση υποστήριξης του μετώπου (support effect) σε περιοχές εκμετάλλευσης κοντά σε αυτό. Η προσέγγιση αυτή ταιριάζει και σε συνθήκες εκμετάλλευσης, που τα μέτρα υποστήριξης δεν έχουν μόνιμο χαρακτήρα στα μέτωπα παραγωγής και εφαρμόζονται σε κάποια απόσταση πίσω από το μέτωπο. Για την εφαρμογή της μεθόδου Σ-Ε στη συγκεκριμένη εργασία, χρειάστηκε να γίνει θεώρηση της έννοιας της «υδραυλικής ακτίνας» των παραγωγικών μετώπων, αντικαθιστώντας την ακτίνα κυκλικών σηράγγων, που χρησιμοποιείται στην εφαρμογή της μεθόδου αυτής. Η εφαρμοζόμενη μέθοδος Σ-Ε μπορεί να επιτευχθεί με αναλυτικό τρόπο αλλά και αριθμητικό. Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας επιλέχθηκε η δεύτερη «οδός» με τη χρήση εμπορικού αριθμητικού κώδικα πεπερασμένων στοιχείων που είναι προσαρμοσμένος για στατικές αναλύσεις προβλημάτων διάνοιξης σηράγγων και υπογείων έργων γενικότερα.

Συνεπώς η προτεινόμενη μέθοδος λαμβάνει υπόψιν τα διαδοχικά στάδια εκμετάλλευσης του κοιτάσματος μέχρι την εξόφληση και επιτρέπει τη θεώρηση των ελαστικών και πλαστικών παραμέτρων που διέπουν τη στατική και κινηματική συμπεριφορά των αγόνων και του κοιτάσματος. Στη μέθοδο της Σύγκλισης- Εκτόνωσης αυτό που θέλουμε

να εκτιμήσουμε, σε αρχικό στάδιο προ-σχεδιασμού, είναι η συμπεριφορά της ανυποστήρικτης μάζας του πετρώματος που περιβάλλει τις εκσκαφές – και εκφράζεται ποσοτικά με την «καμπύλη αντίδρασης της βραχομάζας» (ground reaction curve) - καθώς και το φαινόμενο της δράσης του «ανακουφιστικού τόξου» (arching effect).

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται παράδειγμα εφαρμογής της προσαρμοσμένης για υπόγειες εκμεταλλεύσεις μεθόδου Σ-Ε στην εκμετάλλευση κοιτάσματος τάλκη, μέτριου πάχους και μεγάλης κλίσης εντός οφιο-ασβεστολίθων. Δίνεται έμφαση στο χαρακτηρισμό των παραμέτρων ελαστικότητας και αντοχής των ασυνεχών πετρωμάτων με τη χρήση των συστημάτων ταξινόμησης βραχομαζών RMR και Q καθώς και του δείκτη αντοχής βραχομάζας GSI, και γίνεται κριτική ανάλυση των προτεινόμενων μοντέλων α-στοχίας, κυρίως του μοντέλου των Hoek-Brown, το οποίο προτείνεται από πολλούς ερευνητές και τείνει να αντικαταστήσει το παλιό καθιερωμένο μοντέλο των Coulomb – Mohr.

Πρόλογος

Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών της σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Εξαδάκτυλο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας αλλά και για τις γνώσεις που μου προσέφερε βοηθώντας με να κατανοήσω βαθύτερα τον τομέα της Μηχανικής Πετρωμάτων. Δε θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω τον Δρ. Παντελή Λιόλιο για την υπομονή του, την αμέριστη βοήθειά του και για τον τρόπο που με έμαθε να σκέφτομαι. Επίσης, ευχαριστώ τους καθηγητές κ. Αγιουτάντη και κ. Στειακάκη για τον χρόνο που αφιέρωσαν στη διόρθωση της παρούσας εργασίας.

Συνεχίζοντας οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου που με στήριξαν και εξακολουθούν να με στηρίζουν ο καθένας με το δικό του τρόπο, αλλά πάνω απ' όλα με πίστη προς εμένα.

Τέλος δεν θα μπορούσα να παραλείψω τους φίλους που είχα την ευτυχία να αποκτήσω στα Χανιά, για αυτά τα μοναδικά χρόνια και τις όμορφες αναμνήσεις που μου χάρισαν και θα με συνοδεύουν στη μετέπειτα ζωή μου, όπως επίσης και τον Βασίλη για την υπομονή και τη συμπαράστασή του σε όλους τους τομείς.

Χανιά, Μάρτιος 2015

Σεφεριάδη Εβίνα

Περιεχόμενα

Περίληψη	v
Πρόλογος	vii
Κατάλογος Σχημάτων και Πινάκων	xi
1. Εισαγωγή	1
1.1 Αντικείμενο.....	1
1.2 Σκοπός	2
2. Μέθοδος διαδοχικών ορόφων με κενά μέτωπα	3
2.1 Γενικά στοιχεία	3
2.2 Προϋποθέσεις και πεδίο εφαρμογής.....	3
2.3 Εργασίες προπαρασκευής.....	3
2.4 Εξόρυξη	4
2.5 Φόρτωση – Αποκομιδή του μεταλλεύματος.....	7
2.6 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα της μεθόδου	7
3. Χαρακτηριστικές ιδιότητες βραχόμαζας	9
3.1 Περιγραφή της βραχόμαζας.....	9
3.2 Συστήματα ταξινόμησης της βραχόμαζας	9
3.2.1 Σύστημα RMR.....	10
3.2.2 Σύστημα Q.....	12
3.2.3 Δείκτης αντοχής βραχόμαζας GSI (Geological Strength Index)	17
3.3 Αρχική εντατική κατάσταση.....	18
4. Κριτήρια αστοχίας βραχόμαζας	21
4.1 Κριτήριο αστοχίας Hoek – Brown.....	21
4.2 Θεωρία αστοχίας Mohr – Coulomb.....	22
4.2.1 Ο κύκλος του Mohr	22
4.2.2 Κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb	24
4.3 Ο Πόλος των Καθέτων	26
5. Μέθοδος Σύγκλισης – Υποστύλωσης	29
5.1 Μελέτη προχώρησης σήραγγας με τη Μέθοδο Σύγκλισης – Υποστύλωσης	29
5.2 Υπολογισμός σύγκλισης – εκτόνωσης σηράγγων	35
5.2.1 Ανάλυση αλληλεπίδρασης βραχόμαζας και υποστύλωσης.....	37
5.2.2 Αξονοσυμμετρική σήραγγα σε ελαστικό γεωϋλικό	38

6. Πρόγραμμα υπολογιστικής γεωμηχανικής Phase²	43
6.1 Γενικά	43
6.2 Χαρακτηριστικά πετρώματος	44
6.3 Γεωμετρία εκμετάλλευσης	44
6.4 Διακριτοποίηση	47
6.5 Συνοριακές συνθήκες	47
6.6 Εντατικό πεδίο	47
6.7 Μηχανικές ιδιότητες πετρωμάτων	48
6.8 Υπολογισμός επιφανειακών τάσεων με βάση το συντελεστή εκτόνωσης	52
6.9 Αποτελέσματα	56
7. Συμπεράσματα – Προτάσεις	63
7.1 Συμπεράσματα	63
7.2 Προτάσεις	64
Βιβλιογραφία	65
Παράρτημα	67
Π1. Αποτελέσματα από το πρόγραμμα Phase για την κύρια τάση σ_1 για κάθε stage της εκμετάλλευσης	67
Π2. Αποτελέσματα από το πρόγραμμα Phase για την κύρια τάση σ_3 για κάθε stage της εκμετάλλευσης	70
Π3. Αποτελέσματα από το πρόγραμμα Phase για τη συνολική μετατόπιση (οριζόντια και κατακόρυφη) της εκσκαφής για κάθε stage της εκμετάλλευσης	73

Κατάλογος Σχημάτων

2.1 Τρισδιάστατη απεικόνιση εργασιών προπαρασκευής	4
2.2 Τομή κατά τη διεύθυνση του κοιτάσματος.....	5
2.3 α) Τομή κατά την κλίση Α-Α' μικρού πάχους κοιτάσματος για περίπτωση που η διευθυντική στοά του ορόφου καλύπτει όλο το πάχος του κοιτάσματος και β) Τομή κατά τη διεύθυνση του κοιτάσματος	6
3.1 Δείκτης αντοχής της βραχώμαζας GSI.....	18
4.1 α) Μορφή του κριτηρίου αστοχίας Hoek-Brown σε άξονες σ_1 - σ_3 και β) σε άξονες τ - σ'	22
4.2 Ορισμός του κύκλου του Mohr.....	23
4.3 α) Σχέση μεταξύ συνοχής c και GSI και β) Γωνίας εσωτερικής τριβής ϕ και GSI.....	25
4.4 Γραφική απεικόνιση του κριτηρίου αστοχίας Mohr – Coulomb	26
4.3 Κύκλος του Mohr και Πόλος των Καθέτων	27
5.1 Κυλινδρική σήραγγα μέσα σε βραχώμαζα.....	30
5.2 α) Τομή Α – Α' χωρίς υποστήριξη β) Τομή Α – Α' με υποστήριξη.....	30
5.3 Φορτία υποστήριξης κατά την προχώρηση της σήραγγας	31
5.4 Σχηματική αναπαράσταση των καμπύλων LDP, GRC και SCC.....	33
5.5 Σύγκλιση της σήραγγας συναρτήσει της απόστασης από το μέτωπο βάση τρειςδιάστατης προσομοίωσης της εκσκαφής της σήραγγας και επί τόπου μετρήσεις	37
5.6 Βαθμιαία εκτόνωση των γεωστατικών τάσεων συναρτήσει της απόστασης από το μέτωπο	39
5.7 Καμπύλη αντίδρασης πετρώματος (GRC) και χαρακτηριστική καμπύλη υποστήριξης (SCC)	41
6.1 Τομή εκμετάλλευσης κατά την παράταξη	45
6.2 Στάδια εκμετάλλευσης σε τομή κατά την παράταξη	46
6.3 Field Stress Properties	48
6.4 Γραφική παράσταση της ακεραιότητας της βραχώμαζας (1-D) συναρτήσει του RMR βασισμένη στο νόμο του Lorentz	49
6.5 RMR για ασβεστόλιθο και τάλκη	50
6.6 Μηχανικές ιδιότητες ασβεστολίθου	51
6.7 Μηχανικές ιδιότητες τάλκη	51
6.8 Φάσεις εκμετάλλευσης κατά την παράταξη	52
6.9 Υπολογισμός σ_H από τον Πόλο των καθέτων	54
6.10 Μοντέλο ανά στάδιο όπως σχεδιάστηκε στο Phase	55

6.11 Οριζόντιες μετατοπίσεις.....	57
6.12 Καμπύλη GRC για τα σημεία A, C, E.....	60
6.13 Καμπύλη GRC για τα σημεία B, D, F.....	61

Κατάλογος Πινάκων

3.1 Μεταβλητές του συστήματος RMR	11
3.2 Μεταβλητές του συστήματος Q	16
6.1 Μεταβλητές x/R_h και λ για κάθε φάση.....	53
6.2 Επιφανειακές τάσεις για κάθε φάση.....	54

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η πρόταση μεθοδολογίας υπολογιστικής ανάλυσης της μεθόδου εκμετάλλευσης διαδοχικών ορόφων με κενά μέτωπα με τη μέθοδο σύγκλισης παρυφών – εκτόνωσης των τάσεων.

Έως και σήμερα ο σχεδιασμός των υπογείων εκμεταλλεύσεων γίνεται συνήθως με εμπειρικό τρόπο, ενώ στις περιπτώσεις που εφαρμόζονται αναλυτικές μέθοδοι, ή πιο συχνά αριθμητικά μοντέλα (πρότυπα), γίνονται οι παραδοχές της επίπεδης παραμόρφωσης συνεχών και ισοτρόπων ελαστικών, και μερικές φορές ανελαστικών, πετρωμάτων. Η εφαρμογή τρισδιάστατων αριθμητικών μοντέλων είναι εξαιρετικά σπάνια, λόγω του απαγορευτικού μεγέθους του μοντέλου, στο οποίο περιλαμβάνονται όλα τα παραγωγικά μέτωπα, η μεταβολή της γεωμετρίας της εκμετάλλευσης με την πάροδο του χρόνου, καθώς και η γεωλογική πληροφορία.

Γι' αυτό το λόγο αναπτύχθηκε κατάλληλη μεθοδολογία για τη διαστασιολόγηση των υπογείων παραγωγικών μετώπων στη μέθοδο των διαδοχικών ορόφων με κενά μέτωπα. Η μεθοδολογία αυτή βασίζεται στη μέθοδο της σύγκλισης-αποτόνωσης των τάσεων που αναπτύχθηκε για την διαστασιολόγηση σηράγγων. Για να επιτευχθεί ο σκοπός που τέθηκε κατ' αρχάς έπρεπε να τροποποιηθεί η αρχική μέθοδος για να προσαρμοσθεί σε μη-κυκλικά ανοίγματα σε ετερογενείς γεωλογικούς σχηματισμούς.

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία αρχικά γίνεται μια σύντομη περιγραφή του τρόπου εκμετάλλευσης μεταλλευτικών κοιτασμάτων με τη μέθοδο διαδοχικών ορόφων με κενά μέτωπα, αναλύοντας τις εργασίες προπαρασκευής και τον τρόπο εξόρυξης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα συστήματα ταξινόμησης της βραχύμαζας RMR και Q, και του δείκτη αντοχής βραχύμαζας GSI. Ακολουθεί η ανασκόπηση των κριτηρίων αστοχίας Hoek – Brown και Mohr – Coulomb καθώς με αυτά εξετάστηκε η εκμετάλλευση, για τα οποία έγινε και σύγκριση της αποτελεσματικότητάς τους. Ακόμη, αναλύεται η μέθοδος σύγκλισης – εκτόνωσης η οποία έχει μελετηθεί παλαιότερα για κυκλικό άνοιγμα εντός ομοιογενούς και ισότροπου ελαστοπλαστικού μέσου. Από εμάς έγινε προσπάθεια μελέ-

της υπόγειων ανοιγμάτων ορθογωνικής διατομής σε ανομοιογενές μέσο (κοίτασμα περιβαλλόμενο από πέτρωμα διαφορετικών ιδιοτήτων) με την ίδια μέθοδο. Τέλος, παρουσιάζεται παράδειγμα εφαρμογής της προσαρμοσμένης για υπόγειες εκμεταλλεύσεις μεθόδου σύγκλισης – εκτόνωσης στην εκμετάλλευση κοιτάσματος τάλκη, μέτριου πάχους και μεγάλης κλίσης εντός οφιο-ασβεστολίθων και υπολογισμός των μετατοπίσεων και των κύριων τάσεων με τη βοήθεια υπολογιστικού κώδικα πεπερασμένων στοιχείων.

1.2 Σκοπός

Σκοπός της διαδικασίας είναι ο προσδιορισμός των κρίσιμων περιοχών συγκέντρωσης τάσεων και των αντίστοιχων παραμορφώσεων γύρω από το άνοιγμα προκειμένου να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα υποστήριξης που τυχόν απαιτούνται.

Το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε είναι το Phase² της εταιρίας Rocscience.

Κεφάλαιο 2

Μέθοδος διαδοχικών ορόφων με κενά μέτωπα

2.1 Γενικά στοιχεία

Η μέθοδος εκμετάλλευσης που θεωρήθηκε καταρχάς στην παρούσα εργασία είναι η διαδοχικών ορόφων με κενά μέτωπα (Sublevel Open Stopping). Γενικότερα, στις μεθόδους εκμετάλλευσης με κενά μέτωπα ο χώρος που μένει κενός κατά την απόληψη του μεταλλεύματος εγκαταλείπεται όπως έχει και διατηρείται από μόνος του ή με τη βοήθεια τεχνικής ή φυσικής υποστήριξης. Η συγκεκριμένη μέθοδος αποτελεί τρόπο υπόγειας εκμετάλλευσης ο οποίος αναπτύχθηκε κυρίως για κατακόρυφα ή παρακατακόρυφα κοιτάσματα με σκοπό την υψηλή παραγωγικότητα και τη μέγιστη αποληψιμότητα του μεταλλεύματος.

2.2 Προϋποθέσεις και πεδίο εφαρμογής

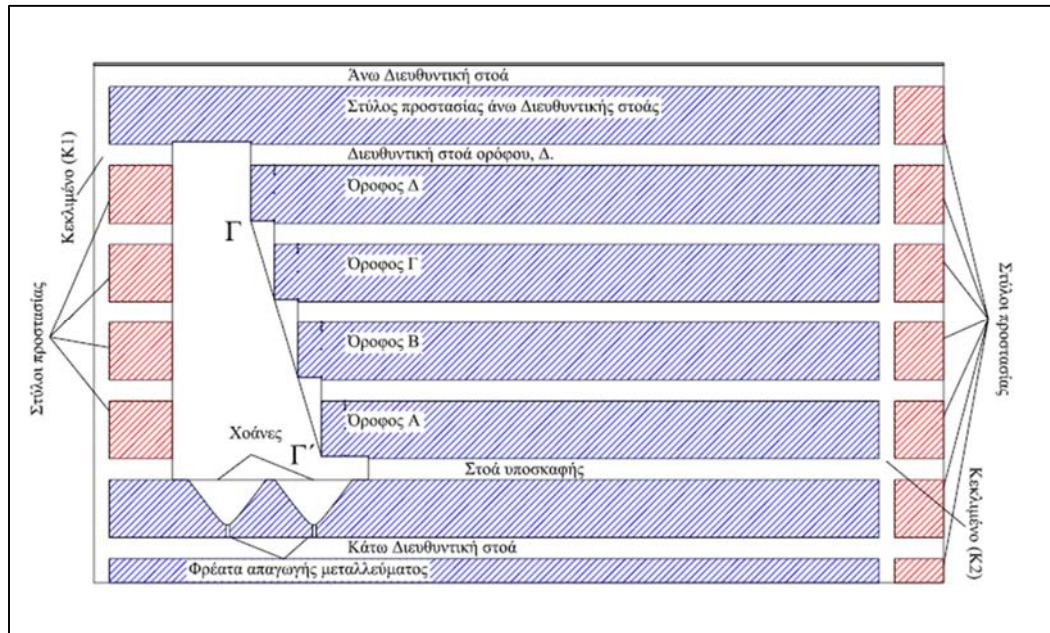
Βασικές προϋποθέσεις και πεδίο εφαρμογής της μεθόδου αυτής είναι:

- Μέτρια έως υψηλή κλίση κοιτάσματος.
- Η μεγαλύτερη διάσταση του κοιτάσματος να είναι κατά την κατακόρυφο.
- Ομαλά γεωμετρικά χαρακτηριστικά κοιτάσματος.

Στη συγκεκριμένη μέθοδο, μετά την εξόρυξη του μεταλλεύματος οι κενοί χώροι παραμένουν ανυποστήρικτοι. Επίσης, η μεγαλύτερη διάσταση των μετώπων είναι κατά την κατακόρυφο.

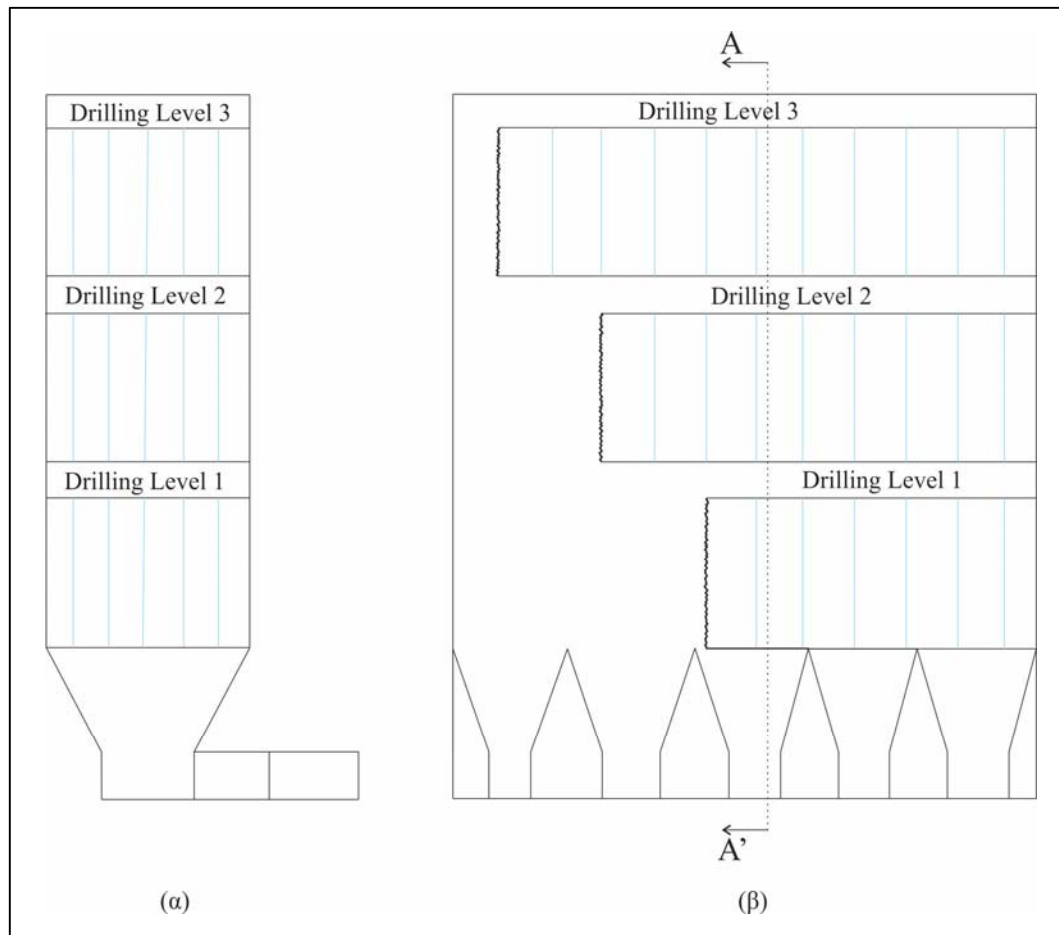
2.3 Εργασίες προπαρασκευής

Αρχικά, με τη χρήση φρέατος, ράμπας ή κεκλιμένης στοάς K2 ορύσσονται δύο κύριες διευθυντικές στοές, η Άνω Διευθυντική Στοά (ΑΔΣ) και η Κάτω Διευθυντική Στοά (ΚΔΣ) οι οποίες δημιουργούν πάτωμα και οροφή. Στη συνέχεια ορύσσεται κεκλιμένο K2, το οποίο διατρήεται είτε με ανιούσα είτε με κατιούσα φορά, που συνδέει τις διευθυντικές στοές και χρησιμεύει για την δημιουργία αρχικής ελεύθερης επιφάνειας. Το επόμενο



Σχήμα 2.2: Τομή κατά τη διεύθυνση του κοιτάσματος.

Όταν το πάχος του κοιτάσματος είναι μικρό τότε οι διευθυντικές στοές τοποθετούνται στο άκρο του ορόφου και εξορύσσονται κατά το ήμισυ με ανιόντα και κατά το έτερον ήμισυ με κατιόντα διατρήματα. Οι εργαζόμενοι βρίσκονται στην άκρη των διευθυντικών στοών των ορόφων και ορύσσουν τα διατρήματα προς τους πάνω και κάτω ορόφους με την χρήση ελαφριών αερόσφυρων. Σε μικρού πάχους κοιτάσματα η στοά μπορεί να διαπλατυνθεί και να πάρει την μορφή θαλάμου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3: (α) Τομή κατά την κλίση Α – Α' μικρού πάχους κοιτάσματος για περίπτωση που η διεθυντική στοά του ορόφου καλύπτει όλο το πάχος του κοιτάσματος και (β) Τομή κατά τη διεύθυνση του κοιτάσματος.

Όταν το πάχος του κοιτάσματος ξεπερνά τα 5m τότε από τις διεθυντικές στοές γίνεται όρυξη βοηθητικών εγκάρσιων στοών οι οποίες ενώνουν τις δύο παρυφές του κοιτάσματος.

Η εξόρυξη κοιτάσματος μεγάλου πάχους και υπό κλίση γίνεται σε ορόφους προκαθορισμένου υψομέτρου. Σε κάθε όροφο ορύσσονται διεθυντικές στοές σε όλο το πλάτος του τμήματος από τις οποίες, στην συνέχεια, γίνεται η όρυξη περιμετρικών διατρημάτων (Ring Drilling) ή κατακόρυφα διατρήματα με κατάλληλη διάταξη ώστε να καλύπτουν όλο το μέταλλευμα μεταξύ των υποπατωμάτων.

Σημαντική αύξηση του ύψους των ορόφων και αντίστοιχη μείωση των έργων προπαρασκευής επιτυγχάνεται με την χρήση jumbo με ικανότητα διάτρησης μεγάλου μήκους διατρημάτων έως 60-80m, όπως η ενδοδιατρηματική αερόσφυρα DTH (Down The Hole).

Πολλές είναι οι περιπτώσεις όπου είτε λόγω μεγάλου μήκους διατρημάτων είτε κακού σχεδιασμού παράγονται χονδρομερή ογκοτεμάχια μεταλλεύματος. Για την αντιμετώπισή τους είναι απαραίτητη η εγκατάσταση διαχωριστικής εσχάρας για την εξασφάλιση καλής λειτουργίας των φρέατων απαγωγής του μεταλλεύματος (λούκια). Συνήθως τα φρέατα απαγωγής χρησιμοποιούνται για την προσωρινή αποθήκευση του μεταλλεύματος, γι' αυτό το λόγο στο κάτω μέρος τους, με κατάλληλη διαρρύθμιση, πραγματοποιείται αυτόματη φόρτωση στα βαγόνια ή στα φορτηγά μεταφοράς. Σε ορισμένες περιπτώσεις τα φρέατα παραμένουν ανοιχτά, χωρίς σχάρα, ώστε το μέταλλευμα να πέφτει κατ' ευθείαν στη στοά βάσης και από εκεί να παραλαμβάνεται και να φορτώνεται με μηχανικούς φορτωτές ή αποξεστήρες.

Μετά την ολοκλήρωση της ανατίναξης κάθε κύκλου διατρημάτων το μέτωπο υποχωρεί και το μέταλλευμα απολαμβάνεται από το κατώτερο σημείο του πατώματος, στις χοάνες απόληψης. Κατά την διάρκεια των έργων εξόρυξης αφήνονται στύλοι ασφαλείας μεταξύ των υποπατωμάτων ώστε να ελέγχονται οι τάσεις οι οποίες κατανέμονται στα τοιχώματα του ανοίγματος.

2.5 Φόρτωση – Αποκομιδή του μεταλλεύματος

Η φόρτωση από το σημείο απόληψης γίνεται είτε με δηζελοκίνητο εξοπλισμό ή με αυτοφορτωτές LHDs χωρητικότητας κάδου 2-5m³, είτε με αποξεστήρες (Slushers) που φορτώνουν κατευθείαν το κύριο μεταφορικό μέσο, όπως για παράδειγμα σιδηροδρομικός συρμός ή φορτηγά αυτοκίνητα.

2.6 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα της μεθόδου

Πλεονεκτήματα:

- Δυνατότητα μηχανοποίησης.
- Μέθοδος μεγάλης παραγωγής μεταλλεύματος.
- Η εξόρυξη του μεταλλεύματος γίνεται από διευθυντικές στοές μεταξύ δύο στοών ορόφου, ενώ η φόρτωση διενεργείται στον πυθμένα του μετώπου.
- Η διάτρηση γίνεται με τη χρήση μηχανημάτων με ακτινικά διατεταγμένες σφύρες, οι οποίες είναι ικανές να διατρήσουν σε μεγάλα μήκη.

- Η μέθοδος διαδοχικών ορόφων έχει υψηλό λόγο έργων αναπτύξεως προς έργα εξορύξεως (περίπου 1/5) σε σχέση με άλλες μεθόδους. Αυτός, όμως, ο λόγος μειώνεται από το γεγονός ότι τα 2/3 των έργων αναπτύξεως μπορούν να γίνουν παράλληλα με την εξόρυξη και τη φόρτωση σε άλλους ορόφους ή πατώματα.
- Οι φάσεις της διάτρησης, γόμωσης, πυροδότησης και φόρτωσης είναι σχεδόν ανεξάρτητες μεταξύ τους.
- Η αποληψιμότητα είναι σχετικά υψηλή (70 – 75%) και η αραίωση μικρή.

Μειονεκτήματα:

- Το σχήμα και το μέγεθος του κοιτάσματος όπως και η ευστάθεια των ανοιγμάτων στο πέτρωμα προσδιορίζουν τη γεωμετρία και τα μεγέθη των μετώπων.
- Η προχώρηση των μετώπων κατά την έννοια της διεύθυνσης ή της κλίσης του κοιτάσματος εξαρτάται αποκλειστικά από το πάχος του κοιτάσματος.
- Ο αντικειμενικός σκοπός είναι η αύξηση του λόγου εξόρυξης μεταλλεύματος προς τα έργα ανάπτυξης.
- Πρέπει να βρεθεί μια βέλτιστη λύση μεταξύ της σχέσης των εργασιών ανάπτυξης και εξόρυξης ανάλογα με την τοποθέτηση των στοών των ορόφων.

Κεφάλαιο 3

Χαρακτηριστικές ιδιότητες βραχώμαζας

3.1 Περιγραφή της βραχώμαζας

Η βραχώμαζα σπανίως είναι συνεχής, ομογενής και ισότροπη. Συνήθως είναι ρηγματωμένη, διασχίζεται από ασυνέχειες, όπως ρήγματα, διακλάσεις, διατμητικές ρωγμές κ.λπ., παρουσιάζει μεταβλητό βαθμό αποσάθρωσης και εξαλλοίωσης και έχει ανισότροπη συμπεριφορά. Συνεπώς, η εκτίμηση αντιπροσωπευτικών τιμών των μηχανικών ιδιοτήτων της βραχώμαζας δεν γίνεται μόνο με άμεσο τρόπο (π.χ. με εργαστηριακές ή επιτόπου δοκιμές) αλλά και έμμεσα, δηλαδή μέσω της περιγραφής και ταξινόμησης της βραχώμαζας σε κατηγορίες και στη συνέχεια γίνεται εκτίμηση των μηχανικών παραμέτρων κάθε κατηγορίας με εμπειρικές σχέσεις. Η ταξινόμηση της βραχώμαζας είναι άμεσα συνδεδεμένη με την μηχανική αντοχή του πετρώματος που δομεί τη βραχώμαζα. Η μηχανική αντοχή εκφράζεται μέσω της αντοχής (σ_{ci}) που προκύπτει κατά τη δοκιμή μοναξονικής θλίψης (uniaxial compression strength) σε κυλινδρικά δοκίμια του ακέραιου πετρώματος.

3.2 Συστήματα ταξινόμησης της βραχώμαζας

Η ταξινόμηση της βραχώμαζας σε κατηγορίες είναι απαραίτητη τόσο κατά το σχεδιασμό όσο και κατά την κατασκευή των υπογείων έργων. Τυπικά, ο σχεδιασμός των υπογείων έργων μεγάλου μήκους (σήραγγες) γίνεται για περισσότερες της μιας κατηγορίες βραχώμαζας (που αντιστοιχούν σε κάποιες τυπικές διατομές σχεδιασμού), με διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά. Κατά τη φάση της κατασκευής, η ταξινόμηση της επιτόπου βραχώμαζας σε κατηγορίες είναι απαραίτητη στην απόφαση περί της εφαρμοστέας τυπικής διατομής της μελέτης του έργου.

Τα πλέον διαδεδομένα συστήματα ταξινόμησης της βραχώμαζας είναι:

1. Το σύστημα RMR (Bieniawski, 1989)
2. Το σύστημα Q ή NGI (Barton, 1974)
3. Ο δείκτης αντοχής της βραχώμαζας GSI (Hoek, 1995)

3.2.1 Σύστημα RMR

Το σύστημα ταξινόμησης της ποιότητας βραχώμαζας RMR (Rock Mass Rating) προτάθηκε από τον Bieniawski το 1976, έλαβε την τελική του μορφή το 1979 (Bieniawski, 1979) και παρουσιάστηκε (χωρίς ουσιαστικές τροποποιήσεις) εκ νέου το 1989 (Bieniawski, 1989). Κατά το σύστημα αυτό, η ταξινόμηση της βραχώμαζας γίνεται με έξι (6) παραμέτρους εκάστη των οποίων λαμβάνει μια τιμή. Το άθροισμα των τιμών των έξι παραμέτρων αποτελεί την τιμή του δείκτη RMR. Οι έξι παράμετροι και οι τιμές τους είναι:

1. Αντοχή του ακέραιου πετρώματος σε μοναξονική θλίψη (σ_{ci})

Αντοχή σ_{ci} (MPa)	Δείκτης R1
> 250	15
100 – 250	12 – 15
50 – 100	7 – 12
25 – 50	4 – 7
5 – 25	2 – 4
1 – 5	1 – 2
< 1	0

2. Δείκτης κερματισμού της βραχώμαζας (RQD)

$$\text{όπου: } RQD = \frac{\text{συνολικό μήκος τμημάτων πυρήνα δειγματοληψίας } > 100mm}{\text{συνολικό μήκος διάτρησης}} \times 100 \quad [3.1]$$

RQD (%)	Δείκτης R2
> 90	20
75 – 90	17 – 20
50 – 75	13 – 17
25 – 50	8 – 13
< 25	3

3. Απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών

Απόσταση (m)	Δείκτης R3
> 2	20
0,6 – 2	15 – 20
0,2 – 0,6	10 – 15
0,06 – 0,2	8 – 10
< 0,06	5

4. Κατάσταση των ασυνεχειών

Κατάσταση ασυνεχειών	Δείκτης R4
Πολύ τραχείες, χωρίς εξαλλοίωση	30
Ελαφρώς τραχείες, ελαφρά εξαλλοιωμένες, υλικό πλήρωσης < 1mm	25
Ελαφρώς τραχείες, πολύ εξαλλοιωμένες, υλικό πλήρωσης < 1mm	20
Λείες ή γυαλιστερές (slickensided), υλικό πλήρωσης 1-5mm	10
Υλικό πλήρωσης πάχους άνω των 5mm	0

5. Επίδραση των υπόγειων νερών

Παρουσία υπόγειου νερού	Δείκτης R5
Καθόλου νερό	15
Παρουσία υγρασίας	10
Υγρές επιφάνειες	7
Στάγδην	4
Μη ροή	0

6. Προσανατολισμός των ασυνεχειών σε σχέση με τη φορά διάνοιξης του έργου

Προσανατολισμός ασυνεχειών	Δείκτης R6
Πολύ ευμενής	0
Ευμενής	-2
Αδιάφορος	-5
Δυσμενής	-10
Πολύ δυσμενής	-12

Ο δείκτης RMR υπολογίζεται ως το άθροισμα των δεικτών R1 έως R6. Με βάση την τιμή του δείκτη RMR, η βραχώμαζα κατατάσσεται στις εξής κατηγορίες:

Κατηγορία βραχώμαζας	Τιμές δείκτη RMR
Πολύ καλή – I	81 – 100
Καλή – II	61 – 80
Μέτρια – III	41 – 60
Πτωχή – IV	21 – 40
Πολύ πτωχή – V	0 – 20

Πίνακας 3.1: Μεταβλητές του συστήματος RMR

Ο δείκτης RMR αναπτύχθηκε με βάση την εμπειρία από στοές ορυχείων όπου συνήθως η βραχώμαζα είναι καλής ποιότητας ($RMR > 40$). Για βραχώμαζες πτωχών μηχανικών ιδιοτήτων ($RMR < 40$) η μέθοδος δεν είναι πρόσφορη επειδή δεν διαθέτει επαρκές εύρος τιμών. Για τις συγκεκριμένες τιμές αναπτύχθηκαν το σύστημα ταξινόμησης Q και ο δείκτης αντοχής της βραχώμαζας GSI.

3.2.2 Σύστημα Q

Το σύστημα Q αναπτύχθηκε στο Νορβηγικό Γεωτεχνικό Ινστιτούτο (NGI) από τους Barton, Lien και Lunde το 1974 με σκοπό τον εμπειρικό σχεδιασμό των μέτρων άμεσης υποστήριξης σηράγγων που διανοίγονται με τη μέθοδο NATM (New Austrian Tunneling Method). Η μέθοδος βασίζεται στον υπολογισμό του δείκτη Q από την εξίσωση 3.2:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \frac{J_r}{J_a} \frac{J_w}{SRF} \quad [3.2]$$

όπου:

RQD = ο δείκτης κερματισμού της βραχώμαζας

J_n = δείκτης του αριθμού των συστημάτων ασυνεχειών (joint set number)

J_r = δείκτης τραχύτητας του χειρότερου συστήματος ασυνεχειών (joint roughness number)

J_a = δείκτης εξαλλοίωσης του ασθενέστερου επιπέδου αδυναμίας (joint alteration number)

J_w = δείκτης επίδρασης του νερού στις ασυνέχειες (joint water reduction number)

SRF = συντελεστής επίδρασης της εντατικής κατάστασης του πετρώματος (ή συντελεστής απομείωσης τάσεων – stress reduction factor)

Στην εξίσωση 3.2 ο πρώτος λόγος (RQD / J_n) εκφράζει το μέσο μέγεθος των τεμαχών που συγκροτούν τη βραχώμαζα. Ο δεύτερος λόγος (J_r / J_a) εκφράζει τα χαρακτηριστικά διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών της βραχώμαζας και ο τρίτος λόγος (J_w / SRF) εκφράζει τις τάσεις που επικρατούν στη βραχώμαζα. Οι τιμές των παραπάνω παραμέτρων συνοψίζονται παρακάτω.

1. Συντελεστής RQD

Χρησιμοποιείται η τιμή του δείκτη RQD, η οποία ορίζεται από την εξίσωση [3.1]. Εάν $RQD < 10\%$ τότε χρησιμοποιείται η συμβατική τιμή 10.

2. Συντελεστής J_n

Οικογένειες ασυνεχειών	Τιμή του J_n
Συμπαγές πέτρωμα ή λίγες ασυνέχειες	0.5-1
Μια οικογένεια	2
Μια οικογένεια και μερικές τυχαίες ασυνέχειες	3
Δυο οικογένειες	4
Δυο οικογένειες και μερικές τυχαίες ασυνέχειες	6
Τρεις οικογένειες	9
Τρεις οικογένειες και μερικές τυχαίες ασυνέχειες	12
Τέσσερις ή παραπάνω οικογένειες	15
Θρυμματισμένο πέτρωμα	20

Σε περιοχές διασταύρωσης σιράγγων η τιμή του J_n τριπλασιάζεται. Σε περιοχές στομίων η τιμή του J_n διπλασιάζεται.

3. Συντελεστής J_r

α) Περίπτωση βραχομάζας με ασυνέχειες χωρίς υλικό πλήρωσης ή με υλικό πλήρωσης μικρού πάχους (ώστε να αποκαθίσταται επαφή των εκατέρωθεν της ασυνέχειας τοιχωμάτων για σχετική ολίσθηση μικρότερη των 10cm).

Κατάσταση επιφάνειας των ασυνεχειών	Τιμή του J_r
Ασυνεχείς διακλάσεις	4
Τραχείες και ακανόνιστες, κυματώδεις	3
Ομαλές, κυματώδεις	2
Λείες ή ολισθηρές, κυματώδεις	1.5
Τραχείες ή ακανόνιστες, κυματώδεις	1.5
Ομαλές επίπεδες	1.0
Ολισθηρές επίπεδες	0.5

β) Περίπτωση βραχομάζας χωρίς επαφή των εκατέρωθεν της ασυνέχειας τοιχωμάτων ακόμη και μετά από σημαντική σχετική ολίσθηση κατά μήκος της ασυνέχειας).

Κατάσταση επιφάνειας των ασυνεχειών	Τιμή του J_r
Με υλικό πλήρωσης από αργιλικό υλικό σε επαρκές πάχος, ώστε να παρεμποδίζεται η επαφή των τοιχωμάτων του πετρώματος	1.0
Με υλικό πλήρωσης από αμμώδες ή χαλικώδες υλικό σε επαρκές πάχος, ώστε να παρεμποδίζεται η επαφή των τοιχωμάτων του πετρώματος.	1.0

Στην περίπτωση που η μέση απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών υπερβαίνει τα τρία μέτρα, η τιμή του J_r αυξάνεται κατά 1.

4. Συντελεστής J_a

α) Περίπτωση βραχώμαζας με επαφή των εκατέρωθεν της ασυνέχειας τοιχωμάτων του πετρώματος.

Κατάσταση εξαλλοίωσης των τοιχωμάτων των ασυνεχειών	Τιμή του J_a
Υγιή και πλήρως «επουλωμένα» τοιχώματα	0.75
Οξειδωμένα τοιχώματα χωρίς αποσάθρωση	1.0
Ελαφρώς αποσαθρωμένα τοιχώματα με αμμώδες (αργιλικό) υλικό πλήρωσης	2.0
Αμμώδες ή ιλυώδες υλικό πλήρωσης	3.0
Υλικό πλήρωσης από αργιλικά ορυκτά έως 2mm	4.0

β) Περίπτωση βραχώμαζας υλικό πλήρωσης μικρού πάχους (να αποκαθίσταται επαφή των εκατέρωθεν της ασυνέχειας τεμαχών για σχετική ολίσθηση μικρότερη των 10cm).

Κατάσταση εξαλλοίωσης των τοιχωμάτων των ασυνεχειών	Τιμή του J_a
Υλικό πλήρωσης από αμμώδη συστατικά	4.0
Υλικό πλήρωσης από στιφρή άργιλο πάχους έως 5mm	6.0
Υλικό πλήρωσης από μαλακή άργιλο πάχους έως 5mm	8.0
Υλικό πλήρωσης από διογκούμενη άργιλο πάχους έως 5mm. Η τιμή του J_a εξαρτάται από το ποσοστό της διογκούμενης αργίλου	8-12

γ) Περίπτωση βραχώμαζας χωρίς επαφή των εκατέρωθεν της ασυνέχειας τοιχωμάτων του πετρώματος ακόμη και μετά από σχετική ολίσθηση κατά μήκος της ασυνέχειας.

Κατάσταση εξαλλοίωσης των τοιχωμάτων των ασυνεχειών	Τιμή του J_a
Ζώνες από θρυμματισμένο ιλο-αμμώδες υλικό	5
Παχιές ζώνες από αργιλικό υλικό (στιφρή άργιλος, μαλακή άργιλος ή διογκούμενη άργιλος)	6-24

5. Συντελεστής J_w

Παρουσία Υπόγειων Υδάτων	Τιμή του J_w
Στεγνή εκσκαφή ή μικρή τοπική εισροή νερού έως 5 lt/min	1.0
Μέτρια εισροή νερού με μερική απόπλυση του υλικού πλήρωσης	0.66
Μεγάλη εισροή νερού σε καλό πέτρωμα με ρωγμές, χωρίς υλικό πλήρωσης	0.50
Μεγάλη εισροή νερού με σημαντική απόπλυση του υλικού πλήρωσης	0.33
Πολύ μεγάλη εισροή νερού βαθμιαίως, μειούμενη με την πάροδο του χρόνου	0.2-0.1
Πολύ μεγάλη εισροή νερού χωρίς μείωση με την πάροδο του χρόνου	0.05-0.1

6. Συντελεστής SRF

α) Διέλευση από ζώνες ρηγμάτων. Διέλευση από ασθενείς ζώνες που είναι δυνατόν να προκαλέσουν χαλάρωση της βραχώμαζας.

Περίπτωση	Τιμή του SRF
Αφθονες ασθενείς ζώνες με αργιλικό ή αποσαθρωμένο πέτρωμα, πολύ χαλαρό περιβάλλον πέτρωμα (για οποιοδήποτε βάθος)	10
Μεμονωμένες ασθενείς ζώνες ως ανωτέρω (βάθος σήραγγας < 50m)	5
Μεμονωμένες ασθενείς ζώνες ως ανωτέρω (βάθος σήραγγας > 50m)	2.5
Αφθονες ζώνες διάτμησης σε σκληρό πέτρωμα, χωρίς αργιλικό υλικό, χαλαρό περιβάλλον πέτρωμα (για οποιοδήποτε βάθος)	7.5
Μεμονωμένες ζώνες διάτμησης ως ανωτέρω (βάθος σήραγγας < 50m)	5
Μεμονωμένες ζώνες διάτμησης ως ανωτέρω (βάθος σήραγγας > 50m)	2.5
Χαλαρές ανοιχτές ασυνέχειες, έντονα διακλασμένη μάζα (για οποιοδήποτε βάθος)	5

β) Περίπτωση πετρώματος ικανής αντοχής υπό σχετικώς υψηλές τιμές γεωστατικών τάσεων.

Περίπτωση	C _o	T _o	Τιμή του SRF
Χαμηλές τάσεις, κοντά στην επιφάνεια, ανοιχτές ασυνέχειες	>200	>13	2.5
Μέσες τάσεις	200-10	13-0.66	1.0
Υψηλές τάσεις, πολύ «σφιχτή» δομή	10-5	0.66-0.33	0.5-2.0
Μέτρια «εκτίναξη» σκληρού πετρώματος μετά από 1 ώρα	5-2.5	0.33-0.16	5-10
Έντονη «έκρηξη» και δυναμικές παραμορφώσεις σκληρού πετρώματος	<2.5	<0.16	10-20

γ) Συνθλίβον πέτρωμα, έντονες πλαστικές παραμορφώσεις, λόγω πολύ υψηλών τάσεων.

Περίπτωση	Τιμή του SRF
Μέτρια πίεση εξαιτίας της συμπίεσης	5-10
Μεγάλη πίεση εξαιτίας της συμπίεσης	10-20

δ) διογκούμενο πέτρωμα, λόγω χημικής ενεργότητας με προσρόφηση νερού.

Περίπτωση	Τιμή του SRF
Μέτρια πίεση εξαιτίας της διόγκωσης	5-10
Μεγάλη πίεση εξαιτίας της διόγκωσης	10-15

Με βάση το δείκτη ποιότητας κατά το σύστημα Q, η βραχώμαζα μπορεί να καταταγεί στις ακόλουθες κατηγορίες:

Q	Κλάση	Χαρακτηρισμός
>400	Q-Ia	εξαιρετική καλή
100-400	Q-Ib	πάρα πολύ καλή
40-100	Q-II	πολύ καλή
10-40	Q-IIIa	καλή
4-10	Q-IIIb	μέτρια
1-4	Q-Iva	πτωχή
0.1-1	Q-IVb	πολύ πτωχή
0.01-0.1	Q-Va	πάρα πολύ πτωχή
<0.01	Q-Vb	εξαιρετικά πτωχή

Πίνακας 3.2: Μεταβλητές του συστήματος Q.

3.2.3 Δείκτης αντοχής βραχώμαζας GSI (Geological Strength Index)







Ο δείκτης αντοχής GSI (Geological Strength Index) προτάθηκε από τον Hoek (αρχικώς το 1995 και με βελτιώσεις το 1998) και δίνει ιδιαίτερη έμφαση σε σχετικώς πτωχής ποιότητας βραχώμαζες με $RMR < 40$ αλλά με λειτουργία αλληλεμπλοκής μεταξύ των βραχωδών τεμαχών. Τέτοιου τύπου βραχώμαζες δομούν ένα σημαντικό ποσοστό του Ελληνικού χώρου και συνεπώς έχουν μεγάλη σημασία στο σχεδιασμό υπογείων έργων.

Το συγκεκριμένο σύστημα σχεδιάστηκε ώστε εν γένει να είναι συμβατό με το σύστημα RMR για βραχώμαζες με $RMR > 40$, δηλαδή οι τιμές του δείκτη GSI είναι περίπου ίσες με τις αντίστοιχες τιμές του δείκτη RMR. Για βραχώμαζες με $RMR < 40$, το σύστημα GSI πλεονεκτεί επειδή παρέχει καλύτερη διακριτοποίηση, χωρίς απότομες μεταβολές της τιμής του δείκτη, ενώ ταυτοχρόνως παραμένει συμβατό με το σύστημα RMR.

Το σύστημα GSI βασίζεται στην αξιολόγηση δυο παραμέτρων:

- (α) Της δομής της βραχώμαζας, που χαρακτηρίζει το βαθμό αλληλεμπλοκής των βραχωδών τεμαχών.
- (β) Της κατάστασης των επιφανειών των ασυνεχειών που χαρακτηρίζει το μέγεθος της διατμητικής αντοχής τους.

Η συναξιολόγηση των παραμέτρων και οι αντίστοιχες τιμές του δείκτη GSI φαίνονται στο Σχήμα 3.1. Το σύστημα GSI εφαρμόζεται σε βραχώμαζες με αλληλεμπλοκή μεταξύ των βραχωδών τεμαχών, δηλαδή σε βραχώμαζες με μικρό ποσοστό συμμετοχής εδαφικού υλικού (τυπικά λιγότερο από 20% του συνολικού όγκου της βραχώμαζας).

		SURFACE CONDITIONS				
		VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY →				
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90 80 70 60 50 40 30 20 10 ↓ DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES				N/A
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets					N/A
	VERY BLOCKY- interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets					N/A
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity					N/A
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces					N/A
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes					N/A

Σχήμα 3.1: Δείκτης αντοχής της βραχόμαζας GSI.

3.3 Αρχική εντατική κατάσταση

Στη συνέχεια θεωρούνται μόνο οι γεωστατικές τάσεις ενώ αγνοούνται τυχόν παλαιο-τάσεις, τεκτονικές τάσεις κ.λπ. Η όρυξη ανοίγματος στη μάζα του πετρώματος επιφέρει την μεταβολή του εντατικού πεδίου του αδιατάρακτου πετρώματος, λόγω της ανακατανομής των τάσεων γύρω από το άνοιγμα. Οι τάσεις οι οποίες οφείλονται στο πεδίο βαρύτητας υπολογίζονται με ισορροπία δυνάμεων στον κατακόρυφο άξονα. Οι κατακόρυφες τάσεις που ασκούνται σε ένα στοιχειώδες τμήμα πετρώματος σε βάθος h κάτω από την επιφάνεια της γης ισούνται με το βάρος των υπερκειμένων. Δηλαδή πρόκειται για το βάρος μιας στήλης με διατομή ίση με τη διατομή του στοιχειώδους τμήματος και ύψος την απόσταση h από την επιφάνεια του εδάφους. Άρα, οι κατακόρυφες τάσεις υπολογίζονται από την εξίσωση [3.1]:

$$\sigma_v = \gamma h$$

[3.3]

όπου: σ_v = η κατακόρυφη θλιπτική τάση

γ = το μοναδιαίο βάρος του πετρώματος

h = το ύψος των υπερκειμένων

Σε περίπτωση που οι πόροι του υλικού περιέχουν υγρό η εξίσωση [3.1], εξαιτίας της πίεσης των πόρων, γίνεται :

$$\sigma_v' = \gamma h - p \quad [3.4]$$

όπου: p = η πίεση των πόρων

Οι οριζόντιες τάσεις που δέχεται το στοιχειώδες τμήμα σε βάθος h θεωρούνται συνάρτηση των κατακόρυφων τάσεων σύμφωνα με τη εξίσωση:

$$\sigma_h = k\sigma_v' \quad [3.5]$$

όπου: σ_h = η οριζόντια θλιπτική τάση

k = ο συντελεστής πλευρικών τάσεων

Ο συντελεστής k είναι σταθερά η οποία εξαρτάται από τον εξίσωση του εντατικού πεδίου και σε ελαστικές συνθήκες ισούται με:

$$k = \frac{\nu}{1-\nu} \quad [3.6]$$

όπου ν ο λόγος Poisson. Ο λόγος του Poisson ορίζεται από τον λόγο της εγκάρσιας ($-\epsilon_x$) προς την αξονική ($+\epsilon_y$) ανηγμένη παραμόρφωση σε μονοαξονική καταπόνηση:

$$\nu = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_y} \quad [3.7]$$

και κυμαίνεται στο διάστημα $0 \leq \nu \leq 0,5$. Άρα, ο συντελεστής πλευρικών τάσεων παίρνει τιμές στο διάστημα $0 \leq k \leq 1$. Ενδεικτικές τιμές για το λόγο Poisson φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (Καββαδάς, 2000):

Τύπος βραχώμαζας	Λόγος Poisson
Τεμαχώδης με καλή αλληλεμπλοκή των κόκκων χωρίς διαταραχή	0,20 – 0,25
Τεμαχώδης ελαφρώς διαταραγμένη	0,30 – 0,35
Διαταραγμένη, πτυχωμένη με γωνιώδη τεμάχια	0,35 – 0,40
Πολύ διαταραγμένη με γωνιώδη και στρογγυλεμένα τεμάχια	0,40 – 0,45
Τελείως εξαλλοιωμένη βραχώμαζα	0,45 – 0,50

Κεφάλαιο 4

Κριτήρια αστοχίας βραχώμαζας

4.1 Κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown

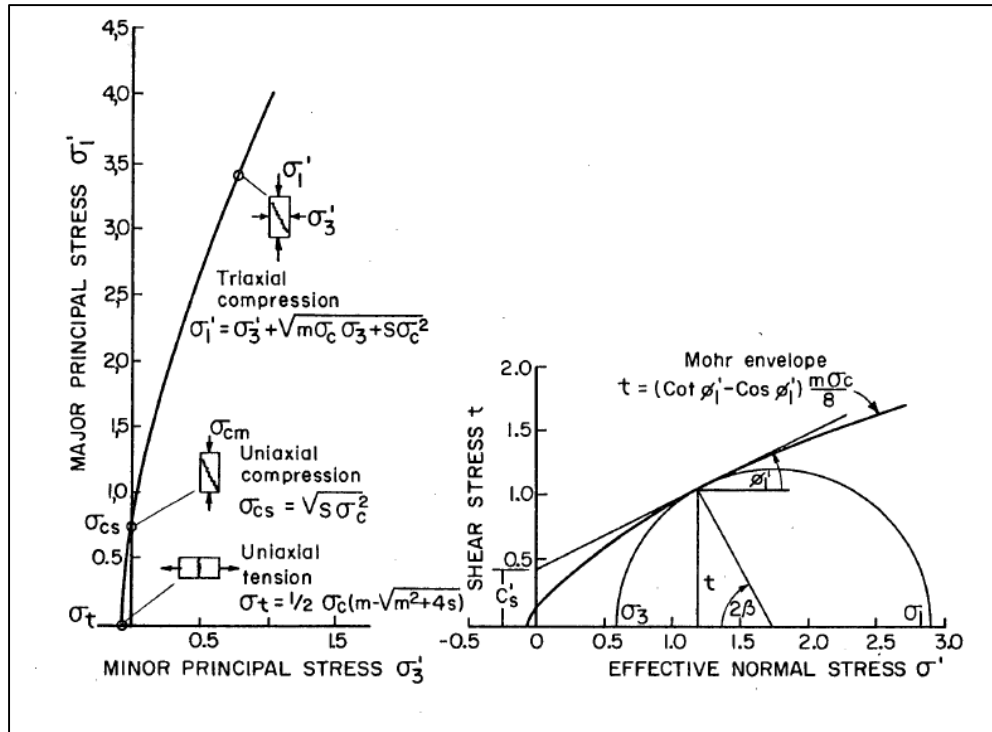
Η ρηγματωμένη βραχώμαζα συνήθως έχει καμπύλη περιβάλλουσα των κύκλων Mohr στην κατάσταση αστοχίας οπότε η συμπεριφορά της δεν μπορεί να προσομοιωθεί ικανοποιητικά μέσω του κριτηρίου αστοχίας Mohr-Coulomb (του οποίου η περιβάλλουσα αστοχίας είναι ευθύγραμμη). Για το λόγο αυτό οι βραχώμαζες προσομοιάζονται καλύτερα μέσω του κριτηρίου αστοχίας Hoek-Brown το οποίο έχει καμπύλη περιβάλλουσα αστοχίας. Το κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\sigma_{1p} = \sigma_3 + (m UCS \sigma_3 + s UCS^2)^{1/2} \quad [4.1]$$

όπου: σ_{1p} = η μεγαλύτερη κύρια τάση τη στιγμή της αντοχής του πετρώματος, σ_3 = η μικρότερη κύρια τάση τη στιγμή της αντοχής του πετρώματος, UCS = η αντοχή του πετρώματος σε ανεμπόδιστη θλίψη και m, s = σταθερές που εξαρτώνται από την έκταση της θραύσης του πετρώματος πριν αστοχήσει. Για το άρρηκτο πέτρωμα s=1, ενώ για πλήρως θραυσμένο πέτρωμα s=0. Η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη της βραχώμαζας είναι $UCS_m = UCS s^{1/2}$ και επομένως είναι μηδέν για s=0. Η παραπάνω έκφραση του κριτηρίου συναρτήσει των κυρίων τάσεων είναι βολική σε προβλήματα υπόγειων ανοιγμάτων. Παρόλ' αυτά το κριτήριο μπορεί να εκφρασθεί με τη σχέση της διατμητικής τάσης σε επίπεδο με μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα n με την ορθή τάση στο ίδιο επίπεδο

$$\tau_N = A(\sigma_N - \sigma_{iN})^B \quad [4.2]$$

Όπου $\tau_N = \tau_n/UCS$, $\sigma_N = \sigma_n/UCS$, $\sigma_{iN} = \left[\frac{1}{2}m - (m^2 + 4s)^{1/2}\right]$, και A, B είναι σταθερές που εξαρτώνται από την τιμή της σταθεράς m.



Σχήμα 4.1: α) Μορφή του κριτηρίου αστοχίας Hoek-Brown σε άξονες σ_1 - σ_3 και β) σε άξονες τ - σ' .

4.2 Θεωρία αστοχίας Mohr – Coulomb

4.2.1 Ο κύκλος του Mohr

Ο προσδιορισμός της εντατικής κατάστασης για κάποιο τυχαίο επίπεδο μπορεί να γίνει εκτός από αναλυτικές μεθόδους και γραφικά. Από τις εξισώσεις για την ορθή τάση:

$$\sigma_\varphi = \sigma_1 \cos^2 \varphi + \sigma_2 \sin^2 \varphi = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\varphi \quad [4.3]$$

και για τη διατμητική τάση:

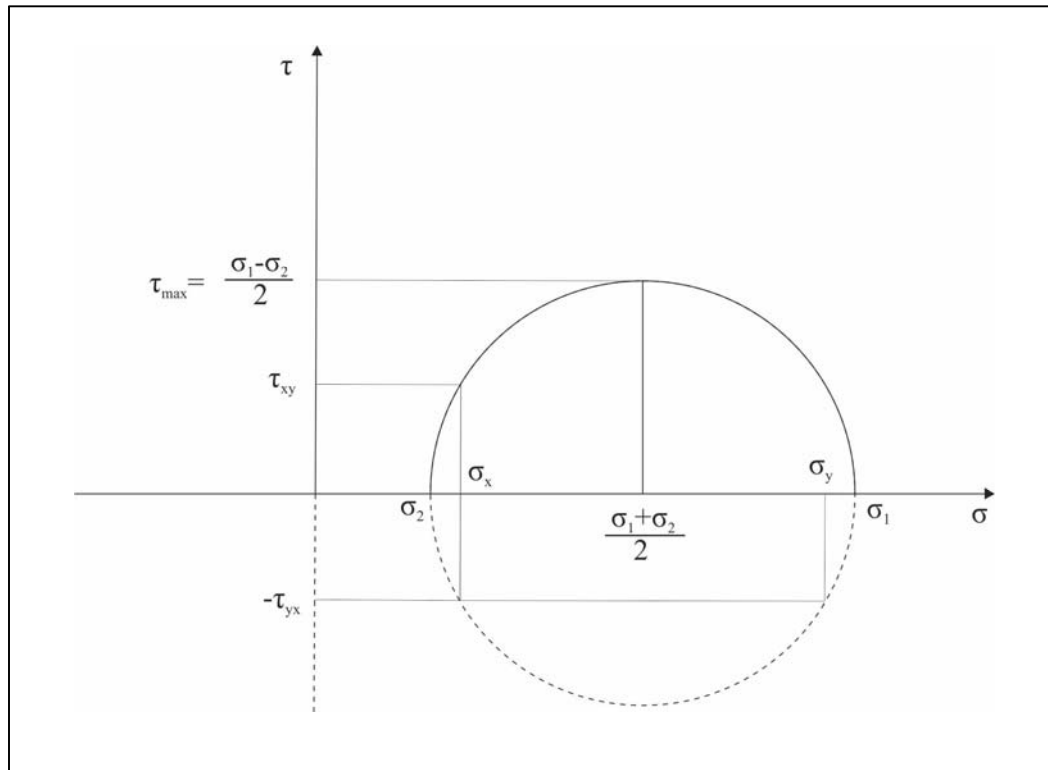
$$\tau_\varphi = (\sigma_1 - \sigma_2) \sin \varphi \cos \varphi = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin 2\varphi \quad [4.4]$$

όπου φ είναι η γωνία που σχηματίζει το διάνυσμα που αντιστοιχεί σε ένα τυχαίο επίπεδο με τον άξονα της κύριας τάσης σ_1 , και με απαλοιφή του 2φ και από τις δύο σχέσεις, λαμβάνεται εξίσωση επίπεδης καμπύλης. Η εξίσωση [4.5] που προκύπτει είναι εξίσωση

κύκλου και η γραφική της παράσταση είναι γνωστή στη Μηχανική ως κύκλος του Mohr (Mohr's Circle).

$$\left(\sigma - \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}\right)^2 + r^2 = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}\right)^2 \quad [4.5]$$

Ο κύκλος σχεδιάζεται σε ορθογώνιο σύστημα αξόνων (σ , τ) με το κέντρο του να βρίσκεται στον άξονα των ορθών τάσεων (σ) και με τετμημένη $(\sigma_1 + \sigma_2)/2$ και η ακτίνα του ισούται με $(\sigma_1 - \sigma_2)/2$. Το σημείο της περιφέρειας του κύκλου, που δίνει την τιμή της τάσης σε επίπεδο που σχηματίζει θετική γωνία ϕ ως προς τον άξονα της κύριας τάσης σ_1 , βρίσκεται σε ακτίνα που σχηματίζει γωνία 2ϕ (με αριστερόστροφη φορά) από τον θετικό άξονα των κυρίων τάσεων σ (Σχήμα 4.2)



Σχήμα 4.2: Ορισμός του κύκλου του Mohr.

Ουσιαστικά, ο κύκλος του Mohr δηλώνει ότι οι ορθές και οι διατμητικές τάσεις που δρουν σε ένα επίπεδο εξαρτώνται από τον προσανατολισμό αυτού του επιπέδου. Άρα ο κύκλος του Mohr αποτελεί γραφική μέθοδο μετασχηματισμού των συνιστωσών του τανυστή τάσης.

Σύμβαση των τάσεων: Στον τομέα της Μηχανικής Πετρωμάτων, όσον αφορά τις ορθές τάσεις, θετικές θεωρούνται οι θλιπτικές τάσεις ενώ οι εφελκυστικές τάσεις λαμβάνονται ως αρνητικές. Επίσης, για το σχεδιασμό του κύκλου οι διατμητικές τάσεις είναι θετικές για τάσεις που στρέφουν δεξιόστροφα το στοιχειώδη όγκο και αρνητικές αντίθετα.

4.2.2 Κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb

Η πιο ενδιαφέρουσα θεωρία αστοχίας διατυπώθηκε από τον Coulomb το 1773. Με βάση τη τριβή και την αστοχία των πετρωμάτων σε διάτμηση ο Coulomb διατύπωσε την εξής άποψη: «στην διατμητική τάση, που αναπτύσσεται στο πέτρωμα ως συνέπεια της υποβολής του σε θλίψη και τείνει να προκαλέσει αστοχία σε ολίσθηση πάνω σε ένα επίπεδο, ανθίστανται η συνοχή του υλικού και μια άλλη σταθερά του υλικού πολλαπλασιαζόμενη επί την τάση, που δρα κάθετα στο επίπεδο αστοχίας». Η θεωρία αυτή είναι σήμερα διεθνώς γνωστή ως θεωρία αστοχίας Mohr – Coulomb (Goodman, 1980) ή αλλιώς «θεωρία της εσωτερικής τριβής» (internal friction theory) ή «θεωρία της διατμητικής αστοχίας» (shear failure theory) και διατυπώνεται ως εξής:

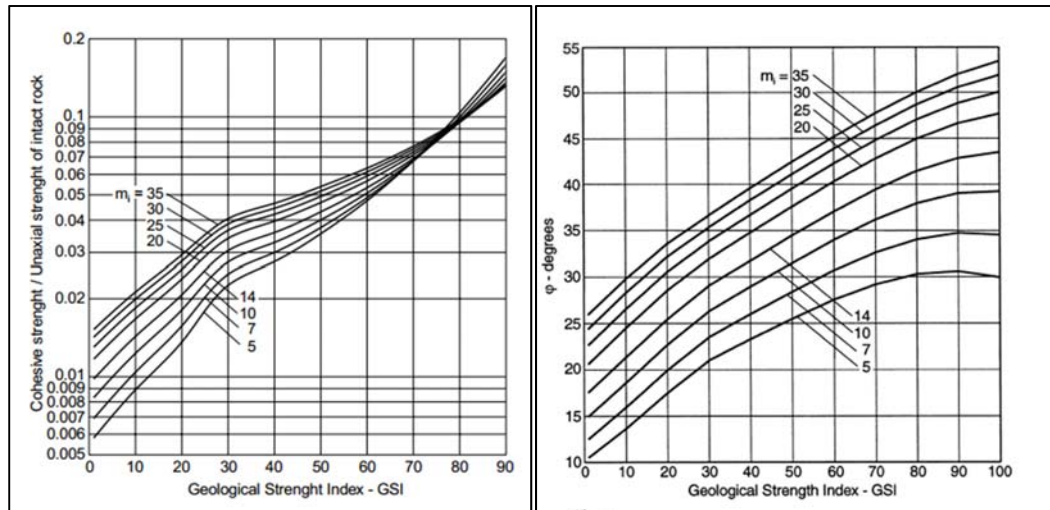
«Η αστοχία ενός υλικού σε διάτμηση, όταν αυτό υποβάλλεται σε θλίψη, οφείλεται στο γεγονός ότι στο επίπεδο αστοχίας του ικανοποιείται, τη στιγμή της αστοχίας, η εμπειρική εξίσωση [4.6]

$$|\tau_f| = c + \sigma_f \tan \varphi_p \quad [4.6]$$

όπου τ_f η διατμητική αντοχή σε ένα επίπεδο αστοχίας εδάφους και σ_f η ορθή τάση που ασκείται στο ίδιο επίπεδο, c η φαινόμενη συνοχή του γεωυλικού και φ_p είναι η μέγιστη γωνία εσωτερικής τριβής του υλικού. Επειδή το πρόσημο της διατμητικής τάσης τ_f επηρεάζει μόνο τη διεύθυνση ολίσθησης στη εξίσωση [4.6] λαμβάνεται πάντα η απόλυτη τιμή του. Με βάση τη σύμβαση προσήμου των τάσεων οι θλιπτικές τάσεις θεωρούνται θετικοί αριθμοί με $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$, αν και η ενδιάμεση κύρια τάση σ_2 δεν επιδρά στο κριτήριο αστοχίας.

Η συνοχή (cohesion) ενός υλικού συμβάλλει στην αύξηση της διατμητικής του αντοχής και εκφράζει την ικανότητά του να ανθίσταται στις διατμητικές δυνάμεις. Η συνοχή ενός πετρώματος εξαρτάται από την περιεκτικότητά του σε νερό και την πυκνό-

τητά του. Η γωνία εσωτερικής τριβής (angle of internal friction) ορίζεται ως το μέτρο της γωνίας φυσικής απόθεσης του εδάφους. Η συνοχή c και η γωνία εσωτερικής τριβής φ_p έχουν άμεση σχέση με το σύστημα GSI σύμφωνα με τα σχήματα 4.3 (α) και (β), αντίστοιχα.



Σχήμα 4.3: α) Σχέση μεταξύ συνοχής c και GSI και β) γωνίας εσωτερικής τριβής φ_p και GSI. (Hoek et al, 1998)

Για παράδειγμα αν το $GSI = 20$ και το $m_i = 10$ τότε η σχέση της συνοχής προς την μονοαξονική θλίψη $c/\sigma_{ci} = 0.018$ (Σχήμα 4.3.α) και η γωνία εσωτερικής τριβής $\varphi_p = 23^\circ$ (Σχήμα 4.3.β).

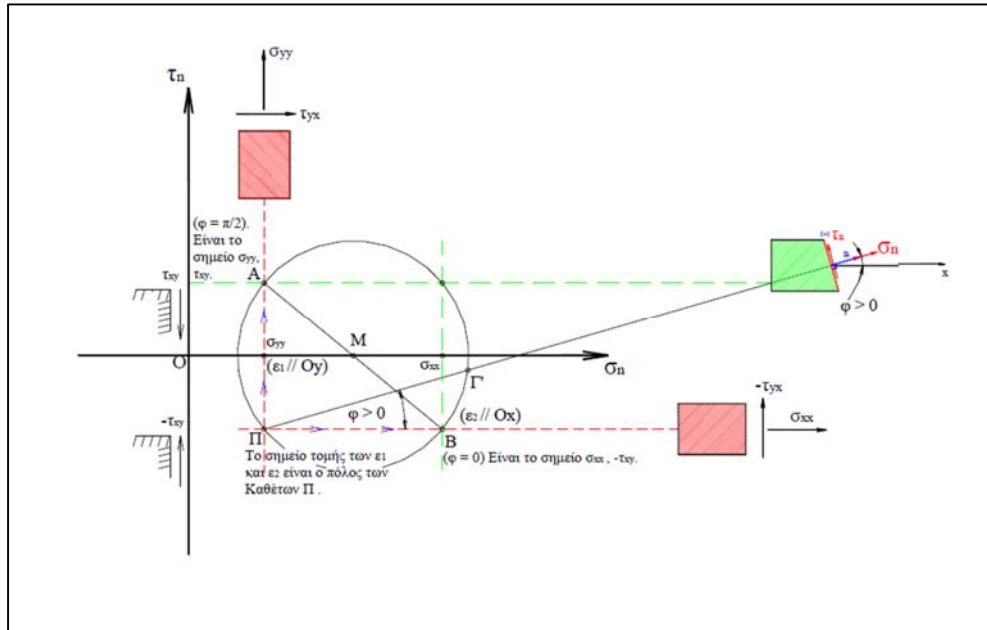
Σύμφωνα με τον Roberts (1977) για ένα μη συνεκτικό εδαφικό υλικό, δηλαδή ένα υλικό με $c = 0$, η μέγιστη κλίση πρανούς ισούται με την γωνία φυσικής απόθεσης, ενώ για ένα συνεκτικό εδαφικό υλικό η αντίστοιχη μέγιστη κλίση είναι μεγαλύτερη από αυτή που καθορίζεται από τη γωνία φυσικής απόθεσης. Επομένως, ένα υλικό αστοχεί σε διάτμηση κατά ένα επίπεδο όταν οι διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται υπερβαίνουν τη συνοχή του υλικού και την τάση που αναπτύσσεται λόγω τριβής.

Με τον όρο αστοχία (failure) ενός υλικού εννοείται η μεταβολή της μηχανικής του συμπεριφοράς με αποτέλεσμα να μην μπορεί να αναλάβει τα φορτία για τα οποία επιλέχθηκε. Η αστοχία ενός υλικού δεν σημαίνει απαραίτητα και θραύση, αλλά και πλαστική ή μόνιμη παραμόρφωση σε μη επιτρεπτά επίπεδα.

Βασική προϋπόθεση του κριτηρίου αστοχίας Coulomb, εξίσωση [4.6], είναι ότι $\sigma_f > 0$, δηλαδή η ορθή τάση να είναι θλιπτική. Αντίθετα, αν η ορθή τάση είναι εφελκυστική, τότε η έννοια της εσωτερικής τριβής παύει να υφίσταται, γιατί η τάση τείνει να

προς το υπόψιν επίπεδο στο φυσικό χώρο έχει τον ίδιο προσανατολισμό με την ευθεία στον χώρο του Mohr.

Αναλυτικότερα, όταν δίνονται οι τάσεις $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$, ο κύκλος του Mohr κατασκευάζεται ώστε να περνάει από τα σημεία A (σ_x, τ_{xy}) και B ($\sigma_y, -\tau_{xy}$). Τότε ο πόλος θα βρίσκεται από την τομή της ευθείας που ξεκινά από το σημείο B και είναι παράλληλη με τον άξονα Ox με την ευθεία που ξεκινά από το σημείο A και είναι παράλληλη με τον Oy. Αφού έχει βρεθεί ο πόλος των καθέτων (Π) τότε η ευθεία που διέρχεται από αυτόν και είναι παράλληλη προς το κάθετο διάνυσμα n του επιπέδου τέμνει τον κύκλο του Mohr στο σημείο Γ'. Το σημείο αυτό αντιστοιχεί στο εντατικό πεδίο ($\sigma_n, -\tau_n$) το οποίο είναι και το ζητούμενο εντατικό πεδίο. (Σχήμα 4.5)



Σχήμα 4.5: Κύκλος του Mohr και Πόλος των Καθέτων.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι ο πόλος Π είναι μοναδικός για κάθε μια δεδομένη εντατική κατάσταση.

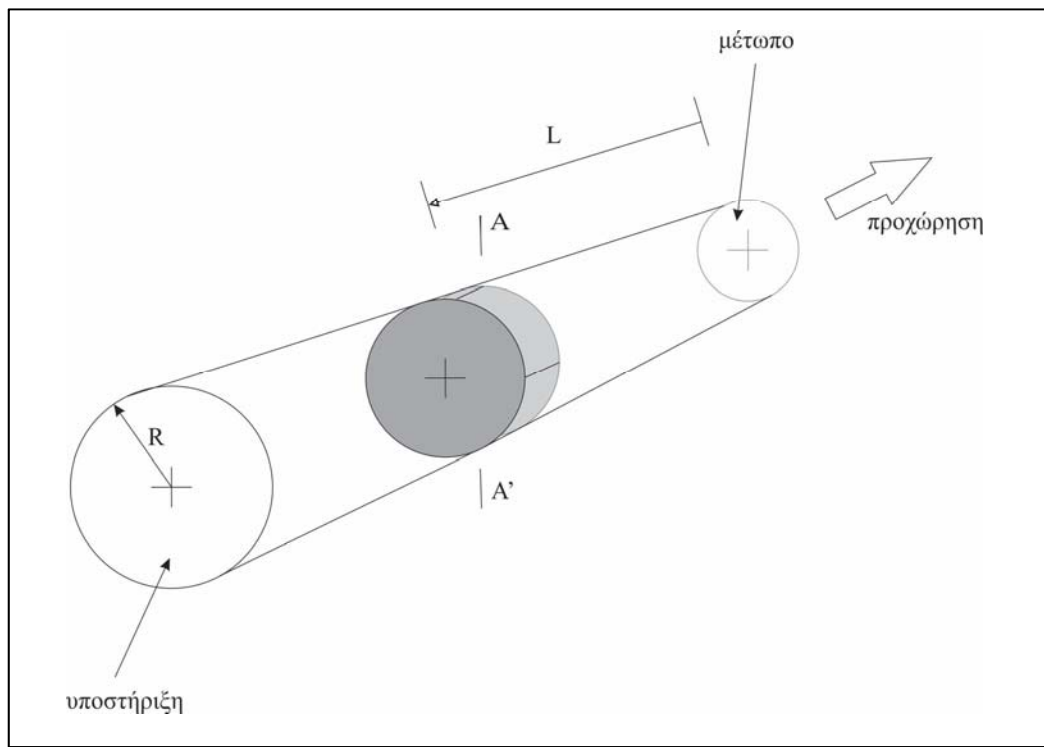
Κεφάλαιο 5

Μέθοδος Σύγκλισης – Υποστύλωσης

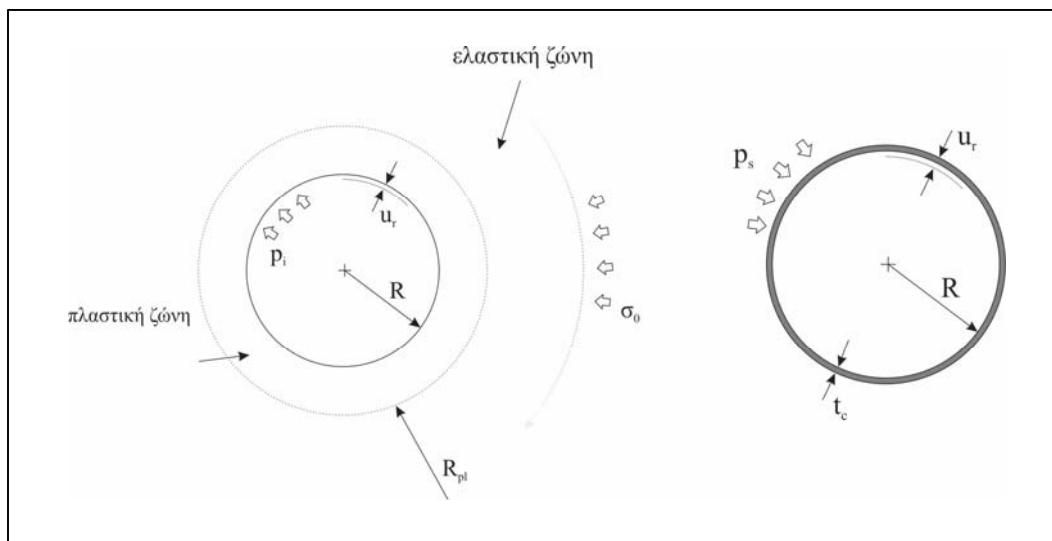
5.1 Μελέτη προχώρησης σήραγγας με τη Μέθοδο Σύγκλισης – Υποστύλωσης

Η μέθοδος της Σύγκλισης και Υποστύλωσης (ή εκτόνωσης των τάσεων) είναι μια διαδικασία η οποία επιτρέπει τον υπολογισμό του φορτίου που επιβάλλεται σε μια υποστήριξη πίσω από το μέτωπο. Όταν ένα τμήμα της υποστήριξης τοποθετείται σε άμεση επαφή με το μέτωπο της σήραγγας δεν παραλαμβάνει όλο το φορτίο της εκσκαφής, καθώς μέρος αυτού παραλαμβάνεται από το ίδιο το μέτωπο. Ενώ η σήραγγα - άρα και το μέτωπο - προχωρούν η επίδραση του μετώπου μειώνεται, οπότε στην υποστήριξη επιβάλλεται μεγαλύτερο ποσοστό του φορτίου, το οποίο παραλάμβανε πιο πριν το μέτωπο. Έτσι, όταν το μέτωπο βρεθεί αρκετά μακριά από την αρχική του θέση, η υποστήριξη θα παραλάβει όλο το φορτίο για το οποίο έχει σχεδιαστεί.

Στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζεται κυλινδρική σήραγγα με ακτίνα R η οποία έχει διανοιχθεί σε βραχόμαζα και υποβάλλεται αρχικά σε ομοιόμορφη τάση. Έχει τοποθετηθεί κυλινδρική υποστήριξη από την αρχή της σήραγγας μέχρι το τμήμα $A - A'$. Το συγκεκριμένο τμήμα, το οποίο έχει μοναδιαίο πάχος, είναι τοποθετημένο κατά τον άξονα της σήραγγας και σε απόσταση L από το μέτωπο. Σκοπός είναι να προσδιοριστεί το φορτίο το οποίο η βραχόμαζα θα μεταφέρει στην υποστήριξη από τη στιγμή της τοποθέτησης μέχρι τη στιγμή όπου το μέτωπο θα είναι πολύ μακριά, με αποτέλεσμα η επίδραση του μετώπου να είναι μηδενική.



Σχήμα 5.1: Κυλινδρική σήραγγα μέσα σε βραχώμαζα.

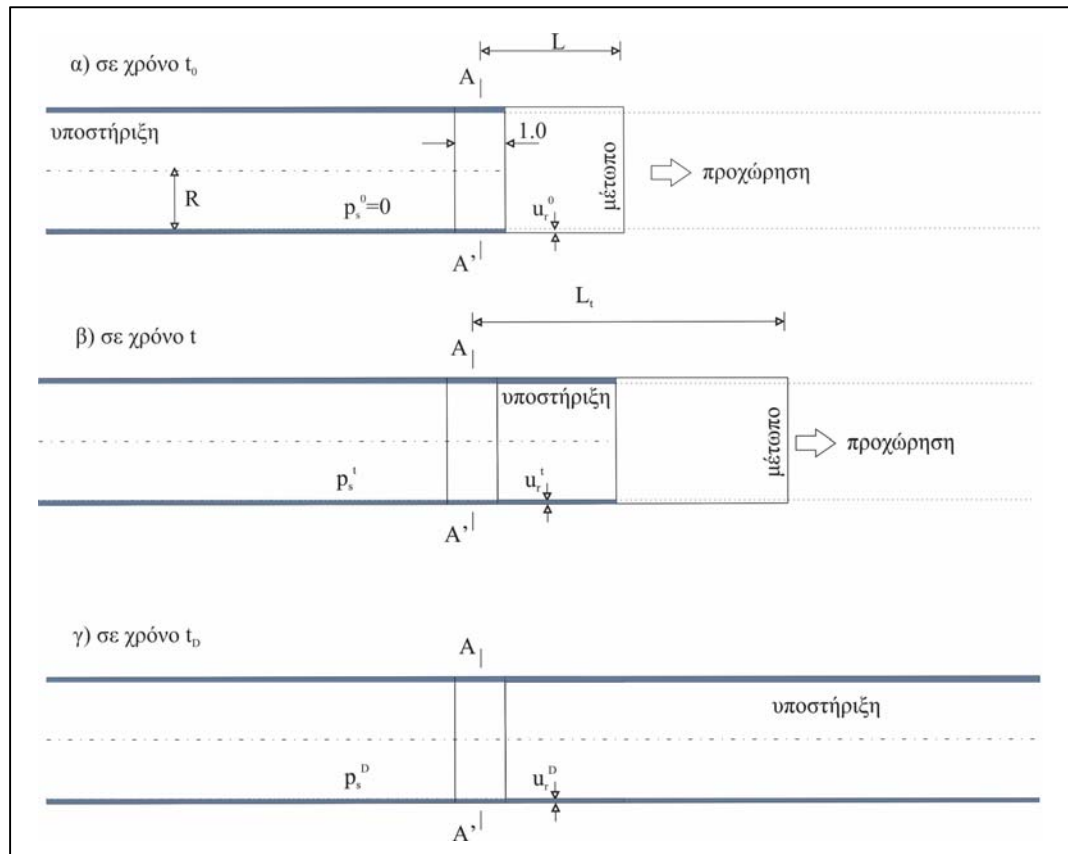


Σχήμα 5.2: α) Τομή A – A' χωρίς υποστήριξη β) Τομή A – A' με υποστήριξη.

Οι τιμές που λαμβάνονται υπόψη φαίνονται στο Σχήμα 5.2.α το οποίο απεικονίζει τομή της εκσκαφής στο σημείο A – A', χωρίς την υποστήριξη. Η τάση σ_0 είναι η υδρο-

στατική τάση μακρινού πεδίου στην βραχόμαζα και η ακτίνα R_{pl} προσδιορίζει την έκταση της αστοχίας, ή αλλιώς της πλαστική ζώνης, η οποία αναπτύσσεται γύρω από τη σήραγγα. Η ακτινική μετατόπιση συμβολίζεται ως u_r και η πίεση – που θα ασκηθεί αργότερα – από την υποστήριξη στα τοιχώματα της σήραγγας ως p_i .

Το Σχήμα 5.2.β αναπαριστά την τομή Α – Α' της σήραγγας με υποστήριξη πάχους t_c , η οποία δέχεται ομοιόμορφη πίεση p_s από την βραχόμαζα και προκαλεί ακτινική μετατόπιση u_r στην υποστήριξη.



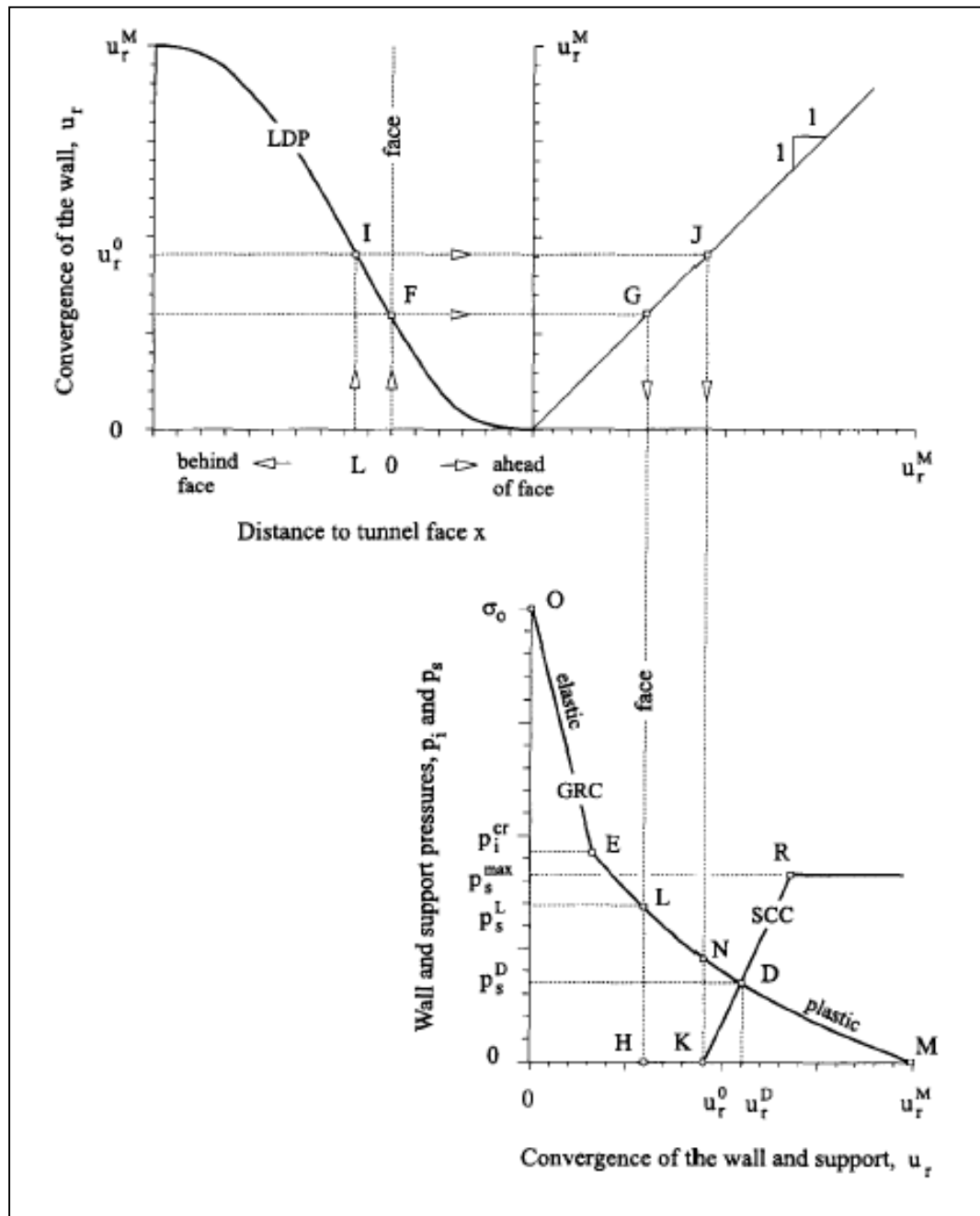
Σχήμα 5.3: Φορτία υποστήριξης κατά την προχώρηση της σήραγγας.

Η μέθοδος της Σύγκλισης – Υποστύλωσης αναπτύσσεται εικονικά στο Σχήμα 5.3 από το σχήμα (α) προς το σχήμα (γ). Στον αρχικό χρόνο t_0 (Σχήμα 5.3.α) η υποστήριξη έχει φτάσει μέχρι το σημείο της τομή Α – Α', απέχει απόσταση L από το μέτωπο και το έδαφος έχει υποστεί ακτινική μετατόπιση u_r^0 . Από τη στιγμή που η υποστήριξη βρίσκεται μακριά από το μέτωπο, η βραχόμαζα δεν μεταφέρει φορτία στην υποστήριξη, άρα $p_s^0 =$

0 σε αυτό το στάδιο. Καθώς η σήραγγα προχωράει προς τα δεξιά, το έδαφος και η υποστήριξη παραμορφώνονται και η υποστήριξη λαμβάνει μέρος του φορτίου το οποίο πιο πριν λάμβανε το μέτωπο. Στο Σχήμα 5.3.β φαίνεται η κατάσταση της σήραγγας σε χρόνο t και όταν το τμήμα $A - A'$ βρίσκεται σε απόσταση L_t από το μέτωπο. Σε αυτό το σημείο το έδαφος έχει συγκλίνει κατά $u_r^t > u_r^0$ και η βραχώμαζα μεταφέρει πίεση p_s^t προς την υποστήριξη. Τέλος, όταν το μέτωπο της σήραγγας έχει προχωρήσει αρκετά μακριά (Σχήμα 5.3.γ) στο τμήμα $A - A'$ το σύστημα εδάφους – υποστήριξης έχει εξισορροπηθεί και η υποστήριξη λαμβάνει το τελικό φορτίο p_s^D , για το οποίο έχει σχεδιαστεί. Τη χρονική στιγμή t_D , έχει μηδενιστεί η επίδραση του μετώπου και η υποστήριξη και το έδαφος έχουν συγκλίνει μαζί κατά u_r^D .

Οι τρεις βασικές γραφικές παραστάσεις της μεθόδου Σύγκλισης – Εκτόνωσης είναι:

- i. Κατανομή της σύγκλισης κατά μήκος της σήραγγας, Longitudinal Deformation Profile (LDP)
- ii. Καμπύλη Αντίδρασης του Πετρώματος, Ground Reaction Curve (GRC)
- iii. Χαρακτηριστική Καμπύλη της Υποστήριξης, Support Characteristic Curve (SCC)



Σχήμα 5.4: Σχηματική αναπαράσταση των καμπύλων LDP, GRC και SCC.
Panet (1997)

Η καμπύλη LDP είναι η γραφική παράσταση της ακτινικής μετατόπισης η οποία συμβαίνει κατά μήκος του άξονα μη υποστηριγμένης κυλινδρικής εκσκαφής, για τμήματά της που βρίσκονται πίσω και μπροστά από το μέτωπο. Η συγκεκριμένη καμπύλη αναπαρίσταται στο πρώτο διάγραμμα του Σχήματος 5.4, όπου στον οριζόντιο άξονα προβάλλεται η απόσταση x από το προς ανάλυση τμήμα έως το μέτωπο της σήραγγας. Ο κατακόρυφος άξονας δείχνει την αντίστοιχη ακτινική μετατόπιση u_r . Από το διάγραμμα

φαίνεται ότι σε ορισμένη απόσταση πίσω από το μέτωπο η επίδραση του μετώπου είναι αμελητέα, με αποτέλεσμα μετά από αυτήν την απόσταση το τμήμα της εκσκαφής έχει συγκλίνει κατά u_r^M (maximum). Ομοίως, σε κάποια απόσταση μπροστά από το μέτωπο η προχώρηση της σήραγγας δεν επιδρά στη βραχύμαζα και η ακτινική μετατόπιση είναι μηδενική.

Θεωρώντας το ανυποστήρικτο τμήμα του Σχήματος 5.2.α η καμπύλη GRC ορίζεται ως η μη γραμμική σχέση μεταξύ της φθίνουσας εσωτερικής πίεσης p_i και της αυξανόμενης ακτινική μετατόπιση των τοιχωμάτων u_r . Η GRC απεικονίζεται από την καμπύλη OEM στο Σχήμα 5.4, ξεκινώντας από το σημείο O, όπου η εσωτερική πίεση p_i είναι ίση με την αρχική τάση σ_0 , και καταλήγει στο σημείο M, όπου η εσωτερική πίεση είναι ίση με το μηδέν και η σύγκλιση u_r^M είναι η μέγιστη δυνατή. Το σημείο E ορίζει την εσωτερική πίεση p_i^{cr} κατά την οποία η βραχύμαζα περνάει από την ελαστική στην πλαστική της περιοχή, όπου δημιουργείται μια ζώνη αστοχίας γύρω από την σήραγγα έκτασης R_{pl} , όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2.α.

Η καμπύλη SCC ορίζεται ως η σχέση μεταξύ της αυξανόμενης πίεσης p_s της υποστήριξης και της αυξανόμενης ακτινικής μετατόπισης u_r της υποστήριξης. Η SCC προβάλλεται με την καμπύλη KR στο Σχήμα 5.4. Το σημείο K αντιστοιχεί στη μηδενική πίεση από την υποστήριξη, δηλαδή την στιγμή που τοποθετείται, και το σημείο R αντιστοιχεί στη μέγιστη πίεση p_s^{max} την οποία μπορεί να δεχτεί η υποστήριξη χωρίς να αστοχήσει.

Η ερμηνεία της αλληλεπίδρασης μεταξύ των καμπυλών LDP, GRC και SCC επιτρέπει να οριστεί η πίεση p_s την οποία το έδαφος μεταφέρει στην υποστήριξη με την προχώρηση του μετώπου. Σε αυτό το σημείο πρέπει να γίνει σαφές πως η καμπύλη LDP προβάλλει την ελαστική συμπεριφορά της βραχύμαζας ενώ η καμπύλη GRC την ελαστοπλαστική συμπεριφορά της. Η εγκατάσταση της υποστήριξης στο τμήμα A – A' τη χρονική στιγμή t_0 (Σχήμα 5.3.α) αντιστοιχεί στην καμπύλη LDP στο σημείο I (Σχήμα 5.4) και με απόσταση από το μέτωπο $x = L$ και σύγκλιση των τοιχωμάτων $u_r = u_r^0$. Το σημείο J στην δεξιά μεριά του διαγράμματος έχει οριζόντια συντεταγμένη $u_r = u_r^0$ και αντιστοιχεί στο σημείο K του κάτω διαγράμματος στο Σχήμα 5.4. Όσο το μέτωπο δεν προχωράει τότε η ευστάθεια διατηρείται αποκλειστικά από την ικανότητα του μετώπου να φέρει τα φορτία τα οποία αναδιανέμονται λόγω της εκσκαφής. Έτσι, το κατακόρυφο τμήμα KN αντιστοιχεί στην πίεση που λαμβάνει το μέτωπο τη στιγμή t_0 .

Καθώς το μέτωπο προχωράει (Σχήμα 5.3), η υποστήριξη και η εκσκαφή παραμορφώνονται εξίσου, με την πίεση p_s της υποστήριξης να αυξάνεται και την υποστηρικτική τάση p_i στην περιφέρεια της σήραγγας να μειώνεται. Τη χρονική στιγμή t_D (Σχήμα 5.3.γ) όταν η επίδραση της υποστήριξης στο μέτωπο έχει εξαφανιστεί, το σύστημα ισορροπεί στο σημείο D (Σχήμα 5.4), δηλαδή στην τομή των καμπυλών GRC και SCC. Η πίεση p_s^D , στο σημείο D, αναπαριστά την τελική πίεση η οποία μεταφέρεται στην υποστήριξη από την βραχώμαζα.

Η σύγκριση των τριών αυτών διαγραμμάτων οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η υποστήριξη δεν μπορεί να υποστεί ακτινική πίεση μεγαλύτερη από την p_s^L , η οποία αντιστοιχεί στο σημείο L του κάτω διαγράμματος στο Σχήμα 5.4. Μεγαλύτερη πίεση από την p_s^L θα μπορούσε να επιτευχθεί στην υποθετική περίπτωση μιας άκαμπτης υποστήριξης τοποθετούμενη στο ίδιο το μέτωπο, δηλαδή η καμπύλη SCC να είναι κάθετη και να ξεκινάει από το σημείο H. Επίσης, η υποστήριξη δεν θα μπορούσε να λάβει κανένα φορτίο αν τοποθετούταν μετά το σημείο M, καθώς ήδη θα είχε επιτευχθεί η μέγιστη σύγκλιση.

5.2 Υπολογισμός σύγκλισης – εκτόνωσης σηράγγων.

Η σύγκλιση του μετώπου είναι αποτέλεσμα της φθοράς του πετρώματος, κυρίως γύρω από το μέτωπο, σε συνάρτηση με τον χρόνο, εξαιτίας της εκτόνωσης των τάσεων. Για τον έλεγχο της σύγκλισης του μετώπου γίνονται επί τόπου μετρήσεις με όργανα όπως η μετροταινία, το δυναμόμετρο ώστε να είναι τανυσμένη η μετροταινία σε σταθερή τιμή και το εκτασιόμετρο τύπου ωρολογίου. Πιο προηγμένες τεχνικές μέτρησης περιλαμβάνουν μέτρηση των συγκλίσεων με ακτίνες laser. Σκοπός της μέτρησης της σύγκλισης του μετώπου είναι ο προσδιορισμός της μεταβολής της απόστασης αντιδιαμετρικών σημείων μιας εκσκαφής με βάση την διαφορά:

$$C(t) = D_0 - D(t) \quad [5.8]$$

όπου $C(t)$ είναι η σύγκλιση τη χρονική στιγμή t μεταξύ δύο αντιδιαμετρικών σημείων, D_0 είναι η αρχική μέτρηση της απόστασης των ίδιων σημείων και $D(t)$ είναι η μέτρηση τη χρονική στιγμή t μεταξύ των σημείων αυτών. Κατά τη μέτρηση των συγκλίσεων αυτές θεωρούνται θετικές όταν τα αντιδιαμετρικά σημεία πλησιάζουν το ένα προς το άλλο και αρνητικές όταν απομακρύνονται. Οι μεταβολές των συγκλίσεων μπορούν να μετρηθούν

κατά την διάρκεια μεγάλων χρονικών περιόδων με ακρίβεια 10^{-5} , δηλαδή 0.1mm σε απόσταση 10m.

Η σύγκλιση μπορεί να εκφρασθεί ως συνάρτηση της απόστασης από το μέτωπο με εμπειρικές σχέσεις, οι οποίες έχουν προκύψει από τρισδιάστατες αναλύσεις και επί τόπου μετρήσεις, όπως αυτές που προτείνουν οι Panet και Guenot (1982) και οι Chern et al. (1998). Η εκτίμηση της μέγιστης σύγκλισης μιας σήραγγας μπορεί να βρεθεί από την καλύτερη προσαρμογή των επί τόπου μετρήσεων από την εκθετική εξίσωση [5.9] (Panet and Guenot, 1982).

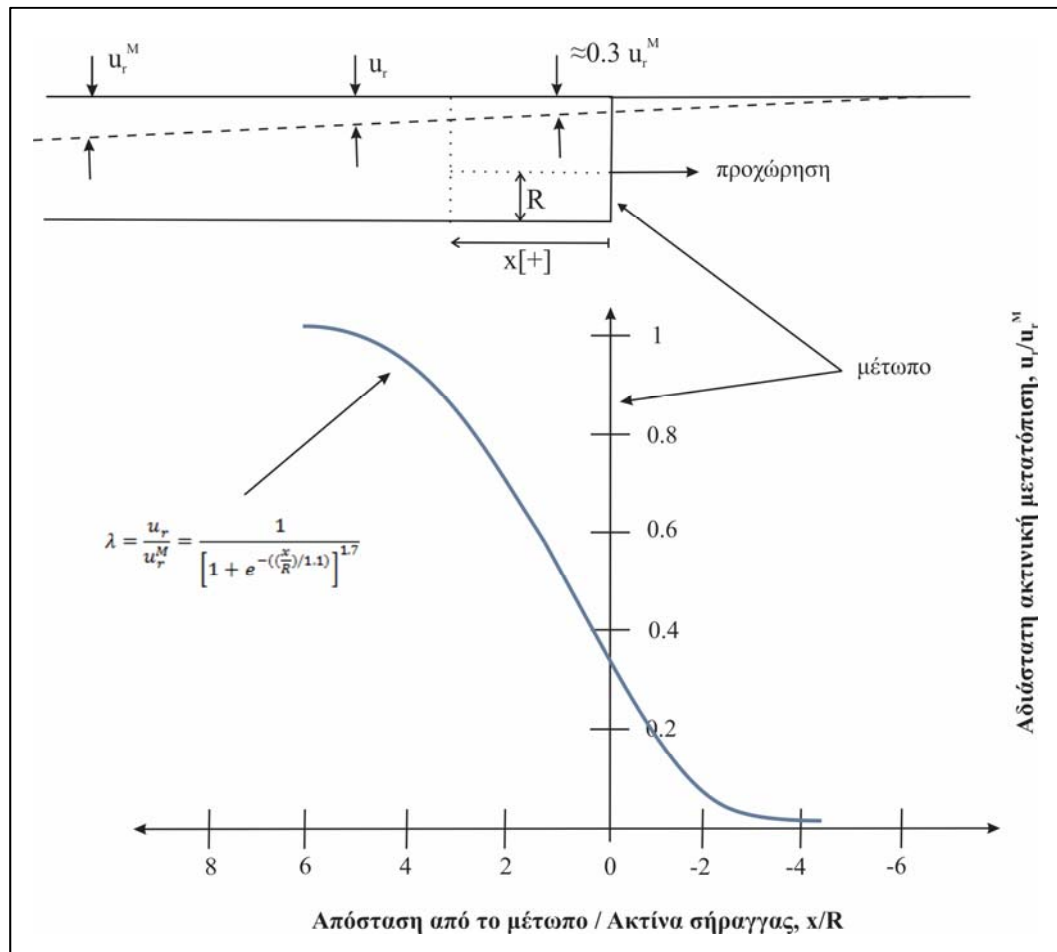
$$C(x) = C_{\infty x} \left[1 - e^{-\frac{x}{R}} \right] \quad [5.9]$$

όπου $C(x)$ είναι η σύγκλιση σε απόσταση x από το μέτωπο της σήραγγας, $C_{\infty x}$ είναι η σύγκλιση των τοιχωμάτων μακριά από το μέτωπο και R είναι η ακτίνα της σήραγγας.

Οι Chern et al. (1998) πρότειναν την εμπειρική εξίσωση [5.10] βάση τρισδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων και μετρήσεων των συγκλίσεων σε παράλληλη σήραγγα με το μέτωπο κατά την προχώρηση αυτού.

$$\lambda = \frac{u_r}{u_r^M} = \frac{1}{\left[1 + e^{-\left(\frac{x}{R}\right)/1.1} \right]^{1.7}} \quad [5.10]$$

όπου x η απόσταση από το μέτωπο, R είναι η ακτίνα καμπυλότητας της σήραγγας στη θέση μέτρησης και u_r είναι η ακτινική μετατόπιση της σήραγγας. Ο συντελεστής λ ονομάζεται «συντελεστής εκτόνωσης» και κυμαίνεται από 0, όταν το άνοιγμα δεν έχει υποστεί μετατόπιση, έως 1, όταν το άνοιγμα έχει φτάσει στη μέγιστη μετατόπιση που μπορεί να υποστεί. Στο (Σχήμα 5.5) παρατηρείται ότι για απόσταση x από το μέτωπο η ακτινική μετατόπιση είναι u_r . Όσο αυξάνεται η απόσταση από το μέτωπο τόσο η ακτινική μετατόπιση πλησιάζει στη μέγιστη τιμή της u_r^M . Για αρνητικές τιμές της απόστασης x , δηλαδή για σημεία μπροστά από το μέτωπο, η ακτινική μετατόπιση μειώνεται, ενώ η σύγκλιση τείνει στο μηδέν για σημεία πριν το μέτωπο. Για απόσταση $x=0$, δηλαδή σε σημείο πάνω στο μέτωπο, λύνοντας την εξίσωση [5.10] προκύπτει $\lambda=0.28$.



Σχήμα 5.5: Σύγκλιση της σήραγγας συναρτήσει της απόστασης από το μέτωπο βάση τρισδιάστατης προσομοίωσης της εκσκαφής της σήραγγας και επί τόπου μετρήσεις.

5.2.1 Ανάλυση αλληλεπίδρασης βραχομάζας και υποστύλωσης

Ο βέλτιστος σχεδιασμός ενός συστήματος προσωρινής υποστύλωσης εξαρτάται από τα προτεινόμενα μέτρα υποστύλωσης αλλά και τον χρόνο εφαρμογής τους. Σημαντικός παράγοντας στον σχεδιασμό της υποστήριξης είναι η μεταβολή του φορτίου της σήραγγας, δηλαδή η χαλάρωση του πετρώματος, κατά την προχώρησή της και πριν μπει υποστήριξη διότι συνοδεύεται από παραμορφώσεις της βραχομάζας. Η προχώρηση εξαρτάται από την απόσταση πίσω από το μέτωπο στην οποία θα τοποθετηθεί η υποστήριξη. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται έλεγχος των παραμορφώσεων της σήραγγας διότι το σύστημα υποστύλωσης θα παραλάβει πιέσεις χαμηλότερες εκείνων που αναπτύσσονται αμέσως μετά την εκσκαφή. Αντίθετα, η ανοχή μεγάλων παραμορφώσεων επιφέρει μείωση των μηχανικών χαρακτηριστικών της βραχομάζας, γεγονός που συμβάλλει στη δημιουργία μακροχρόνια

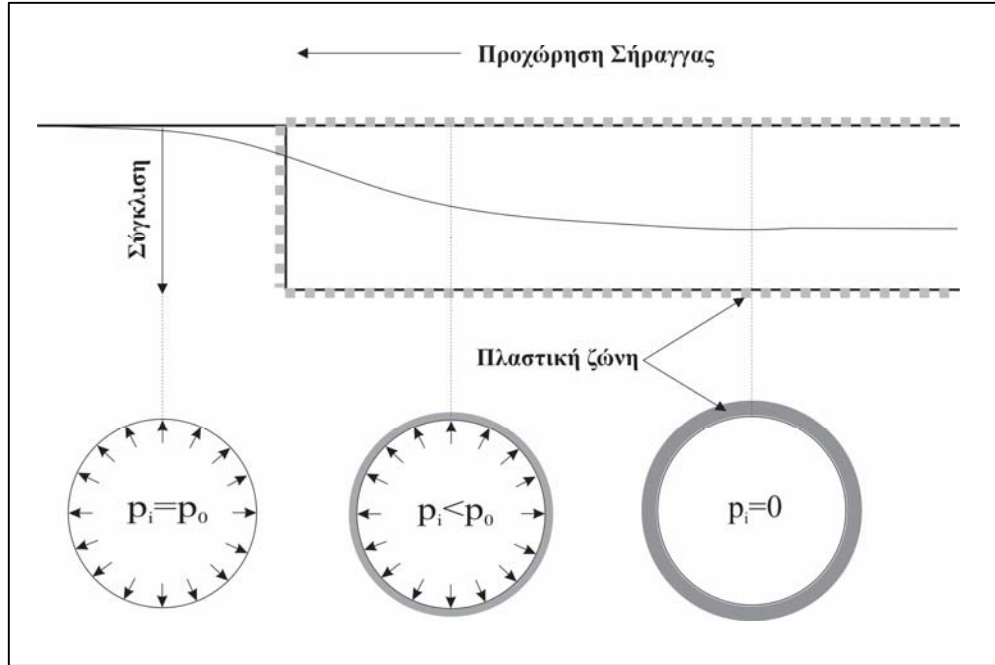
δυσμενών συνθηκών φόρτισης. Άρα, ο βασικός στόχος του συστήματος αρχικής υποστύλωσης είναι η ενεργοποίηση και η διατήρηση της εγγενούς μηχανικής αντοχής της βραχομάζας με σκοπό τη μέγιστη δυνατή αυτοϋποστήριξή της. Αυτό επιτυγχάνεται με τοποθέτηση συστήματος υποστύλωσης κατάλληλης δυσκαμψίας και επαρκούς φέρουσας ικανότητας, στον κατάλληλο χρόνο. Η χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος ως αρχική υποστήριξη και όχι προκατασκευασμένους δακτυλίους σκυροδέματος είναι και η βασική διαφορά της Νέας Αυστριακής Μεθόδου σε εξίσωση με άλλες μεθόδους εξόρυξης.

5.2.2 Αξονοσυμμετρική σήραγγα σε ελαστικό γεωϋλικό

Η αλληλεπίδραση βραχομάζας – υποστύλωσης μπορεί εύκολα να μελετηθεί σε κυκλική σήραγγα με ισότροπη φόρτιση πεδίου p_0 (Σχήμα 5.6). Η εκτόνωση των γεωστατικών φορτίων μπορεί να εκφραστεί με τη βαθμιαία μείωση του αρχικού εντατικού πεδίου κατά μήκος της περιμέτρου της σήραγγας. Οι επιφανειακές τάσεις προκύπτουν από την εξίσωση [5.11]:

$$p_i = (1 - \lambda) p_0 \quad [5.11]$$

όπου p_0 είναι το αρχικό εντατικό πεδίο σε σημείο της περιφέρειας της σήραγγας και λ ο συντελεστής εκτόνωσης, ο οποίος υπολογίζεται από την εξίσωση [5.10].



Σχήμα 5.6: Βαθμιαία εκτόνωση των γεωστατικών τάσεων συναρτήσει της απόστασης από το μέτωπο.

Στην περίπτωση που δεν έχει τοποθετηθεί υποστήριξη ή ακτινική μετατόπιση, πολύ μακριά από το μέτωπο, δίνεται από την εξίσωση [5.12]:

$$u_R(\infty) = \frac{p_0 R}{2 G} \quad [5.12]$$

όπου G το μέτρο διάτμησης του υλικού, με

$$G = \frac{E}{1+\nu} \quad [5.13]$$

Σε πολικές συντεταγμένες η ακτινική τάση σ_r , η εφαπτομενική τάση σ_θ , και η ακτινική μετατόπιση u_r συναρτήσει της ακτινικής θέσης r από το κέντρο της σήραγγας σε συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης δίνονται από τις εξισώσεις:

$$\sigma_r = \left(1 - \lambda \frac{R^2}{r^2}\right) p_0 \quad [5.14.a]$$

$$\sigma_\theta = \left(1 + \lambda \frac{R^2}{r^2}\right) p_0 \quad [5.14.β]$$

$$u_r = \lambda \frac{p_0 R^2}{2G r} \quad [5.14.γ]$$

Επί του συνόρου της σήραγγας με $r = R$ οι εξισώσεις [5.14] γίνονται:

$$\sigma_r(R) = (1 - \lambda)p_0 \quad [5.15.\alpha]$$

$$\sigma_\theta(R) = (1 + \lambda)p_0 \quad [5.15.\beta]$$

$$u_r(R) = \lambda \frac{p_0 R}{2G} \quad [5.15.\gamma]$$

Για το σχεδιασμό της καμπύλης GRC λαμβάνεται υπόψιν η ακτινική τάση στο σύνορο της εκσκαφής $\sigma_r(R)$ συναρτήσει της μετατόπισης του πετρώματος u_R για κάθε τιμή του συντελεστή εκτόνωσης λ . Από την άλλη, για το σχεδιασμό της καμπύλης SCC, όπως φαίνεται στο (Σχήμα 5.7) χρειάζεται η ελαστική σχέση μεταξύ της εφαρμοζόμενης πίεσης p_s και η μετατόπιση της υποστήριξης u_{sR} , η οποία δίνεται από την εξίσωση:

$$p_s = K_s \frac{u_{sR}}{R} \quad [5.16]$$

όπου K_s είναι το μέτρο ακαμψίας της υποστύλωσης και η u_{sR} δίνεται από την εξίσωση:

$$u_{sR} = u_R(x) - u_R(d) \quad [5.17]$$

Η φυσική σημασία της εξίσωσης 5.17 είναι ότι η υποστύλωση τοποθετείται σε απόσταση $x = d$ από το μέτωπο, με d να είναι το ανυποστύλωτο μήκος της σήραγγας.

Κατά της ισορροπία η πίεση που εξασκείται από το πέτρωμα στην υποστήριξη (τομή των δύο ευθειών στο Σχήμα (5.7)) μπορεί να βρεθεί από την εξίσωση [5.16] με αντικατάσταση της [5.17] και προκύπτει:

$$p_s = K_s \frac{\{u_R(x) - u_R(d)\}}{R} = K_s \frac{u_R(x)}{R} - K_s \left\{ \lambda(d) \frac{p_0}{2G} \right\} \quad [5.18]$$

και από την εξίσωση [5.15.α] προκύπτει ότι η μετατόπιση του πετρώματος είναι:

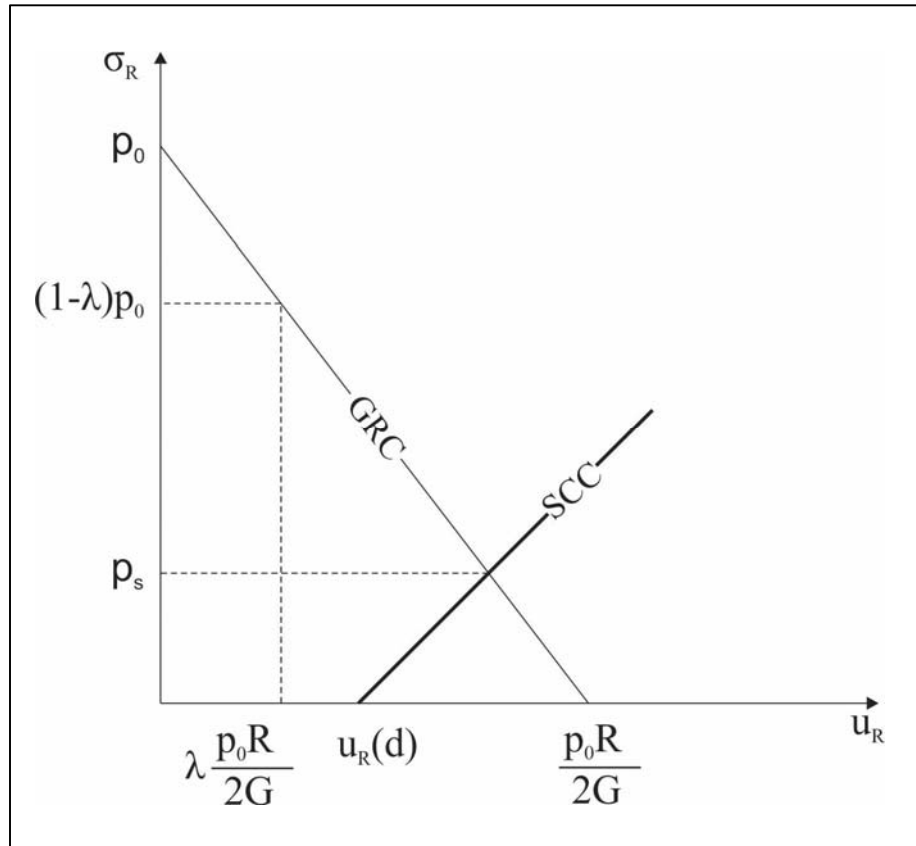
$$\sigma_r(R) = p_s = (1 - \lambda(d))p_0 = p_0 - \frac{2G}{R} u_R(x) \Rightarrow u_R(x) = \frac{R}{2G} [p_0 - p_s] \quad [5.19]$$

Αντικαθιστώντας την [5.19] στην [5.18] βρίσκεται η πίεση που ασκείται στην υποστήριξη ως:

$$p_s = \frac{K_s}{K_s + 2G} [1 - \lambda(d)] p_0 \quad [5.20]$$

Τέλος, αντικαθιστώντας την εξίσωση [5.20] στην [5.19] προκύπτει η τελική μετατόπιση της υποστυλωμένης σήραγγας

$$u_R = \frac{2G + \lambda(d)K_s}{2G + K_s} \frac{p_0 R}{2G} \quad [5.21]$$



Σχήμα 5.7: Καμπύλη αντίδρασης πετρώματος (GRC) και χαρακτηριστική καμπύλη υποστήριξης (SCC).

Κεφάλαιο 6

Πρόγραμμα υπολογιστικής γεωμηχανικής Phase²

6.1 Γενικά

Τεχνικά έργα, όπως όρυξη σηράγγων, εκσκαφή πρανών, υπόγειες μέθοδοι εκμετάλλευσης, δημιουργούν αλλαγές στο εντατικό πεδίο των περιβαλλόντων πετρωμάτων. Για τον σωστό σχεδιασμό των παραπάνω έργων είναι απαραίτητος ο υπολογισμός των δυνάμεων, των τάσεων, των μετατοπίσεων και των ανηγμένων παραμορφώσεων πριν, κατά τη διάρκεια και μετά την όρυξή τους.

Παλαιότερα σε απλά γεωμετρικά προβλήματα γινόταν χρήση μεθόδων αναλυτικής επίλυσης (closed form solutions) των διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν αυτά τα σύνθετα φαινόμενα. Οι πρώτες αριθμητικές τεχνικές πρόβλεψης και επίλυσης των εντατικών καταστάσεων χρησιμοποιούσαν μεθόδους οριακής ισορροπίας και εξέταζαν τη συμπεριφορά διακριτών τεμαχίων με βάση την ισορροπία τάσεων και δυνάμεων. Βασικό μειονέκτημα αυτών των μεθόδων είναι ότι παρόλο που χρησιμοποιούν συνθήκες ισορροπίας δυνάμεων, δεν λαμβάνουν υπόψη τις παραμορφώσεις των υλικών εξαιτίας των δυνάμεων αυτών. Για τον λόγο αυτό, τα τελευταία χρόνια και παράλληλα με την εξέλιξη της τεχνολογίας, αναπτύχθηκαν οι αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης (numerical methods). Σήμερα, υπάρχουν πολλές μέθοδοι αριθμητικής επίλυσης των προβλημάτων ελαστικότητας – πλαστικότητας σε ομογενή, ανομοιογενή, ισότροπα, ανισότροπα, συνεχή και ασυνεχή υλικά.

Για την συγκεκριμένη διπλωματική εργασία επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί το αριθμητικό λογισμικό πακέτο πεπερασμένων στοιχείων Phase² της Καναδικής εταιρίας Rocscience. Το συγκεκριμένο πακέτο επιλέχθηκε διότι προσεγγίζει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο το θέμα της παρούσας εργασίας δίνοντας σαφή και αξιόπιστα αποτελέσματα όσον αφορά το εντατικό πεδίο και τις μετατοπίσεις σε ένα πέτρωμα εντός του οποίου διανοίγεται υπόγεια μέθοδος εκμετάλλευσης δεδομένης γεωμετρίας και διαστάσεων. Σκοπός της διαδικασίας είναι ο προσδιορισμός των κρίσιμων περιοχών συγκέντρωσης τάσεων και των αντίστοιχων παραμορφώσεων γύρω από το άνοιγμα προκειμένου να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα υποστήριξης που τυχόν απαιτούνται.

Το Phase αναλύει μοντέλα επίπεδης παραμόρφωσης (plane strain models). Η θεώρηση επίπεδης παραμόρφωσης εφαρμόζεται όταν η τρίτη διάσταση (z) ενός σώματος δεν είναι μικρή, σε σύγκριση με τις άλλες δύο διαστάσεις (x , y), και τα φορτία που δέχεται το σώμα είναι πάνω στο επίπεδο (x , y). Τότε θεωρείται ότι η συνιστώσα του διανύσματος μετατοπίσεων (u) είναι μηδενική κατά την τρίτη διάσταση. Σημειώνεται ότι $u_z = 0$ και επομένως $\varepsilon_z = 0$. Επίσης, εφόσον $\varepsilon_z = 0$ τότε $\sigma_z \neq 0$.

6.2 Χαρακτηριστικά πετρώματος

Το πέτρωμα εντός του οποίου θα πραγματοποιηθεί η εκμετάλλευση είναι ασβεστόλιθος. Οι ασβεστόλιθοι (limestone) περιέχουν τουλάχιστον 90% ασβεστίτη και 10% δολομίτη. Σε μικρές αναλογίες περιέχουν και χαλαζία, χαλκηδόνιο, αστρίους, αργιλικά ορυκτά, σιδηρίτη και σιδηροπυρίτη. Οι ασβεστόλιθοι είναι κλαστικοί, χημικοί ή βιογενείς, κρυσταλλικοί ή ανακρυσταλλωμένοι. Οι πόροι τους αποτελούν, σε μερικές περιπτώσεις, χώρους συγκέντρωσης πετρελαίων και φυσικών αερίων, καθώς επίσης πολλές φορές αποτελούν δεξαμενές συγκέντρωσης υπεδαφίων υδάτων. Μεγάλες ποσότητες ασβεστολίθων και δολομιτών χρησιμοποιούνται ως δομικοί λίθοι.

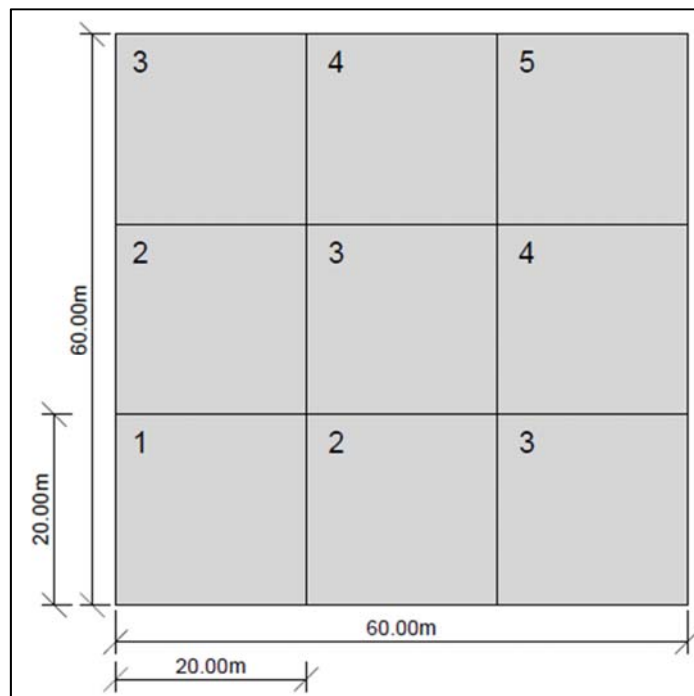
Ο ασβεστίτης (calcite), με χημικό τύπο CaCO_3 , είναι ορυκτό πολύ διαδεδομένο στα ιζηματογενή πετρώματα όπως ο ασβεστόλιθος. Η σκληρότητά του είναι 3 κατά την κλίμακα Mohs και η πυκνότητά του $2,71 \text{ g/cm}^3$. Τα χρώματα που απαντάται είναι λευκό, άχρωμο, κόκκινο, πράσινο, κυανό, κίτρινο, καστανό έως μαύρο.

Το κοίτασμα προς εκμετάλλευση είναι σχιστολιθικός τάλκης. Ο τάλκης (talc) με χημικό τύπο $\text{Zg}_6(\text{OH})_4(\text{Si}_8\text{O}_{20})$ έχει σκληρότητα 1 στην κλίμακα Mohs και πυκνότητά $2,58 \text{ g/cm}^3$ έως $2,83 \text{ g/cm}^3$. Τα χρώματα που εμφανίζεται ο τάλκης είναι ανοικτό πράσινο, σκούρο πράσινο και καστανό, ενώ σε μικροσκοπικές τομές είναι άχρωμο.

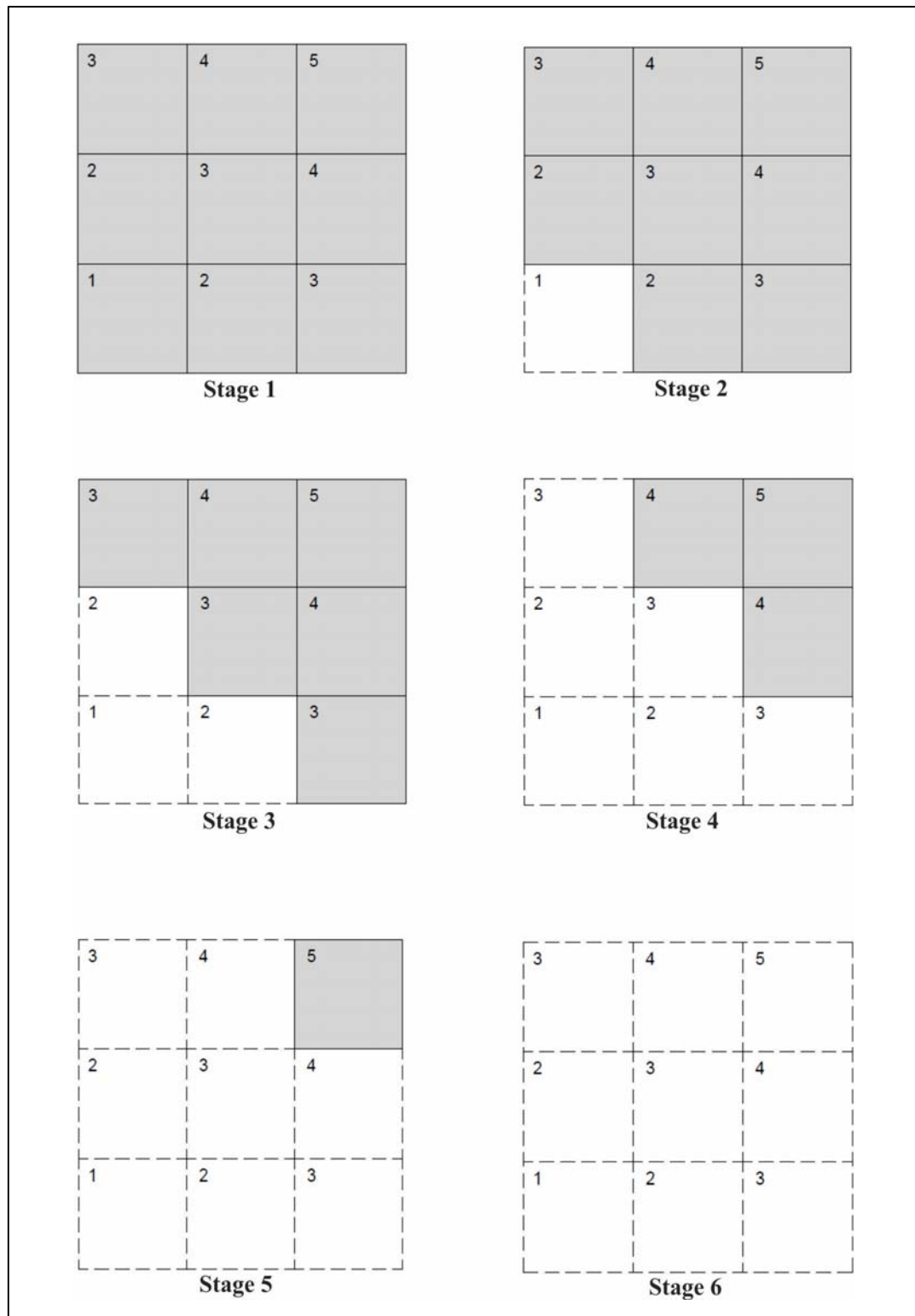
6.3 Γεωμετρία εκμετάλλευσης

Η εκμετάλλευση πραγματοποιείται σε τρεις διαδοχικούς ορόφους διαστάσεων 10m πλάτος, 60m μήκος και 20m ύψος. Η γεωμετρία της τελικής εκσκαφής έχει πλάτος 10m, μήκος 60m, ύψος 60m και διεξάγεται σε πέντε στάδια (stages) (Σχήμα 6.1). Κάθε όροφος εξορύσσεται σε τρεις φάσεις παράλληλα με τους υπόλοιπους, από κάτω προς τα πάνω, με βάση την μέθοδο εκμετάλλευσης διαδοχικών ορόφων με κενά μέτωπα. Το πρόγραμμα υλοποιήθηκε σε έξι stages. Στο πρώτο φαίνεται η αρχική κατάσταση του

πετρώματος και του κοιτάσματος, στο δεύτερο stage έχουν εξορυχθεί τα πρώτα 20m του κοιτάσματος του πρώτου ορόφου ενώ στο έκτο stage εξορύσσεται και το τελευταίο μέρος του κοιτάσματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.2.



Σχήμα 6.1: Τομή εκμετάλλευσης κατά την παράταξη.



Σχέδιο 6.2: Στάδια εκμετάλλευσης σε τομή κατά την παράταξη.

6.4 Διακριτοποίηση

Η διακριτοποίηση του μοντέλου πραγματοποιήθηκε με επιλογή διαβαθμισμένης διακριτοποίησης (graded), η οποία είναι λεπτομερής στην περιφέρεια του ανοίγματος και αραιότερη στα όρια του καννάβου για εξοικονόμηση υπολογιστικού χρόνου.

6.5 Συνοριακές συνθήκες

Η γεωμετρία του καννάβου είναι τετραγωνική και τα όριά του εκτείνονται σε επαρκή απόσταση από την εκμετάλλευση και ίση με εφτά φορές το πλάτος του ανοίγματος. Τοποθετήθηκε κύλιση στο κατώτερο οριζόντιο όριο όπως επίσης και στο δεξί και αριστερό. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται να μην η οριζόντια και κατακόρυφη κίνηση του μοντέλου στον χώρο εξαιτίας των τριών κυλίσεων αλλά και η πάκτωση του στα δύο κάτω άκρα του εξαιτίας των κυλίσεων. Το πάνω οριζόντιο όριο του καννάβου έμεινε ελεύθερο προκειμένου να μελετηθεί η καθίζηση του εδάφους.

6.6 Εντατικό πεδίο

Στο πρόγραμμα Phase το εντατικό πεδίο περιγράφεται από τις δύο κύριες τάσεις στο επίπεδο Oxy, την κατακόρυφη κύρια τάση σ_1 ή σ_v (vertical) και την πλευρική κύρια τάση σ_3 ή σ_h (horizontal), οι οποίες ορίστηκαν ως εξής:

$$\sigma_1 = 3 \text{ MPa}$$

$$\sigma_3 = k \sigma_1 = 1.2 \text{ MPa}$$

Κατά τη μοντελοποίηση θεωρήθηκε βαρυτικό πεδίο τάσεων (gravity field stress) και οι τάσεις εισήχθησαν όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.3:

Σχήμα 6.3: Field Stress Properties

όπου:

μοναδιαίο βάρος ασβεστολίθου: $\gamma = 0,027 \text{ MN/m}^3$ και

$$\sigma_1 = \gamma h \Rightarrow h = \frac{\sigma_1}{\gamma} = \frac{3 \text{ MN/m}^2}{0.027 \text{ MN/m}^2} \Rightarrow h = 110 \text{ m}$$

6.7 Μηχανικές ιδιότητες πετρωμάτων

Ο καθορισμός των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν τις μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος που περιβάλλει την εκσκαφή, αλλά και του κοιτάσματος, είναι απαραίτητος προκειμένου να επιλυθούν οι καταστατικές εξισώσεις που συνδέουν τα εντατικά μεγέθη, δηλαδή τις τάσεις, με τα παραμορφωσιακά μεγέθη, τις παραμορφώσεις και τις μετατοπίσεις. Σκοπός είναι ο προσδιορισμός του πεδίου μετατοπίσεων όπως αυτό διαμορφώνεται στην περιοχή γύρω από την εκσκαφή με λύση του κριτηρίου αστοχίας Mohr – Coulomb. Αρχικά, πρέπει να υπολογιστούν όλες οι παράμετροι του κριτηρίου από την εξίσωση [6.8]:

$$|\tau_f| = c + \sigma_f \tan \varphi_p$$

Για τον **ασβεστόλιθο** θεωρούνται $\text{RMR (GSI)} = 40$, αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου πετρώματος $\text{UCS}_i = 30 \text{ MPa}$ και η συνοχή του άρρηκτου πετρώματος $c_i = 10 \text{ MPa}$. Από την καμπύλη $D = f(\text{RMR})$, την οποία μελετάνε οι G. Exadaktylos και M. Stavropoulou (2008), υπολογίζεται ότι το $(1 - D) = 0.1$, όπου D ο

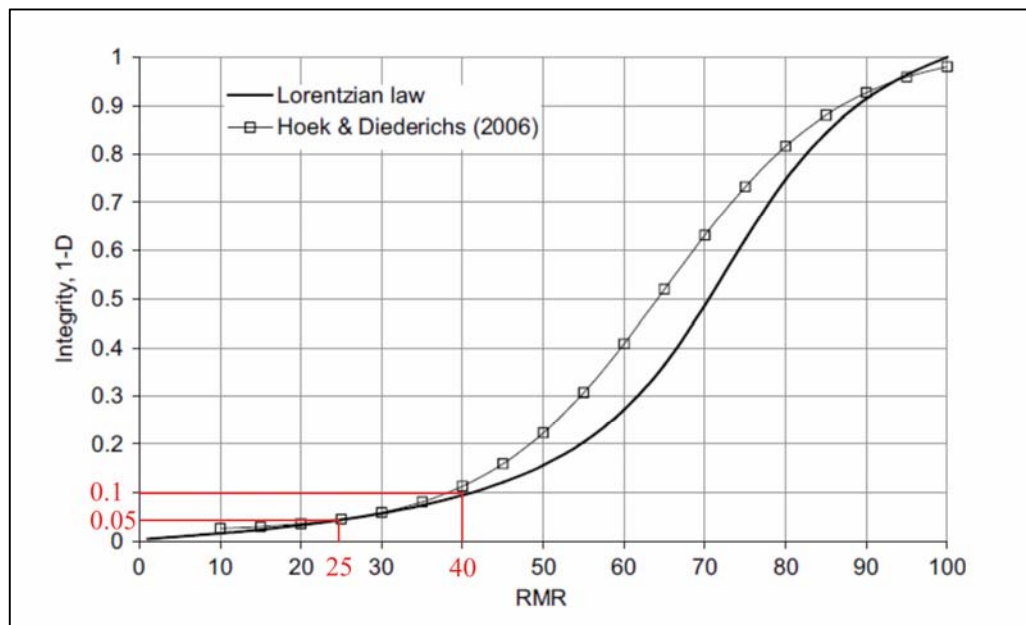
συντελεστής «καταστροφής» του πετρώματος (damage) (Σχήμα 6.4). Η συνοχή του πετρώματος υπολογίζεται από την εξίσωση [6.1]:

$$c = c_i(1 - D) \Rightarrow c = 1 \text{ MPa} \quad [6.1]$$

Και η γωνία εσωτερικής τριβής φ_p υπολογίζεται από την εξίσωση [6.2]:

$$UCS_i = \frac{2c_i \cos \varphi_p}{1 - \sin \varphi_p} \Rightarrow \varphi_p = 30^\circ \quad [6.2]$$

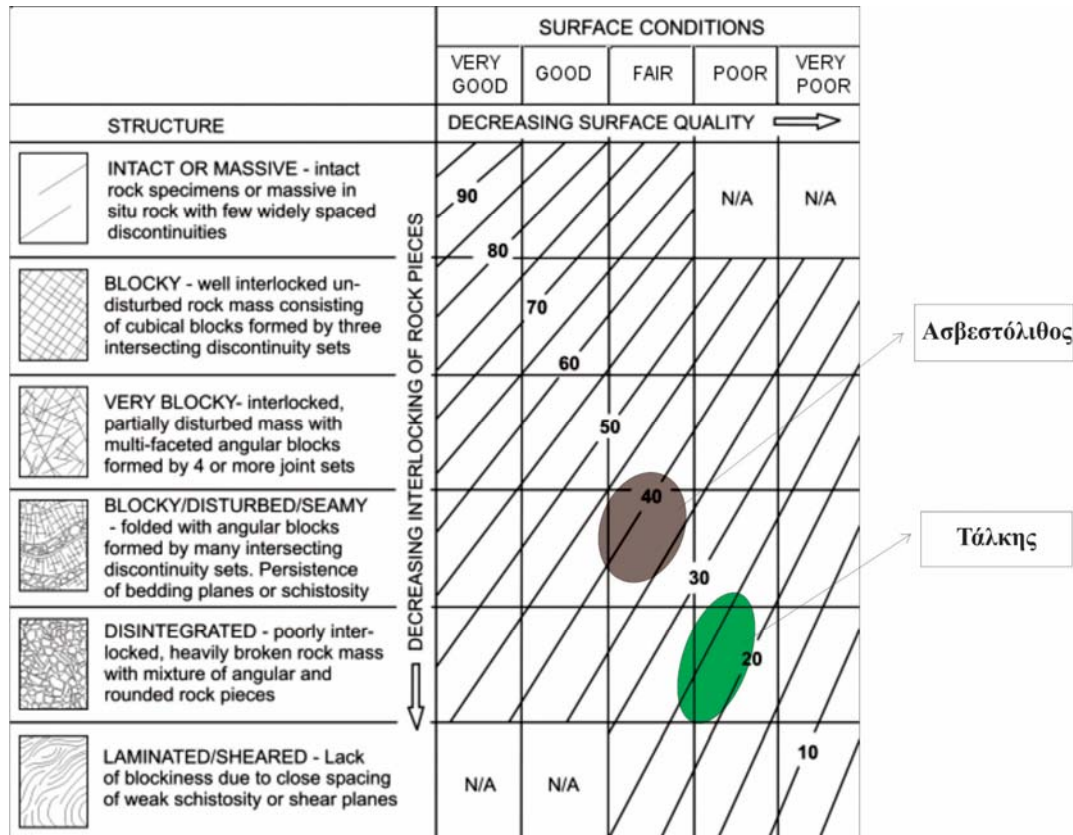
Αντίστοιχα, για τον **τάλκη** θεωρούνται $RMR (GSI) = 25$, αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου πετρώματος $UCS_i = 15 \text{ MPa}$ και η συνοχή του άρρηκτου πετρώματος $c_i = 5.5 \text{ MPa}$. Από την καμπύλη $D=f(RMR)$ υπολογίζεται ότι το $(1 - D) = 0.05$ (Σχήμα 6.4). Η συνοχή του πετρώματος υπολογίζεται από την εξίσωση [6.1], όπου τελικά $c = 0,29 \text{ MPa}$ και από την εξίσωση [6.2] η γωνία εσωτερικής τριβής του τάλκη είναι $\varphi_p = 20^\circ$.



Σχήμα 6.4: Γραφική παράσταση της ακεραιότητας της βραχόμαζας (1-D) συναρτήσει του RMR βασισμένη στο νόμο του Lorentz.

Οι τιμές του RMR φαίνονται στο Σχήμα 6.5 με καφέ χρώμα για τον ασβεστόλιθο και με πράσινο χρώμα για τον τάλκη. Η βραχόμαζα του ασβεστολίθου χαρακτηρίζε-

ται ως μέτρια συνδεδεμένη (FAIR – BLOCKY) ενώ του τάλκη ως πολύ αποσαθρωμένη (POOR – DISINTEGRATED)



Σχήμα 6.5: RMR για ασβεστόλιθο και τάλκη.

Έτσι στο πρόγραμμα Phase² οι μηχανικές ιδιότητες που εισήχθησαν για τον ασβεστόλιθο και τον τάλκη είναι εμφανής στα Σχέδια 6.6 και 6.7, αντίστοιχα.

The screenshot shows the 'Define Material Properties' dialog box for the material 'asvestolithos'. The 'Name' field is set to 'asvestolithos' and 'Initial Element Loading' is 'Field Stress & Body Force'. The 'Material Colour' is a light blue. The 'Unit Weight (MN/m3)' is 0.027. Under 'Elastic Properties', 'Material Type' is 'Isotropic', 'Young's Modulus (MPa)' is 20000, and 'Poisson's Ratio' is 0.3. The orthotropic properties are E1=2000, E2=2000, E3=2000, ν12=0.2, ν13=0.2, ν23=0.2. Under 'Strength Parameters', 'Failure Criterion' is 'Mohr Coulomb', 'Material Type' is 'Plastic', 'Tensile Strength (MPa)' is 0, 'Dilation Angle (deg)' is 10, 'Fric. Angle (peak) (deg)' is 30, 'Fric. Angle (resid) (deg)' is 30, 'Cohesion (peak) (MPa)' is 1, and 'Cohesion (resid) (MPa)' is 0.5. The 'Stage Material Properties' section has 'Apply Factors' checked and a 'Define Factors...' button. At the bottom are 'Copy To...', 'OK', and 'Cancel' buttons.

Σχήμα 6.6: Μηχανικές ιδιότητες ασβεστόλιθου.

The screenshot shows the 'Define Material Properties' dialog box for the material 'talkis'. The 'Name' field is set to 'talkis' and 'Initial Element Loading' is 'Field Stress & Body Force'. The 'Material Colour' is a light green. The 'Unit Weight (MN/m3)' is 0.027. Under 'Elastic Properties', 'Material Type' is 'Isotropic', 'Young's Modulus (MPa)' is 5000, and 'Poisson's Ratio' is 0.3. The orthotropic properties are E1=2000, E2=2000, E3=2000, ν12=0.2, ν13=0.2, ν23=0.2. Under 'Strength Parameters', 'Failure Criterion' is 'Mohr Coulomb', 'Material Type' is 'Plastic', 'Tensile Strength (MPa)' is 0.025, 'Dilation Angle (deg)' is 5, 'Fric. Angle (peak) (deg)' is 20, 'Fric. Angle (resid) (deg)' is 20, 'Cohesion (peak) (MPa)' is 0.29, and 'Cohesion (resid) (MPa)' is 0.1. The 'Stage Material Properties' section has 'Apply Factors' checked and a 'Define Factors...' button. At the bottom are 'Copy To...', 'OK', and 'Cancel' buttons.

Σχήμα 6.7: Μηχανικές ιδιότητες τάλκη.

6.8 Υπολογισμός επιφανειακών τάσεων με βάση τον συντελεστή εκτόνωσης

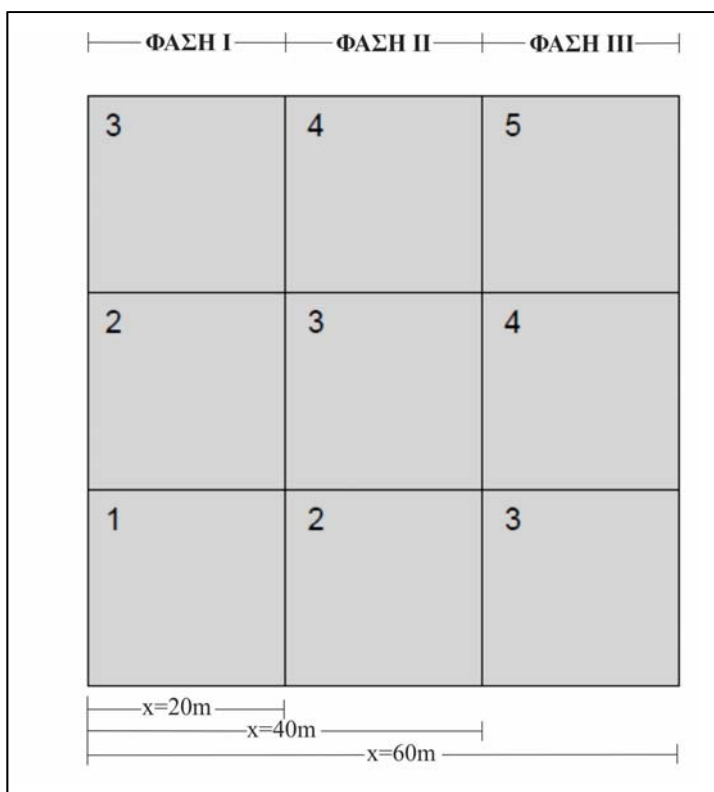
Κατά την εκσκαφή και καθώς αφαιρούνται τμήματα του κοιτάσματος, με βάση τη μέθοδο εκμετάλλευσης που αναπτύχθηκε παραπάνω, είναι απαραίτητος ο καθορισμός των επιφανειακών τάσεων που ασκούνται στο πέτρωμα. Ο καθορισμός γίνεται για την οροφή και το δάπεδο και για τα πλαϊνά τοιχώματα σε κάθε stage, συναρτήσει του συντελεστή εκτόνωσης λ .

Αρχικά, υπολογίζεται η υδραυλική ακτίνα για κάθε οριζόντια προχώρηση της εκσκαφής ανά 20m από την εξίσωση [6.3]:

$$R_h = \frac{4E}{P} = \frac{4(ab)}{2(a+b)} = \frac{4(20 \cdot 10)}{2(20+10)} = 13.3 \text{ m} \quad [6.3]$$

όπου E και P το εμβαδόν και η περίμετρος αντίστοιχα και στη συνέχεια υπολογίζεται ο συντελεστής εκτόνωσης λ για κάθε φάση (Σχήμα 6.7) από την εξίσωση [5.10] του κεφαλαίου 5. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 6.1.

$$\lambda = \frac{u_r}{u_r^M} = \frac{1}{\left[1 + e^{-\left(\frac{x}{R_h}\right)/1.1}\right]^{1.7}} \quad [5.10]$$



Σχήμα 6.8: Φάσεις εκμετάλλευσης κατά την παράταξη.

	$\frac{x}{R_h}$	λ
ΦΑΣΗ Ι	1.5	0.7
ΦΑΣΗ ΙΙ	3	0.9
ΦΑΣΗ ΙΙΙ	4.5	1

Πίνακας 6.1: Μεταβλητές x/R_h και λ για κάθε φάση.

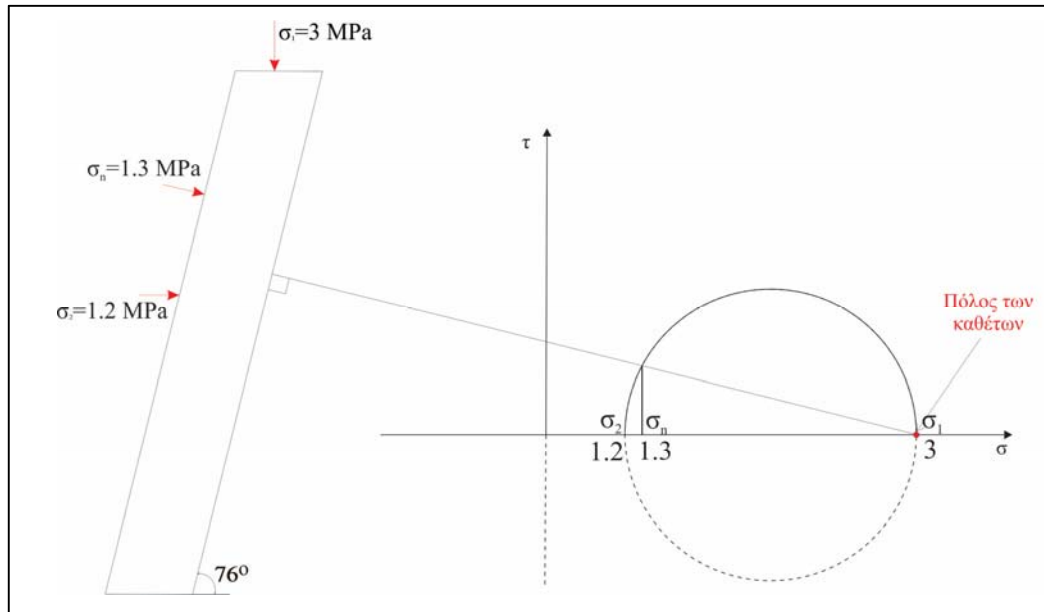
Για τον καθορισμό των τάσεων που ασκούνται στις παρειές (πλαϊνά κεκλιμένα τοιχώματα) της κάθε φάσης θα χρησιμοποιούμε τον κύκλο του Mohr και την έννοια του «πόλου των καθέτων», όπως αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 3.7. Από το Σχήμα 6.7 καθορίζεται η ορθή τάση $\sigma_n = 1.3 \text{ MPa}$ και έτσι η εξίσωση [5.11] γίνεται:

$$p_i = (1 - \lambda) \sigma_n = (1 - \lambda) 1.3 \quad [6.4]$$

Για τον καθορισμό των τάσεων που ασκούνται στην οροφή και στο δάπεδο κάθε φάσης για την ορθή τάση σ_n χρησιμοποιείται η κατακόρυφη τάση του πεδίου, δηλαδή $\sigma_n = \sigma_1 = 3 \text{ MPa}$ και η εξίσωση [5.11] γίνεται:

$$p_i = (1 - \lambda) \sigma_n = (1 - \lambda) 3 \quad [6.5]$$

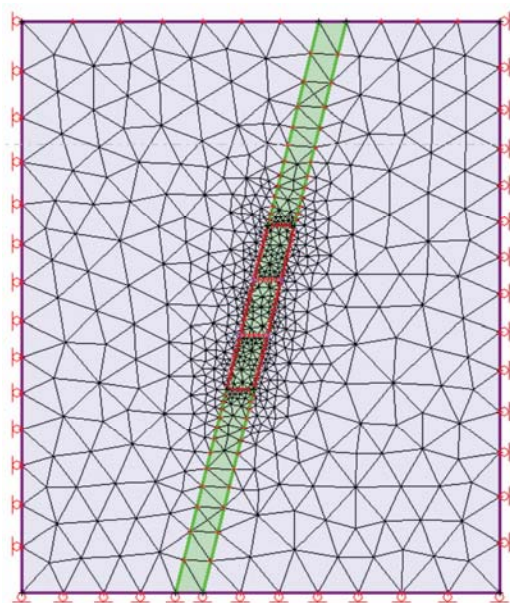
και υπολογίζεται η επιφανειακή τάση σε κάθε φάση της εκμετάλλευσης, με τα αποτελέσματα να φαίνονται στον Πίνακα 6.2.

Σχήμα 6.9: Υπολογισμός σ_n από τον Πόλο των καθέτων.

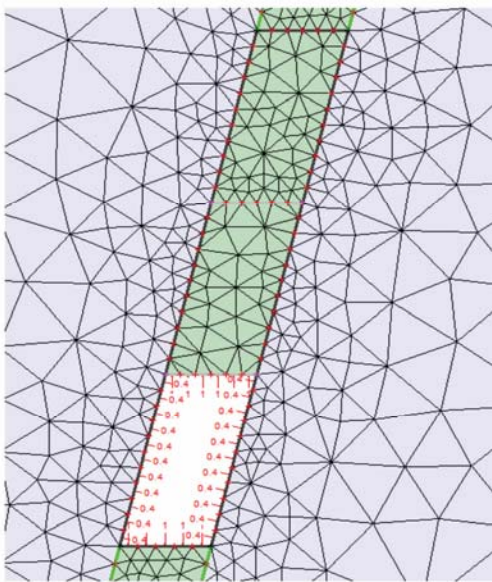
	p_i	
	ΟΡΟΦΗ-ΔΑΠΕΔΟ	ΠΑΡΕΙΕΣ
ΦΑΣΗ Ι	1.00	0.40
ΦΑΣΗ ΙΙ	0.32	0.13
ΦΑΣΗ ΙΙΙ	0.00	0.00

Πίνακας 6.2: Επιφανειακές τάσεις για κάθε φάση.

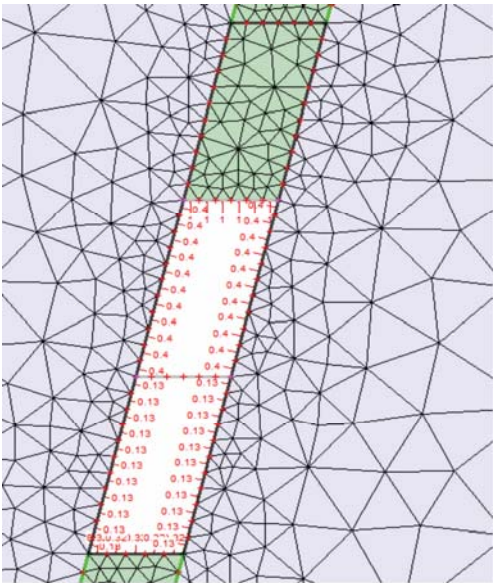
Στο Σχήμα 6.10 φαίνονται τα 6 διαδοχικά στάδια εκμετάλλευσης όπως σχεδιάστηκαν στο πρόγραμμα Phase και οι ορθές τάσεις που ασκούνται σε κάθε στοιχείο της διακριτοποίησης.



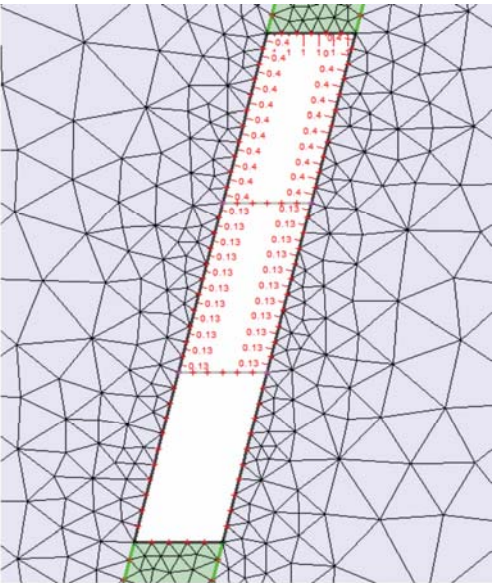
Stage 1



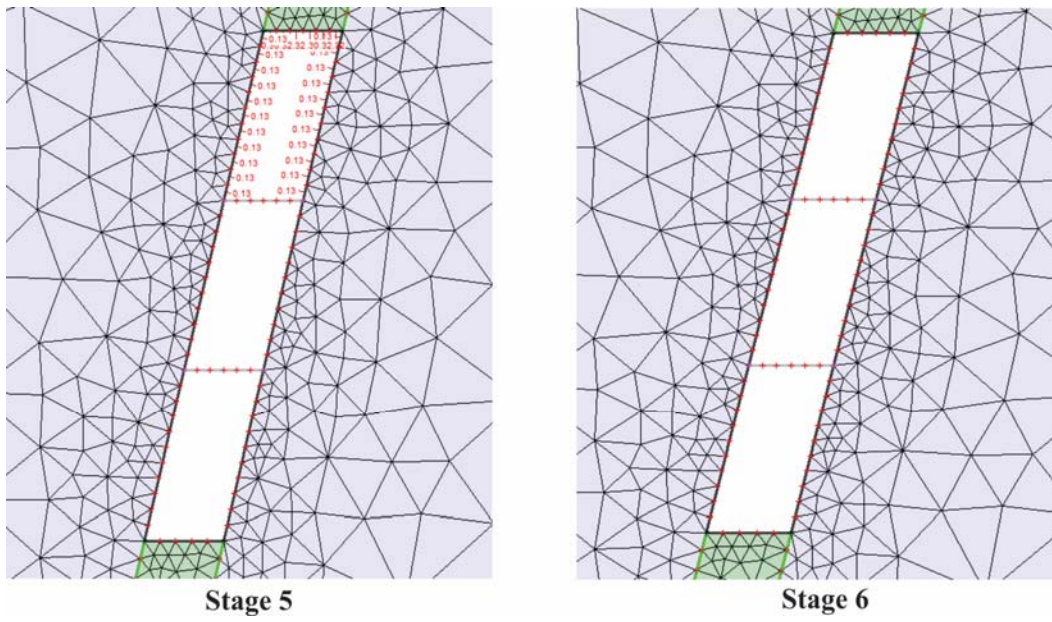
Stage 2



Stage 3



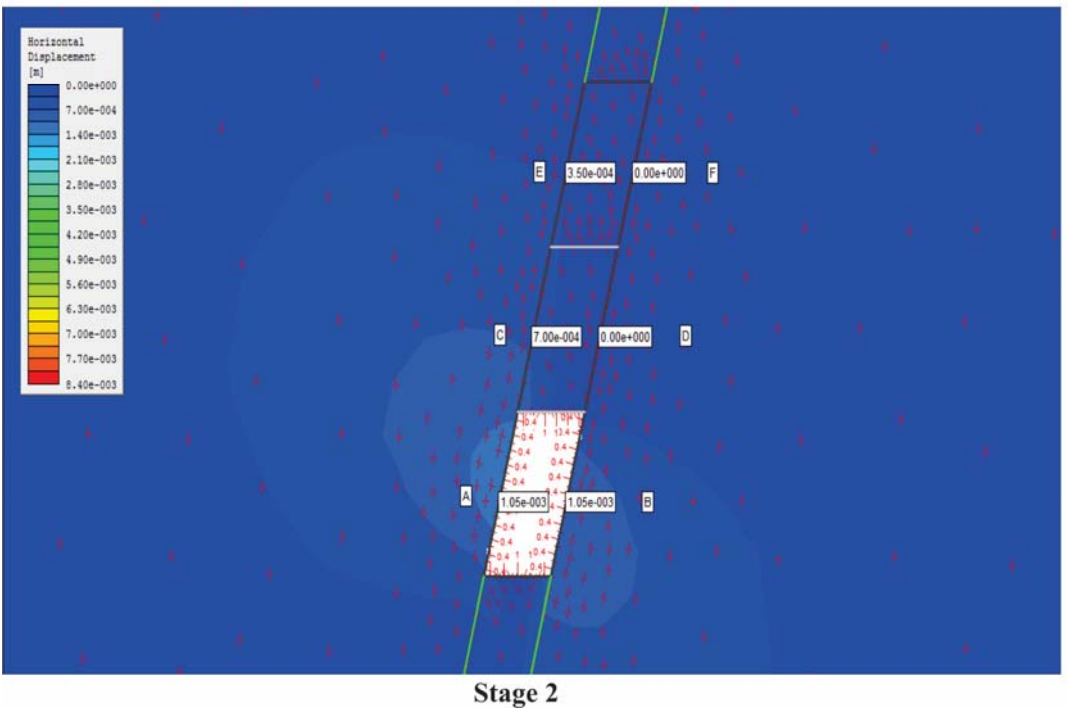
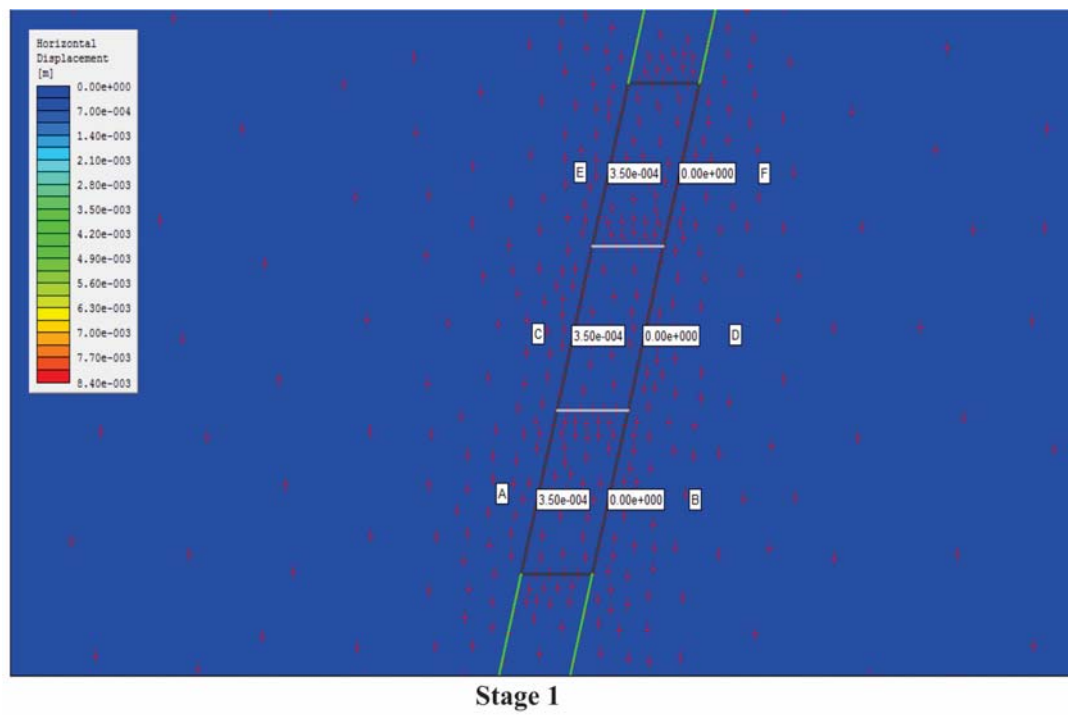
Stage 4

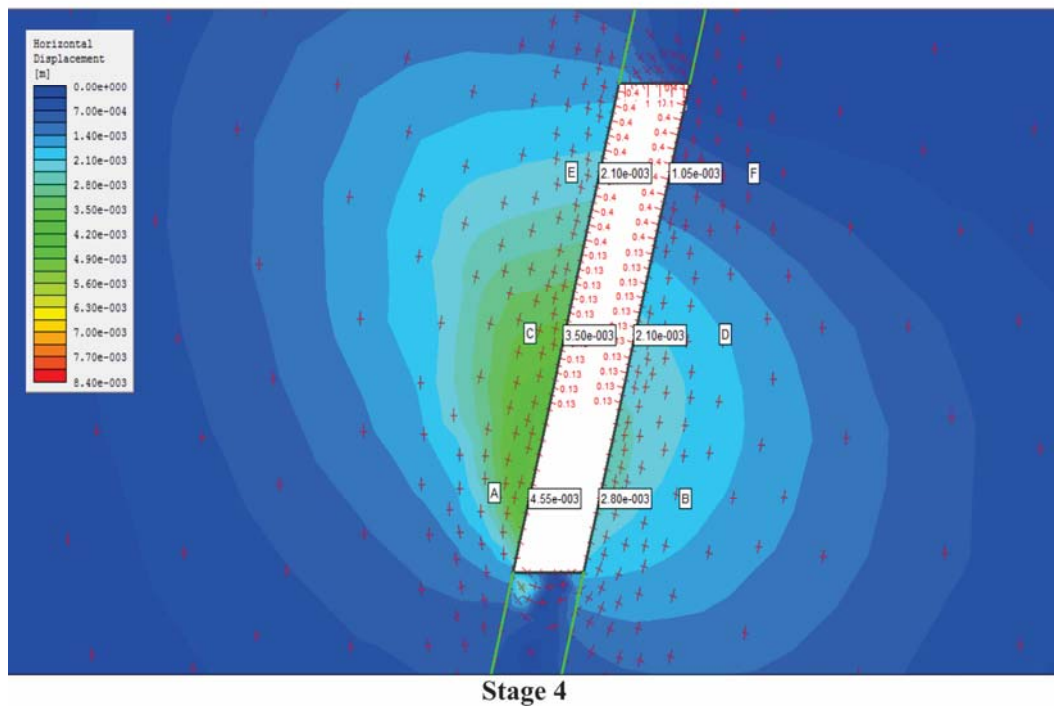
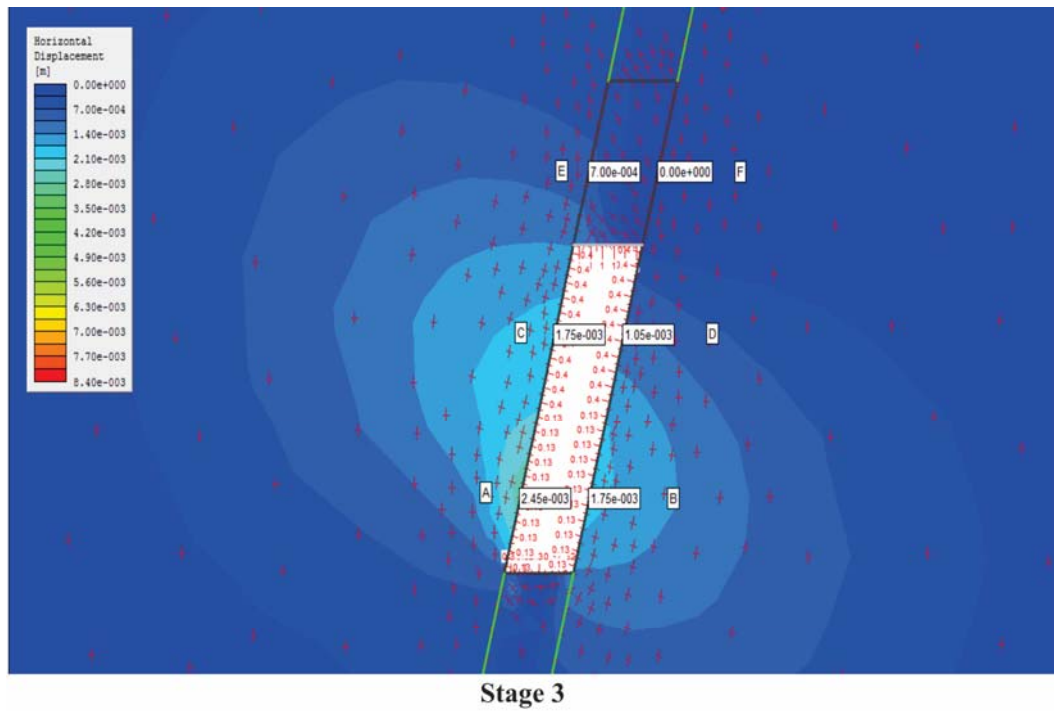


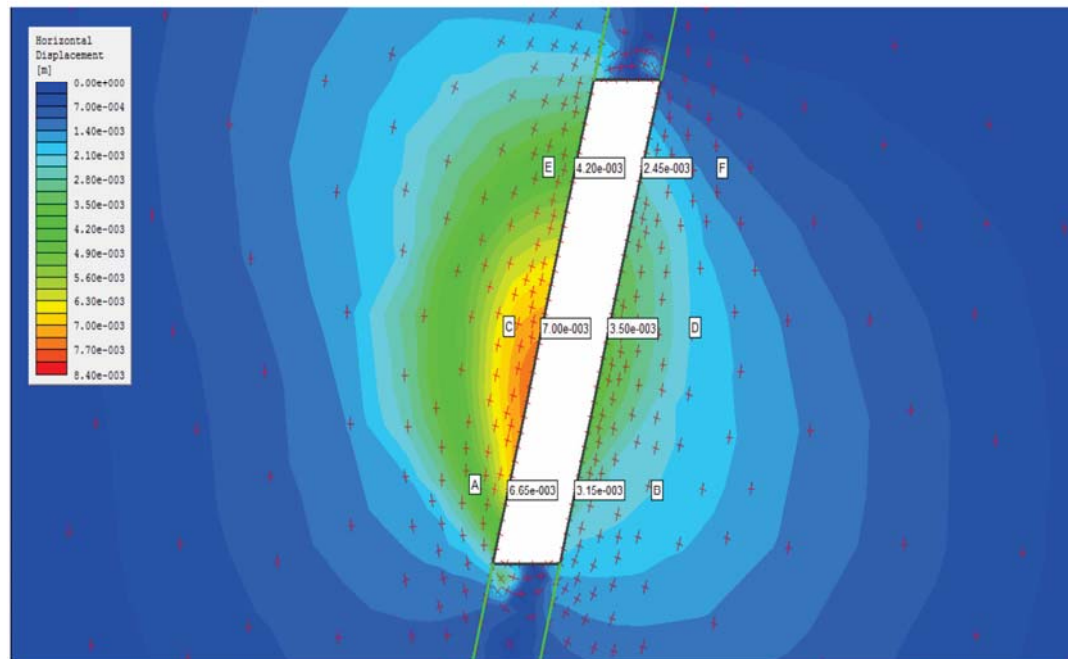
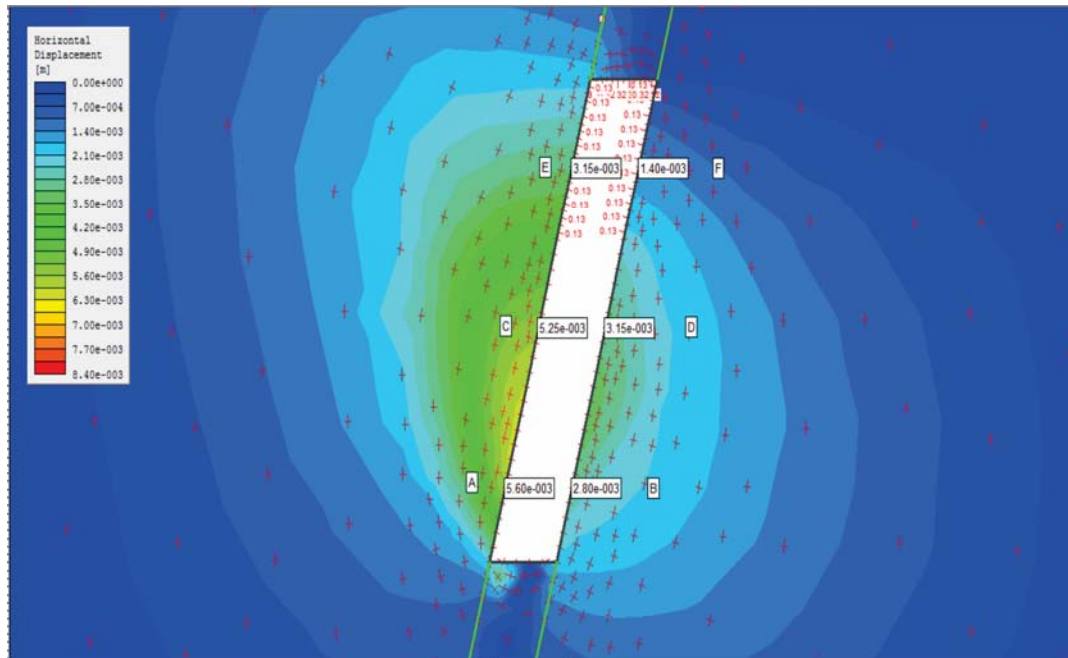
Σχήμα 6.10: Μοντέλο ανά στάδιο όπως σχεδιάστηκε στο Phase.

6.9 Αποτελέσματα

Αφού εισήχθησαν στο πρόγραμμα τα απαραίτητα δεδομένα εξήχθησαν ποσοτικά αποτελέσματα για συγκεκριμένα σημεία στα όρια της εκσκαφής. Τα σημεία A, C, E βρίσκονται στο Hanging Wall της εκμετάλλευσης και τα σημεία B, D, F στο Foot Wall. Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν από την επεξεργασία των δεδομένων και εν συνεχεία εισήχθησαν στο πρόγραμμα φαίνονται στο Σχήμα 6.11 και στο Παράρτημα.





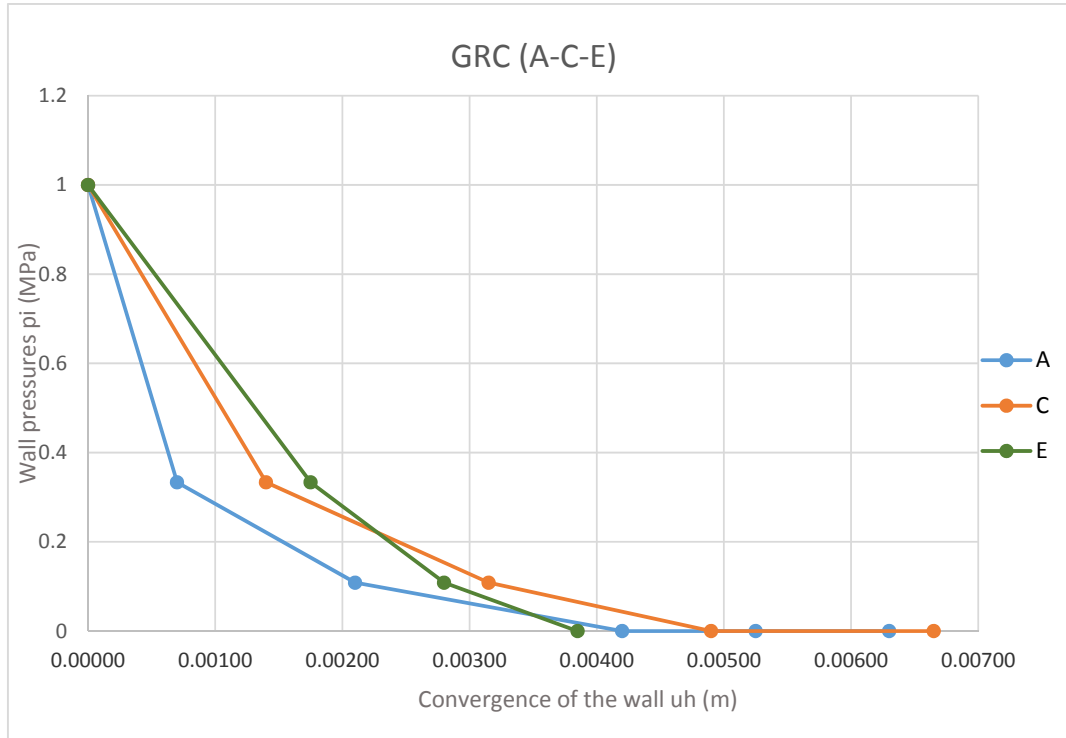


Stage 6

Σχήμα 6.11: Οριζόντιες μετατοπίσεις.

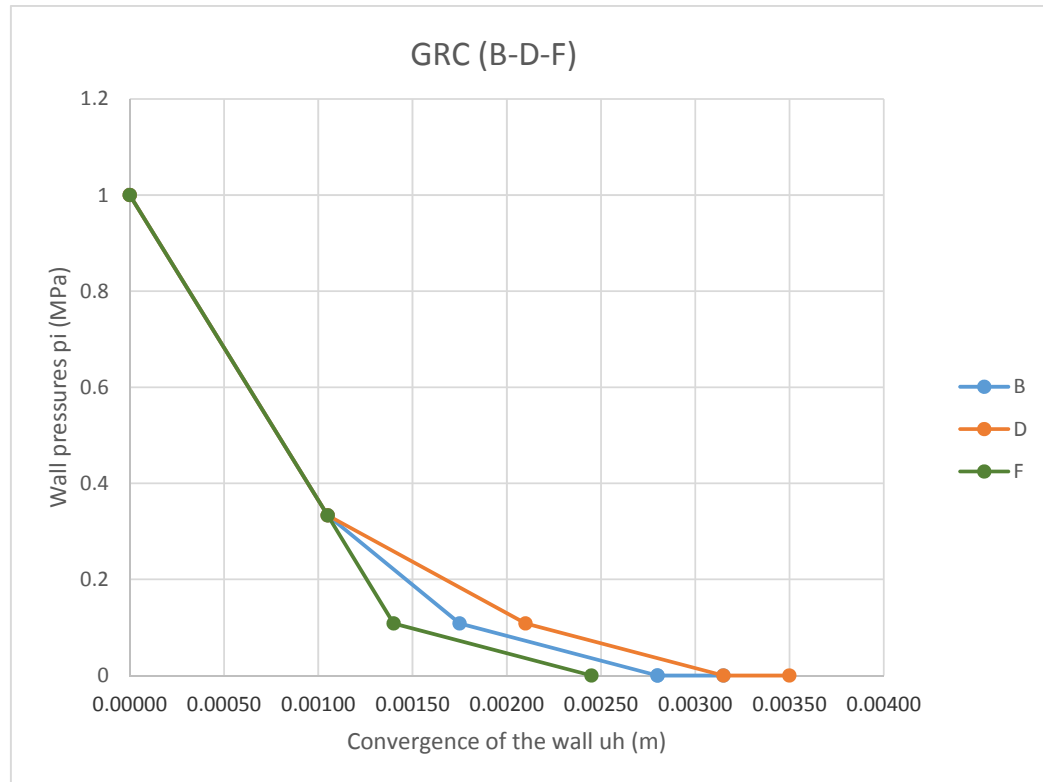
Ελήφθησαν τα ποσοτικά αποτελέσματα της πίεσης με την οριζόντια μετατόπιση στα σημεία A, C, E στην οροφή (ή ταβάνι) του κοιτάσματος καθώς είναι σημεία πιο επιρρε-

πή σε μετατοπίσεις και αστοχίες και κατασκευάστηκαν οι καμπύλες αντίδρασης της βραχώμαζας GRC όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.12.



Σχήμα 6.12: Καμπύλη GRC για τα σημεία A, C, E.

Αντίστοιχα αποτελέσματα ελήφθησαν και για τα σημεία B, D, F και κατασκευάστηκαν οι καμπύλες αντίδρασης της βραχόμαζας GRC όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.13.



Σχήμα 6.13: Καμπύλη GRC για τα σημεία B, D, F.

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα – Προτάσεις

7.1 Συμπεράσματα

Από τις καμπύλες των Σχημάτων 6.12, 6.13 γίνεται αντιληπτό ότι όσο μειώνεται η εσωτερική πίεση p_i τόσο αυξάνεται η σύγκλιση των παρυφών της εκμετάλλευσης u_h κατά τον οριζόντιο άξονα μέχρι να φτάσει στο u_h^M για κάθε σημείο. Για το σημείο A είναι φανερό ότι μετατοπίζεται πιο γρήγορα από τα άλλα σημεία καθώς η μετατόπισή του ξεκινάει ήδη από το Stage 2. Επίσης, για την ίδια πίεση που ασκείται στα πλαϊνά τοιχώματα μεγαλύτερη σύγκλιση υφίσταται το σημείο C με οριζόντια μετατόπιση ίση με 0.07m. Άρα ο μεσαίος όροφος της εκμετάλλευσης και τα σημεία τα οποία βρίσκονται στο hanging wall είναι τα πιο επικίνδυνα της εκμετάλλευσης όσον αφορά την εμφάνιση αστοχιών. Το γεγονός αυτό γίνεται φανερό και από τη χρωματική κλίμακα στο Σχήμα 6.11 όπου φαίνεται το έντονο κόκκινο χρώμα και είναι λογικό καθώς το μεσαίο τμήμα του κεκλιμένου κοιτάσματος συγκεντρώνει μεγάλο ποσοστό τάσεων ενώ παράλληλα βρίσκεται μακριά από την οροφή και το δάπεδο όπου οι τάσεις μειώνονται λόγω του ανακουφιστικού τόξου. Αντίθετα, τα σημεία B, D, F δεν υφίστανται τόσο μεγάλες μετατοπίσεις καθώς η μέγιστη μετατόπιση η οποία ανήκει στο σημείο D είναι μόλις 0.03m.

Επίσης, όσον αφορά το κριτήριο αστοχίας Hoek – Brown, και ύστερα από προσπάθεια λύσης της παρούσας έρευνας με αυτό, παρατηρήθηκε ότι συσχετίζει παραμέτρους μη αντιληπτούς από φυσικής άποψης, όπως το m_i , γεγονός που καθιστά το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb καλύτερο και πιο επιστημονικά τεκμηριωμένο.

Επομένως, ο στόχος που ετέθη στην αρχή επετεύχθη. Υπενθυμίζεται ότι ο στόχος ήταν η πρόταση μεθοδολογίας για τον σχεδιασμό υπογείων εκμεταλλεύσεων με τη μέθοδο των διαδοχικών ορόφων με κενά μέτωπα λαμβάνοντας υπόψιν φυσικά τον ρυθμό παραγωγής με παράλληλη θεώρηση της ευστάθειας των υπογείων μετώπων. Οι μηχανικές ιδιότητες της βραχομάζας υποβαθμίζονται σύμφωνα με προηγούμενο μοντέλο βασι-

ζόμενο στην έννοια της φθοράς (damage). Η ευνοϊκή επίδραση των προχωρούντων μετώπων στην υποστήριξη των κενών μοντελοποιήθηκε με τη μέθοδο της σύγκλισης-απότωσης που εφαρμόζεται ήδη με επιτυχία στη διάνοιξη σηράγγων. Η μέθοδος αυτή προσαρμόστηκε κατάλληλα στην παρούσα εργασία, στην εκμετάλλευση κοιτασμάτων με την συγκεκριμένη μέθοδο. Λαμβάνοντας ως τελικό αποτέλεσμα τις καμπύλες αντίδρασης της βραχομάζας (Σχήμα 6.12,6.13) μπορεί κάποιος να σχεδιάσει τα μέτρα υποστήριξης σε επόμενο στάδιο.

7.2 Προτάσεις

Κύρια πρόταση είναι η μελλοντική μελέτη της υποστήριξης που είναι απαραίτητο να τοποθετηθεί στη συγκεκριμένη εκμετάλλευση καθώς είναι απαραίτητη εξαιτίας των μεγάλων συγκεντρώσεων τάσεις σε ορισμένες περιοχές.

Βιβλιογραφία

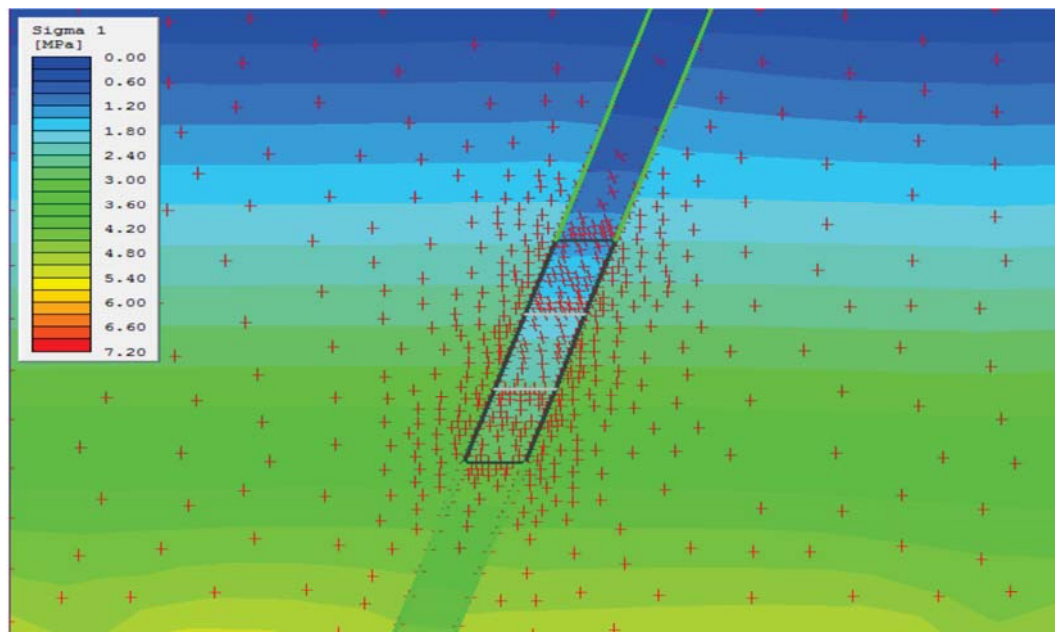
1. Αγιουτάντης Ζ. *Στοιχεία Γεωμηχανικής - Μηχανική πετρωμάτων*. Χανιά, 2002.
2. Βαρδουλάκης Ι. *Στοιχεία Μαθηματικής Θεωρίας Ιδεατής Πλαστικότητας*. Αθήνα, 2008.
3. Εξαδάκτυλος Γ. *Σχεδιασμός Συστημάτων Υπόγειων Έργων για την Εκμετάλλευση Μεταλλευτικών Κοιτασμάτων*. Χανιά, 2005.
4. Εξαδάκτυλος Γ., Σταυροπούλου Μ. *Κατασκευή και Μηχανική των σηράγγων και των Υπόγειων Έργων*. Χανιά, 2006.
5. Τσουτρέλης Χ. *Στοιχεία Μηχανικής των Πετρωμάτων, Μέρος Ι, Βασικά θεωρητικά στοιχεία και Πειραματικές μέθοδοι*. Αθήνα, 1985.
6. Carranza – Torres C., Fairhurst C., *Application of the Convergence – Confinement Method of Tunnel Design to Rock Masses that Satisfy the Hoek – Brown Failure Criterion*. 2002.
7. Exadaktylos G., Stavropoulou M. *A closed – form elastic solution for stresses and displacements around tunnels*. Athens, 2002.
8. Exadaktylos G., Stavropoulou M. *A specific upscaling theory of rock mass parameters exhibiting spatial variability: Analytical relations and computational scheme*. Athens, 2007.
9. Hoek E., Brown E. *Practical Estimates of Rock Mass Strength*. Great Britain, 1998.

Βιβλιογραφικές αναφορές

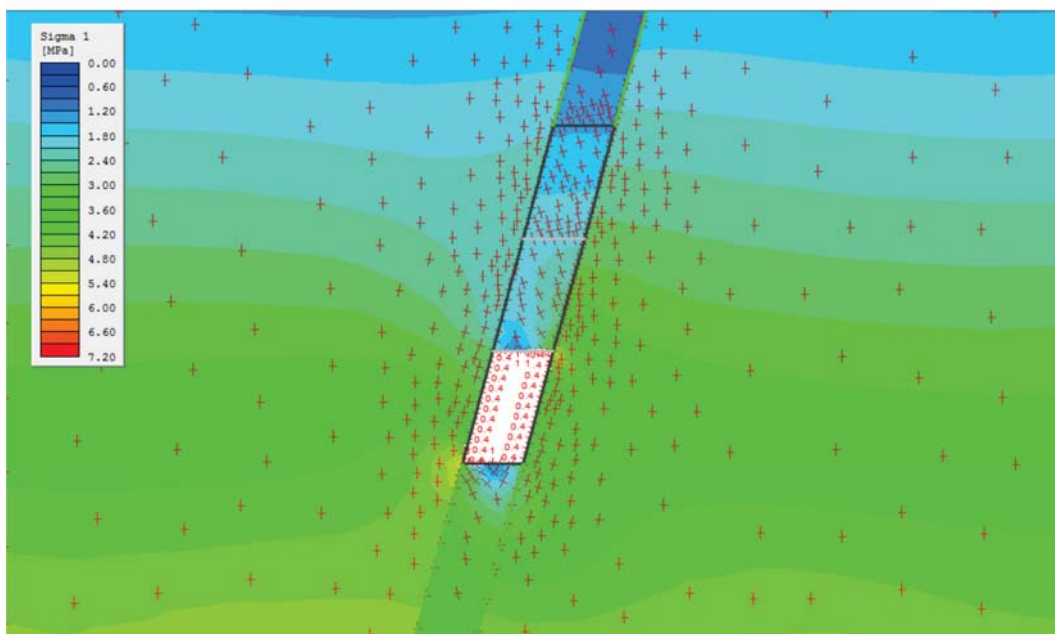
1. Panet, M. (1997). Understanding deformations in tunnels. In *Comprehensive rock engineering*, (ed. J.A. Hudson) 1, 663-690. Rergamon, Oxford.
2. Exadaktylos G., Stavropoulou M. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 45 (2008) 1102–1125

Παράρτημα

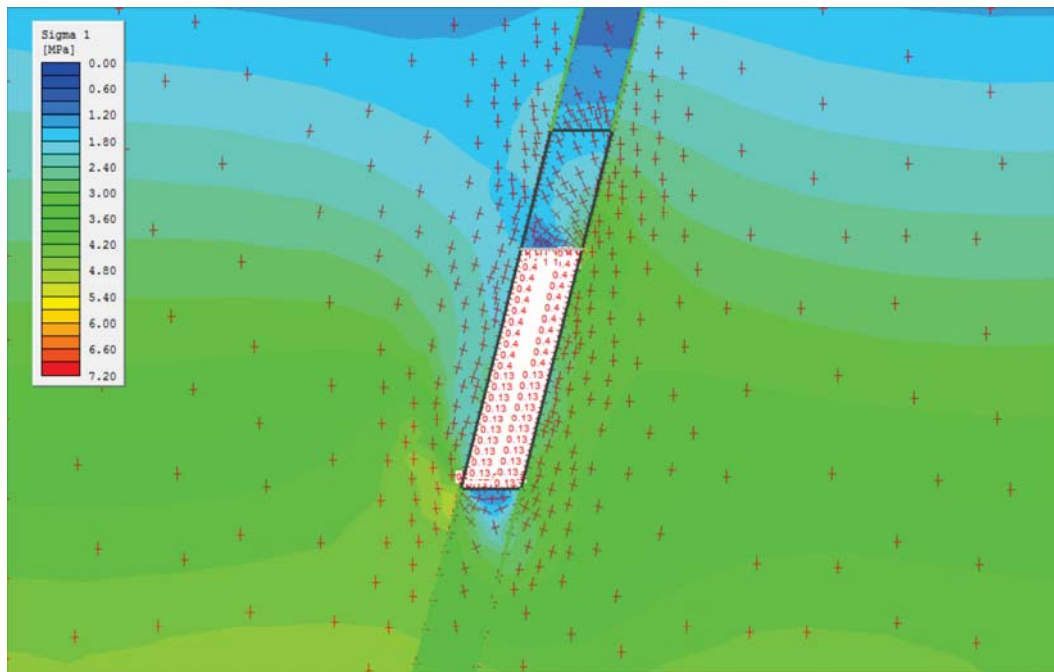
Π1. Αποτελέσματα από το πρόγραμμα Phase για την κύρια τάση σ_1 για κάθε stage της εκμετάλλευσης.



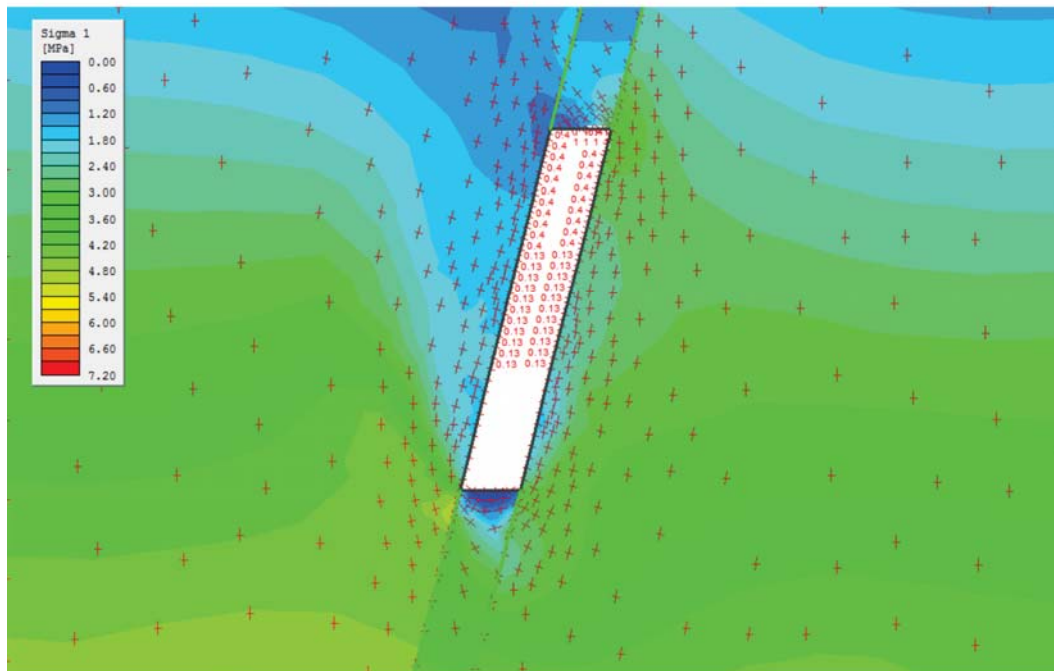
Stage 1



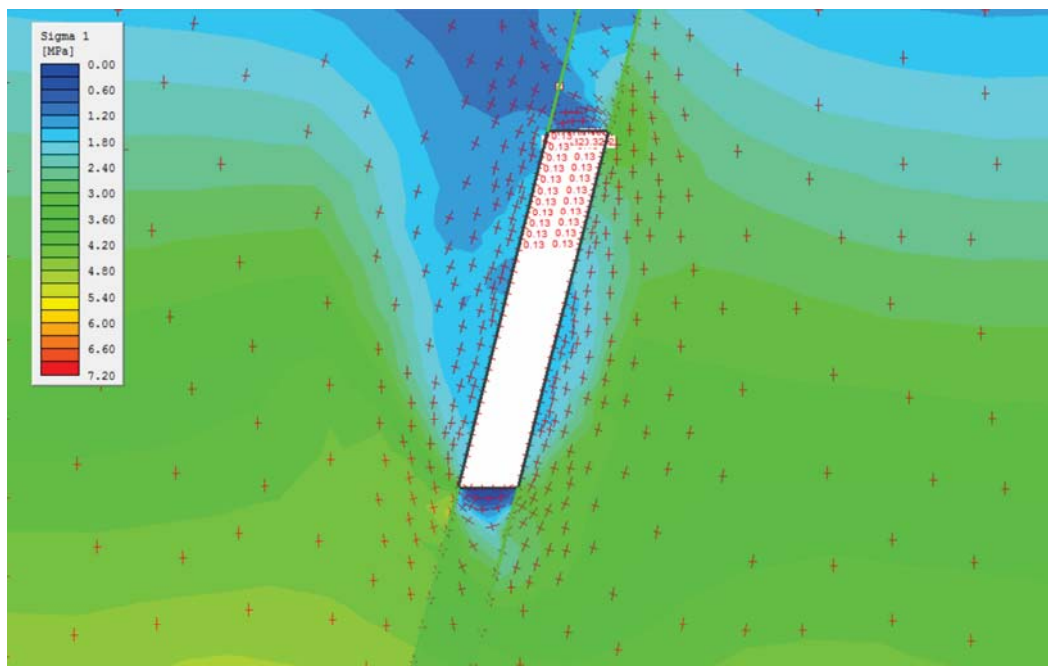
Stage 2



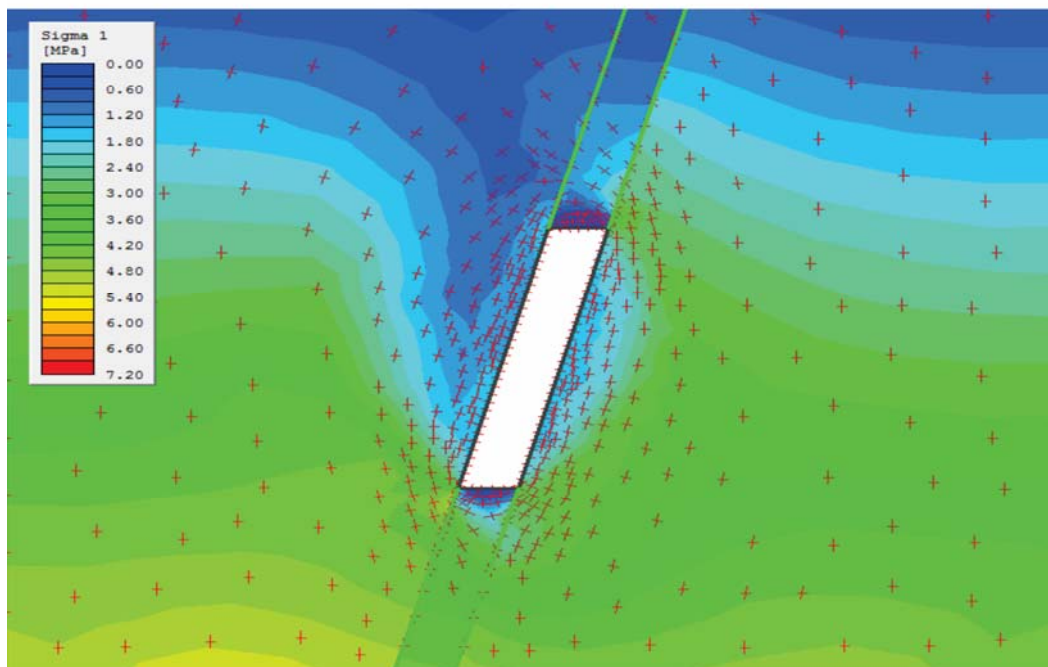
Stage 3



Stage 4

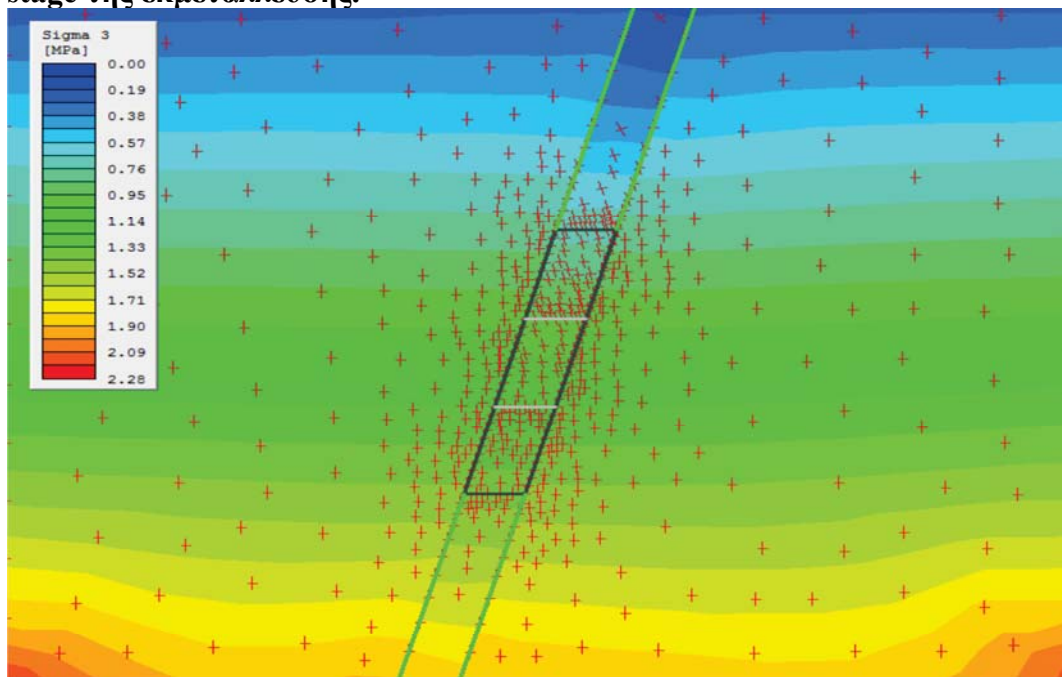


Stage 5

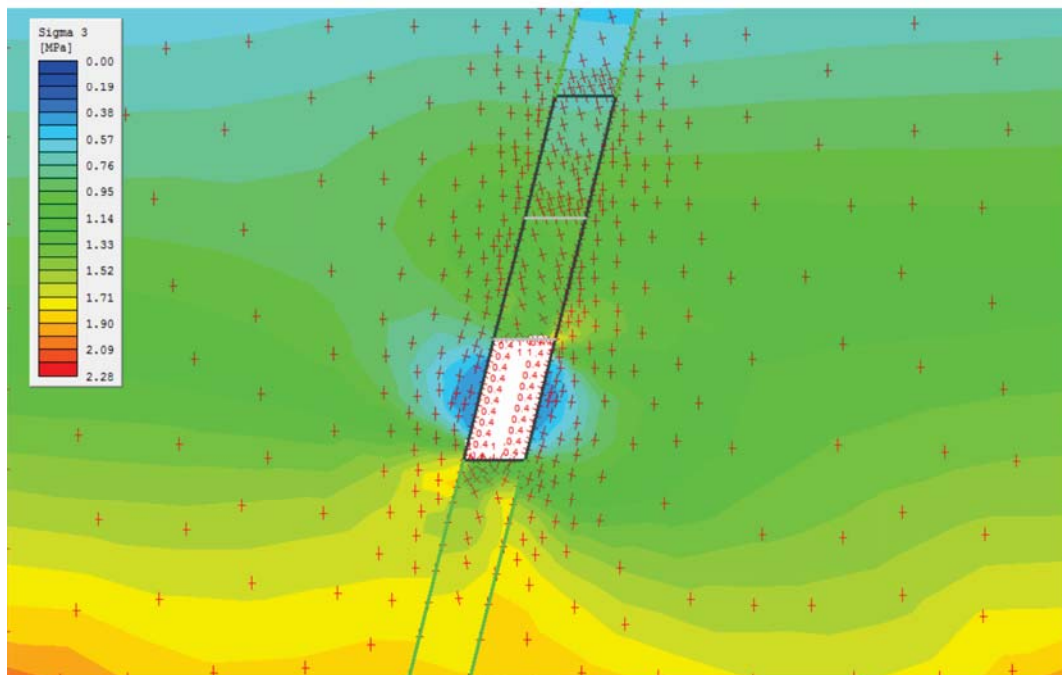


Stage 6

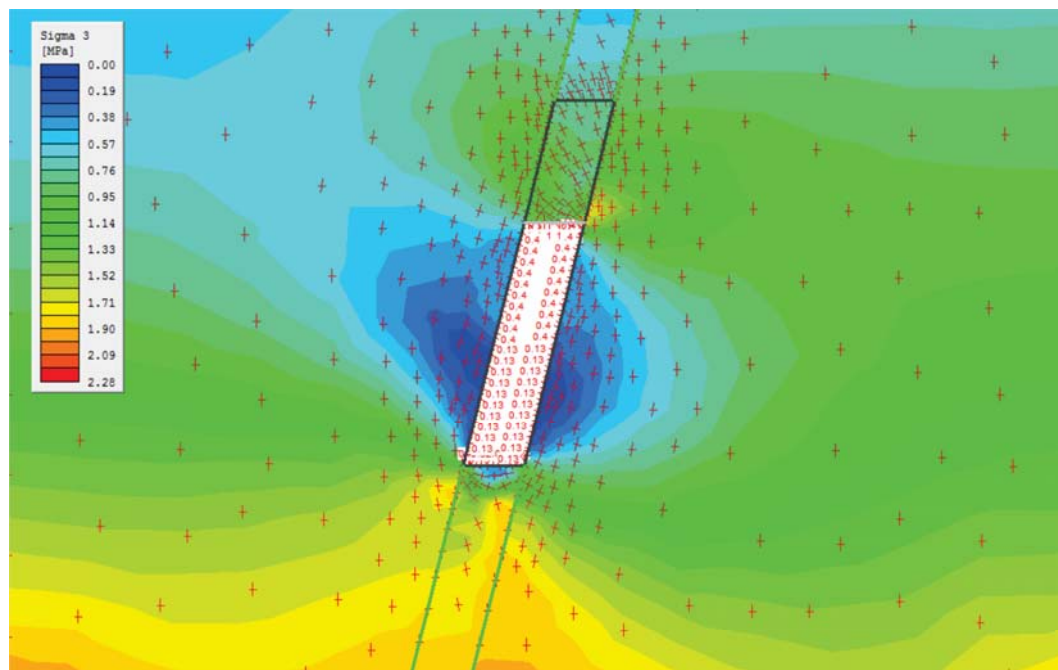
Π2. Αποτελέσματα από το πρόγραμμα Phase για την κύρια τάση σ_3 για κάθε stage της εκμετάλλευσης.



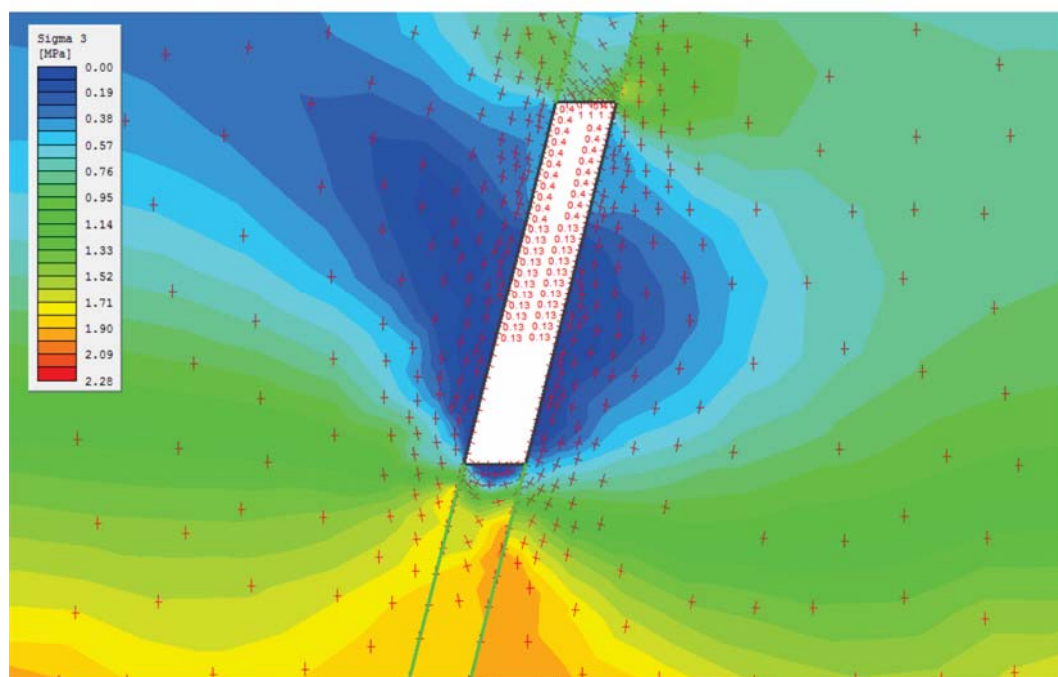
Stage 1



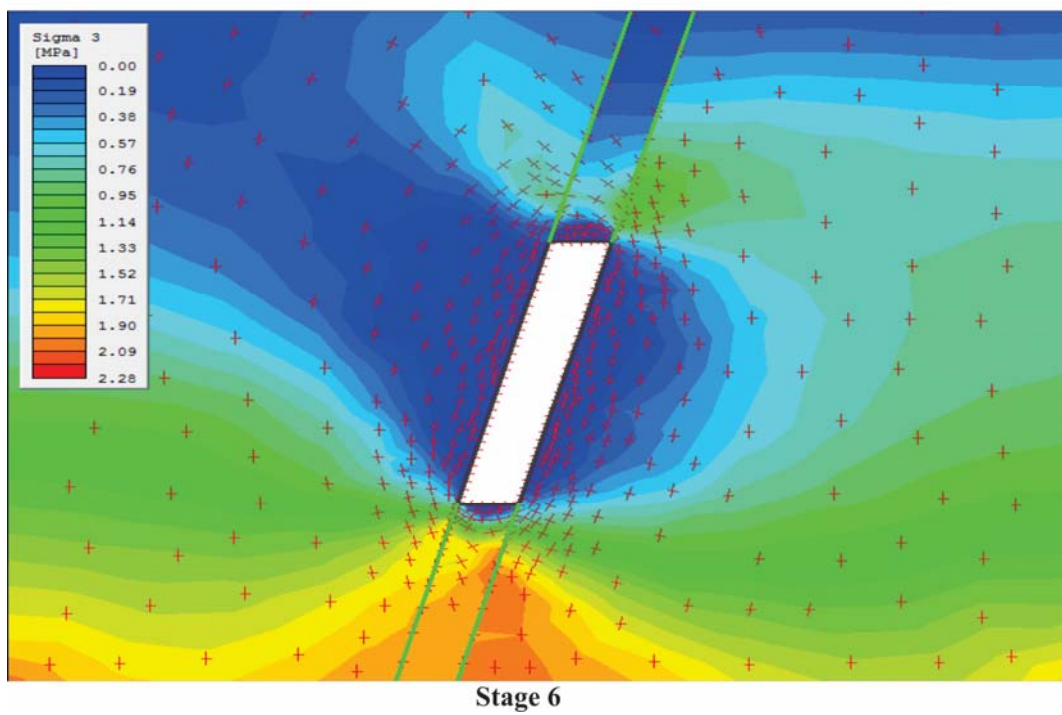
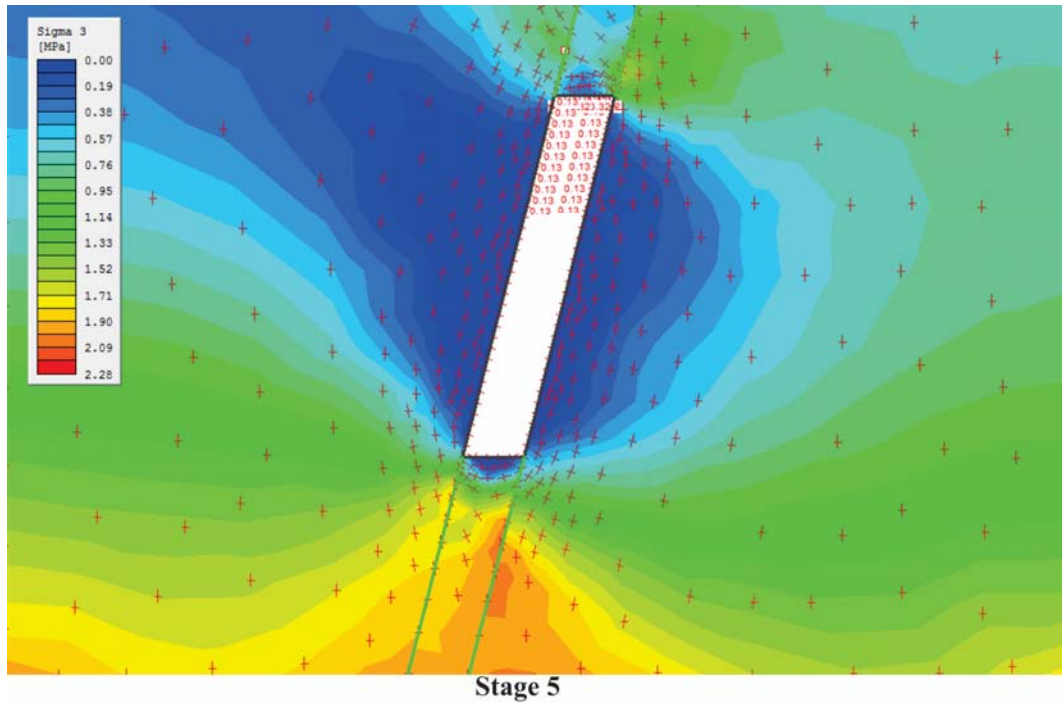
Stage 2



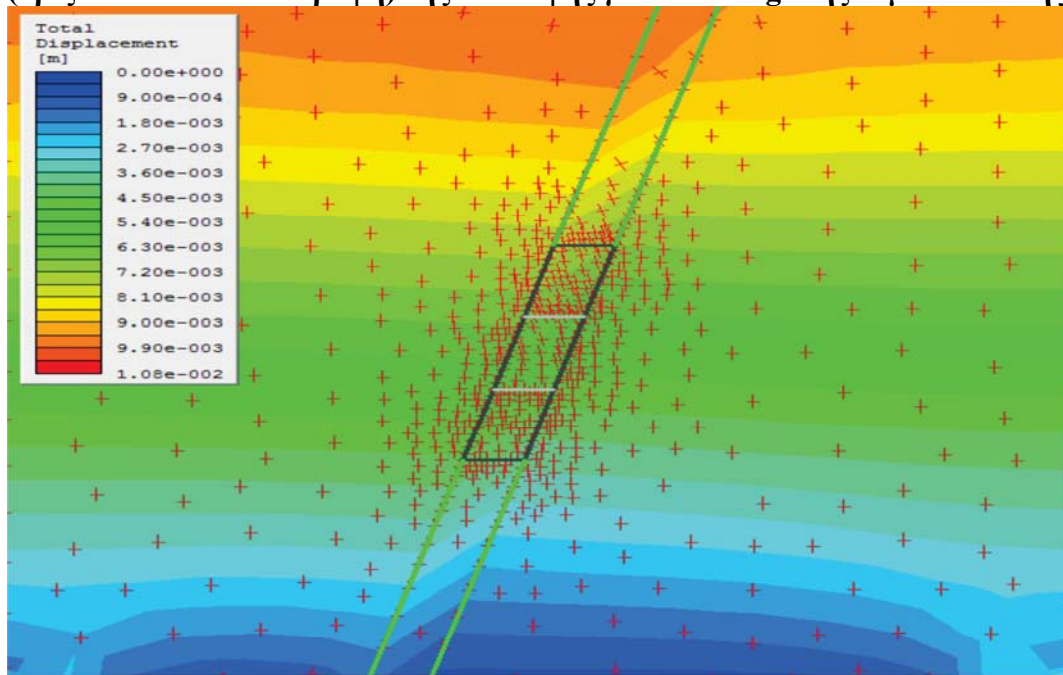
Stage 3



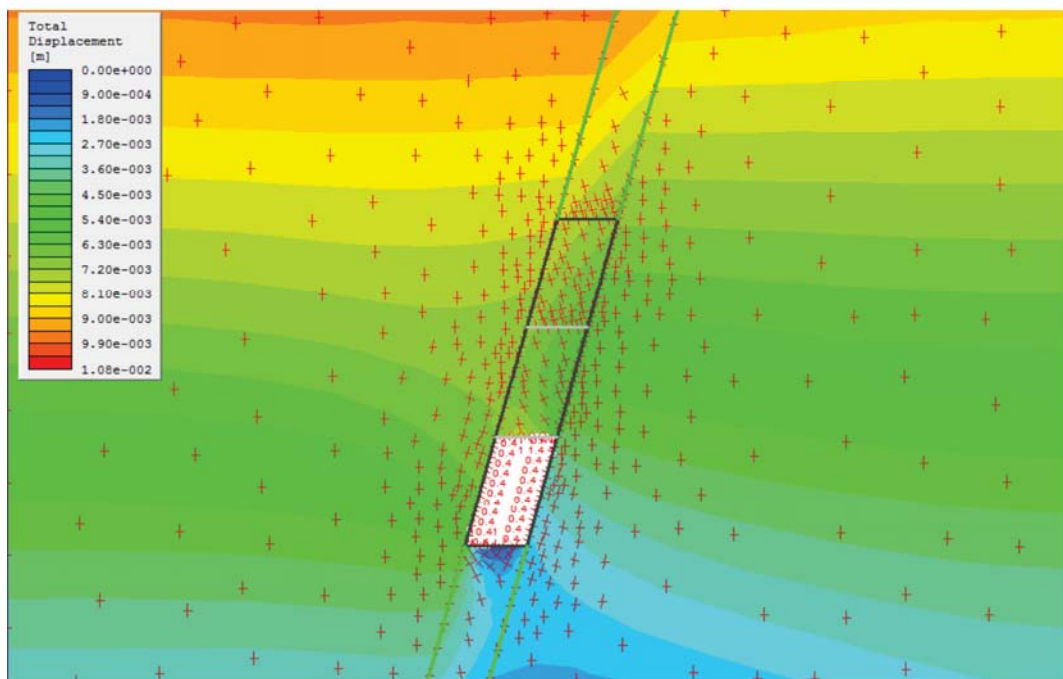
Stage 4



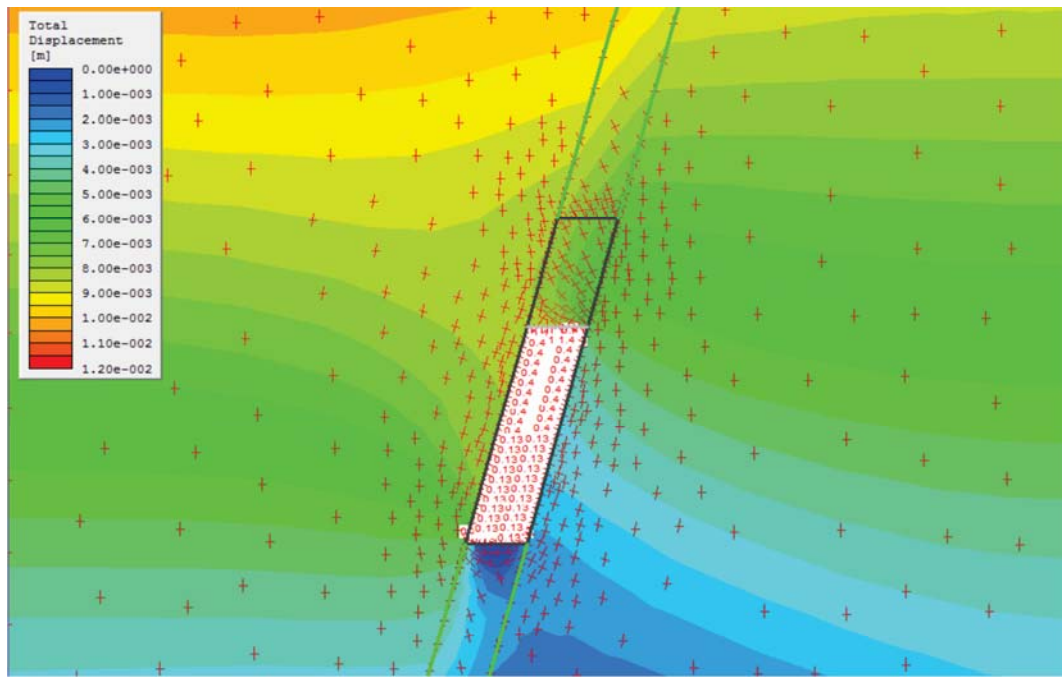
Π3. Αποτελέσματα από το πρόγραμμα Phase για τη συνολική μετατόπιση (οριζόντια και κατακόρυφη) της εκσκαφής για κάθε stage της εκμετάλλευσης.



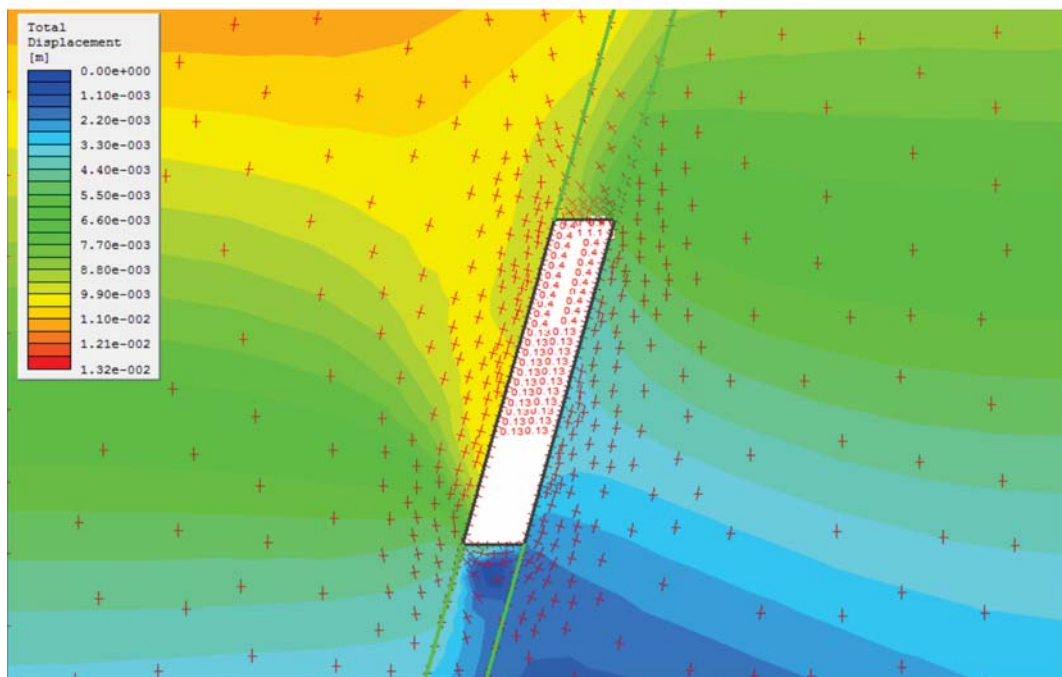
Stage 1



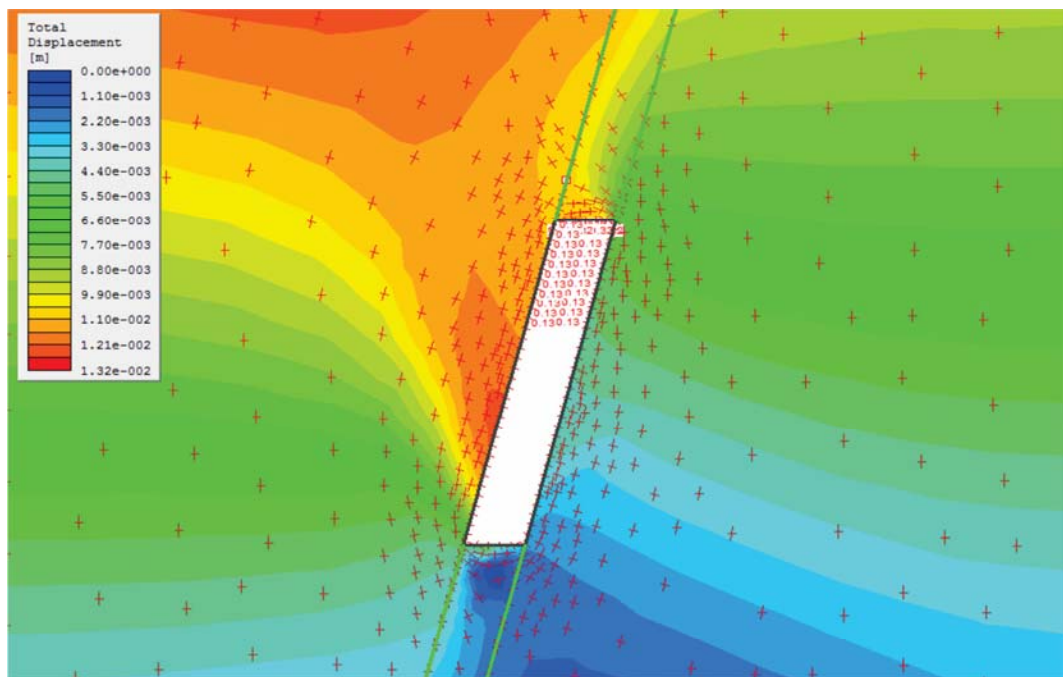
Stage 2



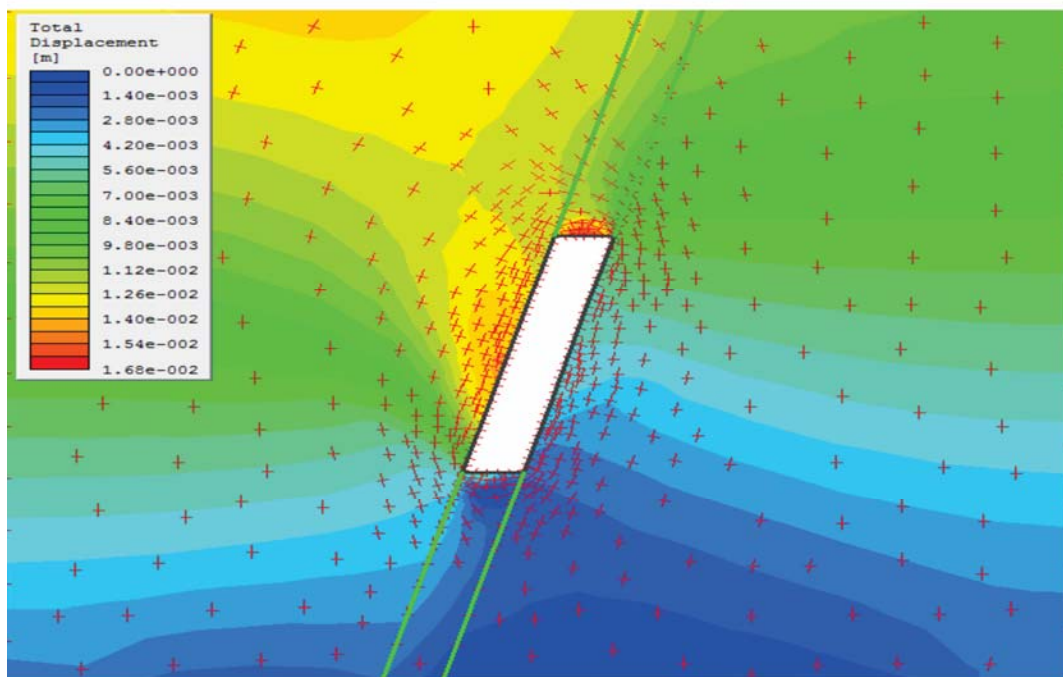
Stage 3



Stage 4



Stage 5



Stage 6



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
TECHNICAL UNIVERISTY OF CRETE