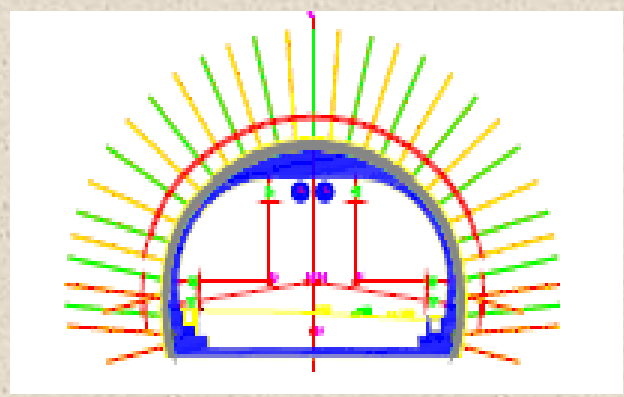
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

Παραμετρική Διερεύνηση μέτρων υποστήριξης οδικής σήραγγας με αριθμητικό προσομοίωμα

Μεταπτυχιακή Διατριβή



Ντιούδη Αντωνία
Πολιτικός Μηχανικός

Εξεταστική επιτροπή: Ζ. Αγιουτάντης, Καθηγητής (επιβλέπων)
Γ. Εξαδάκτυλος, Καθηγητής
Μ. Στειακάκης Λέκτορας

Χανιά, Απρίλιος 2010

Περίληψη

Η κοινωνική και οικονομική απαίτηση μαζικής, ταχείας και αξιόπιστης μεταφοράς ανθρώπων και εμπορευμάτων έχει επιβάλει την ευρεία κατασκευή σύγχρονων αυτοκινητόδρομων υψηλής ταχύτητας και ασφάλειας. Η υπερνίκηση του εδαφικού ανάγλυφου και των διαφόρων γεωτεχνικών και υδραυλικών κωλυμάτων, καθώς και η παράκαμψη αστικών οικισμών, αρχαιολογικών τόπων και περιβαλλοντικά ευαίσθητων περιοχών, επιτυγχάνονται με την κατασκευή μεγάλων και δαπανηρών τεχνικών έργων, γεφυρών και σηράγγων. Ο συνδυασμός των νέων προσεγγίσεων εκσκαφής με εφαρμογή σύγχρονων μεθόδων υποστήριξης κατέληξε στις μέρες μας σε δυνατότητα όρυξης σηράγγων σε ιδιαίτερα απαιτητικές συνθήκες, όπου δεν ήταν δυνατή η ασφαλής όρυξη στο παρελθόν.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η παραμετρική διερεύνηση των μέτρων υποστήριξης οδικής σήραγγας. Η μοντελοποίηση του προβλήματος έγινε σε δύο διαστάσεις με το εμπορικό λογισμικό FLAC. Διερευνάται τόσο το μοντέλο της σήραγγας χωρίς υποστήριξη όσο και το μοντέλο με εναλλακτικού τύπου υποστήριξη και προτείνεται ο βέλτιστος τύπος υποστήριξης με βάση τα δεδομένα του προβλήματος

Πρόλογος

Για την ολοκλήρωση της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής θα ήθελα να ευχαριστήσω κάποιους ανθρώπους οι οποίοι με στήριξαν με την αμέριστη βοήθεια τους.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Αγιουτάντη για την πολύτιμη και συνεχή βοήθεια που μου εξασφάλισε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας μου καθώς και για την κατανόηση και υπομονή που έδειξε σε τυχόν καθυστερήσεις και προβλήματα που μου παρουσιάστηκαν από το ξεκίνημα μέχρι και την ολοκλήρωση της εργασίας μου.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιστημονικό συνεργάτη του Εργαστηρίου Μηχανικής Πετρωμάτων Μεταλλειολόγο Μηχανικό κ. Μαυριγιαννάκη Στέλιο που μου παρείχε πολύτιμες συμβουλές και με διευκόλυνε αρκετές φορές σε τυχόν προβλήματα που συνάντησα.

Οφείλω να ευχαριστήσω και την κατασκευαστική εταιρία ΑΚΤΕΡ για τα στοιχεία της σήραγγας που μου έδωσε. Η σήραγγα αποτελεί μέρος του μέρος του οδικού άξονα Βρύσσες-Χ. Σφακίων-Ανώπολη με διασταύρωση προς Φραγκοκάστελλο – Όριο Ν. Ρεθύμνης.

Τέλος επιθυμώ να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Εξαδάκτυλο και τον Λέκτορα κ. Στειακάκη που δέχτηκαν να συμμετάσχουν στην τριμελή εξεταστική επιτροπή για την αξιολόγηση της εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ 5

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ 7

2.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την κατασκευή σηράγγων 7
2.2 Μέθοδοι διάνοιξης σηράγγων 8
2.2.1 Μέθοδος ανοικτού ορύγματος 10
2.2.2 Μέθοδος κλειστής διάνοιξης 14
Α) Μέθοδοι διάτρησης-ανατίναξης 14
Β) Διάνοιξη σηράγγων με μηχανικά μέσα 20
1. Μέθοδοι σημειακής κοπής 21
2.Μέθοδοι ολομέτωπης κοπής 29
3. Διάνοιξη σηράγγων με την Ν.Α.Τ.Μ. 37
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΕΠΙΤΟΠΟΥ ΕΝΤΑΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΚΑΤΑ ΤΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ 45

3.1 Ανάλυση του αρχικού εντατικού πεδίου 45
3.2 Ανάλυση της ανακατανομής των τάσεων γύρω από τη διάνοιξη του υπόγειου ανοίγματος 49
3.3 Μετακινήσεις του εδάφους κατά τη διάνοιξη της σήραγγας 52
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΤΡΑ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ 57

4.1 Υποστήριξη και ενίσχυση σηράγγων 57
4.2 Εσωτερική ενίσχυση βραχόμαζας 63
4.2.1 Αγκύρια προενίσχυσης (πριν την εκσκαφή) 63
4.2.2 Αγκύρια στήριξης (μετά την εκσκαφή) 65
Α) Αγκύρια σημειακής πάκτωσης 65
Β) Αγκύρια συνεχούς πάκτωσης 69
Γ) Ήλοι τριβής 70
Δ) Αγκυρώσεις Συρματόσχοινου 74
4.3 Εξωτερική υποστήριξη βραχόμαζας 76
4.3.1 Χαλύβδινα πλαίσια 76
4.3.2: Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα 82
4.4 Τελική επένδυση 86
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ - ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ FLAC 88

5.1 Μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών 88
5.2 Το λογισμικό FLAC 89
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΟΔΙΚΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ 96

6.1 Διατύπωση προβλήματος 96
6.2 Διαδικασία προσομοίωσης 98
6.2.1 Δημιουργία αρχικού κανάβου 98
6.2.2 Δημιουργία εκσκαφής 99
6.2.3 Παράμετροι του περιβάλλοντος πετρώματος 100
6.2.4 Καθορισμός συνοριακών συνθηκών και φόρτιση 102
6.2.5 Τοποθέτηση υποστήριξης από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα 105
6.2.7 Τοποθέτηση αγκυρίων 115
6.3 Έλεγχος ευαισθησίας 127
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ 129

7.1 Συμπεράσματα 129
7.2 Προτάσεις 130

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα υπόγεια έργα όπως για παράδειγμα η τεχνολογία των τούνελ και η εξέλιξη της τεχνολογίας και της τεχνογνωσίας γύρω απ' αυτά μπορούν να δώσουν καθοριστικές λύσεις σε προβλήματα που πριν από πολλά χρόνια φάνταζαν άλυτα. Όπως η λύση του κυκλοφοριακού προβλήματος στις πόλεις με υπόγειους αυτοκινητόδρομους ή η σύνδεση περιοχών με υποθαλάσσιες κατασκευές.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι να διερευνηθούν μέσω αριθμητικής προσομοίωσης εναλλακτικοί τρόποι υποστήριξης για υπάρχουσα οδική σήραγγα που εξορύχθηκε στην περιοχή Φραγκοκάστελλο-όριο Ν. Ρεθύμνης. Δηλαδή πραγματοποιείται παραμετρική διερεύνηση μέσω του λογισμικού προγράμματος FLAC, για την επιλογή του βέλτιστου τρόπου υποστήριξης και ενίσχυσης της υπό μελέτης διατομής με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών.

Η διάρθρωση της παρούσας εργασίας έχει ως εξής:
Στο 2^{ο} κεφάλαιο γίνεται περιγραφή και αναφορά των μεθόδων όρυξης οδικών σηράγγων και ανάλυση των διαδικασιών για την πραγματοποίηση της κάθε μεθόδου ανάλογα με τις απαιτήσεις του έργου. Επισημαίνονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κάθε μεθόδου ανάλογα πάντα με τις απαιτήσεις της κάθε κατασκευής.

Στο 3^{ο} κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις μεταβολές των πεδίων των τάσεων και παραμορφώσεων κατά την κατασκευή υπόγειων έργων που έχουν ως αποτέλεσμα μετατοπίσεις των σημείων των επιφανειών εκσκαφής. Οι μέγιστες υπολογιζόμενες τάσεις δεν πρέπει να υπερβαίνουν την αντοχή του περιβάλλοντος πετρώματος ώστε να διασφαλίζεται η σταθερότητα των υπόγειων ανοιγμάτων.

Στο 4^{ο} κεφάλαιο θα παρουσιαστούν αναλυτικά τα μέτρα υποστήριξης και ενίσχυσης σηράγγων. Θα γίνει κατηγοριοποίηση των μέτρων και θα αναλυθεί η εσωτερική ενίσχυση βραχόμαζας πριν και μετά την εκσκαφή, η εξωτερική υποστήριξη και η τελική επένδυση της σήραγγας.

Στο 5^{ο} κεφάλαιο περιγράφεται περιληπτικά το εμπορικό λογισμικό FLAC (Itasca), το οποίο είναι ένα πρόγραμμα ηλεκτρονικού υπολογιστή, και αναλύονται οι διαδικασίες και οι μέθοδοι επίλυσης μέσου του συγκεκριμένου προγράμματος ποικίλων γεωτεχνικών προβλημάτων.

Στο 6^{ο} κεφάλαιο πραγματοποιείται η μοντελοποίηση του μέσου, στο οποίο θα πραγματοποιηθεί η εκσκαφή με το εμπορικό λογισμικό FLAC που βασίζεται στην μέθοδο-των πεπερασμένων διαφορών και ερμηνεύονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

Στο 7^{ο} κεφάλαιο εξάγονται τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας και γίνονται κάποιες προτάσεις για την περαιτέρω διερεύνηση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει η περιγραφή των μεθόδων κατασκευής σηράγγων και των διαδικασιών εκσκαφής τους. Θα γίνει αναφορά στους παράγοντες που επηρεάζουν την κατασκευή σηράγγων, θα κατηγοριοποιηθεί η διάνοιξη των υπόγειων έργων σε ανοικτού και κλειστού τύπου εκσκαφές και θα αναλυθεί η διαδικασία διάνοιξης τους με μηχανικά μέσα στο μέτωπο εκσκαφής, με τη μέθοδο διάτρησης-ανατίναξης (drill and blast) και με τη μέθοδο NATM (New Austrian Tunnelling Method).

2.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την κατασκευή σηράγγων

Οι σήραγγες, αποτελούν υπόγεια τεχνικά έργα σε εδαφικούς ή και βραχώδεις σχηματισμούς όταν η ανοικτή εκσκαφή δεν είναι εφικτή. Είναι έργα που χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής από πλευράς μηχανικού, όμως είναι άρρηκτα συνδεδεμένα (όσο κανένα άλλο τεχνικό έργο) με τις τεχνικογεωλογικές και γεωτεκτονικές συνθήκες του χώρου διέλευσης, από το στάδιο σχεδιασμού του έργου μέχρι και αυτού της λειτουργίας του, καθώς οι παράγοντες μεθόδου κατασκευής εξαρτώνται από (Ρόζος, 1989):

- τις γεωτεκτονικές συνθήκες (γεωλογία – τεκτονική)
- το μήκος της σήραγγας

Συνεπώς οι γεωλογικές συνθήκες μαζί με την τεκτονική αποτελούν πρωταρχικούς παράγοντες στο σχεδιασμό και την κατασκευή των σηράγγων, αφού η γεωμάζα σε αντίθεση με άλλες κατασκευές επιφέρει τις διάφορες φορτίσεις στη σήραγγα, ενώ παράλληλα προσφέρεται σαν το αρχικό μέσο υποστήριξης. Καθώς δηλαδή η εκσκαφή προχωρεί, η αντοχή των σχηματισμών συνήθως κρατά τη σήραγγα ανοικτή για το αναγκαίο διάστημα εγκατάστασης της υποστήριξης. Άρα, οι εδαφικοί ή βραχώδεις γεωλογικοί σχηματισμοί που περιβάλλουν μια σήραγγα αποτελούν κατά κάποιο τρόπο υλικό κατασκευής, του οποίου οι γεωμηχανικές ιδιότητες (όπως και του χάλυβα και του σκυροδέματος που χρησιμοποιείται) είναι σημαντικές. Αναγκαία είναι λοιπόν η διερεύνηση των τεχνικογεωλογικών και υδρογεωλογικών συνθηκών στην περιοχή

κατασκευής, αφού βοηθά στον ορθολογικό σχεδιασμό του έργου για ασφάλεια και οικονομία. Επομένως απαιτείται (Ρόζος, 1989):

- Η κατανόηση των γεωλογικών, υδρογεωλογικών και τεκτονικών συνθηκών (ζώνες μειζόνων ασυνεχειών, πτυχώσεις, επωθήσεις, εφιππεύσεις, λεπιώσεις,) καθώς και της μικροτεκτονικής προκειμένου για βραχομάζα (διαρρήξεις – διακλάσεις, άνοιγμα αυτών, πλήρωση, τραχύτητα, απόσταση) στην περιοχή.
- Ο εντοπισμός των διαφόρων γεωτεχνικών προβλημάτων, τα οποία μπορεί να υπάρχουν στην περιοχή και τα οποία μπορεί να επαναδραστηριοποιηθούν ή επιδεινωθούν με τις εργασίες κατασκευής.
- Η μελέτη των φυσικομηχανικών χαρακτηριστικών των διαφόρων γεωλογικών σχηματισμών που εμπλέκονται στο έργο.
- Η ομαδοποίηση των σχηματισμών από πλευράς γεωμηχανικής συμπεριφοράς σε ενότητες με ορισμένα εύρη παραμέτρων σχεδιασμού.
- Η προσαρμογή των μέτρων υποστήριξης στην εν γένει τεχνικογεωλογική και υδρογεωλογική συμπεριφορά (στις περισσότερες περιπτώσεις εξαρτάται από την κατάσταση κερματισμού, άρα την τεκτονική - μικροτεκτονική) των σχηματισμών.

2.2 Μέθοδοι διάνοιξης σηράγγων

Ένας τρόπος ταξινόμησης των μεθόδων διάνοιξης σηράγγων είναι ανάλογα με τον τρόπο διασφάλισης της ευστάθειας που χρησιμοποιεί η καθεμία πριν την εφαρμογή κάθε είδους υποστήριξης. Οι μέθοδοι διάνοιξης με την κατηγοριοποίηση αυτή χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες (Καββαδάς, 2004).

1. Μέθοδοι διάνοιξης με εφαρμογή πίεσης με μηχανικά μέσα στο μέτωπο, δηλαδή με μηχανήματα ολομέτωπης κοπής (TBM) επειδή κατά τη μέθοδο αυτή η κοπτική κεφαλή του μηχανήματος ασκεί πίεση επί του μετώπου εκσκαφής, π.χ. TBMs, SPB & EPB TBMs (Slurry Pressure Balance & Earth Pressure Balance TBMs).
2. Μέθοδοι διάνοιξης σηράγγων με εκτεθειμένο το μέτωπο εκσκαφής, δηλαδή χωρίς την εφαρμογή πίεσης με μηχανικά μέσα, και με υποστήριξη των τοιχω-

μάτων της σήραγγας με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (απλό ή οπλισμένο) ή/και αγκύρια βράχου, π.χ. μέθοδος NATM.

3. Μέθοδοι διάνοιξης με προστατευτική ασπίδα (shield), επειδή η άμεση υποστήριξη του τοιχώματος της σήραγγας γίνεται μέσω της ασπίδας και όχι με εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος ή αγκυρίων, π.χ. δοκοί προπορείας.
4. Οποιαδήποτε άλλη μέθοδος διάνοιξης κατά την οποία η άμεση υποστήριξη του τοιχώματος της σήραγγας γίνεται χωρίς εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ή αγκύρια, όπως π.χ. με έγχυτο σκυρόδεμα, προκατασκευασμένα στοιχεία από σκυρόδεμα, μέταλλο ή άλλο υλικό.

Κατηγοριοποίηση ανάλογη με τον τύπο κατασκευής των υπόγειων έργων περιγράφεται στη συνέχεια και αποτελεί την κατηγοριοποίηση που θα χρησιμοποιηθεί στο παρόν κεφάλαιο. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι κατασκευής υπογείων έργων (Μαραγκός, 2001):

a) *Ανοικτού τύπου* - Η διάνοιξη σηράγγων κατά τον ανοικτό τύπο κατασκευής, αναφέρεται στην εκσκαφή, η οποία πραγματοποιείται από την επιφάνεια του εδάφους και η μέθοδος εκσκαφής είναι γνωστή ως μέθοδος κοπής και επίχωσης (cut and cover method).
b) *Κλειστού τύπου* - Η διάνοιξη σηράγγων κατά τον κλειστό τύπο κατασκευής αφορά την υπόγεια εκσκαφή και οι μέθοδοι εκσκαφής για τις κατασκευές κλειστού τύπου χωρίζονται σε μεθόδους ανατίναξης και μηχανικής όρυξης, όπως περιγράφονται στη συνέχεια:

1. Μέθοδοι διάτρησης-ανατίναξης
2. Μέθοδοι μηχανικής όρυξης:

    - Μέθοδοι σημειακής κοπής
    - Μέθοδοι ολομέτωπης κοπής

2.2.1 Μέθοδος ανοικτού ορύγματος

Με κοπή και επανεπίχωση

Εφαρμόζεται σε εδαφικούς σχηματισμούς όταν το έργο είναι σε μικρό βάθος. Η μέθοδος ανοικτού ορύγματος εφαρμόζεται διαφορετικά σε ακατοίκητες και διαφορετικά σε κατοικημένες περιοχές. Σε ακατοίκητες περιοχές δεν αντιμετωπίζονται προβλήματα. Η εκσκαφή γίνεται σε όλο της το εύρος από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι το βάθος στο οποίο θα εδρασθεί το έργο και δεν γίνεται αντιστήριξη των παρειών της εκσκαφής οι οποίες διαμορφώνονται με την κλίση που επιτρέπει το έδαφος. Όταν υπάρχουν υπόγεια νερά η στάθμη υποβιβάζεται μέχρις ότου κατασκευαστεί το έργο (Μαραγκός, 2001).

Δυσκολίες παρουσιάζονται σε κατοικημένες περιοχές επειδή η κατασκευή των έργων δεν πρέπει αφενός να προκαλέσει προβλήματα στην κυκλοφορία και αφετέρου ζημιές στις γειτονικές κατασκευές: οικοδομές, υπόγειους αγωγούς, υπόγεια καλώδια. Ανάλογα με τα πολεοδομικά χαρακτηριστικά της περιοχής στην οποία θα γίνει το έργο εφαρμόζονται οι παρακάτω λύσεις (Μαραγκός, 2001):

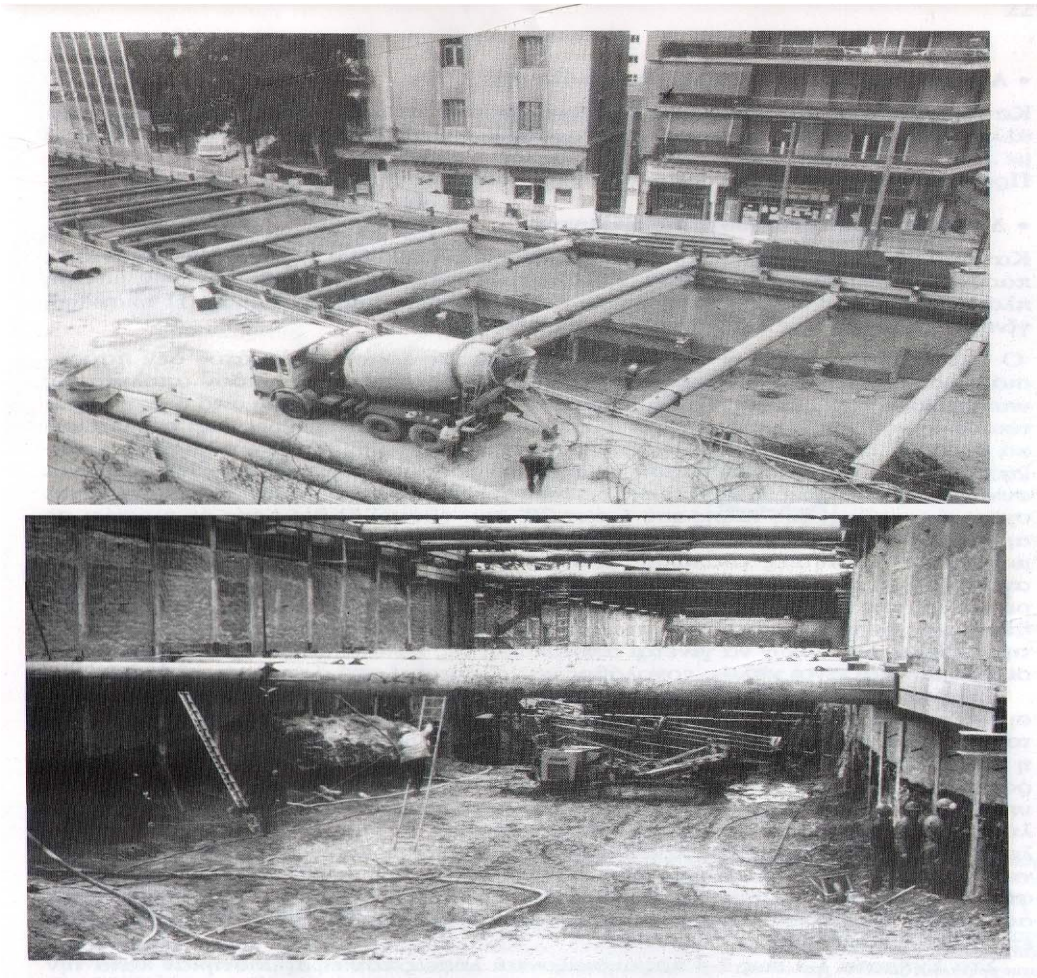
- *Αντιστηριζόμενη εκσκαφή χωρίς κάλυψη.*
  Κατασκευάζεται αρχικά η μισή διατομή ώστε να είναι δυνατή η κυκλοφορία στο άλλο ήμισυ της οδού. Η εκσκαφή αντιστηρίζεται με διαφραγματικούς τοίχους ή με πασαλοσανίδες ώστε να αποφευχθούν ζημιές στις γειτονικές κατασκευές. Προσοχή χρειάζεται στη σύνδεση των δύο τμημάτων της διατομής.
- *Διάνοιξη υπό την προστασία κάλυψης.*
  Κατασκευάζεται αρχικά η αντιστήριξη (διαφραγματικοί τοίχοι, πασσαλοσανίδες, πασσαλοσυστοιχίες) πάνω στην οποία τοποθετείται προσωρινή κάλυψη ή μόνιμη πλάκα κάλυψης για την γρήγορη αποκατάσταση της κυκλοφορίας.

Ο σχεδιασμός υπόγειων έργων με τη μέθοδο ανοικτού ορύγματος Σχήματα (2.1, 2.2, 2.3) δεν παρουσιάζει δυσκολίες. Οι διαφραγματικοί τοίχοι προστατεύουν σχεδόν απόλυτα τις υπάρχουσες κατασκευές. Οι παραμορφώσεις του εδάφους πίσω από διαφραγματικούς τοίχους έχουν αποτελέσει αντικείμενο συστηματικής έρευνας, τα εμπειρικά στοιχεία από μετρήσεις σε πραγματικές κατασκευές είναι πλούσια. Οι καθι-

ζήσεις εκτείνονται σε απόσταση από 1 έως 2 m πίσω από τους τοίχους και είναι συνάρτηση του ολικού βάθους της εκσκαφής. Σε αργιλικά εδάφη μπορεί να είναι σχετικά μεγάλες, της τάξης του 1 έως 2% του ολικού βάθους της εκσκαφής. Σε αμμώδη εδάφη ανέρχονται στο ήμισυ των παραπάνω τιμών, ενώ σε πυκνές άμμους είναι αμελητέες. Αν ληφθούν όλα τα κατάλληλα μέτρα αντιστήριξης των διαφραγματικών τοίχων και οι εκσκαφές γίνουν με φροντίδα, οι καθιζήσεις του εδάφους έχουν ασήμαντες επιπτώσεις στη συμπεριφορά των θεμελιώσεων των γειτονικών κατασκευών. Εντούτοις είναι απαραίτητο πριν από την έναρξη των έργων να γίνεται αποτύπωση της κατάστασης των παρακείμενων οικοδομών και είναι καλό ο εργολάβος να καλύπτεται από ασφαλτική εταιρεία (Μαραγκός, 2001).

Σχήμα 2.1: Μέθοδος ανοικτού ορύγματος. Έργα μετρό στο Βερολίνο (Stiegler,1993)

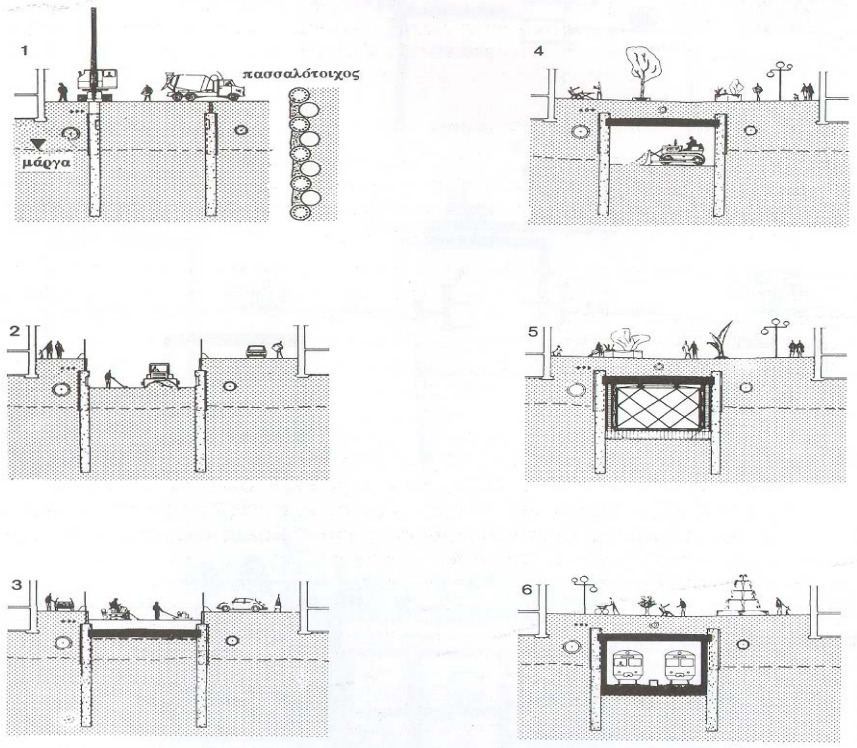
Σχήμα 2.2: Κατασκευή έργων μετρό στην Αθήνα (www.ametro.gr)



Σχήμα 2.3: Κατασκευή έργων μετρό στην Αθήνα. Οδός Λιοσίων. Κατασκευή της σήραγγας με τη μέθοδο ανοικτού ορύγματος. Κατασκευή από πάνω προς τα κάτω των διαφραγματικών τοίχων. Δύο σειρές αντηρίδων εφαρμόζονται σε οριζόντιες δοκούς στήριξης. Πρόσθετη ενίσχυση της στήριξης με την εφαρμογή συστήματος αγκυρίων (Φωτογραφικό αρχείο Αττικό Μετρό Α.Ε.) (Μαραγκός, 2001).

Η διατομή της σήραγγας είναι ορθογωνική και κατασκευάζεται από οπλισμένο σκυρόδεμα. Το πάχος της πλάκας οροφής είναι της τάξης των 60-80 cm και τοποθετείται συνήθως σε βάθος 1 έως 1,5 m από την επιφάνεια ώστε η κατανομή των επιφανειακών φορτίων πάνω της να είναι καλή (μειώνονται οι ροπές και οι διατμητικές τάσεις, Βαλαλάς, 1984). Προβλήματα θεμελίωσης δεν υπάρχουν επειδή τα φορτία που υπήρχαν πριν αφαιρεθεί το έδαφος ήταν μεγαλύτερα από τα φορτία που μεταφέρει στο έδαφος η σήραγγα. Το δάπεδο αποτελεί πλάκα θεμελίωσης και προστατεύει τη σήραγγα από την εισροή υπόγειων νερών. Οι κατακόρυφοι τοίχοι δέχονται τις ωθήσεις του εδάφους και της κυκλοφορίας που δεν είναι σημαντικές. Για λόγους στεγανότητας γίνεται επίστρωση με ασφαλτικό υλικό και για λόγους αισθητικής και ηχητικής προστασίας η κατασκευή επενδύεται εσωτερικά. Στο Σχήμα 2.4 παρουσιάζεται λύση που εφαρμόστηκε για την κατασκευή έργων μέτρο και περιγράφονται στη συνέχεια οι φάσεις κατασκευής (Μαραγκός, 2001).

- **Φάση 1:** Κατασκευή των πασσαλότοιχων αντιστήριξης. Οι πάσσαλοι κατασκευάζονται με αφαίρεση (μέσω γεωτρύπανου) του εδαφικού υλικού και σκυροδέτηση. Κάθε δεύτερος πάσσαλος είναι χωρίς σκυρόδεμα και εισχωρεί 1,5 μέτρο μέσα στη σκληρή μάργα.
- **Φάση 2:** Εκσκαφή μέχρι το βάθος στο οποίο θα εδρασθεί η πλάκα κάλυψης. Ισοπέδωση, διάστρωση του μπετόν καθαριότητας.
- **Φάση 3:** Σκυροδέτηση πλάκας. Πλήρωση της εκσκαφής (μπάζωμα) πάνω από την πλάκα. Κατασκευή έργων πεζοδρόμησης και αποκατάσταση του χώρου πάνω από την εκσκαφή.
- **Φάση 4:** Εκσκαφή υπό την προστασία της πλάκας κάλυψης και των πασσαλοτοίχων. Με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα εξομαλύνονται οι επιφάνειες των πασσαλοσυστοιχιών. Διάστρωση του μπετόν καθαριότητας.
- **Φάση 5:** Κατασκευή του δαπέδου και των κατακόρυφων τοίχων με υδατοστεγές μπετόν σε μπλοκ των 10 μέτρων.
- **Φάση 6:** Ολοκλήρωση της σήραγγας.



Σχήμα 2.4: Εφαρμογή της μεθόδου ανοικτού ορύγματος κατά την κατασκευή έργων μετρό στην πόλη Herne, Γερμανία (Μαραγκός, 2001).

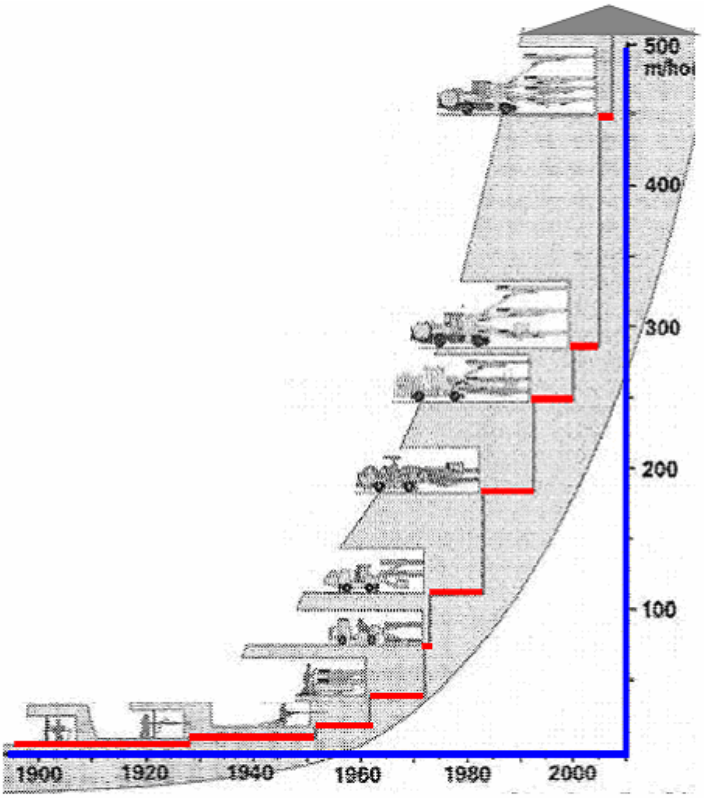
2.2.2 Μέθοδος κλειστής διάνοιξης

Α) Μέθοδοι διάτρησης-ανατίναξης

Διάτρηση και ανατίναξη

Η μέθοδος διάτρησης πετρωμάτων αναπτύχθηκε από το 1850 με τη χρήση συμπιεσμένου αέρα διάτρησης. Το 1945 άρχισαν να χρησιμοποιούνται κοπτικά άκρα tungsten carbide διάτρησης πετρωμάτων, και λίγα χρόνια αργότερα περίπου το 1960 ανακαλύφθηκαν τα αεροκίνητα διατρητικά (pneumatic drilling). Στη συνέχεια υδραυλικά διατρητικά κατασκευάστηκαν και χρησιμοποιούνται μέχρι και σήμερα. Στο Σχήμα 2.5 φαίνεται η εξέλιξη των μεθόδων διάτρησης με την πάροδο των χρόνων (Zhao, 2007).

Η διαδικασία της ανατίναξης ξεκίνησε το 1860 με τη χρήση μαύρης σκόνης (black powder) και τη χρήση δυναμίτη κυρίως για σκληρά πετρώματα. Στην συνέχεια το 1922 χρησιμοποιήθηκε η ηλεκτρική έναυση (1sec delay), το 1955 έγινε η χρήση του ANFO (μίγματος νιτρικού αμμωνίου και πετρελαίου) και το 1980 αναπτύχθηκαν τα εκρηκτικά γαλακτώματα τα οποία χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα και είναι ανθεκτικά στο νερό, αντλήσιμο και παράγουν λιγότερα τοξικά αέρια.



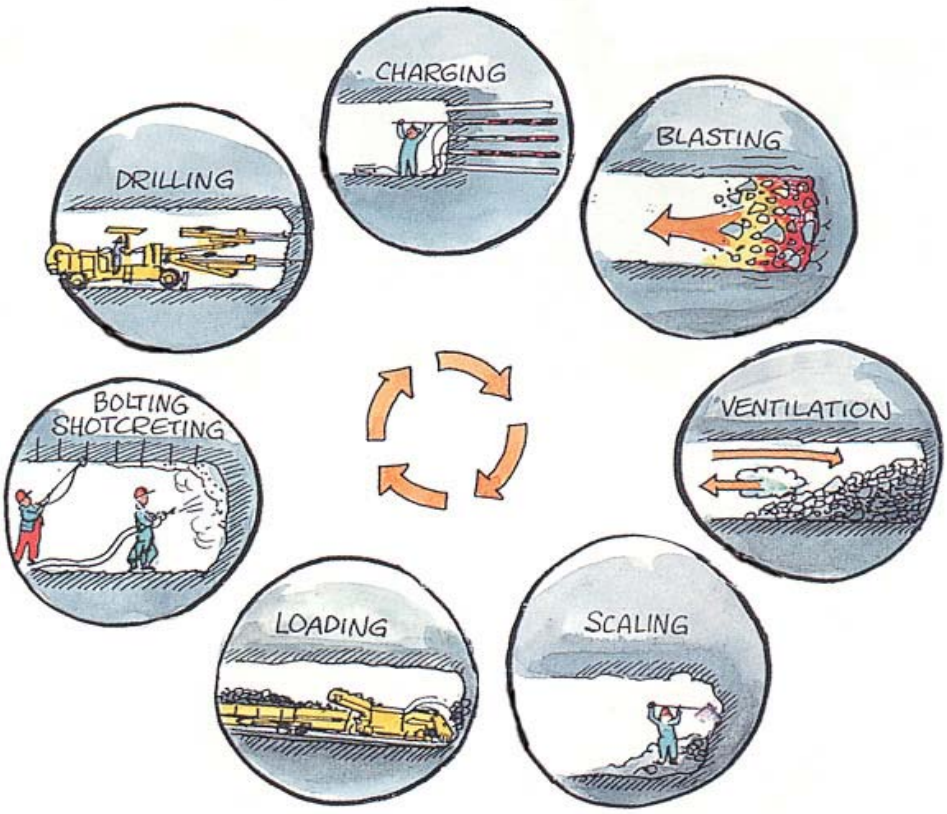
Σχήμα 2.5: Η μέθοδος διάτρησης αυξάνεται από 5 m/h 100 χρόνια πριν σε 450 m/h σήμερα (Πηγή: Zhao, 2007)

Ο τυπικός κύκλος εκσκαφής των τεχνικών ανατίναξης εκτελείται με τα ακόλουθα βήματα (USACE, 1997):

1) Άνοιγμα διατρημάτων ανατίναξης και γόμωσή τους με εκρηκτικά.
2) Έναυση για εκτέλεση της έκρηξη ακολουθούμενη από αερισμό για την απομάκρυνση των αερίων της έκρηξης
3) Απομάκρυνση του εξορυσσόμενου πετρώματος (mucking).
4) Απομάκρυνση χαλαρών τμημάτων πετρώματος από τη στέψη και τα τοιχώματα (scaling).

5) Εγκατάσταση αρχικής υποστήριξης.

Το Σχήμα 2.6 απεικονίζει τον κύκλο της μεθόδου διάτρησης – ανατίναξης



Σχήμα 2.6: Διαδικασία κύκλου διάτρησης-ανατίναξης (Ρόζος, 1989)

Οι περισσότερες σήραγγες ορύσσονται με τη μέθοδο ολομέτωπης εκσκαφής όπου όλο το μέτωπο ανατινάσσεται σε ένα γύρο. Στο Σχήμα 2.7 φαίνεται η σήραγγα ΟΣΕ στην «Κακιά Σκάλα», σε συνδυασμό με τα επιφανειακά έργα που επίσης βασιζόταν σε μαζικές ανατινάξεις σε περιοχές βαριάς –συνεχούς κυκλοφορίας. Τα διατρήματα ανατίναξης έχουν μήκος μικρότερο από τη διάσταση του ανοίγματος και η ανατίναξη επηρεάζει το πέτρωμα μέχρι το 90% του μήκους των διατρημάτων. Τυπικοί κύκλοι προχώρησης είναι 2 με 4 m (7-13 ft) βάθος. Ανατίναξη του μετώπου σε φάσεις είναι μερικές φορές πιο πρακτική ή μπορεί ή μπορεί και να απαιτείται από τις συνθήκες του εδάφους ή από τους περιορισμένους εξοπλισμούς. Η πιο κοινή μέθοδος τμηματικής εκσκαφής είναι η «heading and bench» κατά την οποία το επάνω τμήμα του μετώπου (heading) ανατινάσσεται πρώτο, σε όλο του το πλάτος, και ακολουθεί μετά η ανατίναξη του υπόλοιπου (bench). Το κάτω τμήμα του μετώπου μπορεί να εκσκαφεί με

οριζόντια ή κατακόρυφα διατρήματα (όμοια με των επιφανειακών ανατινάξεων). Υπάρχουν και άλλες παραλλαγές της τμηματικής ανατίναξης, όπως ένα κεντρικό άνοιγμα στη στέψη (center crown drift), ακολουθούμενο από δύο πλευρικά ανοίγματα (crown side drifts) και στη συνέχεια από την όρυξη του κάτω τμήματος του μετώπου σε ένα, δύο ή τρία στάδια. Η τμηματική ανατίναξη προτιμάται στις εξής περιπτώσεις: α) όταν η διατομή είναι πολύ μεγάλη για ένα υπόγειο διατρητικό συγκρότημα (jumbo), β) όταν το μέγεθος της έκρηξης σχετιζόμενο με το βάρος των εκρηκτικών πρέπει να είναι περιορισμένο για περιορισμό των δονήσεων και γ) όταν το έδαφος είναι τόσο φτωχό που το πλήρες πλάτος εκσκαφής ίσως δεν είναι σταθερό για αρκετό διάστημα που να επιτρέπει την εγκατάσταση της αρχικής υποστήριξης.

Τα διατρήματα ορύσσονται συνήθως με υδραυλικά κρουστικά διατρητικά. Η απόδοση και η ταχύτητα της όρυξης βελτιώνονται γρήγορα, όπως και η φθορά των κοπτικών και η ακρίβεια κατά τη διάτρηση, χάρη σε νέο σχεδιασμό των ράβδων και των κοπτικών. Τα jumbo κινούνται σε ράγες, σε πλατφόρμες ή σε τροχούς. Αυτά που κινούνται σε πλατφόρμες επιτρέπουν και την κίνηση του εξοπλισμού που απομακρύνει το υλικό εκσκαφής από το μέτωπο (USACE, 1997).

Σε μια σήραγγα, δεν υπάρχει αρχικά ελεύθερη επιφάνεια παράλληλη σε διάτρημα ανατίναξης και γι' αυτό πρέπει να δημιουργηθεί από το σχεδιασμό της ανατίναξης. Συνήθως χρησιμοποιείται η σφηνοειδής κοπή (V-cut), όπου τα διατρήματα ορύσσονται στο κάτω μισό του μετώπου σε σχήμα σφήνας και η έναυσή τους προηγείται των υπολοίπων, ούτως ώστε να απομακρυνθεί το υλικό σφήνας και δημιουργηθεί ελεύθερη επιφάνεια για τις ακόλουθες εναύσεις. Πολλές φορές τα αρχικά διατρήματα παραμένουν κενά, χωρίς να γομώνονται με εκρηκτικά για τον ίδιο λόγο.

Ηλεκτρικές ή μη-ηλεκτρικές επιβραδύνσεις (electric or nonelectric delays) χρησιμοποιούνται για να ελέγξουν την ακολουθία και τις χρονικές στιγμές της έναυσης για τον περιορισμό της ποσότητας των εκρηκτικών που ανατινάσσονται μια χρονική στιγμή. Στο παρελθόν η έναυση γινόταν με ηλεκτρικά μέσα, αλλά εναύσεις και επιβραδύνσεις μη-ηλεκτρικές είναι διαθέσιμες σήμερα, οι οποίες προτιμώνται, διότι δεν επηρεάζονται από τυχαία ηλεκτρικά ρεύματα.

Σχήμα 2.7: Σήραγγες ΟΣΕ στην «Κακιά Σκάλα», σε συνδυασμό με τα επιφανειακά έργα που επίσης βασιζόταν σε μαζικές ανατινάξεις σε περιοχές βαριάς –συνεχούς κυκλοφορίας (Πηγή: Μπαλικτσής, 2009)

Ποικίλλουν ανάλογα με την πυκνότητα φόρτισης ανά μήκος διατρήματος, διάμετρο, ταχύτητα έναυσης, χαρακτηριστικά αερίων, ανθεκτικότητα στο νερό, κ.α. Σε ξηρό πέτρωμα συνήθως χρησιμοποιείται ANFO. Τα διατρήματα έχουν τυπικό μέγεθος 45 με 50 mm και φυσίγγια εκρηκτικών μέσων είναι συνήθως διαμέτρου 40 mm. Τα κενά διατρήματα είναι μικρότερης, ίσης ή και μεγαλύτερης διαμέτρου (USACE, 1997).

Δύο παράμετροι υπολογίζονται συνήθως σε ένα σχεδιασμό ανατίναξης: ο συντελεστής κατανάλωσης εκρηκτικών (kg/m^3) εξορυσσόμενου πετρώματος και ο συντελεστής διάτρησης (συνολικό μήκος διατρημάτων ανά όγκο εξορυσσόμενου πετρώματος). Αυτές οι παράμετροι είναι δείκτες της οικονομίας της ανατίναξης και επιτρέπουν εύκολη σύγκριση μεταξύ σχεδιασμών ανατίναξης. Ο συντελεστής κατανάλωσης εμφανίζει διακυμάνσεις ανάλογα με τις συνθήκες. Για παράδειγμα, είναι μεγαλύτερο όσο μικραίνει η σήραγγα ή όσο το πέτρωμα είναι πιο σκληρό και εύκαμπτο. Πετρώματα με κενά εμφανίζουν μεγάλες τιμές ειδικών φορτίων. Τυπικές τιμές του συντελεστής κατανάλωσης είναι 0,6 – 5 kg/m^3 (1 kg/m^{3}για σήραγγες διαμέτρου μεγαλύτερης από 30 m^2 και πάνω από 3 kg/m^3 για μεγέθη κάτω από 10 m^2 για τον ίδιο τύπο βραχόμαζας). Τυπικές τιμές του συντελεστή διάτρησης κυμαίνονται από 0,8 – 6 m/m^3.

Η ιδανική ανατίναξη πρέπει να καταλήγει στην ελάχιστη βλάβη στο εναπομένων πετρωμάτων και στην ελάχιστη υπερεκσκαφή (overbreak) (USACE, 1997).

Σε περιπτώσεις όπου, λόγω της φύσης των πετρωμάτων, με την συμβατική μέθοδο των ανατινάξεων δεν αποφεύγονται δυσμενείς καταστάσεις (υπερεκσκαφές, διαταραχές πετρώματος κ.λπ.), θα εφαρμόζονται *μέθοδοι ελεγχόμενης ανατίναξης* που έχουν ως σκοπό (USACE, 1997):

1. Την μείωση της διατάραξης του γεωϋλικού με τον σχηματισμό μιας επιφάνειας πρότμησης, επί της οποίας ανακλώνται τα κρουστικά κύματα της έκρηξης και κατευθύνονται προς την επιθυμητή διεύθυνση.
2. Την μείωση της «υπερεκσκαφής».
3. Την καλύτερη εκμετάλλευση της ενέργειας της έκρηξης για θρυμματισμό του εξορυσσόμενου υλικού.
4. Την μείωση των παραγομένων δονήσεων.

Οι πλέον διαδεδομένες σήμερα μέθοδοι ελεγχόμενη ανατίναξης (δηλ. με κατάλληλη επιλογή της διάταξης των διατρημάτων, της ποσότητας των εκρηκτικών και των χρόνων ανατίναξης) θεωρούνται οι ακόλουθοι (ΠΕΤΕΠ 12-02-01-02, 2006):

- Περιμετρική ανατίναξη
- Γραμμική διάτρηση

Για την διαμόρφωση των μετώπων προσβολής των σηράγγων καθώς και την διάνοιξη των πρώτων μέτρων από τα στόμια (δηλ. σε απόσταση της τάξης των δύο έως τριών διαμέτρων της σήραγγας), θα χρησιμοποιούνται μέθοδοι ελεγχόμενης ανατίναξης.

Περιμετρική ανατίναξη

Η διάμετρος των διατρημάτων κυμαίνεται από σαράντα έξι (46) μέχρι εβδομήντα έξι (76) mm. Τα διατρήματα θα γομώνονται με φυσίγγια. Η απόσταση και ο τύπος των φυσιγγίων, το γέμισμα, το τάπωμα και άλλες λεπτομέρειες γόμωσης και πυροδότησης

θα προκύπτουν από δοκιμαστικές ανατινάξεις Τα διατρήματα της περιμετρικής ανατίναξης θα πυροδοτούνται με ελάχιστη υστέρηση μεταξύ τους, ώστε να δημιουργούν διατμητικές δυνάμεις και διαρρήξεις κατά μήκος της περιφέρειας της ανατίναξης (ΠΕΤΕΠ 12-02-01-02, 2006).

Γραμμική διάτρηση

Γραμμική διάτρηση θα χρησιμοποιηθεί σε ειδικές περιπτώσεις, σε περιοχές στις οποίες επιβάλλεται η ελάχιστη δυνατή διατάραξη των σχηματισμών και οι οποίες θα υποδειχθούν ειδικά. Τα διατρήματα θα έχουν διάμετρο κυμαινόμενη από σαράντα έξι (46) μέχρι εβδομήντα έξι (76) mm, δεν θα γομώνονται, η δε απόσταση μεταξύ τους θα είναι τέτοια, ώστε να είναι δυνατός ο διαχωρισμός του πετρώματος κατά μήκος υγιούς επιφάνειας βράχου όταν γίνει η κύρια ανατίναξη, μπροστά από την γραμμή των διατρημάτων. Ενδέχεται να απαιτηθεί η χρήση λοστών και σφηνών (ΠΕΤΕΠ 12-02-01-02, 2006).

Παρακάτω παρουσιάζονται μερικά από τα πλεονεκτήματα της μεθόδου ελεγχόμενης ανατίναξης (USACE, 1997):

a) Λιγότερη βλάβη στο πέτρωμα σημαίνει μεγαλύτερη ευστάθεια και λιγότερη απαιτούμενη υποστήριξη.
b) Οι λειτουργίες στη σήραγγα είναι ασφαλέστερες, εφόσον δεν απαιτείται απομάκρυνση επισφαλών όγκων (scaling).
c) Λιγότερη υπερεκσκαφή καταλήγει σε ομαλότερη επιφάνεια για μία ανυποστήρικτη σήραγγα.
d) Σε υποστηριγμένη σήραγγα, λιγότερο overbreak σημαίνει λιγότερο τσιμέντο για να καλύψει τα κενά.

Β) Διάνοιξη σηράγγων με μηχανικά μέσα

Στην κατασκευή της πλήρους διάνοιξης σηράγγων με μηχανικά μέσα ολομέτωπης ή σημειακής κοπής περιλαμβάνονται η διάθεση (προσκόμιση, ρήση, αποκομιδή) των κατάλληλων μηχανημάτων κοπής κάθε είδους απαιτούμενου εξοπλισμού, η διάθεση του κατάλληλου εργατικού και τεχνικού ανθρώπινου δυναμικού, η προμήθεια επί τό-

που του έργου όλων των υλικών (ρυθμιστές εδάφους, στεγανωτικά μίγματα σφράγισης κ.τ.λ.), η έντεχνη εκτέλεση όλων των διαδικασιών και λειτουργιών που απαιτούνται για την εκσκαφή σε όλα τα είδη και ποιότητες γεωυλικών (ΠΕΤΕΠ 12-02-01-02, 2006).

1. Μέθοδοι σημειακής κοπής

α) Εκσκαπτικό μηχάνημα σημειακής κοπής

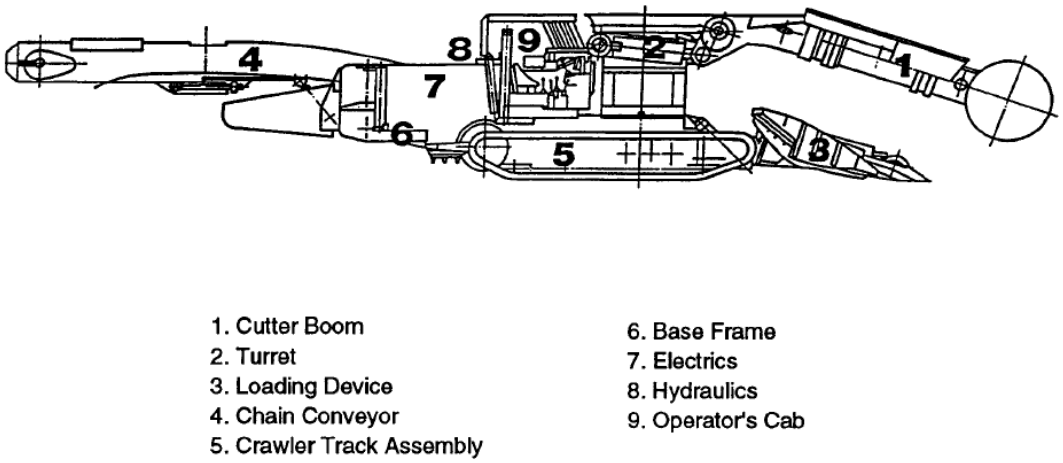
Τα πρώτα μηχανήματα σημειακής κοπής (roadheaders), χρησιμοποιήθηκαν για διάνοιξη σηράγγων τη δεκαετία του 60. Μέσα σε λίγα χρόνια περίπου 150 –200 τέτοια μηχανήματα χρησιμοποιούνταν στην κατασκευή υπογείων έργων (Καλιαμπάκος, 2004). Τα βασικά τμήματα ενός εκσκαπτικού μηχανήματος σημειακής κοπής φαίνονται στο Σχήμα 2.8. Στο Σχήμα 2.9 απεικονίζεται εκσκαπτικό μηχάνημα ανοικτής ασπίδας.

Οι κοπτικοί βραχίονες αποτελούν το εργαλείο προσβολής του μετώπου. Τα βασικά του τμήματα είναι η μηχανή του βραχίονα και οι κοπτικές κεφαλές. Υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες κοπτικών κεφαλών (Σχήμα 2.10):

- Οι διαμήκεις, οι οποίες περιστρέφονται παράλληλα με τον άξονα του βραχίονα.
- Οι εγκάρσιες, οι οποίες περιστρέφονται κάθετα με τον άξονα του βραχίονα.

Και τα δύο είδη κοπτικών κεφαλών έχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Κάποια βασικά σημεία που αφορούν την δημιουργία σηράγγων είναι τα εξής:

- Οι εγκάρσιες κεφαλές κόβουν κατά την διεύθυνση του μετώπου. Έτσι, είναι πιο σταθερές από τις διαμήκεις, με ανάλογο βάρος και δύναμη.



Σχήμα 2.8: Τα βασικά τμήματα ενός Roadheader (Πηγή: Εξαδάκτυλος, 2006)

Σχήμα 2.9: Εκσκαπτικό μηχάνημα ανοικτής ασπίδας Roadheader (Πηγή: Εξαδάκτυλος, 2006)

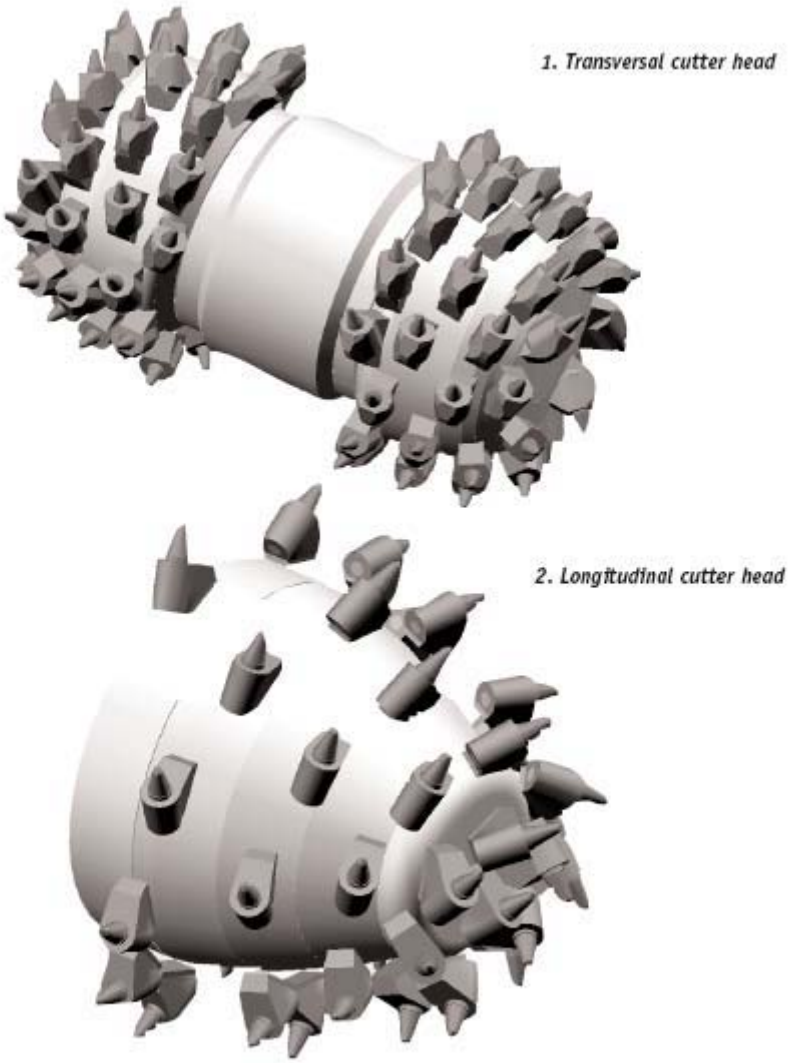


FIGURE 6.2.-39. Types of cutter heads

Σχήμα 2.10: Τύποι Περιστροφικών κεφαλών με κοπτικά άκρα (Εξαδάκτυλος, 2006)

- Στις εγκάρσιες κεφαλές το μεγαλύτερο μέρος των δυνάμεων κατευθύνονται στο κύριο τμήμα του μηχανήματος.
- Τα μηχανήματα σημειακής κοπής με εγκάρσιες κοπτικές κεφαλές επηρεάζονται λιγότερο από αλλαγές στα χαρακτηριστικά της βραχόμαζας ή σημειακά σκληρότερες επιφάνειες.
- Αν το σημείο περιστροφής του βραχίονα βρίσκεται περίπου στον άξονα της σήραγγας, μια διαμήκης κοπτική κεφαλή προκαλεί ελάχιστη υπερεκσκαφή. Οι εγκάρσιες κεφαλές πάντα προκαλούν κάποια υπερεκσκαφή, ανεξάρτητα από την θέση του μηχανήματος.

- Οι περισσότερες διαμήκεις κεφαλές παρουσιάζουν μικρότερη κατανάλωση διατρητικών στελεχών, πράγμα που οφείλεται κυρίως στην μικρότερη ταχύτητα κοπής.
- Οι εγκάρσιες κοπτικές κεφαλές προσφέρουν μεγαλύτερη ευελιξία και έχουν μεγαλύτερη γκάμα εφαρμογών. Η απόδοση τους δεν μειώνεται σημαντικά ακόμα και στα δυσκολότερα πετρώματα.

Το πρώτο βήμα λειτουργίας τους είναι η επαφή της κοπτικής κεφαλής με το μέτωπο, είτε με την κίνηση όλου του μηχανήματος, μέσω ειδικού συστήματος ερπυστριών, είτε με ειδικούς τηλεσκοπικούς βραχίονες. Οι μηχανές σημειακής κοπής μπορούν πρακτικά, μέσα στα γεωμετρικά όρια τους, να δημιουργήσουν διατομή οποιουδήποτε μεγέθους και σχήματος απαιτείται. Ακόμα, μπορεί να προσαρμοστεί εύκολα στις περισσότερες τροποποιήσεις της μεθόδου εκσκαφής. Η συλλογή των προϊόντων της εξόρυξης γίνεται αυτόματα από τις ειδικές διατάξεις, οι οποίες είναι ενσωματωμένες στο κύριο σώμα του μηχανήματος.

Στην πράξη, τα όρια λειτουργίας και απόδοσης των μηχανημάτων σημειακής κοπής εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του πετρώματος και τις συνθήκες που επικρατούν στο κάθε έργο (Καλιαμπάκος, 2004).

Στο Σχήμα 2.11 παρουσιάζεται ο τρόπος λειτουργίας ενός συστήματος σημειακής κοπής σε τρεις φάσεις:

- Διείσδυση
- κοπή μετώπου και
- διαμόρφωση προφίλ του μετώπου

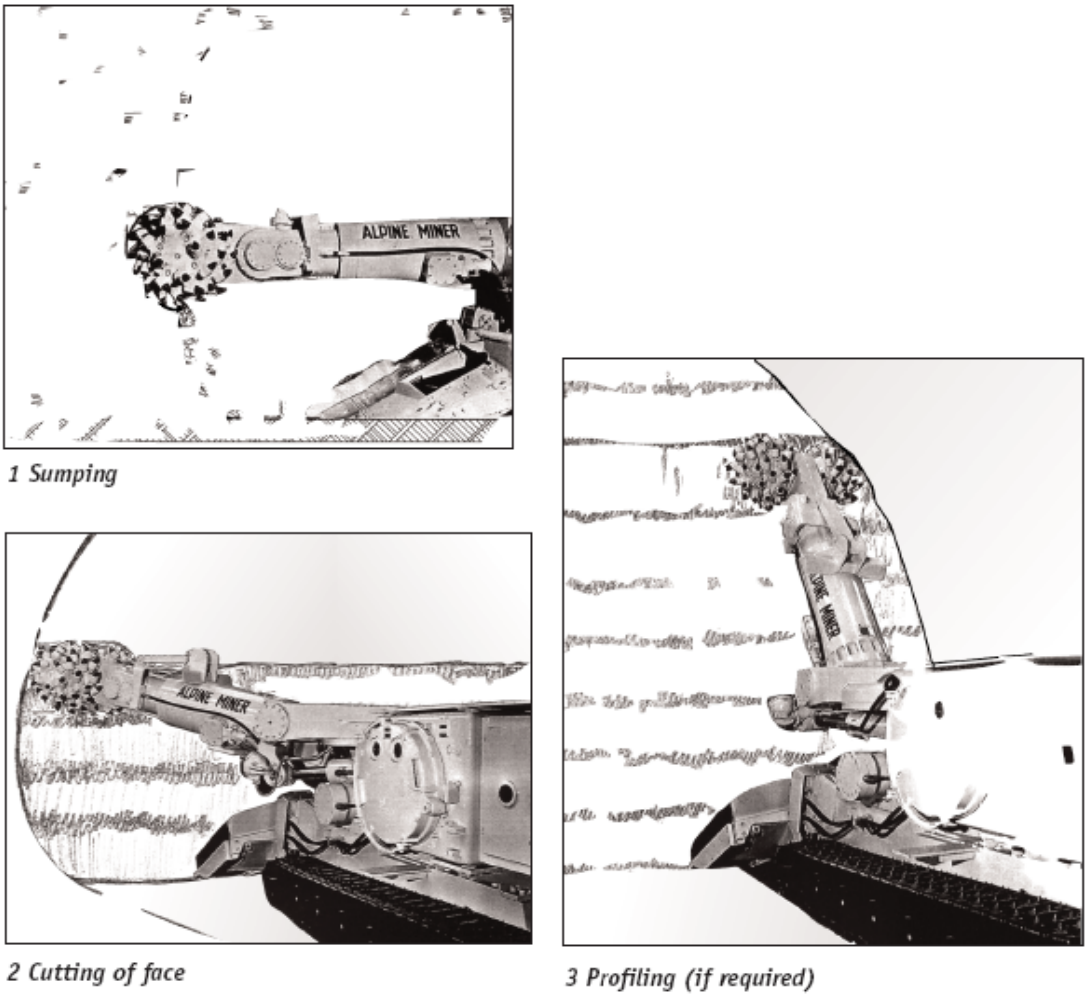


FIGURE *6.2.-41. Steps of excavation by a roadheader*

Σχήμα 2.11: Τρόποι λειτουργίας ενός roadheader (1.διείσδυση, 2.κοπή μετώπου και 3.διαμόρφωση προφίλ του μετώπου) (Εξαδάκτυλος, 2006).

β) Εκσκαφή με σφύρες

Η χρήση υδραυλικών κρουστικών σφυρών (hammer tunneling) για τη διάνοιξη σηράγγων είναι μια πρωτοπόρα μέθοδος και ξεκίνησε η χρήση της από το 1960. Στην Ιταλία και στην Ασία ένας μεγάλος αριθμός από σήραγγες έχουν κατασκευαστεί με αυτή τη μέθοδο, η οποία θεωρείται και οικονομική. Σ' αυτή την τεχνική 3000 kg (συνήθη όρια 2000-3500 kg) υδραυλικές σφύρες με ενέργεια κρούσης γύρω στα 6000 Joules (με μέσο όρο 2000 με 12000 J) χρησιμοποιούνται για την κατασκευή σηράγγων (Giovene, 1990). Η κρουστική σφύρα αποτελείται συνήθως από ένα κοπίδι άκμονα αυτό-ακονιζόμενο (Σχήματα 2.12, 2.13) (Ratan Raj Tatiya, 2005).

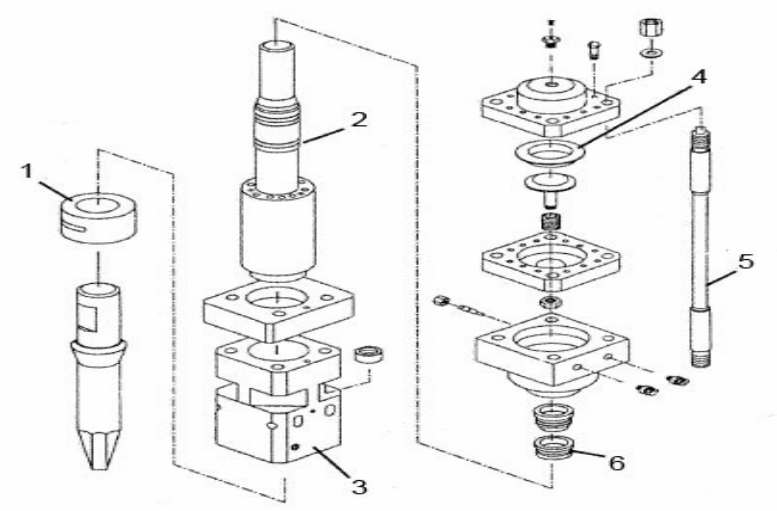
Η τεχνική είναι κατάλληλη για σήραγγες που υπερβαίνουν τα 30 m^2 αλλά σε μικρότερων διαστάσεων σήραγγες μπορεί να προκαλέσουν λειτουργικά προβλήματα εξαιτίας του περιορισμένου χώρου. Σε στενές σήραγγες (πλάτος < 8 m) μόνο ένας εκσκαφέας που φέρει σφύρα μπορεί να χωρίσει και να λειτουργήσει. Η εργασία χωρίζεται στις εξής διακριτές λειτουργίες:

1. εκσκαφή
2. φόρτωση
3. Απομάκρυνση και φόρτωση του εξορυσόμενου υλικού
4. Ενίσχυση και υποστήριξη των τοιχωμάτων της σήραγγας

Σχήμα 2.12: Κρουστική υδραυλική σφύρα (Πηγή: www.hydraulic-hammer.info)

Σε σήραγγες *με εμβαδό διατομής μεγαλύτερο των 70 m^2* η εξόρυξη και η μεταφορά του υλικού μπορεί να πραγματοποιηθεί ταυτόχρονα. Σ' αυτή την περίπτωση η διαδικασία λειτουργίας είναι η παρακάτω:

1. Εκσκαφή και απομάκρυνση των επισφαλών όγκων και η μεταφορά του εξορυσόμενου υλικού.
2. Ενίσχυση και κατάλληλη υποστήριξη των τοιχωμάτων της σήραγγας.

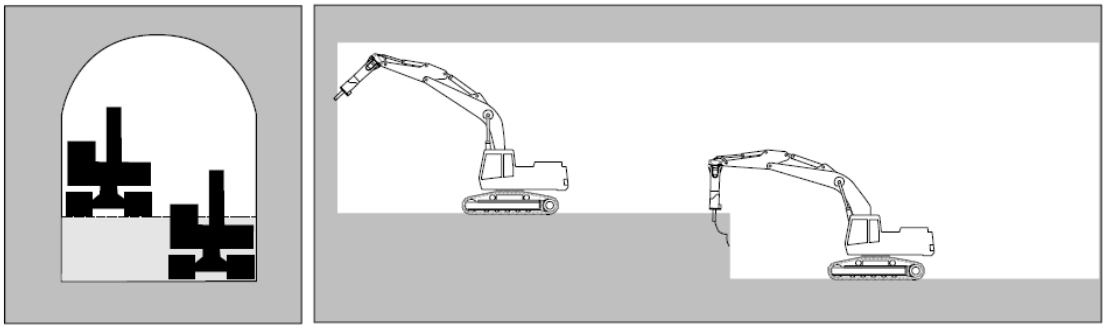


1.	Bottom bushing	4.	Diaphragm
2.	Piston	5.	Tie rod bolt
3.	Front head	6.	Top bushing

Σχήμα 2.13: Μέρη κρουστικής υδραυλικής σφύρας (Πηγή:www.gorillahammers.com)

Για σήραγγες *με ύψος μεγαλύτερο των 7 m*, η εργασία μπορεί να διαιρεθεί σε δύο φάσεις, γιατί ο εκσκαφέας είναι αδύνατον να εξορύξει το υλικό από τόσο ψηλά (Σχήμα 2.14) (Παπαντώνη, 2007 από Heiniö 1999):

- Εκσκαφή της σήραγγας από τον εκσκαφέα με τη σφύρα μέχρι ένα συγκεκριμένο ύψος (μικρότερο των 7 m).
- Ένας ακόμη συνδυασμός εκσκαφέα – σφύρας ξεκινά περίπου 150 m πίσω από τον πρώτο εκσκαφέα και μεγαλώνει το βάθος της σήραγγας μέχρι αυτή να αποκτήσει το επιθυμητό ύψος.



Σχήμα 2.14: Εκσκαφή σήραγγας σε δύο φάσεις με δύο σφύρες (Πηγή Παπαντώνη, 2007 από Heiniö, 1999)

Η διαδικασία εκσκαφής της σήραγγας ξεκινάει αρχικά σε ύψος 1 έως 1.5 m στο κέντρο τα σήραγγας πάνω από το πάτωμα. Η διάνοιξη συνεχίζεται στις πλευρές της εγκοπής μέχρι τα πλευρικά τοιχώματα της σήραγγας. Όταν ολοκληρωθεί το στάδιο η διαδικασία επαναλαμβάνεται προς την κορυφή της σήραγγας όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.15.

Σε σχέση με τη διάτρηση – ανατίναξη προτιμάται όταν ρηγματωμένες δομές βράχωδεν επιτρέπουν ελεγχόμενη ανατίναξη. Επίσης, οι δονήσεις που μεταφέρονται στο έδαφος αντιστοιχούν στο 5 – 10% των δονήσεων της ανατίναξης. Η χρήση των σφυρών περιλαμβάνει σχετικά λίγες φάσεις εργασίας και απαιτεί λιγότερο εξειδικευμένο εργατικό δυναμικό από τη διάτρηση – ανατίναξη. Σε σχέση με τα TBMs, το κόστος επένδυσης είναι πολύ μικρότερο και δεν θέτονται περιορισμοί στο σχήμα της σήραγγας (Ratan Raj Tatiya, 2005).

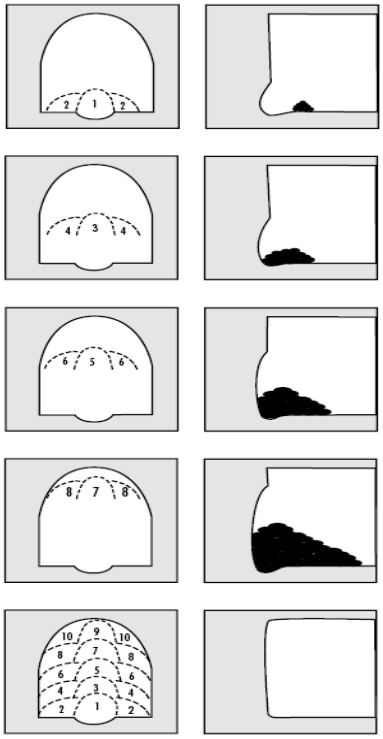


FIGURE *6.2.-47. Hammer working sequence from floor to roof.*

Σχήμα 2.15: Ακολουθία εργασιών της σφύρας (Πηγή Παπαντώνη, 2007 από Heiniö 1999)

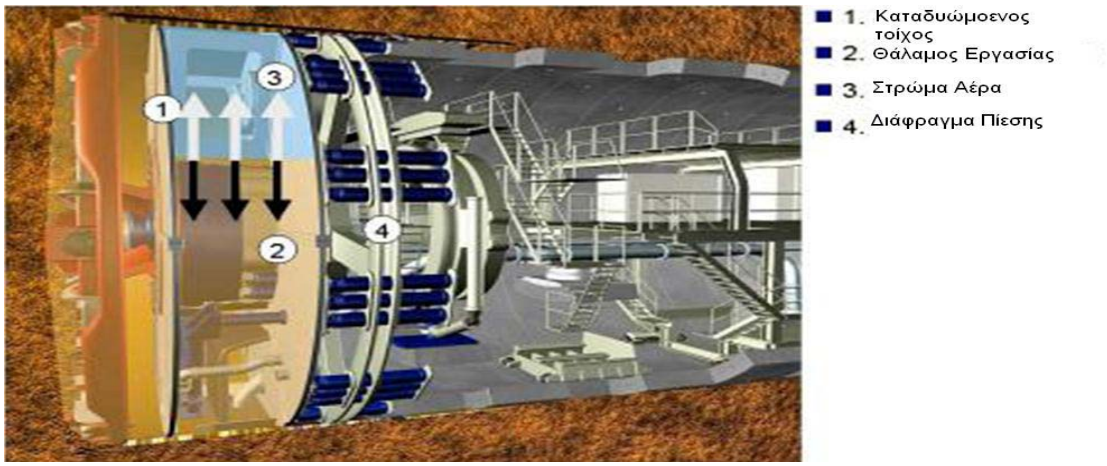
2.Μέθοδοι ολομέτωπης κοπής

α) Μηχανήματα ολομέτωπης κοπής

Τα μηχανήματα ολομέτωπης κοπής (Tunnel boring machines, T.B.M) χρησιμοποιούνται για τη διάνοιξη σηράγγων μέσα σε διαφορετικούς γεωλογικούς σχηματισμούς. Μπορεί να χρησιμοποιηθούν το ίδιο αποτελεσματικά για τη διάνοιξη μέσα από σκληρά ή χαλαρά πετρώματα ή εδάφη. Οι διάμετροι διάνοιξης κυμαίνονται από 1 m έως και 15 m (με τάση να φτάσουν τα 19 m) και οι ταχύτητες προσχώρησης ανάλογα με τις γεωλογικές συνθήκες από μερικά cm/βδομάδα έως και 130 m/βδομάδα (Εξαδάκτυλος, 2006).

Ένα TBM συνήθως αποτελείται από ένα ή δύο ασπίδες, μεταλλικούς κυλίνδρους και από συστήματα υποστήριξης. Στο ένα άκρο της ασπίδας τοποθετείται η κοπτική κεφαλή. Πίσω από την κοπτική κεφαλή υπάρχει ένας θάλαμος στον οποίο, ανάλογα με τον τύπο του κοπτικού, τα θραύσματα κοπής ανακατεύονται με πολφό (slurry), ή μένουν ως έχουν και μεταφέρονται στην έξοδο της σήραγγας. Η επιλογή της κοπτικής επαφής εξαρτάται από τις ιδιότητες του εδάφους. Πίσω από το θάλαμο βρίσκονται μια σειρά από υδραυλικοί γρύλοι (Σχήμα 2.16) οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την προώθηση του μηχανήματος. Οι γρύλοι τοποθετούνται στην επένδυση της σήραγγας που βρίσκεται πίσω από το μηχάνημα και εν συνεχεία το ωθούν προς την αντίθετη κατεύθυνση.

Η κοπτική κεφαλή του TBM περιστρέφεται με γωνιακές ταχύτητες από 1 έως 10 rpm. Η ταχύτητα περιστροφής καθορίζεται από τις γεωλογικές συνθήκες καθώς και από τις δυνατότητες του μηχανήματος. Ανάλογα με τη γεωλογία μπορεί η σήραγγα να υποστηριχθεί ή να αφεθεί ανυποστήρικτη. Η υποστήριξη γίνεται με την εισαγωγή προκατασκευασμένων δακτυλίων σκυροδέματος, οι οποίοι τοποθετούνται στη θέση τους καθώς το μηχάνημα προωθείται προς τα εμπρός.



Σχήμα 2.16: Τμήματα ενός TBM (Πηγή: Εξαδάκτυλος, 2006)

Η επιλογή μονής ή διπλής ασπίδας εξαρτάται κυρίως από τη γεωλογία της περιοχής καθώς και από την ταχύτητα προχώρησης. Διπλές ασπίδες χρησιμοποιούνται σε χαλαρά εδάφη ή ρηγματογόνες ζώνες όπου απαιτείται μεγάλη ταχύτητα προχώρησης. Αντίστοιχα η μονή ασπίδα χρησιμοποιείται σε σκληρά, συμπαγή πετρώματα (Εξαδάκτυλος, 2006).

-*TBM με σύστημα πλευρικής αντιστήριξης*

Ένα gripper TBM είναι κατάλληλο για εξόρυξη βραχομαζών που η ευστάθεια του μετώπου και του ανυποστύλωτου τμήματος της σήραγγας μπορεί να επιτευχθεί με προσωρινά μέσα υποστύλωσης όπως κοχλίες, μεταλλικά πλαίσια και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα . Το gripper TBM αποτελείται από τέσσερα σύνολα συστημάτων:

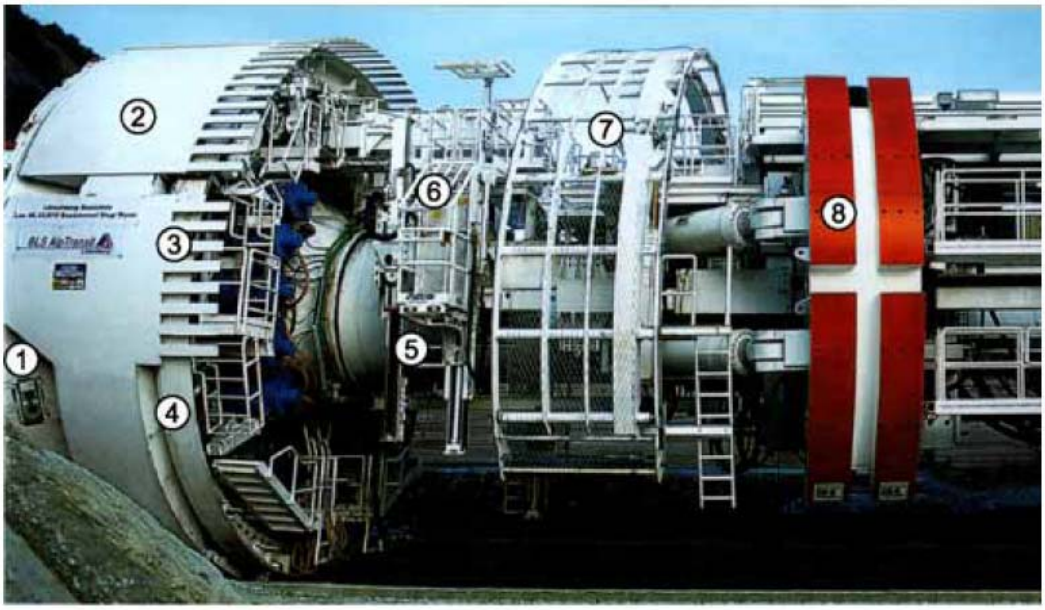
1. σύστημα διάτρησης
2. σύστημα προώθησης και πλευρικής αντιστήριξης (gripper)
3. σύστημα υποστύλωσης και τοποθέτησης των προκατασκευασμένων δακτυλίων σκυροδέματος,
4. σύστημα μεταφορικής ταινίας.

Το σύστημα διάτρησης αποτελείται από την κοπτική κεφαλή, του δίσκους κοπής, το σύστημα μετάδοσης κίνησης της κεφαλής και το σύστημα οδήγησης (Σχήμα 2.17). Η κοπτική κεφαλή προωθείται και οδηγείται με ηλεκτρουδραυλικό σύστημα κινητήρων.

-TBM με ασπίδα

Τα μηχανήματα ολομέτωπης κοπής με ασπίδα (Σχήμα 2.18) χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις που η βραχόμαζα λόγω της μικρής της αντοχής δεν μπορεί να παραλάβει τις δυνάμεις στήριξης της μηχανής TBM με σύστημα πλευρικής αντιστήριξης, που είναι απαραίτητες για την μετάδοση των δυνάμεων πρόωσης. Μια μηχανή TBM τύπου ασπίδας χωρίς μηχανισμό υποστήριξης του μετώπου μπορεί επίσης να εφαρμοσθεί αν το περίγραμμα της σήραγγας δεν είναι ευσταθές με συνέπεια να μπορεί να επισυμβούν καταπτώσεις. Το κέλυφος της ασπίδας που καλύπτει όλο το μηχάνημα χρησιμεύει ως προσωρινή υποστήριξη της σήραγγας.

Η μόνιμη επένδυση αποτελείται από προκατασκευασμένους δακτυλίους σκυροδέματος. Τα στοιχεία υποστύλωσης τοποθετούνται κάτω από την προστασία του ουραίου τμήματος της ασπίδας που ονομάζεται tail-skin.

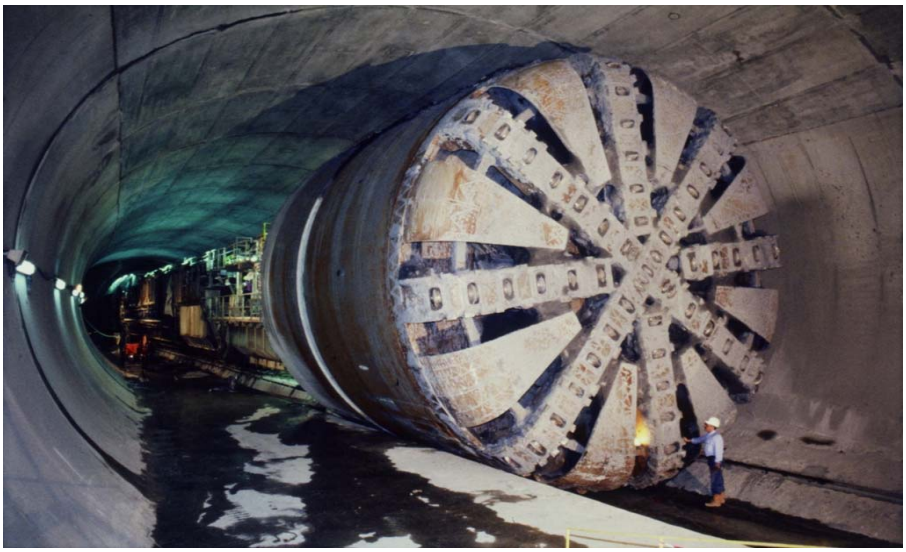


① cutterhead
② gripper shield
③ finger shield
④ ring erector
⑤ anchor drill
⑥ work cage with safety roof
⑦ wire mesh erector
⑧ gripper plates

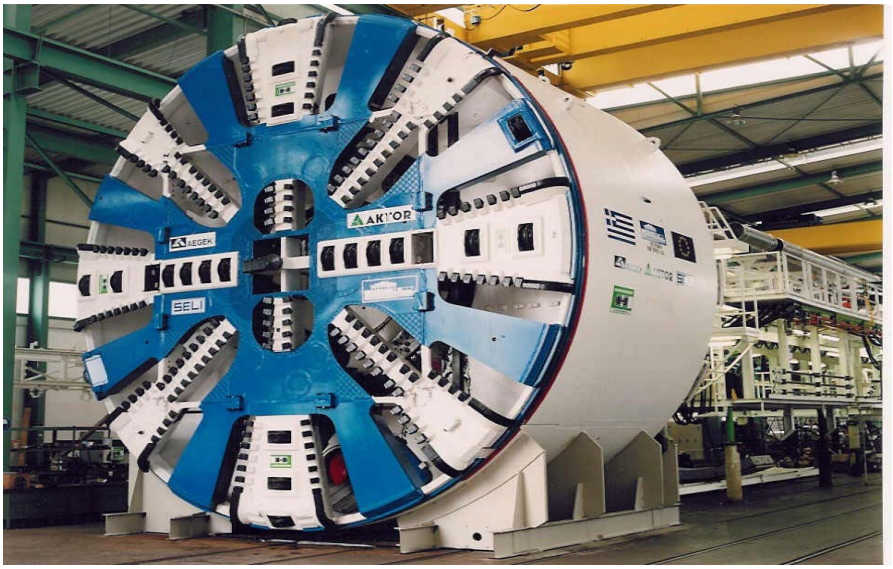
Σχήμα 2.17: TBM με πλευρικούς grippers (Πηγή: Εξαδάκτυλος, 2006)

-TBM χωρίς ασπίδα

Οι μηχανές της συγκεκριμένης αυτής κατηγορίας (Σχήμα 2.19) δεν έχουν ασπίδα, δηλαδή είναι ανοιχτές, εφόσον δεν απαιτείται η τοποθέτηση δακτυλίων αντιστηρίξεως στο πέτρωμα. Το μηχάνημα στηρίζεται στα πλευρικά τοιχώματα της σήραγγας με υδραυλικά έμβολα και η προώθηση της κοπτικής κεφαλής γίνεται από μια ή περισσότερες σειρές τηλεσκοπικών κυλίνδρων.



Σχήμα 2.18: Μηχάνημα Ολομέτωπης Κοπής με ασπίδα (Πηγή http//www.ametro.gr)



Σχήμα 2.19: Μηχάνημα Ολομέτωπης Κοπής χωρίς ασπίδα (πηγή http//www.ametro.gr)

-Ασπίδες με την χρήση πεπιεσμένου αέρα

Εάν έχει διαπιστωθεί η ύπαρξη υπογείου ύδατος, τότε αυτό πρέπει να κρατηθεί μακριά από το μέτωπο με την χρήση πεπιεσμένου αέρα και μηχανικά μέσα, εκτός αν μπορεί να γίνει ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα. Στον πεπιεσμένο αέρα υποβάλλεται είτε ολόκληρη η σήραγγα, είτε μονό το κοπτικό μηχάνημα, το οποίο είναι εφοδιασμένο με κατάλληλα διαφράγματα έτσι, ώστε μονό ο θάλαμος εργασίας να βρίσκεται υπό πίεση (Εξαδάκτυλος, 2006).

-Μηχανήματα ολομέτωπης κοπής πολφού ή νερού)

Το μίγμα μπεντονίτη-εδάφους μεταφέρεται υδραυλικά μέσω ενός σωλήνα. Το ρευστό και στερεό του μίγματος μπεντονίτη-εδάφους διαχωρίζονται από έναν διαχωριστή που βρίσκεται έξω από τη σήραγγα. Μηχανές ολομέτωπης κοπής (slurry or water shields*)* αυτού του τύπου εφαρμόζονται στις εξής περιπτώσεις:

- Αν το έδαφος που περιβάλλει την εκσκαφή και το μέτωπο πρέπει να υποστηρίζεται.
- Αν σε ένα πολύ υδατοπερατό έδαφος πρέπει να αποφευχθεί η εισροή ύδατος στην εκσκαφή.

-Ασπίδες με ισορροπία πίεσης γαιών (EPB)

Στην ασπίδα ισορροπίας γαιών το μέτωπο συγκρατείται με τη χρήση του εξορυγμένου εδάφους ή πετρώματος που έχουν λάβει τη μορφή λάσπης. Η λάσπη αυτή σχηματίζεται με τη βοήθεια των κοπτικών εργαλείων και των εργαλείων ανάμιξης στο μέτωπο και στον θάλαμο εκσκαφής και με τη βοήθεια υγρών ή αφρωδών μέσων. Ο θάλαμος εκσκαφής, που βρίσκεται υπό πίεση (το πολύ 5 atm), είναι διαχωρισμένος από την υπόλοιπη σήραγγα με τη χρήση στεγανών διαφραγμάτων. Το εδαφικό υλικό απομακρύνεται, από το μέτωπο, με τη χρήση κοπτικών, τα οποία είναι προσαρμοσμένα στην κοπτική κεφαλή και στην συνεχεία με τη χρήση κοχλία, ο οποίος τα μεταφέρει στην ατμοσφαιρική πίεση και μακριά από το μέτωπο. Τα μηχανήματα EPB χρησιμοποιούνται σε τμήματα σήραγγας που βρίσκονται σε έδαφος και πέτρωμα μαζί. Εφαρμόζο-

νται επίσης σε μεταβαλλόμενες γεωλογικές συνθήκες ή σε μικτές γεωλογίες μετώπων και σε πολύ αποσαρθρωμένα πετρώματα (Εξαδάκτυλος, 2006).

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των εκσκαφών με μηχανές ολομέτωπου κοπής είναι τα ακόλουθα:

- Η ταχύτητα προχώρησης είναι μεγάλη (ιδιαίτερα σε μαλακά και όχι πολύ συνεκτικά πετρώματα).
- Τα περιβάλλοντα πετρώματα καθώς και η προς εξόρυξη βραχομάζα παραμένουν αδιατάρακτα.
- Οι παρειές της εκσκαφής είναι λείες
- Συνήθως δεν απαιτείται πρόσθετη εργασία για την περαιτέρω διαμόρφωση της διατομής της εκσκαφής
- Η ευθυγραμμία της στοάς δύναται να ελέγχεται ασφαλέστερα και ακριβέστερα
- Απαιτείται λιγότερο προσωπικό ανά βάρδια.
- Η ασφάλεια γενικά είναι καλύτερη και ειδικότερα για τους εργαζόμενους στο μέτωπο της εκσκαφής
- Η διαδικασία είναι πλήρως αυτοματοποιημένη και δεν υπάρχουν διακοπές στην συνεχή διαδικασία κοπής - υποστήριξης
- Επιτυγχάνεται απολύτως το επιθυμητό μέγεθος της διατομής με ελάχιστη υπερεκσκαφή (overbreak)
- Μπορεί να γίνει αξιόπιστη πρόβλεψη της πορείας προόδου και είναι εφικτός ο σωστός χαρακτηρισμός των υπογείων συνθηκών.
- Η πορεία της εκσκαφής ελέγχεται ηλεκτρονικά με αισθητήρες laser και η απόκλιση από την προκαθορισμένη μηκοτομή είναι από ελάχιστη έως μηδαμινή
- Μπορούν να συλλεχθούν μετρήσεις των ιδιοτήτων της βραχομάζας από αισθητήρες που βρίσκονται στην κοπτική κεφαλή
- Η λειτουργία γίνεται χωρίς έντονους κραδασμούς, επομένως δεν υφίστανται-σχεδόν καθόλου ανησυχία για τις εδαφικές δονήσεις.
- Η εκσκαφή της επιφάνειας όρυξης είναι ομαλή, οπότε έχουμε μειωμένο ποσοστό σκόνης, μικρότερο κόστος επένδυσης, μείωση ρίσκου για την εισροήνερών.

- Η αποκομιδή του θρυμματισμένου υλικού (muck) είναι εύκολη και επιτυγχάνεται επαναχρησιμοποίηση αυτού.

Τα κυριότερα μειονεκτήματα των εκσκαφών με μηχανές ολομέτωπου κοπής είναι τα ακόλουθα (Εξαδάκτυλος, 2006):

- Η αρχική επένδυση κεφαλαίου για τον εξοπλισμό είναι ιδιαίτερα υψηλή Τα μηχανήματα κατασκευάζονται κατά παραγγελία και για συγκεκριμένες συνθήκες
- Ο χρόνος παράδοσης του εξοπλισμού είναι μεγάλος
- Τα συστήματα αυτά χαρακτηρίζονται από μικρή ευκινησία και μεγάλη περίοδο εγκατάστασης και έναρξης λειτουργίας.
- Οι μεγάλοι χρόνοι κινητοποίησης και η μικρή κινητικότητα του βαρύεξοπλισμού, καθιστούν τις διαδικασίες του TBM γενικά πολύ δαπανηρές, για μικρού μήκους σήραγγες
- Υφίστανται αδυναμία ευχερούς αντιμετώπισης μεταβαλλόμενων συνθηκών εξόρυξης (σκληρότητα, υδροφορία, κ.λπ.)
- Οι μετατροπές στα εν λόγω μηχανήματα είναι περιορισμένης ικανότητας, σε περίπτωση αλλαγής των γεωλογικών συνθηκών.
- Υφίστανται αδυναμία εφαρμογής της μεθόδου για την όρυξη σκληρών σχηματισμών, η όρυξη με TBM δεν εφαρμόζεται σε όλα τα πετρώματα.
- Δεν υπάρχει ποικιλία στη διάμετρο και στο σχήμα της εκσκαφής, το TBM διανοίγει μόνο κυκλικές διατομές
- Σε πολύ σκληρό πέτρωμα αναμένονται, μειωμένα ποσοστά διείσδυσης και αύξηση των δαπανών σε κοπτικά για σκληρό και λείο πέτρωμα

β) μικροσήραγγες

Η διάνοιξη μικροσηράγγων (microtunneling*)* με ταυτόχρονη υδραυλική προώθηση σωλήνων (pipe jacking), είναι μια μέθοδος εγκατάστασης, επιδιόρθωσης ή αντικατάστασης υπόγειων αγωγών, οχετών κλπ. Ισχυροί υδραυλικοί προωθητές χρησιμοποιούνται για να ωθήσουν τις ειδικά κατασκευασμένες σωλήνες μέσα στο έδαφος πίσω από τον εκσκαφέα παράλληλα με την εκσκαφή. Η μέθοδος αυτή προσφέρει έναν ευέ-

λικτο, συμπαγή, υδατοστεγή και ολοκληρωμένο αγωγό όσο αυτός διανοίγεται (Εξαδάκτυλος, 2006).

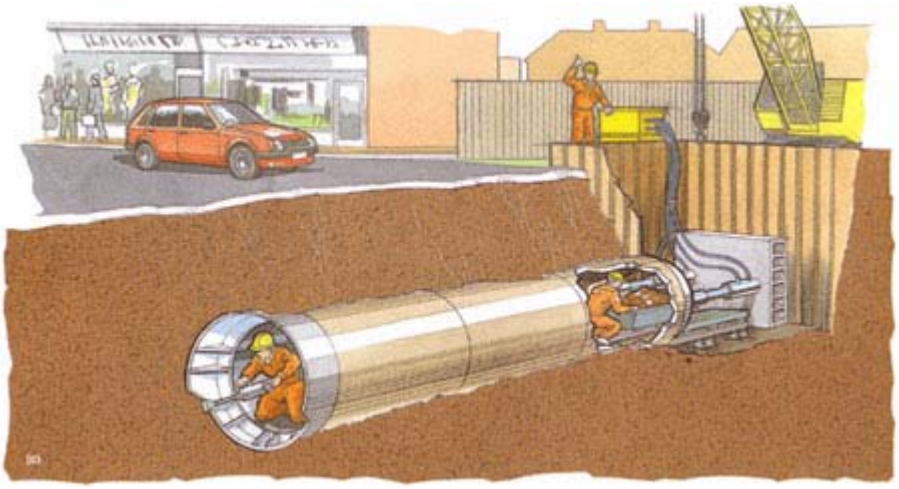
Δεν υπάρχει κανένα θεωρητικό όριο για το μήκος του αγωγού που θα κατασκευαστεί, παρόλο που η γεωτεχνικές παράμετροι και τα οικονομικά του έργου μπορεί να δώσουν περιορισμούς. Οδηγοί σε μήκος μερικών εκατοντάδων μέτρων ή σε τόξο έχουν πλέον καθιερωθεί σαν ρουτίνα. Ένας αριθμός συστημάτων διάνοιξης είναι πλέον διαθέσιμα στην αγορά. Σε αυτά περιλαμβάνονται χειροκίνητα, μηχανοκίνητα, και μέσω τηλεχειρισμού. Οι κατασκευαστικές ανοχές είναι συμβατές με άλλες μεθόδους διάνοιξης σηράγγων και η μέθοδος αυτή παρουσιάζει ελάχιστη υπερεκσκαφή και κατά συνέπεια καλύτερη εδαφική υποστήριξη.

Οι μέθοδοι εκσκαφής είναι πανομοιότυποι με αυτές άλλων τρόπων διάνοιξης σηράγγων χρησιμοποιώντας είτε χειροκίνητο είτε μηχανοκίνητο τρόπο διάνοιξης. Επίσης ασπίδες, υποστήριξη εκσκαφής και μετώπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ένα μεγάλο εύρος εδαφών. Προκειμένου να εγκατασταθεί ένας αγωγός με αυτή τη μέθοδο απαιτούνται ένα πηγάδι προώθησης και ένα πηγάδι υποδοχής, στο τέλος του αγωγού, απ' όπου θα ανασυρθεί ο εκσκαφέας. Οι διαστάσεις και η κατασκευή του φρεατίου προώθησης μπορεί να ποικίλει σύμφωνα με τις απαιτήσεις, είτε οικονομικές, είτε τεχνικές, με τις πρώτες να παίζουν τον σημαντικότερο ρόλο (Εξαδάκτυλος, 2006).

Η μηχανοποιημένη εκσκαφή μπορεί να απαιτεί μεγαλύτερα φρεάτια προώθησης από ότι η χειροκίνητη εκσκαφή αρκετό ώστε να κατασκευαστεί τοίχος προώθησης, η αντίδραση της προώθησης πρέπει να αντισταθμιστεί με άλλου είδους θεμελιώσεις που να μπορούν να παραλάβουν οριζόντια φορτία.

Έμβολα υψηλής υδραυλικής πίεσης δίνουν ικανοποιητικές δυνάμεις προώθησης προκειμένου να προωθηθούν τσιμεντένιοι αγωγοί. Η διάμετρος του εμβόλου καθώς και μήκος του εμβόλου προσαρμόζονται ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις. Προκειμένου να εξασφαλιστεί η ισοκατανομή των δυνάμεων στον αγωγό, τοποθετείται ένας δακτύλιος ανάμεσα στα έμβολα και την σωλήνα. Τα έμβολα ρυθμίζονται ώστε να έχουν την ίδια δύναμη και επιμήκυνση. Ο αριθμός των εμβόλων μπορεί να ποικίλει (πάντα ζυγός αριθμός) ανάλογα με το μέγεθος του αγωγού, τον τύπο του εδάφους, την δύναμη των εμβόλων και το συνολικό μήκος του αγωγού (Εξαδάκτυλος, 2006).

Στο Σχήμα 2.19 φαίνεται μια τυπική διάταξη pipe jacking.



Σχήμα 2.19: Τυπική διάταξη Pipe Jacking (Πηγή: www.pipejacking.org, 2007)

3. Διάνοιξη σηράγγων με την Ν.Α.Τ.Μ.

Η λεγόμενη Νέα Αυστριακή Μέθοδος Διάνοιξης Σηράγγων ουσιαστικός δεν αποτελεί μια "μέθοδο" αλλά περιλαμβάνει ένα σύνολο τεχνικών διάνοιξης και υποστήριξης σηράγγων οι οποίες εφαρμόσθηκαν συστηματικά κατά τη διάνοιξη σηράγγων στις Αυστριακές Άλπεις στις αρχές της δεκαετίας του 1960. Οι τεχνικές αυτές είχαν εφαρμοσθεί και πριν το 1960 τόσο στην Αυστρία όσο και σε άλλα μέρη του κόσμου αλλά η συστηματοποίηση και ονομασία τους (NATM) έγινε από Αυστριακούς Μηχανικούς (Rabcewicz, Mueller, Brunner και Pacher) περί το 1960. Έτσι, αν και η "Μέθοδος NATM" όταν προτάθηκε δεν ήταν ούτε "Νέα" ούτε "Αυστριακή" (αφού είχε εφαρμοσθεί και στο παρελθόν σε άλλες χώρες) αλλά ούτε και "Μέθοδος" (αφού ουσιαστικά αποτελείται από ένα σύνολο τεχνικών οι οποίες μάλιστα αλλάζουν με την πρόοδο της τεχνολογίας), διατήρησε διεθνώς μέχρι σήμερα το όνομά της (Καββαδάς, 2004).

Η συνήθης εφαρμογή της μεθόδου NATM είναι η διάνοιξη της διατομής της σήραγγας σε μια ή περισσότερες φάσεις και η άμεση υποστήριξη του τοιχώματος με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (απλό, ινοπλισμένο, οπλισμένο με χαλύβδινο πλέγμα ή ενισχυμένο με χαλύβδινες νευρώσεις από ράβδους ή διατομές I) και αγκύρια (παθητικά ή προεντεταμένα). Σημειώνεται ότι η υποστήριξη του τοιχώματος της σήραγγας μόνον με αγκύρια χωρίς εκτοξευόμενο σκυρόδεμα υπάγεται επίσης στην κατηγορία της με-

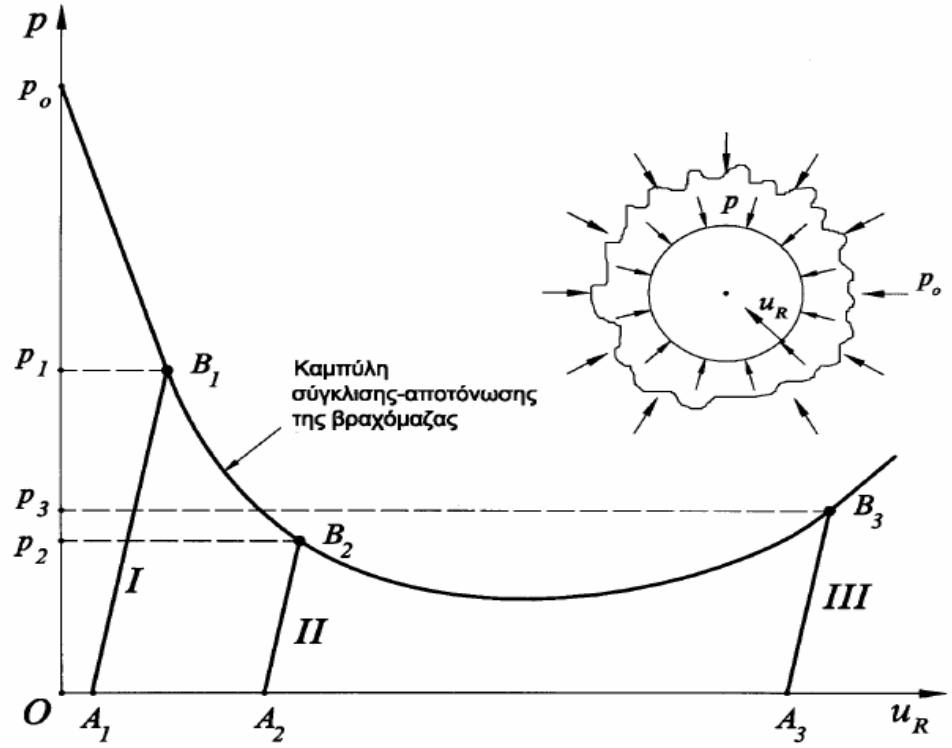
θόδου ΝΑΤΜ. Τέλος, κατά τη μέθοδο ΝΑΤΜ η ως άνω άμεση υποστήριξη συνήθως ακολουθείται σε μεταγενέστερο χρόνο από την κατασκευή της "τελικής επένδυσης" της σήραγγας η οποία θεωρείται ως φέρον στοιχείο (σε ορισμένες περιπτώσεις δεν κατασκευάζεται τελική επένδυση αλλά η άμεση υποστήριξη σχεδιάζεται ώστε να αναλάβει το σύνολο των φορτίων της περιβάλλουσας βραχόμαζας).

Η βασική αρχή της μεθόδου ΝΑΤΜ είναι ότι η διάνοιξη της σήραγγας και η κατασκευή της άμεσης υποστήριξης γίνονται κατά τρόπο ώστε να ενεργοποιηθεί η αντοχή της περιβάλλουσας βραχόμαζας (μέσω της ελεγχόμενης σύγκλισης του τοιχώματος της σήραγγας) σε ικανό βαθμό ώστε να μειωθούν αρκετά οι πιέσεις επί της άμεσης υποστήριξης αλλά όχι τόσο ώστε να προκληθεί αποδιοργάνωση της βραχόμαζας με συνέπεια την αύξηση των πιέσεων στην άμεση υποστήριξη και τελικώς την κατάρρευση της διατομής της σήραγγας (Σχήμα 2.12) (Καββαδάς, 2004).

Δεδομένου ότι ένα σημαντικό ποσοστό της σύγκλισης του τοιχώματος της σήραγγας συμβαίνει εμπρός από το μέτωπο εκσκαφής (δηλαδή πριν η εκσκαφή φθάσει στη συγκεκριμένη θέση) και επιπλέον ότι η σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας αυξάνει με ταχείς ρυθμούς στην περιοχή του μετώπου εκσκαφής, προκύπτει ότι στις περισσότερες περιπτώσεις η αντοχή της βραχόμαζας έχει ενεργοποιηθεί επαρκώς πολύ κοντά στο μέτωπο της εκσκαφής και συνεπώς η άμεση υποστήριξη θα πρέπει να κατασκευασθεί κατά το δυνατόν πλησιέστερα στο μέτωπο εκσκαφής. Η παραπάνω αρχή της μεθόδου ΝΑΤΜ εξειδικεύεται ως εξής (Καββαδάς, 2004) :

1. Η εκσκαφή της διατομής της σήραγγας συνήθως γίνεται σε περισσότερες της μιας φάσεις. Τυπικές περιπτώσεις φαίνονται στα σχήματα 2.13, 2.14, και 2.15. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται η επιφάνεια του μετώπου της εκσκαφής κάθε φάσης και συνεπώς μειώνεται η συνολική σύγκλιση του τοιχώματος (σε σχέση με την εκσκαφή της διατομής σε μια φάση) και βελτιώνεται η ευστάθεια της διατομής αποφεύγοντας την αποδιοργάνωση της περιβάλλουσας βραχόμαζας.
2. Κατασκευή της άμεσης υποστήριξης της διατομής σε μικρή απόσταση από το μέτωπο της εκσκαφής ώστε να περιορισθεί η περαιτέρω σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας και να αποφευχθεί η αποδιοργάνωση της δομής της βραχόμαζας. Τούτο επιτυγχάνεται με την προώθηση της κάθε φάσης εκσκαφής σε

μικρά βήματα της τάξεως των 1-2 μέτρων αναλόγως της ποιότητας της βραχόμαζας. Το μήκος του βήματος εκσκαφής μειώνεται όσο πτωχότερη είναι η ποιότητα της βραχόμαζας (επειδή στις περιπτώσεις αυτές η αποδιοργάνωση της δομής της βραχόμαζας είναι ταχύτερη).



Σχήμα 2.20: Επιρροή του χρόνου τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης στην πίεση της βραχόμαζας επί της υποστήριξης της σήραγγας(Καββαδάς, 2004).

I: πολύ νωρίς. Η πίεση στην άμεση υποστήριξη (p_1) είναι πολύ μεγάλη.

II: κανονικός χρόνος κατασκευής της άμεσης υποστήριξης. Η πίεση (p_2) έχει μειωθεί σημαντικά.

III: πολύ αργά. Η πίεση (p_3) έχει αυξηθεί λόγω αποδιοργάνωσης χαλάρωσης της βραχόμαζας, με συνέπεια τον κίνδυνο κατάρρευσης

3. Η άμεση υποστήριξη της διατομής θα πρέπει να αναλάβει φορτία κατά το δυνατόν ταχύτερα ώστε να περιορισθεί η περαιτέρω σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας και συνεπώς η αποδιοργάνωση της δομής της βραχόμαζας. Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πλεονεκτεί ως προς την άποψη αυτή επειδή βρίσκεται σε απόλυτη επαφή με την περιβάλλουσα βραχόμαζα (και συνεπώς η παραμικρή σύγκλιση του τοιχώματος προκαλεί τη φόρτισή του) και επιπλέον έχει μικρό χρόνο πήξεως (μερικές ώρες). Η χρήση αγκυρίων βράχου σε κανο-

νικό κάνναβο οπλίζει την περιβάλλουσα βραχόμαζα και συντελεί στην καλύτερη ανάπτυξη της λειτουργίας τόξου στη βραχόμαζα. Πράγματι, η τάση της βραχόμαζας να παραμορφωθεί διατμητικά προκαλεί (μέσω της διασταλτικότητας) την ανάπτυξη εφελκυσμού στα αγκύρια και συνεπώς θλίψης στη βραχόμαζα. Η θλίψη της βραχόμαζας αυξάνει την αντοχή της και μειώνει την παραμορφωσιμότητά της λόγω εγκιβωτισμού (λειτουργία ανάλογη με αυτή του σπειροειδούς οπλισμού στα υποστυλώματα).

4. Ολοκλήρωση του δακτυλίου του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στο σύνολο της διατομής (δηλαδή και στο δάπεδο). Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ένας κλειστός δακτύλιος με πολύ μικρή παραμορφωσιμότητα ώστε να περιορίζονται οι περαιτέρω συγκλίσεις του τοιχώματος. Η δημιουργία κλειστού δακτυλίου με την ταχεία σκυροδέτηση του δαπέδου (early invert closure) συντελεί τα μέγιστα στη μείωση της σύγκλισης του τοιχώματος της σήραγγας και στην ευστάθεια της διατομής. Σημειώνεται ότι στην περίπτωση βραχόμαζας με καλά μηχανικά χαρακτηριστικά συχνά δεν είναι απαραίτητο να ολοκληρώνεται ο δακτύλιος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, δηλαδή δεν επενδύεται με σκυρόδεμα το δάπεδο της σήραγγας.
5. Στην περίπτωση διάνοιξης σηράγγων σε βραχόμαζα με πολύ πτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά ή σε εδαφικούς σχηματισμούς, είναι συνήθης η εμφάνιση φαινομένων αστάθειας του μετώπου της εκσκαφής (face instability). Τα φαινόμενα αυτά προκαλούν αύξηση της σύγκλισης και αποδιοργάνωση της δομής της βραχόμαζας με πιθανή κατάληξη την κατάρρευση της σήραγγας. Σε τέτοιες περιπτώσεις μπορούν να ληφθούν μέτρα βελτίωσης της ευστάθειας του μετώπου, όπως αύξηση του αριθμού των φάσεων εκσκαφής (ώστε να μειωθούν οι διαστάσεις του μετώπου), διαμόρφωση του μετώπου με κλίση ως προς την κατακόρυφο (δηλαδή αφήνοντας έναν εδαφικό τάκο στον πόδα του μετώπου), ενίσχυση του μετώπου με αγκύρια, ενίσχυση της οροφής με ράβδους (spiles) ή δοκούς προπορείας (forepoling), κατασκευή τσιμεντενέσεων, επένδυση του. μετώπου με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κλπ.
6. Η πυκνότητα των μέτρων άμεσης υποστήριξης προσαρμόζεται στις επιτόπου συνθήκες. Ειδικότερα, η μέθοδος NATM βασίζεται σε μετρήσεις της συμπεριφοράς του τμήματος της σήραγγας που έχει ήδη διανοιχθεί (όπως μετρήσεις της σύγκλισης του τοιχώματος, της πίεσης της βραχόμαζας στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, της θλιπτικής τάσης στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κλπ). Με τον

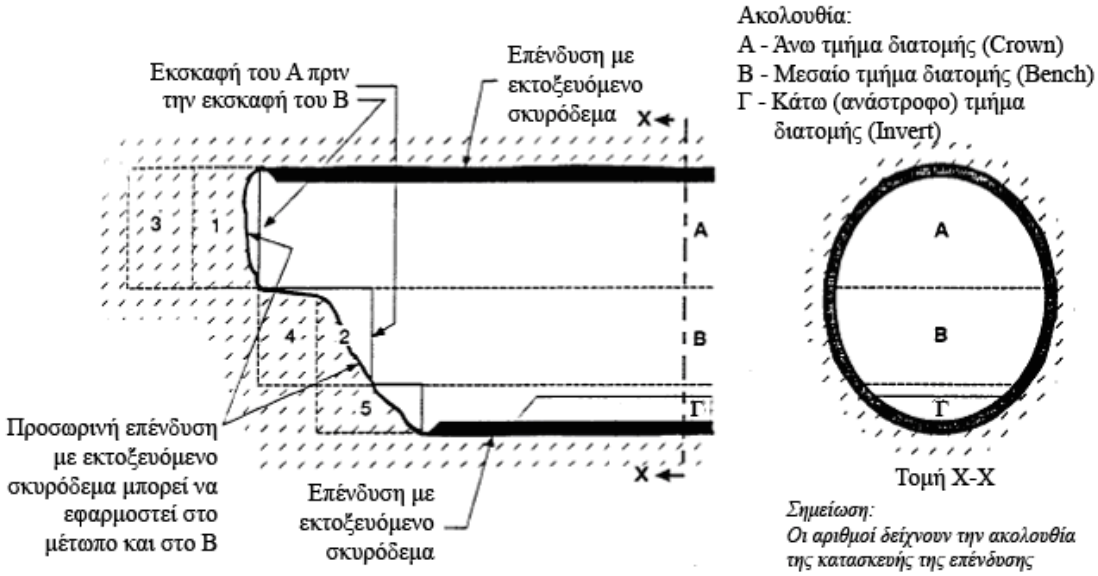
τρόπο αυτό, οποιαδήποτε απόκλιση από την προηγούμενη συμπεριφορά θα πρέπει να αξιολογείται και να ερμηνεύεται, στη συνέχεια δε να αντιμετωπίζεται με κατάλληλη προσαρμογή των μέτρων άμεσης υποστήριξης.

Ως εκ της φύσεως της μεθόδου, ο σχεδιασμός της διάνοιξης και άμεσης υποστήριξης της σήραγγας θα πρέπει να είναι ευπροσάρμοστος στις επιτόπου συνθήκες. Για το σκοπό αυτό ο σχεδιασμός γίνεται ως εξής:

a) Με βάση τα αποτελέσματα των γεωτεχνικών ερευνών η βραχόμαζα που αναμένεται να συναντηθεί κατά μήκος της σήραγγας κατατάσσεται σε 3-5 κατηγορίες (με βάση τα μηχανικά χαρακτηριστικά). Οι κατηγορίες αυτές συνήθως βασίζονται στα γνωστά συστήματα κατατάξεως (RMR, GSI, Q).
b) Μορφώνονται 3-5 τυπικές διατομές διάνοιξης και άμεσης υποστήριξης της σήραγγας οι οποίες διαφέρουν ως προς το είδος των μέτρων υποστήριξης (π.χ. εάν διαθέτουν ενίσχυση με χαλύβδινα πλαίσια) και την πυκνότητά τους (π.χ. διάσταση του κανάβου των αγκυρίων ή πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος). Οι τυπικές διατομές μπορεί να διαφέρουν και ως προς τον αριθμό των φάσεων εκσκαφής. Κατά τη μόρφωση των διατομών λαμβάνεται υπόψη ότι θα πρέπει να είναι κατασκευαστικά δυνατή η αλλαγή της διατομής της σήραγγας από τον ένα τύπο στον άλλο με σχετική ευχέρεια.
c) Διατυπώνεται ένα σύνολο κριτηρίων με βάση τα οποία θα είναι δυνατή η επιλογή της εφαρμοστέας τυπικής διατομής κατά την κατασκευή της σήραγγας. Τα κριτήρια αυτά συνήθως βασίζονται σε ένα συνδυασμό παραγόντων όπως η ποιότητα της βραχόμαζας, το πάχος των υπερκειμένων γαιών, ο προσανατολισμός των ασυνεχειών της βραχόμαζας, τα αποτελέσματα των μετρήσεων συμπεριφοράς του έργου σε προηγούμενες διατομές ή σε προηγούμενη φάση εκσκαφής στη συγκεκριμένη θέση κλπ. Στις περισσότερες περιπτώσεις η άμεση υποστήριξη της σήραγγας ακολουθείται από την κατασκευή της τελικής επένδυσης η οποία αναλαμβάνει μέρος (ή το σύνολο) των φορτίων της περιβάλλουσας βραζόμαζας. Η τελική επένδυση συνήθως κατασκευάζεται μετά την ολοκλήρωση της διάνοιξης και άμεσης υποστήριξης του συνόλου του μήκους της σήραγγας αλλά οπωσδήποτε αφού η σήραγγα ισορροπήσει με την άμεση υποστήριξη, δηλαδή αφού πρακτικώς μηδενισθούν οι ρυθμοί εξέλιξης των μετακινήσεων, εντάσεων κλπ.

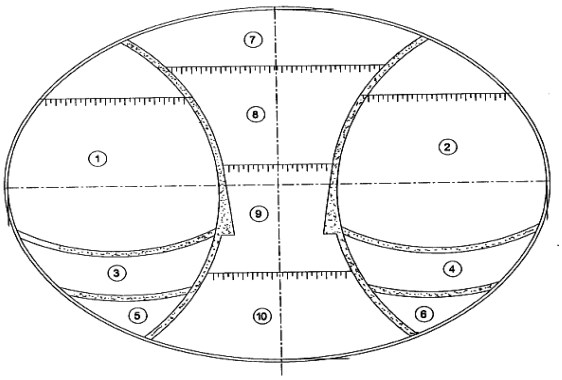
Η εκσκαφή σηράγγων με τη μέθοδο NATM συνήθως γίνεται σε περισσότερες της μιας φάσεις. Τα κυριότερα συστήματα εκσκαφής είναι (Καββαδάς, 2004):

- Εκσκαφή μετώπου-βαθμίδας (top heading and bench). Η εκσκαφή της σήραγγας γίνεται από πάνω προς τα κάτω. Η πρώτη φάση εκσκαφής (top heading) μπορεί να εκσκαφθεί και σε περισσότερες υποφάσεις κατά το πλάτος της σήραγγας. Στην περίπτωση αυτή η πρώτη φάση ουσιαστικά αποτελεί σήραγγα-πιλότο που χρησιμεύει και για τη διερεύνηση των συνθηκών που αναμένεται να συναντηθούν κατά τη διάνοιξη της σήραγγας. Παραλλαγή της μεθόδου με τρεις φάσεις περιγράφεται στο Σχήμα 2.21.
- Εκσκαφή με πλευρικές στοές (side-wall drifts). Η μέθοδος εφαρμόζεται σε σήραγγες μεγάλου εύρους σε βραχόμαζες με σχετικώς πτωχά χαρακτηριστικά ή στις περιπτώσεις όπου είναι κρίσιμος ο περιορισμός της σύγκλισης του τοιχώματος (π.χ. σε αστικές περιοχές). Περιλαμβάνει την υποδιαίρεση της διατομής κατά το πλάτος και διάνοιξη πρώτα της μιας πλευράς και στη συνέχεια της άλλης πλευράς. Σε ιδιαιτέρως δύσκολες συνθήκες η μέθοδος μπορεί να περιλάβει δυο πλευρικές στοές και ενδιάμεσο πυλώνα (twin side-wall drifts with central pillar). Στην περίπτωση αυτή πρώτα διανοίγονται οι πλευρικές στοές και στο τέλος διανοίγεται ο κεντρικός πυλώνας (Σχήμα 2.22) (Καββαδάς, 2004).



Σχήμα 2.21:Διάνοιξη σήραγγας σε τρεις φάσεις καθ' ύψος (top heading-bench-invert) (Πηγή: Καββαδάς 2004)

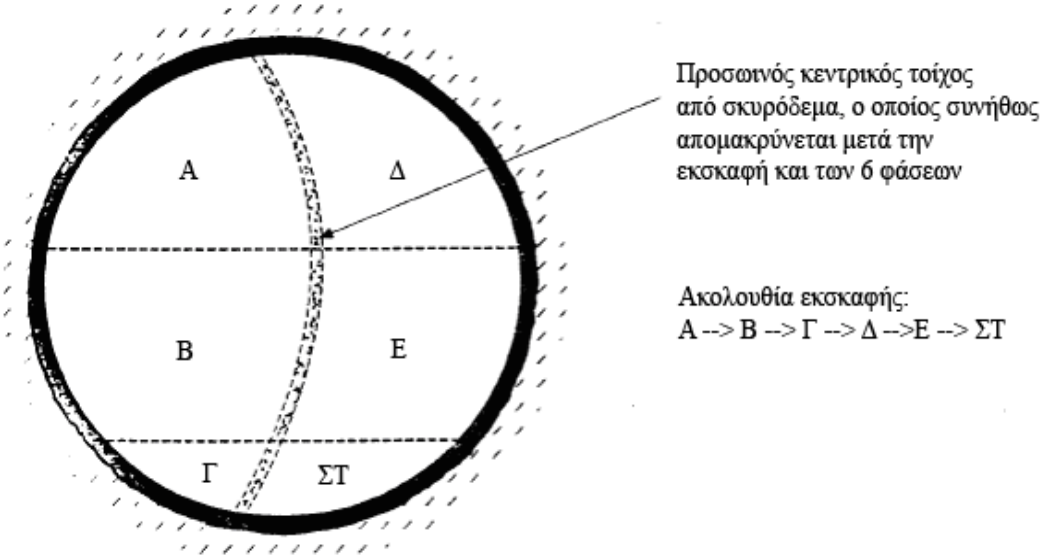
- Μια άλλη μέθοδος είναι η διάνοιξη σήραγγας σε έξι φάσεις (δύο κατά πλάτος και τρεις καθ' ύψος) (Σχήμα 2.23).



Σχήμα 2.22: Διάνοιξη σήραγγας με δύο πλευρικές στοές και κεντρικό πυλώνα (Πηγή: Καβ-βαδάς, 2004)

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου NATM σε σχέση με τις εναλλακτικές μεθόδους (διάνοιξη με TBM ή ασπίδα) είναι τα εξής:

- ✓ Προσαρμόζεται εύκολα σε μεταβαλλόμενες γεωτεχνικές συνθήκες.
- ✓ Προσαρμόζεται εύκολα σε μεταβολές της γεωμετρίας της διατομής και στη-διάνοιξη μή-κυκλικών διατομών.



Σχήμα 2.23: Διάνοιξη σήραγγας σε έξι φάσεις (δύο κατά πλάτος και τρεις καθ' ύψος) (Πηγή: Καββαδάς, 2004)

- ✓ Περιλαμβάνει μηχανικό εξοπλισμό σχετικώς μικρού κόστους και συνεπώς πλεονεκτεί οικονομικά σε σήραγγες μικρού μήκους.
- ✓ Επιτρέπει ευκολότερη στεγάνωση της σήραγγας με συνθετική μεμβράνη (η οποία συνήθως τοποθετείται μεταξύ της άμεσης και της τελικής επένδυσης).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΕΠΙΤΟΠΟΥ ΕΝΤΑΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΚΑΤΑ ΤΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ

Το παρόν κεφάλαιο αναφέρεται στις μεταβολές των πεδίων των τάσεων και παραμορφώσεων κατά την κατασκευή υπόγειων έργων που έχουν ως αποτέλεσμα μετατοπίσεις των σημείων των επιφανειών εκσκαφής.

Το πρόβλημα του σχεδιασμού υπογείων ανοιγμάτων (π.χ. στοών, σηράγγων, κλπ) σε κάποιο πέτρωμα, ανάγεται ουσιαστικά στον προσδιορισμό των μέγιστων τάσεων που θα δημιουργηθούν στο πέτρωμα μετά την όρυξη ή γενικότερα στην κατανομή των τάσεων γύρω από ένα όρυγμα. Οι μέγιστες αυτές τάσεις θα πρέπει να είναι μικρότερες από την αντοχή του πετρώματος για τις δεδομένες συνθήκες εξόρυξης, ώστε να εξασφαλίζεται η ευστάθεια του ανοίγματος (Αγιουτάντης, 2001).

3.1 Ανάλυση του αρχικού εντατικού πεδίου

Σε αντίθεση με τις επίγειες δομικές κατασκευές οι οποίες (εκτός από το ίδιο βάρος τους) θα δεχτούν φορτία μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής τους, η κατασκευή ενός υπόγειου έργου αποτελεί μια δραστική επέμβαση σε ένα υλικό το οποίο βρίσκεται ήδη υπό την επίδραση ενός πλήρως ανεπτυγμένου τασικού πεδίου. Το αρχικό – πριν από την κατασκευή του έργου –αυτό πεδίο, ο προσανατολισμός του (=οι διευθύνσεις των κύριων ορθών τάσεων) δηλαδή και η έντασή του είναι τα μεγέθη τα οποία μαζί με τη γεωμετρία του έργου, τη φύση και τις παραμέτρους αντοχής και παραμορφωσιμότητας του υλικού θα καθορίσουν τα προβλήματα τα οποία θα εμφανιστούν και πρέπει να αντιμετωπιστούν κατά την κατασκευή.

Ο προσδιορισμός του αρχικού τασικού πεδίου δεν είναι εύκολος. Σε τεκτονικά ήρεμες περιοχές, η μέγιστη κύρια τάση είναι η κατακόρυφη γεωστατική τάση, $\boldsymbol{\sigma_v}$ που ενεργεί στο βάθος στο οποίο πρόκειται να γίνει η εκσκαφή (Μαραγκός, 2001).

Αυτή η τάση υπολογίζεται από την απλή σχέση (Hoek et al, 1995) :

$$\sigma_v = \gamma \times z$$

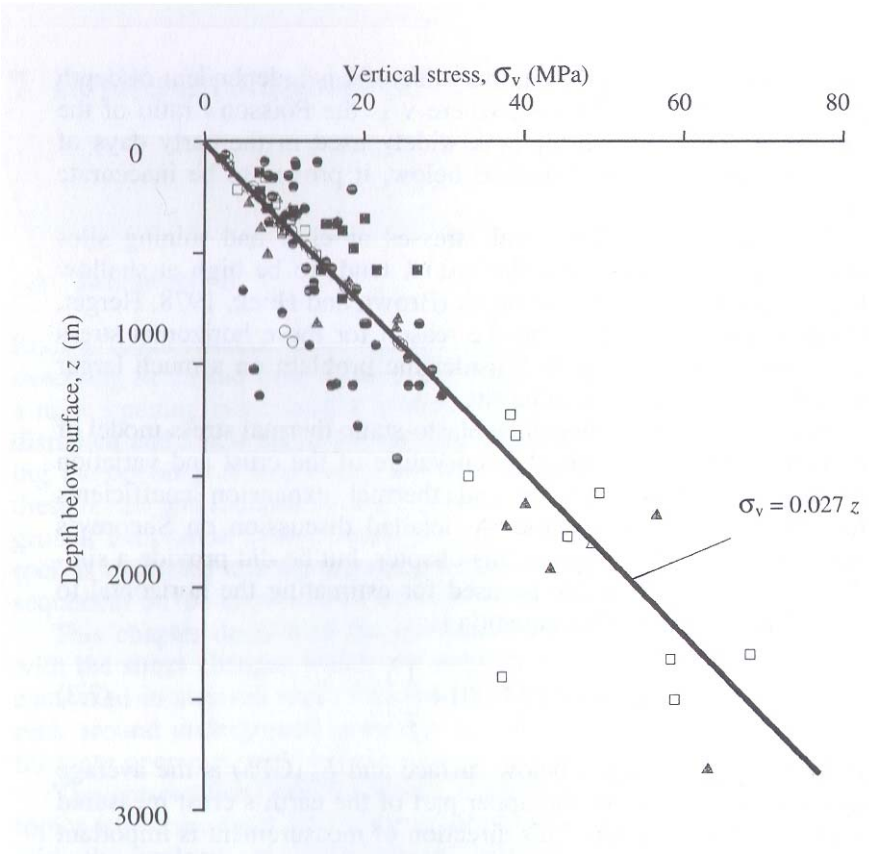
Όπου:

σ_v = κατακόρυφη κύρια τάση

z = το βάθος από την επιφάνεια του εδάφους

γ = το ειδικό βάρος της βραχόμαζας

Το ειδικό βάρος της βραχόμαζας κυμαίνεται περίπου στα 0,027 MN/m^3 Μετρήσεις της κατακόρυφης κύριας τάσης σε διάφορες εξορύξεις και σε έργα πολιτικών μηχανικών (υπόγεια έργα) ανά τον κόσμο, επιβεβαιώνουν ότι αυτή η σχέση ισχύει ούτως ή άλλος (Σχήμα 3.1) και υπάρχει μια σημαντική ποσότητα διασποράς κατά τις μετρήσεις.



Σχήμα 3.1: Μετρήσεις της κάθετης τάσης από διάφορα υπόγεια έργα ανά τον κόσμο (Πηγή: Hoek et al, 1995)

Ο υπολογισμός της οριζόντιας κύριας τάσης που ενεργεί στην βραχόμαζα σε ένα βάθος z από την επιφάνεια του εδάφους είναι πιο δύσκολος σε σχέση με την κατακόρυφη κύρια τάση. Συνήθως με k συμβολίζεται ο λόγος της οριζόντιας προς την κατακόρυφη κύρια τάση όπως:

$$\sigma_h = k\,\sigma_v = k \times \gamma \times z$$

Οι Terzaghi και Richard (1952) θεώρησαν ότι σε μια βαρυτικά φορτισμένη, βραχομάζα χωρίς πλευρική παραμόρφωση, η τιμή του k είναι ανεξάρτητη του βάθους και δίνεται από τη σχέση:

$$k = \frac{\nu}{1-\nu}$$

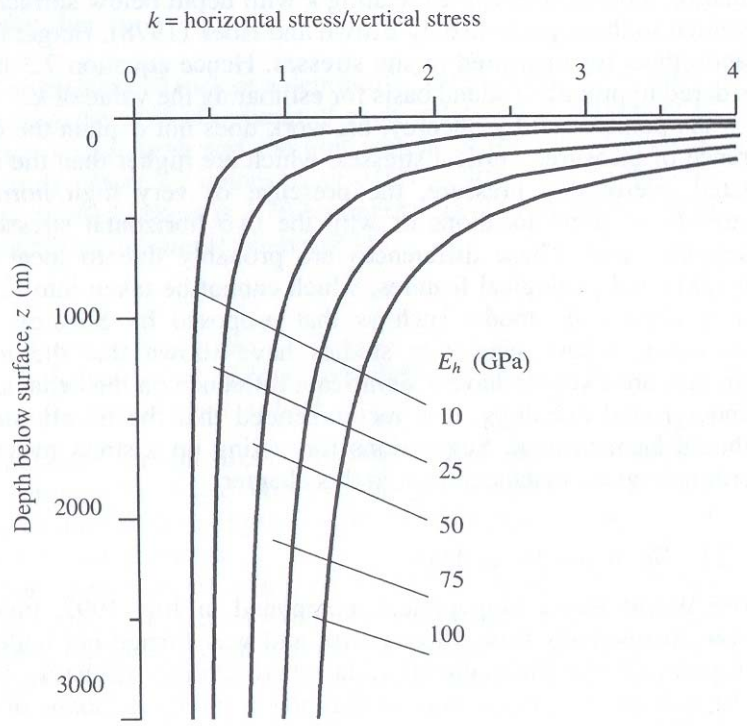
όπου ν είναι ο λόγος του Poison της βραχόμαζας. Αυτή η σχέση χρησιμοποιήθηκε ευρέως στα πρώτα στάδια της μελέτης της μηχανικής των πετρωμάτων, αλλά αποδείχτηκε ότι είναι ανακριβής και σήμερα χρησιμοποιείται σπανίως.

Μετρήσεις οριζόντιων τάσεων σε τεχνικά έργα ανά τον κόσμο δείχνουν ότι ο λόγος k τείνει να είναι υψηλός σε ρηχά βάθη ενώ μειώνεται κατά την αύξηση του βάθους (Brown and Hoek, 1978, Herget, 1988). Για να καταλάβουμε τους λόγους μεταβολής των οριζόντιων τάσεων είναι απαραίτητο να ανάγουμε το πρόβλημα σε μεγαλύτερη κλίμακα σε σχέση με ένα πιο περιορισμένο πεδίο (Hoek et al, 1995).

Ο Sheorey (1994) ανέπτυξε ένα ελαστοστατικό θερμικό μοντέλο της γής. Αυτό το μοντέλο θεωρεί καμπυλότητα του φλοιού (crust) του εδάφους και μεταβολές των ελαστικών σταθερών, όπως πυκνότητα και συντελεστών θερμικής διαστολής μεταξύ φλοιού και mantle. Η εξίσωση του Sheorey που φαίνεται από την παρακάτω σχέση εκτιμάει το λόγο k μεταξύ της οριζόντιας και της κατακόρυφης τάσης. Η εξίσωση είναι:

$$k = 0.25 + 7E_h\,(0.001 + \frac{1}{z})$$

όπου z (m) είναι το βάθος ανάμεσα στην επιφάνεια και E_h (GPa) είναι ο μέσος όρος παραμόρφωσης του σταθερού συντελεστή του ανωτέρου τμήματος του φλοιού της γης μετρημένος κατά την οριζόντια διεύθυνση. Αυτή η διεύθυνση μέτρησης είναι σημαντική ειδικά σε προσχωσιγενές πέτρωμα του οποίου η παραμόρφωση μπορεί να είναι διαφορετική σε κάθε διεύθυνση. Στο Σχήμα 3.2 φαίνονται χαρακτηριστικά μια σειρά από σταθερές παραμόρφωσης (deformation moduli).



Σχήμα 3.2: Ο λόγος της οριζόντιας προς την κάθετη τάση για διαφορετικές σταθερές βασισμένος στην εξίσωση Sheorey (Πηγή: Hoek et al, 1995)

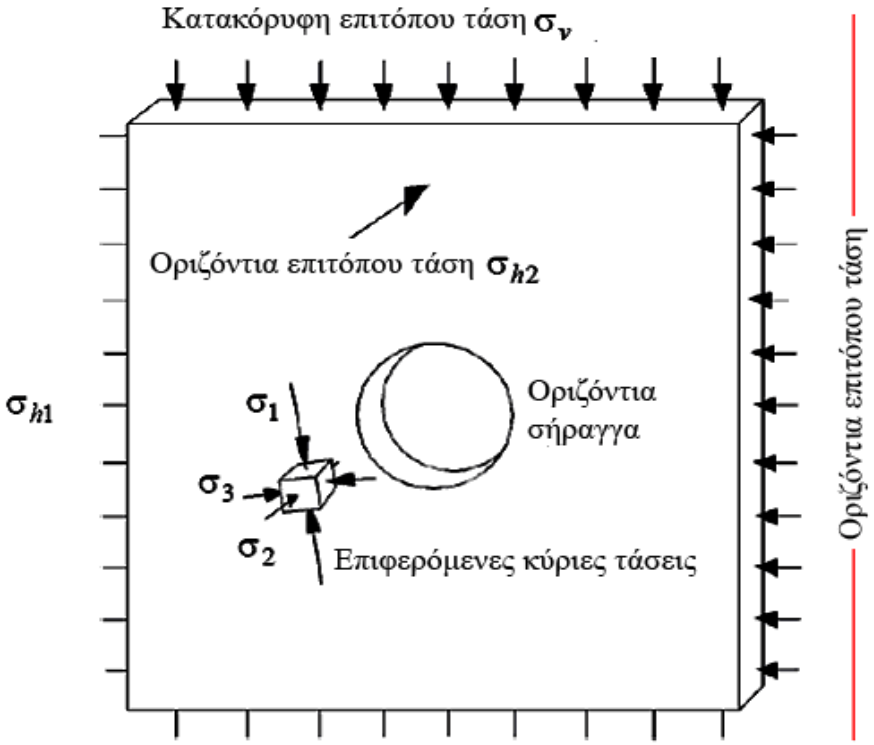
Συνεπώς, όταν συγκεκριμένες μελέτες δείχνουν ότι η επί τόπου εντατική κατάσταση επιδρά σημαντικά στην συμπεριφορά του υπόγειου ανοίγματος, τότε συνιστάται η μέτρηση της επί τόπου εντατικής κατάστασης.

Η μόνη πρακτική μέθοδος για μέτρηση των επιτόπου τάσεων είναι η υδρορωγμάτωση (hydrofracturing), στην οποία χρησιμοποιείται η απαιτούμενη υδραυλική πίεση για το άνοιγμα ήδη υπαρχουσών ρωγμών για την εκτίμηση των επιπέδων των επιτόπου τάσεων. Όταν η πρόσβαση στο υπέδαφος είναι επιτρεπτή, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τεχνικές overcoring (overcoring techniques) για επιτόπου μέτρηση και δεδομένου ότι

δίνεται η δέουσα προσοχή κατά τη λήψη των μετρήσεων, τα αποτελέσματα είναι συνήθως επαρκή για σχεδιαστικούς σκοπούς (Hoek et al, 1995).

3.2 Ανάλυση της ανακατανομής των τάσεων γύρω από τη διάνοιξη του υπόγειου ανοίγματος

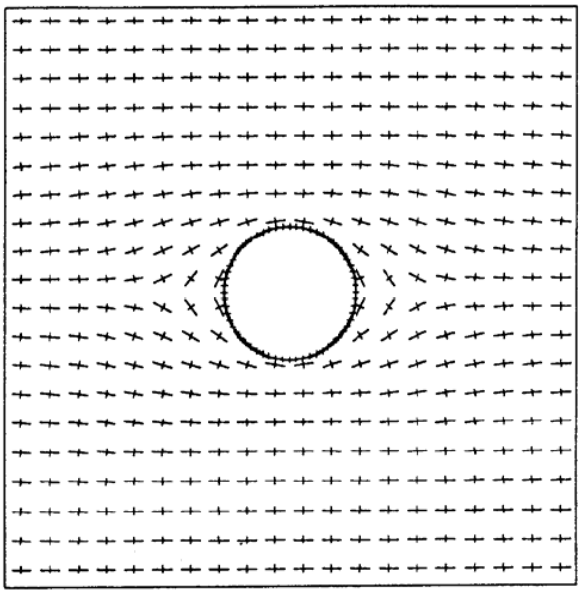
Κατά την εκσκαφή ενός ανοίγματος, το εντατικό πεδίο ανακατανέμεται τοπικά και ένα νέο εντατικό πεδίο εμφανίζεται στο περιβάλλον πέτρωμα του ανοίγματος.



Σχήμα 3.3: Αναπαράσταση των επιφερόμενων κυρίων τάσεων σε ένα στοιχείο πετρώματος κοντά σε οριζόντια σήραγγα που υπόκειται σε κατακόρυφη επιτόπου τάση σ_v σε οριζόντια επιτόπου τάση σ_{h1} σε επίπεδο κάθετο του άξονα της σήραγγας και σε οριζόντια επιτόπου τάση σ_{h2} σε επίπεδο παράλληλο με τον άξονα της σήραγγας (Πηγή: Hoek, et al, 1995)

Πριν την εκσκαφή της σήραγγας οι επιτόπου τάσεις σ_v (κατακόρυφη τάση), σ_{h1} (οριζόντια επιτόπου τάση σε επίπεδο κάθετο στον άξονα της σήραγγας) και σ_{h2} (οριζόντια επιτόπου τάση σε επίπεδο παράλληλο με τον άξονα της σήραγγας) κατανέμονται ομοιόμορφα στο τμήμα του πετρώματος που έχει θεωρηθεί (Σχήμα 3.3). Μετά την απομάκρυνση του πετρώματος για τη δημιουργία του ανοίγματος, οι τάσεις γύρω από

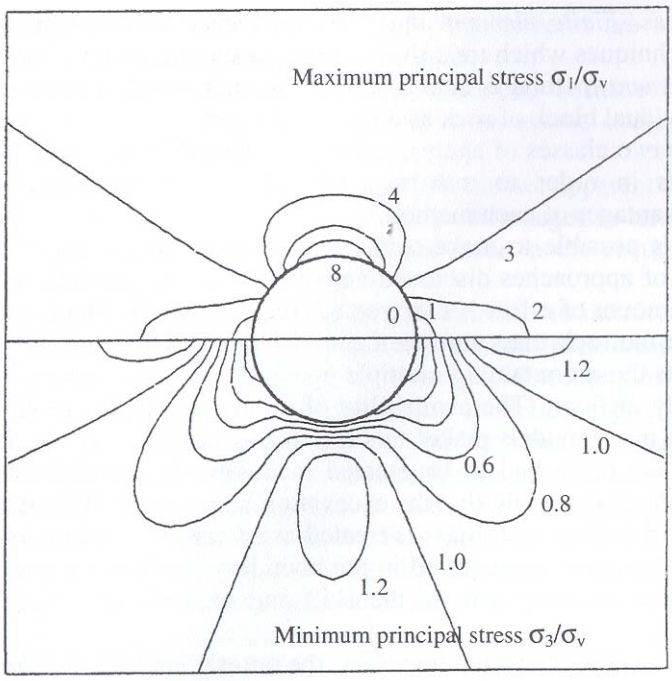
τη σήραγγα αλλάζουν και προκύπτουν νέες τάσεις. Στο Σχήμα 3.3 φαίνονται οι επιφερόμενες κύριες τάσεις στο περιβάλλον πέτρωμα σε μια κατακόρυφη τομή κάθετη στον άξονα της σήραγγας.



Σχήμα 3.4: Διευθύνσεις κυρίων τάσεων στο πέτρωμα που περιβάλλει μια οριζόντια σήραγγα που υπόκειται σε οριζόντια επιτόπου τάση σ_{h1} ίση με $3\sigma_v$ όπου σ_v η κατακόρυφη επιτόπου τάση (Πηγή: Hoek et al, 1995).

Οι τρεις κύριες τάσεις είναι κάθετες μεταξύ τους, αλλά μπορεί να βρίσκονται υπό κλίση κατά τη διεύθυνση της εφαρμοζόμενης επιτόπου τάσης. Το γεγονός αυτό φαίνεται καλύτερα στο Σχήμα 3.4 που δείχνει τις διευθύνσεις των κυρίων τάσεων στο πέτρωμα που περιβάλλει μια οριζόντια σήραγγα που υπόκειται σε οριζόντια επιτόπου τάση σ_{h1} ίση με 3 σ_v, όπου σ_v η κατακόρυφη επιτόπου τάση. Οι μεγαλύτερες παύλες αναπαριστούν τις διευθύνσεις της μέγιστης κύριας τάσης, ενώ οι μικρότερες αναπαριστούν τις διευθύνσεις της ελάχιστης κύριας τάσης σε κάθε σημείο.

Οι τιμές ισοκατανομής της μέγιστης κύριας τάσης σ_1 και της ελάχιστης κύριας τάσης σ_3 φαίνονται στο Σχήμα 3.5. Στο συγκεκριμένο σχήμα παρατηρείται ότι η ανακατανομή των τάσεων είναι συγκεντρωμένη στα πετρώματα που είναι πολύ κοντά στην εκσκαφή και ότι σε απόσταση ίση με τρεις φορές την ακτίνα της κυκλικής σήραγγας η ανακατανομή του επιτόπου τασικού πεδίου είναι αμελητέα.



Σχήμα 3.5: Περιβάλλουσες των μέγιστων και ελάχιστων μεγεθών των κυρίων τάσεων στο πέτρωμα που περιβάλλει μια οριζόντια σήραγγα που υπόκειται σε κατακόρυφη κύρια τάση σ_v και επιτόπου οριζόντια κύρια τάση 3 σ_v (Πηγή: Hoek et al, 1995).

Ο Kirsch (1898) έχει υπολογίσει αναλυτικές λύσεις για την κατανομή των τάσεων σε μια ελαστική πλάκα υπό τάση που έχει μια κυκλική οπή και αυτές αποτέλεσαν τις βάσεις για πολλές μελέτες της βραχώδους συμπεριφοράς γύρω από σήραγγες και φρέατα (Hoek et al, 1995).

Οι σχέσεις που ανέπτυξε ο Kirsch (σε πολικές συντεταγμένες) δίνουν την εφαπτομενική τάση σ_θ την ακτινική σ_r και τη διατμητική $\sigma_{r\theta}$, μετά τη δημιουργία του ανοίγματος σε ομογενές και ισότροπο πέτρωμα με κατακόρυφες τάσεις ίσες με το βάρος των υπερκείμενων. Οι σχέσεις του Kirsch φαίνονται παρακάτω (Sinha, 1989):

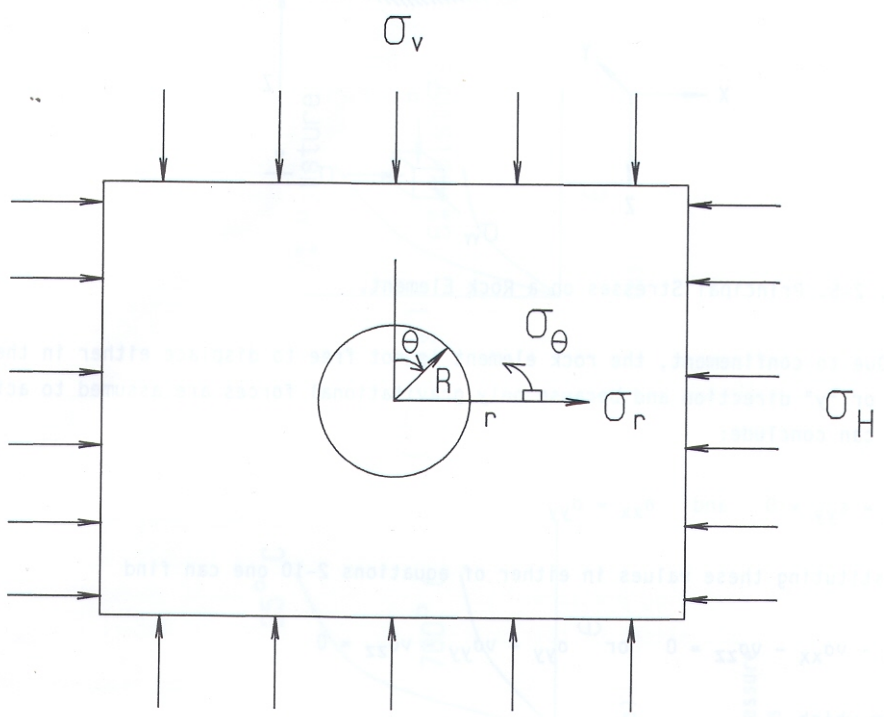
$$\sigma_R = \sigma_v \left(\frac{1+k}{2}\right)\left(1-\frac{r^2}{R^2}\right) + \left(\frac{1-k}{2}\right)\left(1-4\frac{r^2}{R^2}+3\frac{r^4}{R^4}\right)\cos 2\theta]$$

όπου $k=\frac{\sigma_h}{\sigma_v}$

$$\sigma_\theta = \sigma_v \left[\left(\frac{1+k}{2}\right)\left(1+\frac{r^2}{R^2}\right) - \left(\frac{1-k}{2}\right)\left(1+3\frac{r^4}{R^4}\right)\cos 2\theta\right]$$

$$\sigma_{r\theta} = \sigma_v \left[\left(\frac{1-k}{2}\right)\left(1+2\frac{r^2}{R^2} - 3\frac{r^2}{R^4}\right)\right]\sin 2\theta$$

Στο Σχήμα 3.6 το πέτρωμα υπόκειται σε κατακόρυφη τάση σ_v και οριζόντια σ_h και οι δύο τάσεις εφαρμόζονται σε μεγάλη απόσταση από το κέντρο της κυκλικής σήραγγας ακτίνας R.

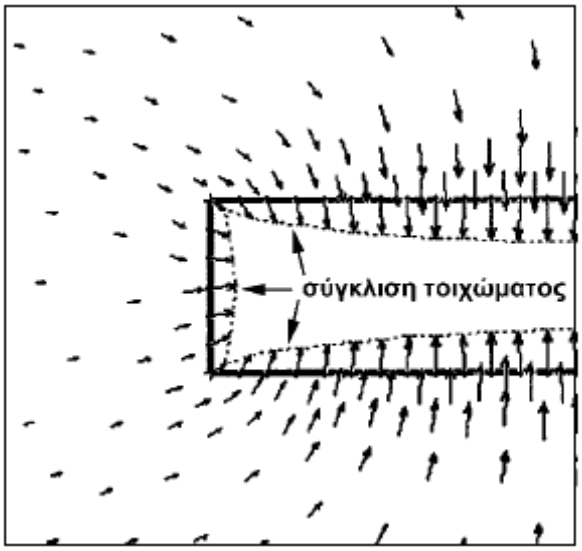


Σχήμα 3.6: Πέτρωμα γύρω από κυκλική οπή (Πηγή: Sinha, 1989)

3.3 Μετακινήσεις του εδάφους κατά τη διάνοιξη της σήραγγας

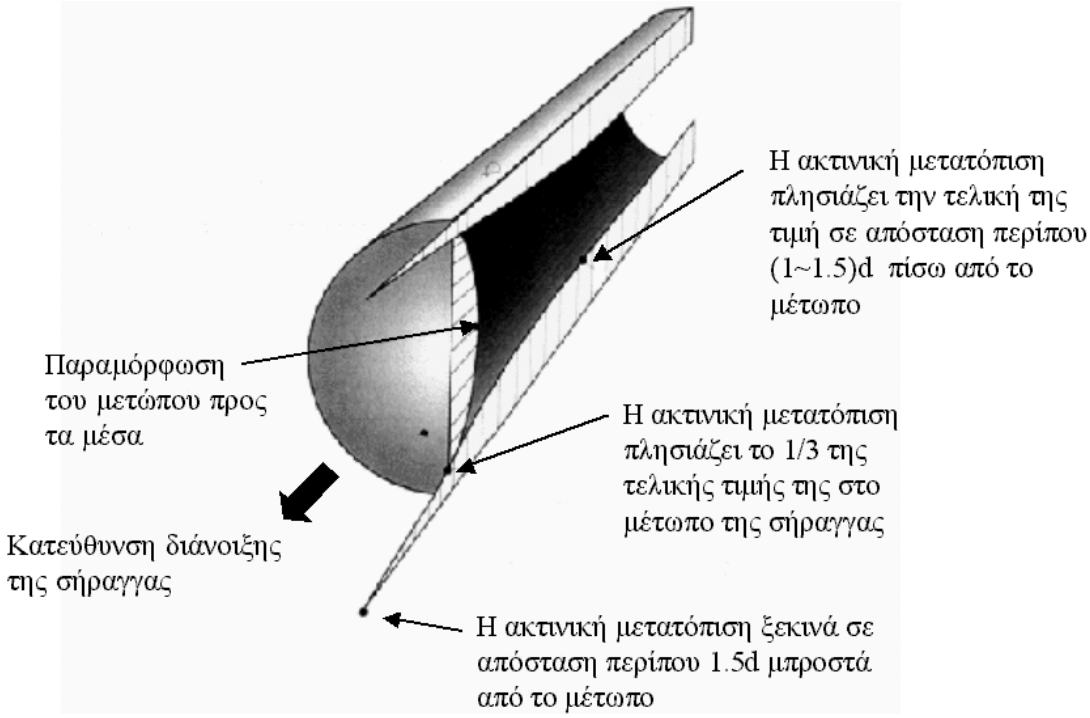
Κατά τη διάνοιξη σήραγγας οι μετατοπίσεις του εδάφους αρχίζουν σε θέσεις αρκετά μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής, δηλαδή πριν αυτό φτάσει σε κάποια συγκεκριμένη θέση. Στο Σχήμα 3.7 φαίνεται η παραμόρφωση της βραχόμαζας κατά την προώθηση μιας κυκλικής σήραγγας μέσα σε υδροστατικό τασικό πεδίο (K=1) που βρίσκει εφαρμογή σε κατακόρυφο φρέαρ και σε διάνοιξη σε έντονο ανάγλυφο, μέσω μιας τρισδιάστατης ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία. Το σχήμα δείχνει τα διανύσματα μετατόπισης μέσα στη βραχόμαζα καθώς και τη μορφή της παραμόρφωσης της σή-

ραγγας. Στο Σχήμα 3.8 συνοψίζονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά της ανάλυσης (Σακελαρίου, 2005).



Σχήμα 3.7: Διανύσματα μετατόπισης μέσα στη βραχόμαζα που περιβάλλει προωθούμενη κυκλική σήραγγα (Πηγή: Hoek, 2000)

Η παραμόρφωση της βραχόμαζας ξεκινά σε απόσταση περίπου 1.5d μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής, όπου d είναι η διάμετρος της σήραγγας και αποκτά τη μέγιστη τιμή της σε απόσταση περίπου (1÷1.5)d μπροστά από το μέτωπο. Στη θέση του μετώπου το 1/3 περίπου της συνολικής σύγκλισης έχει ήδη σημειωθεί και το μέτωπο της σήραγγας μετατοπίζεται προς τα μέσα, όπως απεικονίζεται στα Σχήματα 3.7 και 3.8. Κατά πόσο οι παραμορφώσεις αυτές προκαλούν ή όχι προβλήματα ευστάθειας στη σήραγγα εξαρτάται από τον βαθμό αντοχής της βραχόμαζας στο επίπεδο των επί τόπου τάσεων. Εάν η συμπεριφορά του εδάφους παρουσιάζει χαρακτηριστικά έντονης χαλάρωσης (δηλαδή μείωση της αντοχής με παρατεταμένη παραμόρφωση) τότε η διατομή της σήραγγας δεν ισορροπεί, η σύγκλιση της οροφής αυξάνει απεριόριστα και η διατομή καταρρέει (Σακελαρίου, 2005).



Σχήμα 3.8: Μορφή της παραμόρφωσης στη βραχόμαζα που περιβάλλει μια υπό διάνοιξη σήραγγα (Πηγή: Hoek, 2000)

Τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, χαλύβδινα πλαίσια, αγκύρια κλπ), τοποθετούνται συνήθως σε κάποια (μικρή) απόσταση πίσω από το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας. Σκοπός της τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης είναι ο περιορισμός της σύγκλισης του τοιχώματος της σήραγγας, η αποφυγή κατάρρευσης της οροφής (στην περίπτωση συμπεριφοράς τύπου χαλάρωσης) καθώς και η αποφυγή αποσφηνώσεων βραχωδών τεμαχών.

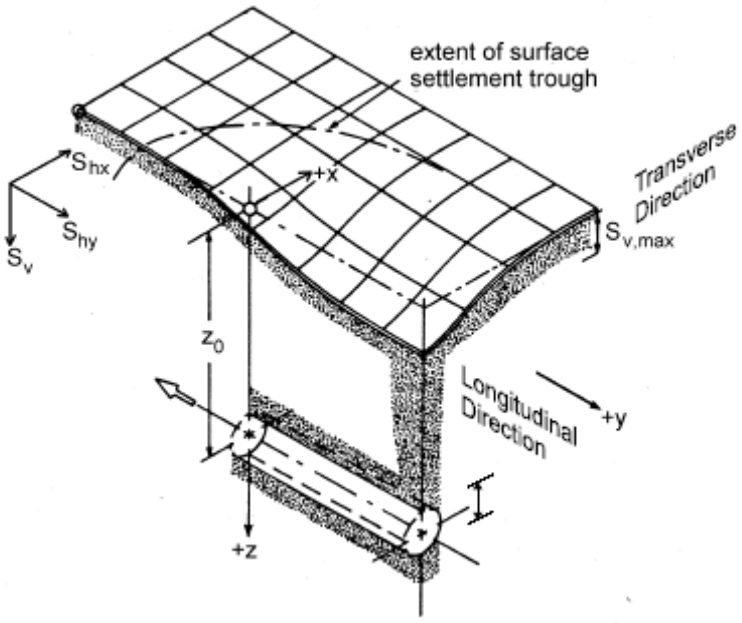
Η τελική επένδυση συνήθως κατασκευάζεται μετά την ολοκλήρωση της διάνοιξης και άμεσης υποστήριξης του συνόλου του μήκους της σήραγγας αλλά οπωσδήποτε αφού η σήραγγα ισορροπήσει με την άμεση υποστήριξη. Η τελική επένδυση της σήραγγας σχεδιάζεται για να αναλάβει μέρος (ή το σύνολο) των φορτίων της περιβάλλουσας βραχόμαζας.

Κατά τη διάνοιξη της σήραγγας προκαλείται καθίζηση και το Σχήμα 3.9 δείχνει την κατανομή των επιφανειακών καθιζήσεων κατά την κατασκευή μιας σήραγγας. Οι όροι που καθορίζουν τη γεωμετρία, την καθίζηση και το σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιείται καθορίζονται στην Σχήμα 3.9 (Σακελαρίου, 2005).

Ο Peck (1969) αναφέρει ότι η κατανομή των καθιζήσεων εγκάρσια στο διαμήκη άξονα της σήραγγας μπορεί να περιγραφεί από την ανεστραμμένη καμπύλη της κανονικής κατανομής (καμπύλη του Gauss) και αυτή η μαθηματική περιγραφή έχει γίνει ευρέως αποδεκτή από τότε. Ακολουθώντας αυτήν την προσέγγιση, η καθίζηση στην εγκάρσια διεύθυνση δίνεται από την εξίσωση:

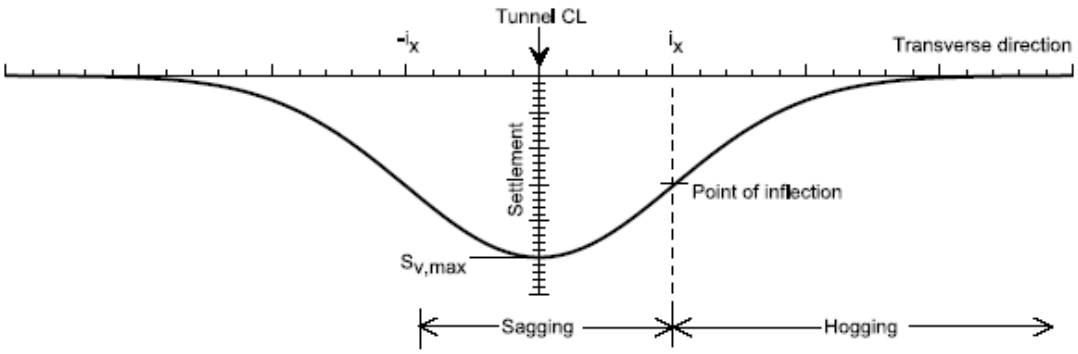
$$S_{V(x)} = S_{V,max}\, e^{-\frac{x^2}{2i^2_x}}$$

όπου το Sv,max είναι η μέγιστη καθίζηση που μετριέται πάνω από τον άξονα της σήραγγας. Η παράμετρος i_x (παράμετρος πλάτους της καμπύλης), αντιπροσωπεύει την τυπική απόκλιση της καμπύλης των επιφανειακών καθιζήσεων.



Σχήμα 3.9: Καμπύλη των καθιζήσεων που προκαλούνται από τη διάνοιξη σήραγγας (Attewell, 1986).

Μια χαρακτηριστική εγκάρσια καμπύλη καθιζήσεων παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.10. Όπως φαίνεται, η καμπύλη εμφανίζει τη μέγιστη κλίση της στο σημείο καμπής (point of inflection) που βρίσκεται σε απόσταση i_x από τον άξονα της σήραγγας (tunnel centre line). Το σημείο καμπής είναι κρίσιμο για τον καθορισμό των κριτηρίων παραμόρφωσης των κτιρίων. Ως θέση της μέγιστης κλίσης, το σημείο καμπής χωρίζει τη ζώνη θλίψης (sagging zone) από τη ζώνη εφελκυσμού (hogging zone), όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.10 (Σακελαρίου, 2005).



Σχήμα 3.10: Επιφανειακές καθιζήσεις κατά την εγκάρσια διεύθυνση (Πηγή: Franzius, 2003).’

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΤΡΑ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο, θα παρουσιαστούν αναλυτικά τα μέτρα υποστήριξης και ενίσχυσης σηράγγων. Θα γίνει κατηγοριοποίηση των μέτρων και θα αναλυθεί η εσωτερική ενίσχυση βραχόμαζας πριν και μετά την εκσκαφή, η εξωτερική υποστήριξη και η τελική επένδυση της σήραγγας.

Η στήριξη και η ενίσχυση των πετρωμάτων βέβαια είναι βασικά αλλά όχι τα μόνα μέτρα σταθεροποίησης των υπογείων ανοιγμάτων. Η επίτευξη των παραπάνω στόχων μπορεί να υποβοηθηθεί με κατάλληλη επιλογή, του μεγέθους, του σχήματος και της διεύθυνσης της εκσκαφής, της αλληλουχίας των φάσεων εξόρυξης, και της εφαρμοζόμενης μεθόδου των ανατινάξεων (Σοφιανός, 2002).

4.1 Υποστήριξη και ενίσχυση σηράγγων

Ο όρος *υποστήριξη* χρησιμοποιείται ευρέως, για να περιγράψει τις διαδικασίες και τα υλικά που χρησιμοποιούνται, για να βελτιώσουν τη σταθερότητα και να διατηρήσουν την ικανότητα παραλαβής φορτίων του πετρώματος κοντά στα τοιχώματα (όρια) των υπόγειων ανοιγμάτων. Επομένως ο όρος υποστήριξη με την ευρεία έννοια έχει δύο αντικειμενικούς σκοπούς (Αγιουτάντης, 2002).

- Να ενισχύσει (reinforce) το πέτρωμα με την ενεργοποίηση και τη διατήρηση της προυπάρχουσας αντοχής της βραχομάζας (mobilized strength).
- Να υποστηρίξει (support) το φορτίο μεμονωμένων τμημάτων της οροφής και των τοιχωμάτων που έχουν αποκολληθεί από τη βραχομάζα.

Η υποστήριξη ενός ανοίγματος μπορεί να χαρακτηριστεί ως *ενεργητική* (active) ή ως *παθητική* (passive) υποστήριξη. Η ενεργητική υποστήριξη εξασκεί ένα προκαθορισμένο φορτίο στην επιφάνεια του πετρώματος, κατά τη στιγμή της εφαρμογής της. Η ενεργητική υποστήριξη μπορεί να εφαρμοστεί με ποικίλα μέσα όπως προεντεταμέ-

νους κοχλίες ή συρματόσχοινα, οι μηχανικοί ή υδραυλικοί ορθοστάτες, ή διογκούμενη υποστήριξη από σκυρόδεμα. Η ενεργητική υποστήριξη είναι συνήθως απαραίτητη όταν πρέπει να υποστηριχθούν βαρυτικά φορτία που προκύπτουν από χαλαρωμένα τμήματα πετρώματος.

Η παθητική υποστήριξη δεν εφαρμόζεται με κάποιον προκαθορισμένο τρόπο αλλά αναπτύσσεται σταδιακά, καθώς παραμορφώνεται η βραχομάζα. Τα συστήματα με τα οποία εφαρμόζεται η παθητική υποστήριξη περιλαμβάνουν τις χαλύβδινες αψίδες, την ξύλινη υποστήριξη, τους μη προεντεταμένους κοχλίες, κ.τ.λ (Αγιουτάντης, 2002).

Η υποστήριξη υπόγειων εκσκαφών επιτυγχάνεται με διάφορα μέσα, από τα οποία τα κυριότερα είναι τα ακόλουθα:

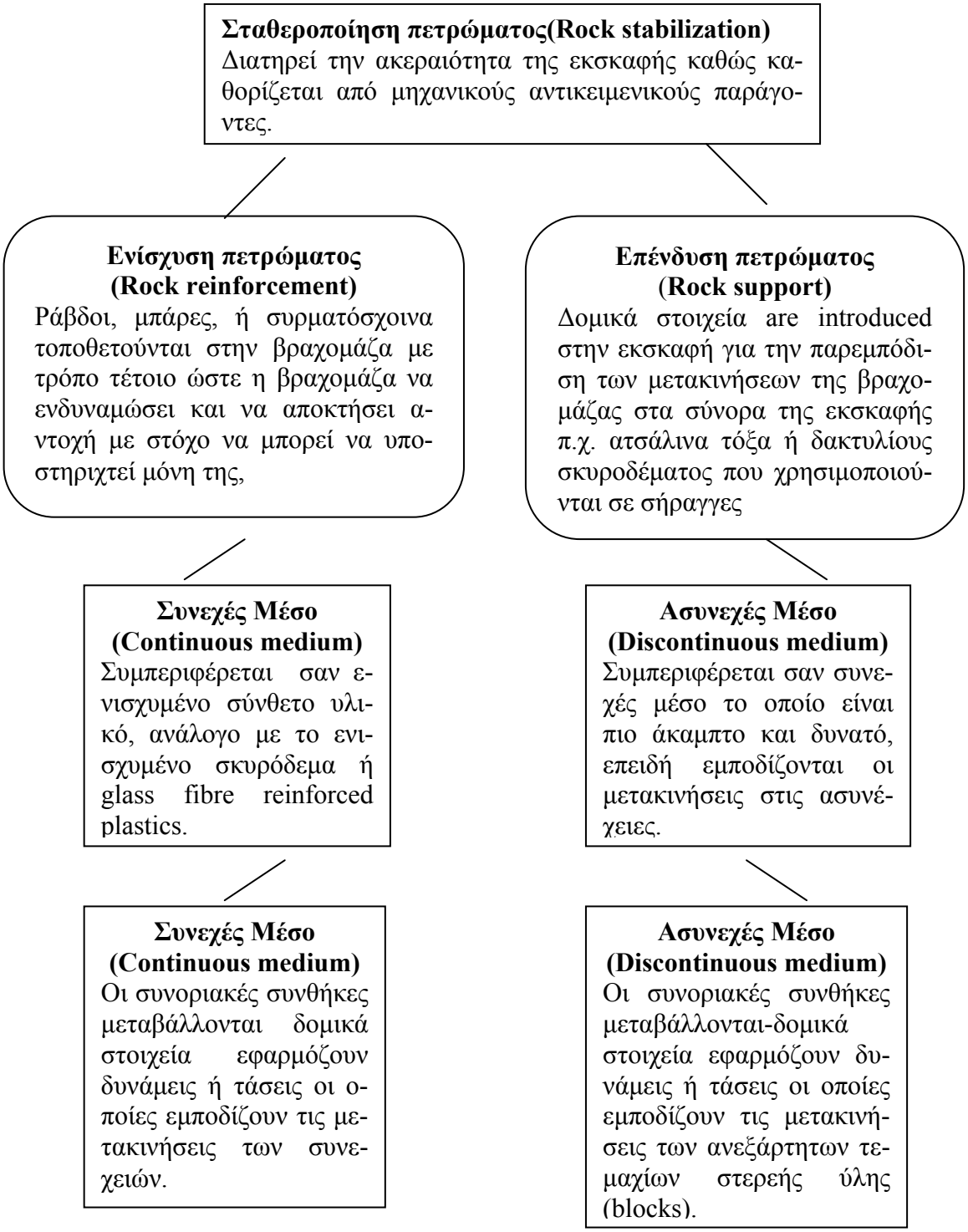
- Τα ξύλινα πλαίσια
- Οι υδραυλικοί ή μηχανικοί ορθοστάτες
- Τα μεταλλικά πλαίσια (πλαίσια μορφοχάλυβα, πλαίσια lattice girden) κ.τ.λ.
- Οι κοχλίες (αγκύρια καρφιά κ.τ.λ)
- Ειδικά συστήματα (όπως υδραυλικές ασπίδες)

Για την επίτευξη αποδοτικότερου ή οικονομικότερου σχεδιασμού υποστήριξης είναι δυνατός ο συνδυασμός δύο ή περισσότερων συστημάτων υποστήριξης. Η υποστήριξη μιας σήραγγας αποτελεί μια πολύπλοκη διαδικασία και γι' αυτό το λόγο διαχωρίζεται σε δύο κατηγορίες, με κύριο γνώμονα το χρονοδιάγραμμα του έργου αλλά και την ασφάλεια τόσο του έργου όσο και του προσωπικού που εργάζεται στα μέτωπα εκσκαφής. Την προσωρινή (temporary) υποστήριξη, η οποία προηγείται και την τελική (μόνιμη, permanent) υποστήριξη, η οποία τοποθετείται στο τελικό στάδιο της κατασκεύης του έργου (Αγιουτάντης, 2002).

-Κατηγοριοποίηση υποστήριξης και ενίσχυσης

Δύο είναι οι μέθοδοι σταθεροποίησης των πετρωμάτων, η εσωτερική ενίσχυση και η εξωτερική υποστήριξη. Όσον αφορά την συμπεριφορά των πετρωμάτων κατά τη σταθεροποίησή τους, αυτή μπορεί να θεωρηθεί ως συνεχής ή ασυνεχής ή συγχρόνως συνεχής και ασυνεχής. Υποστήριξη και ενίσχυση δεν είναι το ίδιο οπότε απαιτείται κατηγοριο-

ποίηση της υποστήριξης και ενίσχυσης συνεχών και μη συνεχών πετρωμάτων. Στο Σχήμα 4.1 φαίνεται η κατηγοριοποίηση από μηχανικής άποψης.

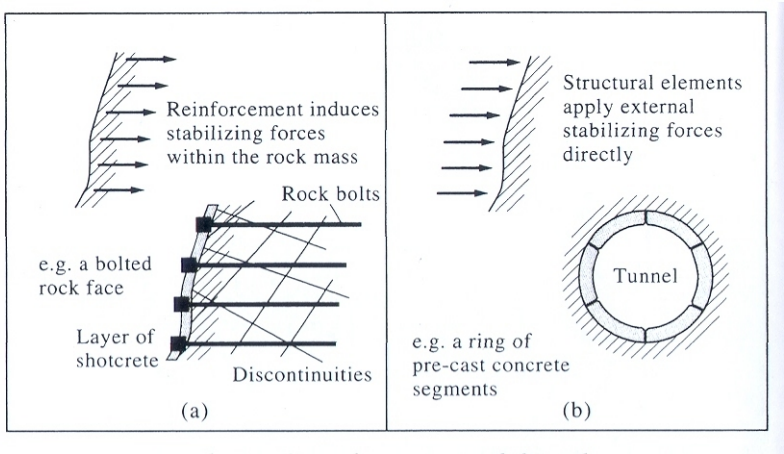


Σχήμα 4.1: Βασική κατηγοριοποίηση υποστήριξης και ενίσχυσης (Πηγή: Hudson and Harrison, 1997)

Εάν η αστοχία είτε επιφανειακά είτε υπόγεια γύρω από την εκσκαφή παρατηρείται εξαιτίας των μετακινήσεων στερεών πετρώματος δύο βασικές αρχές σταθεροποίησης μπορούν να θεωρηθουν (Hundson and Harrison, 1997):

- ✓ Οι μετατοπίσεις στερεών συμβαίνουν γιατί η βραχομάζα είναι ασυνεχής και επομένως το πέτρωμα ενισχύεται ώστε να συμπεριφέρεται ως συνεχές.
- ✓ Άμεσα στοιχεία υποστήριξης παρουσιάζονται κατά την εκσκαφή με σκοπό την διατήρηση των μετακινήσεων σε ανεκτά επίπεδα

Στο Σχήμα 4.2 φαίνεται καθαρά η διαφορά της υποστήριξης της βραχομάζας (rock support) σε σχέση με την ενίσχυση της βραχομάζας (rock reinforcement).



Σχήμα 4.2: Βασικές κατηγορίες (a) ενίσχυσης και (b) υποστήριξης πετρώματος (Πηγή: Hudson and Harrison, 1997)

1. Ενίσχυση πετρώματος σε συνεχές πέτρωμα

Η ενίσχυση πετρώματος π.χ. κοχλίες (rock bolt) (§ 4.1.2) γίνεται μόνο για χρήση σε ασυνεχές βραχομάζες με σκοπό την παρεμπόδιση μετακινήσεων. Ωστόσο η ενίσχυση συνεχούς βραχομάζας μπορεί να βελτιώσει τις συνολικές ιδιότητες του πετρώματος και συνεπώς την συμπεριφορά του. Εάν ένα συνεχές πέτρωμα είναι ισχυρό θα μπορεί να αντέξει τις τάσεις χωρίς περαιτέρω βοήθεια. Αντιθέτως, εάν ένα συνεχές πέτρωμα είναι αδύναμο, ισχυρή άμεση υποστήριξη απαιτείται, όπως τμηματικά pre –cast δακτύλιοι σκυροδέματος, για την βελτίωση της εσωτερικής αντοχής του και την αποκατάσταση της ευστάθειας του (Hudson and Harrison, 1997).

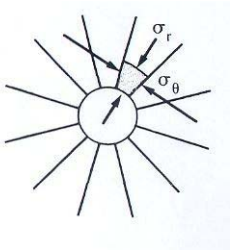
Αν θεωρηθεί ένα στοιχείο ενισχυμένου (οπλισμένου) πετρώματος δίπλα σ'ένα όριο εκσκαφής (Σχήμα 4.3), η επίδραση των στοιχείων οπλισμού του είναι η παραγωγή μιας ενεργής πίεσης περιορισμού:

$$\sigma_r = A' E' \nu \sigma_\theta$$

όπου A και E΄ είναι ο λόγος των διατομών και των μέτρων Young των στοιχείων οπλισμού προς τα αντίστοιχα του πετρώματος

σ_θ είναι η εφαπτομενική τάση

ν ο λόγος του Poison



Σχήμα 4.3: Σχηματικό διάγραμμα ενισχυμένου κυκλικού ανοίγματος (Hudson and Harrison, 1997).

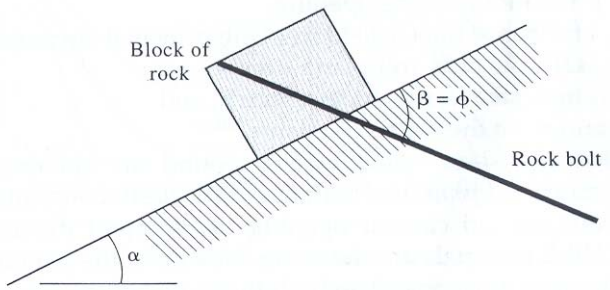
Όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος των διατομών και των μέτρων Young, δηλαδή για μία αυξανόμενη πυκνότητα αγκυρίων πετρώματος και μια χαμηλότερη δυσκαμψία πετρώματος, αντίστοιχα τόσο μεγαλύτερη θα είναι η ενεργή πίεση περιορισμού.

2. Ενίσχυση πετρώματος σε ασυνεχές πέτρωμα

Η ενίσχυση σε μια ασυνεχή βραχομάζα επιδιώκει εκτός της βελτίωσης των δομικών ιδιοτήτων του πετρώματος και την αποφυγή μεγάλων μετατοπίσεων τεμαχών. Αντικείμενο της διερεύνησης είναι αν πράγματι απαιτείται ενίσχυση και εφόσον απαιτείται, η εκτίμηση του βέλτιστου μήκους, του προσανατολισμού και της έντασης των αγκυρίων (Σοφιανός, 2004).

Στο Σχήμα 4.4 φαίνεται η απλούστερη περίπτωση ενίσχυσης ενός ασυνεχούς υλικού. Αν το τέμαχος πετρώματος (χωρίς ενίσχυση με αγκύρια) έχει κλίση μεγαλύτερη από τη γωνία τριβής του πετρώματος (για μηδενική συνοχή της ασυνέχειας), το τέμαχος θα ολισθήσει. Αυτό είναι επομένως το πρώτο κριτήριο της δυνατότητας αστοχίας.

Εξετάζοντας τώρα το μήκος και τη διάμετρο του αγκυρίου, αυτά πρέπει να είναι επαρκή για να εξασφαλίσουν ότι η συνάφεια στις διεπιφάνειες αγκυρίου-κονιάματος και κονιάματος-βραχομάζας είναι σε θέση να αναλάβουν την τάνυση του αγκυρίου, η οποία δεύτερη εξαρτάται από την αντοχή της βραχομάζας (Hudson and Harrison, 1997).



Σχήμα 4.4: Απλούστερη περίπτωση ενίσχυσης ενός ασυνεχούς υλικού (Hudson and Harrison, 1997)

Τέλος, η διάμετρος των αγκυρίων καθορίζεται και από την εφελκυστική αντοχή του υλικού των αγκυρίων. Εάν η ενίσχυση εμποδίζει τη σχετική μετακίνηση των τεμαχών, και ικανοποιητική τάση μπορεί να διαβιβαστεί από τη διεπαφή, τότε σε γενικές γραμμές η ενίσχυση του πετρώματος έχει μετατρέψει το ασυνεχές πέτρωμα σε συνεχές. Στην πράξη, όταν τοποθετούνται αγκύρια σε μια ασυνεχή βραχομάζα, η επιφάνεια του βράχου καλύπτεται συχνά με ψεκασμένο σκυρόδεμα οπλισμένο με πλέγμα. Σκοπός του ψεκασμένου σκυροδέματος είναι η δημιουργία ενός δύσκαμπτου επιστρώματος που εμποδίζει τις τοπικές περιστροφές και μετακινήσεις των τεμαχών. Πριν από την περιστροφή, οι δυνάμεις μπορούν να διαβιβαστούν πλήρως μέσα από τις διεπιφάνειες, μετά όμως από μία έστω πολύ μικρή περιστροφή, αυτές οι δυνάμεις συγκεντρώνονται στις ακμές ή κορυφές των τεμαχών, με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται τοπικά πολύ υψηλές τάσεις. Η ακολουθία τέτοιων περιστροφών οδηγεί στην προοδευτική αστοχία μιας ασυνεχούς βραχομάζας και της ακεραιότητας μιας υπόγειας κατασκευής (Hudson and Harrison, 1997).

4.2 Εσωτερική ενίσχυση βραχόμαζας

Καταρχήν ως αγκύρια νοούνται γραμμικοί μεταλλικοί και μη μεταλλικοί ικανοί σε εφελκυσμό φορείς, οι οποίοι, τοποθετούμενοι μέσα στο γεωυλικό, επιτυγχάνουν την εσωτερική του στήριξη ή ενίσχυση και συνιστούν στοιχείο της άμεσης/προσωρινής αντιστήριξης μέχρι να τοποθετηθεί η μόνιμη επένδυση. Η αγκύρωση περιλαμβάνει, το διάτρημα εντός του γεωυλικού, την ράβδο που τοποθετείται εντός του διατρήματος και εάν προβλέπεται, το υλικό σύνδεσης της ράβδου με το γεωυλικό. Το υλικό και η γεωμετρία της ράβδου ποικίλει ανάλογα με τον τύπο του συστήματος αγκύρωσης και μπορεί να είναι κατασκευασμένο από χάλυβα ή κάποιο συνθετικό υλικό. Το υλικό σύνδεσης της ράβδου με το γεωυλικό είναι συνήθως μίγμα νερού με τσιμέντο και πρόσμικτα ή καθαρά χημικό προϊόν όπως ρητίνες.

Ως «φέρουσα ικανότητα αγκύρωσης» ορίζεται η μέγιστη δύναμη που μπορεί να ασκηθεί στην ράβδο και στις διεπιφάνειες, α) γεωυλικού/υλικού σύνδεσης με τη ράβδο, β) υλικού σύνδεσης /ράβδου ή γ) ράβδου/γεωυλικού, χωρίς να γίνει υπέρβαση του ορίου διαρροής της ράβδου και της μέγιστης διατμητικής αντοχής των διεπιφανειών.

4.2.1 Αγκύρια προενίσχυσης (πριν την εκσκαφή)

Τα *αγκύρια προενίσχυσης*, εφαρμόζονται πριν την εκσκαφή του υπογείου ανοίγματος και ενισχύουν το εκσκαπτόμενο γεωυλικό. Περιλαμβάνονται κυρίως τα αγκύρια μετώπου, τα αγκύρια προενίσχυσης στύλων και τα αγκύρια που τοποθετούνται από πιλοτική σήραγγα ή από την επιφάνεια ή από άλλη σήραγγα (ΠΕΤΕΠ 12-03-03-00, 2006).

1. Αγκύρια συνεχούς πάκτωσης άκαμπτης ράβδου

Είναι αγκύρια συνεχούς πάκτωσης (fully grouted pipe bolts-spiles) όπως τα απλά αγκύρια συνεχούς πάκτωσης, με τη διαφορά ότι η εισαγόμενη ράβδος (συνήθως χαλύβδινη ή από σκληρό πλαστικό, υαλόνημα ή ανθρακόνημα κ.τ.λ.) έχει μεγαλύτερη ακαμψία (διατομής σωλήνα ή συμπαγούς κυκλικής ή άλλης μορφής). Η ράβδος πα-

κτώνεται με τσιμεντοκονία σε όλο το μήκος της μέσα σε διάτρημα που έχει καταλλήλως μεγαλύτερη διάμετρο σε σχέση με εκείνο των απλών αγκυρίων. Η λειτουργία των αγκυρίων αυτού του είδους ασκείται όχι μόνο με την τριβή που αναπτύσσεται κατά μήκος της ράβδου αλλά και με την ακαμψία της ράβδου μαζί με την τσιμεντοκονία που την συμπληρώνει (μέσα και γύρω από αυτήν). Στοχεύουν στην ενίσχυση του περιβάλλοντος γύρω από την σήραγγα αλλά και εμπρός από το μέτωπο εκσκαφής της και ακόμη και στην γεφύρωση του εκάστοτε εκσκαπτόμενου μήκους της σήραγγας μέχρι να ολοκληρωθεί η άμεση προσωρινή υποστήριξη της σήραγγας. Τα αγκύρια αυτού του είδους είναι και λοξά ως προς τον άξονα της σήραγγας, προς τη διεύθυνση εκσκαφής οπότε και ονομάζονται αγκύρια/ηλώσεις προενίσχυσης: προαγκυρώσεις (spiles) ή/και προπορείας (forepoles), ελαφρού, μέσου ή βαρέως τύπου (ΠΕΤΕΠ 12-03-03-00, 2006).

2. Αγκύρια συνεχούς πάκτωσης με σφηνούμενο σχιστό σωλήνα

Ράβδος σχισμένου (Spilt Pipe Rock Bolts) κατά γενέτειρα σωλήνα από χάλυβα υψηλής αντοχής και σκληρότητας, που εισάγεται με πίεση ή και κρούσεις σε διάτρημα (ελαφρώς μικρότερης διαμέτρου). Έτσι σφηνώνεται σε όλο το μήκος του διατρήματος που βρίσκεται σε ανθεκτικό πέτρωμα. Το ελεύθερο άκρο του, μέσω πλάκας διανομής, στερεώνεται στα στοιχεία της άμεσης υποστήριξης της σήραγγας. Λειτουργεί με τις τριβές κατά το εμπηγμένο μήκος του, προσφέροντας σύσφιξη του πετρώματος. Η ικανότητα του εξαρτάται από την ανθεκτικότητα του πετρώματος ώστε να είναι συσφιγμένος ο σχισμένος σωλήνας και αναπτύσσεται αμέσως μετά την έμπηξη. Προσφέρεται για ανθεκτικά ρηγματωμένα πετρώματα αλλά μειονεκτεί λόγω της χαλάρωσης που μπορεί να απέλθει αργότερα (ΠΕΤΕΠ 12-03-03-00, 2006).

3. Απλά αυτοδιατρόμενα αγκύρια/ήλοι

Ράβδος (Self Drilling Simple Bolts*)*, συνήθως χαλύβδινη ή από σκληρό πλαστικό, κυκλικής διατομής (συνήθως με ραβδώσεις ή ελικώσεις στην εξωτερική επιφάνεια και κεντρική αξονική οπή σε όλο το μήκος της), φέρει στο άκρο της κοπτικό εργαλείο μιας χρήσης. Με αυτή την ράβδο ως διατρητικό στέλεχος διανοίγεται το διάτρημα, η ράβδος εγκαταλείπεται παραμένουσα ως τένοντας και το διάκενο γεμίζει με τσιμεντένεμα που εισπιέζεται από την κεντρική οπή, δημιουργώντας αγκύριο πακτωμένο σε

όλο του το μήκος. Η ικανότητα ελέγχεται από την εφελκυστική αντοχή της ράβδου και τις τάσεις τριβής μεταξύ ράβδου-τσιμεντενέματος και περιβάλλοντος πετρώματος. Η λειτουργία του έγκειται στην δυνατότητα ανάληψης εφελκυστικής δύναμης στο άκρο (που στερεώνεται με περικόχλιο και πλάκα διανομής στα στοιχεία της υποστήλωσης της σήραγγας) και στην ενίσχυση/συρραφή του πετρώματος μέσω των δυνάμεων τριβής. Στο ελεύθερο άκρο μπορεί να ασκηθεί ελαφρά δύναμη (με δυναμόκλειδο) για ενεργοποίηση της στερέωσης (ΠΕΤΕΠ 12-03-03-00, 2006).

4. Αυτοδιατρόμενα αγκύρια/ήλοι σωληνωτού τύπο

Τα αγκύρια αυτά (Self Drilling Pipe Bolts/Spiles) κατασκευάζονται με τον ίδιο τρόπο όπως τα απλά αυτοδιατρόμενα αγκύρια-self drilling με την διαφορά ότι τα στελέχη διάτρησης (που εγκαταλείπονται στο διάτρημα ως τελικός οπλισμός) είναι σωλήνες μεγαλύτερης διαμέτρου. Έτσι έχουν μεγαλύτερη ακαμψία. Κατά τα λοιπά λειτουργούν με τον ίδιο τρόπο όπως και τα απλά αυτοδιατρώμενα αγκύρια. Προσφέρονται περισσότερο για προενίσχυση προαγκύρωσης (splites) ή / και προπορείας (forepoles) (ΠΕΤΕΠ 12-03-03-00, 2006).

4.2.2 Αγκύρια στήριξης (μετά την εκσκαφή)

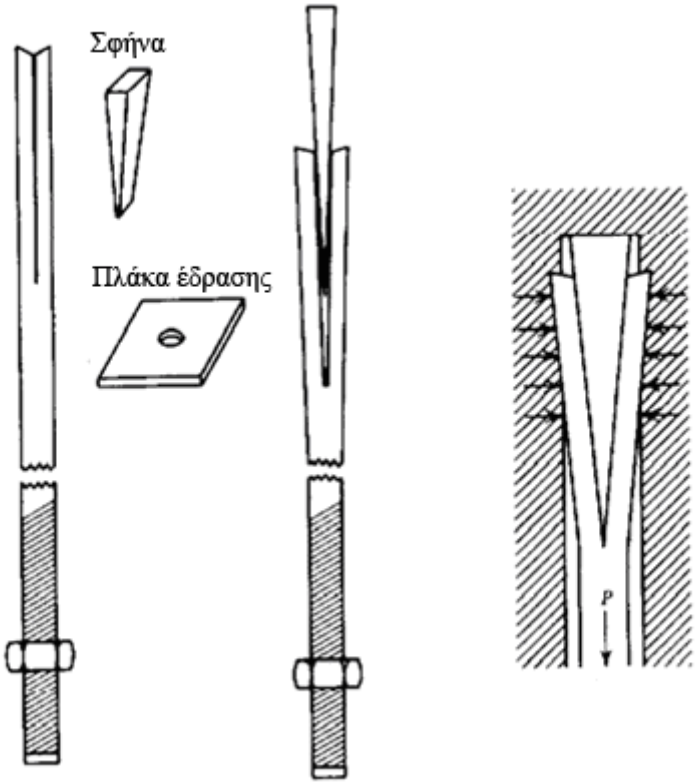
Τα αγκύρια ενίσχυσης ενισχύουν την βραχόμαζα εφαρμοζόμενα μετά την εκσκαφή στη περιφέρεια του υπόγειου ανοίγματος. Περιλαμβάνονται τα αγκύρια σημειακής ή συνεχούς πάκτωσης, τα αγκύρια τριβής και τα αγκύρια συρματόσχοινα (ΠΕΤΕΠ 12-03-03-00, 2006).

Α) Αγκύρια σημειακής πάκτωσης

Οι συνηθέστεροι τύποι αγκυρίων σημειακής πάκτωσης είναι με εγκοπή και σφήνα και με διευρυνόμενο κέλυφος (Σοφιανός, 2008).

1. Ήλοι με εγκοπή και σφήνα

Τυπική μορφή τέτοιου ήλου φαίνεται στο Σχήμα 4.5. Ο ήλος κατασκευάζεται από ελάσιμο χάλυβα, και το στέλεχός του έχει διάμετρο 22-30 mm και μήκος 0,5 έως 2,5 m. Το ένα άκρο του ήλου έχει εγκοπή μήκους 150 mm και πάχους 2-3 mm. Μία σφήνα είναι τοποθετημένη στο άκρο της εγκοπής, έτσι ώστε πιεζόμενη να διευρύνει την εγκοπή. Το διάτρημα έχει συνήθως βάθος 4mm μεγαλύτερο από το μήκος του ήλου, και ο ήλος εμπήγνυται με κρουστική σφύρα. Μετά την έμπηξη, συσφίγγονται τα περικόχλια στην πλάκα συγκράτησης.

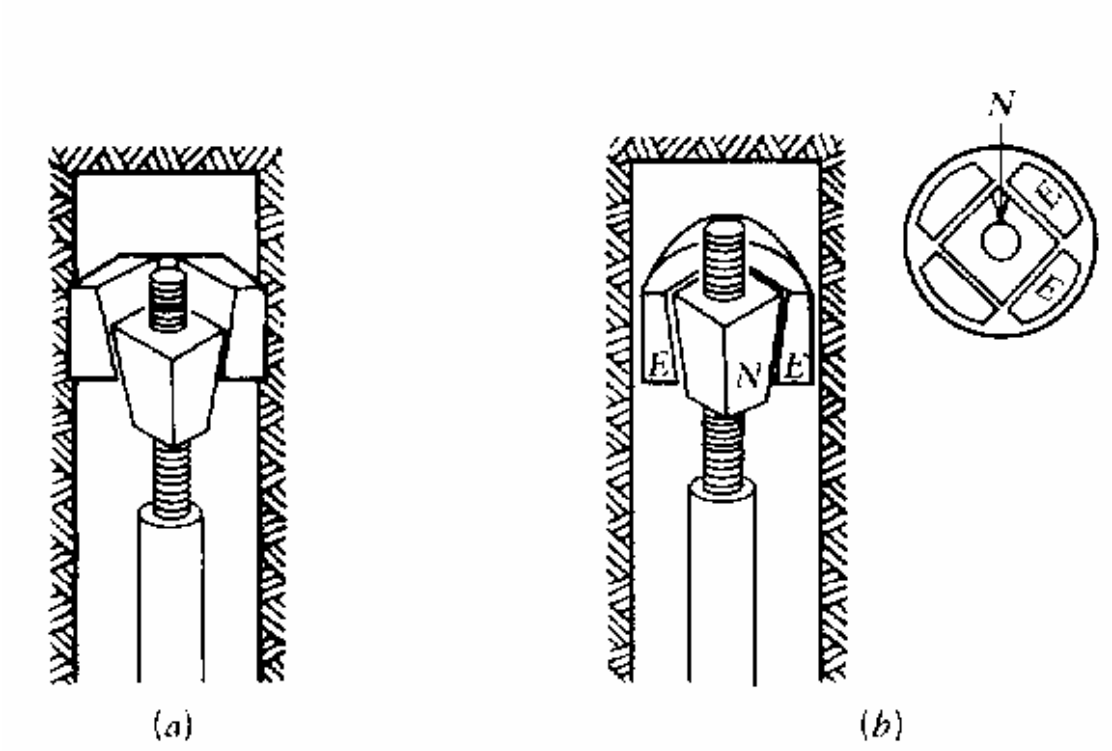


Σχήμα 4.5: Ήλος με εγκοπή και σφήνα (Πηγή: Σοφιανός, 2008)

2. Ήλοι με διευρυμένο κέλυφος

Τυπικός ήλος με διευρυνόμενο κέλυφος φαίνεται στο Σχήμα 4.6. Αποτελείται από στέλεχος 17-22 mm το άκρο του οποίου υπάρχει σπείρωμα στο οποίο είναι βιδωμένο κωνικό στοιχείο N. Γύρω από το στοιχείο αυτό υπάρχουν κελύφη E που μετακινούνται κάθετα στον άξονα του ήλου, καθώς το στοιχείο N μετακινείται αξονικά με τη βοήθεια συστήματος σύσφιγξης (π.χ. ροπόκλειδο). Η τάνυση του ήλου επιτυγχάνεται

με σύσφιγξη του περικοχλίου πάνω στην πλάκα έδρασης. Η ροπή που απαιτείται για τη σύσφιξη θα πρέπει αφενός να ξεπεράσει τις τριβές που αναπτύσσονται από την πλάκα στο σπείρωμα και στην πλάκα έδρασης και αφετέρου να τανύσει τον ήλο (Σοφιανός, 2005).



Σχήμα 4.6: Ήλος με διευρυνόμενο κέλυφος (Πηγή: Σοφιανός, 2005)

3. Αγκύρια σημειακής πάκτωσης με μηχανισμό διαστελλόμενου άκρου

Πρόκειται για ράβδο (συνήθως κυκλικής ή άλλης διατομής) από χάλυβα (ενδεχομένως και από άλλο υλικό όπως υαλόνημα, σκληρό πλαστικό ή ανθρακόνημα) που στο άκρο του έχει μηχανισμό ο οποίος με περιστροφή της ράβδου μπορεί να διαστέλλεται σφηνούμενος στο περιβάλλον έδαφος. Η σφήνωση γίνεται στο βάθος διατρήματος, με διάμετρο ελαφρώς μεγαλύτερη εκείνης του μηχανισμού σε συνεσταλμένη κατάσταση και η στερέωση είναι τόσο καλύτερη όσο πιο ανθεκτικό είναι το περιβάλλον πέτρωμα και η έκταση της διαστολής που επιτυγχάνεται με στρέψη της ράβδου. Εξυπακούεται ότι η καλή πάκτωση προϋποθέτει τοποθέτηση του μηχανισμού σε θέση όπου το πέτρωμα είναι συμπαγές και ανθεκτικό και αυτό συνεπάγεται ότι αυτό πρέπει να αναζητείται ενδεχομένως με μετατόπιση της θέσης του διαστελλόμενου άκρου. Η λειτουργία των /ήλων αυτού του τύπου έγκειται στην δυνατότητα ανάληψης εφελκυστικών

δυνάμεων στο ελεύθερο άκρο (με μεσολάβηση πλάκας διανομής περικοχλίου) που μεταφέρεται σε απομακρυσμένη μάζα του περιβάλλοντος (σταθερού) πετρώματος. Είναι κατάλληλα για πετρώματα συμπαγή και αρκετά ανθεκτικά (Σοφιανός, 2005).

4. Αγκύρια σημειακής πάκτωσης μέσω ρητινικής κόλλας

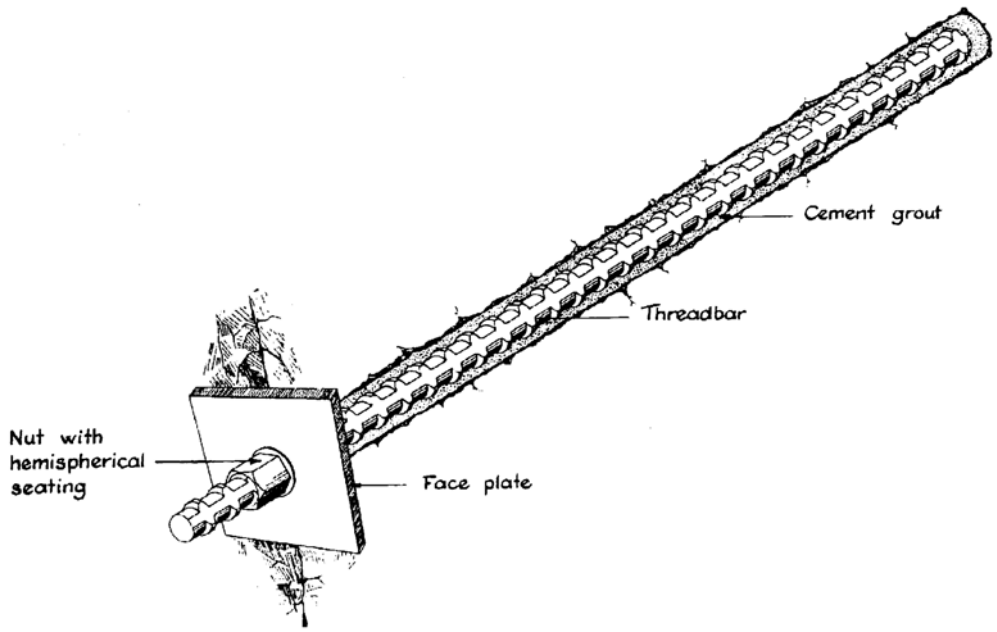
Πρόκειται για ράβδο (κυκλική ή άλλης διατομής) από χάλυβα ή άλλο υλικό (π.χ. υαλόνημα, σκληρό πλαστικό κ.τ.λ.) που πακτώνεται στο άκρο του με ρητινική κόλλα στο βάθος διατρήματος στο πέτρωμα. Η κόλλα αποτελείται από βάση (ρητίνη και άμμο ή ψηφίδες) και καταλύτη που είναι τοποθετημένα χωριστά μέσα σε κυλινδρική πλαστική ή υάλινη κάψα. Τα δύο συστατικά αναμιγνύονται όταν η συσκευασία τους διαλύεται με την εισαγωγή της ράβδου και το μίγμα σκληρύνεται σε μικρό χρόνο πακτώνοντας την ράβδο στο διάτρημα. Είναι χρήσιμα όταν απαιτείται η ταχεία ενεργοποίηση της πάκτωσης (είναι η κύρια διαφορά τους από τα απλά μερικής πάκτωσης) και με κατάλληλη επιλογή του μήκους της ρητινικής κάψας (μία ή και περισσότερες εν σειρά) μπορεί να ορίζεται μεγαλύτερο μήκος στερέωσης ώστε να ασφαλίζεται αυτή υπό ελαστικότερες συνθήκες σκληρότητας της περιβάλλουσας μάζας (είναι η κύρια διαφορά τους από τα αγκύρια σημειακής πάκτωσης με μηχανισμό διαστελλόμενου άκρου). Το ελεύθερο άκρο της ράβδου στερεώνεται (με κοχλία ή με σφήνα) με την μεσολάβηση πλάκας διανομής. Μπορεί να επιβάλλεται μικρή ή μέση τάνυση (με δυναμόκλειδο ή συσκευή), ώστε να ελέγχεται η ενεργοποίηση της στερέωσης ή /κα να επιβάλλεται κάποια αρχική δύναμη σύσφιξης. Η ικανότητα του αγκυρίου ελέγχεται από την αντοχή της ράβδου και την συνάφεια μεταξύ ράβδου-ρητινικής κόλλας-περιβάλλοντος πετρώματος. Η λειτουργία των αγκυρίων/ηλών αυτού του τύπου έγκειται στην δυνατότητα ανάληψης εφελκυστικών δυνάμεων στο ελεύθερο άκρο που μεταφέρεται σε απομακρυσμένη μάζα του περιβάλλοντος πετρώματος που δεν έχει αποσταθεροποιηθεί από τη διάνοιξη της σήραγγας (ΠΕΤΕΠ 12-03-03-00, 2006).

Β) Αγκύρια συνεχούς πάκτωσης

Τα αγκύρια συνεχούς πάκτωσης διακρίνονται σε:

1. Απλά αγκύρια /ήλοι συνεχούς πάκτωσης

Πρόκειται για ράβδο (συνήθως κυκλική ή άλλης διατομής) από χάλυβα ή άλλο υλικό (π.χ. υαλόνημα) που πακτώνεται μέσω τσιμεντενέματος σε όλο το μήκος μέσα σε διάτρηση στο έδαφος ή στον βράχο (ελαφρώς μεγαλύτερης διαμέτρου) (Σχήμα 4.7). Στο ελεύθερο άκρο τα η ράβδος στερεώνεται (με κοχλία ή με σφήνα) με την μεσολάβηση πλάκας διανομής και ελαφρά τάνυση/σύσφιξη, έχοντας το αναγκαίο προεξέχον μήκος για τη σύνδεση. Η ικανότητα ορίζεται από την αντοχή της ράβδου και τις δυνάμεις τριβής /συνάφειας με το τσιμεντένεμα και το περιβάλλον πέτρωμα. Η λειτουργία των αγκυρίων/ήλων αυτού του τύπου έγκειται στην δυνατότητα ανάληψης εφελκυστικών δυνάμεων στο ελεύθερο άκρο ή και στην ενίσχυση/συρραφή του πετρώματος με την εισαγωγή τάσεων εκ των δυνάμεων τριβής. Η ελαφρά τάνυση γίνεται για ενεργοποίηση της στερέωσης και πραγματοποιείται με δυναμόκλειδο (ΠΕΤΕΠ 12-03-03-00, 2006).



Σχήμα 4.7: Ραβδοχάλυβας συνεχούς πάκτωσης με ένεμα (Πηγή: USACE, 1997)

2. Απλά αγκύρια/ήλοι τύπου Perfo

Είναι αγκύρια/ήλοι (Fully Grouted Bolts- Perfo Type) όπως τα απλά συνεχούς πάκτωσης με την διαφορά ότι η ράβδος εισάγεται μέσα σε κύλινδρο (συναρμολογημένο από δύο ημικυλίνδρους) από διάτρητη λαμαρίνα που τοποθετείται γεμισμένος με τσιμεντοκονία ή τσιμεντένεμα στο πλήρες μήκος του διατρήματος, ελαφρώς μεγαλύτερης διαμέτρου. Κατόπιν εισάγεται μέσα στον κύλινδρο (με πίεση με κρούση) η ράβδος οπλισμού που είναι μικρότερης διαμέτρου εκείνης του κυλίνδρου. Κατά την εισαγωγή της ράβδου το τσιμεντένεμα εκτοπίζεται και διαχέεται στο διάκενο μεταξύ διάτρητου σωλήνα και διατρήματος, διεισδύοντας επίσης σε κενά του περιβάλλοντος εδάφους σε όποιον βαθμό αυτό είναι εφικτό. Τα αγκύρια/ήλοι αυτού του τύπου είναι κατάλληλα για εδάφη με ανοικτή δομή (πορώδη ή κατακερματισμένοι βράχοι με κενά). Κατά τα λοιπά η λειτουργία των αγκυρίων αυτού του τύπου είναι ίδια με εκείνη των απλών αγκυρίων συνεχούς πάκτωσης (ΠΕΤΕΠ 12-03-03-00, 2006).

Γ) Ήλοι τριβής

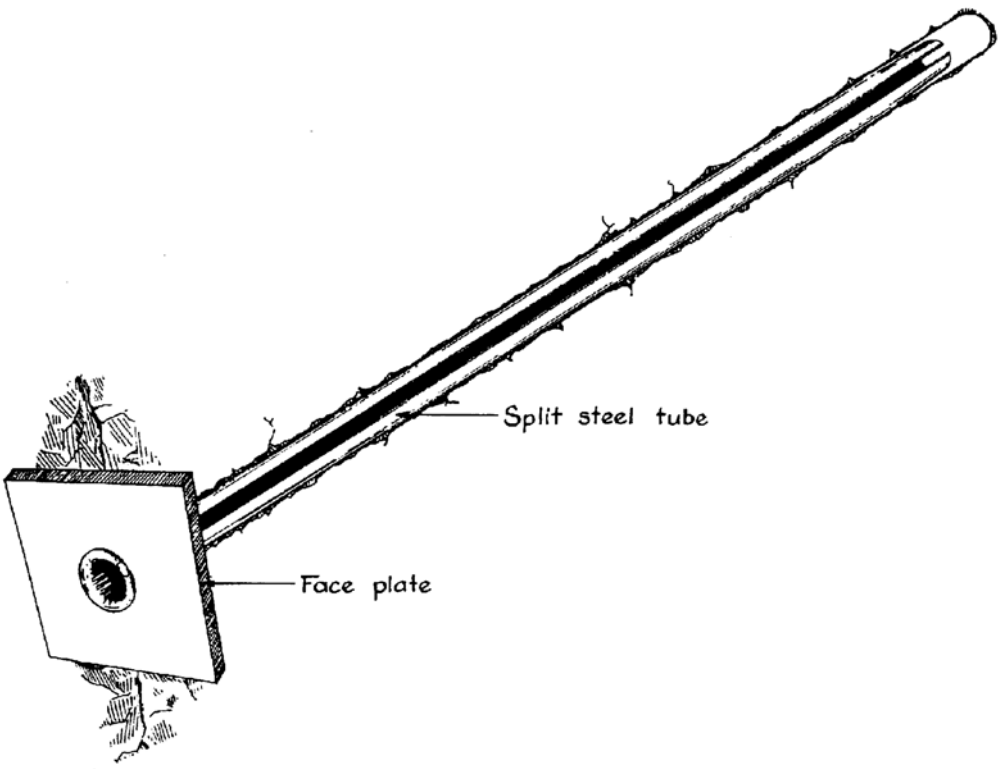
Οι ήλοι τριβής διακρίνονται σε ήλους με διαμήκη σχισμή και σε διογκωμένους ήλους. Στην αγορά οι πρώτοι ονομάζονται Split Set® και οι δεύτεροι Swellex® (Σοφιανός, 2008).

1. Αγκύρια/Ήλοι με διαμήκη σχισμή τύπου Split Set®

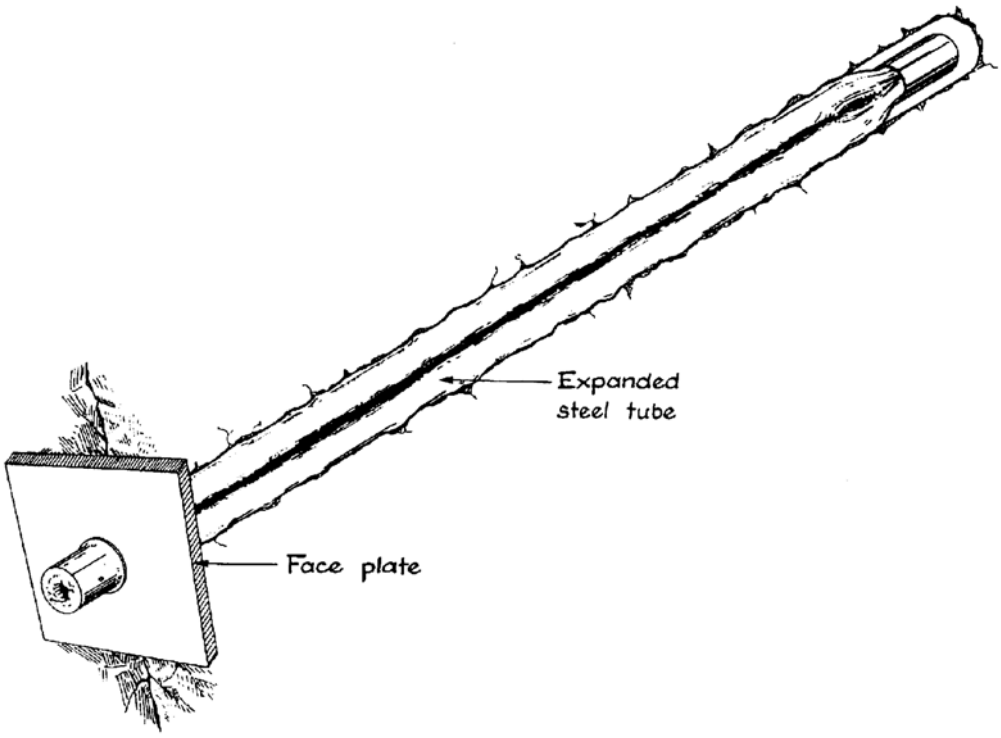
Το αγκύριο Split Set® είναι αγκύριο τριβής (Σχήμα 4.7) το οποίο αποτελείται από χαλύβδινο εντετμημένο σωλήνα με το ένα άκρο του βαθμιαία κωνικοποιημένο για διευκόλυνση της εισαγωγής στην οπή, και το άλλο άκρο με διαμόρφωση φλάντζας για τη συγκράτηση της πλάκας έδρασης. Ο σωλήνας εισάγεται σε οπή η διάμετρος της οποίας είναι ελαφρώς μικρότερη από την διάμετρο του, με αποτέλεσμα το μερικό κλείσιμο της εντορμίας του και την ανάπτυξη ακτινικών δυνάμεων τριβής που συγκρατούν τα τεμάχια του γεωυλικού, ενώ η δύναμη εισαγωγής φορτίζει ενεργητικά την πλάκα έδρασης έναντι του γεωυλικού. Η διάμετρος της οπής που θα διατρηθεί στο βράχο για την τοποθέτηση του αγκυρίου split set θα είναι αυτή που απαιτείται για να επιτευχθεί η βέλτιστη πάκτωση για την κατηγορία του αγκυρίου που χρησιμοποιείται (ΠΕΤΕΠ 12-03-03-00, 2006).

2. Αγκύρια/Ήλοι συνεχούς πάκτωσης διαστελλόμενου χαλυβδοσωλήνα απλού τύπου swellex)

Το αγκύριο συνεχούς πάκτωσης (Swellex Rock Bolts) είναι συνεπτυγμένος σωλήνα από χάλυβα υψηλής αντοχής που εισάγεται σε διάτρημα διαμέτρου ελαφρώς μικρότερης της ονομαστικής (Σχήμα 4.8). Με υψηλή πίεση νερού ο συνεπτυγμένος σωλήνας διαστέλλεται συσφιγγόμενος σε όλο το μήκος του μέσα στο διάτρημα. Στο ελεύθερο άκρο της η σωληνωτή ράβδος, μέσω χαλύβδινης πλάκας διανομής, στερεώνεται δια περικοχλίου στα άλλα στοιχεία της υποστύλωσης της σήραγγας. Η ικανότητα του αγκυρίου ορίζεται από την εφελκυστική αντοχή του χαλυβδοσωλήνα και τις τριβές που αναπτύσσει αυτός διεσταλμένος με το περιβάλλον πέτρωμα. Τα προσόντα αυτού του τύπου αγκυρίων έγκειται στην συμπίεση του πετρώματος και την αμεσότητα της λειτουργίας χωρίς να απαιτείται αναμονή στερέωσης με ένεμα ή κόλλα. Το μειονέκτημα τους έγκειται στην ενδεχόμενη χαλάρωση του δεσμού τους λόγω ερπυσμού του συστήματος συμπιεζόμενου πετρώματος και χάλυβα που μπορεί να εμφανίζεται μακροπρόθεσμος. Η λειτουργία των αγκυρίων αυτών συνίσταται στην δυνατότητα ανάληψης εφελκυστικών δυνάμεων στα ελεύθερα άκρα τους και στην ενίσχυση του πετρώματος με τις τάσεις συμπίεσης και τριβής. Είναι κατάλληλα για σχεδόν κάθε είδους πέτρωμα πλην ασύνδετων και μη συνδετικών υλικών που δεν επιτρέπουν την μόρφωση μη υπενδεδυμένων διατρημάτων. Είναι πιο αποτελεσματικά στην συγκράτηση διαμορφωμένων σφηνών σε σκληρές βραχόμαζες λόγω της άμεσης επενεργειάς τους (ΠΕΤΕΠ 12-03-03-00, 2006).

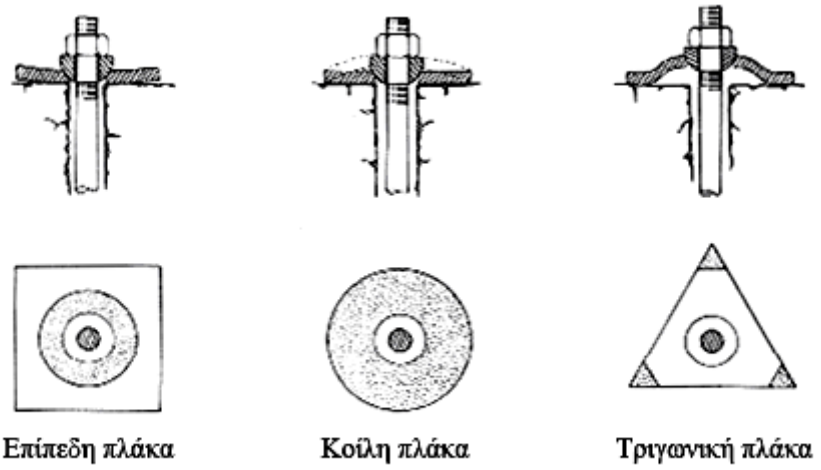


Σχήμα 4.7: Ήλος τριβής τύπου Split Set® (Πηγή: USACE, 1997)



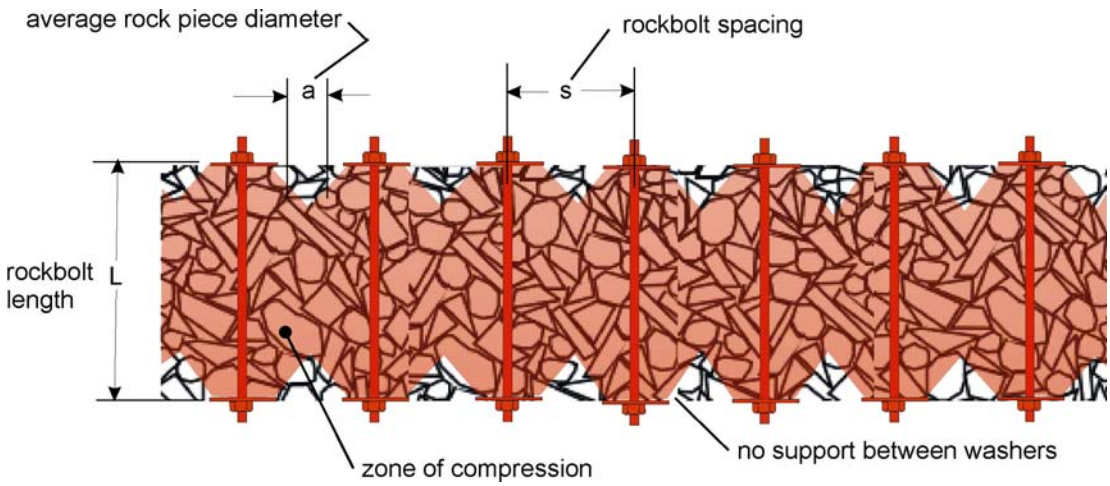
Σχήμα 4.8: Ήλος τριβής Swellex® (Πηγή: USACE, 1997)

Οι πλάκες που τοποθετούνται στην κεφαλή των αγκυρίων (Σχήμα 4.9) μεταβιβάζουν φορτίο από τον ήλο στο πέτρωμα και σταθεροποιούν το πέτρωμα γύρω από τον ήλο.



Σχήμα 4.9: Πλάκες στήριξης αγκυρίων (Πηγή: USACE, 1997)

Στο Σχήμα 4.10 επεξηγείται γραφικά η λειτουργία των αγκυρίων τριβής, στο Σχήμα 4.11 παρουσιάζονται αγκύρια μινιατούρες και στο Σχήμα 4.12 απεικονίζεται η τοποθέτηση των αγκυρίων στην επιφάνεια του πετρώματος.



Σχήμα 4.10: Εξήγηση λειτουργίας των αγκυρίων τριβής. Ζώνη σύνθλιψης προκαλείται στην κόκκινη περιοχή του σχήματος και παρέχεται εφελκυστική ενίσχυση στη βραχόμαζα όταν το κενό μεταξύ των αγκυρίων s είναι μικρότερο από τρεις φορές το μέσο όρο της διαμέτρου α του τμήματος πετρώματος. Το μήκος του αγκυρίου πρέπει να είναι περίπου ίσο με 2s. Σημειώνεται ότι δεν υπάρχει υποστήριξη μεταξύ των ήλων αν δεν τοποθετείται πλέγμα ή εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Σε αντίθετη περίπτωση μπορούν να καταπέσουν όγκοι ανάμεσα από τα αγκύρια (Πηγή: Hoek, 2004).

Σχήμα 4.12: Τοποθέτηση αγκυρίων σε επιφάνεια πετρώματος , with pull-collars attached (Πηγή: www.celtite.com.au)

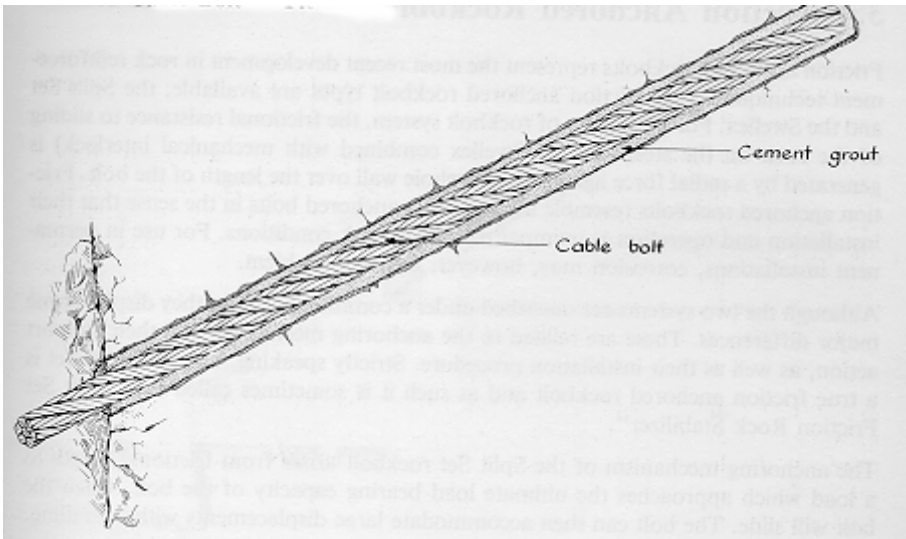
Στον πίνακα 4.1 παρουσιάζονται επιγραμματικά τα τυπικά τεχνικά χαρακτηριστικά των συστημάτων αγκύρωσης και αναφέροντα τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα καθενός από αυτά.

Δ) Αγκυρώσεις Συρματόσχοινου

Είναι χαλύβδινο συρματόσχοινο (cable anchors*)* (Σχήμα 4.13) που πακτώνεται με τσιμεντένεμα σε όλο το μήκος του μέσα σε διάτρημα, με το ελεύθερο άκρο του στερεωμένο, με ειδική κεφαλή (κώνου, σφήνας κ.τ.λ.) και με μεσολάβηση χαλυβοπλάκας διανομής. Η ικανότητα του ορίζεται από την εφελκυστική αντοχή του συρματόσχοινου και από τις δυνάμεις τριβής στις διεπιφάνειες συρματόσχοινου-τσιμεντενέματος-περιβάλλοντος πετρώματος. Λειτουργεί μεταφέροντας δυνάμεις στο απομακρυσμένο άκρο του ή/και ενισχύοντας/συρράπτοντας την περιβάλλουσα εδαφική μάζα. Συνήθως χρησιμοποιείται σε προοδευτικές διανοίξεις όπου έχουν προεγκατασταθεί τα αγκύρια (με προοδευτικές αποκοπές ή/και αναστερεώσεις των συρματοσχοίνων), κατασκευασμένο από την ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους ή από άλλους γειτονικούς υπόγειους θαλάμους (ΠΕΤΕΠ 12-03-03-00, 2006).

Πίνακας 4.1: Τυπικά τεχνικά χαρακτηριστικά συστημάτων αγκύρωσης (Πηγή: USACE, 1997).

Παράμετρος	Αγκυρωμένο μηχανικά	Αγκυρωμένο με ένεμα ρητίνης	Ενεματωμένο με τσιμέντο	Split Set	Swellex
Ποιότητα χάλυβα (MPa)	700	570	1,080	Ειδική	Ειδική
Διάμετρος χάλυβα (mm)	16	20	20	39	26
Φορτίο αστοχίας, χάλυβα (kN)	140	120	283	90	130
Μέγιστο φορτίο χάλυβα (kN)	180	180	339	110	130
Μέγιστη αξονική παραμόρφωση (%)	14	15	9,5	16	10
Βάρος χάλυβα (kg/m)	2	2.6	2,6	1.8	2
Μήκος αγκυρίου (m)	Οποιοδήποτε	Οποιοδήποτε	Οποιοδήποτε	0.9-3	Οποιοδήποτε
Συνήθης διάμετρος διατρήματος (mm)	35-38	30-40	32-38	35-38	32-38
Πλεονεκτήματα	Οικονομική. Άμεση υποστήριξη. Μπορεί να είναι μόνιμα. Υψηλά φορτία αγκύρωσης	Άμεση υποστήριξη. Μπορούν να προενταθούν. Υψηλή αντοχή σε διάβρωση. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα περισσότερα πετρώματα.	Ανταγωνιστικά και διαρκείας. Υψηλή αντοχή σε διάβρωση. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα περισσότερα πετρώματα. Οικονομικά	Γρήγορη και απλή εγκατάσταση. Άμεση υποστήριξη. Δεν απαιτούν ειδικό εξοπλισμό.	Γρήγορη και απλή εγκατάσταση. Άμεση υποστήριξη. Καλά για διάφορες συνθήκες.
Μειονεκτήματα	Χρήση μόνο σε σκληρά πετρώματα. Δύσκολη αξιόπιστη εγκατάσταση. Απαιτείται έλεγχος για κατάλληλη Προένταση. Μπορεί να Χαλαρώσουν λόγω ανατίναξης	Το ένεμα έχει περιορισμένο χρόνο ζωής. Ευαίσθητα σε περιβάλλοντα σηράγγων.	Απαιτούν μεγαλύτερο χρόνο εγκατάστασης σε σχέση με αυτους με ρητίνη. Μπορούν να παραλάβουν υψηλα φορτία.	Οικονομικά. Κρίσιμη η διάμετρος διατρήματος. Μόνο μικρού μήκους. Δεν έχουν αντοχή στην διάβρωση.	Οικονομικά. Δεν έχουν αντοχή στην διάβρωση



Σχήμα 4.13: Συρματόσχοινο ήλωσης πετρωμάτων (Πηγή: Σοφιανός, 2005)

4.3 Εξωτερική υποστήριξη βραχόμαζας

Τα πλαίσια, γενικά, είναι σκελετοί που περιβάλλουν και συγκρατούν κάποιο αντικείμενο προς στερέωση και αποτελούν μέρος της εξωτερικής υποστήριξης της βραχόμαζας (Δημητράκος, 1964).

4.3.1 Χαλύβδινα πλαίσια

Τα χαλύβδινα πλαίσια αποτελούνται γενικά από τα στοιχεία που είναι σχετικά δύσκαμπτα για το μέγεθός τους, ενώ οι συνδέσεις μεταξύ των στοιχείων είναι άλλοτε λίγο και άλλοτε πολύ δύσκαμπτες σύμφωνα με το σκοπό και τη λειτουργία της υποστήριξης. Χρησιμοποιούμενα από μόνα τους, αποτελούν γενικά μια ασυνεχή υποστήριξη που αποτελείται από δακτυλίους οι οποίοι απέχουν μεταξύ τους ώστε να λειτουργούν ανεξάρτητα. Επίσης, σε σύγκριση με άλλα τέτοια συστήματα στήριξης, όπως οι ηλώσεις και η επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, διακρίνονται από τη σχετική ανεξαρτησία τους από το περιβάλλον πέτρωμα που αντιστηρίζουν. Τα πλαίσια μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνα ή σε συνδυασμό με άλλα μέτρα όπως μεταλλικά φύλλα, ήλους, επένδυση από σκυρόδεμα, δομικό πλέγμα, κλπ.

Ο όρος *πλαίσιο* χαρακτηρίζει οποιαδήποτε δύσκαμπτη, ασυνεχή κατά μήκος του υπογείου ανοίγματος, κατασκευή υποστήριξης που τοποθετείται στο τοίχωμά του για την υποστήριξή του. Αυτός ο ορισμός αποκλείει, ειδικότερα, όλα τα συστήματα υποστήριξης που βασίζονται σε μεταλλικές επιφάνειες, τα οποία αποτυγχάνουν να ικανοποιήσουν το κριτήριο της ασυνέχειας. Τα πλαίσια μπορούν να καλύψουν είτε μέρος είτε ολόκληρο το περίγραμμα μιας σήραγγας. Στην πρώτη περίπτωση, η θεμελίωσή τους θα πρέπει να δύναται να διανέμει τα φορτία των άκρων τους, στη βραχομάζα, χωρίς υπερβολική παραμόρφωση (Σοφιανός, 2005).

Τα πλαίσια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εκτελέσουν διαφορετικές λειτουργίες, για τις οποίες απαιτούνται διαφορετικά χαρακτηριστικά. Είναι επομένως σημαντικό, πριν από την επιλογή του τύπου του πλαισίου, να καθοριστεί επακριβώς η λειτουργία του. Για ένα νέο υπόγειο έργο διακρίνονται δύο περιπτώσεις (Σοφιανός, 2005):

i. Μόνος σκοπός είναι η προστασία από καταπτώσεις μεμονωμένων τεμαχών πετρώματος, χωρίς προσπάθεια αποτροπής της σύγκλισης της διατομής. Αυτή η περίπτωση προκύπτει γενικά για βραχομάζα που, ενώ θραύεται, οι γεωτεχνικές της ιδιότητες είναι επαρκείς για τη συγκράτηση των παραμορφώσεων σε μικρές τιμές. Τα πλαίσια στην περίπτωση αυτή "*προστατεύουν*". Αποσκοπούν στην προστασία των εργαζομένων κατά την κατασκευή του έργου, και διαδραματίζουν ένα δευτερεύοντα ρόλο στην υποστήριξη της περιβάλλουσας βραχομάζας. Σε αυτήν την περίπτωση, χρησιμοποιούνται μόνα τους ή τοπικά σε συνδυασμό με φύλλα.
ii. Σκοπός είναι και η καθυστέρηση της παραμόρφωσης και της σύγκλισης των τοιχωμάτων πριν από την τοποθέτηση της οριστικής επένδυσης. Τα πλαίσια τότε "*υποστηρίζουν*" επειδή, στην πραγματικότητα, αναλαμβάνουν έναν μέρος της πίεσης σταθεροποίησης. Σε αυτή την περίπτωση τα τόξα διακρίνονται σε βαριά, με δύσκαμπτες συνδέσεις που αντέχουν ένα μεγάλο φορτίο και περιορίζουν τις παραμορφώσεις της διατομής, και σε ελαφρά που επιτρέπουν μεγαλύτερες παραμορφώσεις αλλά αναλαμβάνουν μικρά φορτία (Σοφιανός, 2005).

Οποιαδήποτε και αν είναι η λειτουργία τους, τα πλαίσια επιλέγονται ώστε να είναι συμβατά με τις συνθήκες διάνοιξης και τους περιορισμούς στο μέγεθος, λόγω μεταφοράς και τοποθέτησης. Τα χαλύβδινα πλαίσια εκτόπισαν την ξύλινη υποστήριξη ε-

πειδή η εκμηχάνιση συνοδεύτηκε, αφενός από την ανάγκη για τύπους υποστήριξης ικανούς να αφήνουν μεγάλα ανοίγματα διέλευσης του εξοπλισμού, αφετέρου δε από διαδικασίες τοποθέτησης πιο συστηματικές, που επιτρέπουν στην πρόοδο της υποστήριξης να συμβαδίζει με τη διάνοιξη. Εάν, εντούτοις, λόγω της φύσης της εργασίας, οι μέθοδοι διάνοιξης που επιλέγονται είναι καθαρώς χειρωνακτικές, το ξύλο μπορεί εύλογα να προτιμηθεί λόγω της ευκολίας τοποθέτησής του χωρίς μηχανήματα και της μεγάλη ευελιξίας προσαρμογής του στο πέτρωμα.

Γενικότερα, η αντικατάσταση της ξύλινης υποστήριξης με μεταλλική οφείλεται στις καλές μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα ως υλικού υποστήριξης. Τα κύρια χαρακτηριστικά του συνοψίζονται στη συνέχεια (Αγιουτάντης .2002):

- Είναι ομογενές υλικό και επομένως επιτρέπει τον σωστό σχεδιασμό με τη χρήση συντελεστών ασφαλείας.
- Έχει υψηλό μέτρο ελαστικότητας (περίπου 200GPa) και επομένως έχει καλύτερη συμπεριφορά σε παραμορφώσεις (π.χ. λυγισμό).
- Δεν επηρεάζεται όσο το ξύλο από την υγρασία και την θερμοκρασία.
- Είναι δυνατόν να ξαναχρησιμοποιηθεί ή να ανακτηθεί μέρος της αξίας του, αν ανακυκλωθεί.
- Είναι ακριβό υλικό.

Τα περισσότερα από τα πλαίσια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για προστασία, υποστήριξη, ή ενίσχυση σύμφωνα με τον τύπο της βραχομάζας και το μέγεθος του ανοίγματος και διακρίνονται (Σοφιανός, 2005):

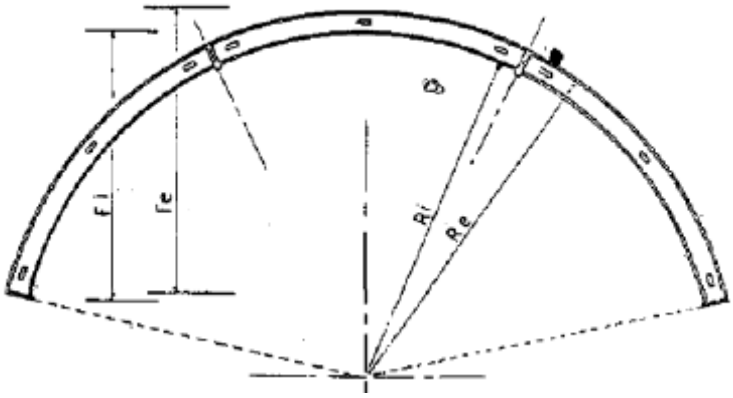
1. Βαριά πλαίσια από μορφοχάλυβα

Αυτά χρησιμοποιούνται γενικά για υποστήριξη ή ενίσχυση. Λόγω της μεγάλης ροπής αδράνειάς τους, μπορούν, στις περισσότερες περιπτώσεις, εάν στηρίζονται και τακάρονται σωστά, να καθυστερούν και περιορίζουν τις παραμορφώσεις του περιβάλλοντος πετρώματος. Λόγω της μεγάλης αντίστασής τους στην παραμόρφωση, μερικές διατομές υπόκεινται στον κίνδυνο ξαφνικής αστοχίας εάν η πίεση λόγω παρεμπόδισης της παραμόρφωσης της βραχομάζας υπερβαίνει την αντοχή του πλαισίου. Αυτό μπορεί να εμφανιστεί ειδικότερα σε βαθιά υπόγεια έργα. Με αυτήν την επιφύλαξη, μπο-

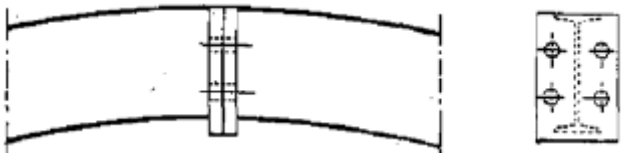
ρούν να χρησιμοποιηθούν όπου απαιτείται η διατήρηση του σχήματος της διατομής ή όπου η έκταση της ζώνης διαρροής της βραχομάζας γύρω από τη σήραγγα πρέπει αυστηρά να είναι περιορισμένη (αστικές αβαθείς σήραγγες). Όταν είναι απαραίτητη η πλήρης ή μερική κάλυψη της περιβάλλουσας βραχομάζας, μπορούν να τοποθετηθούν, μεταξύ των πλαισίων ή ως προπασσάλωση, πτυχωμένα μεταλλικά φύλλα, που δύνανται να είναι διάτρητα και να εφάπτονται μεταξύ τους. Τα πλαίσια διαχωρίζονται σε (Σοφιανός, 2005):

- πρότυπες δοκούς μορφοχάλυβα διατομής απλής ή σε ζεύγος,
- δικτυώματα μορφοχάλυβα,
- αρθρωτές δοκούς,
- ολισθαίνουσες δοκούς και
- δικτυώματα ράβδων.

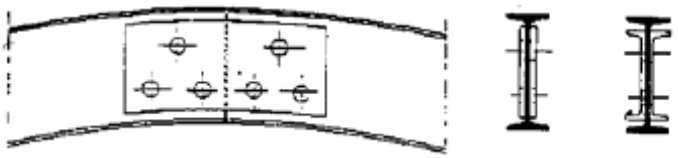
Οι απλές διατομές μορφοχάλυβα, που χρησιμοποιούνται γενικά είναι πρότυπες διατομές, IPE, HEA ή HEB. Συνήθως κάμπτονται (Σχήμα 4.10) ώστε να ταιριάζουν στο θεωρητικό περίγραμμα του θόλου.



α) Τυπική διάταξη



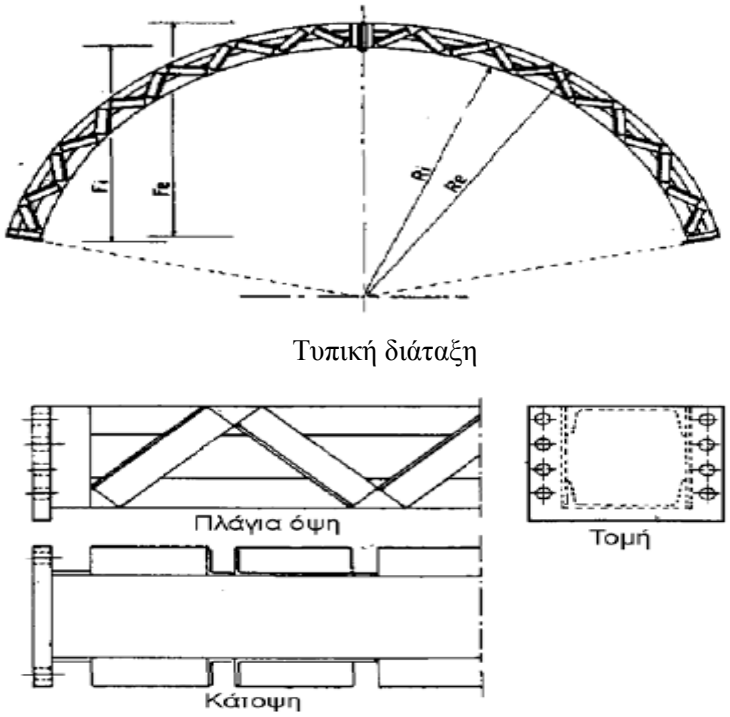
β) Λεπτομέρεια σύνδεσης με μετωπική πλάκα



γ) Λεπτομέρειες σύνδεσης με πλάκες στον κορμό

Σχήμα 4.10: Πλαίσια από απλές διατομές μορφοχάλυβα (Πηγή: Σοφιανός 2005)

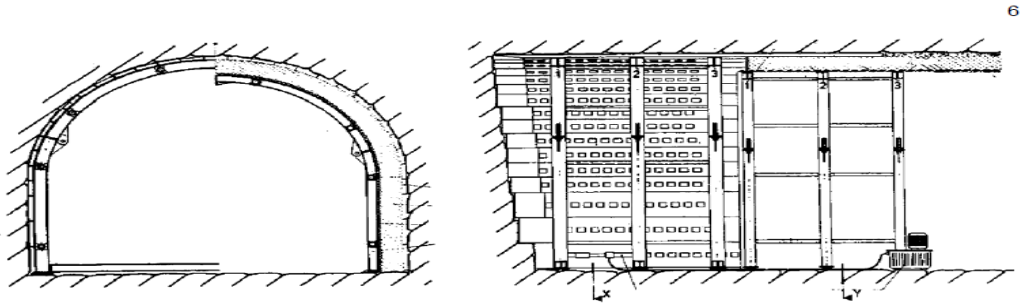
Με τη δημιουργία δικτυώματος από μορφοχάλυβα, μπορούν να κατασκευασθούν πλαίσια με υψηλή ροπή αδρανείας χωρίς σημαντική αύξηση του βάρους. Υπάρχουν πολλοί τύποι δικτυωμάτων που κατασκευάζονται από πρότυπες διατομές. Ένας από τους πιο συνήθεις αποτελείται από δύο δοκούς U καμπυλωμένες στο σχήμα του θόλου και συνδεμένες με διαγώνια γωνιακά ελάσματα Σχήμα 4.12.



Σχήμα 4.12: Δικτυώματα μορφοχάλυβα (Πηγή: Σοφιανός 2005)

Όταν η οργάνωση της διάνοιξης προβλέπει ότι η τοποθέτηση της οριστικής επένδυσης θα ακολουθεί σε σταθερή απόσταση το μέτωπο, και ότι τα πλαίσια δύνανται να αφαιρούνται και να ανακτώνται πριν από τη σκυροδέτηση, η χρησιμοποίηση μικρού αριθμού πλαισίων που θα ελαχιστοποιούν το χρόνο και το κόστος της τοποθέτησης και της αφαίρεσής τους είναι οικονομικά συμφέρουσα. Αυτός είναι ο σκοπός των αρθρωτών πλαισίων (Σχήμα 4.13), τα οποία έχουν γενικά δύο ή τρεις αρθρώσεις για να

διευκολύνουν τη μεταφορά τους κάτω από τα άλλα πλαίσια που είναι τοποθετημένα πλησίον του μετώπου.



Σχήμα 4.13: Αρθρωτά πλαίσια συνδυασμένα με υδραυλικά εμπηγνυόμενα φύλλα (τύπος Bernold) (Πηγή: Σοφιανός 2005)

2. Ελαφρά πλαίσια

Αυτά τα πλαίσια έχουν περιορισμένη φέρουσα ικανότητα και είναι ιδιαίτερα παραμορφώσιμα. Είναι πολύ ευκολότερα στον χειρισμό από τα βαριά πλαίσια και μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε για προστασία μόνο είτε για υποστήριξη της βραχομάζας. Τα ελαφρά μεταλλικά πλαίσια μπορούν επίσης να συνδυαστούν με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, με το οποίο είναι πλήρως συμβατά ακριβώς λόγω της ευκαμψίας τους. Οι τύποι ελαφρών μεταλλικών πλαισίων περιλαμβάνουν ολισθαίνοντα πλαίσια, ελαφρές διατομές, και πλαίσια από πτυχωμένα μεταλλικά φύλλα

3. Δικτυωτά πλαίσια

Στα δικτυωτά πλαίσια (lattice girders) ο όρος "δικτυωτό" αναφέρεται σε μεταλλικό φορέα αποτελούμενο από στρογγυλές ράβδους. Τα πλαίσια αυτά μπορούν να θεωρηθούν ως πλαίσια σκυροδέματος επειδή δεν χρησιμοποιούνται ποτέ μόνα τους αλλά για να ενισχύσουν το σκυρόδεμα. Λειτουργούν ως οπλισμός δοκού στην οποία οι διαμήκεις ράβδοι κάμπτονται στο σχήμα της εκσκαφής. Η διατομή αυτών των στοιχείων είναι γενικά τριγωνική 10 έως 30 cm σε κάθε πλευρά. Οι διαμήκεις ράβδοι συνδέονται μεταξύ τους, δια συγκόλλησης, με λεπτότερες ράβδους. Τα στοιχεία προετοιμάζονται στο εργοστάσιο και ενώνονται μεταξύ τους επί τόπου στις πλάκες που είναι συγκολλημένες στα άκρα τους. Μετά από την τοποθέτηση των πλαισίων, ψεκάζεται το σκυρόδεμα για να τα εγκιβωτίσει. Αυτός ο τύπος πλαισίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για την υποστήριξη, συνήθως, σχετικά ευσταθούς βραχομάζας είτε για να ενισχύσει υπάρχοντα έργα.

Ταιριάζει καλά σε έργα μέσης ή μεγάλης διατομής (μεγαλύτερης από 40m^2). Στις μεγάλες διατομές είναι γενικά απαραίτητη η στερέωση των πλαισίων με ήλους. Η επένδυση με σκυρόδεμα της επιφάνειας μεταξύ των πλαισίων οπλίζεται είτε με δομικό πλέγμα είτε με χαλύβδινες ίνες (Σοφιανός, 2005).

Τα δικτυωτά πλαίσια Σχήμα 4.13 προσφέρουν τις παρακάτω σημαντικές λειτουργίες στην διαδικασία κατασκευής σηράγγων (Komselis et al).

i. Επείγουσα προσωρινή υποστήριξη/συγκράτηση ασταθούς εδαφικής μάζας.
ii. Ακριβής καθορισμός του προφίλ της σήραγγας εκσκαφής.
iii. Πάκτωση του οπλισμού εντός του κελύφους του εκτοξευόμενου σκυροδέμτος.
iv. Αμφιέριστη στήριξη υποστήριξης στο μέτωπο.
v. Προσωρινή υποστήριξη του εκτοξευόμενου σκυροδέματος έως ότου αποκτήσει ικανοποιητική αντοχή ώστε να υποστηρίζεται μόνο του.
vi. Ακριβής οδηγός του πάχους εφαρμογής του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.
vii. Συμμετοχή του οπλισμού στο κέλυφος υποστήριξης

Σχήμα 4.13: Τυπική διάταξη δικτυωτού πλαισίου (Πηγή: Komselis et al,)

4.3.2: Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Ο όρος shotcrete (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα) δόθηκε για πρώτη φορά το 1930 από την Αμερικανική Ένωση Σιδηροδρόμων. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, κατά την ACI 506R-

85 “Οδηγός Εκτοξευόμενου Σκυροδέματος”, ονομάζεται το σκυρόδεμα (ή κονίαμα) που μεταφέρεται μέσα σε σωλήνες και εκτοξεύεται υπό την πίεση αέρα με μεγάλη ταχύτητα επάνω σε μία επιφάνεια. Παλαιότερα χρησιμοποιείτο διεθνώς και ο όρος "gunite" ο οποίος προερχόταν από σχετική κατοχύρωση ευρεσιτεχνίας. Η αποτελεσματικότητα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στην αποφυγή της χαλάρωσης του πετρώματος πιστοποιήθηκε σε μία πληθώρα γεωλογικών συνθηκών, είναι δε ιδιαίτερα ενδεδειγμένη σε χαλαρό πέτρωμα και σε μη ομοιόμορφες διατομές εκσκαφής (Σοφιανός, 2005).

Το σκυρόδεμα που εκτοξεύεται από το ακροφύσιο (Σχήμα 4.14) σε μία τραχεία επιφάνεια πετρώματος, αρχικά γεμίζει τα κενά, όπως ρωγμές, σχισμές ή διακλάσεις, συνδέοντας τα χαλαρά ή μερικά στηριζόμενα θραύσματα, και παρεμποδίζει την περαιτέρω αποσύνθεση. Η συγκόλληση εξαρτάται από τη πλέξη των σωματιδίων του σκυροδέματος με τους κόκκους της επιφάνειας του πετρώματος. Αρχικά σχηματίζεται ένα λεπτό στρώμα τσιμεντοκονίας με κόκκους άμμου μικρότερους από 0.2 mm. Αυτό το λεπτόκοκκο υλικό εισχωρεί στους πόρους και στις ρωγμές και προσφέρει μία βάση για την εκτόξευση και συμπύκνωση του υπολοίπου πάχους. Κατά τη δημιουργία του αρχικού στρώματος τα χονδρόκοκκα αδρανή αναπηδούν και πέφτουν στο δάπεδο. Η πρόσφυση είναι προφανώς καλύτερη σε πρόσφατα θραυσμένο, καθαρισμένο, τραχύ πέτρωμα, παρά σε λεία επιφάνεια πλαστικού ή μετάλλου. Διαβρωμένα, θραυόμενα, εύθρυπτα, λασπώδη ή αργιλικά πετρώματα έχουν φτωχή πρόσφυση. Ο καθαρισμός της επιφάνειας του πετρώματος μπορεί να γίνει με ψεκασμό μείγματος νερού και πιεσμένου αέρα από το ακροφύσιο του εκτοξευτήρα. Ζημιά στο σκυρόδεμα μπορεί να προκληθεί από τη διήθηση νερού, που γι’ αυτό θα πρέπει να παρακαμφθεί, όπως π.χ. με τη διάτρηση οπών και τοποθέτηση σωλήνων συνδεμένων με το σύστημα στράγγισης. Η εκτόξευση σκυροδέματος γίνεται συχνά αμέσως μετά τη δημιουργία της νέας επιφάνειας. Για την εξασφάλιση της γρήγορης πήξης χρησιμοποιούνται επιταχυντικά πρόσθετα στο μείγμα. Η απώλεια που προκαλείται στην τελική αντοχή αντισταθμίζεται από την αυξημένη ασφάλεια και αποτελεσματικότητα.

Οι βασικοί λόγοι χρήσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος σαν επένδυσης είναι :

- Η παρεμπόδιση ή ελαχιστοποίηση των μετακινήσεων του χαλαρούμενου πετρώματος με την ισχυροποίηση της μάζας της οποίας γεμίζονται τα κενά, με

τη μεταφορά του φορτίου του πετρώματος σε γειτονικό ευσταθές πέτρωμα με δυνάμεις διάτμησης ή συγκόλλησης, και με λειτουργία φορέα μεμβράνης.

- Σε οξειδωμένο ή χαλαρούμενο πέτρωμα, η στεγάνωσή του που παρεμποδίζει την περαιτέρω χαλάρωση λόγω της έκθεσης του πετρώματος σε υγρό αέρα ή υπόγεια νερά.
- Ο έλεγχος της δημιουργίας νερού και πάγου, με την ανακατεύθυνση, τη στράγγιση ή το σταμάτημα της ροής.

Σχήμα 4.14: Μηχανή εφαρμογής εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε υπόγειο έργο. Η απόσταση μεταξύ του ακροφυσίου και της επιφάνειας του πετρώματος είναι περίπου στο 1 m (Πηγή: Hoek, Kaiser, Bawden, 1995)

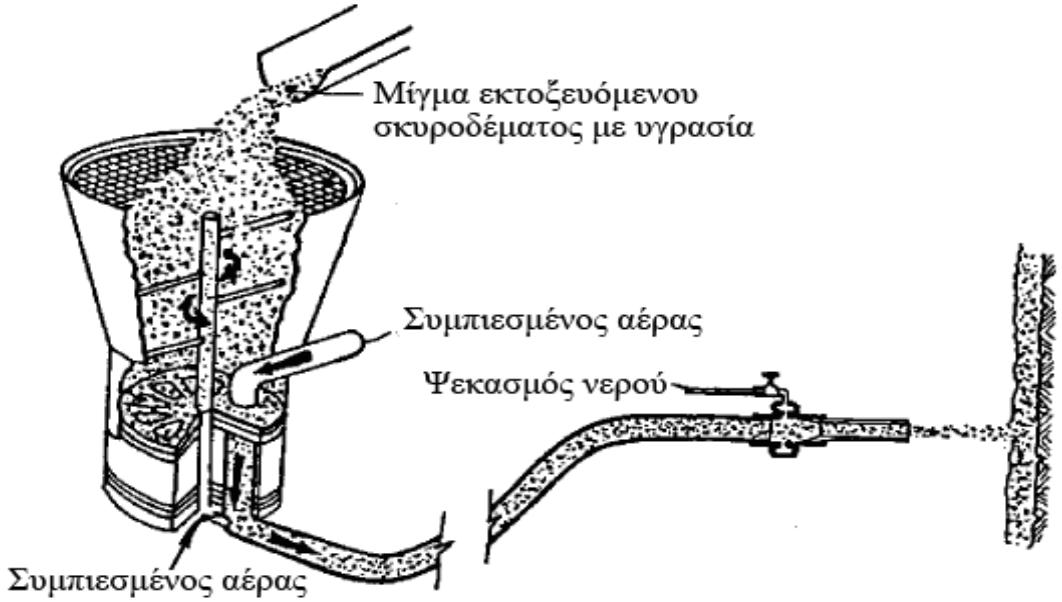
Οι τεχνικές εφαρμογής του εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι αφ' ενός του ξερού μίγματος και αφ ετέρου του υγρού μίγματος. Επειδή και οι δύο διαδικασίες είναι σύμφωνες με τις συνήθεις απαιτήσεις ποιότητας εκτοξευόμενου σκυροδέματος, η επιλογή της μεθόδου γίνεται βασικά με κριτήρια πρακτικότητας και οικονομικότητας (Σοφιανός, 2005).

Στο Σχήμα 4.15 παρουσιάζεται η απλοποιημένη απεικόνιση τυπικού συστήματος ξηρής ανάμειξης. Συμπιεσμένος αέρας εισέρχεται μέσω ενός περιστρεφόμενου κυλίνδρου για να προωθήσει το μίγμα μέσω σωληνώσεων στο ακροφύσιο. Το νερό για την

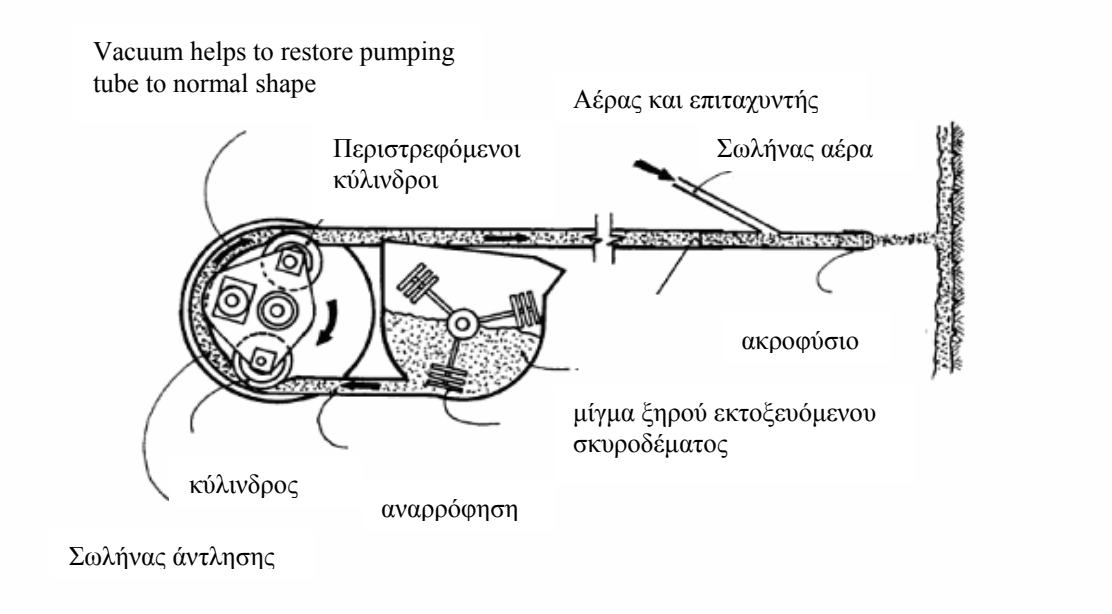
ενυδάτωση προστίθεται υπό πίεση στο ακροφύσιο πριν την εκτόξευση (Hoek et al, 1995).

Στο Σχήμα 4.16 παρουσιάζεται η τυπική απεικόνιση συστήματος υγρής μίξης. Σ' αυτήν την περίπτωση γίνεται ανάμειξη αδρανών, τσιμέντου και νερού. Το μίγμα τροφοδοτεί την αντλία μέσω της οποίας μεταφέρεται και προωθείται στο ακροφύσιο όπου και ψεκάζεται στο τοίχωμα.

Το τελικό προϊόν που προκύπτει είναι το ίδιο και για τις δύο μεθόδους. Η μέθοδος της ξηρής μίξης χρησιμοποιείται συχνότερα σήμερα γιατί ο εξοπλισμός είναι ελαφρύτερος και οικονομικότερος. Τα ξερά υλικά μπορούν να μεταφερθούν σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Οι μηχανές υγρής μίξης δεν μπορούν να μεταφερθούν σε προβληματικές περιοχές που απαιτείται γρήγορη επέμβαση.



Σχήμα 4.15: Απλοποιημένη σχηματική απεικόνιση τυπικού συστήματος ξηρής ανάμειξης εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Πηγή: Hoek et al, 1995)



Σχήμα 4.16: Σχηματική απεικόνιση τυπικού συστήματος υγρής ανάμειξης εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Πηγή: Hoek et al, 1995)

4.4 Τελική επένδυση

Η άμεση υποστήριξη της σήραγγας συνήθως ακολουθείται από την κατασκευή της τελικής επένδυσης η οποία αναλαμβάνει μέρος (ή το σύνολο) των φορτίων της περιβάλλουσας βραζόμαζας. Η τελική επένδυση συνήθως κατασκευάζεται μετά την ολοκλήρωση της διάνοιξης και άμεσης υποστήριξης του συνόλου του μήκους της σήραγγας αλλά οπωσδήποτε αφού η σήραγγα ισορροπήσει με την άμεση υποστήριξη, δηλαδή αφού πρακτικώς μηδενισθούν οι ρυθμοί εξέλιξης των μετακινήσεων, εντάσεων κλπ (Καββαδάς, 2004).

Η τελική επένδυση σηράγγων συνήθως σχεδιάζεται για να αναλάβει τα εξής φορτία:

1. Το φορτίο που αρχικά αναλαμβάνεται από τα αγκύρια, στην περίπτωση προσωρινών αγκυρίων ή στην περίπτωση βραχόμαζας με έντονα ερπυστική συμπεριφορά.
2. Μέρος του φορτίου που αναλαμβάνεται από το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ώστε το απομένον φορτίο του εκτοξευόμενου σκυροδέματος να ικανοποιεί τις απαιτήσεις ασφαλείας μονίμου έργου (δεδομένου ότι κατά την άμεση υποστήριξη της σήραγγας το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα μπορεί να λειτουργεί με μειωμένο συντελεστή ασφαλείας προσωρινού έργου).

3. Τυχόν αυξημένα φορτία της βραχόμαζας λόγω ερπυσμού. Με την πάροδο του χρόνου, η βραχόμαζα που περιβάλλει ένα υπόγειο έργο υπόκειται σε ερπυστικές παραμορφώσεις με αποτέλεσμα την αύξηση των φορτίων στην τελική επένδυση.
4. Τυχόν υδατικές πιέσεις λόγω πλημμελούς αποστράγγισης ή απρόβλεπτης απόφραξης του συστήματος αποστράγγισης.
5. Τυχόν φορτία από μελλοντικές κατασκευές που φορτίζουν τη σήραγγα.
6. Τυχόν σεισμική επιφόρτιση της σήραγγας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ - ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ FLAC

5.1 Μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών

Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών είναι ίσως η παλαιότερη τεχνική αριθμητικής επίλυσης ομάδων διαφορικών εξισώσεων, λαμβάνοντας υπόψη μας τις αρχικές συνθήκες και τις συνοριακές συνθήκες. Στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών κάθε παράγωγος στο σύνολο των εξισώσεων αντικαθίσταται από μια αλγεβρική έκφραση γραμμένη με όρους από το πεδίο των μεταβλητών (π.χ. τάση ή μετακίνηση) σε ιδιαίτερα σημεία της περιοχής μελέτης (FLAC6, 2008).

Στην μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών ζητείται ο υπολογισμός των άγνωστων μεγεθών στους κόμβους, οι οποίοι δημιουργούνται από τη διαίρεση του πεδίου σε νοητά στοιχεία. Σε αντιδιαστολή με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, το πεδίο δεν διαιρείται σε στοιχεία, αλλά ορίζονται κόμβοι πάνω σ' αυτό, οι οποίοι καλύπτουν όλο το πεδίο ορισμού των ζητούμενων μεγεθών. Στη συνέχεια, είναι δυνατόν να υπολογισθεί η τιμή των ζητούμενων μεγεθών αυτών σε κάθε κόμβο του πεδίου, με την θεώρηση των κατάλληλων συναρτήσεων, οι οποίες συνδέουν τα ζητούμενα μεγέθη στους κόμβους του πεδίου (Αγιουτάντης, 2002).

Και οι δύο μέθοδοι ωστόσο παράγουν ένα σύνολο αλγεβρικών εξισώσεων το οποίο κ επιλύουν. Ακόμη και αν αυτές οι δύο εξισώσεις παράγονται με διαφορετικούς τρόπους, είναι φανερό ότι οι προκύπτουσες εξισώσεις είναι ίδιες και στις δύο μεθόδους. Τα προγράμματα των πεπερασμένων στοιχείων συχνά συνδυάζουν τα μητρώα στοιχείων σε ένα μεγάλο σφαιρικό μητρώο ακαμψίας, πράγμα που δεν συμβαίνει στην μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, κατά την οποία αναπαράγονται οι πεπερασμένες εξισώσεις σε κάθε βήμα. Όπως εξηγείται παρακάτω το FLAC χρησιμοποιεί μια άμεση μέθοδο για την επίλυση αλγεβρικών εξισώσεων, ενώ έμμεσες matrix-oriented solution schemes είναι πιο συχνές στα πεπερασμένα στοιχεία.

Πολλοί πιστεύουν ότι οι πεπερασμένες διαφορές πραγματοποιούνται αυστηρά σε ορθογωνικό πλέγμα. Ο Wilkins (1964) παρουσίασε μια μέθοδο παραγωγής πεπερασμένων εξισώσεων για στοιχεία οποιουδήποτε σχήματος. Αυτή η μέθοδος περιγράφεται και ως *finite volume method* και χρησιμοποιείται στο FLAC. Η λανθασμένη άποψη ότι οι πεπερασμένες διαφορές και τα ορθογώνια πλέγματα είναι αδιάσπαστα, είναι η αιτία για πολλές δηλώσεις σε σχέση με τις συνοριακές συνθήκες και την κατανομή των ιδιοτήτων των υπό μελέτη υλικών. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Wilkins τα σύνορα μπορούν να έχουν οποιαδήποτε μορφή και κάθε στοιχείο μπορεί να έχει οποιαδήποτε ιδιότητα, όπως ακριβώς στα πεπερασμένα στοιχεία (FLAC 6, 2008).

5.2 Το λογισμικό FLAC

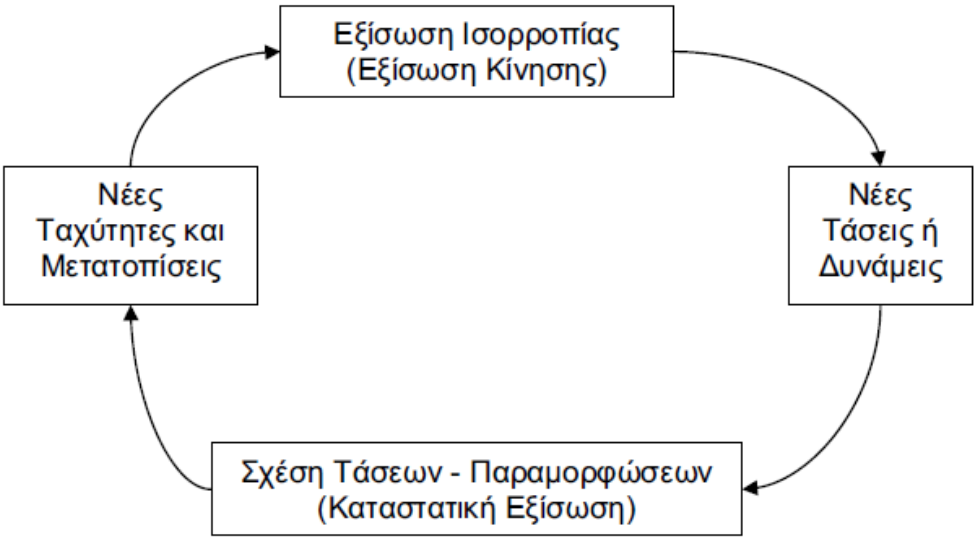
Η επίλυση πολύπλοκων στατικών προβλημάτων χαρακτηρίζεται συνήθως από την αδυναμία εύρεσης αναλυτικής λύσης «κλειστής» μορφής. Για τον λόγο αυτό, τα τελευταία 10-20 χρόνια έχει δοθεί έμφαση στη χρήση αριθμητικών μεθόδων, για την εύρεση προσεγγιστικών λύσεων ή την ποιοτική αξιολόγηση του φαινομένου που διερευνάται. Συνάμα, πολλά προγράμματα ηλεκτρονικού υπολογιστή έχουν κάνει την εμφάνιση τους, για χρήση τόσο στην επαγγελματική πράξη, όσο και σε ερευνητικές εργασίες.

Το λογισμικό FLAC (Itasca) είναι ένα πρόγραμμα ηλεκτρονικού υπολογιστή, που χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών με δυναμική χαλάρωση για την επίλυση κυρίως προβλημάτων που σχετίζονται με συνεχή μέσα (από αυτά, άλλωστε, προήλθε και το όνομα του: Fast Lagrangian Analysis of Continua). Αν και χρησιμοποιείται κατά πρώτο λόγο για προβλήματα Γεωτεχνικής Μηχανικής, μπορεί να γίνει χρήση του και σε πολλά άλλα στατικά προβλήματα. Στη συνέχεια, θα παρουσιασθεί συνοπτικά το θεωρητικό υπόβαθρο του λογισμικού και θα τονισθούν τα στοιχεία του που θα χρησιμοποιηθούν στην παρούσα εργασία (FLAC 6, 2008).

Η διατύπωση των εξισώσεων για τα διάφορα είδη προβλημάτων προς επίλυση- π.χ. στατικές ή δυναμικές αναλύσεις- γίνετε με εφαρμογή της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών στην άμεση μη- πεπλεγμένη μορφή της (explicit form). Καταρχήν, το συνεχές μέσον διακριτοποιείται σε πολλά τμήματα πεπερασμένων διαστάσεων, που στο

FLAC ονομάζονται ζώνες (zones). Αυτή η διακριτοποίηση χρησιμοποιείται λίγο πολύ σε όλες τις αριθμητικές μεθόδους, όπως η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιείται περισσότερο από οποιαδήποτε άλλη σήμερα. Η ισορροπία δυνάμεων ικανοποιείται στα σημεία που ορίζουν το δίκτυο των πεπερασμένων διαφορών, που λέγονται κόμβοι (gridpoints) (FLAC 6, 2008).

Αυτό διαφοροποιεί το FLAC από τη συντριπτική πλειοψηφία των σημερινών προγραμμάτων είναι η διατύπωση των εξισώσεων σε μη-πεπλεγμένη μορφή. Τα περισσότερα λογισμικά διατυπώνουν τις χαρακτηριστικές εξισώσεις του προβλήματος στην πεπλεγμένη μορφή (implicit form): προχωρούν, δηλαδή, στην επίλυση του οποιοιδήποτε προβλήματος καταστρώνοντας και εν συνεχεία λύνοντας ταυτόχρονα όλες τις εξισώσεις ισορροπίας. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται μητρώα και η επίλυση γίνεται με μεθόδους που περιλαμβάνουν πράξεις σε μητρώα. Αντίθετα, το FLAC εξετάζει ανεξάρτητα την ισορροπία κάθε κόμβου, χωρίς να λαμβάνει υπόψιν την επίδραση των άλλων κόμβων. Ακολουθεί μια επαναληπτική διαδικασία διαδοχικών επιλύσεων, μέχρις ότου ικανοποιηθεί η συνθήκη ισορροπίας (που εδώ μεταφράζεται στην απαίτηση η συνισταμένη κάθε κόμβου να είναι μικρότερη από μια μέγιστη αποδεκτή τιμή). Ένα τυπικό βήμα της έμμεσης μεθόδου επίλυσης του FLAC, παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.1.



Σχήμα 5.1: Βασικό μη πεπλεγμένο βήμα επίλυσης στο FLAC (Πηγή: FLAC 6, 2008)

Όπως προαναφέρθηκε, κατά τη διάρκεια ενός βήματος θεωρούνται γνωστές οι τάσεις του προηγούμενου βήματος. Από τις τάσεις στις ζώνες προκύπτουν οι ισοδύναμες δυνάμεις στους κόμβους του δικτύου, που οφείλονται στην εντατική κατάσταση του μέσου. Αυτές επαλληλίζονται με δυνάμεις απόσβεσης και εξωτερικές δυνάμεις δίνοντας την μη ισορροπούσα δύναμη ΣF σε κάθε κόμβο. Η δύναμη αυτή θα πρέπει σύμφωνα με τη διαφορική εξίσωση κίνησης να είναι ίση με την αδρανειακή δύναμη. Έτσι διαιρώντας με την ισοδύναμη μάζα m κάθε κόμβου- που υπολογίζεται από τις μάζες των τεσσάρων περιβαλλουσών ζωνών-και πολλαπλασιάζοντας το πηλίκο με το χρονικό βήμα υπολογισμού Δt, προκύπτει η προσαύξηση της ταχύτητας κάθε κόμβου από τη σχέση:

$$u'_{(t+\frac{\Delta t}{2})} = u'_{(t+\frac{\Delta t}{2})} + \frac{\Sigma F}{m}\,\Delta t$$

Με παραγώγιση των ταχυτήτων προκύπτουν οι ρυθμοί μεταβολής των παραμορφώσεων (strain rates): $e_{ij}' = \frac{1}{2}\left[\frac{\partial \upsilon'_i}{\partial \chi_j} + \frac{\partial \upsilon'_j}{\partial \chi_i}\right]$ και από αυτούς (μέσω του καταστατικού προσομοιώματος) προκύπτουν οι τάσεις του βήματος (προσαύξηση του συγκεκριμένου βήματος και συνολική τάση), οπότε και μπορεί να προχωρήσει η διαδικασία του επόμενου βήματος.

Στην περίπτωση που το πρόβλημα επιλύεται δυναμικά, η μάζα και η σταθερά αποσβέσεως αντιστοιχούν σε πραγματικές παραμέτρους, ενώ τα βήματα υπολογισμού αντιστοιχούν σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Αν η επίλυση επιλεγεί να γίνει στατικά, τότε μάζα και σταθερά αποσβέσεως και το βήμα υπολογισμού καθορίζονται από τον ίδιο κώδικα, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ταχύτερη σύγκλιση. Σημειώνεται, ότι σε δυναμικά προβλήματα το χρονικό βήμα υπολογίζεται από τον κώδικα έτσι ώστε να είναι μικρότερο από τον κωδικό έτσι ώστε να είναι μικρότερο από το κρίσιμο για το οποίο ισχύει:

$$\Delta t_{crit} = \min\left[\frac{A}{V_P * d_{max}}\right]$$

Όπου A το εμβαδόν της τριγωνικής υποζώνης κάθε ζώνης του δικτύου, d_{max} η μεγαλύτερη διαγώνιος της και V_P η ταχύτητα διάδοσης των διαμήκων κυμάτων όπως αυτή

υπολογίζεται από τις δεδομένες ελαστικές σταθερές του προβλήματος. Το minimum αναφέρεται στον ελάχιστο λόγο που απαντάται σε όλο το δίκτυο. Ο περιορισμός αυτός του χρονικού βήματος υπολογισμού οφείλεται στην απαίτηση όπως η «πληροφορία» σε ότι αφορά εντάσεις παραμορφώσεις και δράσεις να μην διαδίδεται μέσα στον κάνναβο με ταχύτητα διάδοσης των διαμήκων κυμάτων, παραβιάζοντας τον πραγματικό μηχανισμό που συναντάτε στην φύση και συνεπώς επιβαρύνοντας την ευστάθεια του συστήματος.

Ένας άλλος λόγος για τον οποίο απαιτείται μικρό χρονικό βήμα είναι για να διασφαλισθεί ότι η θεώρηση σταθερών τάσεων (που γίνεται κατά τους υπολογισμούς ενός βήματος) προσεγγίζει ικανοποιητικά την πραγματικότητα.

Το μεγάλο πλεονέκτημα του FLAC έναντι των «συνηθέστερα χρησιμοποιούμενων» προγραμμάτων (που χρησιμοποιούν πεπλεγμένες μεθόδους) έγκειται στο ότι οι τάσεις υπολογίζονται απευθείας από τις παραμορφώσεις, ακόμα και αν η συμπεριφορά είναι έντονα μη-γραμμική. Αντίθετα, στις πεπλεγμένες μεθόδους, για μη γραμμική συμπεριφορά, απαιτείται μια επαναληπτική διαδικασία με πράξεις επί μητρώων, για τον υπολογισμό των μετακινήσεων, και στη συνέχεια με παραγώγιση του πεδίου των μετακινήσεων, προκύπτουν οι τάσεις και παραμορφώσεις. Εκτός από αυτό, στη μη πεπλεγμένη διατύπωση είναι πολύ εύκολο σε κάθε υπολογιστικό βήμα να ανανεώνονται οι συντεταγμένες των κόμβων, αφού δεν δημιουργούνται μητρώα, κάτι που σημαίνει ότι μπορούν εύκολα να ληφθούν υπόψη και φαινόμενα γεωμετρικών μη γραμμικοτήτων. Από την άλλη, βασικό μειονέκτημα της μη πεπλεγμένης μεθόδου είναι το ότι η απαίτηση για πολύ μικρό χρονικό βήμα κατά τον υπολογισμό μεταφράζεται σε πολλά μικρά υπολογιστικά βήματα. Με άλλα λόγια, ναι μεν απαιτείται μικρή ποσότητα μνήμης ταυτόχρονα όμως χρειάζεται μεγάλη υπολογιστική ισχύς.

Για την περιγραφή της συμπεριφοράς του υλικού των ζωνών του δικτύου μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια πληθώρα νόμων συμπεριφοράς. Μπορούν, για παράδειγμα να χρησιμοποιηθούν ελαστικά προσομοιώματα, που συσχετίζουν γραμμικά τις τάσεις με τις παραμορφώσεις Mohr-Coulomb, τα οποία περιγράφουν ελαστοπλαστικά υλικά που η αστοχία τους καθορίζεται από το κριτήριο Mohr-Coulomb, κάτι που ως γνωστόν θεωρείται ότι περιγράφει ικανοποιητικά τη συμπεριφορά των εδαφών. Περαιτέ-

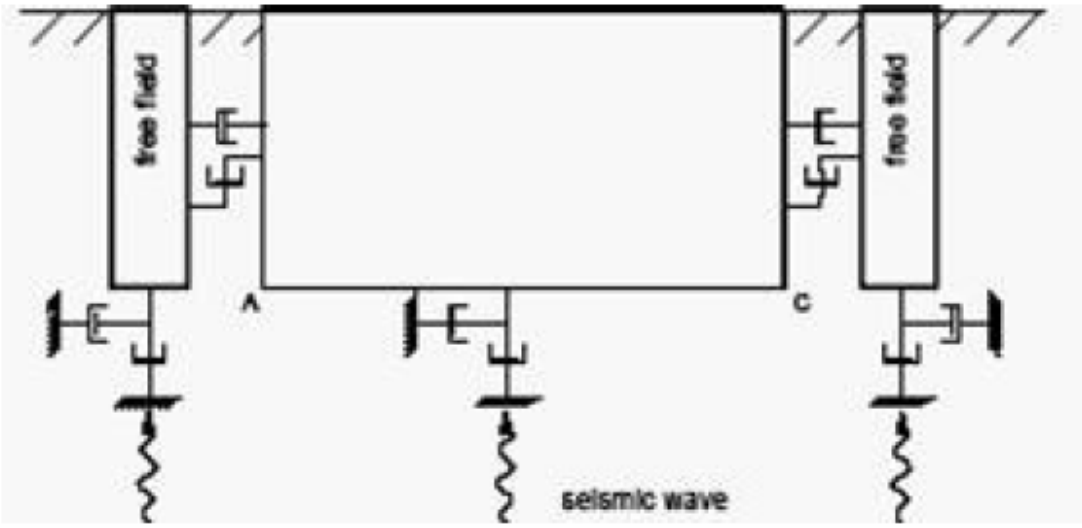
ρω, μπορούν να εισαχθούν καταστατικά προσομοιώματα ορισμένα εξ' ολοκλήρου από το χρήστη (FLAC 6, 2008).

Εκτός από το καταστατικό προσομοίωμα του εδαφικού υλικού, απαραίτητο είναι να χρησιμοποιηθούν τα κατάλληλα «εργαλεία» τα οποία μας παρέχει το λογισμικό για καλύτερη προσομοίωση κάθε φαινομένου. Προφανώς, ένα από αυτά είναι η απόσβεση. Επειδή το υλικό που εισάγεται στις αναλύσεις είναι ελαστοπλαστικό, η υστερητική απόσβεση δεν χρειάζεται να εισαχθεί με κάποιον τρόπο, καθώς οι βρόχοι υστέρησης δημιουργούνται αυτόματα, λόγω του ορισμού ελαστοπλαστικού υλικού. Παρόλα αυτά, απαιτείται προφανώς μια τιμή της απόσβεσης που (ούτως ή άλλως) εμφανίζεται για ελαστική συμπεριφορά. Ως γνωστόν, η απόσβεση αυτή είναι ανεξάρτητη από τη συχνότητα (rate-independent damping). Στο FLAC όμως δεν υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής τέτοιου είδους απόσβεσης, γι'αυτό το λόγο θεωρείται ιξώδης απόσβεση Rayleigh. Η τιμή του λόγου ξ που προκύπτει με βάση αυτή τη μέθοδο εξαρτάται από την τιμή της συχνότητας της φόρτισης. Επειδή οι διεγέρσεις που εισάγονται έχουν συνήθως μια δεδομένη συχνότητα, η τιμή του ζ που είναι επιθυμητό να έχει το έδαφος για γραμμική συμπεριφορά αντιστοιχίζεται στην τιμή της συχνότητας του κραδασμού.

Παράλληλα, πρέπει να δοθεί προσοχή στα σύνορα που θα χρησιμοποιηθούν. Πιο συγκεκριμένα, επειδή πρέπει να προσομοιωθούν συνθήκες όπου το έδαφος εκτείνεται απεριόριστα κατά την οριζόντια έννοια, θα πρέπει να εισαχθούν τα κατάλληλα σύνορα, τα σύνορα ελεύθερου πεδίου (free field boundaries) όπως αποκαλούνται. Αυτά επιβάλλουν τις ίδιες τάσεις που θα επέβαλε η ύπαρξη μιας στήλης υλικού ίδιου με το υλικό που καταλήγει στο άκρο, χωρίς να απαιτείται η εφαρμογή μεγάλου πλάτους δικτύου. Έτσι, δεν έχουμε ανακλάσεις κυμάτων στα δύο κατακόρυφα σύνορα, οι οποίες θα οδηγούσαν στην εξαγωγή λανθασμένων αποτελεσμάτων. Μία σχηματική αναπαράσταση προσομοιώματος εδαφικού σχηματισμού με σύνορα ελεύθερου πεδίου φαίνεται στο Σχήμα 5.2:

Για την προσομοίωση της συμπεριφοράς-στατικής ή δυναμικής-κορεσμένων εδαφικών υλικών, το FLAC μπορεί να εκτελέσει αναλύσεις στις οποίες έχει γίνει σύζευξη προβλήματος μηχανικής συμπεριφοράς και υδατικής ροής διαμέσου πορώδους μέσου. Με βάση την τάση του υλικού για μεταβολή του όγκου των πόρων σε ένα δεδομένο

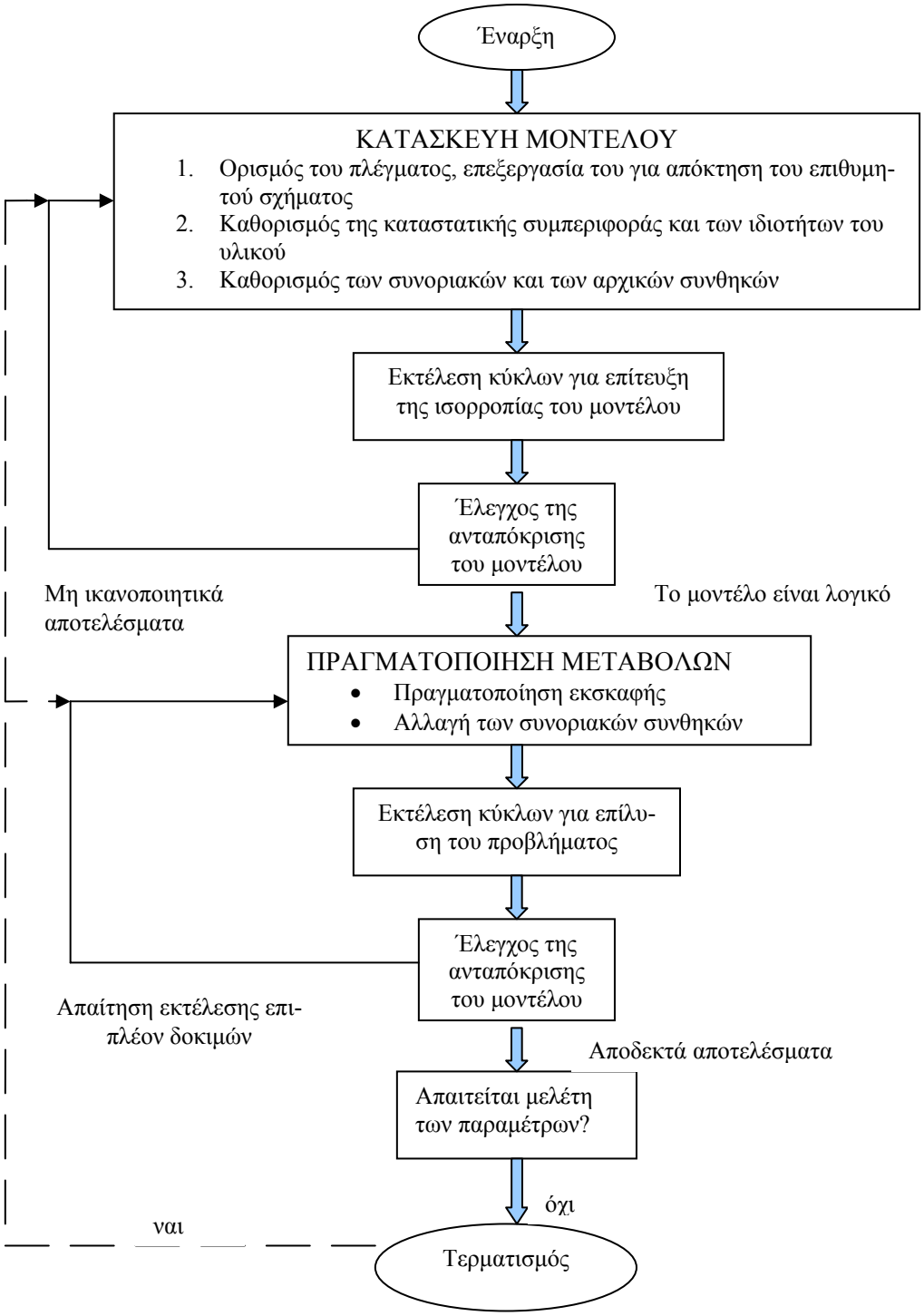
βήμα επίλυσης, υπολογίζεται, με χρήση κατάλληλης σχέσης, η αναπτυσσόμενη υπερπίεση ύδατος πόρων και έτσι μπορούν να υπολογιστούν νέες τιμές των ενεργών τάσεων που με τη σειρά τους θα δώσουν νέα τιμή της μεταβολής όγκου στο επόμενο βήμα επίλυσης.



Σχήμα 5.2: Προσομοίωση εδαφικού σχηματισμού υπό σεισμική διέγερση με χρήση συνόρων ελεύθερου πεδίου (Πηγή: FLAC 6, 2008)

Το FLAC διαθέτει ένα καταστατικό προσομοίωμα (Finn Model), που στην ουσία είναι ένα προσομοίωμα Mohr-Coulomb στο οποίο όμως υπολογίζονται (με τον τρόπο που αναφέρθηκε παραπάνω) οι πιέσεις ύδατος πόρων κάθε βήματος, και λαμβάνεται φυσικά υπόψη η επίδραση τους στη μηχανική απόκριση. Η ανάπτυξη υπερπιέσεων πόρων υπολογίζεται με βάση τις εμπειρικές συσχετίσεις των Martin(1975) ή Byrne (1991). Φυσικά ο χρήστης του λογισμικού έχει τη δυνατότητα να επέμβει και να εισάγει οποιαδήποτε σχέση επιθυμεί για τον υπολογισμό των υδατικών υπερπιέσεων (FLAC 6, 2008).

Η γενική διαδικασία επίλυσης του FLAC φαίνεται στο Σχήμα 5.3, είναι βολική καθώς αντιπροσωπεύει την αλληλουχία διεργασιών που συμβαίνουν στο φυσικό περιβάλλον. Οι βασικές εντολές του FLAC περιγράφονται στη συνέχεια.



Σχήμα 5.3: Γενική διαδικασία επίλυσης στο FLAC (FLAC 6, 2008).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΟΔΙΚΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ

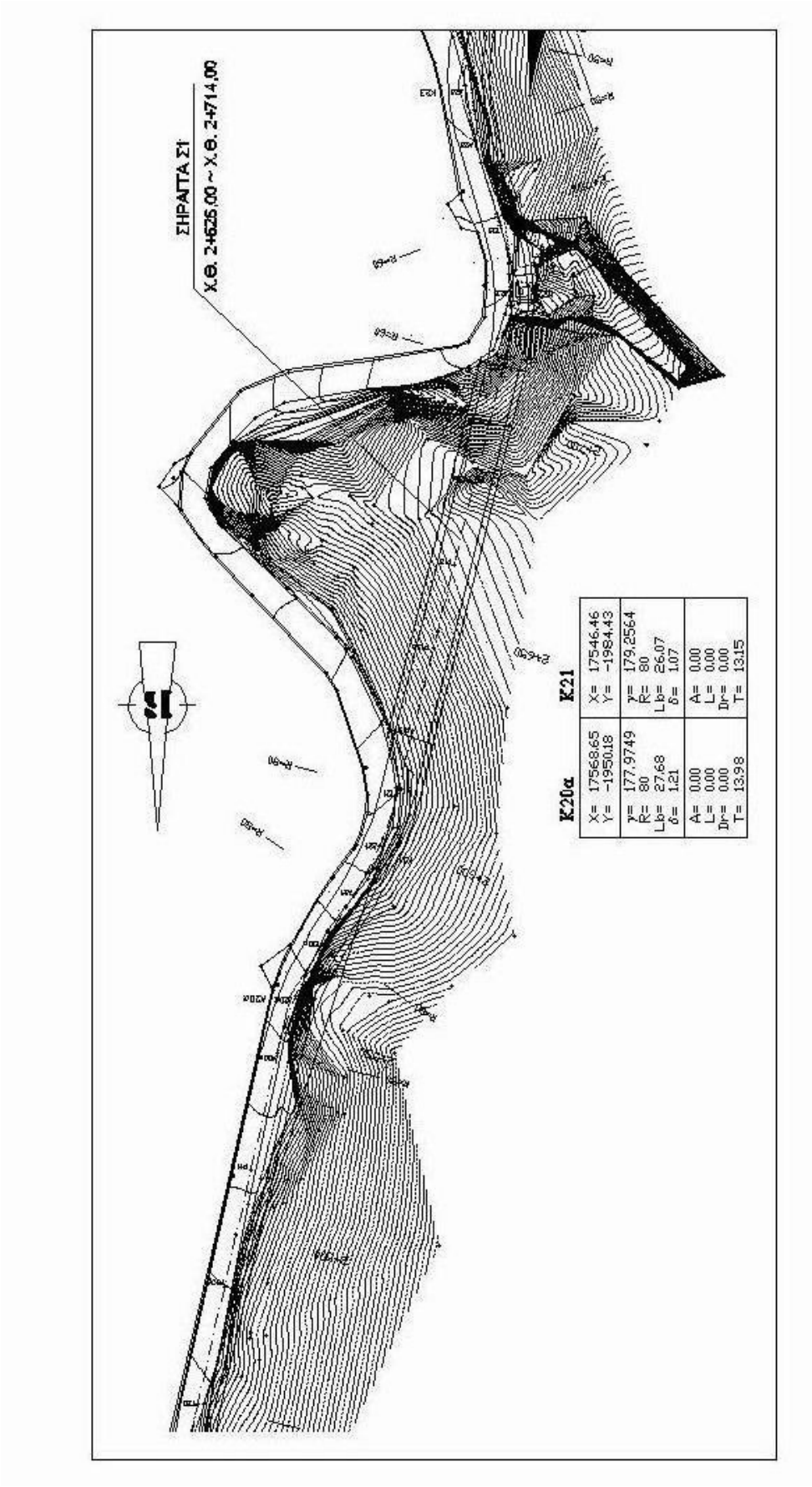
Για τη μελέτη ενός προβλήματος εκσκαφής υπόγειου ανοίγματος με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, αρχικά απαιτείται η μοντελοποίηση του μέσου, στο οποίο θα πραγματοποιηθεί η εκσκαφή. Η διαδικασία περιλαμβάνει την εισαγωγή κατάλληλων καταστατικών μοντέλων υλικού στην αρχική γεωμετρία του μέσου και εφαρμογή αρχικών συνοριακών συνθηκών του προβλήματος.

6.1 Διατύπωση προβλήματος

Έχει πραγματοποιηθεί εκσκαφή σήραγγας στην περιοχή των Σφακίων, η οποία αποτελεί μέρος του οδικού άξονα Βρύσσες-Χ. Σφακίων-Ανώπολη με διασταύρωση προς Φραγκοκάστελλο-Όριο Ν. Ρεθύμνης. Στο Σχήμα 6.1 φαίνεται το απόσπασμα της οριζοντιογραφίας της σήραγγας Σ1. Οι διαστάσεις της σήραγγας είναι καθορισμένες και διερευνάται η επιλογή των απαιτούμενων μέτρων υποστήριξης. Όλα τα στοιχεία και οι διατομές της μελέτης δόθηκαν από την κατασκευαστική εταιρία ΑΚΤΕΡ, η οποία και κατασκεύασε το συγκεκριμένο έργο.

Η εκσκαφή της σήραγγας $\mathbf{\Sigma_1}$ πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο διάτρησης και ανατίναξης για την οποία γίνεται εκτενής περιγραφή στο δεύτερο κεφάλαιο (§2.2.2 (Α)). Με βάση τα αποτελέσματα των γεωτρήσεων και των εργαστηριακών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της μελέτης οι συνθήκες υπεδάφους και οι μέσες γεωτεχνικές παράμετροι αντοχής και συμπιεστότητας μπορούν να ληφθούν συντηρητικά ως εξής: <u>Βραχώδης στρώση ΙΙ: Κρυσταλλικός ασβεστόλιθος, κυρίως Χαμηλής Αντοχής</u>

Η στρώση αυτή αποτελείται από κρυσταλλικό ασβεστόλιθο, γκρίζου χρώματος, υγιή (W1), κυρίως χαμηλής έως κατά θέσεις μέσης αντοχής (R2-R3), λίγο έως μέτρια διακλασμένο, με ασυνέχειες επίπεδες έως κυματοειδείς, τραχείες έως μετρίως τραχείες, ευρείες έως μετρίως ευρείες και κατά θέσεις κερματισμένο.



Σχήμα 6.1: Απόσπασμα οριζοντιογραφίας της σήραγγας Σ1

- Δείκτης ποιότητας RQD= 40% (πτωχής ποιότητας βραχόμαζα)
- Ενεργός συνοχή c΄= 120 kPa
- Υγρό φαινόμενο βάρος γ= 26,8 kN/m^3
- Δείκτης ποιότητας GSI= 40
- Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη σ_{ci}= 6 MPa
- Μέτρο ελαστικότητας E_m=1200 MPa
- Λόγος Poisson ν=0.20
- Γωνία εσωτερικής τριβής φ΄=36°

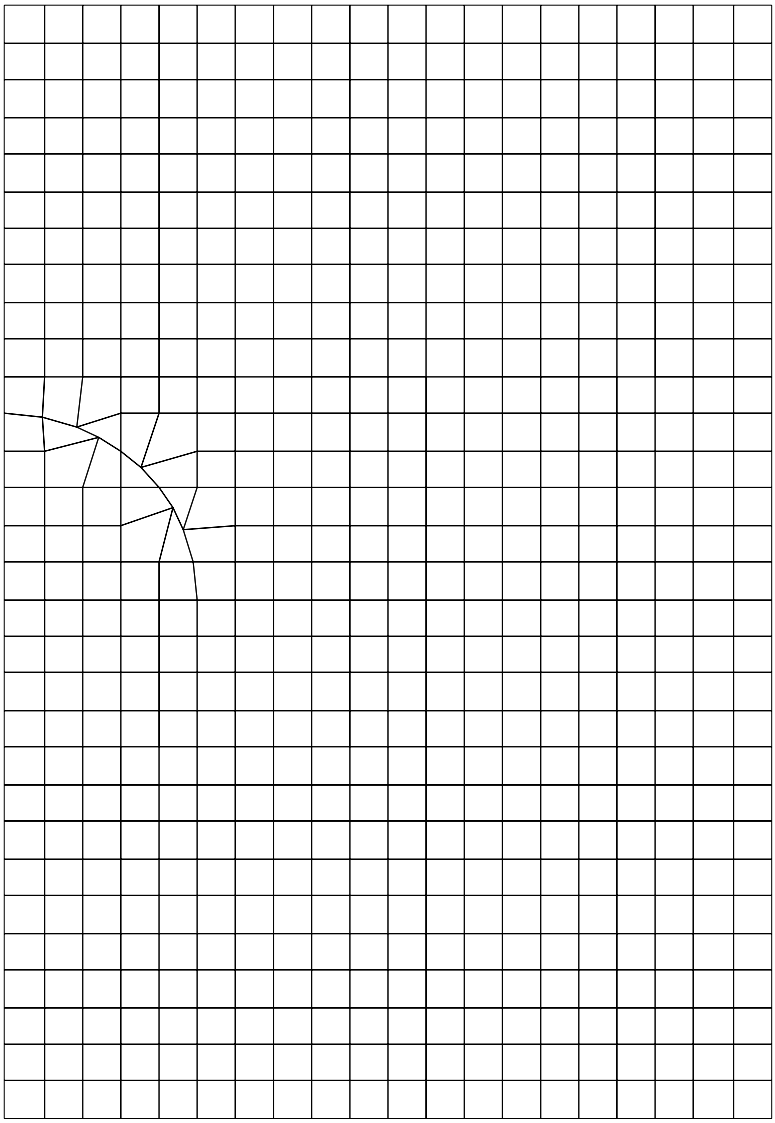
6.2 Διαδικασία προσομοίωσης

Η μοντελοποίηση του προβλήματος έγινε σε δύο διαστάσεις με το εμπορικό λογισμικό FLAC πεπερασμένων διαφορών. Δημιουργήθηκε αρχικά ένα μοντέλο κυκλικής σήραγγας διαμέτρου 10 m χωρίς υποστήριξη και στη συνέχεια μελετήθηκε η ανάγκη και το είδος της υποστήριξης που πρέπει να τοποθετηθεί για την σωστή λειτουργία της οδικής σήραγγας.

6.2.1 Δημιουργία αρχικού κανάβου

Για την υλοποίηση του προβλήματος αρχικά δημιουργήθηκε ένας ορθογωνικός κάναβος διαστάσεων 20 * 30 m. Οι διαστάσεις επιλέχθηκαν ώστε τα όρια του κανάβου να βρίσκονται μακριά από την εκσκαφή και συγκεκριμένα σε απόσταση τριπλάσια από την ακτίνα της σήραγγας έτσι ώστε να μην επηρεαστεί η λύση του προβλήματος. Ο κάναβος διαιρέθηκε σε ζώνες (οι ζώνες στις πεπερασμένες διαφορές είναι ο μικρότερος γεωμετρικός τόπος, μέσα στον οποίο γίνεται η αποτίμηση του φαινομένου) διαστάσεων 1m*1m. Το τετραγωνικό σχήμα των στοιχείων επιλέχθηκε για την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων.

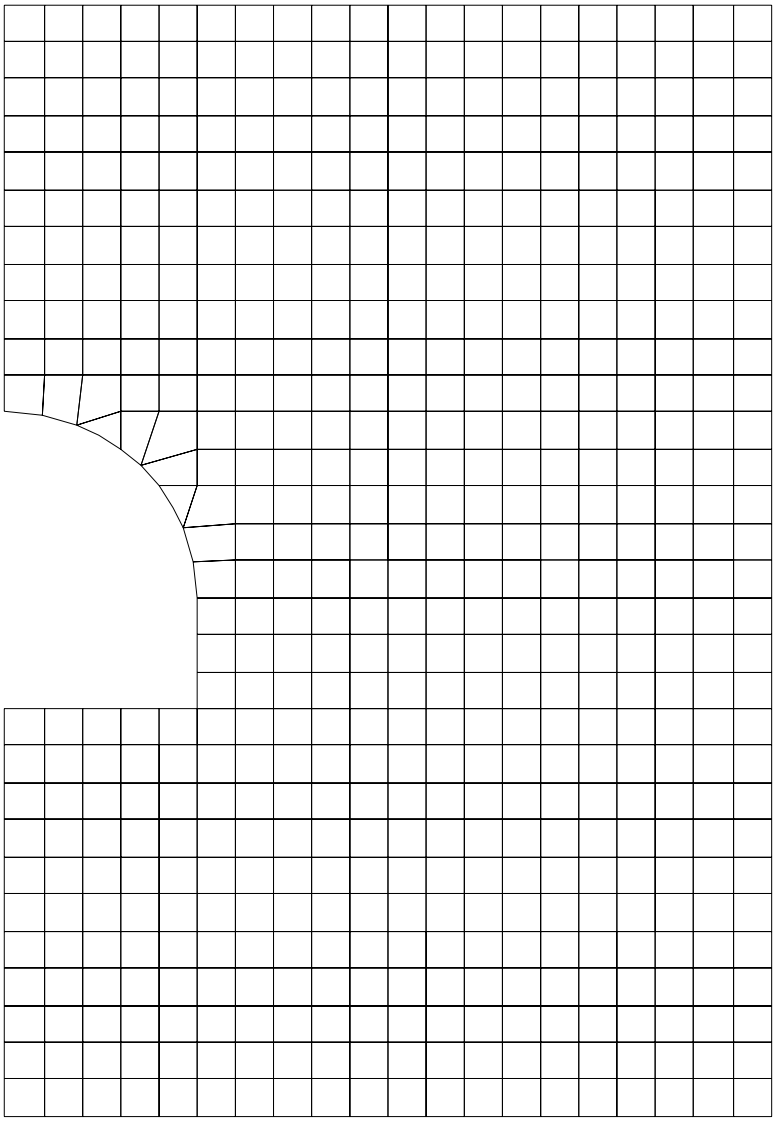
Ο κάναβος κατασκευάστηκε με την εντολή ‘Grid’ του λογισμικού FLAC. Στο Σχήμα 6.2 παρουσιάζεται ο αρχικός κάναβος.



Σχήμα 6.2: Αρχικός κάναβος

6.2.2 Δημιουργία εκσκαφής

Αφού δημιουργήθηκε ο κάναβος συνεχίστηκε η επίλυση με την τοποθέτηση της εκσκαφής, με τη χρήση της εντολής 'Alter' που δίνει τη δυνατότητα τροποποιήσεων στο σχήμα του αρχικού κανάβου. Η διαμόρφωση της εκσκαφής γίνεται με την εντολή 'Shape' και είναι κυκλική μέχρι ένα τμήμα και μετά ευθεία. Οι φάσεις της εκσκαφής της σήραγγας επέτρεπαν τη χρήση συμμετρίας κατά y και γι' αυτό η διατομή διακριτοποιήθηκε κατά το ήμισυ (Σχήμα 6.3). Το ύψος του μοντέλου είναι 9,40 m και το πλάτος του είναι 10 m. Όλα τα χρησιμοποιούμενα υλικά θεωρήθηκαν ελαστικά, ομογενή και ισότροπα.



Σχήμα 6.3: Τοποθέτηση της εκσκαφής

6.2.3 Παράμετροι του περιβάλλοντος πετρώματος

Αφού πραγματοποιηθεί η εκσκαφή ορίζονται οι παράμετροι του πετρώματος που τη φιλοξενεί. Με βάση τις γεωτρήσεις που πραγματοποιήθηκαν για τη διάνοιξη της υπό μελέτη σήραγγας διαπιστώθηκε ότι το RMR του πετρώματος έχει την τιμή 43.

Το σύστημα της γεωμηχανικής ταξινόμησης (Σύστημα RMR) προτάθηκε από τον Bieniawski το 1973, έλαβε την τελική του μορφή το 1973 και παρουσιάστηκε πάλι χωρίς ουσιαστικές τροποποιήσεις το 1989. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί έξι παραμέτρους οι οποίες μπορούν να μετρηθούν επί τόπου ή να υπολογισθούν από πυρήνες γεωτρήσεων. Οι παράμετροι είναι (Αγιουτάντης, 2002) :

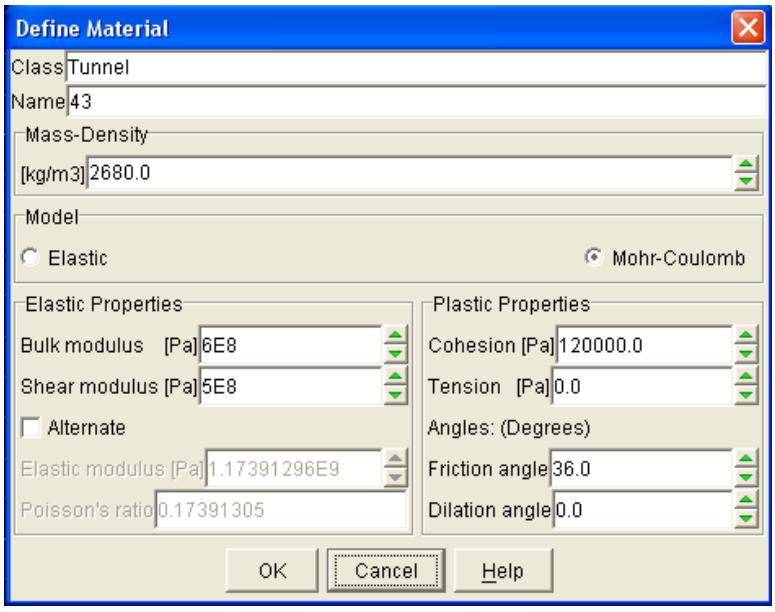
- ✓ η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του ακέραιου πετρώματος
- ✓ Ο δείκτης ποιότητας του πετρώματος (RQD)
- ✓ Η απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών
- ✓ Η κατάσταση των ασυνεχειών
- ✓ Η επίδραση των υπόγειων νερών
- ✓ Ο προσανατολισμός των ασυνεχειών

Οι υπόλοιπες παράμετροι του υλικού που ζητούνται από το λογισμικό για την ενεργοποίηση ενός μοντέλου Mohr-Coulomb είναι η πυκνότητα του πετρώματος, το μέτρο ελαστικότητας, ο λόγος του Poison, η συνοχή, η γωνία εσωτερικής τριβής, ο δείκτης συμπιεστότητας (bulk modulus) και δείκτης διάτμησης (shear modulus). Οι δύο τελευταίοι παράμετροι υπολογίζονται με βάση τις σχέσεις:

$$\textit{bulk modulus}: \mathrm{k}=\frac{E}{3(1-2\nu)}$$

$$\textit{shear modulus}: \mathrm{G}=\frac{E}{2(1+\nu)}$$

Στο Σχήμα 6.4 φαίνεται ο τρόπος ορισμού των παραμέτρων για τις τιμές που αντιστοιχούν σε πέτρωμα με τιμή RMR = 43.

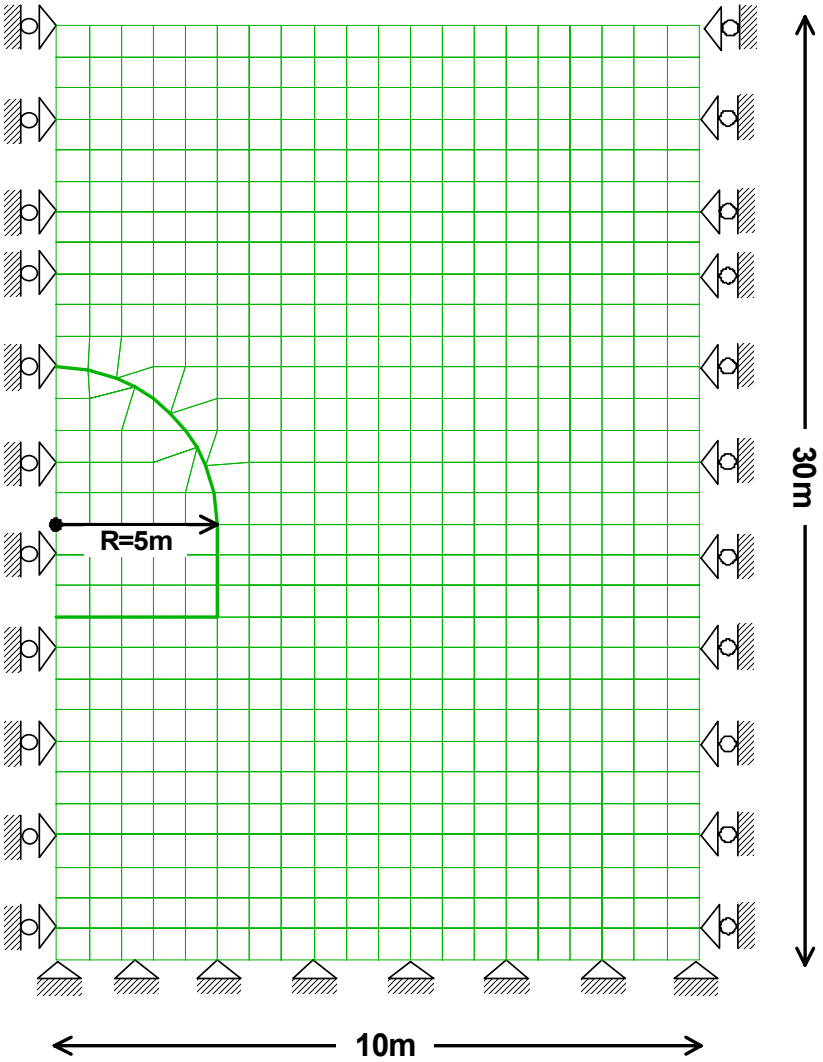


Σχήμα 6.4: Ορισμός των παραμέτρων του πετρώματος

Το μοντέλο Mohr-Coulomb που αντιπροσωπεύει τη διατμητική αστοχία ενός υλικού, επιλέχθηκε γιατί θεωρήθηκε το περισσότερο ακριβές σε σύγκριση με άλλα ελαστικά μοντέλα.

6.2.4 Καθορισμός συνοριακών συνθηκών και φόρτιση

Οι συνοριακές συνθήκες που εφαρμόστηκαν φαίνονται στο Σχήμα 6.5 και είναι:

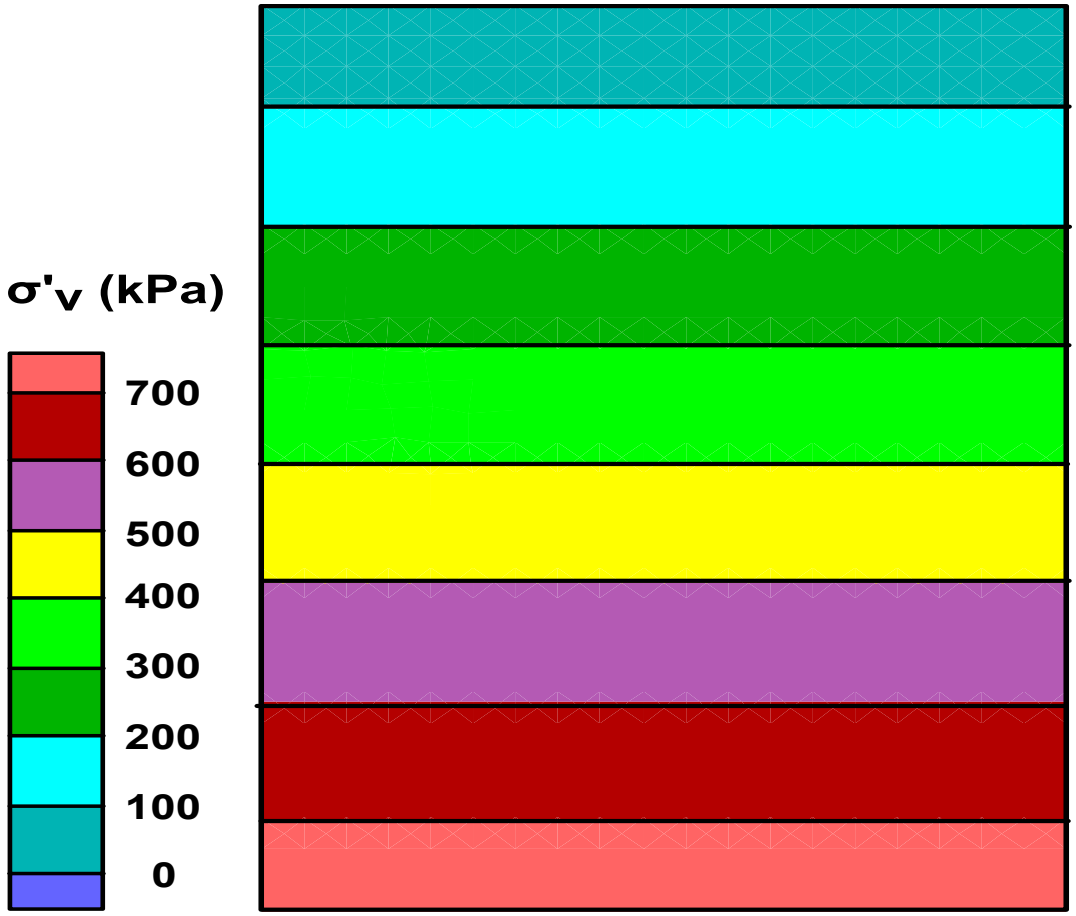


Σχήμα 6.5: Συνοριακές συνθήκες της σήραγγας

1. κύλιση στον άξονα X στη βάση μοντέλου, δηλαδή περιορισμός της κατακόρυφης κίνησης
2. κύλιση στον άξονα Y στις πλευρικές ακμές του μοντέλου

3. ο ακραίος αριστερός και ο ακραίος δεξιός κόμβος της βάσης δεν κινείται ούτε στην οριζόντια ούτε στην κατακόρυφη διεύθυνση.

Η φόρτιση στο πέτρωμα είναι βαρυτική (g = 9,81 m/s^2). Δηλαδή η σήραγγα φορτίζεται μόνο από το βάρος των υπερκείμενων πετρωμάτων. Για την επιβολή της βαρυτικής φόρτισης στο FLAC απαιτείται η δήλωση της τιμής της επιτάχυνσης της βαρύτητας. Στο Σχήμα 6.6 παρουσιάζεται η κατανομή των κατακόρυφων τάσεων μετά την επιβολή της βαρυτικής φόρτισης.

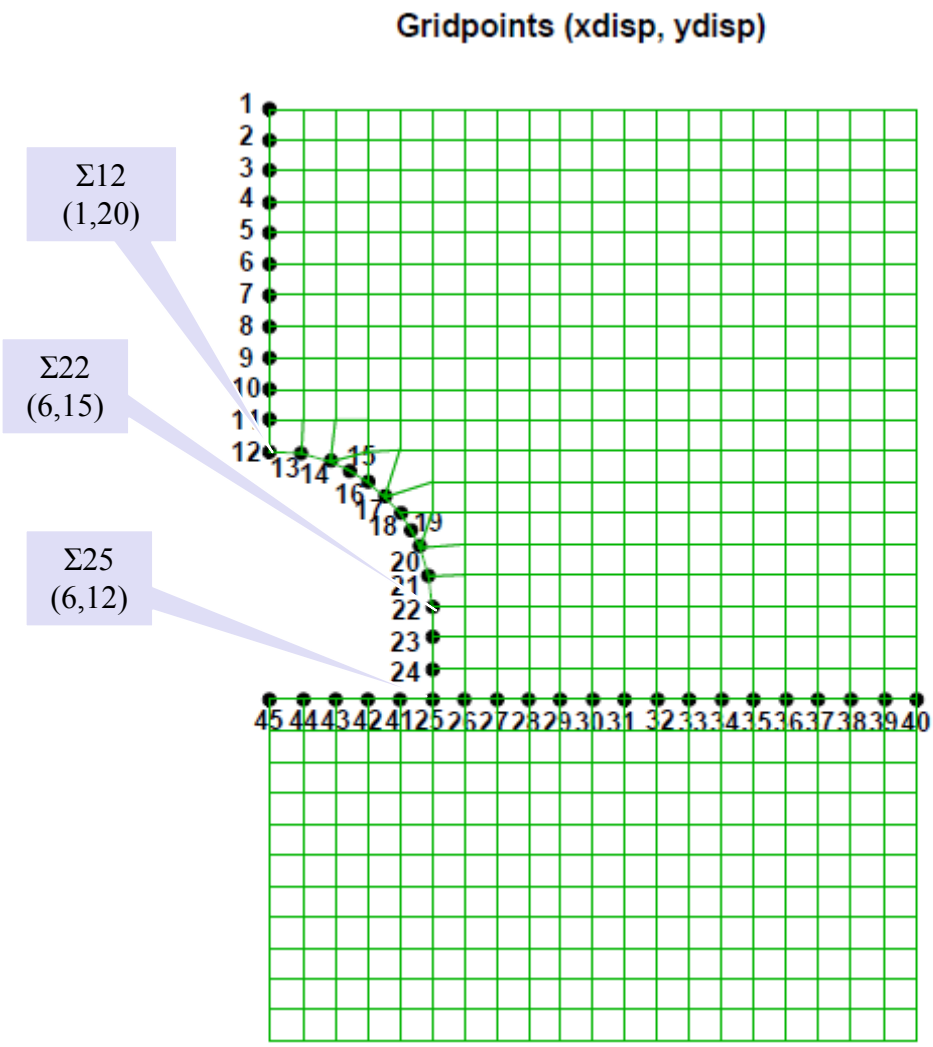


Σχήμα 6.6: Κατανομή κατακόρυφων τάσεων μετά την επιβολή βαρυτικής επιτάχυνσης g=9.81m/s^2

Στον πίνακα 6.1 παρουσιάζονται οι μετατοπίσεις και οι κύριες τάσεις *πριν την τοποθέτηση της υποστήριξης* σε τρία χαρακτηριστικά σημεία (gridpoints) της σήραγγας Σ12 με συντεταγμένες (1,20), στο σημείο Σ22 με συντεταγμένες (6,15) και στο σημείο Σ25 με συντεταγμένες (6,12) (Σχήμα 6.7).

Πίνακας 6.1: Μετατοπίσεις και κύριες τάσεις πριν την τοποθέτηση της υποστήριξης

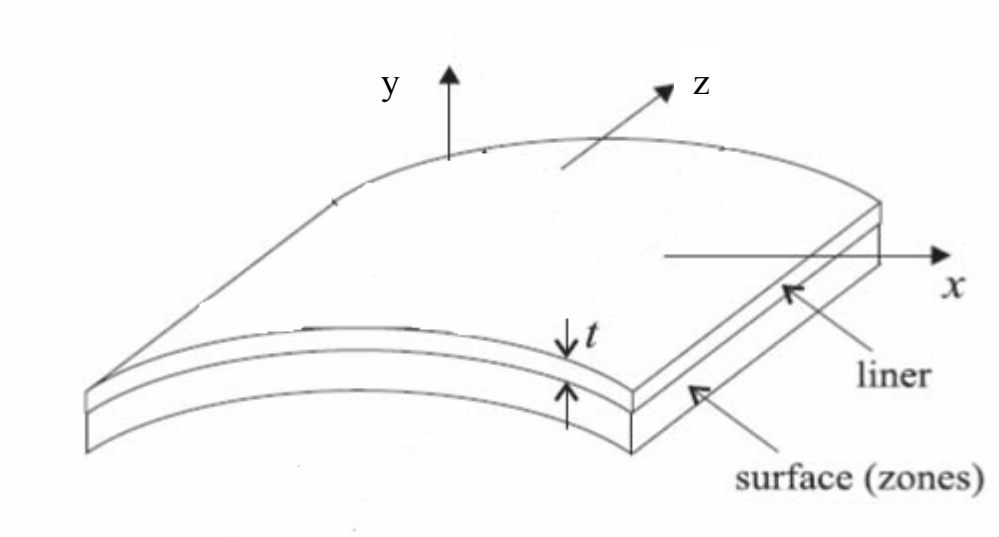
Συντεταγμένες σημείων	Μετατόπιση κατά χ (m)	Μετατόπιση κατά y (m)	Κύρια τάση σ_1 (kPa)	Κύρια τάση σ_3 (kPa)
(1,20)	0	-0,00481	119,3	0,253
(6,15)	-0,00111	0,000741	601,9	173,3
(6,12)	0,0000771	-0,00111	777,4	162,6



Σχήμα 6.7: Απεικόνιση ενδεικτικών σημείων μέτρησης μετακινήσεων και κύριων τάσεων.

6.2.5 Τοποθέτηση υποστήριξης από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Επιλέγεται υποστήριξη από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (liner) η οποία έχει μοναδιαία διάσταση κατά μήκος του άξονα της σήραγγας (Σχήμα 6.8) σύμφωνα με την παραδοχή της επίπεδης παραμόρφωσης. Στη συνέχεια προσδιορίζονται τα στοιχεία της επένδυσης (Σχήμα 6.9).



Σχήμα 6.8: Απεικόνιση της επένδυσης ως συνεχές μέσο σε 1 m μήκος (FLAC 6, 2008).

Για την επιλογή του πάχους της διατομής της επένδυσης επιλέγονται τρεις ενδεικτικές διατομές της τάξης των 0,10 m, 0,15 m και 0,20 m και υπολογίζονται οι μετακινήσεις κατά τον χ και τον y άξονα και οι κύριες τάσεις σ_1 και σ_3 μέσω πάντα του λογισμικού προγράμματος FLAC.

Οι παράμετροι που προσδιορίζουν τα στοιχεία της επένδυσης (Σχήμα 6.9) είναι:

-Area=επιφάνεια ακαμψίας

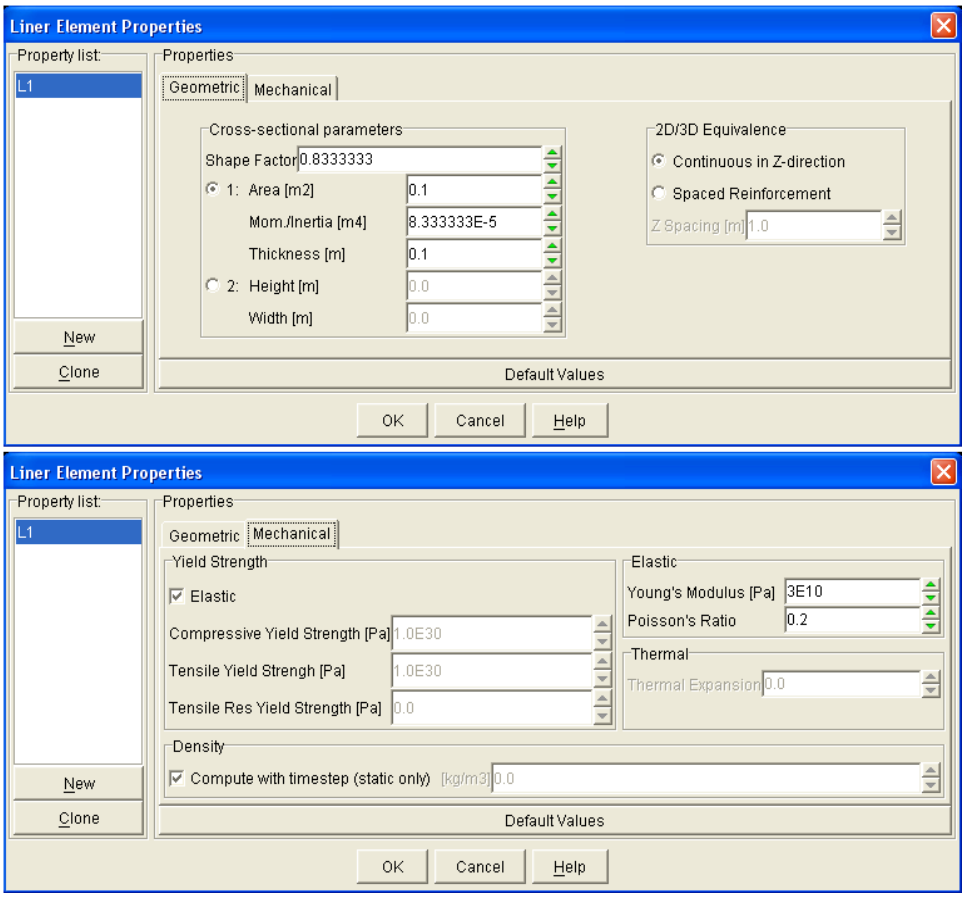
-Shape factor=συντελεστής σχήματος και εξαρτάται η τιμή του από το σχήμα της διατομής. Στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι ορθογωνική η διατομή.

-Thickness=πάχος της διατομής

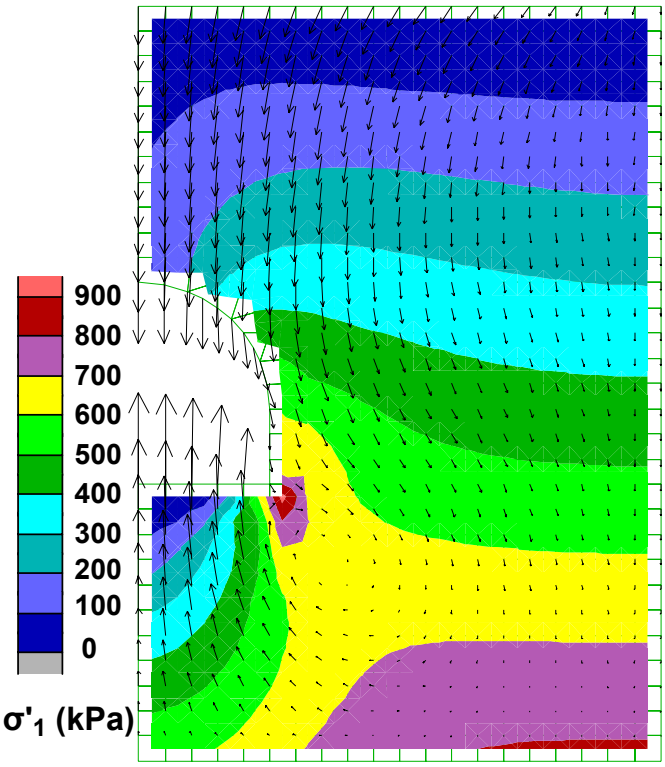
-Mom/inertia=ροπή αδράνειας

-Young's Modulus=μέτρο ελαστικότητας

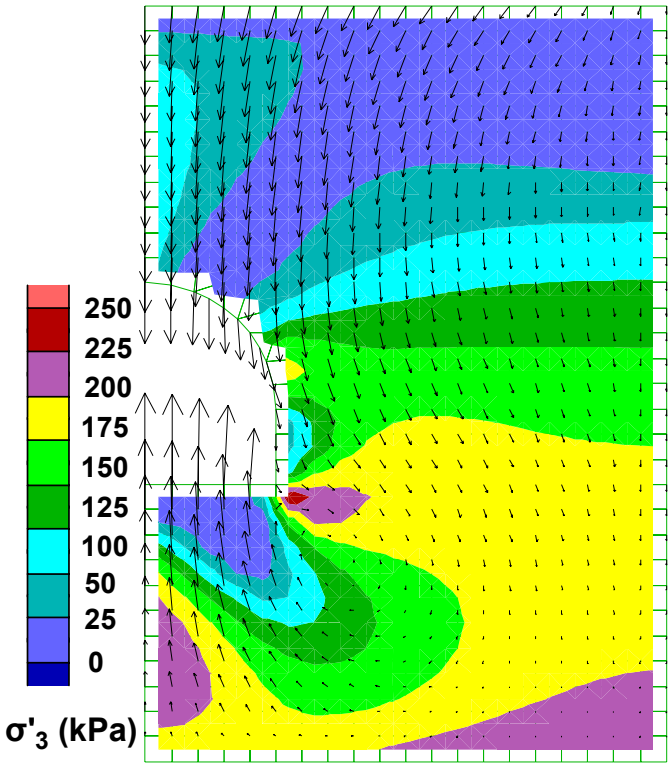
-Poisson's ratio=λόγος του Poisson



Σχήμα 6.9: Ορισμός των παραμέτρων του τύπου της υποστήριξης



Σχήμα 6.10: Κατανομή των κύριων τάσεων σ_1' μετά την τοποθέτηση της επένδυσης



Σχήμα 6.11: Κατανομή των κύριων τάσεων σ_3΄μετά την τοποθέτηση της επένδυσης

Στα Σχήματα 6.10 και 6.11 απεικονίζεται η κατανομή των κύριων τάσεων μετά την τοποθέτηση της επένδυσης.

Στα Σχήματα 6.12,6.13,6.14,6.15, απεικονίζονται τα διαγράμματα των οριζόντιων και κατακόρυφων μετατοπίσεων και των κύριων τάσεων σ_1 σ_3 στην περίμετρο της σήραγγας για τα τρία πάχη της διατομής της επένδυσης από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

Πίνακας 6.2: Μετατοπίσεις και κύριες τάσεις στο σημείο (1,20) της σήραγγας

Πάχος υποστήριξης	Μετακίνηση κατά X (m)	Μετακίνηση κατά Y (m)	σ_1(kPa)	σ_3(kPa)
b_1=0.10	0	$-2,6*10^{-3}$	157,1	8,94
b_2=0.15	0	$-2,28*10^{-3}$	168,2	18,29
b_3=0.20	0	$-2,07*10^{-3}$	174,6	21,85

Πίνακας 6.3: Μετατοπίσεις και κύριες τάσεις στο σημείο (6,15) της σήραγγας

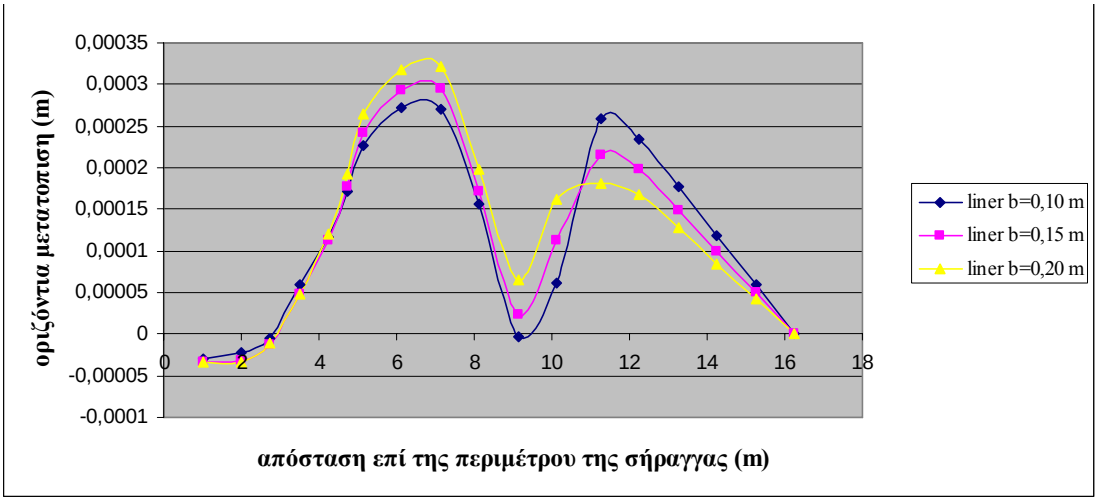
Πάχος υποστήριξης	Μετακίνηση κατά X (m)	Μετακίνηση κατά Y (m)	σ_1(kPa)	σ_3(kPa)
b_1=0.10	$1,56*10^{-4}$	$-8,55*10^{-4}$	696,9	120,8
b_2=0.15	$1,72*10^{-4}$	$-7,81*10^{-4}$	669	68,22
b_3=0.20	$1,99*10^{-4}$	$-6,96*10^{-4}$	658,1	73,88

Πίνακας 6.4: Μετατοπίσεις και κύριες τάσεις στο σημείο (6,12) της σήραγγας

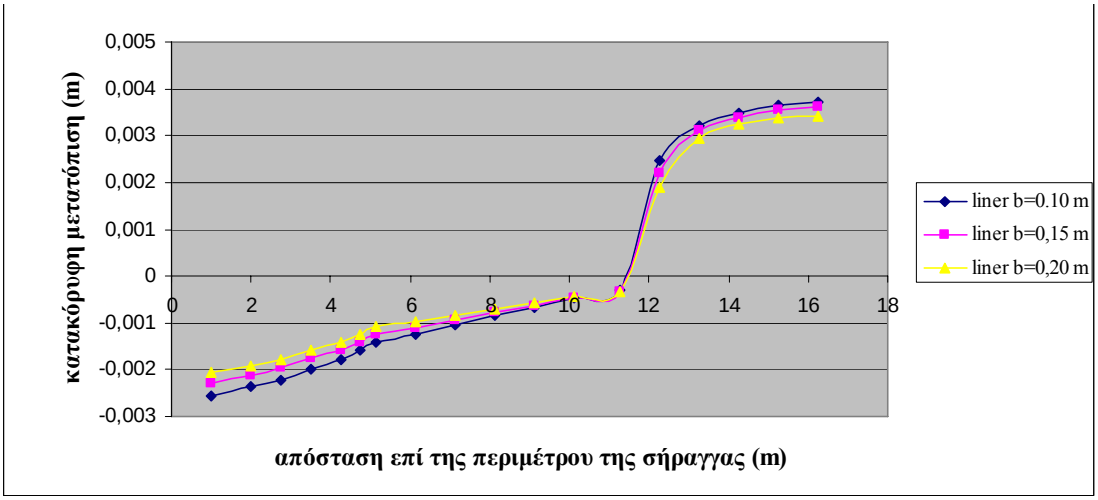
Πάχος υποστήριξης	Μετακίνηση κατά X (m)	Μετακίνηση κατά Y (m)	σ_1 (kPa)	σ_3 (kPa)
b_1=0.10	$2,6*10^{-4}$	$-3,02*10^{-4}$	563	14,5
b_2=0.15	$2,16*10^{-4}$	$-2,16*10^{-4}$	579	141,3
b_3=0.20	$1,81*10^{-4}$	$-3,18*10^{-4}$	569.,9	139,4

Στα σχήματα 6.16, 6.17, 6.18, 6.19 απεικονίζονται τα διαγράμματα των οριζόντιων και κατακόρυφων μετατοπίσεων και των κύριων τάσεων σ_1, σ_3 κατά μήκος του x άξονα για τα τρία πάχη της διατομής της επένδυσης από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

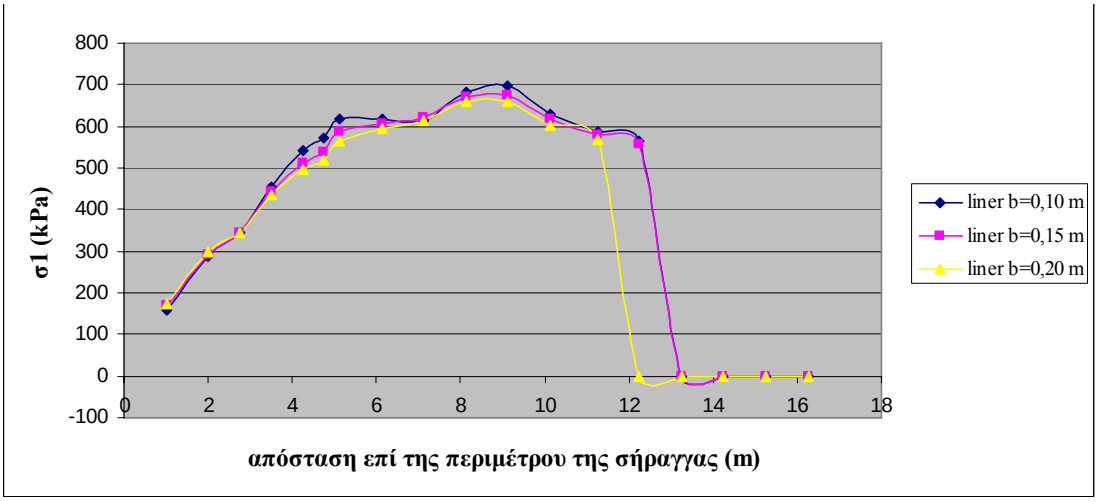
Στα σχήματα 6.20, 6.21, 6.22, απεικονίζονται τα διαγράμματα της κατακόρυφης μετατόπισης και των κύριων τάσεων σ_1, σ_3 κατά μήκος του y άξονα για τα τρία πάχη της διατομής της επένδυσης από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.



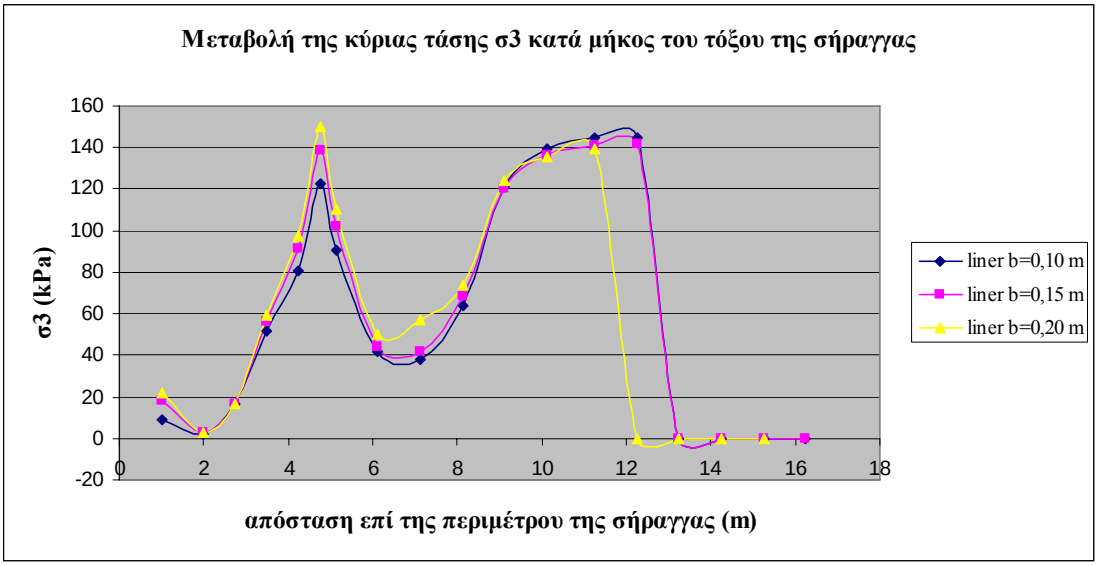
Σχήμα 6.12: Διάγραμμα οριζόντιας μετατόπισης στην περίμετρο της σήραγγας



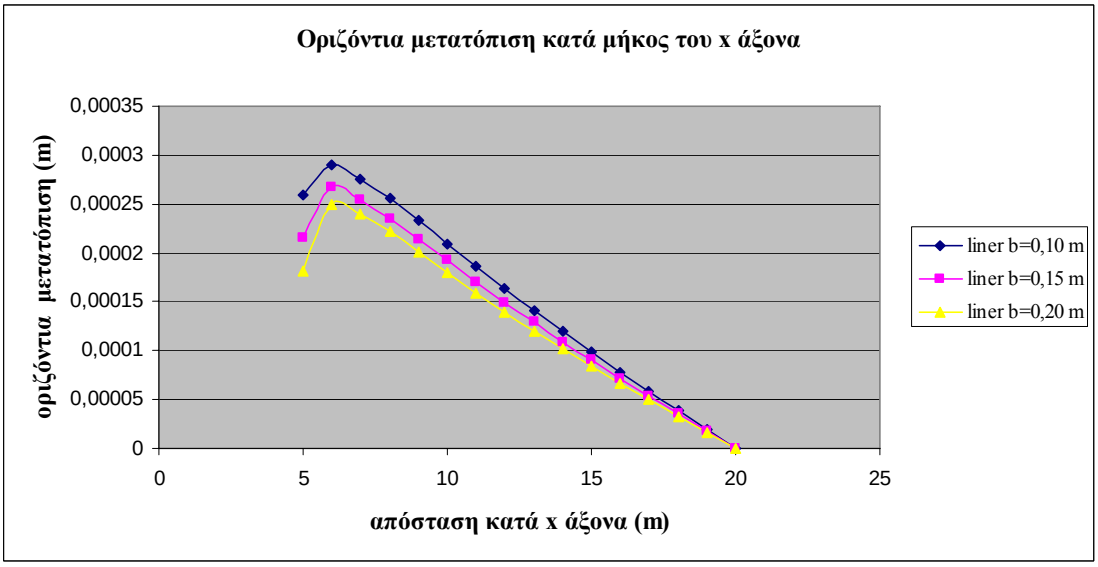
Σχήμα 6.13: Διάγραμμα κατακόρυφης μετατόπισης στην περίμετρο της σήραγγας



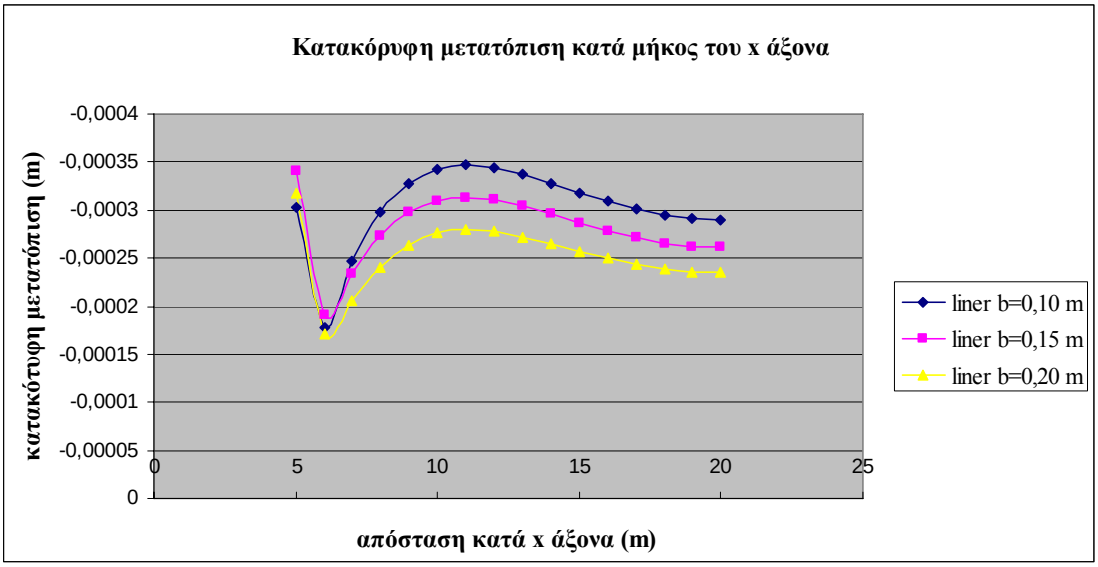
Σχήμα 6.14: Διάγραμμα κύριας τάσης σ_1 στην περίμετρο της σήραγγας



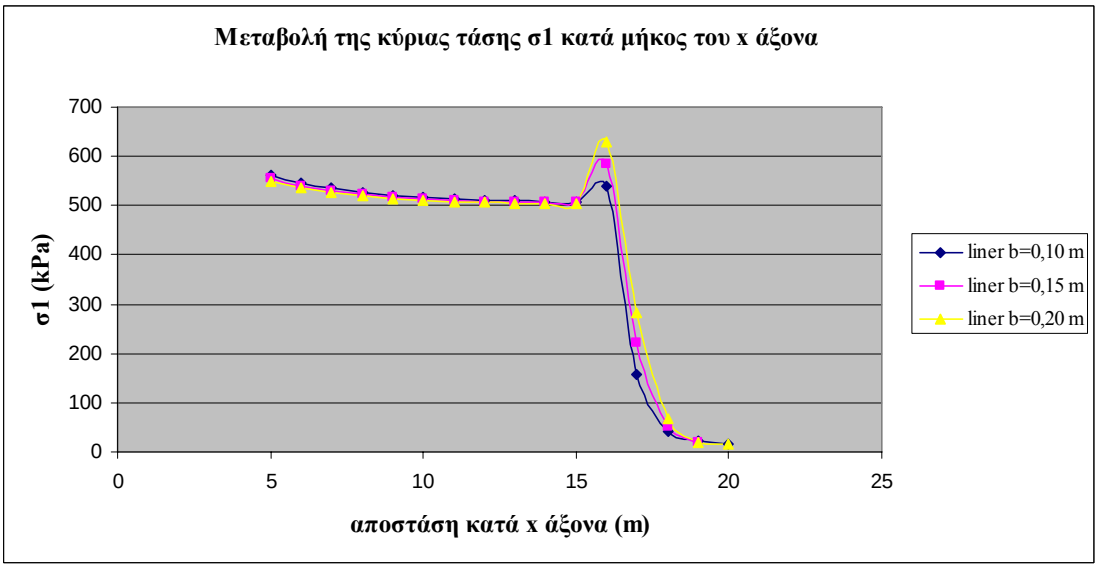
Σχήμα 6.15: Διάγραμμα κύριας τάσης σ_3 στην περίμετρο της σήραγγας



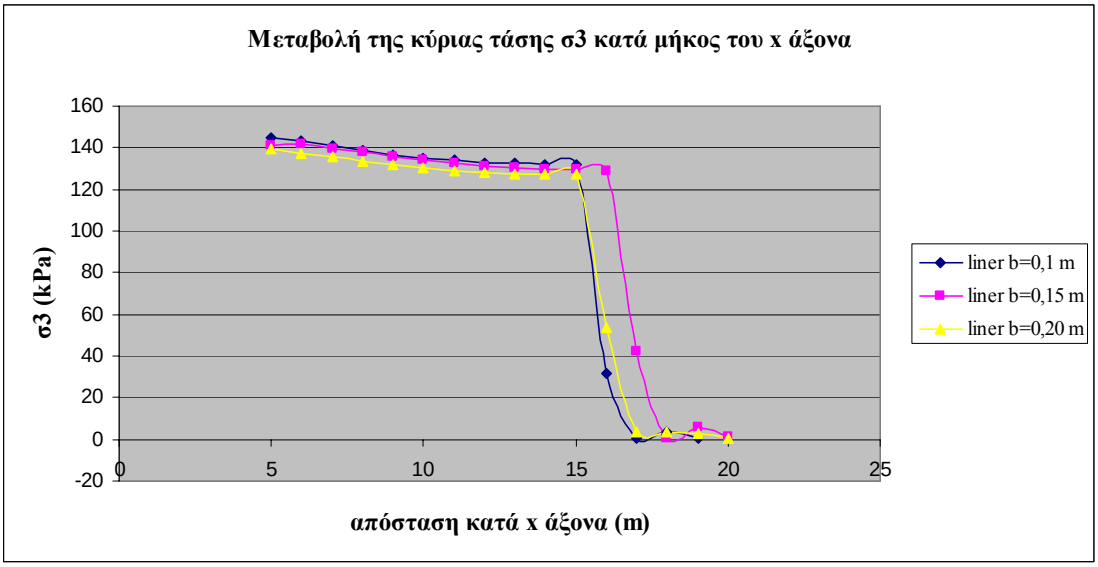
Σχήμα 6.16: Διάγραμμα οριζόντιας μετατόπισης κατά μήκος του x άξονα



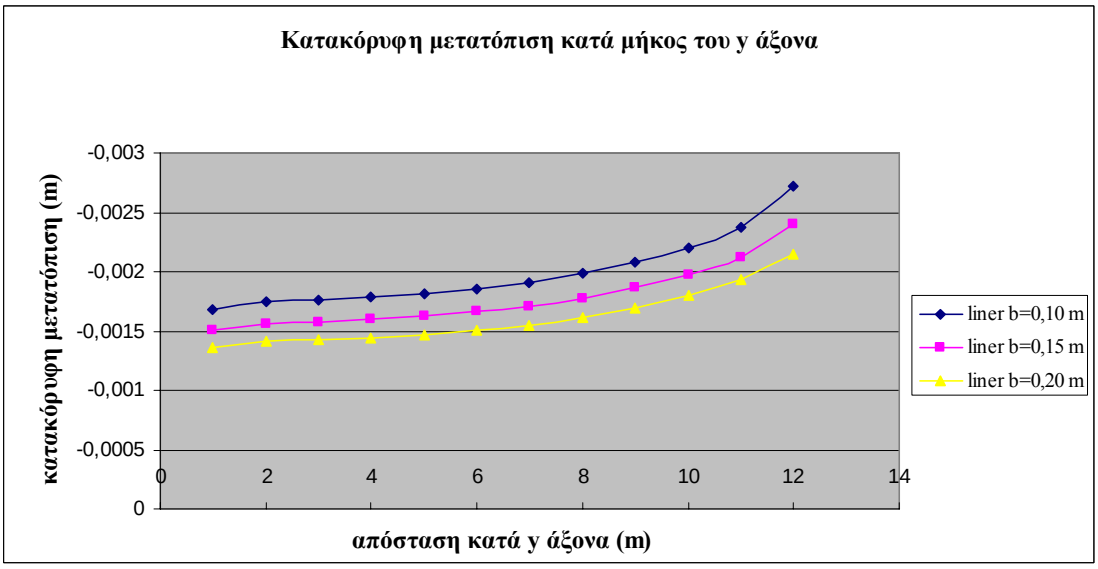
Σχήμα 6.17: Διάγραμμα κατακόρυφης μετατόπισης κατά μήκος του x άξονα



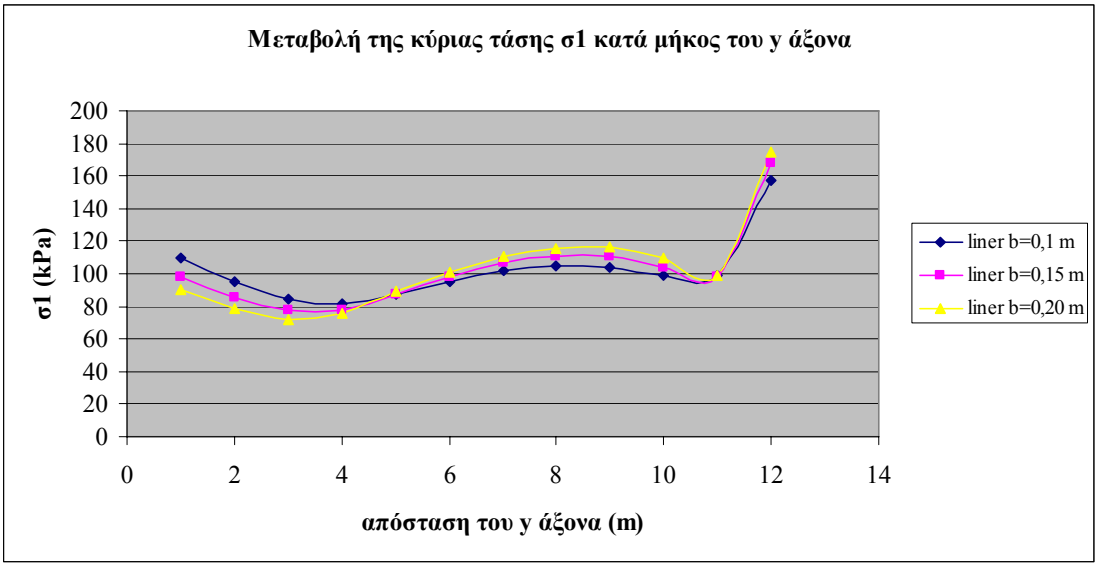
Σχήμα 6.18: Διάγραμμα κύριας τάσης σ_1 κατά μήκος του x άξονα



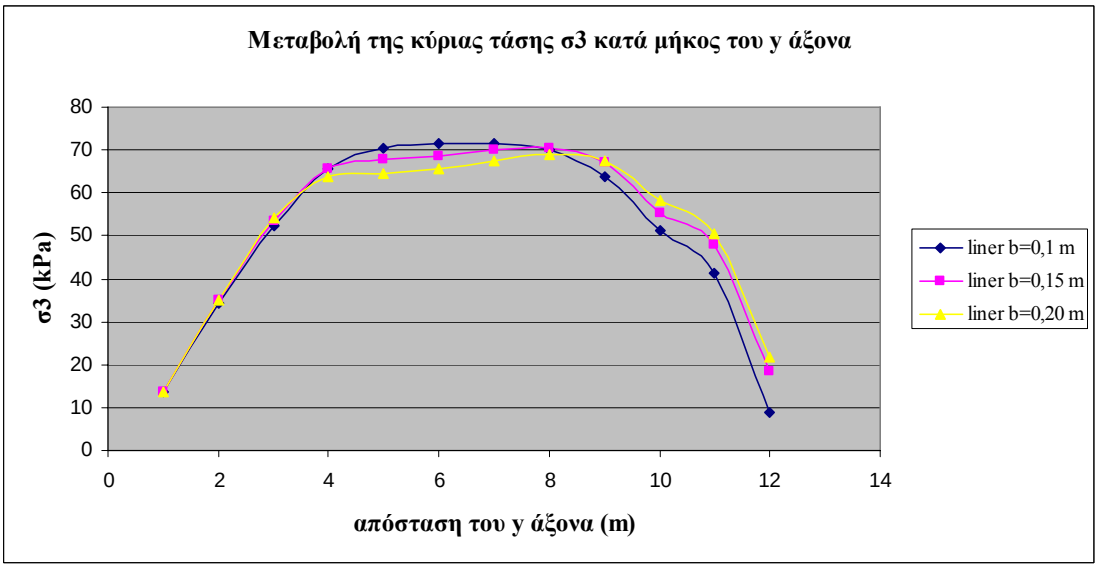
Σχήμα 6.19: Διάγραμμα κύριας τάσης σ_3 κατά μήκος του x άξονα



Σχήμα 6.20: Διάγραμμα κατακόρυφης μετατόπισης κατά μήκος του y άξονα



Σχήμα 6.21: Διάγραμμα κύριας τάσης σ_1 στην περίμετρο της σήραγγας



Σχήμα 6.22: Διάγραμμα κύριας τάσης σ_3 στην περίμετρο της σήραγγας

6.2.6 Αποτελέσματα μετά την τοποθέτηση της επένδυσης

Από το διάγραμμα (Σχήμα 6.12) των *οριζόντιων μετατοπίσεων* για τους τρεις τύπους υποστήριξης παρατηρείται ότι μηδενικές οριζόντιες μετατοπίσεις εμφανίζονται στην στέψη της σήραγγας και συγκεκριμένα στο σημείο (1,20) (σημείο 12 Σχήμα 6.7) και στον πυθμένα της σήραγγας στο σημείο (1,11) (σημείο 45 Σχήμα 6.7). Επίσης παρατηρείται ότι ελαχιστοποιείται κ σχεδόν μηδενίζεται η μετατόπιση με τιμή **$2{,}8*10^{-2}$ mm** εκεί που τελειώνει το καμπύλο τμήμα της σήραγγας (σημείο 23 Σχήμα 6.7) και μάλιστα για πάχος υποστήριξης b=0.1 m γεγονός μη αναμενόμενο, αφού θα περίμενε κανείς την ελάχιστη τιμή μετατόπισης για το μεγαλύτερο

πάχος επένδυσης που είναι b=0.20 m. Η μέγιστη οριζόντια μετατόπιση έχει τιμή **0,3 mm** (σημείο 22 Σχήμα 6.7) πάλι για πάχος επένδυσης b=0.20 m αποτέλεσμα και αυτό μη αναμενόμενο (φαίνεται και στον πίνακα 6.3) ομοίως με την περίπτωση της ελάχιστης οριζόντιας μετατόπισης. Αυτή η παρατήρηση ισχύει μόνο για το καμπύλο τμήμα της σήραγγας γιατί στη συνέχεια παρατηρείται αλλαγή στις μετατοπίσεις και σταδιακή αύξηση της μετατόπισης στο οριζόντιο τμήμα της σήραγγας με μεγαλύτερη (σημείο 25 Σχήμα 6.7) για πάχος επένδυσης 0.10 m (βλέπε πίνακα 4.4) γεγονός αναμενόμενο.

Από το διάγραμμα (Σχήμα 6.13) των *κατακόρυφων μετατοπίσεων* παρατηρείται ότι η μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση έχει τιμή **3,4 mm** και παρατηρείται στο δάπεδο της σήραγγας και συγκεκριμένα στο σημείο με συντεταγμένες (1,11) (σημείο 45 Σχήμα 6.7) για πάχος επένδυσης b=0.10 m. Η ελάχιστη τιμή της κατακόρυφης μετατόπισης βρίσκεται στον πυθμένα της σήραγγας με τιμή **-2,16 mm** στο σημείο με συντεταγμένες (6,12) (σημείο 25 Σχήμα 6.7) για πάχος επένδυσης b=0,15 m αποτέλεσμα μη αναμενόμενο αφού θα ήταν λογικό η τιμή της ελάχιστης κατακόρυφης μετατόπισης να αντιστοιχούσε στο μεγαλύτερο πάχος επένδυσης.

Από το διάγραμμα (Σχήμα 6.16) των οριζόντιων μετατοπίσεων κατά μήκος του x άξονα φαίνεται ότι η μέγιστη μετατόπιση έχει τιμή **0,29 mm** και βρίσκεται στο σημείο με συντεταγμένες (6,11) (Σ 26 Σχήμα 6.7) και αντιστοιχεί σε πάχος επένδυσης b=0,10 m. Η μετατόπιση μειώνεται με την απομάκρυνση από το πάτωμα της σήραγγας, όπως αναμένεται και **μηδενίζεται** στο σημείο με συντεταγμένες (20,11) (Σ40 Σχήμα 6.7) δηλαδή στο πιο απομακρυσμένο σημείο από την εκσκαφή της σήραγγας.

Από το διάγραμμα (Σχήμα 6.17) των κατακόρυφων μετατοπίσεων κατά μήκος του x άξονα φαίνεται ότι η μέγιστη μετατόπιση (ανύψωση) έχει τιμή **-0,347 mm** και βρίσκεται στο μέσο περίπου του x άξονα στο σημείο με συντεταγμένες (11,12) (Σ31 Σχήμα 6.7) και αντιστοιχεί σε πάχος επένδυσης b=0.10 m.

Η ελάχιστη κατακόρυφη μετατόπιση εμφανίζεται στο σημείο με συντεταγμένες (6,12) (Σ25 Σχήμα 6.7) με τιμή **-0,172 mm** και αντιστοιχεί σε πάχος επένδυσης b=0.20 m.

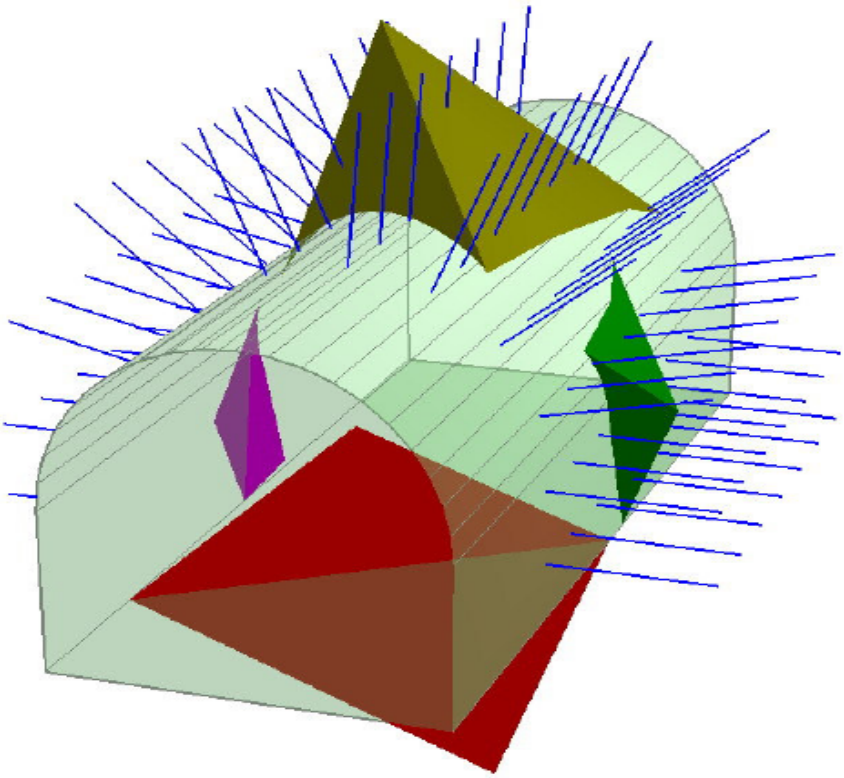
Από το διάγραμμα (Σχήμα 6.18) της μεταβολής της κύριας τάσης σ_1 κατά μήκος του x άξονα διαπιστώνεται ότι οι μεγαλύτερες τάσεις εμφανίζονται σε σημεία απομακρυσμένα από το δάπεδο της σήραγγας, με μέγιστη τιμή, για πάχος επένδυσης b=0,20 m, **628,4 kPa** στο σημείο με συντεταγμένες (16,12) (Σ36 Σχήμα 6.7).

Οι ελάχιστες τάσεις σ_1 εμφανίζονται στο πιο απομακρυσμένο σημείο από το δεξιό άκρο του δαπέδου της σήραγγας με τιμές παρόμοιες και για τα τρία πάχη της επένδυσης με ελάχιστη αυτή που αντιστοιχεί σε πάχος επένδυσης b=0.10 m με τιμή **16,3 kPa** στο σημείο με συντεταγμένες (20,12) (Σ40 Σχήμα 6.7).

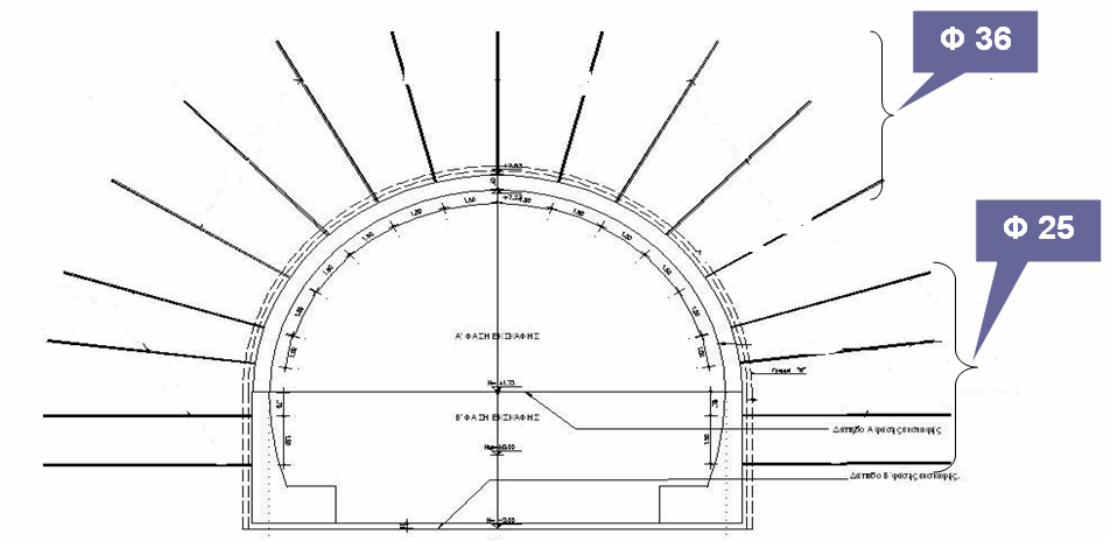
Από το διάγραμμα (Σχήμα 6.20) προκύπτει ότι η μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση κατά μήκος του y άξονα εμφανίζεται κοντά στην στέψη της σήραγγας όπως είναι λογικό και μειώνεται με την απομάκρυνση της από αυτήν. Η μέγιστη τιμή της μετακίνησης είναι **-2,72 mm** (ανύψωση) για πάχος επένδυσης b=0,10 m στο σημείο με συντεταγμένες (1,20) (Σ12 Σχήμα 6.7) ενώ ελαχιστοποιείται στο πιο απομακρυσμένο από τη στέψη της σήραγγας σημείο του y άξονα.

6.2.7 Τοποθέτηση αγκυρίων

Επιλέγεται τοποθέτηση αγκυρίων τύπου Swellex μήκους 5 m από ράβδο σιδηροπλισμού Φ36 και Φ25. Τα αγκύρια τοποθετούνται κάθετα στην επιφάνεια της σήραγγας (Σχήματα 6.24, 625) και εξετάζονται τρεις διαφορετικές περιπτώσεις αποστάσεων μεταξύ των αγκυρίων οι οποίες είναι α) ανά 1,5 m, β) ανά 2,0 m και γ) ανά 2,5 m.

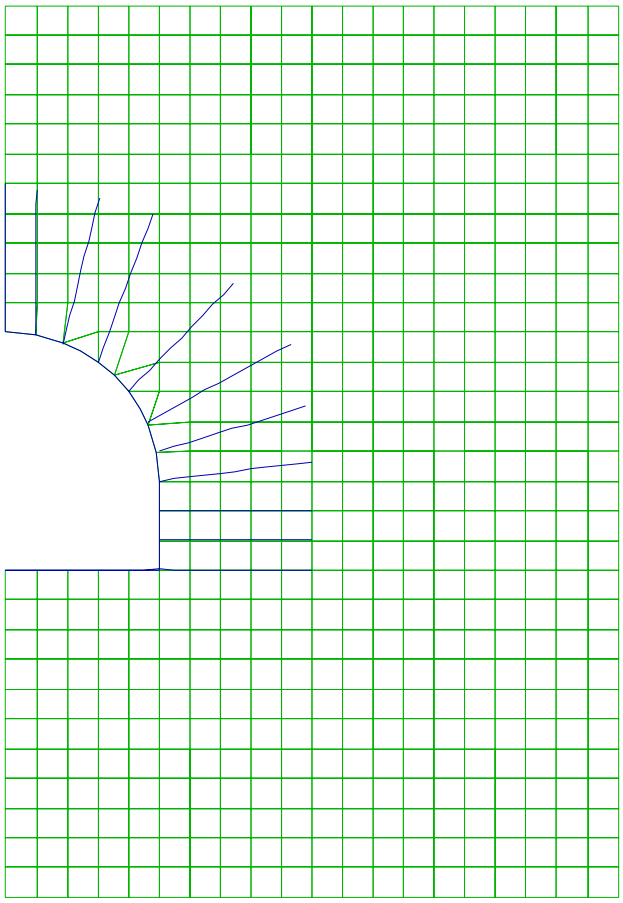


Σχήμα 6.24: Διαμόρφωση αγκύρωσης στην περιφέρεια σήραγγας τρισδιάστατη απεικόνιση (Πηγή: Hoek, 1995)



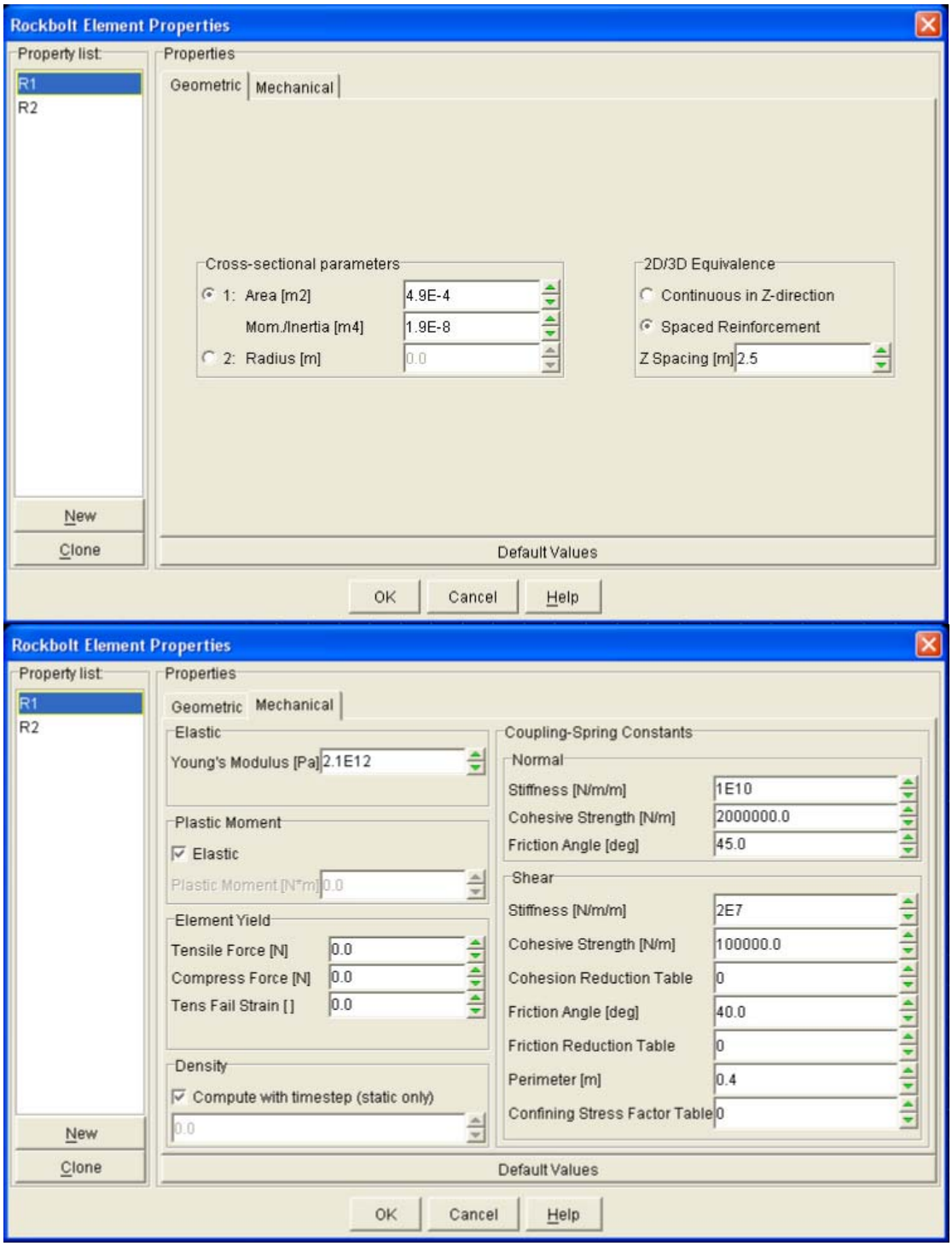
Σχήμα 6.25: Τυπική διατομή μέτρων υποστήριξης σήραγγας Σ_1

Στο σχήμα 6.26 φαίνεται η τοποθέτηση των αγκυρίων περιμετρικά της εκσκαφής μέσω του λογισμικού προγράμματος FLAC.



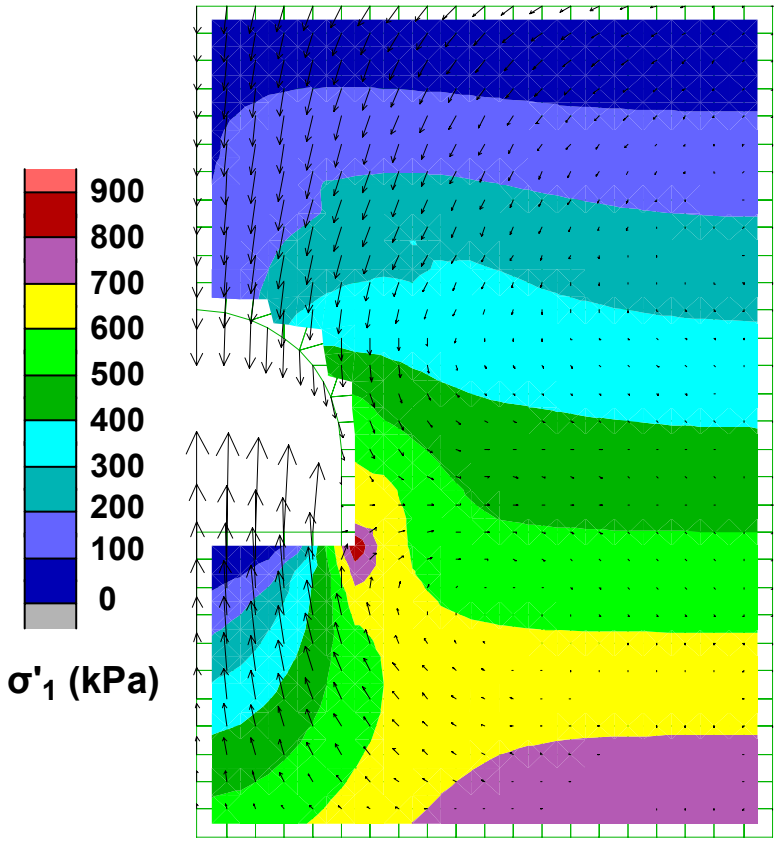
Σχήμα 6.26: Τοποθέτηση αγκυρίων περιμετρικά της εκσκαφής.

Στη συνέχεια προσδιορίζονται οι γεωμετρικές και μηχανικές παράμετροι των αγκυρίων (Σχήμα 6.27). Επιλέγονται αγκύρια μήκους 5m και διατομής Φ25 και Φ36.

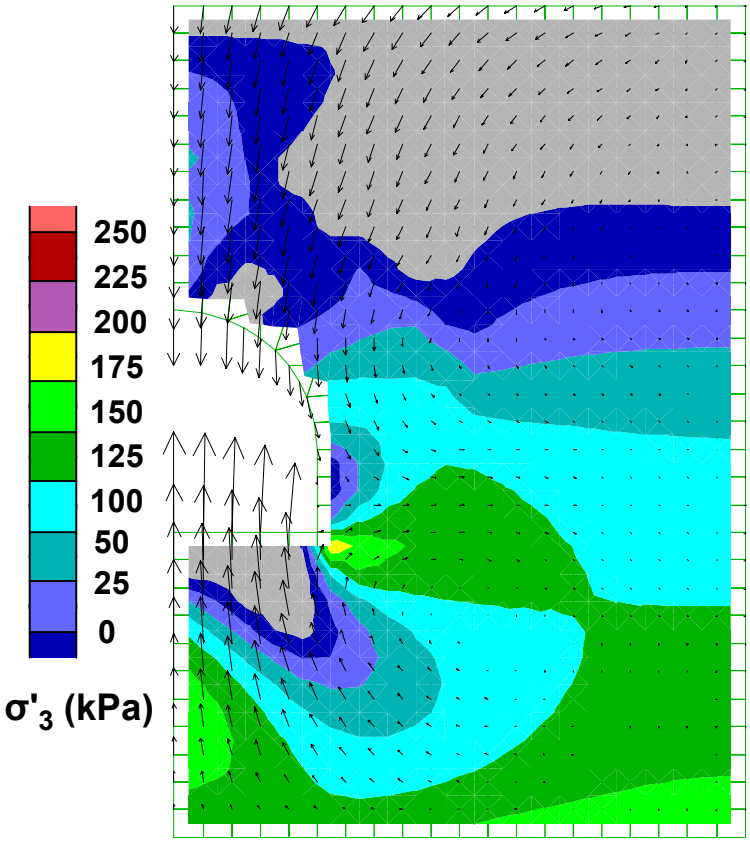


Σχήμα 6.27: Ορισμός των παραμέτρων του τύπου της υποστήριξης

Στα Σχήματα 6.28 και 6.29 απεικονίζεται η κατανομή των κύριων τάσεων μετά την τοποθέτηση των αγκυρίων.

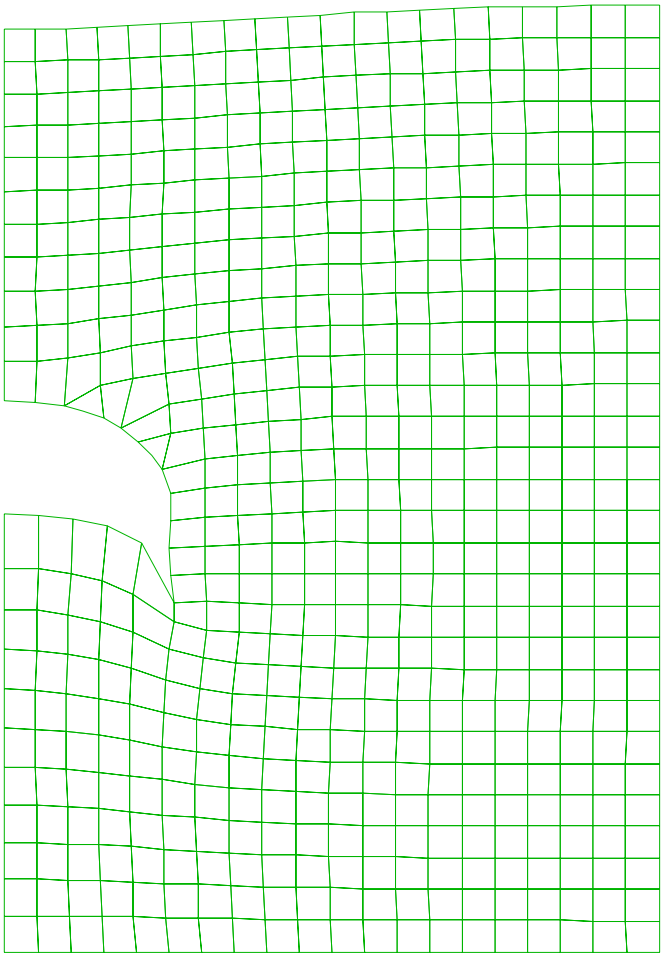


Σχήμα 6.28: Κατανομή της κύριας τάσης σ_1 μετά την τοποθέτηση των αγκυρίων.



Σχήμα 6.29: Κατανομή της κύριας τάσης σ_3 μετά την τοποθέτηση των αγκυρίων.

Στο σχήμα 6.30 απεικονίζεται η παραμόρφωση της εκσκαφής με το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και μετά την τοποθέτηση των αγκυρώσεων ενίσχυσης (rockbolts) σε μεγενθυμένη μορφή.



Σχήμα 6.30: Παραμόρφωση της εκσκαφής μετά την τοποθέτηση και των αγκυρίων ενίσχυσης (μεγενθυμένο σχήμα).

Στους πίνακες 6.5,6.6,6.7 προσδιορίζονται οι τιμές των μετατοπίσεων και των κυρίων τάσεων για τις τρεις περιπτώσεις τοποθέτησης των αγκυρίων στα σημεία με συντεταγμένες (1,20) (Σ12 Σχήμα 6.7), (6,15) (Σ22 Σχήμα 6.7) και (6,12) (Σ25 Σχήμα 6.7). Παρατηρείται ότι οι τιμές των μετατοπίσεων είναι πάρα πολύ μικρές με ελάχιστες διαφορές για τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις τοποθέτησης των αγκυρώσεων ενίσχυσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι όπως παρατηρείται στα Σχήματα 6.28 και 6.29 οι μετατοπίσεις του δαπέδου είναι μεγαλύτερες από αυτές της οροφής. Αυτό είναι εγγενές πρόβλημα του λογισμικού FLAC και εν προκειμένω δεν αξιολογείται.

Στα σχήματα 6.31,6.32,6.33,6.34 απεικονίζονται τα διαγράμματα των οριζόντιων και κατακόρυφων μετατοπίσεων και των κύριων τάσεων σ_1, σ_3 **περιμετρικά της σήραγγας** για τις τρεις περιπτώσεις τοποθέτησης των αγκυρώσεων ενίσχυσης.

Πίνακας 6.5: Μετατοπίσεις και κύριες τάσεις στο σημείο (1,20) της σήραγγας

Απόσταση μεταξύ των αγκυρίων	Μετακίνηση κατά x (m)	Μετακίνηση κατά y (m)	σ_1(kPa)	σ_3(kPa)
S=1,5 m	0	$-2,04*10^{-3}$	117,4	45,76
S=2 m	0	$-1,96*10^{-3}$	150,4	17,14
S=2,5 m	0	$-2,08*10^{-3}$	151,1	17,3

Πίνακας 6.6: Μετατοπίσεις και κύριες τάσεις στο σημείο (6,15) της σήραγγας

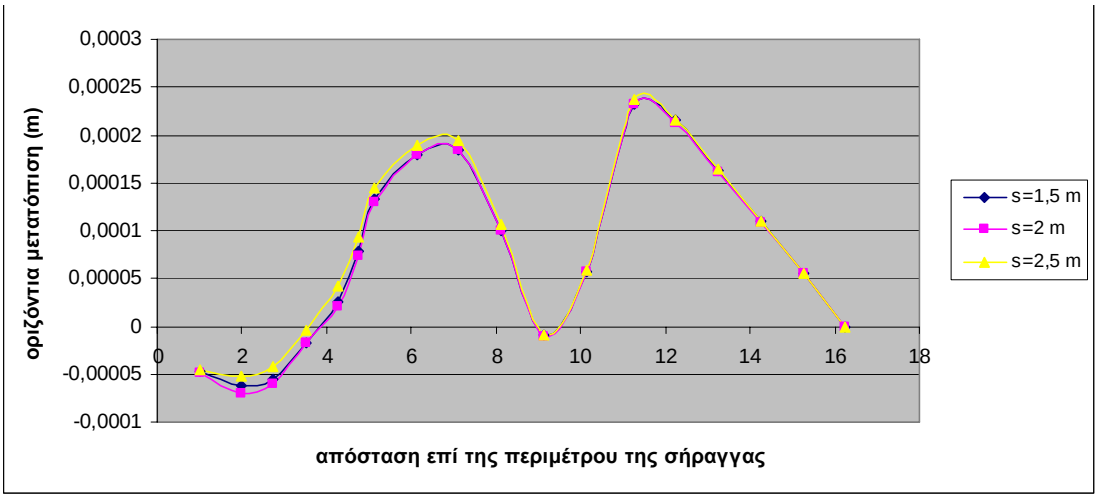
Απόσταση μεταξύ των αγκυρίων	Μετακίνηση κατά x (m)	Μετακίνηση κατά y (m)	σ_1(kPa)	σ_3(kPa)
S=1,5 m	$1*10^{-4}$	$-4,28*10^{-4}$	667,2	74,1
S=2 m	$1*10^{-4}$	$-4,1*10^{-4}$	607,9	73,5
S=2,5 m	$1,06*10^{-4}$	$-4,4*10^{-4}$	668,3	73,10

Πίνακας 6.7: Μετατοπίσεις και κύριες τάσεις στο σημείο (6,12) της σήραγγας

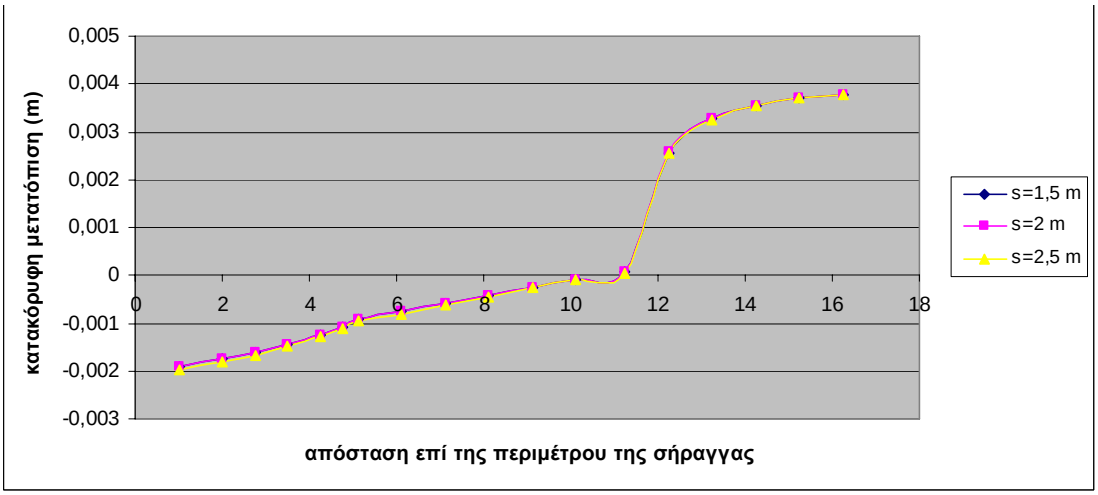
Απόσταση μεταξύ των αγκυρίων	Μετακίνηση κατά x (m)	Μετακίνηση κατά y (m)	σ_1(kPa)	σ_3(kPa)
S=1,5 m	$2,35*10^{-4}$	$6,4*10^{-5}$	540,6	139,4
S=2 m	$2,32*10^{-4}$	$7,69*10^{-5}$	540,6	139,4
S=2,5 m	$2,37*10^{-4}$	$5,25*10^{-5}$	543,8	139,8

Στα σχήματα 6.35, 6.36, 6.37, 6.38 απεικονίζονται τα διαγράμματα των οριζόντιων και κατακόρυφων μετατοπίσεων και των κύριων τάσεων σ_1, σ_3 κατά μήκος του x **ά-**ξονα για τις τρεις περιπτώσεις τοποθέτησης των αγκυρώσεων ενίσχυσης.

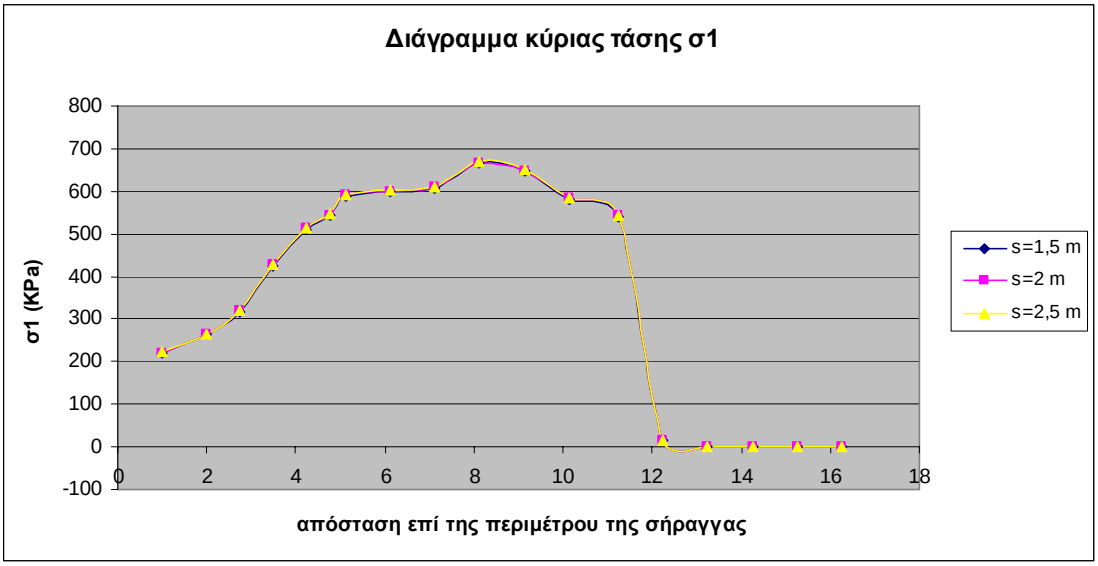
Στα σχήματα 6.39, 6.40, 6.41, 6.42 απεικονίζονται τα διαγράμματα των οριζόντιων και κατακόρυφων μετατοπίσεων και των κύριων τάσεων σ_1, σ_3 κατά μήκος του y ά-ξονα για τις τρεις περιπτώσεις τοποθέτησης των αγκυρώσεων ενίσχυσης.



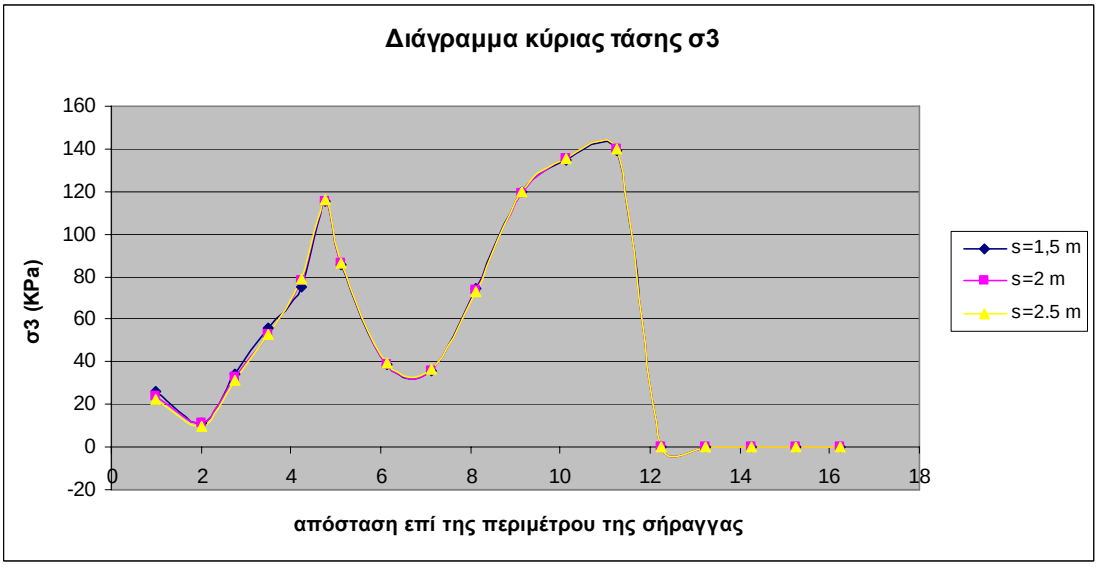
Σχήμα 6.31: Διάγραμμα οριζόντιας μετατόπισης στην περίμετρο της σήραγγας



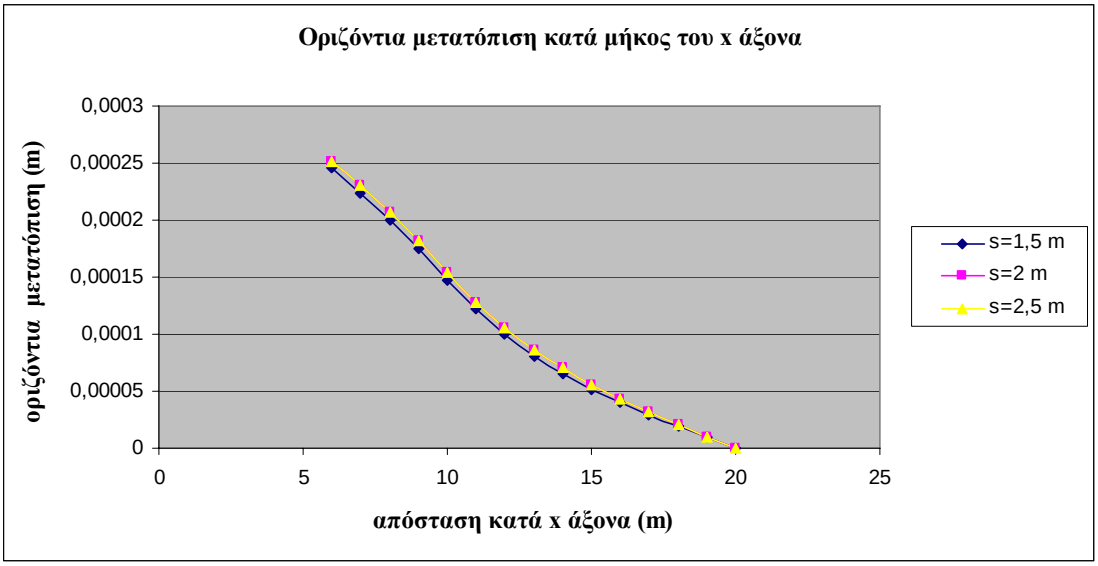
Σχήμα 6.32: Διάγραμμα κατακόρυφης στην περίμετρο της σήραγγας



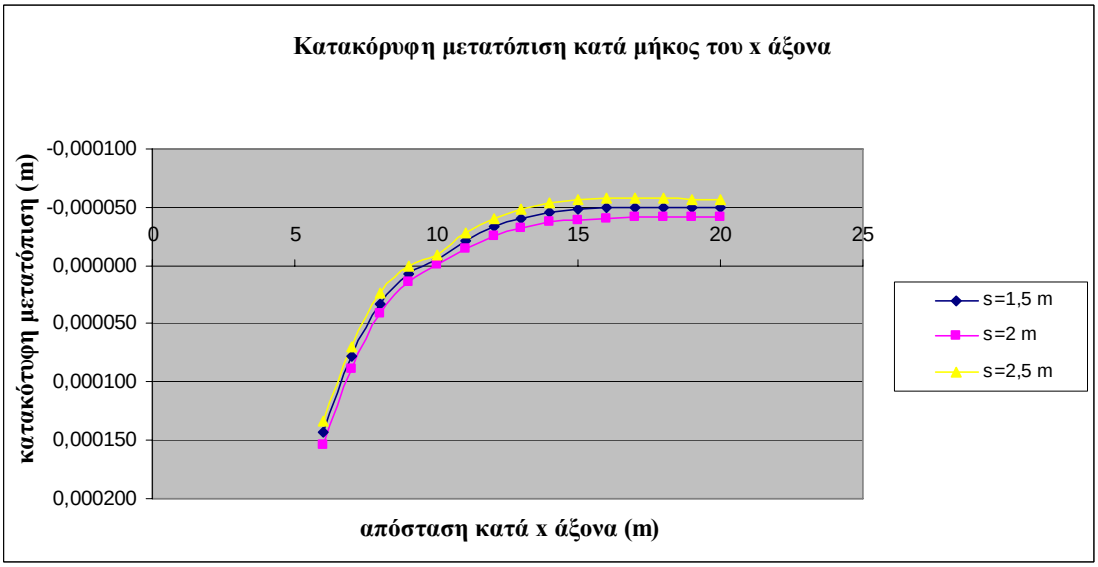
Σχήμα 6.33: Διάγραμμα κύριας τάσης σ_1 στην περίμετρο της σήραγγας



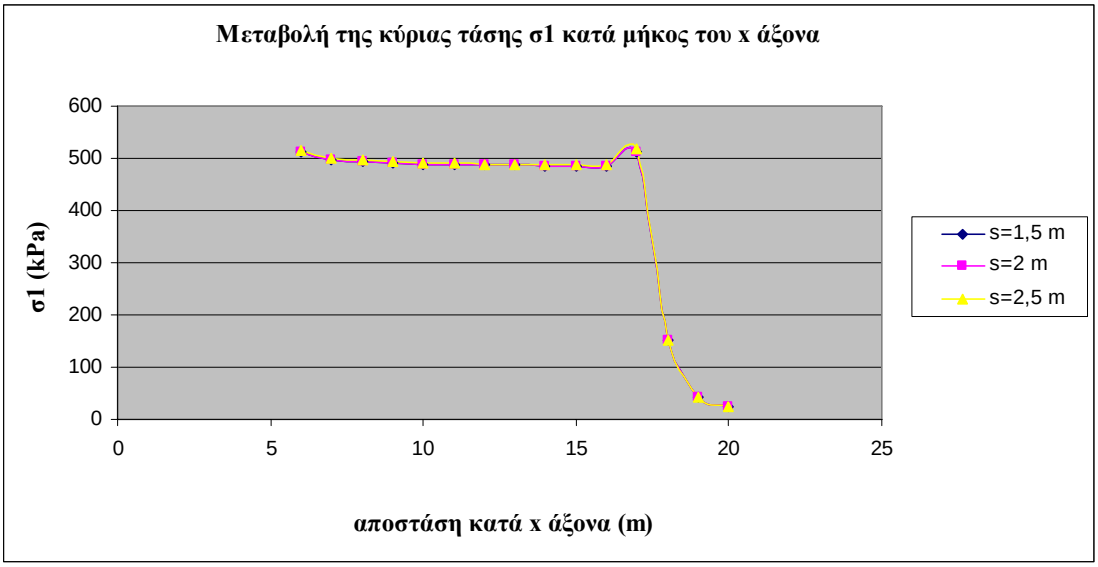
Σχήμα 6.34: Διάγραμμα κύριας τάσης σ_3 στην περίμετρο της σήραγγας



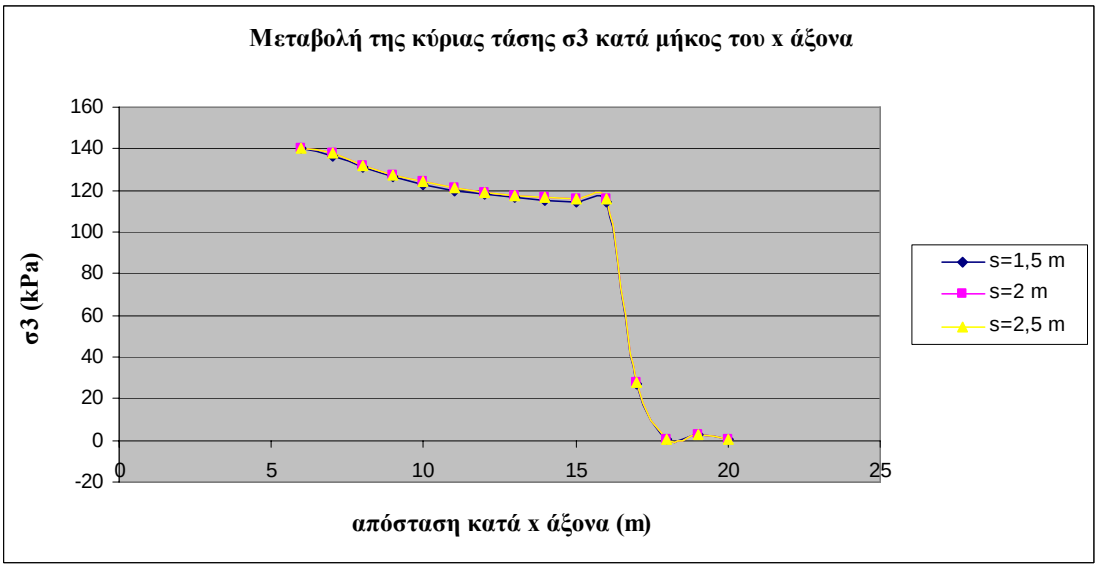
Σχήμα 6.35: Διάγραμμα οριζόντιας μετατόπισης κατά μήκος του x άξονα



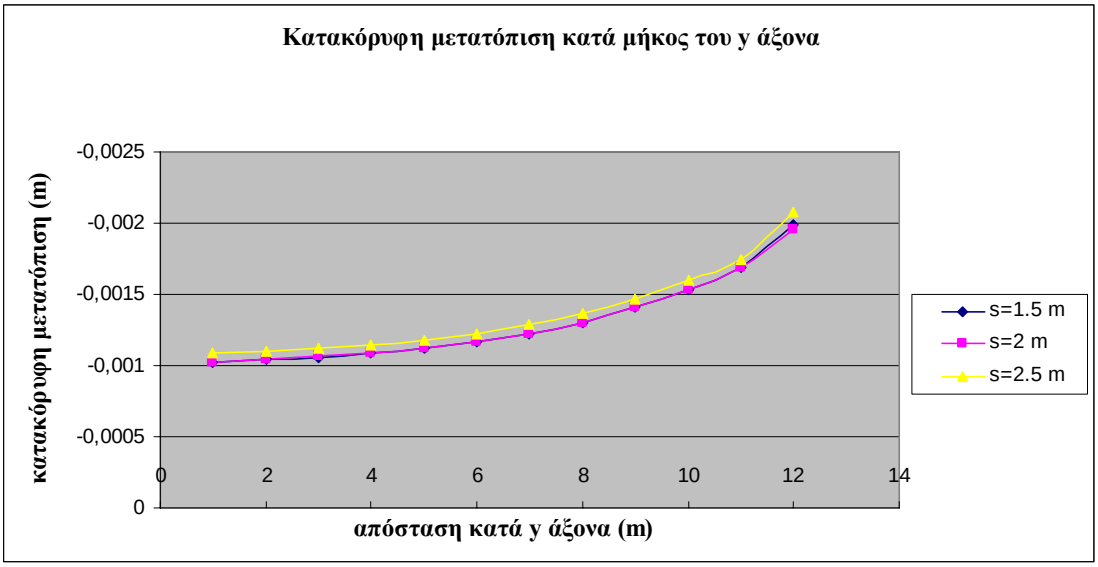
Σχήμα 6.36: Διάγραμμα κατακόρυφης μετατόπισης κατά μήκος του x άξονα



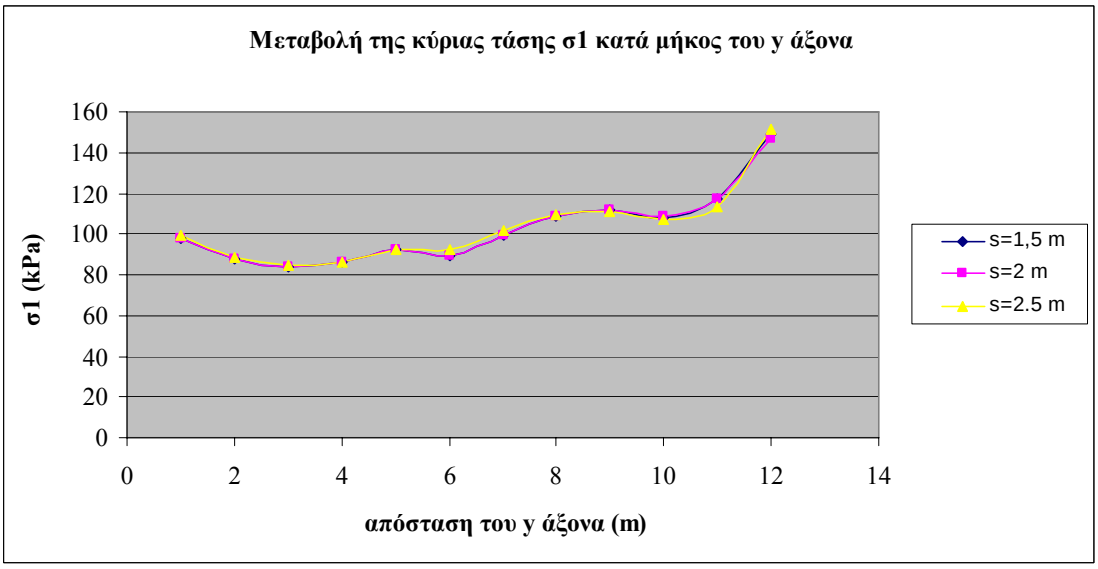
Σχήμα 6.37: Διάγραμμα κύριας τάσης σ_1 κατά μήκος του x άξονα



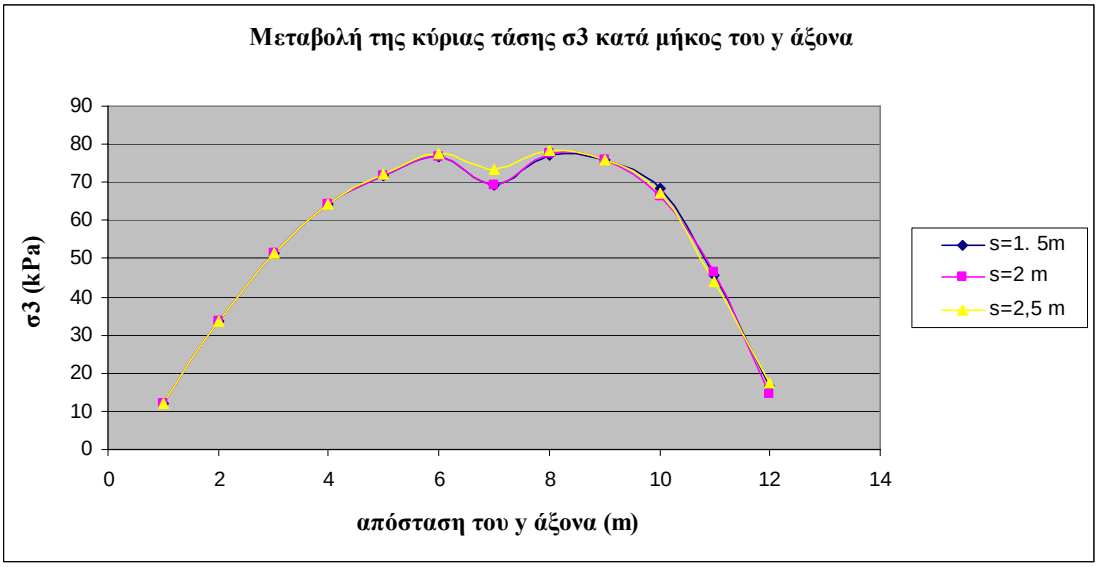
Σχήμα 6.38: Διάγραμμα κύριας τάσης σ_3 κατά μήκος του x άξονα



Σχήμα 6.39: Διάγραμμα κατακόρυφης μετατόπισης κατά μήκος του y άξονα



Σχήμα 6.40: Διάγραμμα κύριας τάσης σ_1 κατά μήκος του y άξονα



Σχήμα 6.41: Διάγραμμα κύριας τάσης σ_3 κατά μήκος του y άξονα

6.2.7 Αποτελέσματα μετά και την τοποθέτηση των αγκυρίων ενίσχυσης

Από το διάγραμμα των οριζόντιων μετατοπίσεων περιμετρικά της σήραγγας (Σχήμα 6.31) διαπιστώνεται ότι η μέγιστη οριζόντια μετατόπιση έχει τιμή 0,23 mm στο σημείο Σ25 (Σχήμα 6.7) για s=2.5 m (όπου s η απόσταση μεταξύ των αγκυρίων) και η ελάχιστη οριζόντια μετατόπιση έχει τιμή $-3,5*10^{-3}$ mm στο σημείο Σ16 (Σχήμα 6.5).

Από το διάγραμμα των κατακόρυφων μετατοπίσεων κατά μήκος του τόξου της σήραγγας (Σχήμα 6.32) διαπιστώνεται ότι η μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση έχει τιμή 3,76 mm στο σημείο Σ45 (Σχήμα 6.7) για s=2.5 m (όπου s η απόσταση μεταξύ των αγκυρίων) και η ελάχιστη κατακόρυφη μετατόπιση έχει τιμή $5,25*10^{-2}$ mm στο σημείο Σ25.

Από το διάγραμμα των οριζόντιων μετατοπίσεων κατά μήκος του x άξονα (Σχήμα 6.35) διαπιστώνεται ότι η μέγιστη οριζόντια μετατόπιση έχει τιμή 2,52 mm στο σημείο Σ26 (Σχήμα 6.7) στο πλησιέστερο σημείο από το πάτωμα της σήραγγας και μηδενίζεται στο πιο απομακρυσμένο σημείο Σ40 (Σχήμα 6.7).

Από το διάγραμμα των κατακόρυφων μετατοπίσεων κατά μήκος του x άξονα (Σχήμα 6.36) διαπιστώνεται ότι η μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση έχει τιμή 0,15 mm στο σημείο Σ 26 (Σχήμα 6.7) και σχεδόν μηδενίζεται στο μέσο του x άξονα.

Από το διάγραμμα των κατακόρυφων μετατοπίσεων κατά μήκος του y άξονα διαπιστώνεται ότι η μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση έχει τιμή -2,04 mm στη στέψη της σήραγγας για s=1,5 m(όπου s η απόσταση μεταξύ των αγκυρίων) δηλαδή στο σημείο Σ12 (Σχήμα 6.7) και ελαττώνεται όσο απομακρύνεται κανείς από τη στέψη της σήραγγας με ελάχιστη τιμή -1,025 mm στο σημείο Σ1 (Σχήμα6.7).

6.3 Έλεγχος ευαισθησίας

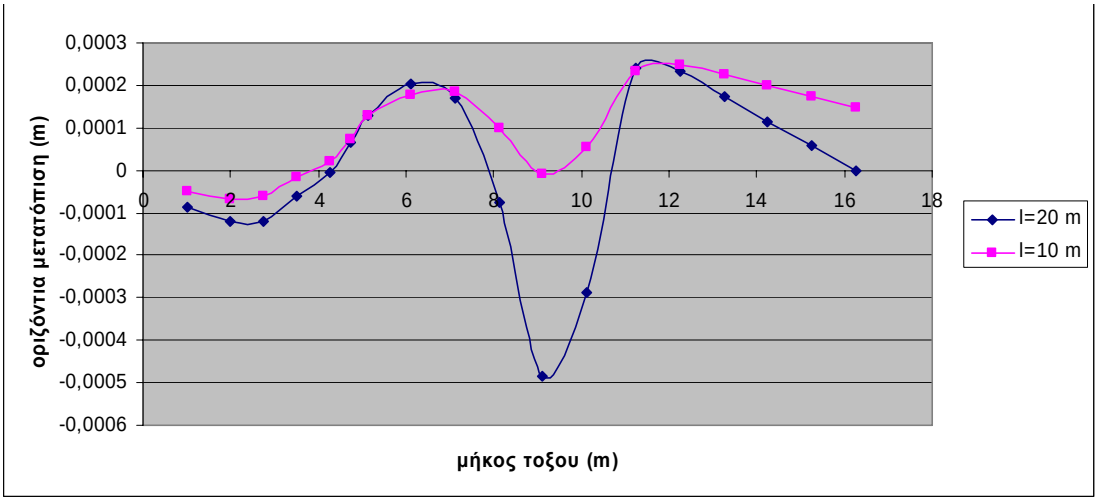
Για να επαληθευτεί η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, γίνεται τροποποίηση των δεδομένων του προβλήματος με αύξηση των υπερκείμενων του εδάφους κατά 10 m. Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία και μέσω του λογισμικού προγράμματος FLAC γίνεται εκ νέου διερεύνηση για μια περίπτωση υποστήριξης, δηλαδή για επένδυση με πάχος b=0,10 m και τοποθέτηση αγκυρίων με απόσταση 2 m μεταξύ τους.

Στον πίνακα 6.8 φαίνονται οι τιμές των μετατοπίσεων και των κύριων τάσεων για τα σημεία Σ12, Σ22, Σ25.

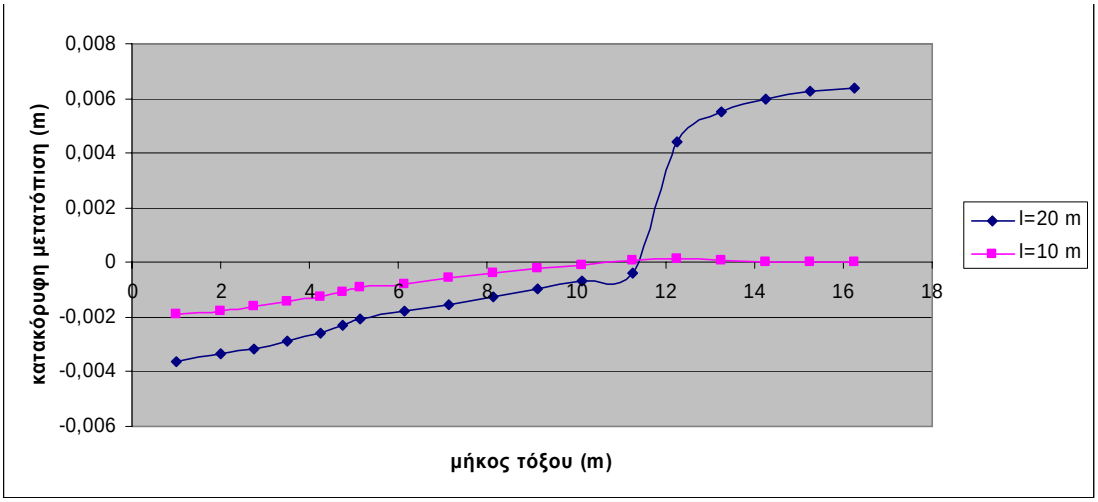
Πίνακας 6.8: Μετατοπίσεις και κύριες τάσεις στα σημεία Σ12,Σ22,Σ25

Συντεταγμένες Σημείων	Μετακίνηση κατά x (m)	Μετακίνηση κατά y (m)	σ_1(kPa)	σ_3(kPa)
(1,20)	0	$-3,77 * 10^{-3}$	269,4	44,73
(6,15)	$-4,9*10^{-4}$	$-9,4*10^{-4}$	799,9	89,2
(6,12)	$2,4*10^{-4}$	$-4,2*10^{-4}$	869,8	220,5

Στα διαγράμματα 6.42 και 6.43 απεικονίζονται οριζόντιες και οι κατακόρυφες μετακινήσεις για ύψος υπεκείμενων 10 m και 20 m αντίστοιχα.



Σχήμα 6.42 Διάγραμμα οριζόντιας μετατόπισης κατά μήκος της περιμέτρου της σήραγγας



Σχήμα 6.43 Διάγραμμα κατακόρυφης μετατόπισης κατά μήκος της περιμέτρου της σήραγγας

Από τα διαγράμματα 6.42 και 6.43 προκύπτει ότι οι μετατοπίσεις για πάχος υπερκείμενων του εδάφους 20 m είναι μεγαλύτερες (πίνακας 6.8) δηλαδή η μέγιστη οριζόντια μετατόπιση για l=20 m (όπου l το πάχος των υπερκείμενων του εδάφους) έχει τιμή -0,49 mm ενώ για l=10 m έχει τιμή -0,1 mm ενώ η μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση για l=20 m έχει τιμή -3,6 mm και για l=10 m έχει τιμή -1,9 mm γεγονός που καταδεικνύει ότι το μοντέλο έχει σταθερή απόκριση σε μεταβολές των παραμέτρων εισόδου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

7.1 Συμπεράσματα

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας έγινε καταρχήν μια συνοπτική καταγραφή και περιγραφή των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για την διάνοιξη οδικών σηράγγων καθώς και παρουσίαση των επιδράσεων της επί τόπου εντατικής κατάστασης κατά το σχεδιασμό υπόγειων έργων. Σημειώνεται ότι η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου διάνοιξης ανάλογα με τις συνθήκες της κάθε περίπτωσης είναι σύνθετη διαδικασία κρίσιμης σημασίας για την ασφαλή και οικονομική ολοκλήρωση του έργου.

Επίσης έγινε εκτενής παρουσίαση των μέτρων υποστήριξης ενίσχυσης των οδικών σηράγγων. Η κατάλληλη επιλογή των μέτρων υποστήριξης παίζει καθοριστικό ρόλο για την ορθή κατασκευή και ολοκλήρωση μιας οδικής σήραγγας οποιουδήποτε μήκους και μεγέθους και κάτω από οποιεσδήποτε γεωμηχανικές συνθήκες σε συνδυασμό πάντα με τις σύγχρονες μεθόδους εκσκαφής.

Η μοντελοποίηση και προσομοίωση της οδικής σήραγγας έγινε με το εμπορικό λογισμικό FLAC, των πεπερασμένων διαφορών. Έτσι, το συνεχές μέσο διακριτοποιείται σε πολλά τμήματα πεπερασμένων διαστάσεων τα οποία στο FLAC ονομάζονται ζώνες (zones). Πραγματοποιήθηκε παραμετρική διερεύνηση για την επιλογή των κατάλληλων μέτρων υποστήριξης. Σκοπός ήταν να εφαρμοστούν τα κατάλληλα μέτρα υποστήριξης στην υπό μελέτη διατομή, αξιοποιώντας όλες τις δυνατές επιλογές που προσφέρει το λογισμικό πακέτο FLAC. Στο μοντέλο εφαρμόστηκαν εναλλακτικοί τρόποι υποστήριξης και τέλος πραγματοποιήθηκε και διερεύνηση ευαισθησίας για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

Για τη σύγκριση των διαφορετικών μέτρων υποστήριξης υπολογίστηκαν οι κατακόρυφες και οι οριζόντιες μετατοπίσεις σε κρίσιμα σημεία και διαδρομές επί του μοντέλου.

Τα σημεία ελέγχου (Σ12 Σχήμα 6.7, Σ25 Σχήμα 6.7) που απέχουν μικρή απόσταση από τον άξονα της σήραγγας εμφανίζουν μεγαλύτερες κατακόρυφες μετατοπίσεις σε σχέση με τα σημεία που απέχουν περισσότερο από αυτόν (Σ1, Σ2, Σ38, Σ39 Σχήμα 6.7).

Οι πολύ μικρές μετατοπίσεις συγκλίνουν στο συμπέρασμα ότι το υλικό και μετά τη διάνοιξη της σήραγγας παραμένει στην ελαστική περιοχή. Από τις λύσεις που προτάθηκαν η πιο οικονομική είναι αυτή που αντιστοιχεί σε πάχος υποστήριξης b=0.10 cm, επειδή οι διαφορές στις μετατοπίσεις και στις τάσεις είναι πολύ μικρές για τα τρία διαφορετικά πάχη υποστήριξης.

Οι διαφορές στις τιμές των μετατοπίσεων κατά την τοποθέτηση των αγκυρίων (rockbolts) είναι ελάχιστες σε σχέση με τις τιμές των μετατατοπίσεων με την τοποθέτηση μόνο της επένδυσης από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (liner). Για το λόγο αυτό καθίσταται μη αναγκαία η τοποθέτηση αγκυρίων τριβής ως μέτρο ενίσχυσης της οδικής σήραγγας.

7.2 Προτάσεις

Η προσομοίωση του εδάφους πραγματοποιήθηκε με τον πλέον απλοποιημένο τρόπο, δηλαδή χρησιμοποιώντας σταθερό μέτρο ελαστικότητας με το βάθος και ελαστοπλαστική απόκριση του υλικού. Θα ήταν πιο ρεαλιστική η προσέγγιση του προβλήματος αν (α) μεταβαλλόταν το μέτρο ελαστικότητας σε σχέση με το βάθος ή και (β) γινόταν επίλυση με την θεώρηση ενός πιο σύνθετου εδαφικού προσομοιώματος λαμβάνοντας υπόψιν και την μη γραμμικότητα του υλικού στην ελαστική περιοχή (απομείωση του μέτρου ελαστικότητας σε σχέση με την επιβαλλόμενη παραμόρφωση).

Επιπρόσθετα. πρέπει να εξεταστεί, εάν υφίστανται συνθήκες αποσφήνωσης όγκων πετρώματος για την αντιμετώπιση των οποίων πρέπει να τοποθετούνται κοχλίες.

Βιλιογραφία

Ελληνική βιβλιογραφία

1. Αγιουτάντης Ζ. (2002), «Στοιχεία Γεωμηχανικής, Μηχανική Πετρωμάτων», Εκδόσεις Ίων.
2. Παπαντώνη Χ. (2007), «Παραμετρική διερεύνηση εναλλακτικών συστημάτων υποστήριξης οδικής σήραγγας» μεταπτυχιακή διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών, Πολυτεχνείο Κρήτης
3. Καββαδάς Μ. (2004), Σημειώσεις Σχεδιασμού Υπόγειων Έργων, Έκδοση Ε.Μ. Πολυτεχνείου.
4. Σοφιανός, Α. Ι. (2002), Σημειώσεις Μαθήματος, Έκδοση Ε.Μ. Πολυτεχνείου.
5. Μαραγκός Χ. (1997), «Τεχνικά έργα υποδομής, κατασκευές στην επιφάνεια του βράχου, υπόγειες κατασκευές, φράγματα».
6. Σακελλαρίου Μ. (2005), «Καθιζήσεις και συγκλίσεις προκαλούμενες από τη διάνοιξη αβαθών σηράγγων. Αναλυτικές και υπολογιστικές μέθοδοι εκτίμη-σης».2ο Πανελλήνιο συνέδριο οδοποιίας, Βόλος 18-20 Μαΐου 2005.
7. ΠΕΤΕΠ (προσωρινές εθνικές τεχνικές προδιαγραφές) 12-03-03-00, Έκδοση 1, Μάιος 2006.
8. Καλιαμπάκος 2004, Σημειώσεις μαθήματος «Εκμετάλλευση μεταλλείων Ι-Μηχανές ολομέτωπης κοπής» Έκδοση Ε.Μ. Πολυτεχνείου.
9. Μπαλικτσής, 2009, ΜΕΤΕΟ 2009-Ημερίδα ΕΕΣΥΕ 20/3/09- Σχεδιασμός και έλεγχος δονήσεων ανατινάξεων διάνοιξης σηράγγων.
10. Ρόζος 1989, Εγχειρίδιο τεχνικής γεωλογίας Ι, 13η διάλεξη Ηλεκτρονικές ση-μειώσεις Ε.Μ. Πολυτεχνείου.

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

1. Hoek et al,1995 «Support of underground excavations in hard rock»
2. Sinha R.S, 1989 «Underground structures, design and instrumentation» Elsevier.
3. Hoek, 2000 «Rock engineering», Courses Notes, published in the web.
4. FLAC version 6, 2009.
5. Hudson & Harrison, 1997 « Engineering rock mechanics» Pergamon

6. D.F. Coates, 1981 «Rock mechanics principles» Monograph 874
7. Zhao, 2007 Inaugural lecture, EPFL, «Tunneling in rocks-Present technology and future challenges», laboratoire de mechanique des rocks-LMR.
8. US Army Corps of Engineers (USACE) (1997), "Tunnels and shafts in Rock".
9. Heiniö, M. (1999), "Rock excavation handbook", Copyright Sandvik Tamrock Corp.
10. Kosmelis C., Blayney N., Hindle D. «The use of lattice girders in the construction of tunnels»
11. Ratan Raj Tatiya,2005 «Surface and underground excavations methods Techniques and Equipment»

Διαδίκτυο

www.therobbinscompany.com,2007

www.pipejackingorg,2007

www.robbinstbm.com,2004

www.gorillahammers.com,2007

www.ametro.gr,2009

www.celtite.com.au,2007