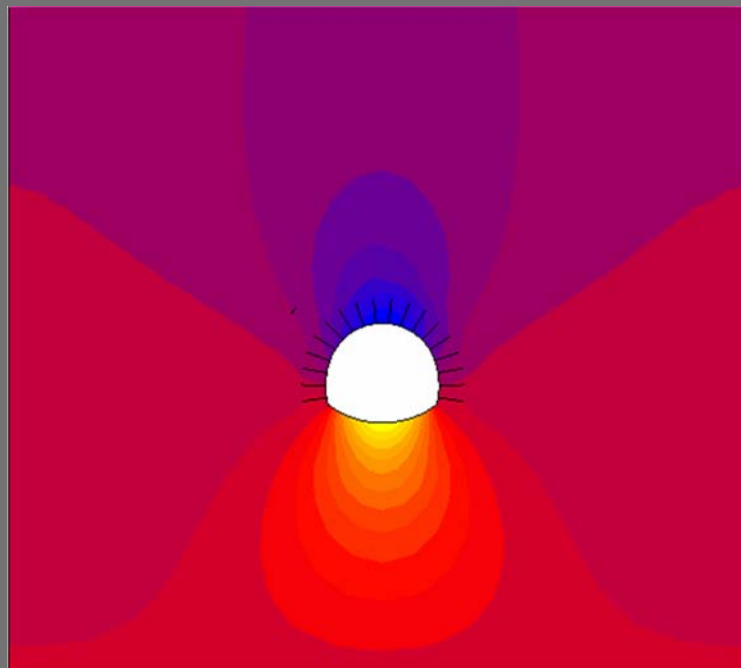




ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ
ΣΠΟΥΔΩΝ

Παραμετρική Διερεύνηση Εναλλακτικών Συστημάτων Υποστήριξης Σε Οδική Σήραγγα

Μεταπτυχιακή Διατριβή



Παπαντώνη Χαραλαμπία
Διπλωματούχος Μηχανικός Ορυκτών Πόρων, MSc

Εξεταστική Επιτροπή: Ζ. Αγιουτάντης, Καθηγητής (επιβλέπων)
Γ. Εξαδάκτυλος, Καθηγητής
Κ. Προβιδάκης, Αναπληρωτής Καθηγητής

Χανιά, Δεκέμβριος 2007

Αφιερώνεται
σε όσους με στήριξαν

Ευχαριστίες

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή δε θα είχε ολοκληρωθεί χωρίς τη βοήθεια και την υποστήριξη ορισμένων ανθρώπων, τους οποίους θα ήθελα να ευχαριστήσω.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Αγιουτάντη Ζαχαρία για την πολύτιμη και συνεχή βοήθεια που μου παρείχε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής και για την κατανόηση που έδειξε σε όλες τις απρόβλεπτες καθυστερήσεις που προέκυψαν από την ανάθεση της εργασίας μέχρι την ολοκλήρωσή της.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στο Διπλωματούχο Μηχανικό Ορυκτών Πόρων και μεταπτυχιακό φοιτητή του τμήματος κ. Βιόπουλο Πολυχρόνη για την άψογη συνεργασία που είχαμε τις αμέτρητες ώρες μελέτης του εγχειριδίου του προγράμματος Marc Mentat και για την αισιοδοξία του σε κάθε πρόβλημα που προέκυπτε.

Ακόμα, θα ήθελα να αναφερθώ στον επιστημονικό συνεργάτη του Εργαστηρίου Μηχανικής Πετρωμάτων Μεταλλειολόγο Μηχανικό κ. Μαυριγιαννάκη Στέλιο που μου παρείχε πολύτιμες συμβουλές για εύρεση εναλλακτικών λύσεων, όπου αυτές χρειάστηκαν.

Ευχαριστίες οφείλω και στη Γενική Μελετών Ίστρια για τα στοιχεία της σήραγγας που έδωσαν. Τα στοιχεία προέρχονται από την προδημοπρασιακή φάση των εταιρειών Hellenic Autopistas. Η σήραγγα αποτελεί μέρος του νέου αυτοκινητοδρόμου Ελευσίνα-Κόρινθος-Πάτρα-Πύργος-Τσακώνα και βρίσκεται στην περιοχή Μαύρα Λιθάρια.

Τέλος, θα ήταν παράλειψη να μην ευχαριστήσω τους κ.κ. Καθηγητή Εξαδάκτυλο Γεώργιο και Αναπληρωτή Καθηγητή Προβιδάκη Κωνσταντίνο που δέχτηκαν να συμμετάσχουν στην τριμελή εξεταστική επιτροπή για την αξιολόγηση της εργασίας.

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	1
Εισαγωγή	2
Κεφάλαιο 1 Εντατικό πεδίο γύρω από υπόγεια ανοίγματα	4
1.1 Εκτίμηση αρχικής εντατικής κατάστασης	4
1.2 Ανακατανομή τάσεων γύρω από υπόγειο άνοιγμα	6
1.3 Παραμορφώσεις κατά την προχώρηση της σήραγγας	10
1.4 Μακροχρόνια συμπεριφορά της βραχόμαζας	12
Κεφάλαιο 2 Μέθοδοι εκσκαφής οδικών σηράγγων	15
2.1 Εναλλακτικές κατηγοριοποιήσεις μεθόδων εκσκαφής	15
2.2 Μέθοδοι εκσκαφής για κατασκευές ανοικτού τύπου	18
2.3 Μέθοδοι εκσκαφής για κατασκευές κλειστού τύπου	20
2.3.1 Μέθοδοι διάτρησης-ανατίναξης	20
2.3.2 Μέθοδοι μηχανικής όρυξης	24
Α. Εφαρμογές σε αυτοϋποστηριζόμενη βραχόμαζα	25
1. Μέθοδοι σημειακής κοπής	25
2. Μέθοδοι ολομέτωπης κοπής	31
3. Νέα Αυστριακή Μέθοδος (New Austrian Tunnelling Method - NATM) ..	42
Β. Εφαρμογές σε μη αυτοϋποστηριζόμενη βραχόμαζα	47
1. Διαδικασίες βελτίωσης ή/και προϋποστήριξης βραχόμαζας	47
2. Μέθοδοι σημειακής κοπής	59
3. Μέθοδοι ολομέτωπης κοπής	60
4. Νέα Αυστριακή Μέθοδος (New Austrian Tunnelling Method – NATM) ..	67
Κεφάλαιο 3 Μέτρα υποστήριξης οδικών σηράγγων	70
3.1 Εσωτερική στήριξη βραχόμαζας	71
3.1.1 Μέσα προενίσχυσης	71
1. Αγκύρια συνεχούς πάκτωσης άκαμπτης ράβδου (Fully Grouted Pipe Bolts-Spiles)	71
2. Απλά αυτοδιατρώμενα αγκύρια/ήλοι (Self Drilling Simple Bolts)	72
3. Αυτοδιατρώμενα αγκύρια/ήλοι σωληνωτού τύπου (Self Drilling Pipe Bolts/Spiles)	72
3.1.2 Μέσα στήριξης (μετά την εκσκαφή)	73
Α. Αγκύρια σημειακής πάκτωσης	73
1. Ήλοι με εγκοπή και σφήνα	74
2. Ήλοι με διευρυμένο κέλυφος	74
3. Ήλοι/Αγκύρια σημειακής πάκτωσης με μηχανισμό διαστελλόμενου άκρου (Mechanically Anchorade Bolts)	75
4. Ήλοι/Αγκύρια σημειακής πάκτωσης μέσω ρητινικής κόλλας (Resin Rock Bolts)	76
Β. Αγκύρια συνεχούς πάκτωσης	77
1. Ήλοι πακτωμένοι με τσιμεντένεμα	78
2. Ήλοι πακτωμένοι με ρητινικό ένεμα	78
Γ. Ήλοι τριβής	79
1. Ήλοι με διαμήκη σχισμή (Split set®)	79
2. Διογκούμενοι ήλοι (Swelllex®)	81
Δ. Συρματόσκοινα	83
3.1.3 Πλάκες στήριξης	83
3.2 Εξωτερική στήριξη βραχόμαζας	85

3.2.1 Δικτύωμα οροφής	85
3.2.2 Μεταλλικά πλαίσια	85
Α. Βαριά πλαίσια	87
Β. Ελαφρά πλαίσια.....	88
3.2.3 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα	92
3.3 Τελική επένδυση	96
Κεφάλαιο 4 Αριθμητική προσομοίωση εκσκαφής και υποστήριξης οδικών σηράγγων	97
4.1 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων	98
4.2 Εναλλακτικές προσεγγίσεις φόρτισης ενός μοντέλου	99
4.2.1 Διαδοχικές φάσεις φόρτισης	101
4.2.2 Ενεργοποίηση εφαρμογής ίσων και αντίθετων δυνάμεων.....	101
4.2.3 Εισαγωγή αρχικών συνθηκών από προηγούμενη φόρτιση.....	102
4.3 Διατύπωση του προβλήματος	103
4.4 Μοντελοποίηση του προβλήματος	108
4.4.1 Μοντελοποίηση Σήραγγας Ι	108
4.4.2 Μοντελοποίηση Σήραγγας ΙΙ	111
4.5 Αποτελέσματα.....	112
4.5.1 Αποτελέσματα Οδικής Σήραγγας Ι	114
4.5.2 Αποτελέσματα Οδικής Σήραγγας ΙΙ.....	119
4.5.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων	125
Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα - Προτάσεις	129
5.1 Συμπεράσματα	129
5.2 Προτάσεις	131
Βιβλιογραφία	132

Περίληψη

Χάρη στην καλύτερη αντίληψη της μηχανικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων, αναπτύσσονται νέες μέθοδοι εκσκαφής υπογείων ανοιγμάτων που στηρίζονται σε εξοπλισμό μεγαλύτερων δυνατοτήτων. 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 να συγκριθούν μέσω αριθμητικής προσομοίωσης εναλλακτικά συστήματα υποστήριξης για οδική σήραγγα που εξορύσσεται με πολλαπλές φάσεις εκσκαφής. Παράλληλα, γίνεται παραμετρική διερεύνηση του κατάλληλου τρόπου φόρτισης, ώστε να εφαρμοσθεί αντιπροσωπευτικά το βαρυτικό πεδίο στις υπό μελέτη διατομές για την προσομοίωση της τμηματικής εκσκαφής και υποστήριξης ενός υπόγειου ανοίγματος με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Επίσης, γίνεται μια εκτενής περιγραφή των μεθόδων εκσκαφής και των συστημάτων υποστήριξης που χρησιμοποιούνται σήμερα σε οδικές σήραγγες, καθώς και η επιλογή τους ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε περίπτωσης.

Εισαγωγή

Η δυνατότητα διάνοιξης υπογείων ανοιγμάτων σήμερα, τόσο όσον αφορά στο μέγεθος όσο και στις συνθήκες, δεν ήταν δυνατή πριν από 50 χρόνια. Αυτό κατέστη δυνατό χάρη στην απόκτηση καλύτερης αντίληψης της μηχανικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων, αλλά και χάρη στις τεχνικές σταθεροποίησης ή/και υποστήριξης που αναπτύχθηκαν.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι να συγκριθούν μέσω αριθμητικής προσομοίωσης εναλλακτικά συστήματα υποστήριξης για οδική σήραγγα που εξορύσσεται με πολλαπλές φάσεις εκσκαφής. Παράλληλα, γίνεται παραμετρική διερεύνηση του κατάλληλου τρόπου φόρτισης, ώστε να εφαρμοσθεί αντιπροσωπευτικά το βαρυτικό πεδίο στις υπό μελέτη διατομές για την προσομοίωση της τμηματικής εκσκαφής και υποστήριξης ενός υπόγειου ανοίγματος με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Η διάρθρωση της παρούσας εργασίας έχει ως εξής:

Στο 1^ο κεφάλαιο περιγράφονται οι τρόποι εκτίμησης ή υπολογισμού της αρχικής εντατικής κατάστασης πριν την όρυξη υπογείου ανοίγματος, καθώς και του μεταβαλλόμενου εντατικού πεδίου μετά την όρυξη του ανοίγματος, εφόσον σημαντική παράμετρος κατά το σχεδιασμό υπογείων έργων αποτελεί η γνώση των εντατικών αυτών πεδίων. Οι μέγιστες υπολογιζόμενες τάσεις δεν πρέπει να υπερβαίνουν την αντοχή του περιβάλλοντος πετρώματος, ώστε να διασφαλίζεται η ευστάθεια των υπόγειων ανοιγμάτων.

Στο 2^ο κεφάλαιο γίνεται αναφορά και περιγραφή των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για την εκσκαφή οδικών σιράγγων, καθώς και περιγραφή του απαιτούμενου εξοπλισμού για την καθεμιά, με ταυτόχρονη επισήμανση των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων της κάθε μεθόδου ανάλογα με τις απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής.

Το 3^ο κεφάλαιο περιλαμβάνει τα μέτρα υποστήριξης που χρησιμοποιούνται σε οδικές σήραγγες, τόσο για την προσωρινή όσο και για τη μόνιμη υποστήριξή τους.

Στο 4^ο κεφάλαιο, περιγράφεται η μοντελοποίηση του προς διερεύνηση θέματος με το εμπορικό λογισμικό πακέτο MSC Marc Mentat, που βασίζεται στην αριθμητική μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και ερμηνεύονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

Τέλος, στο 5^ο κεφάλαιο εξάγονται τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας και γίνονται κάποιες προτάσεις για περαιτέρω διερεύνησή της.

Κεφάλαιο 1

Εντατικό πεδίο γύρω από υπόγεια ανοίγματα

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. Η όρυξη ενός ανοίγματος στη μάζα του πετρώματος επιφέρει τη μεταβολή του εντατικού πεδίου του αδιατάρακτου πετρώματος, λόγω της ανακατανομής των τάσεων γύρω από το άνοιγμα, με σκοπό την αποκατάσταση της στατικής ισορροπίας του συστήματος. Οι τάσεις που επικρατούν στο αδιατάρακτο πέτρωμα είναι οι επί τόπου τάσεις και διακρίνονται σε αρχικές (virgin stresses) και επιφερόμενες (induced stresses) λόγω της διαταραχής του εντατικού πεδίου (Αγιουτάντης, 2001).

1.1 Εκτίμηση αρχικής εντατικής κατάστασης

Τα πετρώματα που βρίσκονται σε βάθη, υπόκεινται σε τάσεις που οφείλονται στο βάρος των υπερκείμενων στρωμάτων και στο ότι βρίσκονται σε καθεστώς τάσεων τεκτονικής προέλευσης. Ο προσδιορισμός του αρχικού τασικού πεδίου δεν είναι εύκολος. Οι αρχικές τάσεις διακρίνονται σε:

- Βαρυτικές τάσεις (gravitational stresses), που οφείλονται στη δράση του πεδίου βαρύτητας
- Τεκτονικές τάσεις (tectonic stresses), που οφείλονται σε τεκτονικές δυνάμεις
- Παραμένουσες τάσεις (residual stresses) που μπορεί να δημιουργηθούν λόγω φυσικών ή/και χημικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα σε περιορισμένους όγκους πετρωμάτων, όπως για παράδειγμα κατά την ανομοιόμορφη ψύξη μάζματος

Οι τάσεις που οφείλονται στο πεδίο βαρύτητας μπορούν να υπολογιστούν εύκολα από την ισορροπία των δυνάμεων στον κατακόρυφο άξονα. Οι υπόλοιπες τάσεις που ενδεχόμενα ασκούνται σε ένα πέτρωμα είναι συνήθως δυνατόν να προσεγγισθούν από μετρήσεις επί τόπου (Αγιουτάντης, 2001).

Η εντατική κατάσταση της βραχώμαζας πριν από την κατασκευή υπογείων έργων συνήθως είναι η γεωστατική – σε τεκτονικά ήρεμες περιοχές-, δηλαδή περιγράφεται από κατακόρυφες και οριζόντιες κύριες ενεργές τάσεις (σ'_v και σ'_h αντιστοίχως) με τιμές:

$$\sigma'_v = \gamma \times h - u_0 \quad \text{και} \quad \sigma'_h = K_0 \times \sigma'_v$$

Όπου:

h = το βάθος από την επιφάνεια του εδάφους

γ = το ειδικό βάρος της βραχώμαζας

u_0 = η υδατική πίεση πόρων ($u_0 = \gamma_w \times d$, όπου γ_w είναι το ειδικό βάρος του νερού (10 kN/m³) και d το πιεζομετρικό ύψος)

K_0 = ο συντελεστής οριζόντιας πίεσης

Το ειδικό βάρος της βραχώμαζας κυμαίνεται μεταξύ 23-26 kN/m³. Στην περίπτωση υδροστατικής πίεσης πόρων: Τέλος, ο συντελεστής οριζόντιας πίεσης (K_0) συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 0,4-1,0 χωρίς να αποκλείονται και μικρότερες ή μεγαλύτερες τιμές. Ειδικότερα, σε υγιείς βραχώμαζες χωρίς επιρροή από τεκτονικές πιέσεις: $K_0 = 0,6-1,0$. Σε αποσαθρωμένες βραχώμαζες: $K_0 = 0,4-0,7$. Στην περίπτωση όπου η βραχώμαζα επηρεάζεται από τεκτονικές πιέσεις ο συντελεστής K_0 μπορεί να υπερβαίνει σημαντικά τη μονάδα (έχουν μετρηθεί τιμές έως και 4 στην περίπτωση έντονου θλιπτικού τεκτονικού καθεστώτος) αλλά και να έχει πολύ μικρές τιμές ($K_0 = 0-0,3$ στην περίπτωση έντονου εφελκυστικού τεκτονικού καθεστώτος). Η διεθνής εμπειρία δείχνει ότι σε μεγάλα βάθη (άνω των 400-500 μέτρων) η γεωστατική εντατική κατάσταση είναι πρακτικώς ισότροπη ($K_0 = 1$), ενώ αντίθετα, σε μικρά βάθη (100-400m) συνήθως μετρώνται τιμές του K_0 αρκετά μεγαλύτερες από τη μονάδα. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τιμές του K_0 που υπερβαίνουν τη μονάδα έχουν μετρηθεί σε χώρες που τελούν υπό έντονο θλιπτικό τεκτονικό καθεστώς (Νότιος Αφρική, Σκανδιναβικές χώρες, Καναδάς) και δεν είναι βέβαιο ότι μπορούν να εφαρμοσθούν στην Ελλάδα (όπου οι τεκτονικές τάσεις στον παρόντα γεωλογικό χρόνο είναι εφελκυστικές).

Σημειώνεται ότι η αξιόπιστη μέτρηση του συντελεστή οριζόντιας πίεσης (K_0) είναι δυσχερής και τα αποτελέσματα δεν είναι εύκολα ερμηνεύσιμα. Οι μέθοδοι που συνήθως χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση του K_0 είναι η δοκιμή πρεσσιομέτρου ή ντιλατομέτρου, η μέθοδος της υδραυλικής θραύσης και η μέθοδος της δειγματοληπτικής αποτόνωσης των τάσεων (overcoring).

Σε αρκετές περιπτώσεις, η αρχική εντατική κατάσταση της βραχόμαζας δεν είναι γεωστατική όπως (Καββαδάς, 2000):

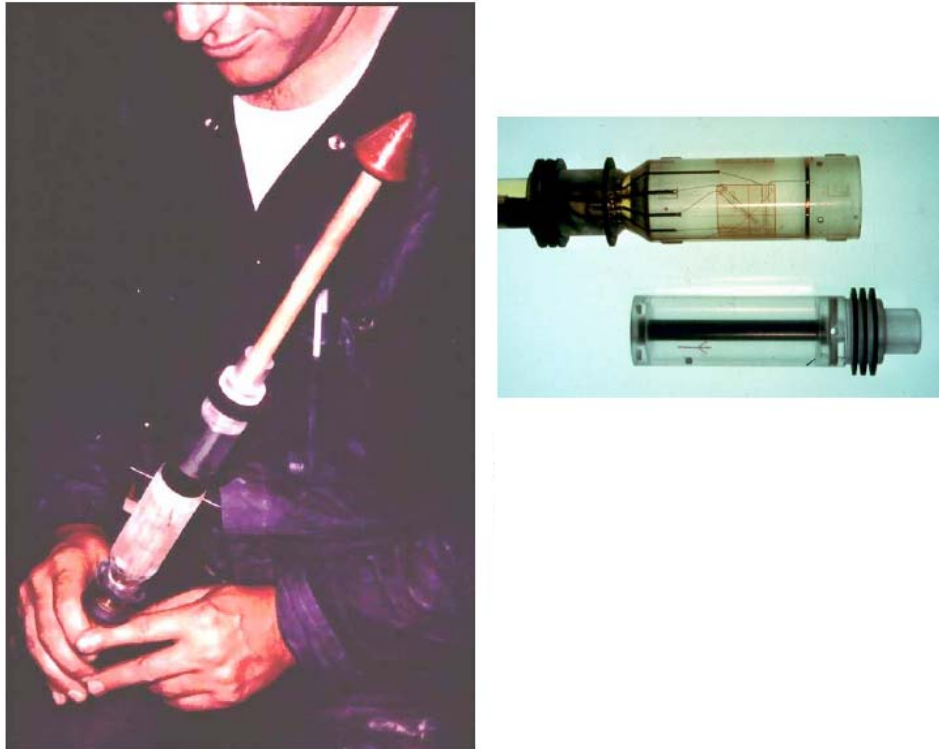
1. Κοντά στην επιφάνεια εδαφικών πρανών. Στην περίπτωση αυτή οι κύριες τάσεις δεν είναι κατά τον κατακόρυφο και οριζόντιο άξονα λόγω των διατμητικών τάσεων που οφείλονται στην κλίση της επιφάνειας του εδάφους.
2. Σε μεγάλα βάθη, εφόσον το καθεστώς των τεκτονικών τάσεων δεν ακολουθεί την κατακόρυφη και οριζόντια διεύθυνση.
3. Σε έντονα ανισότροπους σχηματισμούς (π.χ. σχηματισμούς με έντονη στρωσιγένεια) εφόσον οι κύριες διευθύνσεις της ανισοτροπίας δεν συμπίπτουν με την κατακόρυφη ή την οριζόντια.

Η ευστάθεια υπογείων ανοιγμάτων εξαρτάται από την αντοχή της περιβάλλουσας βραχόμαζας και από τις επιφερόμενες τάσεις στο πέτρωμα. Οι επιφερόμενες αυτές τάσεις είναι συνάρτηση του σχήματος της εκσκαφής και των επιτόπου τάσεων που υπήρχαν πριν από τη δημιουργία των εκσκαφών. Τα μεγέθη των προϋπαρχουσών επιτόπου τάσεων ποικίλουν και εξαρτώνται από τη γεωλογική ιστορία της βραχόμαζας στην οποία μετρώνται. Θεωρητικές προβλέψεις των τάσεων αυτών θεωρούνται μη αξιόπιστες και γι' αυτό για τον κύριο σχεδιασμό υπογείων ανοιγμάτων είναι απαραίτητη η ακριβής μέτρηση των επιτόπου τάσεων.

Όταν δεν είναι δυνατή η υπόγεια πρόσβαση, 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. Ένα από τα όργανα που χρησιμοποιούνται για επιτόπου μετρήσεις φαίνεται στο Σχήμα 1.1 (Hoek, 2000).

1.2 Ανακατανομή τάσεων γύρω από υπόγειο άνοιγμα

Κατά την εκσκαφή ενός ανοίγματος, το εντατικό πεδίο ανακατανέμεται τοπικά και ένα νέο εντατικό πεδίο εμφανίζεται στο περιβάλλον πέτρωμα του ανοίγματος. Γνώση των μέτρων και των κατευθύνσεων των αρχικών και των επιφερόμενων μετά το άνοιγμα τάσεων είναι απαραίτητη στο σχεδιασμό υπόγειων εκσκαφών. Σε πολλές

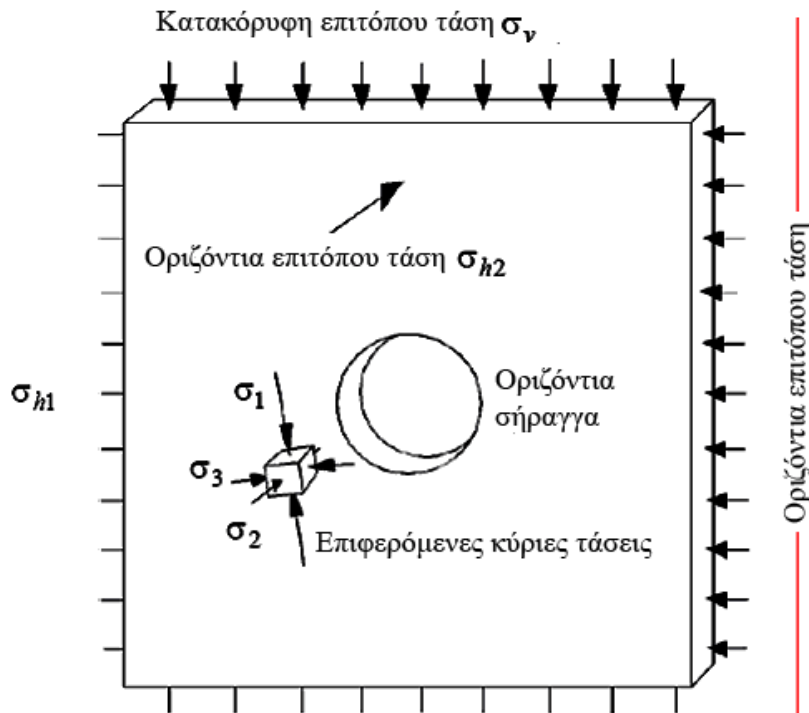


Σχήμα 1.1 Κελί για μέτρηση του επιτόπου τριαξονικού πεδίου τάσεων σε βραχώμαζα (Πηγή: Hoek, 2000)

περιπτώσεις, υπάρχει υπέρβαση της αντοχής των πετρωμάτων με συνέπεια την εμφάνιση αστάθειας, η οποία μπορεί να προκαλέσει σοβαρές συνέπειες στη συμπεριφορά των εκσκαφών.

Κατά τη διάνοιξη ενός υπογείου ανοίγματος σε βραχώμαζα που είναι ήδη υπό τάση, οι τάσεις γύρω από το άνοιγμα ανακατανέμονται. Το δευτερογενές τασικό πεδίο που είναι το νέο πεδίο, γίνεται δυσμενέστερο (πολύ πιο δυσμενές από αυτό στο οποίο θα οδηγούσε η εφαρμογή μεγάλων εξωτερικών φορτίων). Οι μεταβολές είναι έντονες στην περιοχή που γειτνιάζει με την εκσκαφή. Η κατάσταση γίνεται χειρότερη στο όριο της εκσκαφής και οι πλέον δυσμενείς συνθήκες επικρατούν στα τοιχώματα.

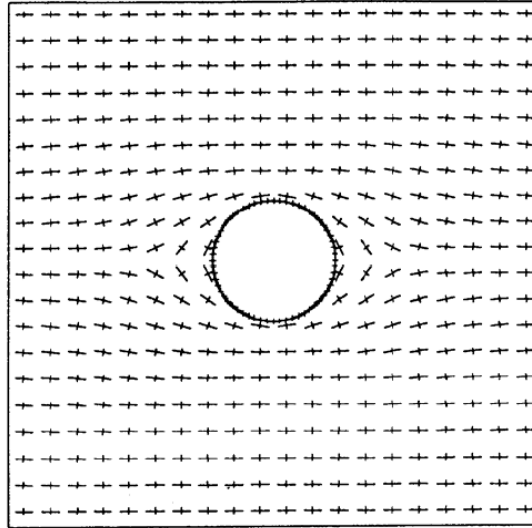
Πριν την εκσκαφή της σήραγγας οι επιτόπου τάσεις σ_v (κατακόρυφη τάση), σ_{h1} (οριζόντια επιτόπου τάση σε επίπεδο κάθετο στον άξονα της σήραγγας) και σ_{h2} (οριζόντια επιτόπου τάση σε επίπεδο παράλληλο με τον άξονα της σήραγγας) κατανέμονται ομοιόμορφα στο τμήμα του πετρώματος που έχει θεωρηθεί (Σχήμα 1.2). Μετά την απομάκρυνση του πετρώματος για τη δημιουργία του ανοίγματος, οι τάσεις γύρω από τη σήραγγα αλλάζουν και προκύπτουν νέες τάσεις. Στο Σχήμα 1.2 φαίνονται οι επιφερόμενες κύριες τάσεις στο περιβάλλον πέτρωμα σε μια κατακόρυφη τομή κάθετη στον άξονα της σήραγγας.



Σχήμα 1.2 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, 2000)

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 1.3 που δείχνει τις διευθύνσεις των κυρίων τάσεων στο πέτρωμα που περιβάλλει μια οριζόντια σήραγγα που υπόκειται σε οριζόντια επιτόπου τάση σ_{h1} ίση με $3\sigma_v$, 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.

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 βραχυδούς συμπεριφοράς γύρω από σήραγγες και φρέατα (Hoek, 2000). Οι σχέσεις που ανέπτυξε ο Kirsch (σε πολικές συντεταγμένες) δίνουν την εφαπτομενική τάση σ_θ , την ακτινική σ_r και τη διατμητική $\tau_{r\theta}$, μετά τη δημιουργία του ανοίγματος με ορισμένες παραδοχές, όπως α) ότι το πέτρωμα θεωρείται ελαστικό, ομογενές και ισότροπο, β) το άνοιγμα έχει γίνει σε αδιατάρακτο (άπειρο) μέσο, γ) το άνοιγμα έχει πολύ μεγαλύτερο μήκος από τις διαστάσεις της διατομής του, δ) το άνοιγμα βρίσκεται υπό την επίδραση ομοιόμορφου εντατικού πεδίου, ε) οι κατακόρυφες τάσεις είναι ίσες με το βάρος των υπερκειμένων



Σχήμα 1.3 Διευθύνσεις κυρίων τάσεων στο πέτρωμα που περιβάλλει μια οριζόντια σήραγγα που υπόκειται σε οριζόντια επιτόπου τάση σ_{hl} ίση με $3\sigma_v$, όπου σ_v η κατακόρυφη επιτόπου τάση (Πηγή: Hoek, 2000)

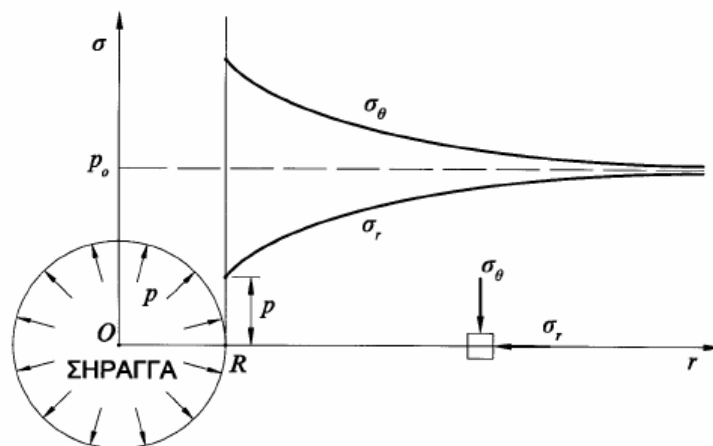
($\sigma_v = \gamma \times h$). Οι σχέσεις του Kirsch όπως αναφέρονται στους Mahtab and Grasso (1992):

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

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

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

Στο Σχήμα 1.4 δίνεται η κατανομή των εν λόγω τάσεων.



Σχήμα 1.4 Κατανομή τάσεων γύρω από κυκλική οπή. Παραδοχή γραμμικώς ελαστικού εδάφους (Πηγή: Καββαδάς, 2000)

1.3 Παραμορφώσεις κατά την προχώρηση της σήραγγας

Κατά τη διάνοιξη σηράγγων οι μετακινήσεις του εδάφους αρχίζουν σε θέσεις αρκετά εμπρός από το μέτωπο διάνοιξης, δηλαδή πριν το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας φθάσει σε κάποια συγκεκριμένη θέση. Το Σχήμα 1.5 παρουσιάζει μια τέτοια καμπύλη (ΑΒΓΔ) εξέλιξης της σύγκλισης για ανυποστήρικτη σήραγγα, σε διάγραμμα $x - u_R$ όπου (u_R) είναι η σύγκλιση της οροφής της σήραγγας και (x) είναι η απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής. Από το σχήμα φαίνεται ότι ένα σημαντικό ποσοστό της συνολικής σύγκλισης (u_{R0}), της τάξεως του 30-35% της συνολικής σύγκλισης, συμβαίνει εμπρός από το μέτωπο της σήραγγας. Στο ίδιο σχήμα φαίνεται και η αντίστοιχη καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης. Συνεπώς, σε κάθε θέση (x) κατά μήκος του άξονα της σήραγγας αντιστοιχεί μέσω της καμπύλης $x-u_R$ μια τιμή της σύγκλισης του τοιχώματος (u_R). Για τη συγκεκριμένη τιμή (u_R) αντιστοιχεί μέσω της καμπύλης σύγκλισης-αποτόνωσης μια τιμή της πίεσης (p), η οποία είναι μικρότερη από την αρχική γεωστατική πίεση (p_o). Η πίεση (p) ονομάζεται “ισοδύναμη εσωτερική πίεση” επειδή προκαλεί την ίδια σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας με αυτήν που συμβαίνει σε απόσταση (x) από το μέτωπο της σήραγγας. Σημειώνεται ότι 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.

Η συσχέτιση της σύγκλισης (u_R) του τοιχώματος της σήραγγας με την απόσταση (x) από το μέτωπο εκσκαφής είναι πολύ χρήσιμη γιατί επιτρέπει την εκτίμηση της σύγκλισης του τοιχώματος της σήραγγας που έχει συμβεί πριν από την εφαρμογή της προσωρινής υποστήριξης. Σημειώνεται ότι ακόμη και στην περίπτωση όπου η προσωρινή υποστήριξη εφαρμόζεται ακριβώς στη θέση του μετώπου της σήραγγας, κάποια σύγκλιση έχει ήδη συμβεί (της τάξεως του 30-35% της συνολικής σύγκλισης). Η σύγκλιση της βραχώμαζας πριν από την εφαρμογή των μέτρων υποστήριξης συντελεί στην αποτόνωση της βραχώμαζας και τη μείωση των πιέσεων που θα ασκηθούν επί των μέτρων υποστήριξης. Κατά συνέπεια, η εκτίμηση της ως άνω σύγκλισης επηρεάζει σημαντικά το σχεδιασμό των μέτρων υποστήριξης. Στα επόμενα εκτιμάται η σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας συναρτήσει της απόστασης (x) από το μέτωπο εκσκαφής.

Η σύγκλιση $u_{R(x)}$ του τοιχώματος ανυποστήρικτης σήραγγας σε απόσταση ($x < 0$) πίσω από το μέτωπο της εκσκαφής (που βρίσκεται στη θέση $x = 0$) δίνεται από την προσεγγιστική σχέση (Panet, 1995):

$$u_R(x) = u_R(0) + [u_{R\infty} - u_R(0)] \left\{ 1 - \left[\frac{m}{m + \xi \left(\frac{-x}{R} \right)} \right]^2 \right\}$$

Όπου:

$u_{R\infty}$ = η τελική σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας σε μεγάλη απόσταση ($x = -\infty$) πίσω από το μέτωπο εκσκαφής. Η σύγκλιση αυτή μπορεί να υπολογισθεί και με αριθμητικές μεθόδους ανάλυσης της συμπεριφοράς της βραχώμαζας κατά τη διάνοιξη της σήραγγας (π.χ. την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων) για μηδενική τιμή της εσωτερικής πίεσης.

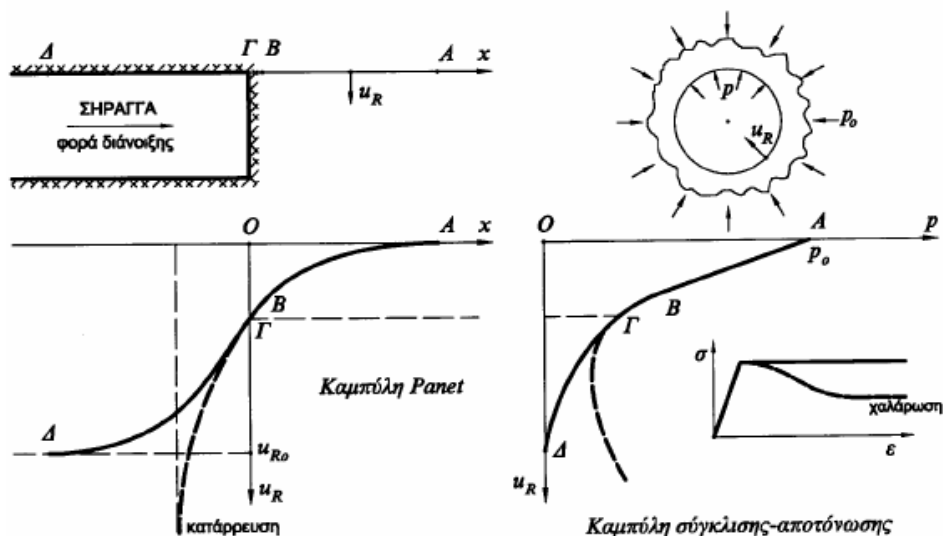
R = η ακτίνα της σήραγγας

$\xi = u_{R\infty}^e / u_{R\infty}$ = συντελεστής που ισούται με το λόγο της ελαστικής προς την ελαστοπλαστική τελική σύγκλιση

$u_{R(0)}$ = σύγκλιση του τοιχώματος στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας (θέση $x=0$)

m = συντελεστής

Οι τιμές των δύο τελευταίων συντελεστών εξαρτώνται από το συντελεστή υπερφόρτισης της βραχώμαζας $N_s = 2p_0 / \sigma_{cm}$, όπου σ_{cm} η αντοχή της βραχώμαζας σε μονοαξονική θλίψη (Καββαδάς, 2004).

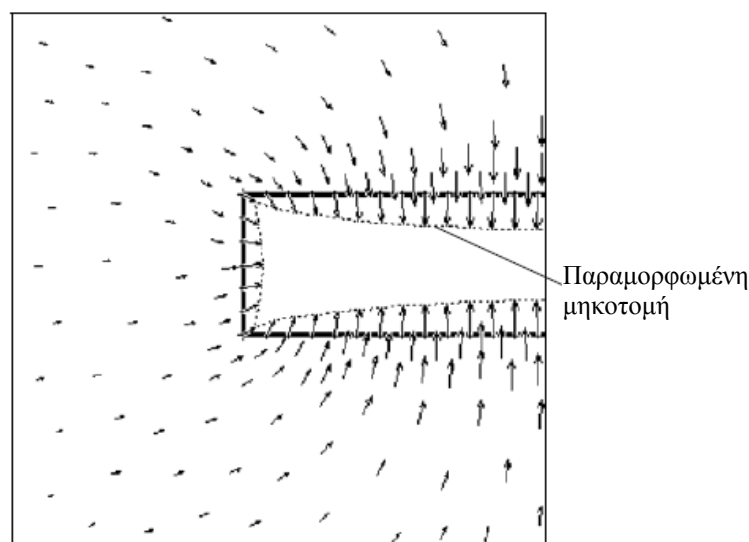


Σχήμα 1.5 Καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης και καμπύλες Panet σε ανυποστήρικτη σήραγγα (Πηγή: Καββαδάς, 2004)

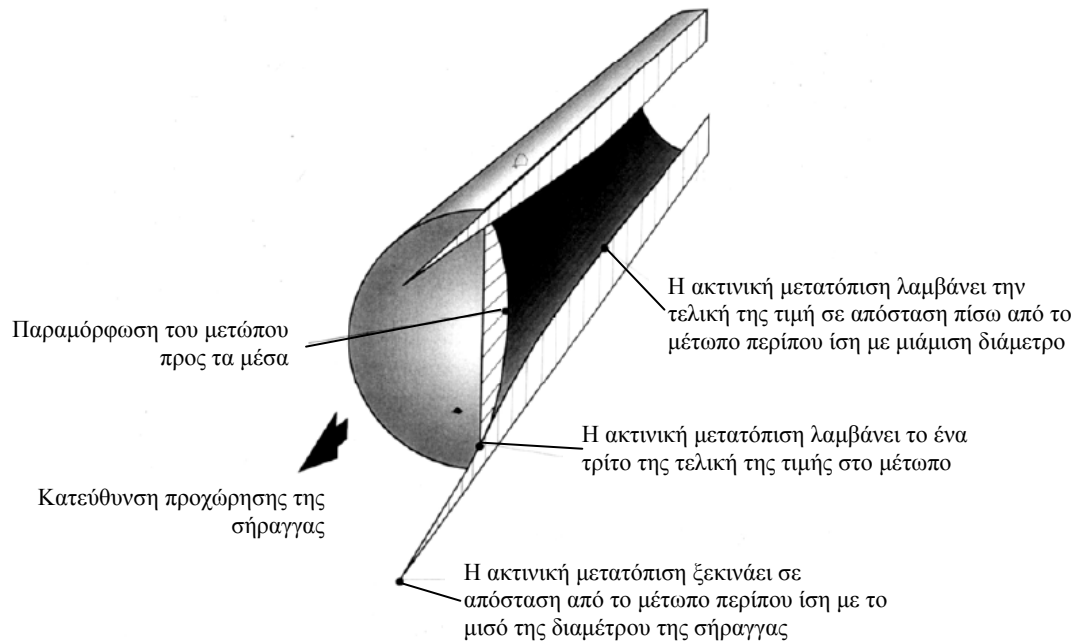
Για να υπολογιστούν οι παραμορφώσεις της βραχόμαζας που περιβάλλει μια σήραγγα χρησιμοποιείται συχνά η τρισδιάστατη ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία. Στην περίπτωση σήραγγας κυκλικής διατομής που διέρχεται από αδύναμη βραχόμαζα που υπόκειται σε ίσες τάσεις προς όλες τις διευθύνσεις, τα αποτελέσματα μιας τέτοιας τρισδιάστατης ανάλυσης δίνονται στο Σχήμα 1.6, όπου φαίνονται τα διανύσματα μετατόπισης στη βραχόμαζα και το παραμορφωμένο προφίλ της σήραγγας. Στο Σχήμα 1.7 δίνεται μια γραφική περίληψη των πιο σημαντικών χαρακτηριστικών της ανάλυσης. Η παραμόρφωση της βραχόμαζας ξεκινάει σε απόσταση από το μέτωπο περίπου ίση με το μισό της διαμέτρου της σήραγγας και φτάνει στη μέγιστη τιμή της σε απόσταση πίσω από το μέτωπο περίπου ίση με μιάμιση διάμετρο. Στη θέση του μετώπου λαμβάνει χώρα περίπου το ένα τρίτο της συνολικής ακτινικής σύγκλισης της σήραγγας και το μέτωπο παραμορφώνεται προς τα μέσα. Το αν οι παραμορφώσεις αυτές θα προκαλέσουν ή όχι προβλήματα στη σήραγγα εξαρτάται από το λόγο της αντοχής της βραχόμαζας προς το επίπεδο των επιτόπου τάσεων. Αξίζει να σημειωθεί ότι η διαδικασία παραμόρφωσης που περιγράφεται λαμβάνει χώρα απευθείας μετά την εκσκαφή του μετώπου (Hoek, 2000).

1.4 Μακροχρόνια συμπεριφορά της βραχόμαζας

Με την πάροδο του χρόνου, η βραχόμαζα που περιβάλλει ένα υπόγειο έργο υπόκειται σε ερπυστικές παραμορφώσεις με συνέπεια (Καββαδάς, 2004 από Hoek, 2000):



Σχήμα 1.6 Μηκοτομή τρισδιάστατης μοντελοποίησης με πεπερασμένα στοιχεία της αστοχίας και της παραμόρφωσης της βραχόμαζας που περιβάλλει το μέτωπο μιας κυκλικής σήραγγας σε εξέλιξη. Φαίνονται τα διανύσματα μετατόπισης και το σχήμα της παραμορφωμένης μήκοτομής της σήραγγας (Πηγή: Hoek, 2000)



Σχήμα 1.7 Σχηματική απεικόνιση της παραμόρφωσης της βραχόμαζας που περιβάλλει μια σήραγγα σε εξέλιξη (Πηγή: Hoek, 2000)

1. Την αύξηση των παραμορφώσεων της βραχόμαζας (π.χ. σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας) εφόσον οι παραμορφώσεις δεν παρεμποδίζονται από έργα υποστήριξης.
2. Την αύξηση της φόρτισης των έργων υποστήριξης στις περιπτώσεις όπου οι παραμορφώσεις της βραχόμαζας παρεμποδίζονται (π.χ. στην περίπτωση σιράγγων μετά την κατασκευή της τελικής επένδυσης).

Ο βαθμός ερπυσμού της βραχόμαζας ποικίλει μεταξύ πρακτικώς μηδέν (για βραχόμαζες με μεγάλες τιμές του δείκτη RMR) και αρκετά υψηλών τιμών (για βραχόμαζες με πτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά και εδαφικούς σχηματισμούς).

Τυπικά, ο βαθμός ερπυσμού μπορεί να περιγραφεί μέσω του ερπυστικού συντελεστή (k) ο οποίος εκφράζει τον ρυθμό της ερπυστικής παραμόρφωσης της βραχόμαζας υπό μονοαξονική θλίψη. Μια σχετικώς υψηλή τιμή του ερπυστικού συντελεστή (που αφορά κυρίως στιφρές-σκληρές αργίλους) είναι $k = 0,10$, δηλαδή η αύξηση της παραμόρφωσης ανά λογαριθμικό κύκλο του χρόνου είναι ίση με το 10% της ελαστικής (αρχικής) παραμόρφωσης. Έτσι, για παράδειγμα, εάν η αρχική (ελαστική) παραμόρφωση είναι 2%, η παραμόρφωση θα γίνει 2,2% σε ένα έτος, 2,4% εντός δέκα ετών και 2,6% εντός εκατό ετών. Στην περίπτωση παρεμπόδισης ανάπτυξης της ανωτέρω παραμόρφωσης, είναι προφανές ότι θα αυξηθεί η φόρτιση στην επένδυση της σήραγγας (Καββαδάς, 2004 από Hoek, 2000).

Το παραπάνω μοντέλο ερπυσμού της βραχώμαζας μπορεί να περιγραφεί από τη σχέση: $\varepsilon^t = k\varepsilon^e \log\left(\frac{t}{t_0}\right) \Rightarrow \varepsilon \equiv \varepsilon^e + \varepsilon^t = \varepsilon^e \left[1 + k \log\left(\frac{t}{t_0}\right)\right]$, όπου k είναι ο ερπυστικός συντελεστής, ε^t είναι η ερπυστική παραμόρφωση τη χρονική στιγμή (t), ε^e είναι η αρχική ελαστική παραμόρφωση, ε είναι η συνολική παραμόρφωση και (t_0) είναι ο χρόνος έναρξης των ερπυστικών παραμορφώσεων. Από την ανωτέρω σχέση προκύπτει ότι εάν ε_1 και ε_2 είναι οι παραμορφώσεις που αντιστοιχούν στις χρονικές στιγμές t_1 και t_2 όπου $t_2 = 10t_1$, τότε $\varepsilon_2 - \varepsilon_1 = k\varepsilon^e$, δηλαδή η αύξηση της παραμόρφωσης ανά λογαριθμικό κύκλο χρόνου είναι ένα ποσοστό (k) της ελαστικής παραμόρφωσης.

Εναλλακτικά, η ανάπτυξη ερπυστικών παραμορφώσεων μπορεί να προσομοιωθεί μέσω απομείωσης του μέτρου ελαστικότητας της βραχώμαζας σε σχέση με τη βραχυχρόνια τιμή του E_0 . E_0 είναι η τιμή του μέτρου ελαστικότητας τη χρονική στιγμή t_0 και ισούται με $E_0 = \sigma/\varepsilon_e$. Λαμβάνοντας υπόψη ότι $E = \sigma/\varepsilon$, η μειωμένη τιμή του μέτρου ελαστικότητας τη χρονική στιγμή (t) είναι:

$$E = E_0 \frac{1}{1 + k \log\left(\frac{t}{t_0}\right)}$$

Η απομείωση του ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας λόγω ερπυσμού μπορεί να φτάσει και το 30% στην περίπτωση εδαφών με έντονα ερπυστική συμπεριφορά (Καββαδάς, 2004 από Hoek, 2000).

Αυτή η ενδεχόμενη μείωση του μέτρου ελαστικότητας πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό των υπογείων έργων και την επιλογή των μέτρων υποστήριξης.

Κεφάλαιο 2

Μέθοδοι εκσκαφής οδικών σηράγγων

Στο παρόν κεφάλαιο, θα γίνει περιγραφή των σύγχρονων μεθόδων εκσκαφής οδικών σηράγγων και θα αναφερθούν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της καθεμιάς, ο απαιτούμενος εξοπλισμός, καθώς και οι συνθήκες εφαρμογής τους. Στις σύγχρονες εκσκαφές σηράγγων είναι δυνατή η επιλογή της αποδοτικότερης μεθόδου εκσκαφής μέσα από πολλές διαφορετικές μεθόδους. Οι παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την επιλογή της μεθόδου είναι οι ακόλουθοι (Heiniö, 1999):

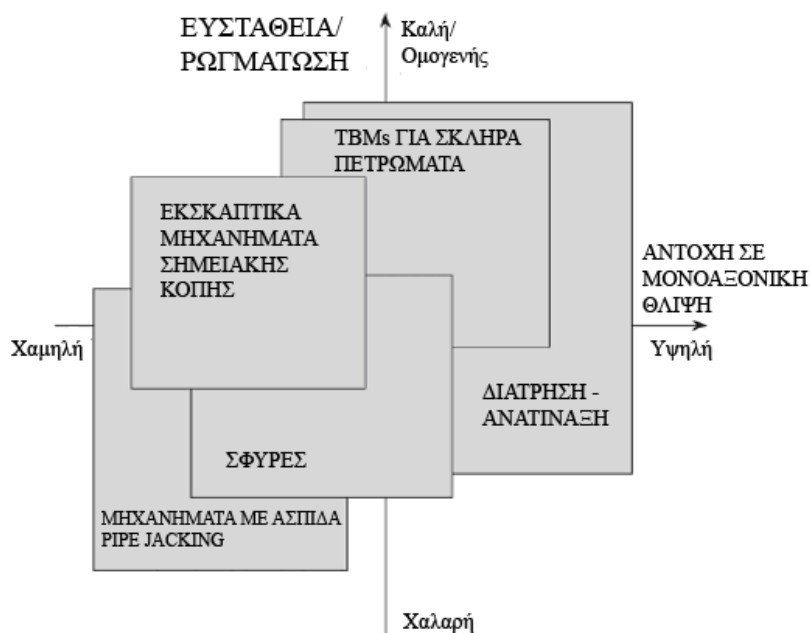
- Οι διαστάσεις των σηράγγων
- Η γεωμετρία των σηράγγων
- Το μήκος των σηράγγων και ο συνολικός όγκος εκσκαφής
- Γεωλογικές και μηχανικές ιδιότητες πετρώματος
- Επίπεδο υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα και αναμενόμενη εισροή υδάτων
- Περιορισμοί δονήσεων
- Επιτρεπόμενες καθιζήσεις επιφανείας

2.1 Εναλλακτικές κατηγοριοποιήσεις μεθόδων εκσκαφής

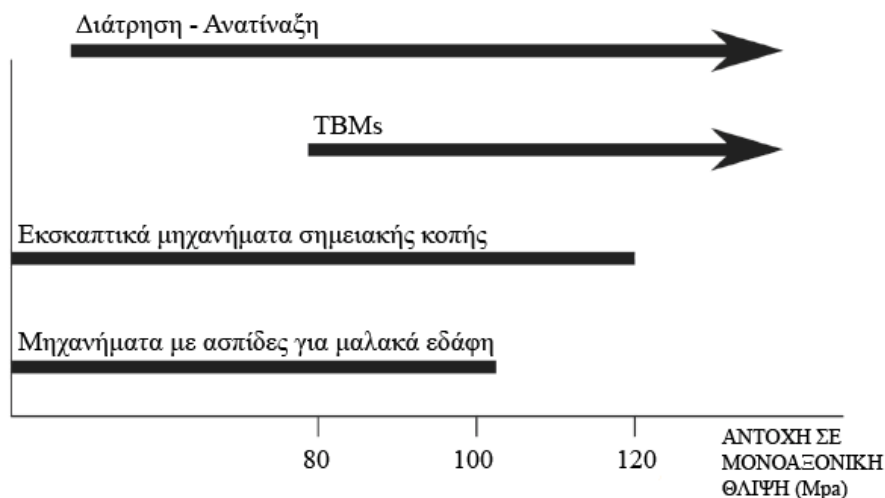
Οι μέθοδοι εκσκαφής μπορούν να χωριστούν σε διάτρηση-ανατίναξη και μηχανική εκσκαφή. Οι μηχανικές μέθοδοι μπορούν να χωριστούν περαιτέρω σε σημειακής κοπής (π.χ. roadheaders, σφύρες, εκσκαφείς) και ολομέτωπης κοπής (TBM, ασπίδα, pipe-jacking, micro tunneling). Στο Σχήμα 2.1 φαίνεται η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εκσκαφής ανάλογα με τις διαφορετικές συνθήκες που επικρατούν στη βραχύμαζα και στο Σχήμα 2.2 δίνεται το εύρος των μεθόδων ανάλογα με την αντοχή της βραχύμαζας σε μονοαξονική θλίψη (Heiniö, 1999).

Η κατηγοριοποίηση των μεθόδων μπορεί να γίνει με ποικίλους τρόπους, ανάλογα με τον παράγοντα που επιλέγεται να θεωρηθεί πρωταρχικής σημασίας για την εν λόγω διάνοιξη.

ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ



Σχήμα 2.1 Επιλογή κατάλληλης μεθόδου εκσκαφής ανάλογα με τις διαφορετικές συνθήκες πετρώματος/εδάφους (Πηγή: Heiniö, 1999).



Σχήμα 2.2 Εύρος των μεθόδων ανάλογα με την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του πετρώματος/εδάφους (Πηγή: Heiniö, 1999).

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 σιράγγων με εκτεθειμένο το μέτωπο εκσκαφής, δηλαδή χωρίς την εφαρμογή πίεσης με μηχανικά μέσα, και με υποστήριξη των τοιχωμάτων της σήραγγας με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (απλό ή οπλισμένο) ή/και αγκύρια βράχου, π.χ. μέθοδος NATM (New Austrian Tunnelling Method)
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:

α) Ανοικτού τύπου - Η διάνοιξη σιράγγων 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)

β) Κλειστού τύπου - Η διάνοιξη σιράγγων 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 (Drill and Blast)
2. Μέθοδοι μηχανικής όρυξης
 - Μέθοδοι σημειακής κοπής
 - Μέθοδοι ολομέτωπης κοπής

Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου μηχανικής όρυξης γίνεται ανάλογα με το αν εφαρμόζονται σε αυτοϋποστηριζόμενο ή μη αυτοϋποστηριζόμενο πέτρωμα. Σε

περιπτώσεις μη αυτοϋποστηριζόμενου πετρώματος συναντώνται συμπληρωματικές εφαρμογές, όπως μέθοδοι βελτίωσης βραχύμαζας ή μέθοδοι προστατευτικής ασπίδας.

2.2 Μέθοδοι εκσκαφής για κατασκευές ανοικτού τύπου

Μέθοδος κοπής και επίχωσης (cut and cover method)

Η μέθοδος κοπής και επίχωσης εντάσσεται στις μεθόδους ανοικτού τύπου (Σχήμα 2.3), όπου η εκσκαφή γίνεται από την επιφάνεια του εδάφους, θεωρείται συνήθως ως εκσκαφή τάφρων σε μαλακό έδαφος και αφορά έργα μικρού βάθους.

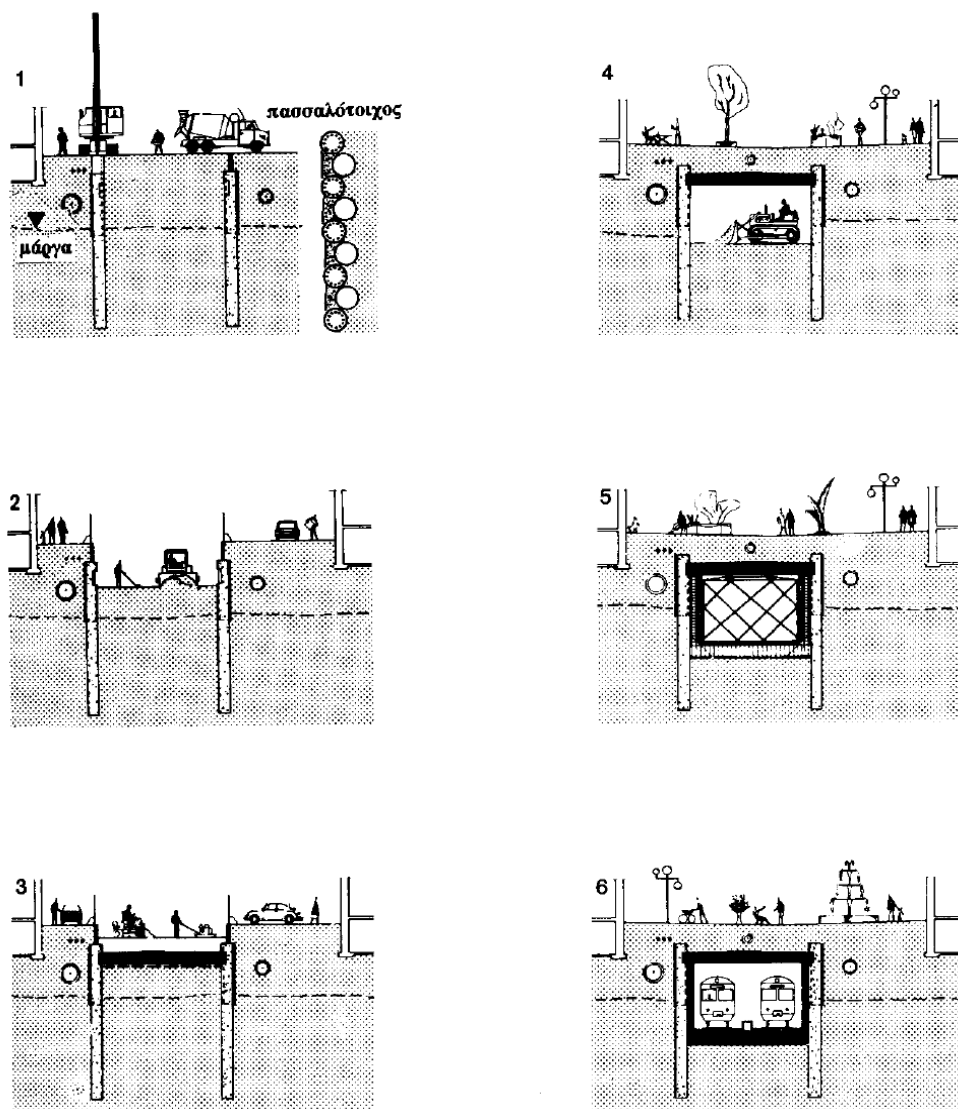
Η μέθοδος κοπής και επίχωσης εφαρμόζεται με διαφορετικό τρόπο σε ακατοίκητες σε κατοικημένες περιοχές. Στις ακατοίκητες περιοχές, δεν συναντώνται ιδιαίτερα προβλήματα κατά την εκσκαφή, η οποία πραγματοποιείται σε όλο το εύρος της, από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι και το βάθος στο οποίο θα λάβει χώρα το έργο. Δεν κρίνεται απαραίτητη η αντιστήριξη των πρανών της εκσκαφής, διότι αυτές διαμορφώνονται σύμφωνα με την κλίση που επιτρέπουν οι εκάστοτε συνθήκες του εδάφους. Τα προβλήματα παρουσιάζονται στις κατοικημένες περιοχές, τα οποία δημιουργούνται κατά την κατασκευή του έργου. Αυτά αφορούν τις επιφανειακές κατασκευές που είναι κοντινές στο έργο, τους υπόγειους αγωγούς και καλωδιώσεις, κ.ά. (Μπούνου, 2005 από Μαραγκός, 1999).

Μια περίπτωση εφαρμογής της μεθόδου κοπής και επίχωσης σε κατοικημένη περιοχή φαίνεται στο Σχήμα 2.4. Οι φάσεις που ακολουθήθηκαν περιγράφονται στη συνέχεια:

- Φάση 1: Κατασκευή των πασσάλων αντιστήριξης. Οι πάσσαλοι κατασκευάζονται με αφαίρεση του εδαφικού υλικού, μέσω γεωτρυπάνων, και έπειτα γέμισμα αυτών με σκυρόδεμα. Κάθε δεύτερος πάσσαλος είναι χωρίς σκυρόδεμα και εισχωρεί 1,5 μέτρο μέσα στη σκληρή μάργα.



Σχήμα 2.3 Διάνοιξη με Κοπή και Επίχωση (Πηγή: www.dr-sauer.com, 2004)



Σχήμα 2.4 Εφαρμογή της μεθόδου, κατά την κατασκευή έργων μετρό στην πόλη Herne της Γερμανίας (Πηγή: Μαραγκός, 1999)

- Φάση 2: Εκσκαφή μέχρι το βάθος (διάνοιξη της τάφρου), που θα κατασκευαστεί η πλάκα κάλυψης. Ακολουθεί ισοπέδωση και στρώσιμο του τσιμέντου καθαριότητας.
- Φάση 3: Σκυροδέτηση της πλάκας, γέμισμα (κλείσιμο) της τάφρου πάνω από την πλάκα και τέλος εργασίες όσον αφορά την πεζοδρόμηση και την αποκατάσταση του χώρου πάνω από την εκσκαφή.
- Φάση 4: Εκσκαφή υπό την προστασία της προαναφερθείσας πλάκας και των πασσάλων. Διάστρωση με τσιμέντο.
- Φάση 5: Κατασκευή του δαπέδου και των τοίχων της σήραγγας, με τσιμέντο ανθεκτικό στο νερό.
- Φάση 6: Ολοκλήρωση της σήραγγας.

Οι πάσσαλοι, στόχο έχουν τη στήριξη της κατασκευής, αλλά και την αποφυγή των προβλημάτων στις γειτονικές κατασκευές. Η πλάκα κάλυψης, μπορεί να είναι προσωρινή ή μόνιμη και κατασκευάζεται για την γρήγορη αποκατάσταση της κυκλοφορίας στην επιφάνεια, αλλά και για την ασφάλεια της εκσκαφής κάτω από αυτήν. Το δάπεδο της σήραγγας αποτελεί πλάκα θεμελίωσης και μέτρο προστασίας, από την εισροή νερών.

Η επιλογή του συστήματος υποστήριξης της τάφρου, μπορεί να εξαρτάται κυρίως από την ύπαρξη μικτής γεωλογίας (ανομοιομορφία εδάφους), παρά από τις εδαφολογικές συνθήκες. Οι πάσσαλοι πρόσχωσης και οι σωληνώσεις, είναι οι προτιμότερες μέθοδοι υποστήριξης. Οι πάσσαλοι πρόσχωσης πρέπει να εισχωρήσουν στο υγιές πέτρωμα για την υποστήριξη της βάσης (του ποδιού). Εάν αυτός ο τρόπος δεν είναι αξιόπιστος, τότε οι βάσεις (πόδια) των πασσάλων πρέπει να αγκυρωθούν στο υγιές πέτρωμα (Μπούνου, 2005 από Sinha, 1991).

2.3 Μέθοδοι εκσκαφής για κατασκευές 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.

2.3.1 Μέθοδοι διάτρησης-ανατίναξης

Διάτρηση – Ανατίναξη (Drill and Blast)

Η μέθοδος της διάτρησης-ανατίναξης είναι ακόμα η πιο τυπική μέθοδος για συνθήκες μεσαίου έως σκληρού πετρώματος. Κάποια από τα χαρακτηριστικά της περιλαμβάνουν ευέλικτο εξοπλισμό, γρήγορη εκκίνηση και σχετικά χαμηλό κόστος επένδυσης σε εξοπλισμό. Από την άλλη πλευρά, η κυκλική φύση της μεθόδου διάτρησης-ανατίναξης απαιτεί πολύ καλή οργάνωση στο πεδίο. Οι δονήσεις και ο θόρυβος των ανατινάξεων περιορίζει επίσης τη χρήση της μεθόδου αυτής σε αστικές περιοχές.

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

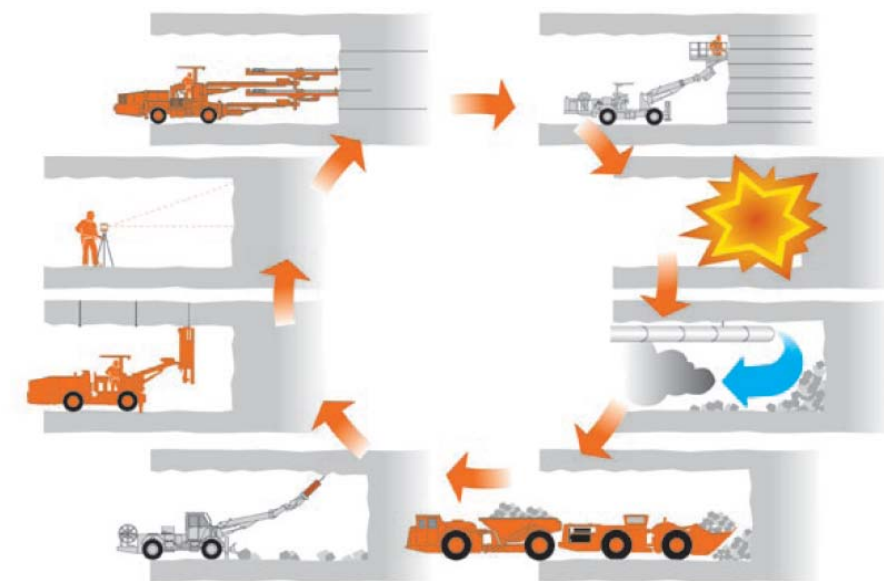
- A) Άνοιγμα διατρημάτων ανατίναξης και γόμωσή τους με εκρηκτικά
- B) Έναυση για εκτέλεση της έκρηξης, ακολουθούμενη από αερισμό για την απομάκρυνση των αερίων της έκρηξης
- Γ) Απομάκρυνση του εξορυσσόμενου πετρώματος (mucking)

Δ) Απομάκρυνση χαλαρών τμημάτων πετρώματος από τη στέψη και τα τοιχώματα (scaling)

Ε) Εγκατάσταση αρχικής υποστήριξης

Το Σχήμα 2.5 απεικονίζει τον κύκλο της μεθόδου διάτρησης – ανατίναξης.

Οι περισσότερες σήραγγες ορύσσονται με τη μέθοδο ολομέτωπης εκσκαφής, όπου όλο το μέτωπο ανατινάσσεται σε ένα γύρο. Τα διατρήματα ανατίναξης έχουν μήκος μικρότερο από τη διάσταση του ανοίγματος και η ανατίναξη επηρεάζει πέτρωμα μέχρι το 90% του μήκους των διατρημάτων. Τυπικοί γύροι είναι 2 – 4 m βάθος. Ανατίναξη του μετώπου σε φάσεις είναι μερικές φορές πιο πρακτική ή μπορεί και να απαιτείται από τις συνθήκες του εδάφους ή από περιορισμούς του εξοπλισμού. 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 υπολοίπου (bench). Το κάτω τμήμα του μετώπου (bench) μπορεί να εκσκαφτεί με οριζόντια διατρήματα ή με κατακόρυφα διατρήματα (όμοια με των επιφανειακών ανατινάξεων). Υπάρχουν κι 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



Σχήμα 2.5 Ο κύκλος της μεθόδου διάτρησης - ανατίναξης (Πηγή: Heiniö, 1999)

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.

Οι κύκλοι ανατίναξης σχεδιάζονται από κάποιον ειδικό στις ανατινάξεις. 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.

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 διατρημάτων, ούτως ώστε να απομακρυνθεί το υλικό της σφήνας και να 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 ανατινάζονται 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.

Εκρηκτικά μέσα (υλικά ή μίγματα με εκρηκτικές ιδιότητες) είναι διαθέσιμα για ειδικές περιπτώσεις. 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 (μίγμα νιτρικού αμμωνίου και πετρελαίου). Τα διατρήματα έχουν τυπικά διάμετρο 45 με 50 mm και τα φυσίγγια εκρηκτικών μέσων είναι συνήθως διαμέτρου 40 mm. Τα κενά διατρήματα είναι μικρότερης, ίσης ή και μεγαλύτερης διαμέτρου.

Δύο παράμετροι υπολογίζονται συνήθως σε ένα σχεδιασμό ανατίναξης: το ειδικό φορτίο (kg εκρηκτικών ανά κυβικό μέτρο εξορυσσόμενου πετρώματος και ο παράγοντας διάτρησης (συνολικό μήκος διατρημάτων ανά όγκο εξορυσσόμενου

πετρώματος). Αυτές οι παράμετροι είναι δείκτες της οικονομίας της ανατίναξης και επιτρέπουν εύκολη σύγκριση μεταξύ σχεδιασμών ανατίναξης. Το ειδικό φορτίο 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 ειδικού φορτίου είναι $0,6 - 5 \text{ kg/m}^3$ (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 βραχώμαζας). Τυπικές τιμές του παράγοντα διάτρησης κυμαίνονται από $0,8 - 6 \text{ m/m}^3$. Η ιδανική ανατίναξη πρέπει να καταλήγει στην ελάχιστη βλάβη στο εναπομένον πέτρωμα και στην ελάχιστη υπερεκσκαφή (overbreak). Κάτι τέτοιο επιτυγχάνεται με ελεγχόμενη ανατίναξη. Η ελεγχόμενη ανατίναξη δύναται να επιτευχθεί με μικρότερες αποστάσεις μεταξύ των κενών διατρημάτων, με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο αριθμός των απαιτούμενων διατρημάτων. Κλειδί για επιτυχημένη ελεγχόμενη ανατίναξη αποτελεί η ακριβής διάτρηση των διατρημάτων, καθώς αποκλίσεις τους από τον αρχικό σχεδιασμό οδηγεί σε διαφορετικές μεταξύ τους αποστάσεις που προκαλούν ακανόνιστες επιφάνειες. Ενδεικτικά αναφέρονται κάποια πλεονεκτήματα:

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

Για να εκτιμηθεί η ποιότητα της ανατίναξης υπάρχουν μέθοδοι για εκτίμηση του βάθους της βλάβης που προκαλεί η ανατίναξη πίσω από το μέτωπο, όπως τεχνικές σεισμικής ανάκλασης και μετρήσεις διαπερατότητας σε πυρήνες. Το βάθος της διαταραγμένης ζώνης κυμαίνεται από $0,1 - 0,2 \text{ m}$ με εξαιρετικά ελεγχόμενη ανατίναξη και ξεπερνά τα 2 m με μη ελεγχόμενη ανατίναξη.

Οι δονήσεις που προκαλεί η ανατίναξη διαδίδονται μέσω της βραχώμαζας. Εάν οι δονήσεις είναι αρκετά έντονες προκαλούν βλάβες στο πέτρωμα ή σε φρέσκο σκυρόδεμα και δεν είναι αποδεκτές από τον άνθρωπο. Ο άνθρωπος παρουσιάζει μεγαλύτερη ευαισθησία στις δονήσεις από ότι οι προϋπάρχουσες κατασκευές. Έλεγχος των δονήσεων είναι απαραίτητος σε αστικές περιοχές.

Η απομάκρυνση του εξορυσσόμενου πετρώματος (mucking) απαιτεί εξοπλισμό φόρτωσης και μεταφοράς, ο οποίος μπορεί να είναι με σιδηροτροχιές (βαγόνια σε σήραγγες μεγάλου μήκους) ή χωρίς σιδηροτροχιές (λαστιχένιοι τροχοί σε σήραγγες μικρού μήκους) ή ταινιόδρομοι. Σε σήραγγες μεγάλου μήκους πρέπει να υπάρχει χώρος για να διέρχονται βαγόνια ή οχήματα. Λόγω της κυκλικής φύσης της εκσκαφής με ανατίναξη, μεγάλη απόδοση μπορεί να επιτευχθεί αν πλήρωμα και εξοπλισμός μπορούν να δουλεύουν σε δύο ή περισσότερα μέτωπα ταυτόχρονα. Η ιδανική ανατίναξη καταλήγει σε τέτοια θραύση του πετρώματος, ώστε να είναι λίγα τα μεγάλα κομμάτια που είναι δύσκολα στο χειρισμό. Παρ'ολ'αυτά μεγάλες ποσότητες λεπτόκοκκου υλικού σημαίνει σπατάλη της ενέργειας των εκρηκτικών.

Ένα σημαντικό στοιχείο της εκσκαφής με ανατίναξη είναι η διαδικασία απομάκρυνσης των επισφαλών όγκων μετά την ανατίναξη (scaling). Η ανατίναξη συνήθως αφήνει θραύσματα ή μεγάλα κομμάτια πετρώματος χαλαρωμένα, αλλά παραμένοντα στις αρχικές τους θέσεις. Αυτά ενδέχεται να πέσουν μετά από κάποιο χρονικό διάστημα, θέτοντας σε κίνδυνο το προσωπικό. Επίσης, χαλαρό πέτρωμα το οποίο δε θα απομακρυνθεί από τη θέση του θα προκαλέσει ανομοιόμορφα φορτία στη μόνιμη υποστήριξη. Οι επισφαλείς αυτοί όγκοι απομακρύνονται από το προσωπικό με χρήση ξεσκαρωτή. Η διαδικασία αυτή είναι επικίνδυνη και απαιτεί εμπειρία (USACE, 1997).

2.3.2 Μέθοδοι μηχανικής όρυξης

Οι μέθοδοι μηχανικής όρυξης διακρίνονται σε σημειακής κοπής (π.χ. εκσκαφή με εκσκαπτικά μηχανήματα σημειακής κοπής, σφύρες, εκσκαφείς) και ολομέτωπης κοπής (TBMs, μικροσήραγγες, κλπ). Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου μηχανικής όρυξης εξαρτάται κυρίως από τον τύπο της βραχομάζας. Στην παράγραφο αυτή οι μέθοδοι μηχανικής όρυξης κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το αν χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές σε αυτοϋποστηριζόμενη ή μη αυτοϋποστηριζόμενη βραχομάζα. Αξίζει στο σημείο αυτό να αναφερθεί ότι μετά από διαδικασίες βελτίωσης της βραχομάζας ή μετά από προϋποστηρίξεις με προστατευτική ασπίδα, όταν αυτό κρίνεται απαραίτητο σε μη αυτοϋποστηριζόμενα εδάφη, δύναται να χρησιμοποιηθούν εν συνεχεία και οι μέθοδοι που προτείνονται για αυτοϋποστηριζόμενη βραχομάζα, εφόσον δεν υφίστανται πια οι περιορισμοί που τις αποκλείουν.

A. Εφαρμογές σε αυτοϋποστηριζόμενη βραχόμαζα

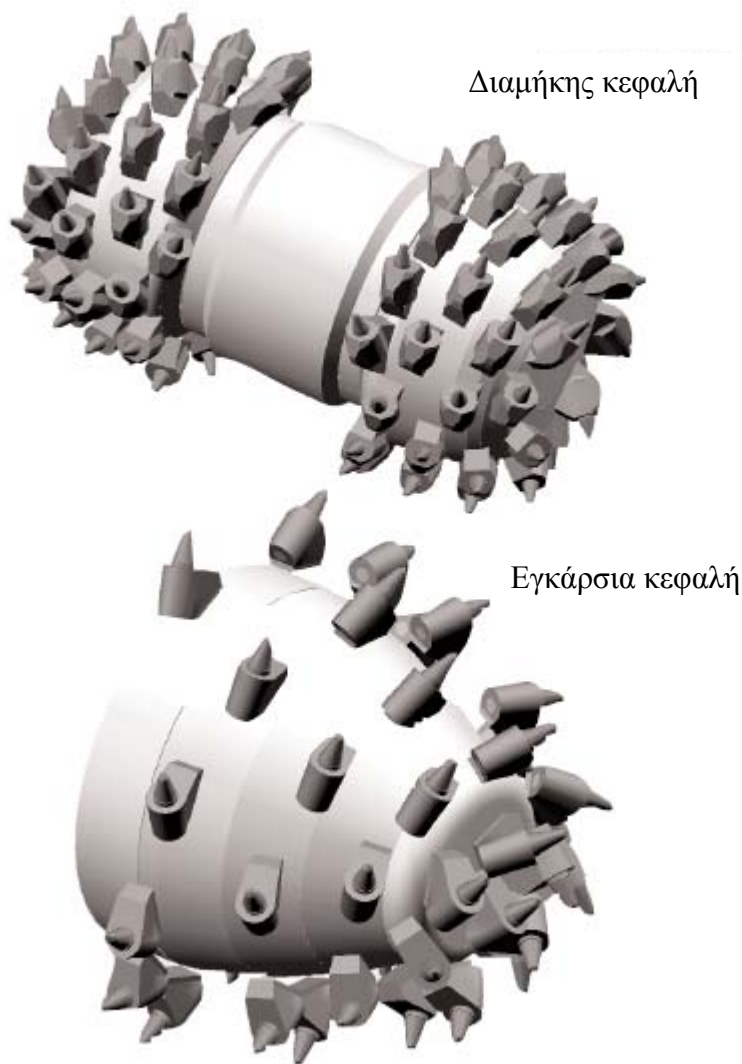
1. Μέθοδοι σημειακής κοπής

α) Εκσκαπτικό μηχάνημα σημειακής κοπής (Roadheaders)

Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για όρυξη σηράγγων σε αυτοϋποστηριζόμενη βραχόμαζα χαμηλής έως μέσης σκληρότητας. Όπου εφαρμόζεται, το εκσκαπτικό μηχάνημα σημειακής κοπής συνδυάζει τη δυνατότητα της μεθόδου διάτρησης – ανατίναξης για παραγωγή σηράγγων διαφόρων γεωμετριών και τη συνέχεια της μηχανικής εκσκαφής του μετώπου. Καθώς, σε αντίθεση με τη μέθοδο διάτρησης – ανατίναξης, δεν παράγει κραδασμούς κατά τη λειτουργία του, μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις ευαίσθητες αστικές περιοχές. Σε συνθήκες σκληρότερης βραχόμαζας, η χρήση του εκσκαπτικού μηχανήματος σημειακής κοπής περιορίζεται, λόγω μικρότερου χρόνου ζωής των χρησιμοποιούμενων εργαλείων και αυξημένου κόστους των κοπτικών εργαλείων. Τα πρώτα εκσκαπτικά μηχανήματα σημειακής κοπής χρησιμοποιήθηκαν τη δεκαετία του 1960 (Heiniö, 1999).

Τα εκσκαπτικά μηχανήματα σημειακής κοπής συναντώνται σε πολλά μεγέθη και σχήματα και είναι εξοπλισμένα για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Χρησιμοποιούνται για εκσκαφή σηράγγων με τη μέθοδο της ολομέτωπης και σημειακής κοπής, καθώς και για την εκσκαφή υπόγειων θαλάμων. Επίσης, μπορούν να κάνουν την αρχική εκσκαφή του χώρου για την τοποθέτηση μηχανήματος TBM, εκσκαφή βοηθητικών στοών και άλλων υπόγειων ανοιγμάτων οποιουδήποτε σχήματος και μεγέθους. Τα μέρη από τα οποία αποτελείται ένα τυπικό εκσκαπτικό μηχάνημα σημειακής κοπής είναι τα ακόλουθα:

- Περιστροφική κεφαλή με κοπτικά άκρα. Οι κύριες σχεδιαστικές αρχές των κεφαλών είναι δύο (Σχήμα 2.6):
 - ο Διαμήκεις, οι οποίες περιστρέφονται παράλληλα προς τον άξονα του βραχίονα
 - ο Εγκάρσιες, οι οποίες περιστρέφονται κάθετα προς τον άξονα του βραχίονα
- Υδραυλικός βραχίονας, ο οποίος κινείται κατακόρυφα, ώστε να τοποθετεί την κεφαλή στην επιθυμητή θέση
- Θωράκιο (turret), που επιτρέπει οριζόντια κίνηση στην κεφαλή
- Συσκευή φόρτωσης με βραχίονες περισυλλογής

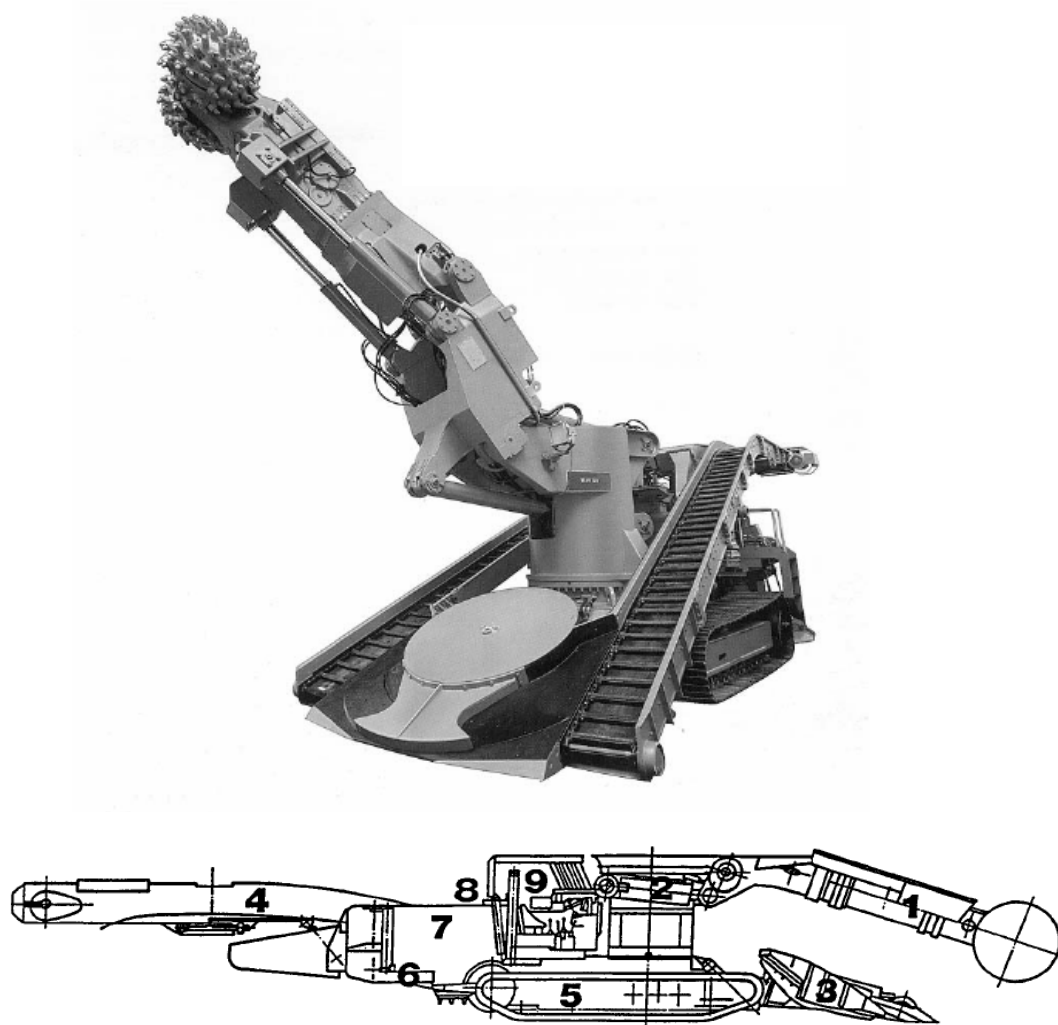


Σχήμα 2.6 Τύποι Περιστροφικών κεφαλών με κοπτικά άκρα (Πηγή: Heiniö, 1999).

- Ταινιόδρομο για τη μεταφορά του εξορυσσόμενου υλικού από τη συσκευή φόρτωσης στο πίσω τμήμα της μηχανής
- Πλαίσιο βάσης, συχνά με στηρικτικά άκρα, εφοδιασμένο με ηλεκτρικά και υδραυλικά χειριστήρια της συσκευής και καμπίνα χειριστή
- Ερπύστριες για προώθηση

Ένα τυπικό εκσκαπτικό μηχάνημα σημειακής κοπής και τα κύρια δομικά του μέρη παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.7.

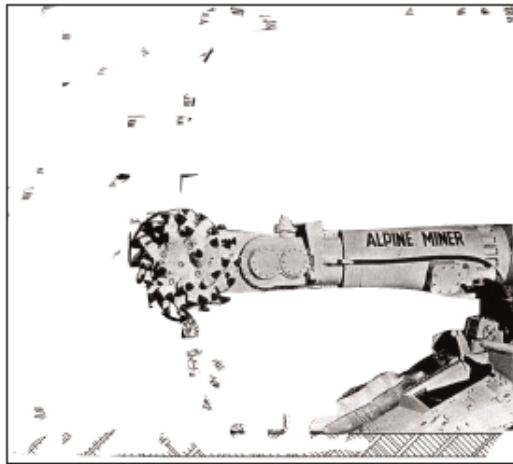
Σε αντίθεση με τα TBMs, τα οποία προσβάλλουν ταυτόχρονα ολόκληρο το μέτωπο λόγω της μόνιμης διαμόρφωσης των κοπτικών άκρων που διαθέτουν, η λειτουργία του εκσκαπτικού μηχανήματος σημειακής κοπής περιλαμβάνει διαφορετικά βήματα της διαδικασίας της εκσκαφής (Σχήμα 2.8).



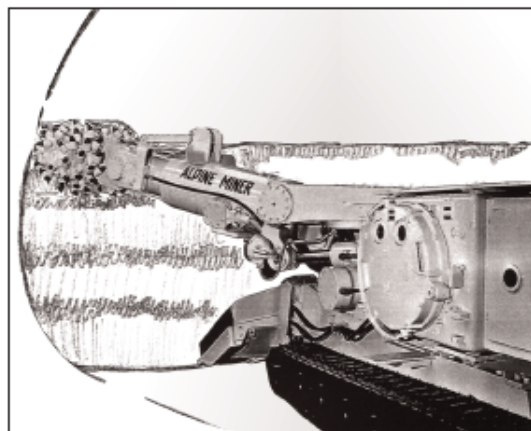
- | | |
|-----------------------|---------------------|
| 1. Κοπτικός βραχίονας | 6. Πλαίσιο βάσης |
| 2. Θωράκιο | 7. Ηλεκτρικά |
| 3. Συσκευή φόρτωσης | 8. Υδραυλικά |
| 4. Ταινιόδρομος | 9. Καμπίνα χειριστή |
| 5. Ερπύστριες | |

Σχήμα 2.7 Τυπικό εκσκαπτικό μηχάνημα σημειακής κοπής (Πηγή: Καββαδάς, 2004) και τα κύρια δομικά του μέρη (Πηγή: USACE, 1997)

Το πρώτο βήμα, η εισχώρηση της περιστροφικής κεφαλής στο μέτωπο, προκαλείται είτε από την εμπρόσθια κίνηση ολόκληρου του μηχανήματος μέσω των ερπυστριών, είτε από κίνηση του βραχίονα (αν διαθέτει αυτή την ικανότητα). Η διαδικασία εισχώρησης απαιτεί την περισσότερη ισχύ στην ακολουθία της κοπής, ωστόσο το πάτωμα δεν επηρεάζεται σχεδόν καθόλου, καθώς οι ερπύστριες δεν εμπλέκονται σε αυτή. Η εκσκαφή του μετώπου συνεχίζεται με οριζόντια μετακίνηση της κεφαλής και με κάθετη μετατόπισή της όταν φτάνει στο εξωτερικό όριο της



1. Εισχώρηση κεφαλής στο μέτωπο



2. Κοπή του μετώπου



3. Εξομάλυνση (αν απαιτείται)

Σχήμα 2.8 Τα βήματα της διαδικασίας εκσκαφής ενός μηχανήματος σημειακής κοπής (Πηγή: Heiniö, 1999)

σήραγγας. Τέλος, εάν κρίνεται απαραίτητο, ένα επιπλέον βήμα εξομάλυνσης (profiling) ελαχιστοποιεί τις πτυχώσεις της σήραγγας και τη φέρνει πλησιέστερα στο θεωρητικό της σχήμα (Heiniö, 1999).

β) Εκσκαφή με σφύρες (Hammer tunnelling)

Οι σφύρες αναπτύχθηκαν στα τέλη της δεκαετίας του 1980 και συνδυάζουν μία συνεχή μέθοδο με χαμηλό κόστος εξοπλισμού. Μεγαλύτερη διάδοση γνωρίζουν στις Μεσογειακές χώρες και στην Ιαπωνία, όπου η χρήση τους αποδείχτηκε πιο οικονομική. Δεν θέτουν περιορισμούς στη γεωμετρία του μετώπου της σήραγγας και είναι αποδοτικές σε βραχύμαζα με χαμηλή έως μέση αντοχή σε θλίψη. Σε σκληρή βραχύμαζα η χρήση τους δεν συνίσταται, λόγω περιορισμένου ρυθμού παραγωγής (Heiniö, 1999).

Σε σχέση με τη διάτρηση – ανατίναξη προτιμάται όταν ρηγματωμένες δομές βραχώμαζας δεν επιτρέπουν ελεγχόμενη ανατίναξη. Επίσης, οι κραδασμοί που μεταφέρονται στο έδαφος αντιστοιχούν στο 5 – 10% των κραδασμών 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.

Η μέθοδος εργασίας που εφαρμόζεται εξαρτάται από το μέγεθος της σήραγγας.

— Σε σήραγγες με εμβαδό διατομής από 30 – 70 m², μπορεί να χωρέσει μόνο ένας εκσκαφέας που φέρει σφύρα, οπότε η διαδικασία εξόρυξης διενεργείται στις ακόλουθες 5 διακριτές φάσεις:

- ο Εκσκαφή
- ο Μεταφορά του εξορυσσόμενου υλικού
- ο Απομάκρυνση των επισφαλών όγκων
- ο Μεταφορά του εξορυσσόμενου υλικού που προήλθε από οτς επισφαλείς όγκους
- ο Ενίσχυση και υποστήριξη των τοιχωμάτων της σήραγγας

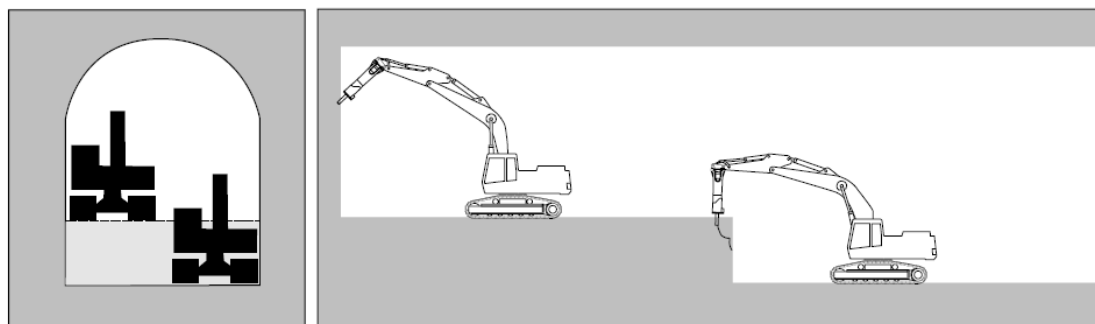
— Σε σήραγγες με εμβαδό διατομής μεγαλύτερο από 70 m², η εξόρυξη και η μεταφορά του υλικού μπορεί να γίνεται ταυτόχρονα. Αυτό μειώνει το συνολικό αριθμό φάσεων σε 2:

- ο Εκσκαφή (και απομάκρυνση των επισφαλών όγκων) και μεταφορά του εξορυσσόμενου υλικού
- ο Ενίσχυση και υποστήριξη των τοιχωμάτων της σήραγγας

Αυτό γίνεται γιατί μία σήραγγα τέτοιου μεγέθους μπορεί να φιλοξενήσει έναν εκσκαφέα με υδραυλική σφύρα, ένα φορτωτή κι ένα φορτηγό.

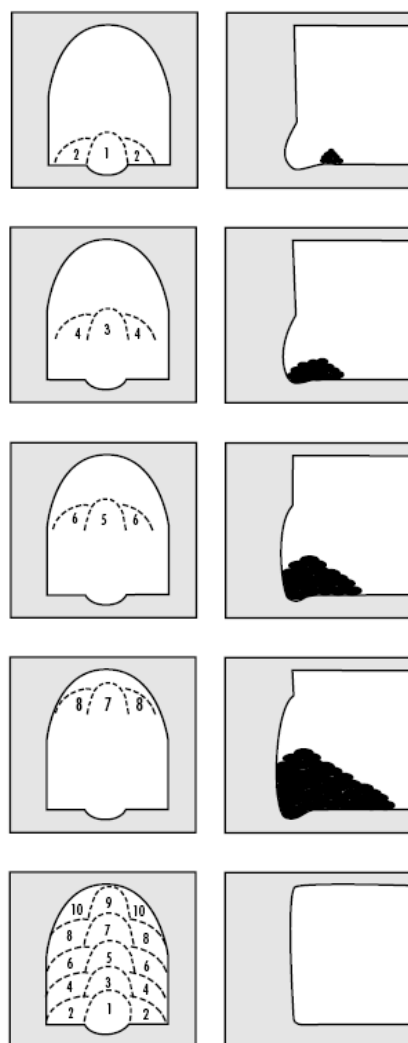
— Σε σήραγγες με ύψος μεγαλύτερο από 7 μέτρα, είναι αδύνατο ένας εκσκαφέας να εξορύξει υλικό από τόσο ψηλά και η διαδικασία γίνεται σε δύο στάδια (Σχήμα 2.9)

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



Σχήμα 2.9 Εκσκαφή σήραγγας σε δύο φάσεις με δύο σφύρες (Πηγή: Heiniö, 1999)

Η διαδικασία της εκσκαφής ξεκινά από το κέντρο της σήραγγας σε ύψος 1,0 – 1,5 m και διανοίγεται μία οπή βάθους 1,5 – 2,0 m. Η διάνοιξη συνεχίζεται στις πλευρές της οπής μέχρι τα πλευρικά τοιχώματα της σήραγγας. Όταν το στάδιο αυτό ολοκληρωθεί, η διαδικασία επαναλαμβάνεται με τον ίδιο τρόπο προς την κορυφή της σήραγγας, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.10 (Heiniö, 1999)



Σχήμα 2.10 Ακολουθία εργασιών της σφύρας (Πηγή: Heiniö, 1999)

2. Μέθοδοι ολομέτωπης κοπής

α) Μηχανές ολομέτωπης κοπής (Tunnel Boring Machines – TBMs)

Μια μηχανή ολομέτωπης κοπής αποτελείται από μηχανικά, υδραυλικά, και ηλεκτρικά μέρη που ενσωματώνονται σε μια πλήρη ενιαία μονάδα, η οποία παρέχει την ταυτόχρονη εκσκαφή και αφαίρεση στείρων από το μέτωπο. Η μηχανή αυτή αποτελεί μέρος ενός γενικού μηχανοποιημένου συστήματος εκσκαφής, που περιλαμβάνει τα υποσυστήματα που παρέχουν την ακρίβεια ευθυγράμμισης, τη μεταφορά των στείρων, την παροχή αερισμού, νερού και ισχύος στην εκμετάλλευση (utility supply), και την υποστήριξη εδάφους. Η συναρμολόγησή της διενεργείται στο μέτωπο των σηράγγων. Τα περισσότερα από τα «εφεδρικά» μέρη των υποσυστημάτων, τοποθετούνται σε πλατφόρμες, οι οποίες ρυμουλκούνται πίσω από τη μηχανή. Η απομάκρυνση των στείρων και η παροχή του εξοπλισμού, μεταφέρονται στη σήραγγα μέσω ενός φρέατος ή μιας πύλης εξόδου.

Οι μηχανές ολομέτωπης κοπής έχουν κατασκευαστεί για να κόβουν διαμέτρους από 6 έως 40 ft (2 έως 12 m). Μερικές μηχανές διεύρυνσης έχουν σχεδιαστεί για να κάνουν ένα δεύτερο-πέρασμα κοπής διαμέτρου 50 ft (15 m) από πειραματική πιλοτική (κατευθυντήρια) τρύπα διαμέτρου 10 ft (3 m). Τα μήκη των μηχανών ολομέτωπης κοπής από τη κοπτική κεφαλή έως το πίσω μέρος του δομικού πλαισίου είναι περίπου 40 έως 80 ft (12 έως 25 m), ενώ για μεγαλύτερης διαμέτρου μηχανές είναι ακόμη μακρύτερο. Η μεγάλη ακτίνα καμπυλότητας στο πρόσωπο των μηχανών, επιτρέπει το χειρισμό πιο κλειστών στροφών, για την περαιτέρω προσβολή του μετώπου εκσκαφής (Μπούνου, 2005 από Sinha, 1991).

Η πρώτη μηχανή εκσκαφής σχεδιάστηκε με σκοπό να ορύξει ένα πλήρες μέτωπο σηράγγων και αναπτύχθηκε από τον Maus στην Ιταλία το 1846. Η μέθοδος δράσης των σταθερών κοπτικών εργαλείων, ήταν κρουστική παρά περιστροφική. Ένα σχέδιο μηχανήματος, σταθερής περιστροφικής ολομέτωπου κοπής, κατοχυρώθηκε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας αρχικά το 1875 από τον Beaumont. Αυτό το σχέδιο βελτιώθηκε από τον English με πατέντα το 1880. Μηχανήματα τέτοιου τύπου επιλέχθηκαν στη δεκαετία του 1980 για να ξεκινήσουν τη διάνοιξη της σήραγγας Channel, που ενώνει την Αγγλία με τη Γαλλία και από τις δύο πλευρές τις ταυτόχρονα (Μπούνου, 2005 από Sinha, 1991).

Η εξόρυξη των πετρωμάτων με χρήση μηχανημάτων συνεχούς κοπής, διαδόθηκε περισσότερο με τη σταδιακή βελτίωση του σχεδιασμού τους. Αυτή η βελτίωση είχε

ως συνέπεια την επέκταση της εφαρμογής τους σε πετρώματα υψηλής αντοχής και σε περιπτώσεις δύσκολων γεωτεχνικών συνθηκών (π.χ. μικτής γεωλογίας) (Μπούνου, 2005 από Sinha, 1991).

Οι βελτιώσεις που έγιναν στο σχεδιασμό τους, περιλαμβάνουν:

- Βελτιωμένη σκληρότητα μετάλλων και αντοχή κόπωσης των τμημάτων των κοπτικών κεφαλών.
- Υψηλότερη ικανότητα των δίσκων του κοπτικού και μεγαλύτερες διαμέτροι των δίσκων αυτών.
- Βελτιωμένο σχέδιο διέλευσης κοπτικών για τη γρήγορη αντικατάσταση των εργαλείων.
- Αποδοτικές υδραυλικές και ηλεκτρικές μηχανές κίνησης.
- Δυναμικά συστήματα μεταφοράς που αυξάνουν την πυκνότητα ισχύος στη κοπτική κεφαλή.
- Βελτιωμένα συστήματα λίπανσης.
- Ρουλεμάν υψηλής ικανότητας και μεγάλης διάρκειας ζωής.

Οι πρόσφατα αναπτυγμένες προστατευμένες κοπτικές κεφαλές, επιτρέπουν τη χρήση των TBMs σε σπασμένο έδαφος και σε πρόσωπα μικτής γεωλογίας, όπου η εκσκαφή με TBMs παλιά θεωρούνταν αδύνατη (Μπούνου, 2005 από Sinha, 1991).

Μια μηχανή ολομέτωπης κοπής έχει τα εξής τρία ευδιάκριτα δομικά μέρη (Σχήμα 2.11):

1. την ουρά, η οποία περιέχει τους ανυψωτικούς μηχανισμούς για την εγκατάσταση της επένδυσης, την πλατφόρμα τσιμεντενέσεων (grouting platform), τα υδραυλικά συστήματα αγκυρώσεων (shove jacks), το σύστημα μεταφορέων και άλλα βοηθητικά συστήματα



Σχήμα 2.11 Μηχάνημα Ολομέτωπης Κοπής, στην πλήρη ανάπτυξή του (Πηγή: www.robbinstbm.com, 2004)

2. το σώμα, το οποίο περιέχει τις πλευρικές αγκυρώσεις, τις δαγκάνες σταθεροποίησης, την αίθουσα του χειριστή, τα υδραυλικά και ηλεκτρικά συστήματα, τις μηχανές, τις γεννήτριες, και την πλατφόρμα εργασίας και
3. την κεφαλή, η οποία είναι το περιστρεφόμενο μέρος του συστήματος, το οποίο περιέχει τον κοπτικό μηχανισμό και, όταν κρίνεται απαραίτητο έναν μηχανισμό προστατευτικών καλυμμάτων (ασπίδα – shield) (Μπούνου, 2005 από Sinha, 1991).

Οι βασικές σχεδιαστικές αρχές των μηχανών ολομέτωπης κοπής είναι δύο:

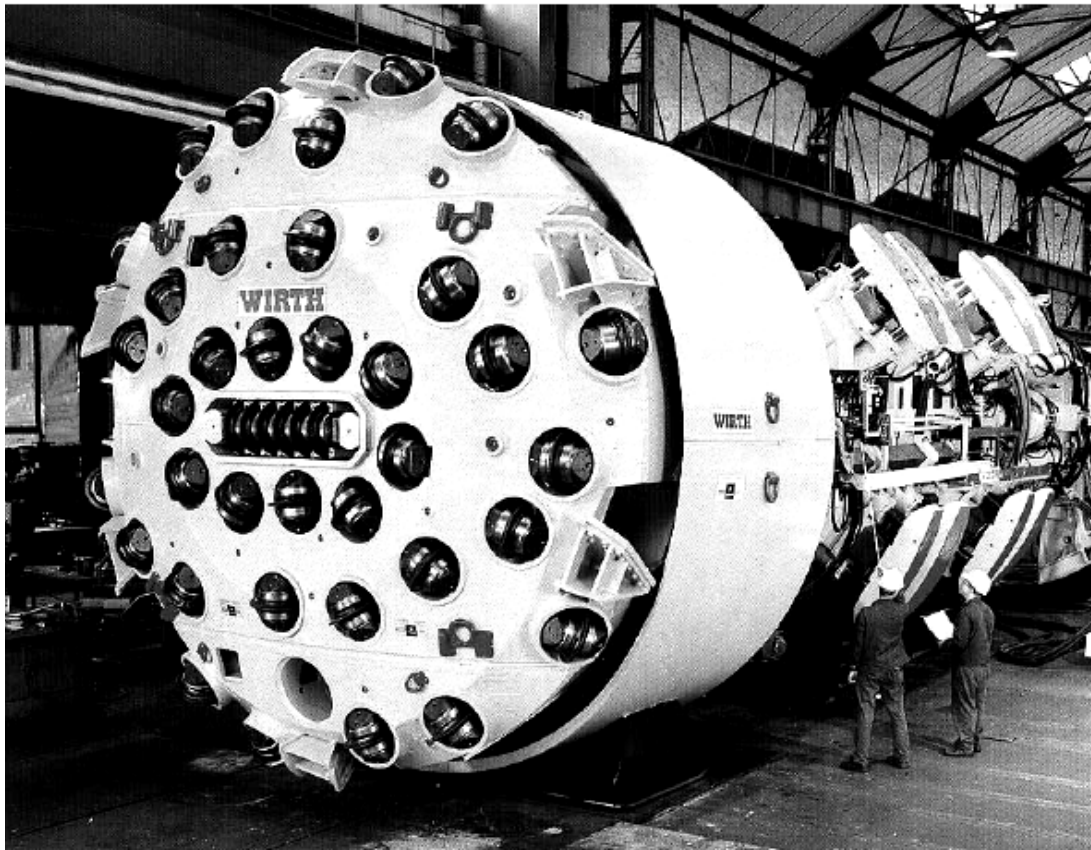
- Οι μηχανές απλού gripper
- Οι μηχανές διπλού gripper

Το gripper είναι σύστημα πλευρικής αντιστήριξης και προώθησης και είναι απαραίτητο για τη μετάδοση των δυνάμεων πρόωσης του TBM. Η διαφορά τους έγκειται στο ότι οι μηχανές απλού gripper υποστηρίζονται από ένα σύστημα πλευρικής αντιστήριξης, ενώ οι διπλού από δύο τέτοια συστήματα. Τα συστήματα αυτά διενεργούν εξ ολοκλήρου τη λειτουργία καθοδήγησης της μηχανής.

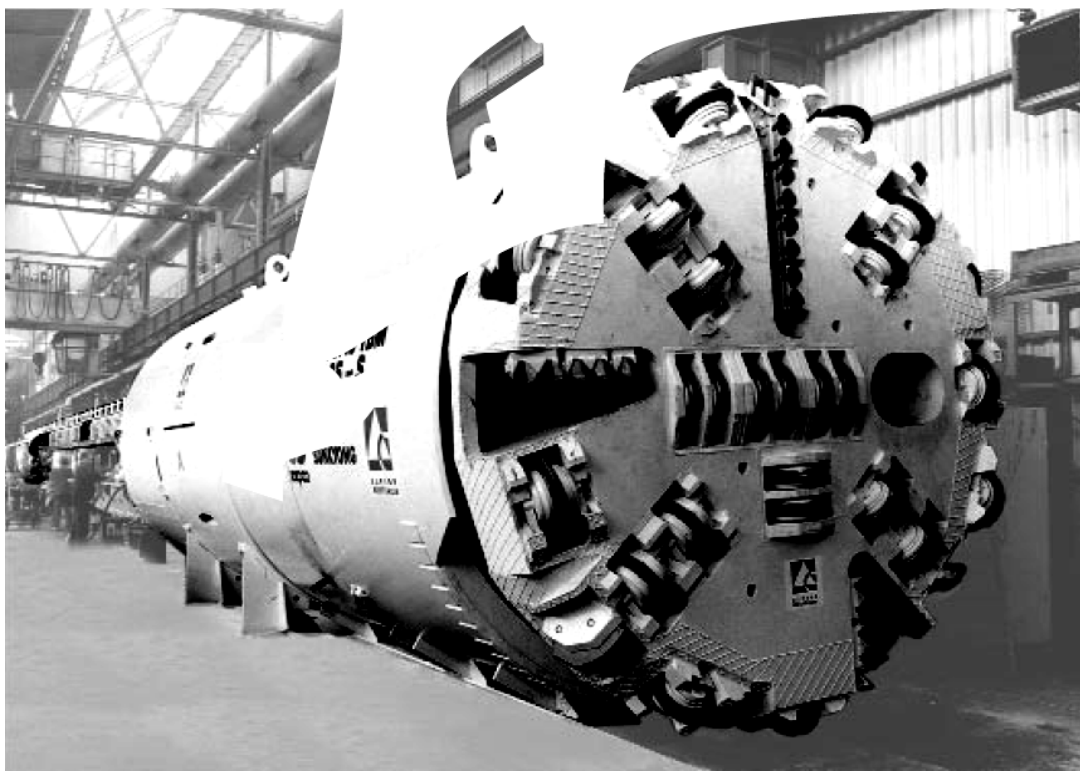
Οι μηχανές διπλού gripper έχουν τη δυνατότητα καλύτερης κατανομής των δυνάμεων στα τοιχώματα της σήραγγας όταν το έδαφος είναι ασθενές. Ωστόσο, καταλαμβάνουν αρκετό από το διαθέσιμο χώρο για εργασίες διέλευσης και σταθεροποίησης (consolidation), τουλάχιστον σε μικρότερες διαμέτρους. Επίσης, η στροφή κατά τη διάρκεια της διάτρησης είναι σχεδόν αδύνατη για τις μηχανές διπλού gripper και για το λόγο αυτό η σήραγγα που προκύπτει έχει πολυγωνικό σχήμα. Οι μηχανές που χρησιμοποιούνται συχνότερα είναι οι απλού gripper (Heiniö, 1999).

Επιπλέον, οι μηχανές ολομέτωπης κοπής διακρίνονται, ανάλογα με την ύπαρξη ή όχι καλύμματος γύρω τους, στις ακόλουθες κατηγορίες (Καββαδάς, 2004):

- Χωρίς ασπίδα ή ανοικτά (Open TBMs) (Σχήμα 2.12): Χρησιμοποιούνται σε καλής ποιότητας βραχώμαζα. Τα περισσότερα από αυτά έχουν τουλάχιστον μια μερική ασπίδα στην οροφή τους για τη προστασία των εργαζομένων έως ότου να εγκατασταθεί η υποστήριξη.
- Με μονή ασπίδα: Μια πλήρως προστατευμένη μηχανή ολομέτωπης κοπής έχει το σώμα και την ουρά, κάτω από μια ασπίδα. Συστήματα ολομέτωπης κοπής με ασπίδα χρησιμοποιούνται σε χαλαρά εδάφη και μικτό υπέδαφος και σε συνθήκες που αναμένεται υψηλή εισροή νερού (Σχήμα 2.13).
- Με διπλή (τηλεσκοπική) ασπίδα: Σε καλής ποιότητας βραχώμαζα συμπεριφέρονται όπως τα ανοικτά TBMs και η προώθηση γίνεται με τα



Σχήμα 2.12 Μηχάνημα Ολομέτωπης Κοπής χωρίς ασπίδα (Πηγή: Καββαδάς, 2000)



Σχήμα 2.13 Μηχάνημα Ολομέτωπης Κοπής με ασπίδα (Πηγή: Heiniö, 1999)

grippers, ενώ η τοποθέτηση της επένδυσης (προκατασκευασμένα στοιχεία) μπορεί να γίνεται ταυτοχρόνως με την εκσκαφή

TBMs μονής ασπίδας χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές μη αυτοϋποστηριζόμενης βραχώμαζας, ενώ τα διπλής ασπίδας, ανάλογα με τον τύπο της βραχώμαζας, συμπεριφέρονται είτε σαν ανοικτά, είτε σαν μονής ασπίδας (βλ. §2.3.2 – Β. Εφαρμογές μη αυτοϋποστηριζόμενης βραχώμαζας) (Καββαδάς, 2004).

Με λίγες εξαιρέσεις, όλες οι μηχανές διάνοιξης σιράγγων υιοθετούν τη χρήση της κρούσης και στρέψης, για να εξορύξουν το βράχο ή να απομακρύνουν το χώμα, έτσι ώστε να προωθήσουν ένα μέτωπο εκσκαφής.

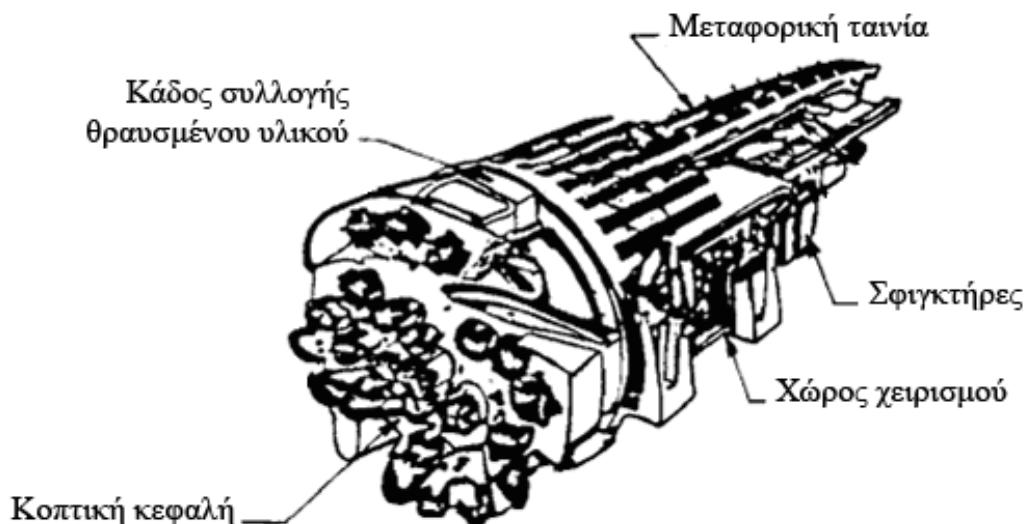
Η υδραυλική πίεση λειτουργίας για την κίνηση των κυλίνδρων, επιλέγεται από το χειριστή της μηχανής, έτσι ώστε να επιτύχει τα επιθυμητά ποσοστά διεύδυσης, χωρίς να υπερφορτωθούν οι μηχανές παροχής ροπής (Μπούνου, 2005 από Sinha, 1991).

Η θέση του χειριστή είναι αρκετά άνετη, καθώς περιλαμβάνει όλα τα απαραίτητα όργανα για το χειρισμό του TBM και κάμερες που παρακολουθούν τα σημαντικά σημεία της διαδικασίας, όπως το σημείο φόρτωσης, αλλαγή μηχανής και περιοχές κινδύνου. Όλη η πληροφορία για το χειρισμό φαίνεται σε μια οθόνη, ενώ η καταγραφή της πιο σχετικής πληροφορίας είναι δεδομένη. Η θέση του χειριστή είναι ηχομονωμένη και κλιματίζεται (Heiniö, 1999).

Στο μέτωπο της εκσκαφής η απομάκρυνση των στείρων πραγματοποιείται μέσω κάδων. Τα στείρα παραδίδονται μέσω μιας χοάνης στην κορυφή της κοπτικής κεφαλής της μηχανής (Σχήμα 2.14). Μέσω ενός αγωγού υπό κλίση, το θρυμματισμένο υλικό από την εκσκαφή εκφορτώνεται επάνω σε έναν μεταφορέα, και αυτός στη συνέχεια μεταφέρει το υλικό στο πίσω μέρος (Μπούνου, 2005 από Sinha, 1991).

Οι μεταφορείς/ταινιόδρομοι φορτώνουν το στείρο υλικό σε μία δεύτερη μεταφορική ταινία, η οποία στηρίζεται σε ένα πλαίσιο, το οποίο ρυμουλκείται πίσω από τη μηχανή. Η εν λόγω συρόμενη πλατφόρμα, μπορεί να περιέχει πρόσθετους μεταφορείς που επεκτείνονται κατά μήκος της πλατφόρμας, που σε ακραίες περιπτώσεις μπορεί να επεκταθούν περισσότερο από 150 m πίσω από τη μηχανή.

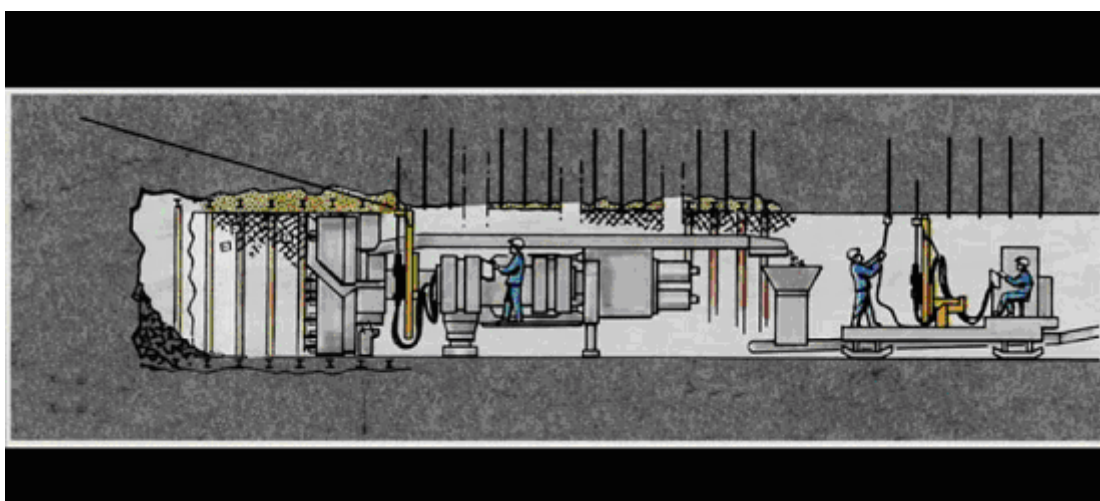
Ο αερισμός γίνεται μέσω αγωγών εξαερισμού και ανεμιστήρων, με μηχανικό ή φυσικό τρόπο, με στόχο τον καλύτερο αερισμό του χώρου, για το εργατικό προσωπικό. Οι προσπάθειες βελτίωσης στον τομέα καταστολής της σκόνης



Σχήμα 2.14 Διάταξη μηχανής ολομέτωπης κοπής, όπου διακρίνονται: 1) Κάδος συλλογής θραυσμένου υλικού (Muck bucket), 2) Μεταφορική ταινία (Belt conveyor), 3) Κοπτική κεφαλή (Cutter head), 4) Χώρος Χειρισμού (Operator control console), 5) Σφιγκτήρες (Clamp legs) (Πηγή: Μπούνου, 2005 από Sinha, 1991)

συνεχίζονται, με στόχο τις καλύτερες συνθήκες εργασίας για το προσωπικό (Μπούνου, 2005 από Sinha, 1991).

Η υποστήριξη της εκσκαφής με τη χρήση ενός συστήματος μηχανής ολομέτωπης κοπής, πραγματοποιείται από το ίδιο το σύστημα. Στην ουρά του υπάρχει ολόκληρο σύστημα, το οποίο εφαρμόζει τα απαραίτητα μέτρα υποστήριξης, ανάλογα με την περίπτωση. Δηλαδή, υπάρχει ενσωματωμένος εξοπλισμός για την εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος ή τοποθέτηση αγκυρίων (Σχήμα 2.15), όπου αυτό κρίνεται απαραίτητο. Συνολικά καθ' όλο το μήκος της, υπάρχουν πλευρικά αγκύρια και άλλα συστήματα για την πλευρική στήριξη της εκσκαφής.



Σχήμα 2.15 Τοποθέτηση αγκυρίων κατά τη διάνοιξη με μηχανή ολομέτωπης κοπής (Πηγή: www.atlascorpc.com, 2004)

Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα των μηχανών ολομέτωπης κοπής

Μερικά από τα πλεονεκτήματα των μηχανικών συστημάτων εκσκαφής, αναφέρονται κυρίως στην ταχύτητα της εκσκαφής και στην επιδίωξη βελτίωσης της ακεραιότητας της βραχομάζας κατά τη διάρκεια των διαδικασιών της εξόρυξης (Μπούνου, 2005 από Sinha, 1991).

Τα πλεονεκτήματα των εν λόγω μηχανικών συστημάτων ολομέτωπης κοπής, είναι (Μπούνου, 2005 από Sinha, 1991):

1. Επίτευξη μικρότερου χρόνου διάνοιξης, μέσω της συνεχούς λειτουργίας της μηχανής ολομέτωπης κοπής.
2. Αξιόπιστη πρόβλεψη πορείας προόδου και εφικτός ο σωστός χαρακτηρισμός των υπογείων συνθηκών.
3. Λειτουργία χωρίς έντονους κραδασμούς, επομένως σχεδόν καθόλου ανησυχία για τις εδαφικές δονήσεις.
4. Ομαλή εκσκαφή της επιφάνειας όρυξης, οπότε μειωμένο ποσοστό σκόνης, μικρότερο κόστος επένδυσης, μείωση ρίσκου όσον αφορά την εισροή νερών.
5. Ελάχιστη διαταραχή της βραχομάζας.
6. Εύκολη αποκομιδή του θρυμματισμένου υλικού (muck) και επαναχρησιμοποίηση αυτού.
7. Ασφάλεια εργαζομένων στο μέτωπο της εκσκαφής.
8. Λιγότερο προσωπικό ανά βάρδια.

Κάποια από τα μειονεκτήματα ή τους περιορισμούς, που θα πρέπει να εκτιμώνται κατά το σχεδιασμό, προγραμματισμό και κατά τη διάρκεια κατασκευής σε εκσκαφές έργων με μηχανικά συστήματα των μηχανημάτων ολομέτωπης κοπής, είναι (Μπούνου, 2005 από Sinha, 1991):

1. Το αρχικό κόστος του εξοπλισμού είναι μεγάλο.
2. Ο χρόνος παράδοσης του εξοπλισμού είναι μεγάλος.
3. Τα συστήματα αυτά χαρακτηρίζονται από μικρή ευκινησία και μεγάλη περίοδο εγκατάστασης και έναρξης λειτουργίας.
4. Οι μετατροπές στα εν λόγω μηχανήματα είναι περιορισμένης ικανότητας, σε περίπτωση αλλαγής των γεωλογικών συνθηκών.
5. Η διαδικασία δεν είναι ιδιαίτερα ευέλικτη. Σε περίπτωση διακοπής των εργασιών, το χρονικό αυτό διάστημα της διακοπής, μπορεί να αποβεί καταστρεπτικό για τον προγραμματισμό του έργου. Ο κατασκευαστής πρέπει

- να καταφέρει να διατηρήσει τη συνεχή λειτουργία της μηχανής ολομέτωπης κοπής, δεδομένου ότι ολόκληρη η διαδικασία διάνοιξης εξαρτάται από αυτή.
6. Είναι δύσκολη η εγκατάσταση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής, με αποτέλεσμα η λειτουργία της μηχανής ολομέτωπης κοπής να καθίσταται ευάλωτη, στην περίπτωση διαταραχής του εδάφους. Η άμεση πρόσβαση στο μέτωπο της βραχομάζας για τη διάνοιξη διατηρημάτων, τη τσιμεντένεση, και την προσωρινή υποστήριξη, είναι δύσκολη με τα περισσότερα μηχανήματα. (Μηχανήματα που ξεπερνούν τέτοιου είδους δυσκολίες αναφέρονται στην Παράγραφο 2.3.2 – Β. Εφαρμογές σε μη-αυτοϋποστηριζόμενη βραχώμαζα)
 7. Σε πολύ σκληρό πέτρωμα αναμένονται, μειωμένα ποσοστά διείδυσης και αύξηση των δαπανών σε κοπτικά για σκληρό και λείο πέτρωμα.
 8. Οι μεγάλοι χρόνοι κινητοποίησης και η μικρή κινητικότητα του βαρύ εξοπλισμού, καθιστούν τις διαδικασίες πάρα πολύ δαπανηρές, για μικρού μήκους σήραγγες.
 9. Δεν υπάρχει ποικιλία στη διάμετρο και στο σχήμα της εκσκαφής.

Εφαρμογές των συστημάτων ολομέτωπης κοπής

Τα συστήματα ολομέτωπης κοπής μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνθήκες σχετικά μαλακού προς σκληρού πετρώματος και καλύτερα όταν προβλέπονται ρωγματώσεις πετρώματος και ζώνες αδυναμίας. Αποτελούν την πιο οικονομική μέθοδο για μεγάλα μήκη σηράγγων, στα οποία ο υψηλός ρυθμός προχώρησης της εκσκαφής εξισορροπεί το υψηλό κόστος επένδυσης και το μεγάλο χρόνο εγκατάστασης των συστημάτων. Η μέθοδος των TBM παράγει μία ομαλή σήραγγα με χαμηλό κόστος ενίσχυσης βραχομάζας και είναι βέλτιστη όσον αφορά την αντίσταση ροής σε μεγάλου μήκους σήραγγες αερισμού ή νερού (Heiniö, 1999).

Τα συστήματα ολομέτωπης κοπής σήμερα μπορούν να σχεδιαστούν και να κατασκευαστούν έτσι ώστε να έχουν ικανοποιητική απόδοση, σχεδόν σε κάθε πιθανή γεωλογική κατάσταση.

Τα συγκεκριμένα συστήματα εκσκαφής, έχουν χρησιμοποιηθεί σε ποικιλία εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένων σηράγγων: σιδηροδρομικών, εθνικών οδών, μεταβίβασης νερού και λυμάτων, μεταλλείων και διάφορων αποθηκευτικών και άλλης χρησιμότητας χώρων.

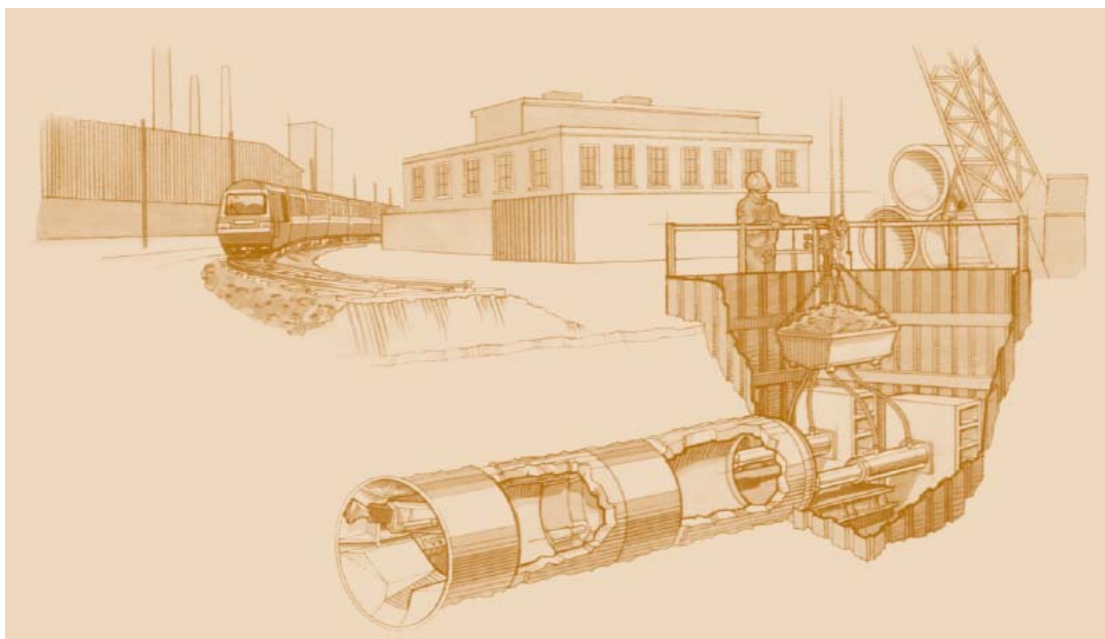
Τα συστήματα μηχανών ολομέτωπης κοπής έχουν ενσωματωθεί και σε άλλες μεθόδους εκσκαφής, όπως (Μπούνου, 2005 από Sinha, 1991):

- Εκσκαφή πιλοτικής (πειραματικής) σήραγγας με μηχανές ολομέτωπης κοπής, με την τελική διεύρυνση στο πλήρες μέγεθος, μέσω πάλι συστημάτων μηχανών ολομέτωπης κοπής ή διαδικασιών διάτρησης/ανατίναξης.
- Εκσκαφή σιράγγων κλίσης μικρής διαμέτρου, οι οποίες διανοίχτηκαν εφαπτομενικά η μια στην άλλη, κατά μήκος της περιμέτρου ενός μελλοντικού μεγαλύτερου ανοίγματος. Αυτές οι σήραγγες κλίσης γεμίζουν με σκυρόδεμα και χρησιμεύουν ως προσωρινές υποστηρίξεις, για το μελλοντικό μεγαλύτερο άνοιγμα.

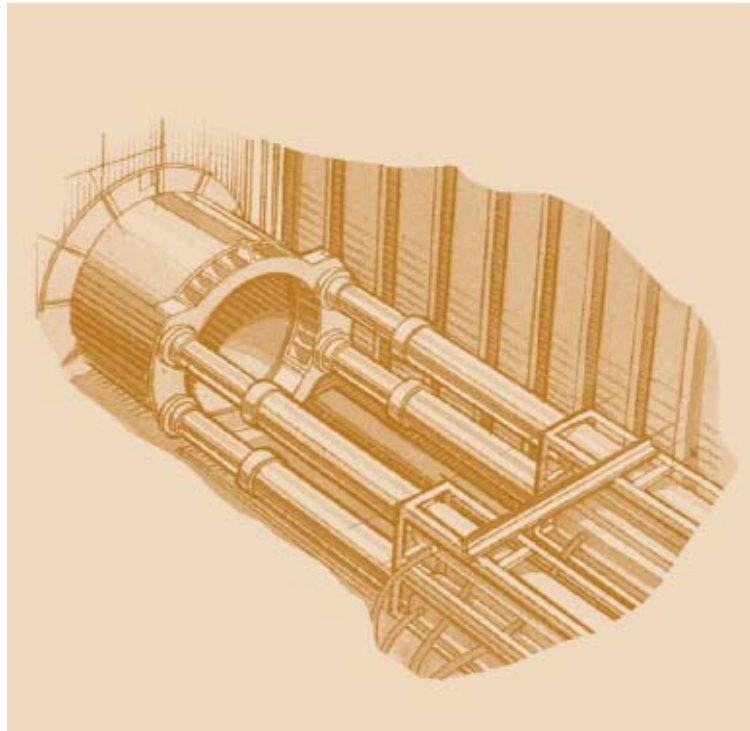
β) Μικροσήραγγες (Microtunneling)

Οι μικροσήραγγες αρχικά ορίστηκαν ως μία ειδική εφαρμογή της μεθόδου pipe-jacking σε σήραγγες μικρού μεγέθους, στις οποίες δεν μπορούν να χωρέσουν άνθρωποι. Σήμερα, ορίζεται καλύτερα ως pipe jacking που χρησιμοποιεί μια μηχανή εκσκαφής με τηλεχειριστήριο.

Με τον όρο pipe jacking περιγράφεται η αρχή της εισπίεσης άκαμπτων σωλήνων στο έδαφος μέσα σε μια σήραγγα που έχει προεκσκαφτεί. Διάταξη pipe jacking φαίνεται στο Σχήμα 2.16 και το σύστημα υδραυλικής εισπίεσης σωλήνων φαίνεται στο Σχήμα 2.17. Αρχικά, η εκσκαφή γινόταν από άνθρωπο που βρισκόταν στο μπροστινό τμήμα της σωλήνας που επρόκειτο να εγκατασταθεί. Για διάφορους λόγους, όπως την απαίτηση για εγκατάσταση σωλήνων μικρότερης διαμέτρου, λόγους ασφαλείας και τη δυνατότητα να λειτουργούν σε δυσκολότερες εδαφικές



Σχήμα 2.16 Τυπική διάταξη pipe jacking (Πηγή: www.pipjacking.org, 2007)



Σχήμα 2.17 Σύστημα υδραυλικής εισπίεσης σωλήνων (Πηγή: www.pipejacking.org, 2007)

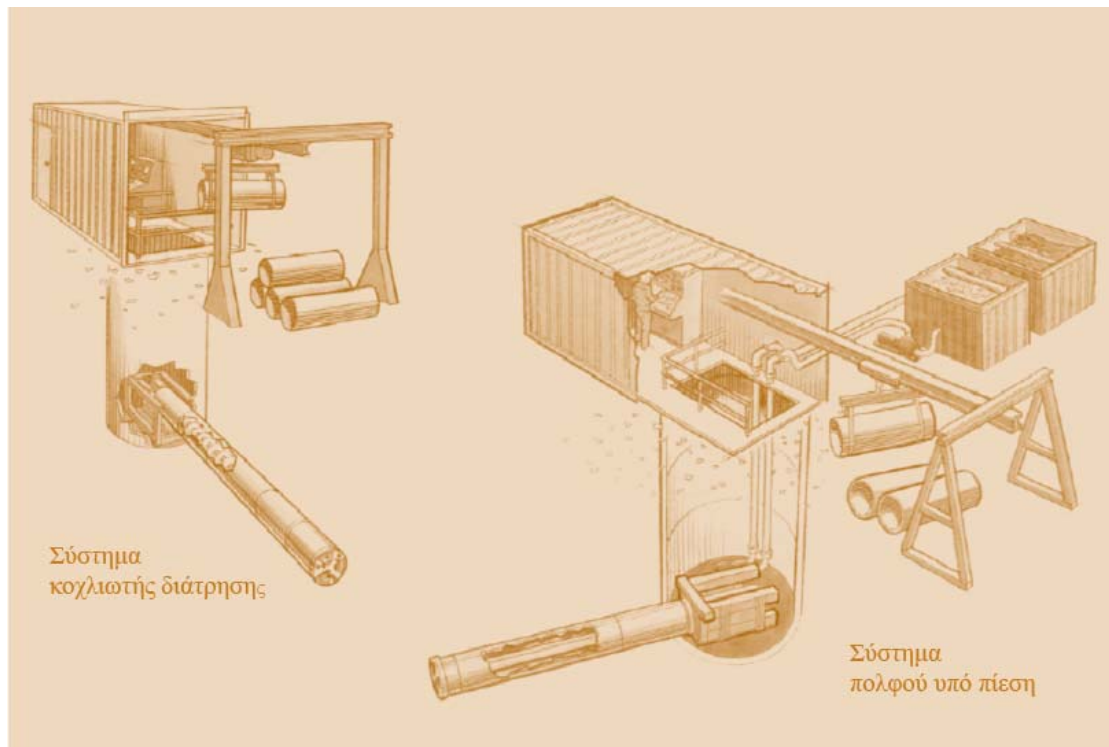
συνθήκες, μηχανικοί αποφάσισαν να αναπτύξουν μηχανοποιημένο εξοπλισμό για την αντικατάσταση του ατόμου που βρισκόταν μπροστά στη σωλήνα. Ξεκινώντας από την Ιαπωνία, οι μικροσήραγγες καθιερώθηκαν παγκοσμίως και μερικές εκατοντάδες χιλιόμετρα σωληνώσεων με μικροσήραγγες εγκαθίστανται ετησίως.

Δύο είδη τεχνικών μικροσηράγγων χρησιμοποιούνται ευρέως (Σχήμα 2.18):

1. Κοχλιωτά συστήματα διάτρησης (auger based systems), τα οποία χρησιμοποιούν μια κοπτική κεφαλή που τροφοδοτεί έναν κοχλιομεταφορέα με το προς απομάκρυνση υλικό.
2. Συστήματα πολφού (slurry systems), τα οποία χρησιμοποιούν μια κοπτική κεφαλή που εμποδίζει κάθε διείσδυση μέσω υγρών ή στερεών και απομακρύνουν το υλικό εκσκαφής από την κεφαλή με συστήματα άντλησης του πολφού.

Τα συστήματα διάτρησης έχουν τα εξής πλεονεκτήματα:

- α) Είναι απλά στην κατασκευή και οικονομικά
- β) Λειτουργούν γρηγορότερα σε ιδανικές εδαφικές συνθήκες (τυπικά αργίλους και μη κοκκώδη υλικά)
- γ) Προσφέρουν μεγάλη ευελιξία επιτρέποντας τη τοποθέτηση σωλήνων διαφορετικών διαμέτρων με την ίδια μηχανή



Σχήμα 2.18 Τεχνικές μικροσηράγγων (Πηγή: www.piperejacking.org, 2007)

Τα πλεονεκτήματα των συστημάτων πολφού είναι τα ακόλουθα:

- α) Ο σπαστήρας δίνει τη δυνατότητα για όρυξη μεγαλύτερου εύρους εδαφών
- β) Λειτουργούν ευκολότερα κάτω από υπόγεια νερά
- γ) Με χρήση ελαστικών σωλήνων, ακολουθούν καμπύλες τροχιές

Κάθε εργασία μικροσηράγγων ξεκινά με όρυξη φρέατος που καταλήγει στο βάθος που θα γίνει η σήραγγα. Αρχικά, μέσω του φρέατος εισπίζεται η μηχανή στο έδαφος και στη συνέχεια εισπίζονται σωλήνες πίσω από τη μηχανή σπρώχνοντας τη μηχανή και επενδύοντας τη σήραγγα. Η διεργασία συνεχίζεται μέχρι να φτάσει η μηχανή στο φρέαρ εξόδου.

Οι σωλήνες που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως από σκυρόδεμα, χάλυβα, άργιλο ή κεραμικά. Λόγω των φορτίων εγκατάστασης, ο σχεδιασμός των αρμών είναι κρίσιμος για τους σωλήνες. Οι σωλήνες πρέπει να είναι σχεδιασμένοι για να αντέχουν το μόνιμο φορτίο του εδάφους και τις πιέσεις εγκατάστασης (jacking pressures).

Η μηχανή εκσκαφής καθοδηγείται από το εξωτερικό της σήραγγας με τηλεχειρισμό, είτε από την επιφάνεια είτε από μια καμπίνα που βρίσκεται μέσα στο φρέαρ. Ο χειριστής ελέγχει την περιστροφή της μηχανής, τη διεύθυνση περιστροφής της κοπτικής κεφαλής, την πίεση της κοπτικής κεφαλής και τη ροπή στρέψης της, τις πιέσεις των πολφών, τον όγκο της ροής του πολφού, κινήσεις του διατρητικού

(auger), μέγεθος εισπίεσης σωλήνων (jacking), κ.α. Η ευθυγράμμιση της σήραγγας παρακολουθείται και ελέγχεται με laser ή με μεθόδους υπολογισμού δυναμικής θέσης μέσω υπολογιστή.

Οι εφαρμογές των μικροσηράγγων συναντώνται όπου δεν υπάρχει η δυνατότητα όρυξης τάφρων, όπως η εγκατάσταση σωληνώσεων σε αστικά περιβάλλοντα ή κάτω από εμπόδια (ποτάμια, λεωφόρους, σιδηροτροχιές) και σε βάθη όπου η όρυξη τάφρων δεν είναι οικονομικά συμφέρουσα ή τεχνικά δυνατή. Επομένως, η μέθοδος των μικροσηράγγων χρησιμοποιείται για την εγκατάσταση σωληνώσεων νερού, όμβριων υδάτων, φυσικού αερίου, αστικών λυμάτων, καλωδίων ηλεκτρισμού και τηλεπικοινωνιών και σωληνώσεων πετρελαίου. Επίσης, χρησιμοποιείται και για την εφαρμογή μέτρων προϋποστήριξης υπογείων εκσκαφών, όπως για παράδειγμα στη μέθοδο pipe roof.

Με τη μέθοδο αυτή είναι δυνατή η εγκατάσταση σωλήνων διαμέτρου από 200 mm έως 2500 mm. Το κόστος για την εφαρμογή της μεθόδου αυξάνει λόγω του ειδικού εξοπλισμού, της απαίτησης εξειδικευμένων χειριστών και του υψηλότερου κόστους των ειδικών σωλήνων (jacking pipes) σε σχέση με τις συμβατικές. Όμως, η εφαρμογή της σε μεγαλύτερα βάθη δεν αυξάνει το κόστος, όπως συμβαίνει με την όρυξη τάφρων, εξοικονομεί το κόστος για την επανακατασκευή των δρόμων και το κόστος των υλικών επίχωσης, καθώς και τα κόστη για τη διασφάλιση της ασφάλειας των εργαζομένων.

3. Νέα Αυστριακή Μέθοδος (New Austrian Tunnelling Method - NATM)

Η λεγόμενη «Νέα Αυστριακή Μέθοδος Διάνοιξης Σιράγγων» (New Austrian Tunnelling Method - NATM) ουσιαστικά δεν αποτελεί μια «μέθοδο» αλλά περιλαμβάνει ένα σύνολο τεχνικών διάνοιξης και υποστήριξης σιράγγων οι οποίες εφαρμόστηκαν συστηματικά κατά τη διάνοιξη σιράγγων 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.

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 μόνο με αγκύρια χωρίς εκτοξευόμενο σκυρόδεμα υπάγεται επίσης στην κατηγορία της μεθόδου NATM. Τέλος, κατά τη μέθοδο NATM η άμεση υποστήριξη συνήθως ακολουθείται σε μεταγενέστερο χρόνο από την κατασκευή της τελικής επένδυσης της σήραγγας. Σε ορισμένες περιπτώσεις δεν κατασκευάζεται τελική επένδυση αλλά η άμεση υποστήριξη σχεδιάζεται ώστε να αναλάβει το σύνολο των φορτίων της περιβάλλουσας βραχώμαζας.

Η βασική αρχή της μεθόδου NATM είναι η ενεργοποίηση και διατήρηση της εγγενούς μηχανικής αντοχής της περιβάλλουσας βραχώμαζας, ώστε να αξιοποιηθεί κατά το μέγιστο δυνατό το δυναμικό αυτοστηρίξεώς της.

Η παραπάνω αρχή της μεθόδου NATM εξειδικεύεται ως εξής:

1. Η εκσκαφή της διατομής της σήραγγας συνήθως γίνεται σε περισσότερες της μιας φάσεις. Τυπικές περιπτώσεις φαίνονται στα Σχήματα 2.19, 2.20 και 2.21. 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 βραχώμαζας.
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 βραχώμαζας. Τούτο επιτυγχάνεται με την προώθηση της κάθε φάσης εκσκαφής σε μικρά βήματα της τάξεως των 1-2 μέτρων αναλόγως της ποιότητας της βραχώμαζας.
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 βραχώμαζας. Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πλεονεκτεί ως προς την άποψη αυτή επειδή βρίσκεται σε απόλυτη επαφή με την περιβάλλουσα βραχώμαζα (και συνεπώς η παραμικρή σύγκλιση του τοιχώματος προκαλεί τη φόρτισή του) και επιπλέον

έχει μικρό χρόνο πήξεως (μερικές ώρες). Η χρήση αγκυρίων βράχου σε κανονικό κάναβο οπλίζει την περιβάλλουσα βραχώμαζα και συντελεί στην καλύτερη ανάπτυξη της λειτουργίας τόξου στη βραχώμαζα. Πράγματι, η τάση της βραχώμαζας να παραμορφωθεί διατμητικά προκαλεί (μέσω της διασταλτικότητας) την ανάπτυξη εφελκυσμού στα αγκύρια και συνεπώς θλίψης στη βραχώμαζα.

4. Σημειώνεται ότι στην περίπτωση βραχώμαζας με καλά μηχανικά χαρακτηριστικά συχνά δεν είναι απαραίτητο να ολοκληρώνεται ο δακτύλιος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, δηλαδή δεν ολοκληρώνεται ο δακτύλιος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στο σύνολο της διατομής (δηλαδή και στο δάπεδο), καθώς δεν απαιτείται να μειωθούν περαιτέρω οι συγκλίσεις του τοιχώματος.
5. 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 βραχώμαζας 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 (Καββαδάς, 2004):

1. Με βάση τα αποτελέσματα των γεωτεχνικών ερευνών η βραχώμαζα 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).
2. 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.

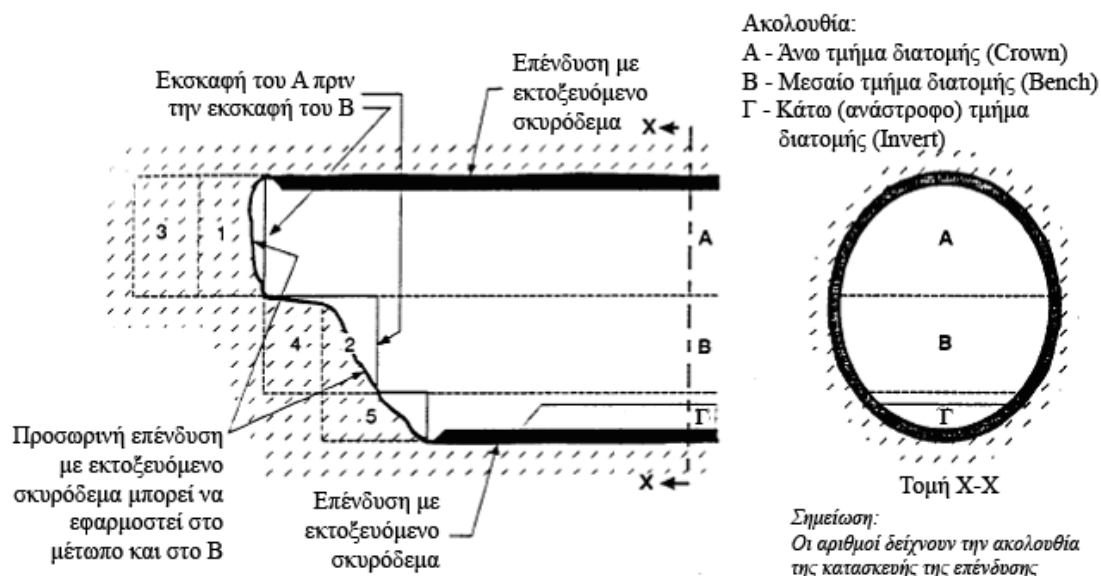
3. Διατυπώνεται ένα σύνολο κριτηρίων με βάση τα οποία θα είναι δυνατή η επιλογή της εφαρμοστέας τυπικής διατομής κατά την κατασκευή της σήραγγας. Τα κριτήρια αυτά συνήθως βασίζονται σε ένα συνδυασμό παραγόντων όπως η ποιότητα της βραχώμαζας, το πάχος των υπερκειμένων γαιών, ο προσανατολισμός των ασυνεχειών της βραχώμαζας, τα αποτελέσματα των μετρήσεων συμπεριφοράς του έργου σε προηγούμενες διατομές ή σε προηγούμενη φάση εκσκαφής στη συγκεκριμένη θέση κλπ.

Φάσεις εκσκαφής

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

1. 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 εκσκαφεί και σε περισσότερες υποφάσεις κατά το πλάτος της σήραγγας. Στην περίπτωση αυτή η πρώτη φάση ουσιαστικά αποτελεί σήραγγα-πλότο 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 2.19.



Σχήμα 2.19 Διάνοιξη σήραγγας σε τρεις φάσεις καθ' ύψος (top heading-bench-invert) (Πηγή: Καββαδάς, 2004)

2. Εκσκαφή με πλευρικές στοές (side-wall drifts).

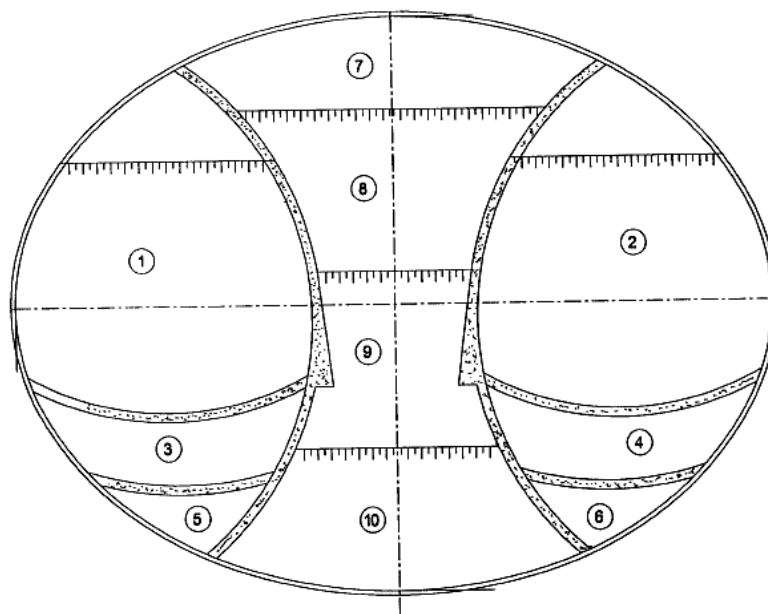
Η μέθοδος εφαρμόζεται σε σήραγγες μεγάλου εύρους σε βραχώμαζες με σχετικώς πτωχά χαρακτηριστικά ή στις περιπτώσεις όπου είναι κρίσιμος ο περιορισμός της σύγκλισης του τοιχώματος (π.χ. σε αστικές περιοχές). Περιλαμβάνει την υποδιαίρεση της διατομής κατά το πλάτος και διάνοιξη πρώτα της μιας πλευράς και στη συνέχεια της άλλης πλευράς. Σε ιδιαίτερες 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 2.20) (Καββαδάς, 2004).

3. Άλλες μέθοδοι.

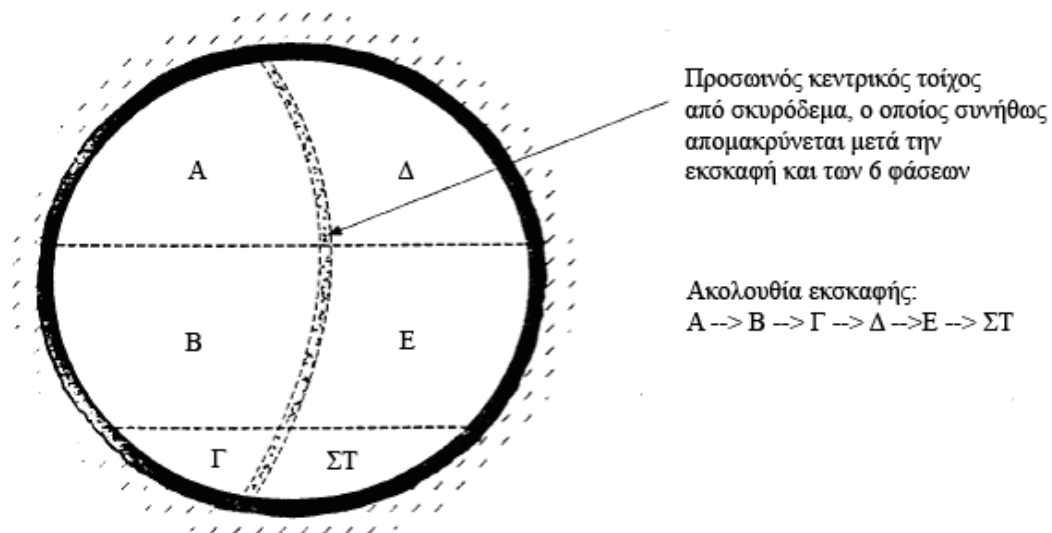
Ανάλογα με το σχήμα της διατομής, τις ιδιότητες της βραχώμαζας και τα μέτρα υποστήριξης, προσαρμόζονται ο αριθμός και οι διαστάσεις των φάσεων εκσκαφής (Σχήμα 2.21).

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου NATM σε σχέση με τις εναλλακτικές μεθόδους είναι τα εξής (Καββαδάς, 2004):

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



Σχήμα 2.20 Διάνοιξη σήραγγας με δύο πλευρικές στοές και κεντρικό πυλώνα (Πηγή: Καββαδάς, 2004)



Σχήμα 2.21 Διάνοιξη σήραγγας σε έξι φάσεις (δύο κατά πλάτος και τρεις καθ' ύψος) (Πηγή: Καββαδάς, 2004)

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

Β. Εφαρμογές σε μη αυτοϋποστηριζόμενη βραχώμαζα

1. Διαδικασίες βελτίωσης ή/και προϋποστήριξης βραχώμαζας

Η όρυξη σηράγγων είναι απαιτητική και πολύπλοκη διεργασία, ειδικά αν η όρυξη λαμβάνει χώρα σε βραχομάζα ή εδάφη με προβληματικές τιμές μηχανικών ιδιοτήτων. Ακόμα και με την επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου εκσκαφής για την κάθε περίπτωση, συχνά απαιτούνται παρεμβάσεις στη βραχομάζα με στόχο τη βελτίωσή της ή/και παρεμβάσεις για την προϋποστήριξή της πριν την όρυξη του ανοίγματος. Αυτή η διαδικασία καθιστά ευκολότερη την εφαρμογή της μεθόδου εκσκαφής και διασφαλίζει την ευστάθεια του μετώπου κατά τη διάρκεια των εργασιών. Υπάρχουν ορισμένες περιπτώσεις όπου η εφαρμογή της μεθόδου εκσκαφής είναι πρακτικά αδύνατη χωρίς να έχει προηγηθεί κάποια μέθοδος βελτίωσης των μηχανικών χαρακτηριστικών του εδάφους (ground improvement) ή/και προϋποστήριξής του (Βιόπουλος, 2006).

α) Μέθοδοι βελτίωσης βραχώμαζας

Γενικά υπάρχουν τέσσερις βασικές μέθοδοι βελτίωσης της βραχώμαζας. Αυτές είναι η ενεμάτωση με χαμηλή πίεση (grouting ή low pressure injection), η ενεμάτωση

υψηλής πίεσης (jet-grouting), η ψύξη του εδάφους (freezing) και η αποστράγγιση (dewatering ή drainage) (Βιόπουλος, 2006, από Peila and Oggeri, 2006).

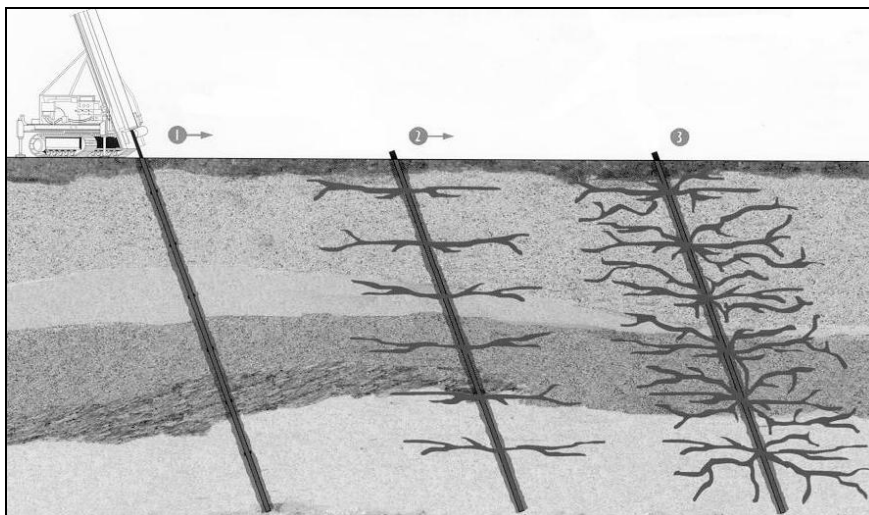
i) Ενεμάτωση με χαμηλή πίεση (grouting ή low pressure injection)

Οι σήραγγες, κατασκευάζονται για πολλούς και διαφορετικούς σκοπούς και κάτω από ένα ευρύ φάσμα γεωγραφικών και γεωλογικών συνθηκών. Στις σήραγγες δεν πρέπει να υπάρχει εισροή ύδατος από τα γειτονικά εδάφη στη σήραγγα, καθώς αυτό μπορεί να οδηγήσει στην πτώση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα σε επίπεδο πολύ χαμηλότερο του κανονικού, σε καθιζήσεις στην επιφάνεια, σε ζημιές στις υπάρχουσες κατασκευές στην επιφάνεια, σε ανικανότητα άντλησης νερού από τις υπάρχουσες γεωτρήσεις νερού, καθώς και σε άλλες ανεπιθύμητες συνέπειες (Βιόπουλος, 2006, από Atlas Corpro, 2005).

Ειδικά όταν η σήραγγα περιβάλλεται από ασταθή εδάφη ή καρστικούς σχηματισμούς, η ενεμάτωση με σκυρόδεμα είναι απαραίτητη για να σταθεροποιήσει, να βελτιώσει και να στεγανοποιήσει τα υπερκείμενα στρώματα.

Η ενεμάτωση με χαμηλή πίεση (grouting ή low pressure injection) έχει σκοπό να σταθεροποιήσει, να βελτιώσει, αλλά και να στεγανοποιήσει τα υπερκείμενα στρώματα. Τα διατρήματα που χρησιμοποιούνται έχουν μήκος 15 – 25 μέτρα και η διάμετρός τους είναι συνήθως 51 – 64 mm. Όταν η ποιότητα του εδάφους είναι χαμηλή, η διαδικασία της διάτρησης είναι δυσκολότερη ενώ η ανάγκη να διατρηθούν οριζόντια διατρήματα είναι πολύ μεγαλύτερη. Είναι επίσης ζωτικής σημασίας να γίνεται τοποθέτηση του ενέματος εκεί όπου πραγματικά απαιτείται. Όπου είναι δυνατόν, τα διατρήματα της ενεμάτωσης, θα πρέπει να γίνονται σε σωστές γωνίες σε σχέση με τις κύριες ρηγματώσεις, ούτως ώστε να επιτευχθεί όσο το δυνατόν καλύτερη πλήρωσή τους με σκυρόδεμα.

Όταν είναι γνωστό ότι η σήραγγα θα διασχίσει αδύναμα εδάφη (όπως μη συνεκτικά εδάφη ή ζώνες με κατακερματισμένα πετρώματα), με παρουσία νερού σε υψηλή πίεση, το έδαφος πρέπει να ενεματωθεί με χαμηλή πίεση έτσι ώστε να πληρωθούν τα κενά του χωρίς να αλλάξει σημαντικά η δομή του εδάφους ή ο όγκος του. Ο αρχικός σκοπός της ενεμάτωσης αυτής είναι η μείωση της διαπερατότητας του εδάφους. Η βελτίωση του εδάφους στην περίπτωση αυτή είναι συνήθως ένα παράπλευρο κέρδος. Είναι προτιμότερο η διαδικασία αυτή να γίνει (όπου αυτό βέβαια είναι δυνατόν) από την επιφάνεια του εδάφους (Σχήμα 2.22) για να αποφευχθούν χρονοβόρες διαδικασίες μέσα στη σήραγγα.



Σχήμα 2.22 Ενεμάτωση από την επιφάνεια (Πηγή: Καββαδάς, 2000)

Όταν η ενεμάτωση δεν μπορεί να γίνει από την επιφάνεια του εδάφους, γίνεται από το μέτωπο της σήραγγας, πριν όμως φτάσει η σήραγγα σε ανεπιθύμητες συνθήκες. Μια διάταξη διατρημάτων για τσιμεντενέσεις με ακτινωτό σχήμα κατασκευάζονται, μερικές ακόμα και 20 – 40 μέτρα από το μέτωπο (Σχήμα 2.23).

ii) Ενεμάτωση με υψηλή πίεση (jet grouting)

Η ενεμάτωση με υψηλή πίεση (jet grouting), διαφέρει σημαντικά από τις άλλες μεθόδους βελτίωσης εδαφών. Με τη μέθοδο αυτή, καταστρέφεται ολοκληρωτικά η δομή του εδάφους, το εδαφικό υλικό μεταφέρεται στην επιφάνεια με τη βοήθεια των εισπιεζόμενων ρευστών και έπειτα διενεργείται ανάμιξη του εδαφικού υλικού με το τσιμέντο με αποτέλεσμα τη δημιουργία ομογενοποιημένου εδάφους που στο επόμενο



Σχήμα 2.23 Τσιμεντενέσεις στο μέτωπο (Πηγή: Βιόπουλος, 2006, από Peila and Oggeri, 2006)

στάδιο, στερεοποιείται. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται ανεξάρτητα από το είδος του εδάφους, την κοκκομετρία του ή την διαπερατότητά του. Θεωρητικά η τεχνική αυτή, μπορεί να βελτιώσει τα περισσότερα εδάφη από μαλακά αργιλώδη εδάφη ως αμμώδεις χάλικες (Βιόπουλος, 2006, από Jet-grouting.com, 2005).

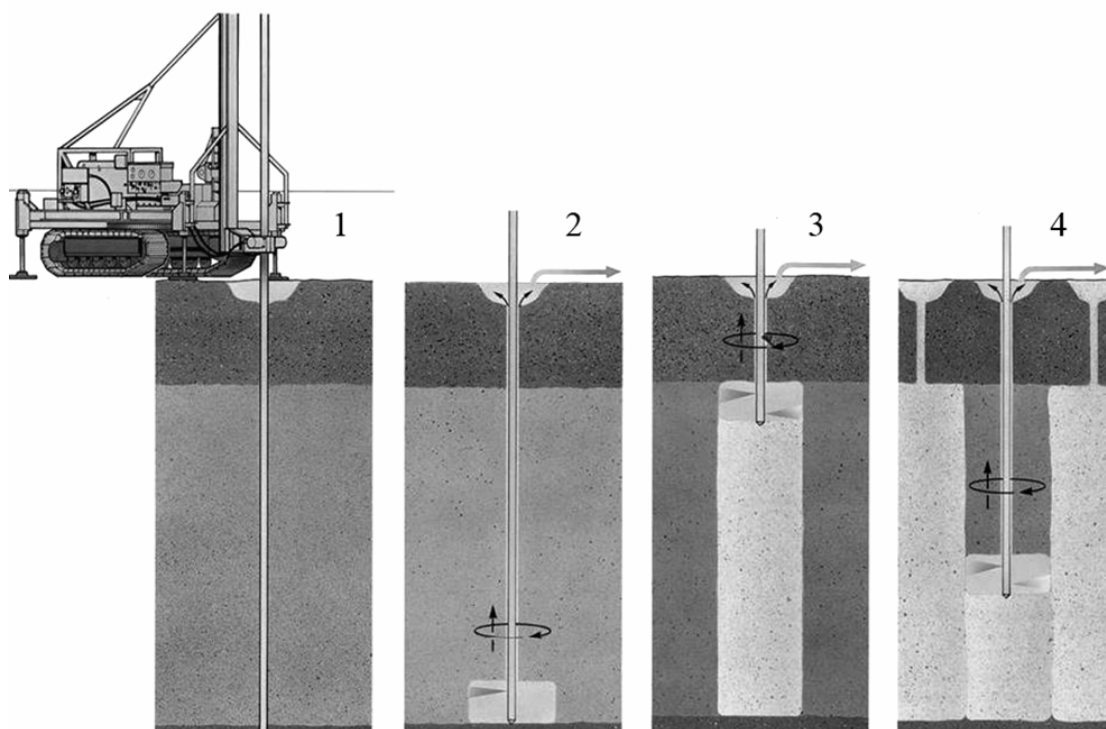
Η διαδικασία της βελτίωσης του εδάφους με τη μέθοδο της ενεμάτωσης με υψηλή πίεση, έχει ως εξής: πρώτα γίνεται διάτρηση οπής διαμέτρου 100 – 150 mm μέχρι το επιθυμητό βάθος. Έπειτα με τη βοήθεια μιας ισχυρής αντλίας υψηλής πίεσης μέσω ενός ή περισσότερων ακροφυσίων (Σχήμα 2.24) τα οποία είναι τοποθετημένα στο άκρο της διατρητικής στήλης, γίνεται ο ψεκασμός του μίγματος. Το μίγμα συνήθως αποτελείται από νερό και τσιμέντο ή σε άλλες περιπτώσεις από νερό, τσιμέντο και μπεντονίτη. Τέλος περιστρέφονται τα στελέχη και σταδιακά ανυψώνονται. Έτσι δημιουργείται μια στήλη μίγματος από εδαφικό υλικό και τσιμέντο. Η τεχνική αυτή ονομάζεται και τεχνική τσιμεντοεδαφοπασσάλων. Τα βήματα της τεχνικής φαίνονται στο Σχήμα 2.25.

Έχουν αναπτυχθεί τρία συστήματα ενεμάτωσης με υψηλή πίεση σε σχέση με τα εισπιεζόμενα ρευστά που χρησιμοποιούνται. Το πρώτο σύστημα χρησιμοποιεί ένα μόνο ρευστό, το τσιμεντένεμα, το δεύτερο σύστημα χρησιμοποιεί τρία εισπιεζόμενα ρευστά (νερό, αέρας, τσιμεντένεμα) ενώ το τρίτο σύστημα χρησιμοποιεί δύο εισπιεζόμενα ρευστά (αέρας και τσιμεντένεμα) (Βιόπουλος, 2006, από Jet-grouting.com, 2005).

Η ενεμάτωση με υψηλή πίεση, εκτός από τη βελτίωση εδαφών, χρησιμοποιείται και για άλλους σκοπούς, όπως για ανάσχεση κατολισθήσεων, για τη σταθεροποίηση



Σχήμα 2.24 Ψεκασμός μίγματος από τα ακροφύσια της διατρητικής στήλης (Πηγή: Καββαδάς, 2000)



Σχήμα 2.25 Τεχνική τσιμεντοεδαφοπασσάλων (Πηγή: Καββαδάς, 2000)

εδάφους για τη διάνοιξη σήραγγας καθώς και για την προπασσάλωση οροφής της σήραγγας (η μέθοδος αυτή αναλύεται στην Παράγραφο 2.3.2 – Β.1.β.ι).

iii) Ψύξη εδαφών (ground freezing)

Η ψύξη εδαφών (ground freezing), είναι μια πιθανή εναλλακτική λύση της ενεμάτωσης με χαμηλή πίεση (grouting), όσον αφορά τον έλεγχο της εισροής υδάτων στη σήραγγα. Η ιδέα της ψύξης εδαφών στηρίζεται στο γεγονός ότι με τον τρόπο αυτό, το νερό αποκλείεται προσωρινά από την σήραγγα μέχρι να κατασκευαστεί η τελική επένδυση της σήραγγας η οποία και θα προσφέρει μια πλήρη υδατοστεγή προστασία. Η ψύξη των υδάτων γύρω από μια σήραγγα, μπορεί να οδηγήσει επίσης σε σταθεροποίηση του εδάφους ακόμη και σε υποστήριξη της κατασκευής εάν οι εδαφικές συνθήκες είναι οι κατάλληλες (Βιόπουλος, 2006, από Harris, 1995).

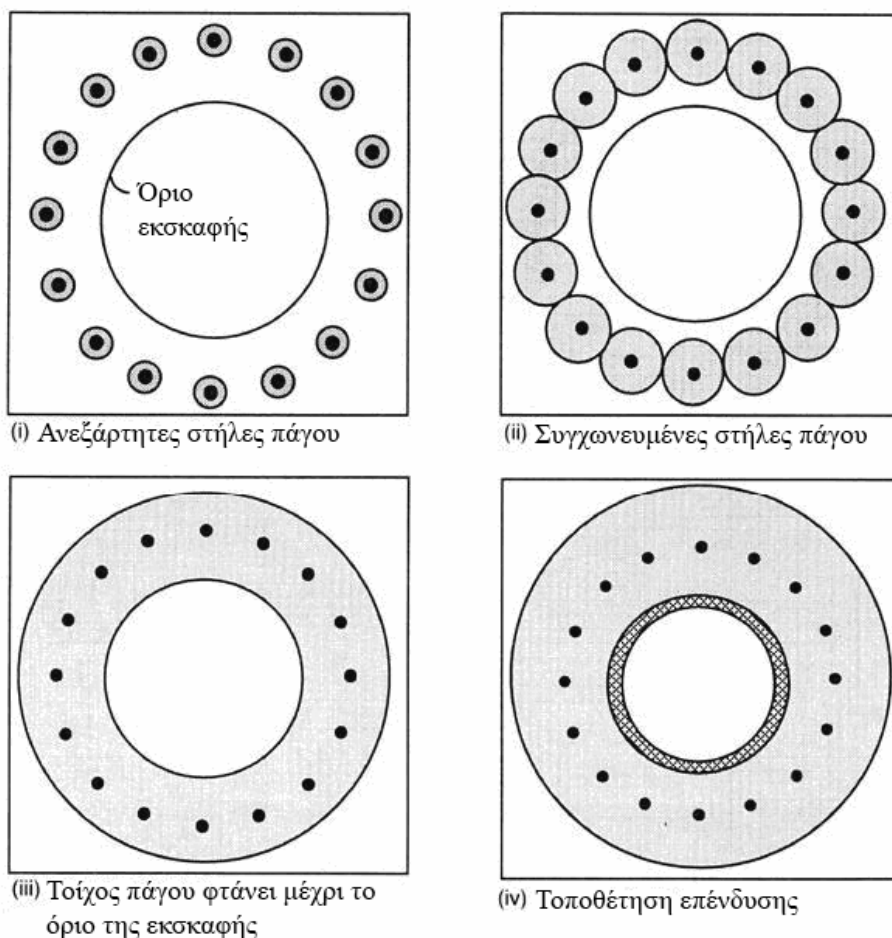
Η διαδικασία της ψύξης εδαφών, είναι παροδική και έτσι δεν επηρεάζει την ποιότητα του υδροφόρου ορίζοντα, έχει ελάχιστες περιβαλλοντικές συνέπειες και είναι ασφαλής. Η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί σε όλους τους τύπους των πετρωμάτων. Οι μόνοι περιορισμοί της μεθόδου είναι ότι η μάζα του πετρώματος πρέπει να έχει ένα ικανοποιητικό περιεχόμενο υγρασίας και ότι πρέπει να υπάρχει ελάχιστη ροή υδάτων διαμέσω ή γύρω από την παγωμένη ζώνη του πετρώματος.

Κατά την ψύξη, η ζώνη ψύξης (frozen zone ή ice-wall), δημιουργείται γύρω από τους σωλήνες πάγου (freeze-tubes). Η κατασκευή τους, εξαρτάται από το μέγεθος της εκσκαφής. Τα στάδια ανάπτυξης της ζώνης ψύξης γύρω από μια σήραγγα, φαίνονται στο Σχήμα 2.26.

Η διαδικασία ψύξης μπορεί να ολοκληρωθεί σε τέσσερα στάδια. Αυτά είναι η εγκατάσταση του ψυκτικού συστήματος, η ενεργή ψύξη (active refrigeration) για τη δημιουργία της ζώνης ψύξης, η συντήρηση της ψύξης για να διατηρηθεί και πιθανόν να αυξηθεί το πάχος της ζώνης ψύξης όσο γίνεται η εκσκαφή και ο έλεγχος για την απόψυξη και τις συνέπειές της.

iv) Αποστράγγιση (dewatering)

Το νερό που υπάρχει μέσα σε μια υπό κατασκευή σήραγγα, πρέπει να απομακρυνθεί γιατί κάνει τα πετρώματα πιο επιρρεπή σε καταστάσεις αποχωρισμού και πτώσης, μειώνοντας τη φυσική συνοχή τους. Αφαιρώντας το νερό, βελτιώνονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά της βραχώμαζας, ενισχύεται η σταθερότητα της



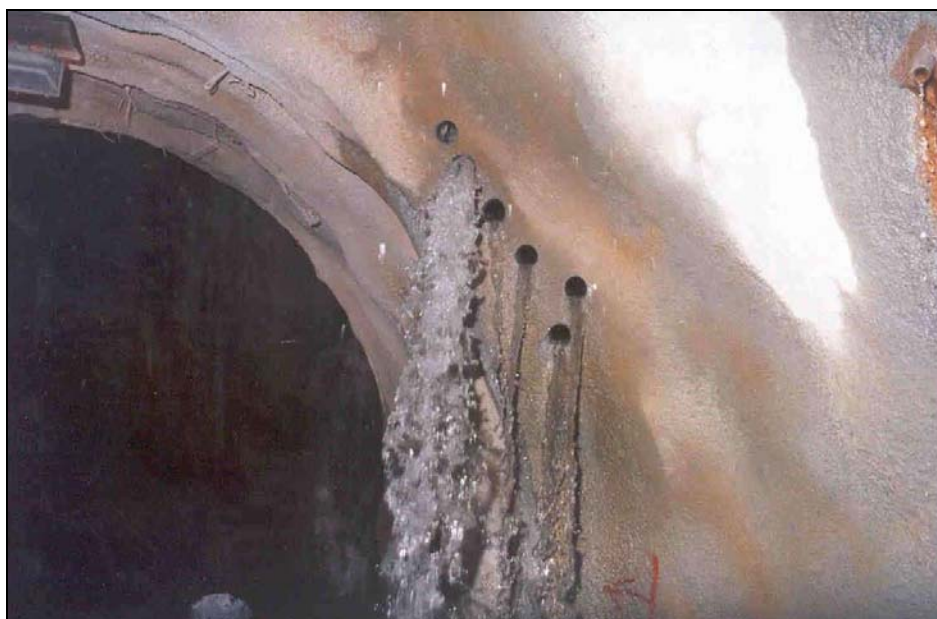
Σχήμα 2.26 Στάδια ανάπτυξης της ζώνης ψύξης γύρω από μια σήραγγα
(Πηγή: Βιόπουλος, 2006, από Harris, 1995)

κατασκευής και βελτιώνονται οι συνθήκες εργασίας των εργαζόμενων (Βιόπουλος, 2006, από USACE, 1997).

Η αποστράγγιση (dewatering) πρέπει να γίνεται έτσι ώστε τα ύδατα που βρίσκονται σε συγκεκριμένα σημεία που ορύσσεται η σήραγγα, να απομακρύνονται πριν η προχώρηση της εκσκαφής φτάσει στο σημεία αυτά (Σχήμα 2.27).

Το σύστημα αποστράγγισης που χρειάζεται μια σήραγγα, ποικίλλει καθώς εξαρτάται από τον τύπο της σήραγγας, το βάθος της και τις συνθήκες που επικρατούν στον υδροφόρο ορίζοντα. Σε μικρές και ρηχές εκσκαφές, η απορροή των υδάτων, μπορεί να γίνει μόνο με σωλήνες και χωρίς καθόλου έλεγχο των υδάτων. Σε μεγαλύτερες και βαθύτερες εκσκαφές όμως χρησιμοποιούνται μεγάλα συστήματα αποστράγγισης με πολλές μεθόδους ελέγχου των υδάτων, αφού ο ρυθμός ροής των τελευταίων είναι υψηλότερος και τα φαινόμενα εισροής νερού είναι σοβαρότερα. Το σύστημα αποστράγγισης πρέπει να είναι συμβατό με τη μέθοδο εκσκαφής της σήραγγας καθώς και με τα μέτρα υποστήριξης που λαμβάνονται. Το σύστημα αποστράγγισης δεν θα πρέπει να εμποδίζει τον εξοπλισμό της εκσκαφής ούτε και την εγκατάσταση και λειτουργία του συστήματος υποστήριξης.

Κάποιες μέθοδοι αποστράγγισης προκύπτουν από τον έλεγχο των επιφανειακών υδάτων (με αγωγούς εκτροπής των υδάτων από τη σήραγγα) και από τον έλεγχο των υπόγειων υδάτων (με ανοιχτή άντληση, με οριζόντιους αγωγούς, με μικρές σήραγγες απορροής υδάτων έξω από την κύρια εκσκαφή, με γεωτρήσεις άντλησης κ.α.)



Σχήμα 2.27 Αποστράγγιση σήραγγας (Πηγή: Βιόπουλος, 2006, από Peila and Oggeri, 2006)

β) Προϋποστήριξη με προστατευτική ασπίδα

Πριν από την εφαρμογή οποιασδήποτε μεθόδου εκσκαφής, δύναται, αν κριθεί απαραίτητη, η δημιουργία μιας προστατευτικής ασπίδας στην οροφή της προς εκσκαφή σήραγγας για την αποφυγή κατάρρευσης της οροφής ή για την διασφάλιση ευστάθειας του μετώπου. Συνήθεις μέθοδοι είναι η χρήση δοκών/ράβδων προπορείας, η περιφερειακή πρότμηση και η μέθοδος pre-tunnel.

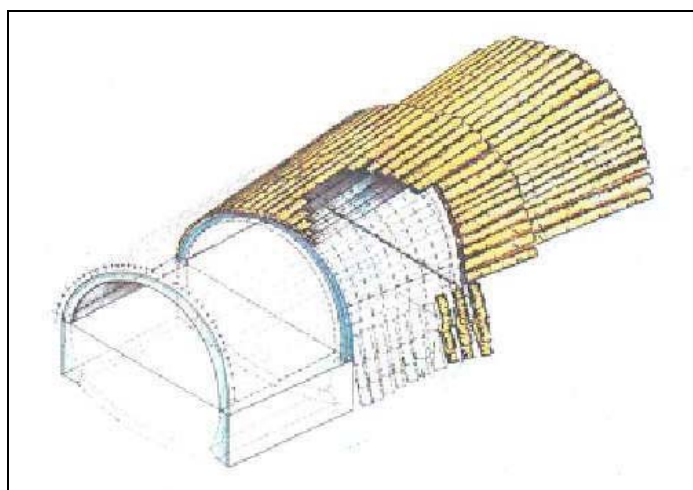
ι) Δοκοί προπορείας (Forepoling)

— Προπασσάλωση με ενεμάτωση υψηλής πίεσης (Jet grouting)

Η μέθοδος προπασσάλωσης με ενεμάτωση υψηλής πίεσης χρησιμοποιείται σε ιδιαίτερα δύσκολες συνθήκες, όπου συναντώνται ταυτόχρονα αδύναμα εδάφη (π.χ. αμμώδεις ή χαλικώδεις σχηματισμοί) και λεπτά υπερκείμενα.

Στη μέθοδο αυτή το έδαφος αντικαθίσταται από ένα μίγμα εδάφους και τσιμέντου, το οποίο μετά την πήξη του δημιουργεί ένα τσιμεντοεδαφοπάσσαλο διαμέτρου περίπου 0,6 μέτρων και μήκους που κυμαίνεται από 10 έως 15 μέτρα. Οι τσιμεντοεδαφοπάσσαλοι τοποθετούνται με μικρή κλίση, ώστε να σχηματίζουν μια σειρά από μερικώς αλληλοεπικαλυπτόμενες αψίδες. Το Σχήμα 2.28 παρουσιάζει ένα χαρακτηριστικό σύστημα προπασσάλωσης με ενεμάτωση υψηλής πίεσης (Coulter et al, 2004).

Όπου απαιτείται, προκειμένου να ενισχυθούν οι μηχανικές ιδιότητες των τσιμεντοεδαφοπασσάλων, όσο αυτοί είναι ακόμα σε ρευστή φάση εισάγεται στον καθένα ένας χαλύβδινος σωλήνας με απλή έμπηξη (μετά την πλήρωση του ενέματος). Ο σωλήνας μαζί με το μίγμα εδάφους και τσιμέντου, δημιουργεί ένα υλικό με υψηλές αντοχές.



Σχήμα 2.28 Μέθοδος προπασσάλωσης με ενεμάτωση υψηλής πίεσης (Πηγή: Βιόπουλος, 2006, από Peila and Oggeri, 2006)

Σε περίπτωση που η πρόσβαση στη σήραγγα είναι δυνατή από την επιφάνεια, το υπερκείμενο της σήραγγας έδαφος, μπορεί να ενισχυθεί και να σταθεροποιηθεί με την πλήρωση με ένεμα σε μια σειρά αλληλοτεμνόμενων στύλων.

— Η μέθοδος spiling

Η μέθοδος spiling είναι μία τεχνική ενίσχυσης του εδάφους, όπου η δομή υποστήριξης ενός τομέα μιας σήραγγας τοποθετείται πριν από την εκσκαφή του μετώπου. Η μέθοδος spiling έχει τέσσερα κύρια χαρακτηριστικά:

- ο Τους χρησιμοποιούμενους διάτρητους χαλύβδινους σωλήνες
- ο Το ρευστοκονίαμα που καλύπτει το εσωτερικό των σωλήνων και τα κενά έξω από αυτούς
- ο Το επεξεργασμένο έδαφος από την εισχώρηση του ρευστοκονιάματος λόγω διαπερατότητας ή ρωγματώσεων
- ο Το χαλύβδινο υποστηρικτικό τόξο

Ο ψεκασμός του ρευστοκονιάματος είναι το κυριότερο σημείο της μεθόδου για τη διαμόρφωση της δομής που μοιάζει με τόξο και εξαρτάται από το τύπο του εδάφους. Διενεργείται για την ενίσχυση αδύναμων και χαλαρών εδαφών, τη μείωση της διαπερατότητας, την ελάττωση φαινομένων καθιζήσεων που προκαλούνται από αποστράγγιση και τη σταθεροποίηση αμμωδών εδαφών. Για την εφαρμογή της μεθόδου χρησιμοποιούνται συνήθως περίπου 40-45 σωλήνες μήκους 12-14 μέτρων.

Η μέθοδος spiling μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί και στη βασική μέθοδο διάτρησης – ανατίναξης εάν επικρατούν συνθήκες αστοχίας, καθώς και όπου απαιτούνται επιπλέον υποστηρικτικά μέτρα. Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι δοκοί προπορείας από μόνοι τους δεν αρκούν για επαρκή στήριξη του μετώπου και απαιτούνται εξειδικευμένα εξαρτήματα στήριξης, όπως σωλήνες ψεκασμού από fiberglass.

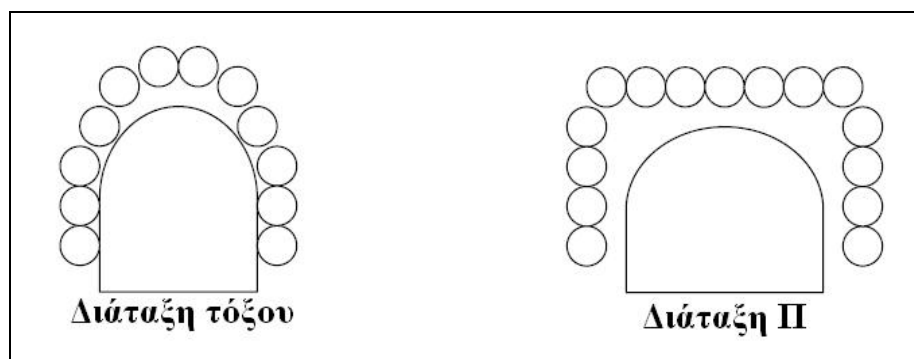
Σε γενικές γραμμές, η μέθοδος spiling είναι απλή, ευέλικτη (μπορεί να συνδυαστεί με άλλα μέτρα υποστήριξης), ασφαλής (όλες οι εργασίες διενεργούνται κάτω από τους τοποθετημένους σωλήνες) και γρήγορη (ο αριθμός των φάσεων εκσκαφής μειώνεται και ο ημερήσιος ρυθμός εκσκαφής αυξάνεται). Επιπλέον, οι επιφανειακές καθιζήσεις, καθώς και οι μόνιμες μετατοπίσεις γύρω από την εκσκαφή είναι χαμηλές, ενώ η ευστάθεια του μετώπου της σήραγγας και των πλευρικών τοιχωμάτων της βελτιώνεται. Συνεπώς, η μέθοδος είναι κατάλληλη για εδάφη και πετρώματα χαμηλής αντοχής και αστικές περιοχές,

όπου οι επιφανειακές καθιζήσεις δεν είναι αποδεκτές (Agioutantis et al, 2007, από Rotex, 2002).

— Η μέθοδος pipe roof

Η μέθοδος προπασσάλωσης οροφής pipe roof εφαρμόζεται στη στέψη της σήραγγας και περιλαμβάνει μια σειρά μεγάλης διαμέτρου χαλύβδινους ή τσιμεντένιους σωλήνες σε διάταξη τόξου ή σε διάταξη Π (Σχήμα 2.29). Η μέθοδος χρησιμοποιείται όταν το πάχος των υπερκείμενων είναι εξαιρετικά μικρό, καθώς και όταν υπάρχει σοβαρός κίνδυνος καθιζήσεων. Η απομάκρυνση γεωυλικού από την περιοχή εκσκαφής της σήραγγας, με την πάροδο του χρόνου προκαλεί αντίστοιχου μεγέθους καθίζηση της επιφάνειας, γεγονός που μπορεί να είναι επικίνδυνο για τις κοντινές κατασκευές της επιφάνειας. Για το λόγο αυτό, η μέθοδος εφαρμόζεται συχνά στην κατασκευή σιράγγων κάτω από αυτοκινητόδρομους (Σχήμα 2.30), ώστε να μη χρειάζεται να διακοπεί η κυκλοφορία ή να επιβληθεί κάποιος περιορισμός στο όριο της ταχύτητας. Επίσης, εφαρμόζεται σε κατοικημένες περιοχές για την προστασία των κτιρίων κάτω από τα θεμέλια των οποίων διανοίγεται η σήραγγα. Η μέθοδος προπασσάλωσης οροφής pipe roof χρησιμοποιήθηκε αρχικά στην Ιαπωνία για την κατασκευή υπόγειων σιδηροδρομικών σταθμών. Επίσης χρησιμοποιείται ευρέως στις Η.Π.Α. για την κατασκευή σιράγγων μικρής διαμέτρου (Βιόπουλος, 2006, από Tan and Ranjith, 2003).

Οι σωλήνες εγκαθίστανται συνήθως με τη μέθοδο pipe jacking ή άλλες μεθόδους μικροσηράγγων (Βλ. § 2.3.2 – Α.2.β). Οι σωλήνες στη μέθοδο αυτή τοποθετούνται παράλληλα με τον άξονα της σήραγγας και σχεδιάζονται για να φέρουν μόνο φορτία κατά μήκος της σήραγγας (Βιόπουλος, 2006, από Tan and Ranjith, 2003).



Σχήμα 2.29 Διατάξεις σωλήνων στη μέθοδο pipe roof (Πηγή: Βιόπουλος, 2006, από Tan and Ranjith, 2003)



Σχήμα 2.30 Μέθοδος pipe roof κάτω από αυτοκινητόδρομο (Πηγή: Βιόπουλος, 2006, από Peila and Oggeri, 2006)

Πρέπει να σημειωθεί ότι στην πρώτη και τρίτη μέθοδο οι σωλήνες δρουν ως δοκοί, δηλαδή μεταφέρουν τα φορτία που δέχονται κατά το μήκος τους στο έδαφος μέσω μεταλλικών πλαισίων που τοποθετούνται κατά διαστήματα, ενώ το βελτιωμένο έδαφος που προκύπτει από την εφαρμογή της δεύτερης μεθόδου κάνει τη δομή να λειτουργεί σαν τόξο.

ii) Περιφερειακή πρότμηση

Η περιφερειακή πρότμηση (mechanical precut) είναι μια μέθοδος υποστήριξης στην οποία, τέμνεται περιφερειακά ο θόλος της σήραγγας μπροστά από το μέτωπο και εισπιέζεται ένεμα από ινοπλισμένο (με χαλύβδινες ίνες) σκυρόδεμα στο κενό. Έτσι δημιουργείται κατά μήκος του τόξου της σήραγγας ένα συνεχές και λεπτό στρώμα σκυροδέματος.

Η μέθοδος αυτή, συνήθως βρίσκει εφαρμογή σε μαλακά πετρώματα καθώς και σε μαλακές έως μέτρια σκληρές αργίλους.

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για τη μέθοδο της περιφερειακής πρότμησης φαίνεται στο Σχήμα 2.31. Σε μια αλυσίδα κοπής, μήκους 150 έως 220 χιλιοστών, εφαρμόζεται μια λεπίδα μήκους 5 μέτρων η οποία εισέρχεται μέσα στο έδαφος περιφερειακά της σήραγγας και τέμνει ένα στρώμα από το έδαφος όσο και το πλάτος της λεπίδας. Κατόπιν το κενό που αφήνει η λεπίδα καθώς κινείται στην περίμετρο της σήραγγας, καλύπτεται με ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Απόρροια όλων των παραπάνω είναι να δημιουργείται διαρκώς ένα συνεχές περίβλημα από εκτοξευόμενο



Σχήμα 2.31 Μηχάνημα περιφερειακής πρότμησης (Πηγή: Βιόπουλος, 2006, από Peila and Oggeri, 2006)

σκυρόδεμα το οποίο καλύπτει το θόλο και τις παρειές της σήραγγας σταθεροποιώντας τα (Βιόπουλος, 2006, από Δουβής, 2002).

iii) Μέθοδος Pretunnel

Η μέθοδος pretunnel, αναπτύχθηκε για την κατασκευή μεγάλης διατομής σιράγγων σε δύσκολες εδαφικές συνθήκες. Ιστορικά μπορεί να θεωρηθεί σαν την εξέλιξη της περιφερειακής πρότμησης (mechanical precut). Η σημαντική καινοτομία της μεθόδου αυτής βρίσκεται στο γεγονός ότι κατασκευάζεται η τελική επένδυση μπροστά από το μέτωπο πριν από την εκσκαφή. Αυτό εξαφανίζει την ανάγκη για προσωρινή υποστήριξη και δημιουργεί ασφαλείς εργασιακές συνθήκες κατά την κατασκευή της σήραγγας. Η κατασκευή της τελικής επένδυσης σε μια φάση και μπροστά από το μέτωπο της εκσκαφής, έχει επίσης ως αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση των καθιζήσεων στην επιφάνεια (Βιόπουλος, 2006, από Tonon et al, 2005).

Υπάρχουν δύο πιθανοί τύποι κατασκευής τις μεθόδου pretunnel η συνεχής (continuous) και η μη συνεχής (discontinuous). Η συνεχής μέθοδος είναι η κλασσική μέθοδος pretunnel. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται είναι παρόμοιος με της

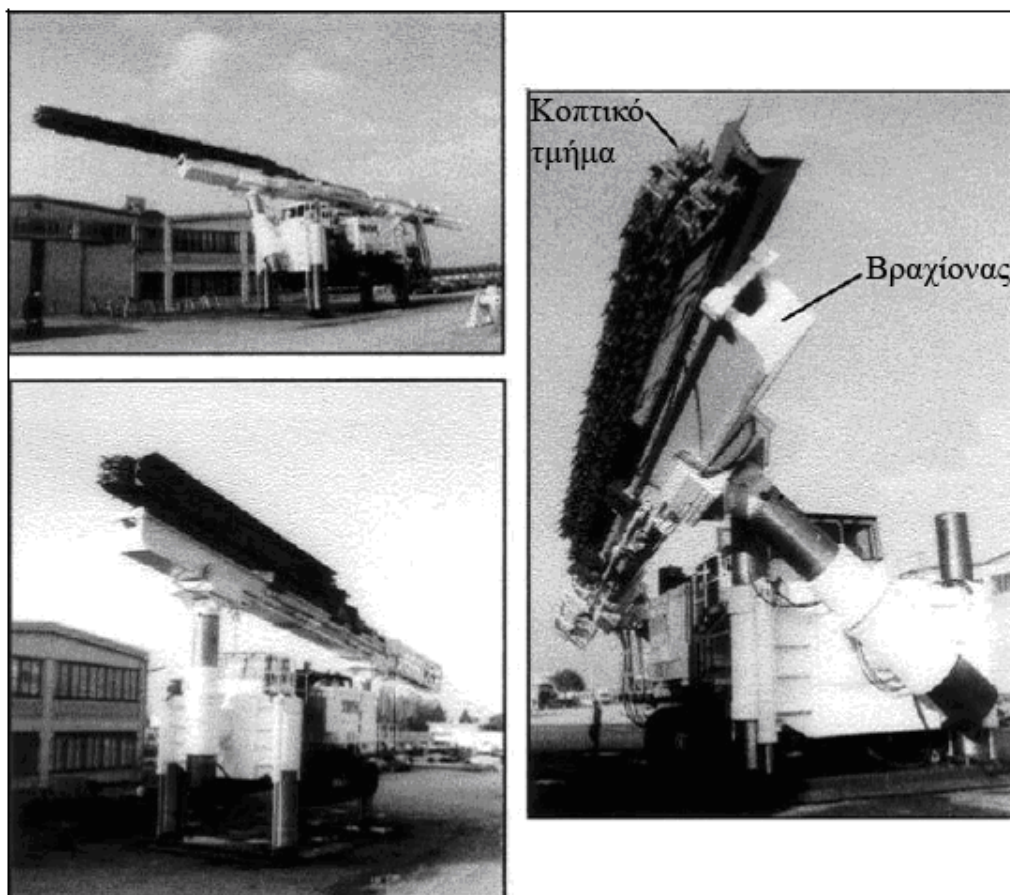
μεθόδου περιφερειακής πρότμησης σε μεγαλύτερη διάσταση (Σχήμα 2.32) (Βιόπουλος, 2006, από Tonon et al, 2005).

γ) Άλλες μέθοδοι

Άλλες τακτικές που ακολουθούνται για τη διασφάλιση της ευστάθειας του μετώπου είναι οι ηλώσεις μετώπου (face nailing), η ενίσχυση του μετώπου με αγκύρια (fiberglass), η εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος στο μέτωπο και η υποθεμελίωση του μετώπου. Οι ηλώσεις μετώπου και το σκυρόδεμα απομακρύνονται κατά την εφαρμογή της ακολουθούμενης μεθόδου εκσκαφής μαζί με το εξορυσσόμενο υλικό.

2. Μέθοδοι σημειακής κοπής

Όλες οι μέθοδοι σημειακής κοπής μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε μη αυτοϋποστηριζόμενη βραχόμαζα, αν έχουν προηγηθεί τεχνικές βελτίωσής της ή έχει εφαρμοστεί προστατευτική ασπίδα που διασφαλίζει την ομαλή και ασφαλή λειτουργία των μηχανημάτων και την αδιατάρακτη διεξαγωγή των εργασιών.



Σχήμα 2.32 Μηχάνημα pretunnel (Πηγή: Βιόπουλος, 2006, από Tonon et al, 2005)

3. Μέθοδοι ολομέτωπης κοπής

α) Μηχανές ολομέτωπης κοπής

Περιγραφή της λειτουργίας των μηχανών ολομέτωπης κοπής έχει γίνει στην Παράγραφο 2.3.2 – Α.2.α. Στην παρούσα παράγραφο περιγράφονται οι παραλλαγές των TBMs για προσαρμογή τους σε μη αυτοϋποστηριζόμενα εδάφη.

Σε ασθενή εδάφη προτιμώνται τα TBMs με διπλά gripper, εφόσον έχουν τη δυνατότητα καλύτερης κατανομής των δυνάμεων στα τοιχώματα της σήραγγας.

Συστήματα ολομέτωπης κοπής με ασπίδα χρησιμοποιούνται σε χαλαρά εδάφη και μικτό υπέδαφος και σε συνθήκες που αναμένεται υψηλή εισροή νερού. Τα TBMs με μονή ασπίδα προστατεύουν την κεφαλή από καταπτώσεις της οροφής και η προώθησή τους γίνεται με πίεση επί της τοποθετημένης επένδυσης. Όσον αφορά τα TBMs με διπλή (τηλεσκοπική) ασπίδα, η προώθηση γίνεται με πίεση επί της ήδη τοποθετημένης επένδυσης και συνεπώς συμπεριφέρεται σαν TBMs με μονή ασπίδα, όταν πρόκειται για χαλαρά εδάφη, ενώ συμπεριφέρονται ως συμβατικά TBMs, όταν χρησιμοποιούνται σε καλά πετρώματα.

Σήραγγες μεγάλου βάθους και μήκους διασχίζουν ορεινές περιοχές και άλλες δυσχερείς διαδρομές. Σε αυτές τις συνθήκες, στην πραγματικότητα ελάχιστα είναι γνωστές οι λεπτομερείς γεωλογικές, υδρογεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες που μπορεί να απαντηθούν. Όσο πιο μεγάλου βάθους είναι η σήραγγα, τόσο μεγαλύτερη είναι η αβεβαιότητα και τόσο υψηλότερες είναι οι πιθανότητες να απαντηθούν μη αναμενόμενες και δυσμενείς συνθήκες, με αποτέλεσμα να πρέπει να είναι μεγαλύτερες και οι προσπάθειες και οι πόροι για επιτόπου έρευνες που μειώνουν την αβεβαιότητα.

Η έλλειψη τέτοιου είδους γνώσεων αποτελεί ένα από τα πιο κρίσιμα σημεία στην όρυξη σιράγγων, εφόσον η εκσκαφή πρέπει να γίνει χωρίς ακριβή γνώση του είδους του υπεδάφους και των ποικίλων καταστάσεων που θα απαντηθούν. Όταν χρησιμοποιείται ένα TBM είναι απαραίτητο να λαμβάνεται υπόψη ότι η πρότυπη απόδοσή του εκτιμάται βάσει των ιδιοτήτων της βραχομάζας, αλλά η εμφάνιση περιοριστικών συνθηκών εργασίας κατά την εκσκαφή έχει μεγάλη επίδραση στους χρόνους και στα κόστη της κατασκευής μιας σήραγγας. Περιοριστικές συνθήκες για ένα TBM εμφανίζονται όταν η μηχανή δε μπορεί να δουλέψει με τον τρόπο για τον οποίο σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε, με αποτέλεσμα η πρόοδος της σήραγγας να επιβραδύνεται ή και να διακόπτεται (Peila and Oggeri, 2006).

Οι πιο σημαντικές περιοριστικές συνθήκες που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι:

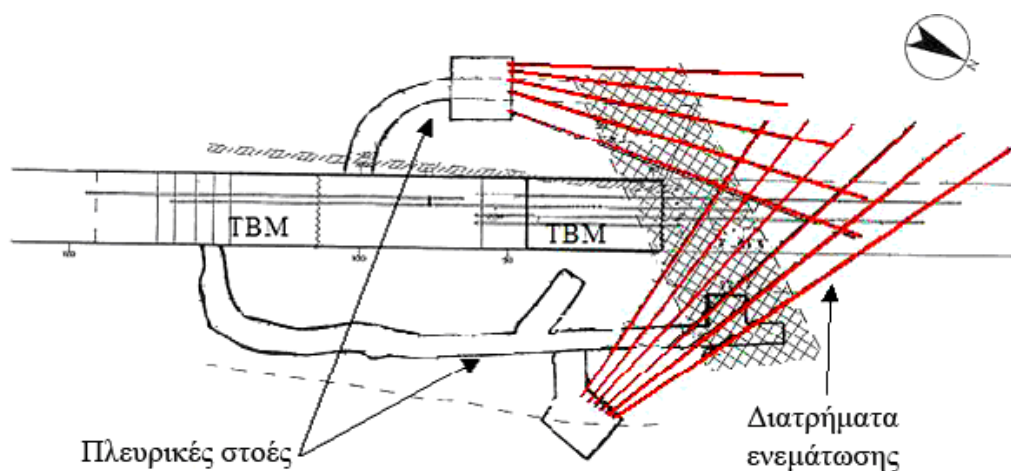
- μη προβλέψιμη παρουσία υπογείων νερών υπό πίεση
- μη προβλέψιμη παρουσία αδύναμων βραχομαζών, με ή χωρίς νερό

Για να παρεμποδιστούν αυτές οι περιοριστικές συνθήκες για ένα TBM και για την ασφαλή κατασκευή μιας σήραγγας κάτω από αβέβαιες γεωλογικές συνθήκες, οι ακόλουθες κύριες απαιτήσεις πρέπει να πληρούνται:

- συστηματικές διερευνήσεις μπροστά από το μέτωπο της σήραγγας για την προληπτική αναγνώριση γεωλογικών δομών που φέρουν νερό και/ή ασταθείς ή δύσκολες γεωτεχνικές συνθήκες
- προεπεξεργασία εδάφους με το σκοπό τη στεγάνωση γύρω από τη σήραγγα, μειώνοντας την πίεση των πόρων, ή βελτιώνοντας τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του εδάφους, με στόχο να είναι συμβατή η ευστάθεια της σήραγγας με την προσωρινή και τη μόνιμη επένδυσή της.

Στο Σχήμα 2.33 φαίνεται παράδειγμα τεχνικών ενίσχυσης εδάφους με χρήση πλευρικών στοών.

Η επιλογή της βέλτιστης τεχνικής ενίσχυσης εδάφους απαιτεί υψηλή ευελιξία σχεδιασμού, διότι όλες οι διαθέσιμες τεχνολογίες πρέπει να ληφθούν υπόψη και να συγκριθούν από τεχνική και οικονομική σκοπιά. Αποστραγγίσεις και εξυγιάνσεις εδαφών είναι οι πιο σημαντικές μέθοδοι που καθιστούν εφικτή τη διάσχιση ενός TBM από απρόβλεπτες δύσκολες γεωτεχνικές συνθήκες. Επομένως, η διερεύνηση και η εξυγίανση εδαφών πρέπει να θεωρούνται αναπόσπαστο κομμάτι της τεχνικής προχώρησης μιας σήραγγας με TBM και να γίνουν αναπόσπαστο μέρος της διαδικασίας κατασκευής (Peila and Oggeri, 2006).



Σχήμα 2.33 Παράδειγμα τεχνικών ενίσχυσης εδάφους με χρήση πλευρικών στοών στη σήραγγα του Hsuehshan (Πηγή: Peila and Oggeri, 2006)

i) TBMs με εξοπλισμό για προ-διάτρηση

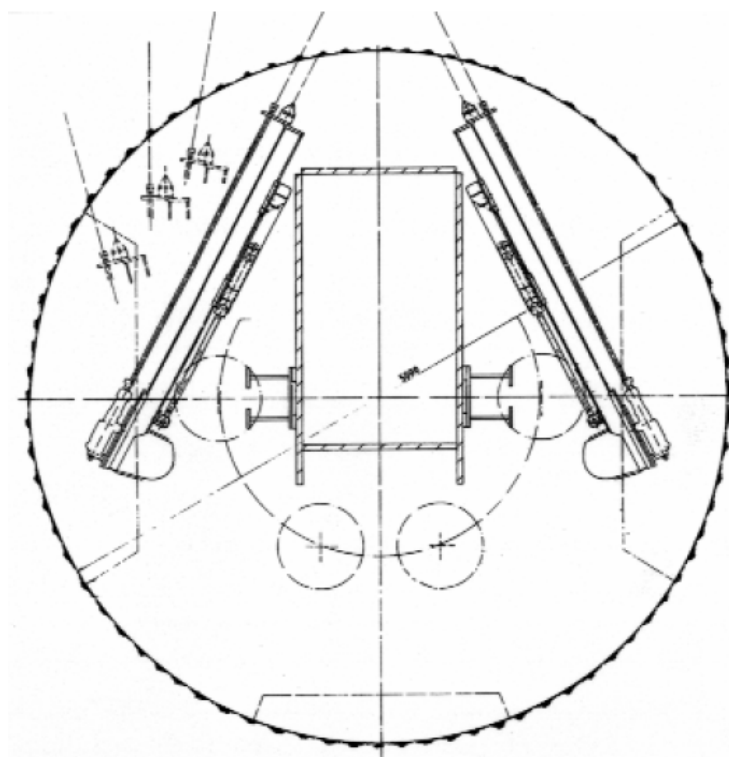
Τα περισσότερα TBMs προσφέρουν εξοπλισμό στελεχών διάτρησης, τα οποία είναι γενικά υδραυλικές σφύρες που επιτρέπουν την κοχλίωση έως και 50 μέτρα εμπρός (consolidation drilling – Σχήμα 2.34) Επίσης, είναι δυνατό να τοποθετηθεί ειδικός εξοπλισμός δειγματοληψίας της βραχώμαζας (probe drilling – Σχήμα 2.35) για να διαπιστωθεί αν υπάρχει πιθανότητα να εμφανιστούν κατά την προχώρηση της σήραγγας συνθήκες που να παρεμποδίσουν τη λειτουργία του TBM, ούτως ώστε να ληφθούν βοηθητικά μέτρα.

Η διαδικασία της κοχλίωσης πρέπει να γίνεται έξω από τη διάμετρο της σήραγγας, για να μην παρεμποδίζεται η έλευση του TBM. Εάν η διάτρηση γίνει στη διατομή της σήραγγας, τα κοπτικά άκρα δεν είναι σε θέση να κόψουν το χάλυβα των κοχλιών και καταστρέφονται.

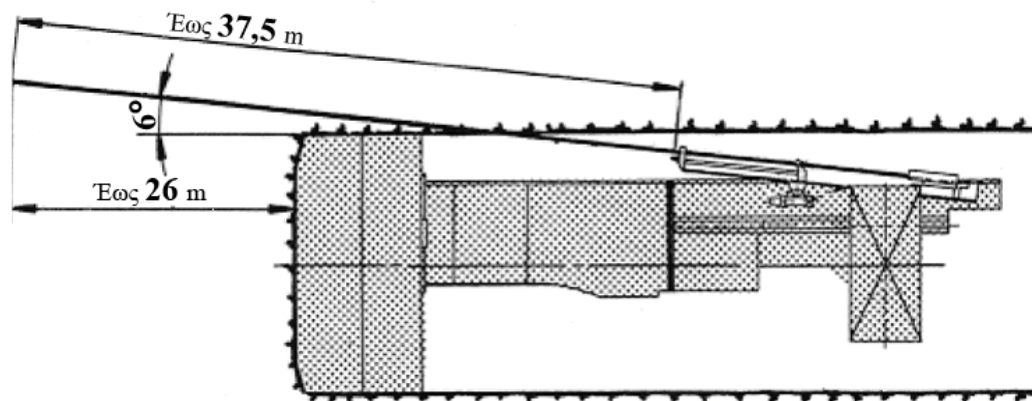
ii) TBMs με εφαρμογή πίεσης

Δύο τύποι TBM διακρίνονται που λειτουργούν με εφαρμογή αντισταθμιστικής πίεσης στο μέτωπο:

- Μηχανήματα ολομέτωπης κοπής με εφαρμογή εδαφικής πίεσης στο μέτωπο (Earth Pressure Balance TBMs - EPB shield)



Σχήμα 2.34 Συμπληρωματική διάταξη σε TBM για εμπρόσθια κοχλίωση οροφής (consolidation drilling) (Πηγή: Heiniö, 1999)



Σχήμα 2.35 Συμπληρωματική διάταξη σε TBM για δειγματοληψία (probe drilling) (Πηγή: Heiniö, 1999)

- Μηχανήματα ολομέτωπης κοπής με εφαρμογή πίεσης στο μέτωπο μέσω μίγματος μπεντονίτη-εδάφους (Slurry Pressure Balance TBMs – SPB or slurry-shield or mix-shield)

Μηχανήματα ολομέτωπης κοπής με εφαρμογή εδαφικής πίεσης στο μέτωπο (Earth Pressure Balance TBMs - EPB shield)

Τα μηχανήματα ολομέτωπης κοπής με εφαρμογή ενεργής πίεσης (EPB TBMs) είναι μηχανήματα ειδικά σχεδιασμένα για λειτουργία σε μαλακά εδάφη που περιέχουν νερό υπό πίεση. Χαλαρές ιζηματογενείς αποθέσεις διαβρωμένες από νερό και αρκετά υπερυψωμένος υδροφόρος ορίζοντας θα ήταν προκλήσεις για τα συμβατικά TBMs. Η ασπίδα των EPB TBMs αντέχει πιέσεις εισροής ύδατος έως και 10 bar και ελέγχουν την ευστάθεια του μετώπου της σήραγγας και την καθίζηση της επιφανείας παρακολουθώντας και ρυθμίζοντας την πίεση μέσα στο θάλαμο της κοπτικής κεφαλής, ώστε να έρθει σε ισορροπία με την πίεση που υπάρχει μπροστά από την κοπτική κεφαλή. Επομένως, η ονομασία τους «EPB» οφείλεται στην αρχή λειτουργίας τους.

Η περιοχή εργασίας μέσα στο EPB TBM είναι απόλυτα στεγανή έναντι της πίεσης ρευστού του εδάφους έξω από τη μηχανή. Μια σπειροειδής μεταφορική ταινία απομακρύνει το ρευστοποιημένο υλικό εκσκαφής πίσω από την κοπτική κεφαλή. Η ταχύτητα της μεταφορικής ταινίας και ο ρυθμός απομάκρυνσης ελέγχεται από το χειριστή και χρησιμοποιείται για να ελέγξει την πίεση στο μέτωπο εργασίας και να ταιριάζει η απομάκρυνση του υλικού εκσκαφής με το ρυθμό προχώρησης του EPB TBM. Η αρθρωτή ένωση ανάμεσα στο μπροστινό και το οπίσθιο τμήμα είναι εξοπλισμένη με υψηλής πίεσης παρέμβυσμα που επιτρέπει γωνιακές κινήσεις, αλλά

εμποδίζει το ρευστό να εισχωρήσει στο μηχάνημα. Καθώς προχωρά το μηχάνημα, εφαρμόζει και την υποστήριξη της σήραγγας με έτοιμους δακτυλίους από σκυρόδεμα. Όταν κρίνεται απαραίτητο να μπει κάποιος εργαζόμενος στο θάλαμο της κοπτικής κεφαλής για να την ελέγξει ή για αλλαγή των κοπτικών άκρων, εισέρχεται μέσω καμπίνας ισοστάθμισης πίεσης, καθώς χρησιμοποιείται ταυτόχρονα συμπιεσμένος αέρας για να εφαρμόζει ενεργή πίεση για να υποστηρίζεται το μέτωπο εργασίας (<http://www.therobbinscompany.com/products/tunnel>, 2007).

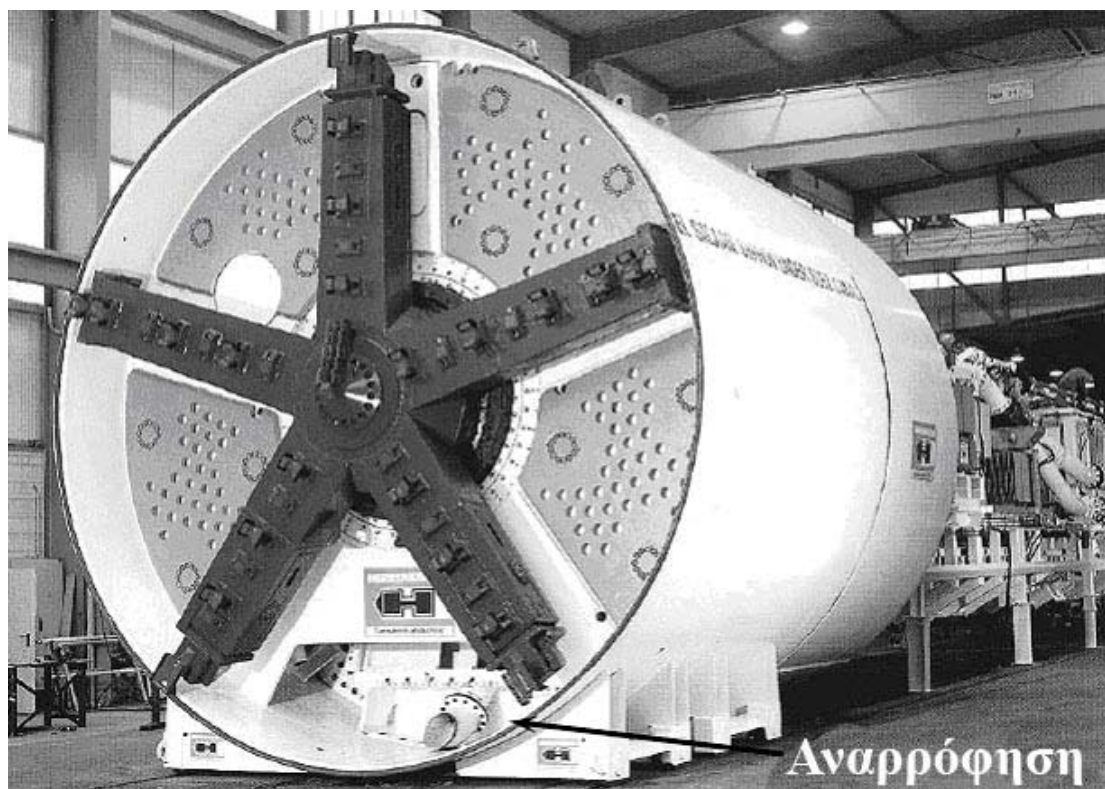
Αξίζει να σημειωθεί ότι η ισορροπία στο μέτωπο επιτυγχάνεται χωρίς τη χρήση πολφού (slurry) κι επιτρέπει την όρυξη σιράγγων σε μαλακά, υγρά ή ασταθή εδάφη με ταχύτητα και ασφάλεια, η οποία δεν ήταν πριν δυνατή. Τμήματα του υπογείου σιδηροδρόμου του Λονδίνου και οι περισσότερες νέες σήραγγες που ολοκληρώθηκαν τα τελευταία χρόνια παγκοσμίως χρησιμοποίησαν τα εν λόγω συστήματα (<https://engineering.purdue.edu/CEM/Research/epb.htm>, 2007).

Ο έλεγχος της διαδικασίας εκσκαφής και η απόδοση του EPB TBM εξαρτάται από τις ιδιότητες του εδάφους που εξορύσσεται. Ρύθμιση του εδάφους με εισπίεση αφρών, πολυμερών νερού, μπετονίτη, ή οποιοδήποτε συνδυασμού τους απαιτείται συνήθως για την τροποποίηση των ιδιοτήτων του εδάφους που εξορύσσεται για να σχηματιστεί μια μαλακή πλαστική πάστα. Αποδοτική εξυγίανση του εδάφους βελτιώνει σημαντικά την απόδοση του μηχανήματος και ελέγχει τη ροή του εδάφους στη μεταφορική ταινία (Lovat, 2007)

Μηχανήματα ολομέτωπης κοπής με εφαρμογή πίεσης στο μέτωπο μέσω μίγματος μπετονίτη-εδάφους (Slurry Pressure Balance TBMs – SPB or slurry-shield or mix-shield)

Τα μηχανήματα ολομέτωπης κοπής μέσω μίγματος μπετονίτη-εδάφους (Σχήμα 2.36) μοιάζουν σχεδιαστικά με τα EPBs, με κύρια διαφοροποίηση τη χρήση πολφού μπετονίτη – για τον έλεγχο της ευστάθειας του μετώπου της σήραγγας και της καθίζησης της επιφανείας. Μηχανήματα αυτού του τύπου εφαρμόζονται αν το έδαφος που περιβάλλει την εκσκαφή και το μέτωπο πρέπει να υποστηρίζεται ή αν σε ένα πολύ υδατοπερατό έδαφος πρέπει να αποφευχθεί η εισροή ύδατος στην εκσκαφή.

Ο θάλαμος εκσκαφής, που ονομάζεται επίσης και θάλαμος πίεσης, βρίσκεται πίσω από την κοπτική κεφαλή και σφραγίζεται από τη σήραγγα με ένα τοίχο πίεσης. Η πίεση υποστήριξης πρέπει να εξισορροπεί τουλάχιστον την πίεση του εδάφους και την πίεση του ύδατος. Ο πολφός μπετονίτη που έχει αναμιχθεί με έδαφος μεταφέρεται



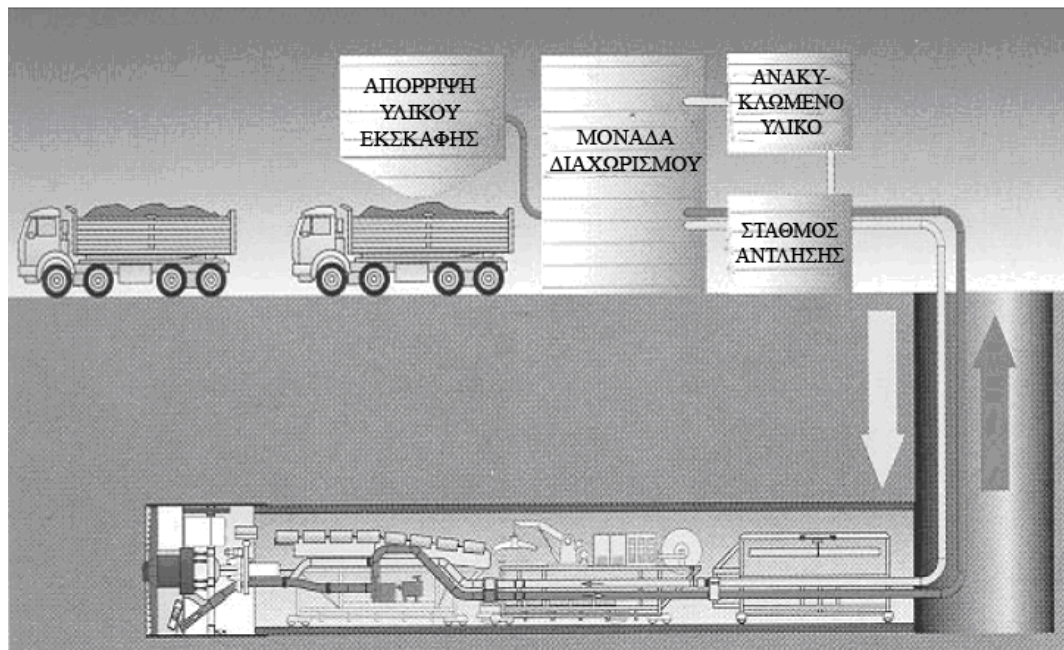
Σχήμα 2.36 Μηχάνημα ολομέτωπης κοπής μέσω μίγματος μπετονίτη-εδάφους (Πηγή: Καββαδάς, 2004)

σε διαχωριστή εκτός της σήραγγας, όπου και διαχωρίζεται πριν εισέλθει και πάλι ως πολφός μπετονίτη (Σχήμα 2.37) (Εξαδάκτυλος και Σταυροπούλου, 2006).

Το κύριο πρόσθετο των SPBs είναι ο πολφός μπετονίτη, ωστόσο μπορεί να προστεθούν επιπλέον πολυμερή ή άλλα υλικά για να υποβοηθήσουν στο διαχωρισμό λεπτόκοκκων εδαφών, όπως η άργιλος από τον πολφό του μπετονίτη (Lovat, 2007).

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται συνοπτικά τα πλεονεκτήματα των EPB TBMs έναντι των SPB (Lovat, 2007):

- Τα EPBs είναι συνολικά απλούστερα στην εκμάθηση, στη λειτουργία και στη συντήρησή τους
- Σε περίπτωση κατάρρευσης του μετώπου η απώλεια εδάφους είναι συγκριτικά μικρότερη
- Ο ρυθμός προχώρησης της εκσκαφής των SPBs περιορίζεται από το σύστημα του πολφού, σε αντίθεση με τα EPBs. Ωστόσο, για τον ίδιο ακριβώς λόγο, η κοπτική κεφαλή των EPBs χρειάζεται συχνότερα συντήρηση, οπότε σε βάθος χρόνου π.χ. μίας εβδομάδας ή ενός μήνα το πλεονέκτημα των EPBs δεν είναι συνολικά ιδιαίτερα μεγάλο.
- Το κόστος επένδυσης είναι μικρότερο



Σχήμα 2.37 Μηχάνημα ολομέτωπης κοπής μέσω μίγματος μπεντονίτη-εδάφους και σύστημα άντλησης/διαχωρισμού πολφού (Πηγή: Καββαδάς, 2004)

- Έχουν μικρότερη κατανάλωση προσθέτων (δεν απαιτείται κύκλωμα πολφού)
- Αντίστοιχα, τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των SPB TBMs είναι τα ακόλουθα:
- Η απαιτούμενη πίεση καθορίζεται κι ελέγχεται από το σύστημα
 - Η κεφαλή κοπής απαιτεί μικρότερη ισχύ
 - Το μολυσμένο εξορυσσόμενο υλικό δεν είναι εκτεθειμένο έως ότου βγει στην επιφάνεια
 - Έχουν τη δυνατότητα ενσωμάτωσης σπαστήρα πετρώματος
 - Επιτυγχάνεται καθαρότερο περιβάλλον εργασίας στη σήραγγα.

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εξαρτάται καθαρά από τις ιδιαίτερες ανάγκες κάθε εφαρμογής. Τέλος, σημειώνεται ότι παρόλο που τα EPBs χρησιμοποιούνταν παλαιότερα για πιο λεπτόκοκκα εδάφη από τα SPBs, με τη χρήση των κατάλληλων πληρωτικών οι διαφορές αυτές έχουν εξαλειφθεί, οπότε ο τύπος του εδάφους δεν είναι πλέον ο πιο κρίσιμος παράγοντας για την επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου (Lovat, 2007).

Τα τελευταία χρόνια η κατασκευή σιράγγων είναι πλήρως μηχανοποιημένη και ιδιαίτερα η ανάπτυξη και τα οφέλη των μηχανών ολομέτωπης κοπής έχουν αναγνωριστεί. Οι μηχανές ολομέτωπης κοπής διακρίνονται σε δύο τύπους: μαλακού εδάφους και σκληρού εδάφους. Αν και περιστασιακά και οι δύο τεχνολογίες

ενσωματώνονται σε μία μηχανή, ιστορικά έχουν εξελιχθεί ανεξάρτητα και βασίστηκαν χωριστά σε διαφορετικές λειτουργίες και απαιτήσεις κατάλληλες για κάθε τύπο εδάφους. Ωστόσο, σπάνια ένα TBM αντιμετωπίζει μόνο τον τύπο βραχώμαζας για τον οποίο έχει σχεδιαστεί. Καθώς το μήκος και το βάθος των σηράγγων αυξάνεται, οι πιθανότητες να αντιμετωπίσει ένα TBM διαφορετικές συνθήκες αυξάνεται σημαντικά. Για την αντιμετώπιση τέτοιων συνθηκών αναπτύσσεται νέα γενιά TBMs που συνδυάζουν και τις δύο τεχνολογίες, η οποία με μεγάλη ταχύτητα και για μεγάλα μήκη θα αντιμετωπίζει ποικιλία εδαφικών συνθηκών από μαλακή έως σκληρή βραχώμαζα. Η νέα αυτή γενιά περιλαμβάνει α) συμβατικά TBMs που μπορούν να κάνουν ταυτόχρονη εκσκαφή και απομάκρυνση του θραυσμένου υλικού, β) SPB και EPB TBMs που είναι κατάλληλα για χρήση και σε σκληρή βραχώμαζα, γ) μηχανήματα διπλής λειτουργίας (dual mode) που επιτρέπουν γρήγορη και εύκολη εναλλαγή από ανοικτού σε κλειστού τύπου λειτουργία και δ) νέα TBMs ανοικτής ασπίδας. Όλες αυτές οι μηχανές, μερικές εκ των οποίων φαίνονται στο Σχήμα 2.38, αποτελούν την τάση της ανάπτυξης των TBMs στο άμεσο μέλλον (Kondo, 2006).

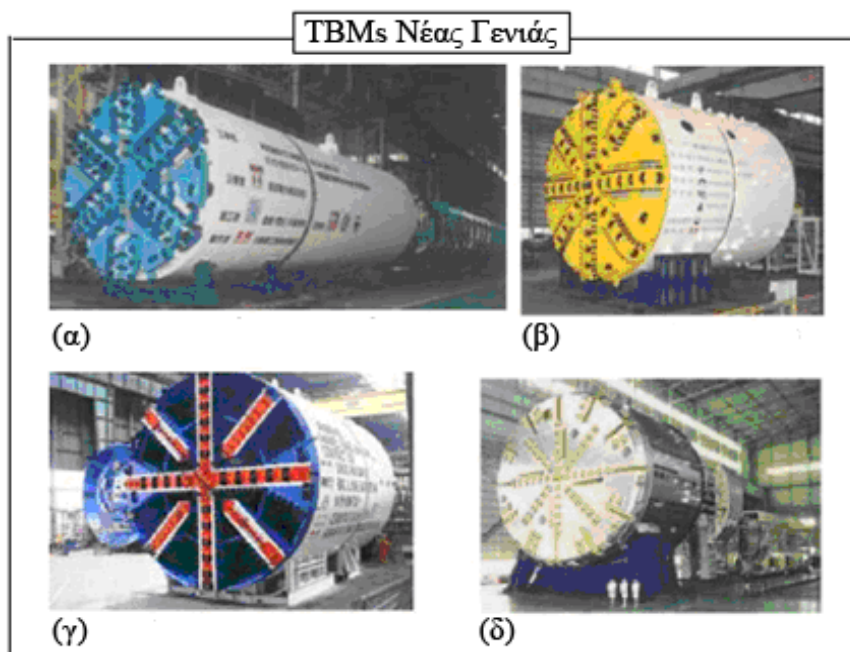
Στο Σχήμα 2.39 δίνεται γραφικά η απόδοση του κάθε διαφορετικού τύπου TBM ανάλογα με την ποιότητα της βραχώμαζας σύμφωνα με το δείκτη RMR.

β) Μικροσήραγγες

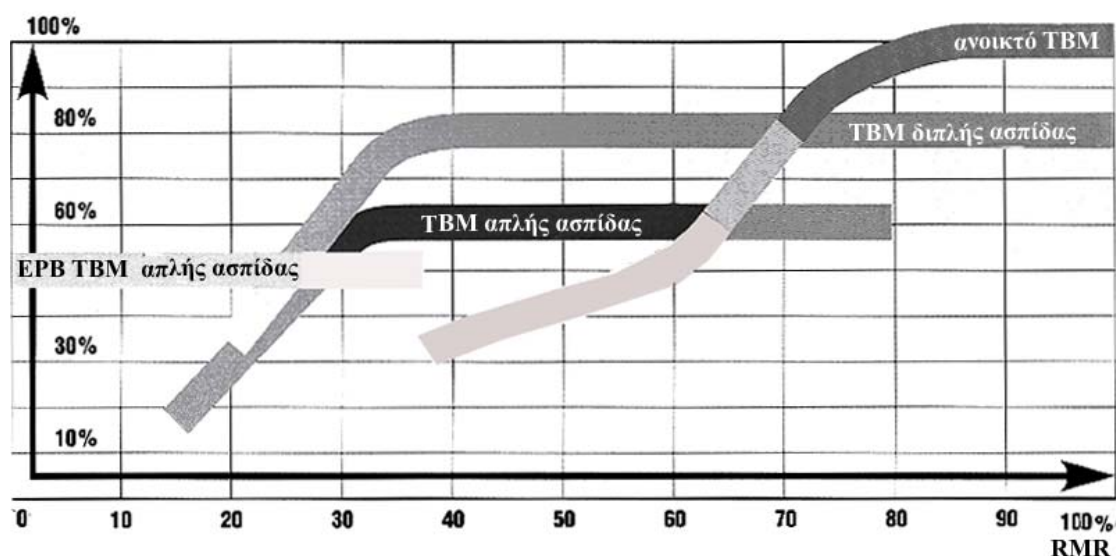
Η μέθοδος μικροσηράγγων (microtunnelling) παρέχει άμεση υποστήριξη, άρα μπορεί να εφαρμοστεί και σε μη αυτοϋποστηριζόμενα εδάφη, όπως περιγράφηκε στην Παράγραφο 2.3.2 – Α.2.β.

4. Νέα Αυστριακή Μέθοδος (New Austrian Tunnelling Method – NATM)

Στην περίπτωση διάνοιξης σηράγγων σε βραχώμαζα 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 βραχώμαζας με πιθανή κατάληξη την κατάρρευση της σήραγγας. Σε τέτοιες περιπτώσεις, κατά την εφαρμογή της μεθόδου NATM (όπως αυτή περιγράφηκε στην Παράγραφο 2.3.2 – Α.3), μπορούν να ληφθούν μέτρα βελτίωσης της ευστάθειας του μετώπου, όπως αύξηση του αριθμού των φάσεων εκσκαφής (ώστε να μειωθούν οι διαστάσεις του μετώπου), μείωση του μήκους του βήματος εκσκαφής όσο μειώνεται η ποιότητα της βραχώμαζας (επειδή στις περιπτώσεις αυτές η αποδιοργάνωση της



Σχήμα 2.38 TBM's νέας γενιάς: (α) συμβατικά TBM's που μπορούν να κάνουν ταυτόχρονη εκσκαφή και απομάκρυνση του θραυσμένου υλικού, (β) SPB και EPB TBM's που είναι κατάλληλα για χρήση και σε σκληρή βραχομάζα, (γ) μηχανήματα διπλής λειτουργίας (dual mode) που επιτρέπουν γρήγορη και εύκολη εναλλαγή από ανοικτού σε κλειστού τύπου λειτουργία και δ) νέα TBM's ανοικτής ασπίδας (Πηγή: Kondo, 2006)



Σχήμα 2.39 Απόδοση του κάθε διαφορετικού τύπου TBM ανάλογα με την ποιότητα της βραχομάζας σύμφωνα με το δείκτη γεωμηχανικής ταξινόμησης πετρώματος RMR (Rock Mass Rating) (Πηγή: Καββαδάς, 2004)

δομής της βραχομάζας είναι ταχύτερη), 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.

Σε βραχύμαζα με φτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά ή σε περιπτώσεις ανάγκης περιορισμού των υποχωρήσεων στην επιφάνεια του εδάφους, ο δακτύλιος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ολοκληρώνεται 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.

Κεφάλαιο 3

Μέτρα υποστήριξης οδικών σηράγγων

Η υποστήριξη σηράγγων και ο σχεδιασμός υπόγειων ανοιγμάτων είναι μια απαιτητική και πολύ σύνθετη διεργασία. Αρχικά, το πρόβλημα μπορεί να προσεγγιστεί με δύο τρόπους: Ο πρώτος τρόπος είναι ο καθορισμός της σχέσης ανάμεσα στις γεωμηχανικές ιδιότητες της βραχομάζας και στις χρησιμοποιούμενες μεθόδους υποστήριξης. Αυτό στηρίζεται κυρίως στη χρήση στατιστικών και εμπειρικών δεδομένων που συγκεντρώνονται σε παρόμοιες συνθήκες. Ο δεύτερος τρόπος είναι η εκτίμηση των χαρακτηριστικών παραμόρφωσης του πετρώματος και στη συνέχεια της σχετιζόμενης επίδρασης στις δομές υποστήριξης. Αυτή η μέθοδος τυπικά απαιτεί κατοχή πολλών δεδομένων για πετρώματα και βραχώμαζες.

Οι πιο σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν το σχεδιασμό και την επιλογή μεθόδου ενίσχυσης βραχώμαζας είναι (Heiniö, 1999):

- Γεωλογικοί παράγοντες, όπως ιδιότητες πετρώματος και δομής βραχομάζας
- Διαστάσεις και γεωμετρία του χώρου εκσκαφής
- Θέση των κοιλοτήτων στη βραχώμαζα
- Μέθοδος εκσκαφής
- Χρήση και αναμενόμενος χρόνος ζωής του χώρου

Συνήθεις μέθοδοι υποστήριξης σε υπόγειες κατασκευές είναι:

- Αγκύρωση
- Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα
- Χαλύβδινα τόξα
- Επένδυση με σκυρόδεμα
- Ενεμάτωση (grouting)

Ο σχεδιασμός των μέτρων άμεσης υποστήριξης μπορεί να γίνει με αναλυτικές μεθόδους από τις οποίες υπολογίζονται τα φορτία στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας και στη συνέχεια ελέγχεται η επάρκεια των μέτρων υποστήριξης για την ανάληψη των φορτίων αυτών. Έχουν αναπτυχθεί και εμπειρικές μέθοδοι εκτίμησης των απαιτούμενων μέτρων άμεσης υποστήριξης (Καββαδάς, 2000).

3.1 Εσωτερική στήριξη βραχόμαζας

Η εσωτερική στήριξη της βραχόμαζας επιτυγχάνεται με γραμμικούς, συνήθως μεταλλικούς, αλλά και με μη μεταλλικούς φορείς, οι οποίοι τοποθετούνται μέσα στο πέτρωμα, και των οποίων η λειτουργία είναι δυνατόν να είναι παθητική, ή και ενεργητική. Με τον όρο παθητική περιγράφεται η λειτουργία των φορέων που φορτίζονται λόγω της παραμόρφωσης της βραχόμαζας, ενώ οι φορείς ενεργητικής λειτουργίας βασίζονται στην ενεργητική φόρτιση της βραχόμαζας λόγω της προέντασής τους. Το υλικό του στελέχους των φορέων της εσωτερικής υποστήριξης είναι συνήθως ραβδοχάλυβας ή συρματόσχοινο. Η εσωτερική στήριξη της βραχόμαζας έχει τη δυνατότητα να εξυπηρετήσει δύο διαφορετικούς σκοπούς, είτε την προενίσχυσή της πριν την εφαρμογή οποιασδήποτε μεθόδου εκσκαφής σε μη αυτοϋποστηριζόμενο πέτρωμα είτε τη στήριξη οροφής και τοιχωμάτων της σήραγγας μετά την εκσκαφή. Η προενίσχυση γίνεται με δοκούς ή ράβδους προπορείας και αγκύρια μετώπου, ενώ η στήριξη με αγκύρια συνεχούς ή σημειακής πάκτωσης και ήλους τριβής. Η κατάταξη των παραπάνω φορέων δεν είναι απόλυτη, και εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή. Η προενίσχυση, όπως και η ενεργητική στήριξη τοποθετούνται όταν είτε είναι αδύνατο να εφαρμοστεί η απαραίτητη υποστήριξη αρκετά γρήγορα είτε είναι απαραίτητο να μειωθούν οι μετακινήσεις στο ελάχιστο (Σοφιανός, 2002).

3.1.1 Μέσα προενίσχυσης

Αγκύρια προενίσχυσης: εφαρμόζονται πριν την εκσκαφή του υπογείου ανοίγματος και ενισχύουν το εκσκαπτόμενο γεωυλικό. Περιλαμβάνονται κυρίως τα αγκύρια μετώπου, οι δοκοί προπορείας και τα αγκύρια που τοποθετούνται από πιλοτική σήραγγα ή από την επιφάνεια ή από άλλη σήραγγα. Η προενίσχυση βοηθά τη βραχόμαζα να αυτοϋποστηριχθεί και ενεργοποιεί την αντοχή της αντί να υποστηρίζει το βάρος της. Η προενίσχυση είναι οικονομικότερη τακτική από την υποστήριξη (USACE, 1997).

1. Αγκύρια συνεχούς πάκτωσης άκαμπτης ράβδου (Fully Grouted Pipe Bolts-Spiles)

Είναι αγκύρια συνεχούς πάκτωσης όπως τα απλά αγκύρια συνεχούς πάκτωσης (§ 3.1.2 - Β), με τη διαφορά ότι η εισαγόμενη ράβδος (συνήθως χαλύβδινη ή από σκληρό πλαστικό, υαλόνημα ή ανθρακόνημα κ.λπ.) έχει μεγαλύτερη ακαμψία (διατομής σωλήνα ή συμπαγούς κυκλικής ή άλλης μορφής). Η ράβδος πακτώνεται 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 την διεύθυνση εκσκαφής οπότε και ονομάζονται αγκύρια/ηλώσεις προενίσχυσης: προαγκύρωσης (spiles) ή/και προπορείας (forepoles), ελαφρού, μέσου ή βαρέως τύπου (www.iok.gr, 2005).

2. Απλά αυτοδιατρώμενα αγκύρια/ήλοι (Self Drilling Simple Bolts)

Πρόκειται για ράβδους, συνήθως χαλύβδινες ή από σκληρό πλαστικό, κυκλικής διατομής (συνήθως με ραβδώσεις ή ελικώσεις στην εξωτερική επιφάνεια και κεντρική αξονική οπή σε όλο το μήκος της), φέρουν στο άκρο τους κοπτικό εργαλείο μίας χρήσης. Με αυτή την ράβδο ως διατρητικό στέλεχος διανοίγεται το διάτρημα, η ράβδος εγκαταλείπεται παραμένουσα ως τένοντα 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 υποστύλωσης 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 (www.iok.gr, 2005).

3. Αυτοδιατρώμενα αγκύρια/ήλοι σωληνωτού τύπου (Self Drilling Pipe Bolts/Spiles)

Τα αγκύρια αυτά κατασκευάζονται με τον ίδιο τρόπο όπως τα απλά αυτοδιατρώμενα αγκύρια-self drilling με τη 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 (spiles) ή/και προπορείας (forepoles) (www.iok.gr, 2005). Οι δοκοί προπορείας αναλαμβάνουν φορτία κυρίως σε κάμψη και διάτμηση, σε αντίθεση με όλους τους άλλους φορείς που αναλαμβάνουν εφελκυστικά φορτία ή και διατμητικά και δεν είναι εφελκυστικοί.

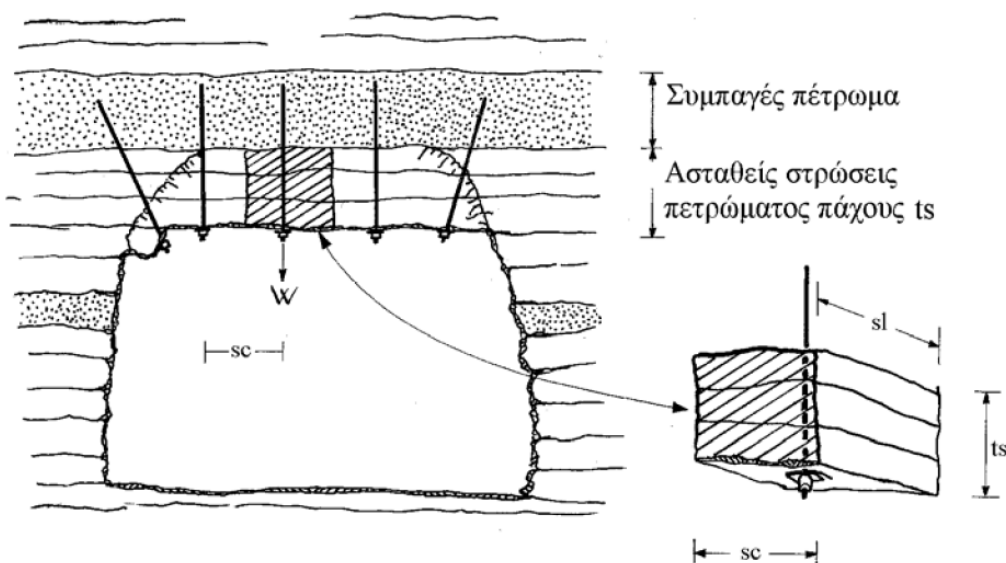
3.1.2 Μέσα στήριξης (μετά την εκσκαφή)

Πρόκειται για εφελκυσμένους φορείς, των οποίων η πάκτωση μέσα στο πέτρωμα επιτυγχάνεται είτε σημειακά είτε ολόσωμα. Στην πρώτη περίπτωση η πάκτωση είναι είτε μηχανική είτε με κάποιο ένεμα. Στη δεύτερη περίπτωση η ολόσωμη πάκτωση επιτυγχάνεται με κάποιο ένεμα.

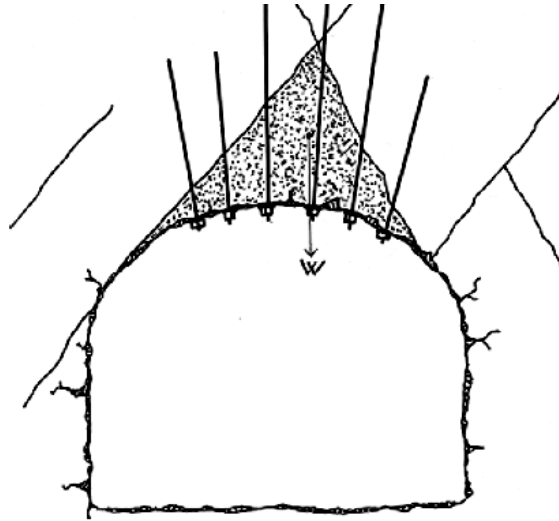
Α. Αγκύρια σημειακής πάκτωσης

Σε περιπτώσεις που το ανώτερο στρώμα μιας στρωσιγενούς οροφής είναι πολύ πιο ισχυρό και δύσκαμπτο από το κατώτερο, μπορεί να παραλάβει πλήρως το βάρος του κατώτερου μέσω αγκυρίων που πακτώνονται στο ανώτερο στρώμα. Αν διαφέρει η δυσκαμψία και η αντοχή των στρωμάτων, τότε παραλαμβάνεται μέρος του βάρους του κατώτερου. Στο Σχήμα 3.1 φαίνονται ασθενείς λεπτές στρώσεις πετρώματος αναρτημένες από συμπαγές πέτρωμα.

Ανάλογη περίπτωση αποτελεί και η συγκράτηση σφηνών από αγκύρια σημειακής πάκτωσης. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2, οι ασυνέχειες διαχωρίζουν τεμάχια



Σχήμα 3.1 Ασθενείς λεπτές στρώσεις πετρώματος αναρτημένες από συμπαγές πέτρωμα (Αγιουτάντης, 2001)



Σχήμα 3.2 Σφήνα στην οροφή σήραγγας (Αγιουτάντης, 2001).

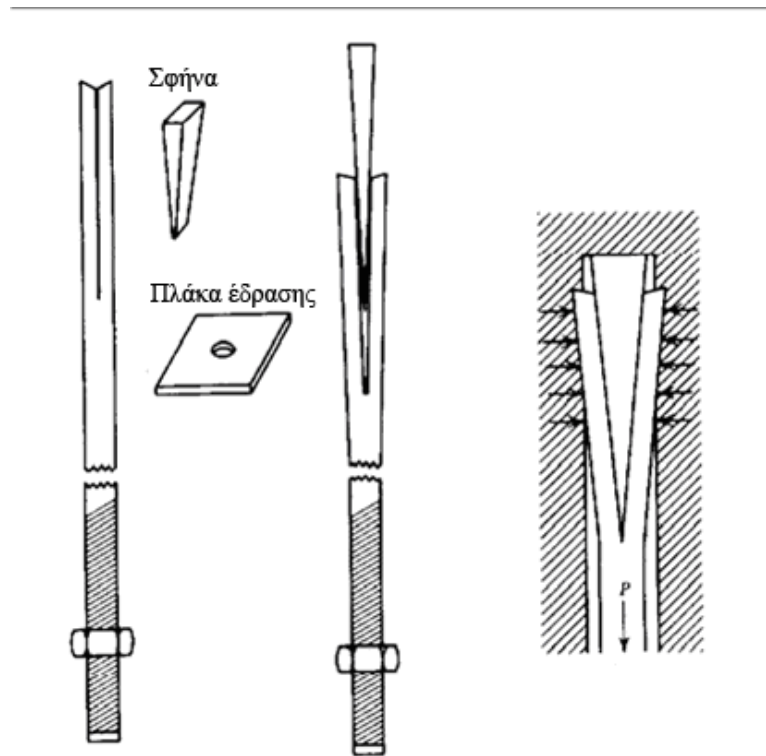
πετρώματος, τα οποία είναι δυνατόν να πέσουν κατακόρυφα από την οροφή ή να ολισθήσουν επάνω σε μία από τις επιφάνειες ασυνέχειας. Τα αγκύρια στην περίπτωση αυτή υποστηρίζουν το βάρος της σφήνας πάνω σε ευσταθές κομμάτι βραχώμαζας.

1. Ήλοι με εγκοπή και σφήνα

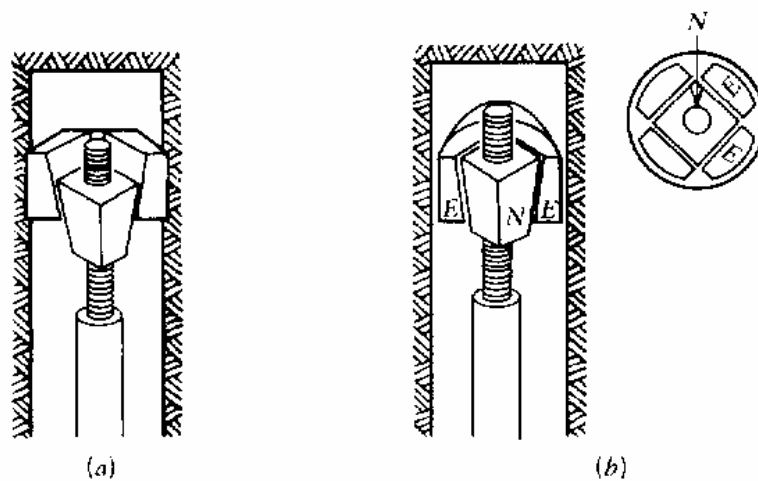
Τυπική μορφή τέτοιου ήλου φαίνεται στο Σχήμα 3.3. Ο ήλος κατασκευάζεται από ελάσιμο χάλυβα, και το στέλεχός του έχει διάμετρο 22-30 mm και μήκος 0,5 έως 2,5 m. Το ένα άκρο του ήλου έχει εγκοπή μήκους 150 mm και πάχους 2-3 mm. Μία σφήνα είναι τοποθετημένη στο άκρο της εγκοπής, έτσι ώστε πιεζόμενη να διευρύνει 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 (Σοφιανός, 2002).

2. Ήλοι με διευρυνόμενο κέλυφος

Τυπικός ήλος με διευρυνόμενο κέλυφος φαίνεται στο Σχήμα 3.4. Αποτελείται από στέλεχος 17-22 mm στο άκρο του οποίου υπάρχει σπείρωμα στο οποίο είναι βιδωμένο κωνικό στοιχείο N. Γύρω από το στοιχείο αυτό υπάρχουν κελύφη E (4 στο σχήμα) που μετακινούνται κάθετα στον άξονα του ήλου, καθώς το στοιχείο N μετακινείται αξονικά με τη βοήθεια συστήματος σύσφιγξης (π.χ. δυναμόκλειδο). Η τάνυση του ήλου επιτυγχάνεται με τη σύσφιγξη του περικοχλίου πάνω στην πλάκα έδρασης (Σοφιανός, 2002).



Σχήμα 3.3 Ήλος με εγκοπή και σφήνα (Πηγή: Σοφιανός, 2002)



Σχήμα 3.4 Ήλος με διευρυνόμενο κέλυφος (Πηγή: Σοφιανός, 2002)

3. Ήλοι/Αγκύρια σημειακής πάκτωσης με μηχανισμό διαστελλόμενου άκρου (Mechanically Anchorade Bolts)

Πρόκειται για ράβδους (συνήθως κυκλικής ή άλλης διατομής) από χάλυβα (ενδεχομένως και από άλλο υλικό όπως υαλόνημα, σκληρό πλαστικό ή ανθρακόνημα) που στο άκρο τους έχουν 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 αρκετά συμπαγές και ανθεκτικό και αυτό συνεπάγεται ότι αυτό πρέπει να αναζητείται ενδεχομένως με μετατόπιση της θέσης του διαστελλόμενου άκρου. Η λειτουργία των αγκυρίων/ήλων αυτού του τύπου έγκειται στην δυνατότητα ανάληψης εφελκυστικών δυνάμεων στο ελεύθερο άκρο (με μεσολάβηση πλάκας διανομής και περικοχλίου) που μεταφέρεται σε απομακρυσμένη μάζα του περιβάλλοντος (σταθερού) πετρώματος. Είναι κατάλληλα για πετρώματα συμπαγή και αρκετά ανθεκτικά (www.iok.gr, 2005).

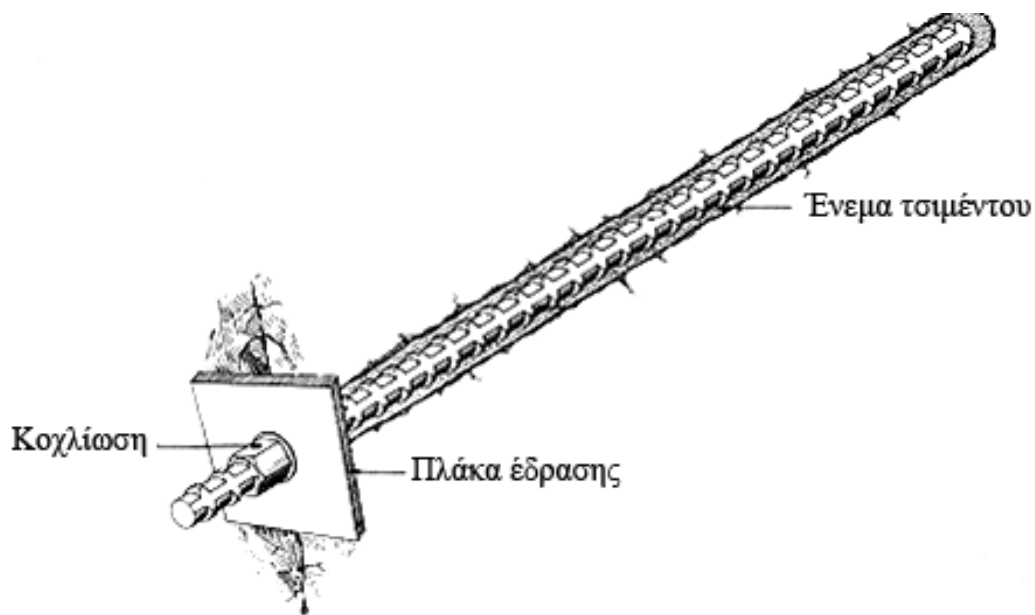
4. Ήλοι/Αγκύρια σημειακής πάκτωσης μέσω ρητινικής κόλλας (Resin Rock Bolts)

Πρόκειται για ράβδους (συνήθως κυκλικής ή άλλης διατομής) από χάλυβα ή άλλο υλικό (π.χ. υαλόνημα, σκληρό πλαστικό κ.λπ.) που πακτώνονται στο άκρο τους 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 αγκύρια μερικής πάκτωσης και με κατάλληλη επιλογή του μήκους της ρητινικής κάψας (μία ή 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/και 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/ήλων 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 την διάνοιξη της σήραγγας (www.iok.gr, 2005).

Β. Αγκύρια συνεχούς πάκτωσης

Τα αγκύρια συνεχούς πάκτωσης (ή βλήτρα κατανεμημένης αγκύρωσης - Fully Grouted-Bolts) συγκολλούνται με το περιβάλλον πέτρωμα σε ολόκληρο το μήκος τους με τη βοήθεια τσιμεντενέματος ή ρητινικού ενέματος (Σχήμα 3.5). Πρόκειται για ράβδους (συνήθως κυκλικής ή άλλης διατομής) από χάλυβα ή άλλο υλικό (π.χ. υαλόνημα) που πακτώνονται μέσω τσιμεντενέματος σε όλο το μήκος μέσα σε διάτρηση στο έδαφος ή στον βράχο (ελαφρώς μεγαλύτερης διαμέτρου). Στο ελεύθερο άκρο τους οι ράβδοι στερεώνονται (με κοχλία ή με σφήνα) με την μεσολάβηση πλάκας διανομής και ελαφρά τάνυση/σύσφιγξη, έχοντας το αναγκαίο προεξέχον μήκος για την 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 (www.iok.gr, 2005).



Σχήμα 3.5 Ραβδοχάλυβας πακτωμένος με ένεμα (Πηγή: Σοφιανός, 2002)

1. Ήλοι πακτωμένοι με τσιμεντένεμα

Το τσιμεντένεμα, που συνίσταται από τσιμέντο, λεπτή άμμο και νερό, τοποθετείται στο μισό του μήκους του διατρήματος. Για διατρήματα στην οροφή, προκειμένου να μη ρέει το ένεμα προς τα έξω, τοποθετείται στην είσοδό τους τάπα. Επίσης, τοποθετείται λεπτή σωλήνα που φθάνει μέχρι το βάθος του διατρήματος, για την απαγωγή του αέρα. Εν συνεχεία εισέρχεται χάλυβας οπλισμού με ραβδώσεις. Μετά την πήξη του το τσιμεντένεμα συγκρατεί το βλήτρο στη θέση του (Σοφιανός, 2002).

Σε ρωγματομένο πέτρωμα που το νερό του ενέματος χάνεται εύκολα χρησιμοποιούνται ήλοι τύπου Perfo (Fully Grouted Bolts-Perfo Type). Είναι αγκύρια/ήλοι όπως τα απλά συνεχούς πάκτωσης με τη 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 ή 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 και 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 κερματισμένοι βράχοι με κενά). Κατά τα λοιπά η λειτουργία των αγκυρίων αυτού του τύπου είναι ίδια με εκείνη των απλών αγκυρίων συνεχούς πάκτωσης (www.iok.gr, 2005).

Υπάρχουν και αγκύρια/ήλοι μερικής πάκτωσης (Partially Fixed Bolts), τα οποία λειτουργούν όπως τα απλά αγκύρια συνεχούς πάκτωσης με τη διαφορά ότι η ράβδος είναι πλήρως πακτωμένη σε τμήμα (προς το τυφλό άκρο) του μήκους της διάτρησης, ενώ κατά το υπόλοιπο μήκος της μπορεί να παραμορφώνεται ελεύθερα τοποθετημένη μέσα σε πλαστικό σωλήνα. Η λειτουργία του αγκυρίου είναι περισσότερο προορισμένη στο να μεταφέρει εφελκυστικές δυνάμεις σε πιο απομακρυσμένη μάζα του περιβάλλοντος πετρώματος. Το τσιμεντένεμα πάκτωσης γεμίζει το σύνολο του μήκους του διατρήματος (www.iok.gr, 2005).

2. Ήλοι πακτωμένοι με ρητινικό ένεμα

Οι ήλοι που πακτώνονται με τσιμεντένεμα έχουν το μειονέκτημα ότι απαιτούν μεγάλο χρονικό διάστημα μέχρι να μπορέσουν να παραλάβουν φορτία. Γι' αυτό

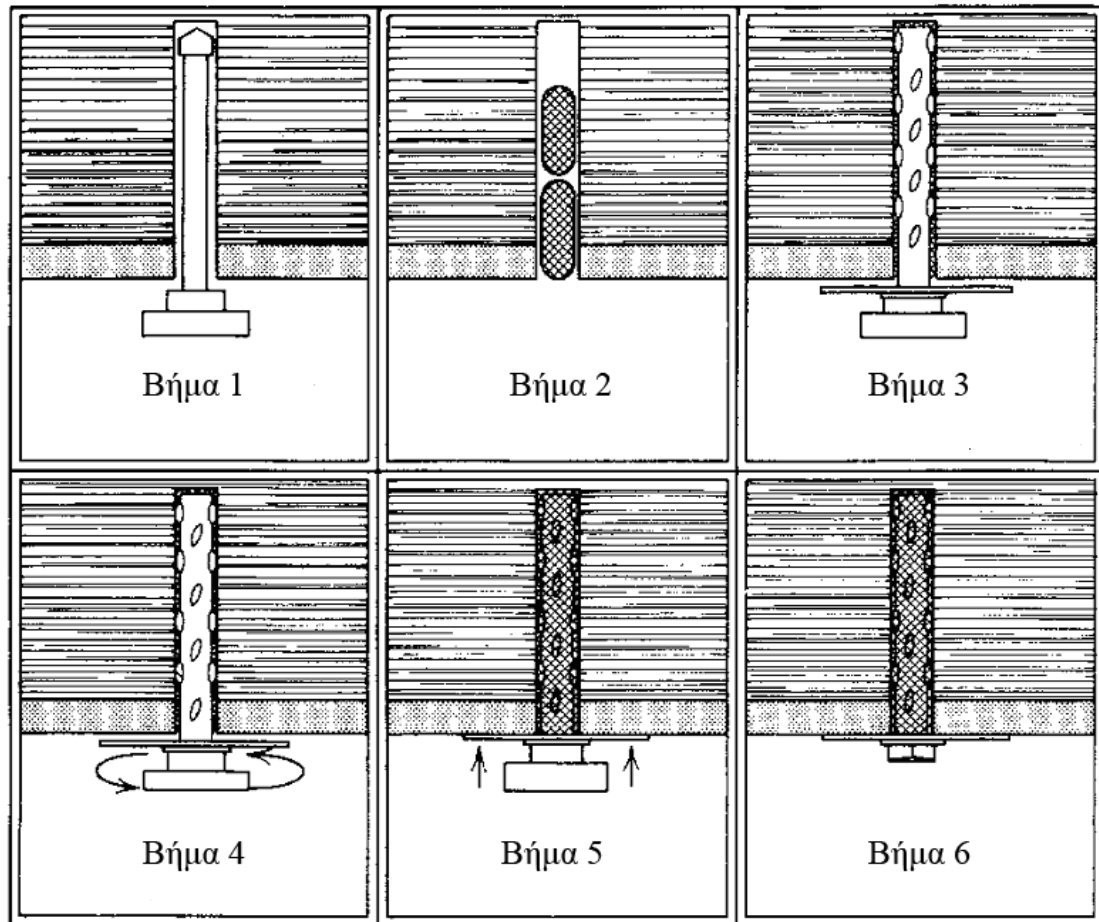
αναπτύχθηκαν ρητίνες που έπηζαν και αποκτούσαν αντοχή μέσα σε λίγα λεπτά. Τα συστατικά της ρητίνης διαφέρουν από κατασκευαστή σε κατασκευαστή. Διαφορετικές αναλογίες των συστατικών έχουν σαν αποτέλεσμα διαφορετικές αντοχές, χρόνους πήξης, αντίστασης στο περιβάλλον, κλπ. Βασικά συστατικά ενός τυπικού ρητινικού ενέματος είναι: πολυεστερική ρητίνη 28,5%, κονιορτοποιημένος ασβεστόλιθος ως πληρωτικό (filler) 66%, επιταχυντής 0,5% και καταλύτης. Προκειμένου να μην έρθουν σε επαφή τα τρία πρώτα συστατικά με τον καταλύτη, συσκευάζονται ξεχωριστά. Συνήθως είναι πακεταρισμένα σε φυσίγγια με τη μία συσκευασία μέσα στην άλλη. Τα φυσίγγια έχουν μήκος μεταξύ 30 έως 120 cm και διάμετρο 2,5 έως 3,5 cm. Η μέγιστη δυνατότητα πάκτωσης επιτυγχάνεται σε λιγότερο από 5 λεπτά, και μετά την πλήρη ωρίμανσή της η ρητίνη έχει τις ακόλουθες φυσικές ιδιότητες: μονοαξονική θλιπτική αντοχή 112 MPa, εφελκυστική αντοχή 63 MPa, διατμητική αντοχή 50 MPa. Η δύναμη την οποία δύναται να αναλάβει η πάκτωση εξαρτάται από τον τύπο του πετρώματος και από το μήκος πάκτωσης. Η διαδικασία τοποθέτησης των ήλων φαίνεται στο Σχήμα 3.6: Διανοίγεται το διάτρημα, τοποθετούνται τα φυσίγγια ρητίνης, εισέρχεται ο ήλος, περιστρέφεται ο ήλος προκειμένου να αναμιχθούν τα συστατικά, και εφαρμόζεται ώση με κατάλληλο μηχανήμα για 20-30 δευτερόλεπτα.

Γ. Ήλοι τριβής

Οι ήλοι τριβής διακρίνονται σε ήλους με διαμήκη σχισμή και σε διογκούμενους ήλους. Στο εμπόριο οι πρώτοι ονομάζονται Split Set® (Σχήμα 3.7), και οι δεύτεροι Swellex® (Σχήμα 3.8).

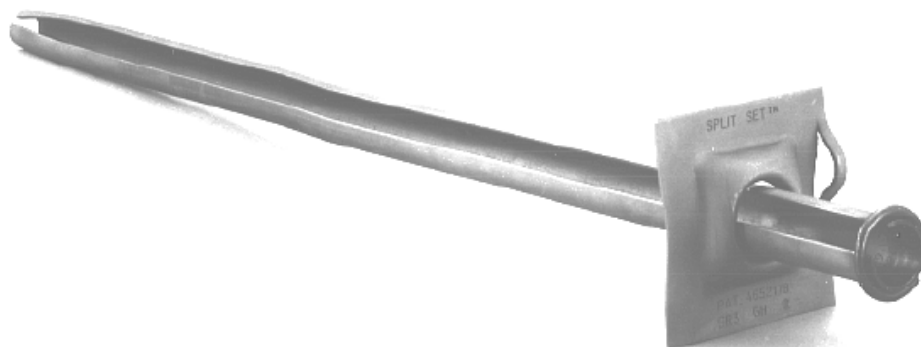
1. Ήλοι με διαμήκη σχισμή (Split set®)

Οι ήλοι Split set αναπτύχθηκαν από τον Scott το 1976 και κατασκευάζονται και διανέμονται από την εταιρία Ingersoll – Rand. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.7, το κύριο τμήμα τους είναι μία ράβδος κατασκευασμένη από σωλήνα χάλυβα υψηλής αντοχής και σκληρότητας, που φέρει διαμήκη σχισμή και εισάγεται με πίεση ή και κρούσεις σε διάτρημα (ελαφρώς μικρότερης διαμέτρου). Έτσι, σφηνώνονται σε όλο το μήκος του διατρήματος που βρίσκεται σε ανθεκτικό πέτρωμα. Το ελεύθερο άκρο τους, μέσω πλάκας διανομής, στερεώνεται στα στοιχεία της άμεσης υποστήριξης της σήραγγας. Λειτουργεί με τις τριβές κατά το εμπηγμένο μήκος του, προσφέροντας σύσφιγξη του πετρώματος. Η ικανότητά τους, η οποία αναπτύσσεται αμέσως μετά την έμπηξη, εξαρτάται από την ανθεκτικότητα του πετρώματος ώστε να είναι



Σχήμα 3.6 Διαδικασία τοποθέτησης ηλώσεων ρητίνης: (1) Διάνοιξη διατρήματος, (2) τοποθέτηση φυσιγγίων ρητίνης, (3) εισχώρηση ήλου, (4), περιστροφή ήλου προκειμένου να αναμιχθούν τα συστατικά, (5) εφαρμογή ώσης με κατάλληλο μηχανήμα για 20-30 δευτερόλεπτα και (6) ολοκλήρωση διαδικασίας (Πηγή: Σοφιανός, 2002)

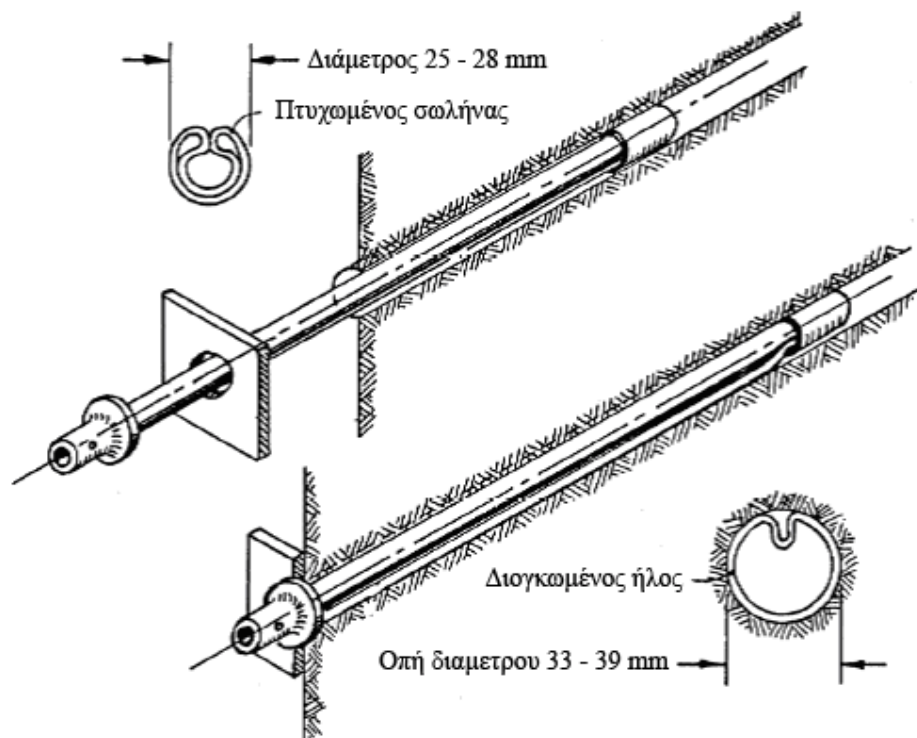
συσφιγμένος ο σχισμένος σωλήνας. Προσφέρεται για ανθεκτικά ρηγματωμένα πετρώματα, αλλά μειονεκτεί κυρίως λόγω της διάβρωσης που επέρχεται στο εξωτερικό τμήμα του, αλλά και στον λεπτότοιχο σωλήνα (www.iok.gr, 2005).



Σχήμα 3.7 Ήλος τριβής Split Set® (Πηγή: Hoek, 2000)

2. Διογκούμενοι ήλοι (Swellex®)

Οι ηλώσεις χωρίς ενεμάτωση τύπου Swellex αναπτύχθηκαν και παράγονται από την εταιρεία Atlas-Corco (Σχήμα 3.8). Το κύριο τμήμα τους είναι ένας συνεπτυγμένος σωλήνας από χάλυβα υψηλής αντοχής που εισάγεται σε διάτρημα ελαφρώς μεγαλύτερης διαμέτρου. 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 όταν είναι διεσταλμένος με το περιβάλλον πέτρωμα. Τα προσόντα αυτού του τύπου αγκυρίων έγκεινται στην συμπίεση του πετρώματος και την αμεσότητα της λειτουργίας χωρίς να απαιτείται αναμονή στερέωσης με ένεμα ή κόλλα. Το μειονέκτημά τους έγκεινται στην ενδεχόμενη χαλάρωση του δεσμού τους λόγω ερπυσμού του συστήματος συμπιεζόμενου πετρώματος και χάλυβα που μπορεί να εμφανίζεται μακροπρόθεσμα. 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



Σχήμα 3.8 Ήλος τριβής Swellex® (Πηγή: Hoek, 2000)

σχεδόν κάθε είδους πέτρωμα πλην ασύνδετων και μη συνεκτικών υλικών που δεν επιτρέπουν τη μόρφωση μη επενδεδυμένων διατρημάτων. Είναι πιο αποτελεσματικά στην συγκράτηση διαμορφωμένων σφηνών σε σκληρές βραχώμαζες λόγω της άμεσης επενέργειάς τους (www.iok.gr, 2005).

Σύγκριση χαρακτηριστικών των ήλων τριβής με τα υπόλοιπα αγκύρια, καθώς και περιγραφή των επιμέρους πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων γίνεται περιληπτικά στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1 Τυπικά τεχνικά χαρακτηριστικά συστημάτων αγκύρωσης (Πηγή: USACE, 1997)

Παράμετρος	Αγκυρωμένο			Split-set	Swellex
	Αγκυρωμένο μηχανικά	με ρητινικό ένεμα	Ενεματωμένο με τσιμέντο		
Ποιότητα χάλυβα (MPa)	700	570	1.080	Ειδική	Ειδική
Διάμετρος χάλυβα (MPa)	16	20	20	39	26
Φορτίο αστοχίας, χάλυβας (kN)	140	120	283	90	130
Μέγιστο φορτίο, χάλυβας (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 διά-μετρος διατρή -ματος (mm)	35-38	30-40	32-38	35-38	32-38
Πλεονεκτήματα	Οικονομικά. Άμεση υποστήριξη. Μπορεί να είναι μόνιμα. Υψηλά φορτία αγκύρωσης.	Άμεση υποστήριξη. Μπορούν να προενταθούν. Υψηλή αντοχή σε διάβρωση. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα περισσότερα πετρώματα.	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 ποικιλία συνθηκών.
	Χρήση μόνο σε σκληρά πετρώματα. Δύσκολη αξιόπιστη εγκατάσταση. Απαιτείται έλεγχος για την κατάλληλη προένταση. Μπορεί να χαλαρώσουν λόγω ανατίναξης	Το ένεμα έχει περιορισμένο χρόνο ζωής. Ευαίσθητα σε περιβάλλοντα σηράγγων.	Απαιτούν μεγαλύτερο χρόνο εγκατάστασης από αυτούς με ρητίνη. Μπορούν να παραλάβουν υψηλά φορτία.	Οικονομικά. Κρίσιμη η διάμετρος διατρήματος. Μόνο μικρού μήκους. Δεν έχουν αντοχή στη διάβρωση.	Οικονομικά. Δεν έχουν αντοχή στη διάβρωση. Απαιτούν ειδική αντλία.
Μειονεκτήματα					

Δ. Συρματόσκοινα

Τα συρματόσκοινα είναι κατασκευασμένα από χάλυβα, ενώ ένα τυπικό συρματόσκοινο παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.9. Αυτά πακτώνονται με τσιμεντένεμα σε όλο το μήκος τους μέσα σε διατρήματα, με το ελεύθερο άκρο τους στερεωμένο, με ειδική κεφαλή (κώνου, σφήνας κλπ.) και με μεσολάβηση χαλυβοπλάκας διανομής. Δύο εναλλακτικοί τρόποι πάκτωσης με τσιμεντένεμα παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.10. Η ικανότητά της αγκύρωσης ορίζεται από την εφελκυστική αντοχή του συρματόσχοινου και από τις δυνάμεις τριβής στις διεπιφάνειες συρματόσχοινου-τσιμεντενέματος-περιβάλλοντος πετρώματος. Η αγκύρωση λειτουργεί μεταφέροντας δυνάμεις στο απομακρυσμένο άκρο του ή/και ενισχύοντας την περιβάλλουσα εδαφική μάζα. Συνήθως χρησιμοποιείται σε προοδευτικές διανοίξεις όπου έχουν προεγκατασταθεί τα αγκύρια (www.ioek.gr, 2005).

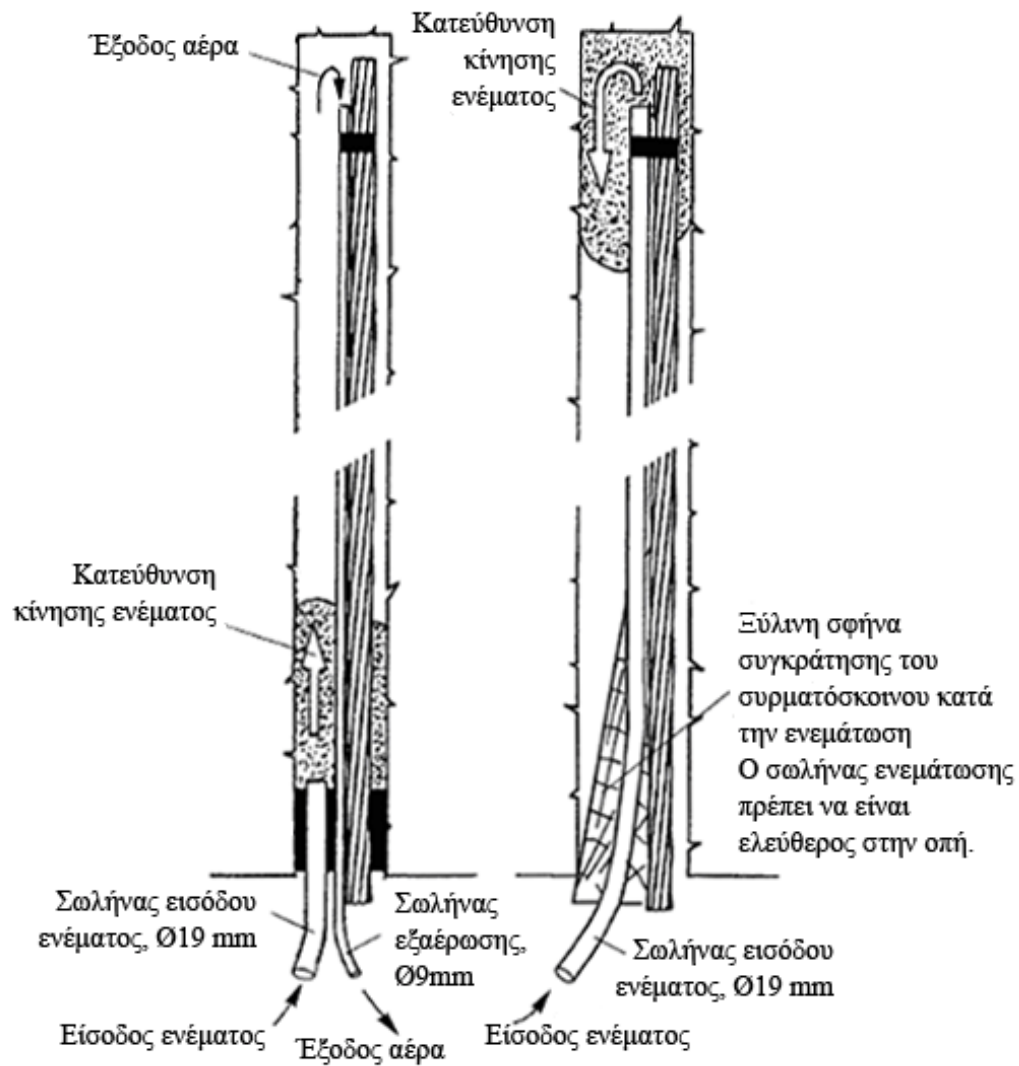
Τα αγκύρια είναι γενικά οικονομικότερα και γρηγορότερα στην εγκατάστασή τους σε σχέση με τα συρματόσχοινα, ωστόσο τα συρματόσχοινα είναι πολύ πιθανό να εγκατασταθούν ευκολότερα όταν απαιτούνται μακριά στοιχεία ενίσχυσης. Συχνά χρησιμοποιούνται συνδυασμοί συρματόσχοινων και αγκυρίων, ώστε να εκμεταλλευτούν τα πλεονεκτήματα και των δύο. Τα αγκύρια εγκαθίστανται κοντά στο μέτωπο για άμεση υποστήριξη, ενώ τα συρματόσχοινα δύνανται να εγκατασταθούν στη συνέχεια ως το κύριο σύστημα ενίσχυσης (Hoek, 2000).

3.1.3 Πλάκες στήριξης

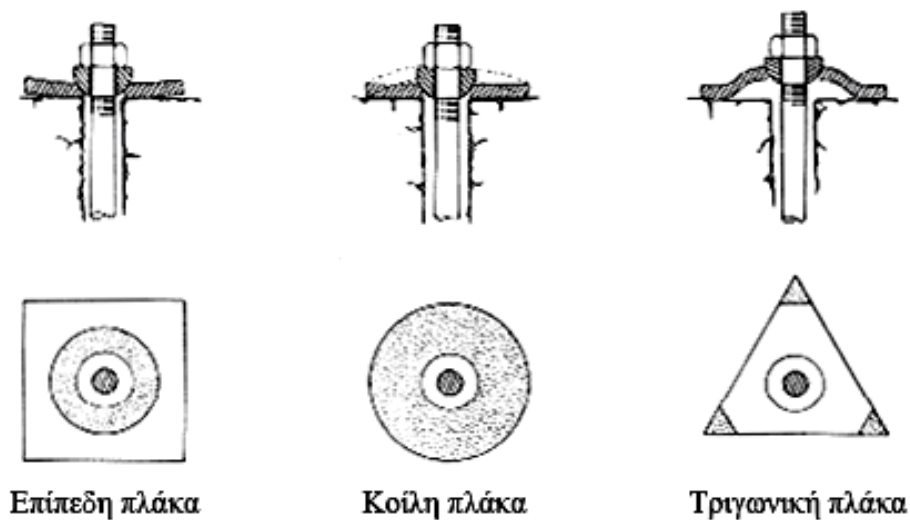
Οι πλάκες που τοποθετούνται στην κεφαλή των αγκυρίων (Σχήμα 3.11) μεταβιβάζουν φορτίο από τον ήλο στο πέτρωμα και σταθεροποιούν το πέτρωμα γύρω από τον ήλο (Σοφιανός, 2002).



Σχήμα 3.9 Τυπικό δείγμα συρματόσχοινου (Πηγή: Hoek, 2000)



Σχήμα 3.10 Εναλλακτικοί τρόποι πάκτωσης συρματόσκοινων με τσιμεντένεμα (Πηγή: Hoek, 2000)



Σχήμα 3.11 Πλάκες στήριξης (Πηγή: USACE, 1997)

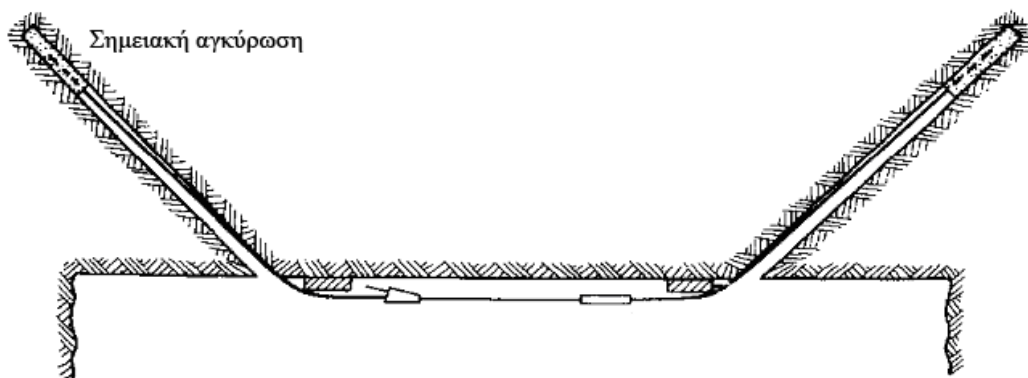
3.2 Εξωτερική στήριξη βραχόμαζας

3.2.1 Δικτύωμα οροφής

Τα δικτυώματα οροφής (Σχήμα 3.12) σχεδιάσθηκαν σύμφωνα με πατέντα του White, και τις εν συνεχεία βελτιώσεις της. Όπου το πέτρωμα είναι βαρύ τα δικτυώματα οροφής αποτελούν τη λύση για να συγκρατήσουν ανοίγματα που άλλως συγκρατούνται με εσωτερική στήριξη. Οι επίπεδες οριζόντιες οροφές αναπτύσσουν εφελκυστικές ζώνες στο μέσον τους. Τα εν λόγω δικτυώματα εφαρμόζουν από κάτω πίεση στην οροφή, με αποτέλεσμα την εξάλειψη αυτών των ζωνών. Το δικτύωμα οροφής αποτελείται από σύστημα αγκύρωσης δύο σημείων, κατά προτίμηση ρητινικών, μία συνδετική ράβδο, σύστημα τάνυσης της ράβδου, τάκους στήριξης, και ρυθμιστή μήκους. Καλά αποτελέσματα δικτυωμάτων οροφής, για ανοίγματα (από διάτρημα σε διάτρημα) 2.5-3.5m, επιτυγχάνονται για κλίσεις των διατρημάτων $\sim 60^\circ$ (Σοφιανός, 2002).

3.2.2 Μεταλλικά πλαίσια

Τα μεταλλικά πλαίσια που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι από χάλυβα και αποτελούνται γενικά από στοιχεία σχετικά δύσκαμπτα για το μέγεθός τους, ενώ οι συνδέσεις μεταξύ των στοιχείων είναι άλλοτε λίγο και άλλοτε πολύ δύσκαμπτες ανάλογα 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



Σχήμα 3.12 Δικτύωμα οροφής (Πηγή: Σοφιανός, 2002)

μόνα ή σε συνδυασμό με άλλα μέτρα όπως μεταλλικά φύλλα, ήλους, επένδυση από σκυρόδεμα, δομικό πλέγμα, κλπ.

Οι μορφές των μερών που τα αποτελούν, προσαρμόζονται στο περίγραμμα του ανοίγματος όσο το δυνατόν περισσότερο. Κατά συνέπεια, όπου το περίγραμμα είναι καμπύλο τα μέρη κάμπτονται για να ταιριάζουν με την ακριβή μορφή του περιγράμματος. Ο όρος πλαίσιο χαρακτηρίζει οποιαδήποτε δύσκαμπτη, ασυνεχί κατά μήκος του υπογείου ανοίγματος, κατασκευή υποστήριξης που τοποθετείται στο τοίχωμά του για την υποστήριξή του.

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:

- α) Μόνος σκοπός είναι η προστασία από καταπτώσεις μεμονωμένων τεμαχίων 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.
- β) 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, παραλαμβάνουν ένα 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.

Για ένα παλαιό υπόγειο έργο που απαιτείται να στερεωθεί ή να αποκατασταθεί, τα πλαίσια γενικά πρέπει να είναι σε θέση να διατηρήσουν απαραμόρφωτο το σχήμα της διατομής αναλαμβάνοντας από κοινού με τον υπάρχοντα φορέα, το σύνολο της πίεσης σταθεροποίησης. Πρέπει επίσης να ικανοποιούν απαιτήσεις μεγέθους, ώστε να αφήνονται χώροι διέλευσης που να επιτρέπουν την κανονική λειτουργία. Τα πλαίσια αυτά «ενισχύουν».

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 επειδή 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 μεγάλης ευελιξίας προσαρμογής του στο πέτρωμα.

Τα περισσότερα από τα πλαίσια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για προστασία, υποστήριξη, ή ενίσχυση ανάλογα με τον τύπο της βραχομάζας και το μέγεθος του ανοίγματος (Σοφιανός, 2002).

A. Βαριά πλαίσια

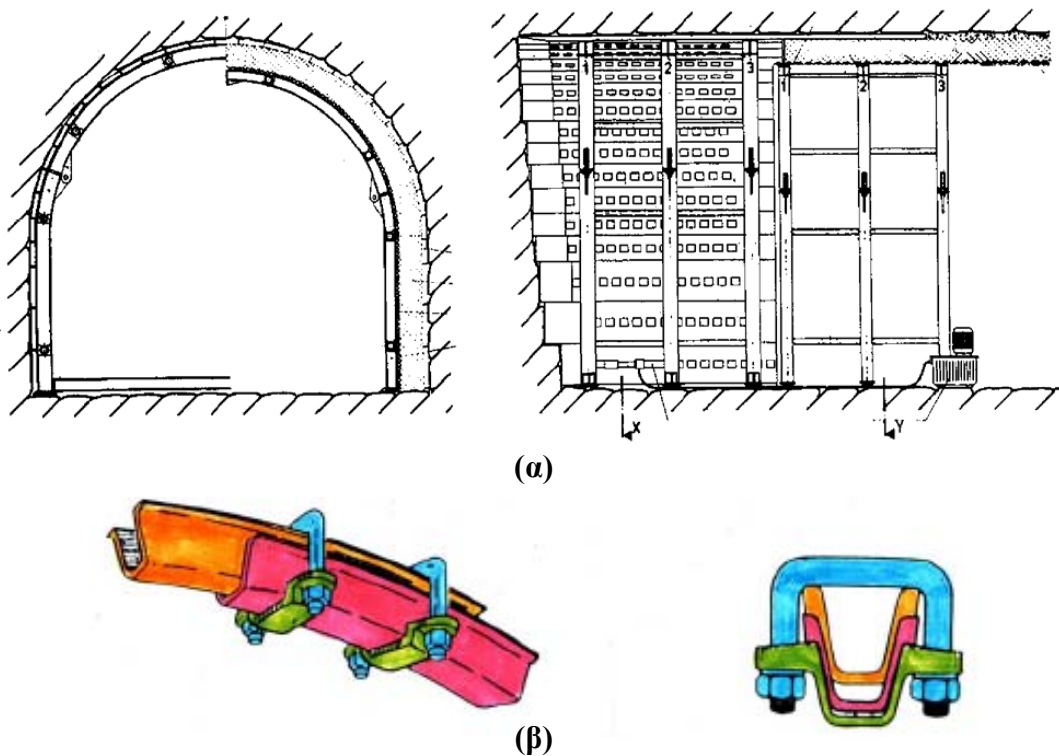
Όσον αφορά τα βαριά πλαίσια, λόγω της μεγάλης αντίστασής τους στην παραμόρφωση, μερικές διατομές υπόκεινται στον κίνδυνο ξαφνικής αστοχίας εάν η πίεση λόγω παρεμπόδισης της παραμόρφωσης της βραχομάζας υπερβαίνει την αντοχή του πλαισίου. Αυτό μπορεί να εμφανιστεί ειδικότερα σε βαθιά υπόγεια έργα. Με αυτήν την επιφύλαξη, μπορούν 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 συντίθενται από πρότυπες δοκούς μορφοχάλυβα διατομής απλής ή σε ζεύγος, από δικτυώματα μορφοχάλυβα, από αρθρωτές δοκούς, από ολισθαίνουσες δοκούς, και από δικτυώματα ράβδων. Οι απλές διατομές μορφοχάλυβα, που χρησιμοποιούνται γενικά είναι πρότυπες διατομές και συνήθως κάμπτονται, ώστε να ταιριάζουν στο θεωρητικό περίγραμμα του θόλου. Κάθε πλαίσιο αποτελείται από δύο έως δέκα επιμέρους στοιχεία, σύμφωνα με το μέγεθος της σήραγγας. Στην περίπτωση υπόγειων εκσκαφών που έχουν μια μέση έως μεγάλη διατομή (μεγαλύτερη από 30 m²) και ειδικά αν η εκσκαφή πραγματοποιείται σε φάσεις, τοποθετείται συχνά πρώτα το τμήμα του πλαισίου στο θόλο, το οποίο

υποστηρίζεται προσωρινά. Τα υπόλοιπα στοιχεία του πλαισίου τοποθετούνται με την προχώρηση των κάτω πλευρικών διανοίξεων. Η παραπάνω προσωρινή υποστήριξη μπορεί να παρασχεθεί από ήλους που τοποθετούνται σε κάθε πλευρά του πλαισίου. Τα στοιχεία του πλαισίου συναρμολογούνται με την κοχλίωση πλακών που είτε είναι συγκολλημένες στα μέτωπα στις άκρες κάθε στοιχείου είτε συνδέουν τους κορμούς.

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 3.13), 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. Μόλις τοποθετηθούν, οι αρθρώσεις κλειδώνουν ώστε να εξασφαλίζεται η δυσκαμψία.

B. Ελαφρά πλαίσια

Αυτά τα πλαίσια έχουν περιορισμένη φέρουσα ικανότητα και είναι ιδιαίτερα παραμορφώσιμα. Είναι πολύ ευκολότερα στον χειρισμό από τα βαριά πλαίσια και



Σχήμα 3.13 (α) Αρθρωτά πλαίσια (Πηγή: Σοφιανός, 2002) (β) Συναρμολόγηση αρθρώσεων (Πηγή: Hoek, 2000)

μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε για προστασία μόνο είτε για υποστήριξη της βραχομάζας. Όπως στην περίπτωση των βαριών πλαισίων, το πέτρωμα μπορεί να καλυφτεί με ξύλινες σανίδες, ή πτυχωμένα μεταλλικά φύλλα, ή δομικό πλέγμα. 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.

Στην περίπτωση των ολισθαίνοντων πλαισίων, η παραμορφωσιμότητα εξαρτάται από τον τρόπο που συνδέονται τα στοιχεία του πλαισίου, ο οποίος επιτρέπει την ελεγχόμενη ολίσθηση των μεταλλικών στοιχείων μεταξύ τους. Στους πιο κοινούς τύπους, τα στοιχεία τοποθετούνται με μια επικάλυψη περίπου 40 cm και στερεώνονται με σφιγκτήρες. Εάν η συμπεριφορά της βραχομάζας είναι ελαστική, σταθεροποίηση μπορεί να πραγματοποιηθεί γρήγορα. Αντίθετα, αν τα χαρακτηριστικά της βραχομάζας είναι τέτοια που η μέγιστη πίεση την οποία μπορεί να ασκήσει το πλαίσιο δεν είναι αρκετή για να εξασφαλιστεί η σταθερότητα, η μετακίνηση θα συνεχιστεί με μία σειρά ολισθήσεων. Το εύρος και η συχνότητα αυτών των μετακινήσεων εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του πλαισίου και της βραχομάζας. Σε αυτήν την περίπτωση, η σύγκλιση των τοιχωμάτων της σήραγγας απλώς επιβραδύνεται. Ο τύπος και η απόσταση των πλαισίων επιλέγονται έτσι ώστε η μετακίνηση να επιβραδύνεται αρκετά και η σύγκλιση να μην υπερβαίνει τις μέγιστες αποδεκτές τιμές στο χρονικό διάστημα μεταξύ της εκσκαφής και της τοποθέτησης της μόνιμης επένδυσης. Η διατομή που χρησιμοποιείται συχνότερα είναι το ανοιγμένο U.

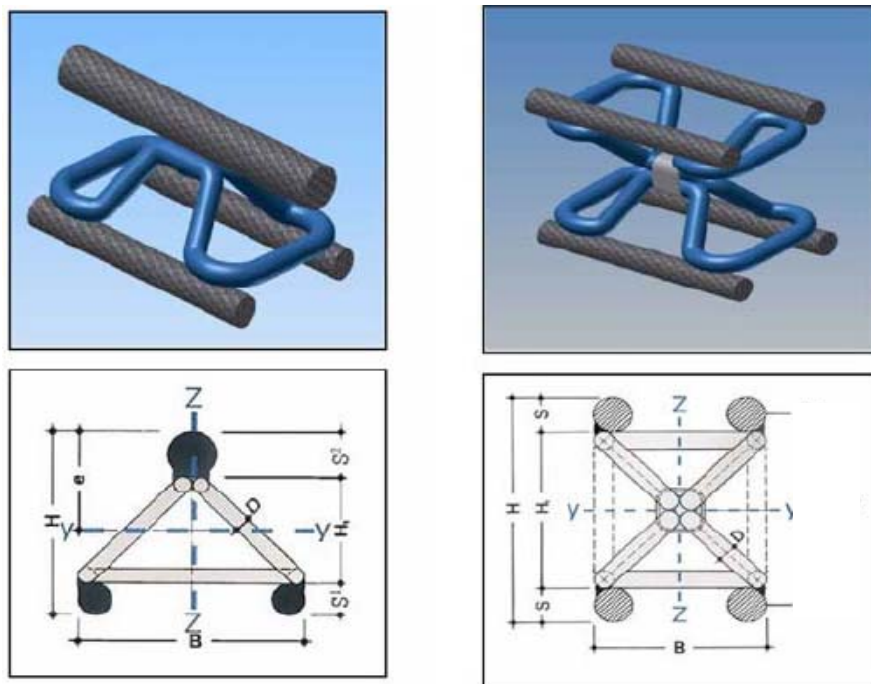
Το ολισθαίνον πλαίσιο ως προστασία τοποθετείται σε διανοίξεις σε σχετικά συμπαγή βραχομάζα όπου η σταθερότητα των τοιχωμάτων εξασφαλίζεται είτε φυσικά είτε από μια μικρή πίεση υποστήριξης, που εν πάση περιπτώσει είναι μικρότερη από τη φέρουσα ικανότητα των πλαισίων. Σε αυτήν την περίπτωση, ο βασικός ρόλος του πλαισίου είναι να προστατεύσει από επιφανειακή αστοχία του πετρώματος. Γενικά, πλαίσια που έχουν μικρό ως μέσο βάρος (10 έως 30 kg/m) συνδυάζονται με συρματόπλεγμα ή δομικό πλέγμα που τοποθετείται στο τοίχωμα. Τα πλαίσια αποτελούνται από επιμέρους στοιχεία (2, 3, ή 5 για πεταλοειδείς διατομές, 4 έως 6 για κλειστές κυκλικές διατομές). Τα πόδια των πεταλοειδών πλαισίων μπορούν να πακτώνονται στο έδαφος ή να εδράζονται σε πέδιλα.

Το ολισθαίνον πλαίσιο ως υποστήριξη τοποθετείται για να επιβραδύνει την παραμόρφωση της βραχομάζας και τη σύγκλιση των τοιχωμάτων της σήραγγας.

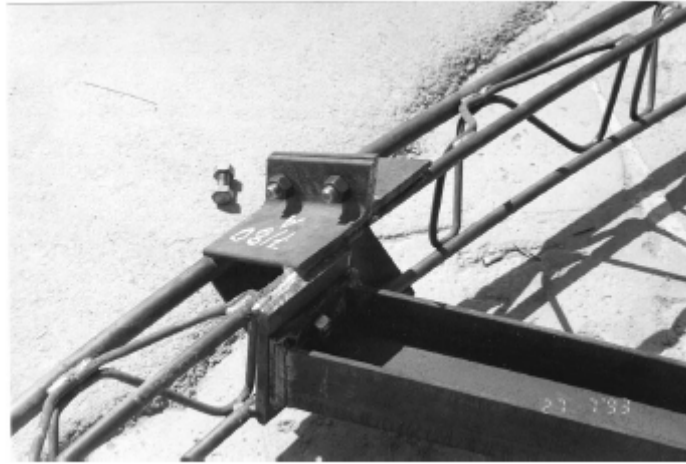
Μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε μόνο του είτε από κοινού με συρματόπλεγμα, συγκολλημένο δομικό πλέγμα, μεταλλικά φύλλα, ή ξύλινες σανίδες. Το ολισθαίνον πλαίσιο χρησιμοποιείται επίσης σε συνδυασμό με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και ηλώσεις. Αυτός ο σύμμεικτος φορέας, εξασφαλίζει με τη βραχομάζα την προσωρινή ή ακόμα και τη μόνιμη σταθερότητα της εκσκαφής. Η μορφή τους επιτρέπει την καλή κάλυψη από ψεκαζόμενο σκυρόδεμα, υπό τον όρο ότι το αυλάκι του πλαισίου βλέπει προς το εσωτερικό του ανοίγματος. Αυτό απαιτεί την κάμψη των δοκών με το κοίλο μέρος να είναι το εσωράχιο, δηλ. καμπυλώνονται σε διεύθυνση αντίθετη από τη συνηθισμένη. Η ενεργή πίεση του πετρώματος κατανέμεται στο σκυρόδεμα, το οποίο τη μεταβιβάζει στη συνέχεια στα πλαίσια. Αυτή η δράση βελτιώνεται με την τοποθέτηση ήλων που τοποθετούνται μέσα από τις αψίδες.

Ολισθαίνοντα ή ελαφρά πλαίσια, μόνα τους ή σε συνδυασμό με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, αλλά δίχως ηλώσεις, δεν χρησιμοποιούνται για τη διάνοιξη υπόγειων έργων που έχουν άνοιγμα που υπερβαίνει τα 6 έως 8 m.

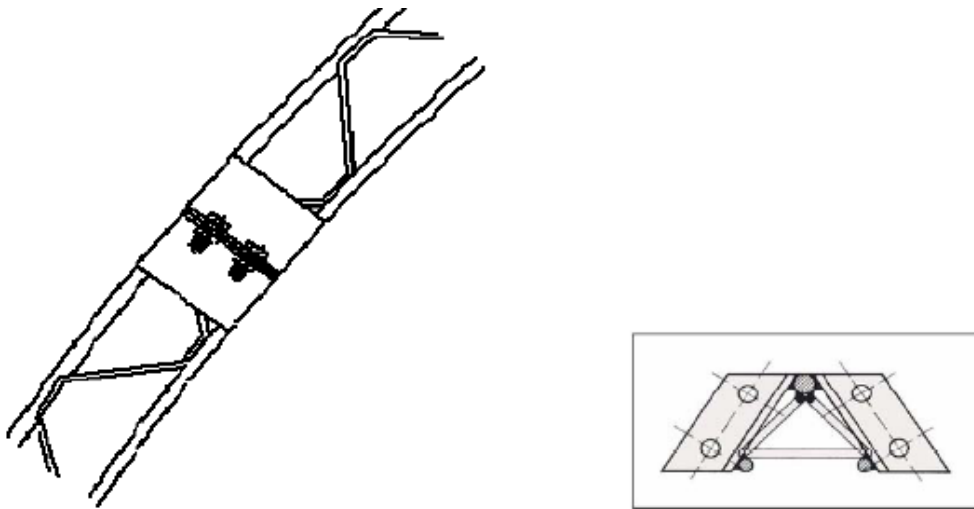
Στα δικτυωτά πλαίσια (δικτυώματα ράβδων – lattice girders) (Σχήματα 3.14 – 3.16), ο όρος «δικτυωτό» αναφέρεται σε μεταλλικό φορέα αποτελούμενο από στρογγυλές ράβδους. Τα πλαίσια αυτά μπορούν να θεωρηθούν ως πλαίσια σκυροδέματος, επειδή δεν χρησιμοποιούνται ποτέ μόνα τους αλλά για να ενισχύσουν το σκυρόδεμα. Λειτουργούν ως οπλισμός δοκού στην οποία οι διαμήκεις ράβδοι



Σχήμα 3.14 Δικτυωτά πλαίσια τριών και τεσσάρων (διαμήκων) ράβδων (Πηγή: Σοφιανός, 2002).



Σχήμα 3.15 Δικτυωτά πλαίσια (Πηγή: Καββαδάς, 2002)



Σχήμα 3.16 Σύνδεση δικτυωτού πλαισίου (Πηγή: Σοφιανός, 2002)

κάμπτονται στο σχήμα της εκσκαφής. Η διατομή αυτών των στοιχείων είναι γενικά τριγωνική. 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 40 m²). 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. Πλαίσια με δικτυωτό οπλισμό είναι σχετικά φθηνά και απαιτούν

συνήθη υλικά εύκολα διαθέσιμα στις περισσότερες περιοχές. Όμως, έχουν συχνά το μειονέκτημα απαιτήσεων επένδυσης σκυροδέματος μεγαλύτερου πάχους και επομένως μεγαλύτερης εκσκαφής (Σοφιανός, 2002).

Στοιχεία έδρασης των πλαισίων

Η μορφή των σταθερώνεδράνων εξαρτάται από τον τύπο του πλαισίου και από την φέρουσα ικανότητα του εδάφους κάτω από το δάπεδο. Στην περίπτωση των βαριών μεταλλικών ασφίδων, το έδρανο είναι δοκός, ξύλινη ή από σκυρόδεμα, που τοποθετείται κατά μήκος της σήραγγας. Σε πολύ ψηλές κατασκευές, όταν η εκσκαφή πραγματοποιείται σε διάφορα στάδια, κατασκευάζεται συχνά στο δάπεδο της πρώτης φάσης εκσκαφής μία προσωρινή διεύρυνση έξω από το περίγραμμα της σήραγγας, για να εξασφαλίσει τη σταθερότητα του άνω τμήματος του πλαισίου πριν από την εκσκαφή της επόμενης φάσης. Τέλος, όταν τα πλαίσια εκτίθενται σε μεγάλες οριζόντιες πιέσεις ή όταν το έδαφος διογκώνεται, μπορεί να απαιτείται η τοποθέτηση αντηρίδων που ενώνουν τα δύο εκατέρωθεν πόδια του πλαισίου.

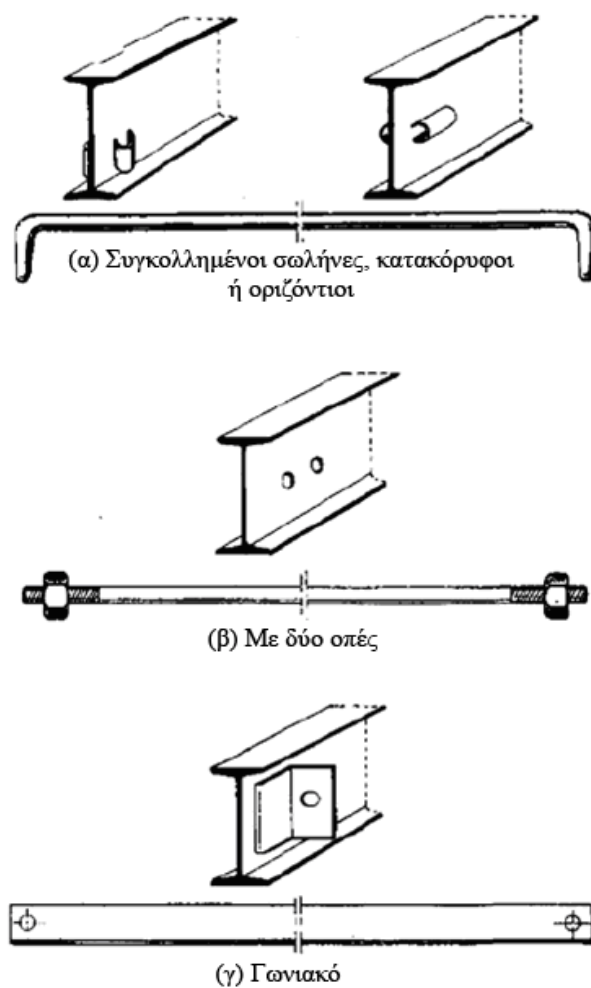
Για να αποτρέπεται ο λυγισμός τους και να εξασφαλίζεται η διαμήκης διασύνδεση και δυσκαμψία τους, χρησιμοποιούνται αντηρίδες, οι οποίες μπορεί να είναι:

- στρογγυλές ράβδοι με καμπυλωμένα άκρα (Σχήμα 3.17α) ώστε να εισέρχονται στους οριζόντιους ή κάθετους σωλήνες που είναι συγκολλημένοι στον κορμό των ασφίδων
- στρογγυλές ράβδοι που εισέρχονται σε διατρήματα στον κορμό των ασφίδων και συσφίγγονται σε αυτές με κοχλίες (Σχήμα 3.17β)
- λωρίδες ή πρότυπες διατομές (γωνίες ή U) που κοχλιώνονται ή συγκολλούνται (Σχήμα 3.17γ) στον κορμό ή το εσωράχιο των ασφίδων.

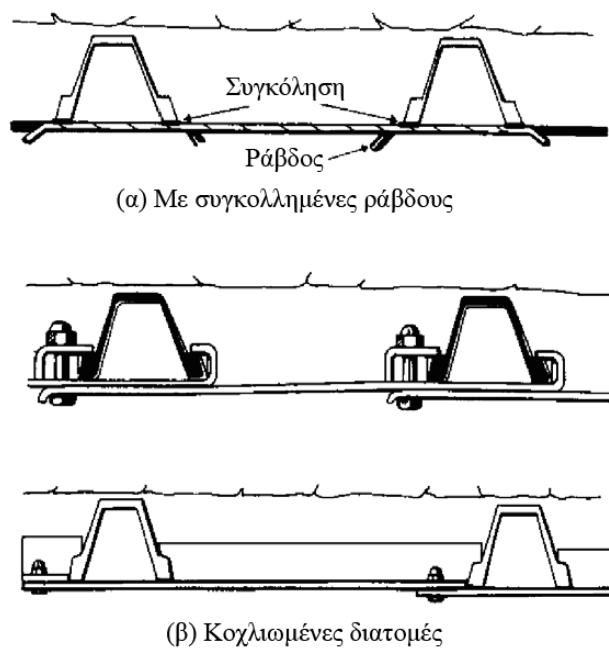
Η σύνδεση ολισθαινόντων πλαισίων φαίνεται στο σχήμα Σχήμα 3.18 (Σοφιανός, 2002).

3.2.3 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Ο όρος εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (shotcrete) χρησιμοποιείται για σκυροδέματα που συνίστανται από τσιμέντο, νερό και λεπτόκοκκα αδρανή (συνήθως έως 10 mm), τα οποία εφαρμόζονται με εκτόξευση (με τη βοήθεια πεπιεσμένου αέρα). Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα παρασκευάζεται είτε ως ξηρό μίγμα (dry mix) με προσθήκη νερού στο στόμιο εκτοξεύσεως είτε ως υγρό μίγμα (wet mix) όπου η ανάμιξη με νερό γίνεται στον αναδευτήρα κατά την παρασκευή του μίγματος. Το υγρό μίγμα



Σχήμα 3.17 Αρθρωτά πλαίσια (Πηγή: Σοφιανός, 2002)



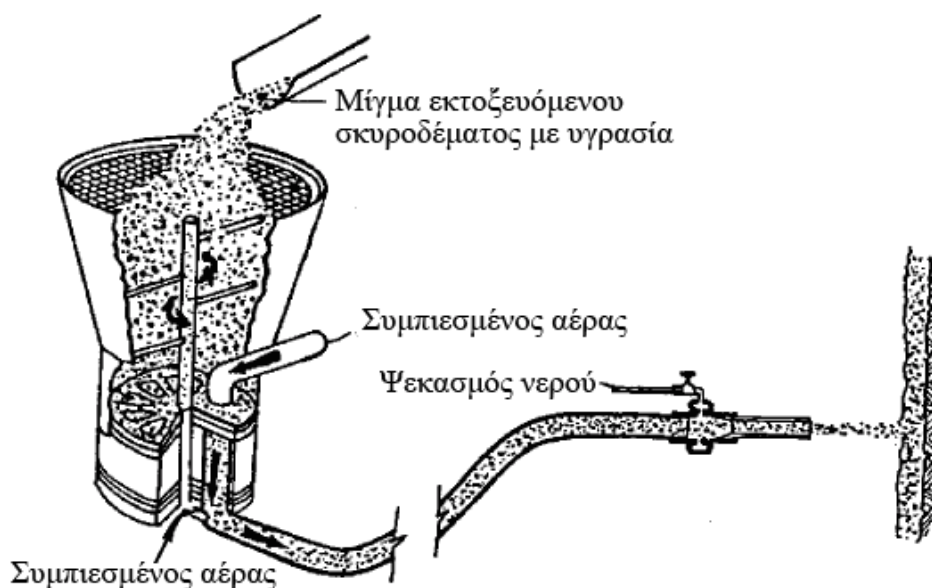
Σχήμα 3.18 Αντηρίδες για ολισθαίνοντα πλαίσια (Πηγή: Σοφιανός, 2002)

χρησιμοποιείται συχνότερα στις περιπτώσεις κατανάλωσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε μεγάλες ποσότητες. Απλοποιημένη απεικόνιση τυπικού συστήματος ξηρής ανάμειξης εκτοξευόμενου σκυροδέματος φαίνεται στο Σχήμα 3.19.

Κατά την παρασκευή εκτοξευόμενου σκυροδέματος η αναλογία ανάμειξης είναι η εξής (για την παραγωγή ενός κυβικού μέτρου βάρους 2.250-2.350 kg):

- Τσιμέντο: 400-450 kg
- Αδρανή (διάσταση κόκκου έως 10mm): 1.600-1.700 kg
- Παιπάλη πυριτίου (micro-silica): 30-50 kg
- Επιταχυντής πήξεως: 10-15 kg
- Νερό: 200-250 kg

Η παιπάλη πυριτίου είναι μια λεπτόκοκκη ποζολάνη η οποία αντιδρά με το υδροξείδιο του ασβεστίου ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) που παράγεται κατά την ενυδάτωση του τσιμέντου και συντελεί στην αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος και τη μείωση της διαπερατότητάς του. Επιπλέον με την προσθήκη της ποζολάνης επιτυγχάνεται μείωση της αναπήδησης (rebound) κατά την εκτόξευση, βελτίωση της πρόσφυσης στη βραχώμαζα και δυνατότητα αύξησης του πάχους της στρώσης του νωπού σκυροδέματος (λόγω αύξησης του ιξώδους και της πρόσφυσης) έως και σε 200mm. Η αντοχή και η πλαστικότητα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μπορούν να αυξηθούν με την προσθήκη μεταλλικών ινών (steel fibres) οι οποίες δρουν ως οπλισμός (Καββαδάς, 2000).



Σχήμα 3.19 Απλοποιημένη σχηματική απεικόνιση τυπικού συστήματος ξηρής ανάμειξης εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Πηγή: Hoek, 2000)

Τα δύο σημαντικότερα πλεονεκτήματα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί γρήγορα και ότι αναπτύσσει αντοχή απευθείας μετά την εφαρμογή. Μηχάνημα εφαρμογής εκτοξευόμενου σκυροδέματος φαίνεται στο Σχήμα 3.20 (Hoek, 2000).

Η προσθήκη μεταλλικών ινών ως οπλισμού του εκτοξευόμενου σκυροδέματος τείνει να αντικαταστήσει την όπλιση με μεταλλικά πλέγματα (wire mesh reinforcement). Η συνήθης αναλογία μεταλλικών ινών είναι 40-60 kg ανά κυβικό μέτρο σκυροδέματος. Η προσθήκη μεταλλικών ινών πλεονεκτεί ως προς τη χρήση μεταλλικού πλέγματος και για τους εξής λόγους:

1. Δεν προκαλεί αυξημένη αναπήδηση (rebound) του σκυροδέματος όπως το μεταλλικό πλέγμα.
2. Δεν υπόκειται σε ηλεκτρολυτική διάβρωση (corrosion) επειδή οι ίνες δεν είναι συνεχείς όπως το μεταλλικό πλέγμα.
3. Η χρήση των ινών είναι ταχύτερη και κατασκευαστικά ευκολότερη απ' ότι η χρήση μεταλλικού πλέγματος ιδίως στην περίπτωση που η επιφάνεια της βραχώμαζας είναι αρκετά ανώμαλη.

Ενώ το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα που έχει ενδυναμωθεί με μεταλλικές ίνες έχει γίνει ευρέως αποδεκτό, το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα που έχει ενδυναμωθεί με πλέγμα χρησιμοποιείται ακόμα πολύ συχνά και προτιμάται σε ορισμένες εφαρμογές. Σε πολύ χαλαρή βραχώμαζα, όπου η εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος στην επιφάνειά



Σχήμα 3.20 Μηχανή εφαρμογής εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Πηγή: Hoek, 2000)

της δεν είναι ικανοποιητική, το πλέγμα προσδίδει σημαντική ενίσχυση, ακόμη και χωρίς εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Οπότε, όταν απαιτείται σταθεροποίηση πρανών σε χαλαρή βραχώμαζα, το πλέγμα χρησιμοποιείται συχνά για να σταθεροποιήσει την επιφάνεια ή να ενδυναμώσει τη βραχώμαζα. Σε τέτοιες περιπτώσεις, αργότερα εφαρμόζεται εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για να προσφέρει επιπλέον υποστήριξη και να προστατέψει το πλέγμα από τη διάβρωση (Hoek, 2000).

3.3 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 βραχώμαζας. 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, 2000)

Η τελική επένδυση σχεδιάζεται να αναλάβει τα εξής φορτία (Καββαδάς, 2004):

1. Το φορτίο των προσωρινών αγκυρίων (σε βραχώμαζα με έντονα ερπυστική συμπεριφορά, ή πιθανότητα διάβρωσης των αγκυρίων)
2. Το φορτίο των χαλύβδινων πλαισίων σε περίπτωση που έχουν ανεπαρκή επικάλυψη και μπορούν να διαβρωθούν
3. Το φορτίο του εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε περίπτωση που έχει έντονο ερπυσμό (π.χ. λόγω των προσμίκτων)
4. Μέρος του φορτίου του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, ώστε το απομένον φορτίο του εκτοξευόμενου σκυροδέματος να ικανοποιεί τις απαιτήσεις ασφαλείας μονίμου έργου (κατά την άμεση υποστήριξη της σήραγγας το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα μπορεί να λειτουργεί με μειωμένο συντελεστή ασφαλείας)
5. Τυχόν αυξημένα μακροχρόνια φορτία της βραχώμαζας λόγω ερπυσμού
6. Τυχόν υδατικές πιέσεις λόγω πλημμελούς αποστράγγισης ή απρόβλεπτης απόφραξης του συστήματος αποστράγγισης
7. Τυχόν φορτία από μελλοντικές κατασκευές που φορτίζουν τη σήραγγα
8. Τυχόν σεισμική επιφόρτιση της σήραγγας

Κεφάλαιο 4

Αριθμητική προσομοίωση εκσκαφής και υποστήριξης οδικών σηράγγων

Η μελέτη σχεδιασμού μιας κατασκευής σε προβληματικά πετρώματα (βραχομάζες) ή εδάφη (υλικά τα οποία έχουν ενδεχόμενα ιδιόμορφα γεωλογικά, γεωτεχνικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά) είναι εφικτή μόνο με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων. Αυτό οφείλεται στην ανισότροπη και μη-γραμμική συμπεριφορά των εδαφών αυτών. Επιπλέον, η πολυπλοκότητα της γεωμετρίας ενός υπογείου ανοίγματος, ιδίως δε η μεταβολή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών κατά το στάδιο της εκσκαφής, απαιτεί εφαρμογή εξειδικευμένων αριθμητικών μοντέλων. Εξάλλου, σημειώνεται ότι και η αλληλεπίδραση γεωυλικού και συστήματος υποστήριξης είναι μη-γραμμικής μορφής. Επίσης, μη-γραμμική μπορεί να είναι η συμπεριφορά του εδάφους, των πετρωμάτων, του σκυροδέματος, των αγκυρίων και των λοιπών στοιχείων της κατασκευής (Αγιουτάντης, 2001). Επακόλουθα, οι αναλυτικές λύσεις έχουν περιορισμένη αξία στον υπολογισμό των τάσεων, των μετατοπίσεων και της αστοχίας της βραχομάζας που περιβάλλει τις εκσκαφές. Οι αριθμητικές μέθοδοι είναι οι πλέον κατάλληλες για την εύρεση προσεγγιστικών λύσεων στα προβλήματα αυτά (Hoek, 2000).

Έτσι, με την εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων κατά το πρώτο στάδιο είναι δυνατή η πρόβλεψη της συμπεριφοράς του εδάφους ή πετρώματος και της κατασκευής πολύ πριν υπάρξουν επί τόπου μετρήσεις απόκρισης των περιβαλλόντων γεωυλικών. Από τη συμπεριφορά αυτή είναι δυνατή η επιλογή της μεθόδου διάνοιξης, των σταδίων και των φάσεων εκσκαφής, η επιλογή της κατάλληλης υποστήριξης και των σταδίων εφαρμογής της. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η εφαρμογή των μεθόδων αυτών κατά τη μελέτη ενός έργου γίνεται με προσεγγιστικό τρόπο, καθώς δεν υπάρχουν ακόμα αρκετές πληροφορίες για τα περιβάλλοντα υλικά. Επομένως, οι αριθμητικές μέθοδοι αποτελούν ένα χρήσιμο εργαλείο σχεδιασμού υπογείων έργων.

Κατά την εφαρμογή των μεθόδων αυτών για την παρακολούθηση της προόδου του έργου, δηλαδή κατά το δεύτερο στάδιο, αυξάνεται η πολυπλοκότητα και η λεπτομέρεια των μοντέλων, καθώς διατίθενται πλέον περισσότερα στοιχεία για τα υλικά και τις ιδιότητές τους, με στόχο την όσο το δυνατόν καλύτερη προσέγγιση της πραγματικής συμπεριφοράς των γεωυλικών και του εξορυσσόμενου ανοίγματος.

Όμως, οι αριθμητικές μέθοδοι βρίσκουν εφαρμογή και μετά την περάτωση της φάσης της κατασκευής ενός έργου, καθώς από τα στοιχεία των επί τόπου μετρήσεων μπορούν να βαθμονομηθούν ή ακόμη και να βελτιωθούν τα αντίστοιχα αριθμητικά μοντέλα και ακόμη να φανεί πού υστερούν και πού δίνουν καλά αποτελέσματα (Αγιουτάντης, 2001).

4.1 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

Η αριθμητική μέθοδος που επιλέχτηκε για την αριθμητική προσομοίωση του προβλήματος είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method). Στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, ζητείται ο υπολογισμός των αγνώστων μεγεθών στους κόμβους οι οποίοι δημιουργούνται από τη διαίρεση του πεδίου σε στοιχεία. Στη συνέχεια, με τη θεώρηση κατάλληλων συναρτήσεων, οι οποίες συνδέουν την κατανομή των μεγεθών στα εσωτερικά σημεία κάθε στοιχείου, είναι δυνατόν να υπολογιστεί η τιμή των μεγεθών αυτών σε κάθε σημείο του πεδίου με τους κόμβους του στοιχείου αυτού.

Η εφαρμογή της μεθόδου σε προβλήματα ελαστικότητας (ή γενικότερα παραμόρφωσης των υλικών) σε δύο ή τρεις διαστάσεις περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια (Αγιουτάντης, 2001):

- Διαίρεση του πεδίου το οποίο εξετάζεται, σε κατάλληλα στοιχεία.
- Επιλογή των κατάλληλων συναρτήσεων για την κατανομή των άγνωστων μεταβλητών σε κάθε στοιχείο
- Προσδιορισμό των συναρτήσεων που συνδέουν την ανηγμένη παραμόρφωση με τη μετατόπιση (strain – displacement) και των συναρτήσεων που συνδέουν την τάση με την ανηγμένη παραμόρφωση (stress – strain), ώστε να συνδεθεί το αίτιο (τάση, δύναμη) με το αποτέλεσμα (μετατόπιση) που αποτελεί και το άγνωστο μέγεθος
- Κατασκευή των καταστατικών (θεμελιωδών) εξισώσεων για κάθε στοιχείο (element equations)
- Υπέρθυση (άθροιση κατά κόμβο) των εξισώσεων των στοιχείων για τον προσδιορισμό του τελικού συστήματος και εισαγωγή των συνοριακών συνθηκών
- Υπολογισμό της εντατικής κατάστασης κάθε στοιχείου ως συνάρτηση των μετατοπίσεων στους κόμβους του στοιχείου

- Υπολογισμό των δευτερογενών μεγεθών που προκύπτουν από την επίλυση (ανηγμένες παραμορφώσεις, τάσεις, κλπ)
- Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα στάδια αυτά είναι γενικά και αναφέρονται στα περισσότερα προβλήματα που αντιμετωπίζονται από τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Για την εφαρμογή, όμως, της μεθόδου σε γεωτεχνικά προβλήματα, πρέπει να ληφθούν υπόψη ορισμένοι παράγοντες, οι οποίοι δεν υφίστανται σε άλλα πεδία εφαρμογής. Ο σημαντικότερος ίσως παράγοντας είναι ότι τα γεωυλικά δεν ακολουθούν κάποιο συγκεκριμένο πρότυπο καταστατικής συμπεριφοράς (π.χ. ελαστικό, ελαστοπλαστικό, πλαστικό, βισκοελαστικό, κλπ) καθόσον από τη φύση τους είναι ανομοιογενή. Πρόσθετα προβλήματα εμφανίζονται από την ύπαρξη διακλάσεων, επιπέδων διαστρώσεων, κλπ)

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί βασικά μία αριθμητική μέθοδο επίλυσης διαφορικών εξισώσεων με συγκεκριμένο γεωμετρικό τόπο εφαρμογής, στον οποίο τίθενται και οι συνοριακές συνθήκες (Αγιουτάντης, 2001).

4.2 Εναλλακτικές προσεγγίσεις φόρτισης ενός μοντέλου

Στην περίπτωση όπου μοντελοποιείται η εντατικοπαραμορφωσιακή κατάσταση γύρω από υπόγεια ανοίγματα με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, η εξωτερική φόρτιση των μοντέλων αυτών επιβάλλεται συνήθως με τους ακόλουθους τρόπους:

- Φόρτιση στα όρια του μοντέλου κατά τις x , y και z διευθύνσεις
- Μετατόπιση στα όρια του μοντέλου
- Βαρυτική φόρτιση προσδιορίζοντας την επιτάχυνση της βαρύτητας
- Συνδυασμός των παραπάνω

Πολλά λογισμικά πακέτα τα οποία χρησιμοποιούνται για αναλύσεις τέτοιου τύπου σε εδαφικά ή βραχώδη υλικά διαθέτουν αυτόματες επιλογές επιβολής εντατικού πεδίου για να μοντελοποιήσουν ανοίγματα μέσα στο υπέδαφος. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πακέτο Marc Mentat, το οποίο είναι ένα πολύ καλό λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων για μη γραμμικά προβλήματα, αλλά δεν διαθέτει έτοιμες επιλογές για τη μοντελοποίηση της φόρτισης γύρω από υπόγεια ανοίγματα.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας εξετάστηκαν τρεις εναλλακτικές φορτίσεις γενικού ενδιαφέροντος, με στόχο να επιλεγεί ο κατάλληλος τύπος φόρτισης και να

εξαχθούν τα αντίστοιχα αποτελέσματα για το υπό μελέτη πρόβλημα και συγκεκριμένα για την προσομοίωση της τμηματικής εκσκαφής και υποστήριξης ενός υπόγειου ανοίγματος.

Η επιβολή της κατακόρυφης φόρτισης στο υπέδαφος μέσω του προγράμματος μπορεί να γίνει με δύο τρόπους:

- Φόρτιση βαρυτικού τύπου (gravity loading) κατά την οποία υπολογίζεται για κάθε στοιχείο μια τάση σ_v ίση με το άθροισμα όλων των επιμέρους γινομένων της πυκνότητας της βραχώμαζας ρ κάθε υπερκείμενου στοιχείου επί το ύψος h του κάθε υπερκείμενου στοιχείου, πολλαπλασιασμένο με την επιτάχυνση της βαρύτητας κατά τον κατακόρυφο άξονα g .
- Φόρτιση ακμής (edge loading) κατά την οποία επιβάλλεται φόρτιση στην επιφάνεια του μοντέλου κατά μήκος της ανώτερης οριζόντιας ακμής του και είναι ίση με την κατακόρυφη γεωστατική τάση σ_v που ενεργεί στο βάθος στο οποίο πρόκειται να γίνει η εκσκαφή, όπου $\sigma_v = \gamma \times h$ (h : το βάθος από την επιφάνεια του εδάφους και γ : σταθμισμένος μέσος του ειδικού βάρους της υπερκείμενης βραχώμαζας).

Το εντατικό πεδίο που εμφανίζεται στο μοντέλο λόγω της βαρυτικής αυτής φόρτισης (υπολογισμένης ανά στοιχείο) είναι πιο ρεαλιστικό από την παραδοχή μιας ισοδύναμης φόρτισης ακμής.

Σημειώνεται ότι η παραδοχή της ισοδύναμης φόρτισης ακμής έχει χρησιμοποιηθεί από τον Kirsch για την εξαγωγή των αναλυτικών λύσεων σχετικά με την ανακατανομή τάσεων γύρω από κυκλικά υπόγεια ανοίγματα και χρησιμοποιείται ευρέως για αρχικές προσεγγίσεις σε παρόμοια προβλήματα.

Κατά την εκσκαφή ενός υπόγειου ανοίγματος σε ένα εντατικό πεδίο που έχει ήδη διαμορφωθεί λόγω βαρυτικών δυνάμεων, το αρχικό εντατικό πεδίο ανακατανέμεται τοπικά και ένα νέο εντατικό πεδίο εμφανίζεται στο περιβάλλον πέτρωμα του ανοίγματος. Στόχος είναι η αποτύπωση του εντατικού πεδίου λόγω της εφαρμογής βαρυτικής φόρτισης στο πέτρωμα πριν από την οποιαδήποτε παρέμβαση σε αυτό (αποτύπωση αρχικών τάσεων) και η εν συνεχεία τμηματική εκσκαφή του ανοίγματος για την παρακολούθηση των επιφερόμενων τάσεων λόγω του ανοίγματος. Η προσομοίωση της τμηματικής εκσκαφής γίνεται με σταδιακή απενεργοποίηση των στοιχείων που απαρτίζουν την κάθε φάση με ταυτόχρονη εφαρμογή της επιλεχθείσας υποστήριξης ανά φάση.

Με το παραπάνω σκεπτικό και αξιοποιώντας τις διάφορες επιλογές που προσφέρει το λογισμικό πακέτο Marc Mentat, δοκιμάστηκαν τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις για τη μοντελοποίηση του προβλήματος, οι οποίες περιγράφονται στη συνέχεια. Στο σημείο αυτό αναφέρεται ότι στην παρούσα εργασία έγινε χρήση της φόρτισης του διακριτοποιημένου πεδίου μέσω του βαρυτικού φορτίου.

4.2.1 Διαδοχικές φάσεις φόρτισης

Σε προβλήματα όπου χρησιμοποιούνται διαδοχικές φάσεις φόρτισης (loadcases), στο μοντέλο μπορούν να επιβληθούν διαδοχικά φορτίσεις, των οποίων η επίδραση λειτουργεί αθροιστικά. Σε αυτήν την περίπτωση στο μοντέλο μπορεί να επιβληθεί σας πρώτη φάση φόρτισης η βαρυτική φόρτιση με αποτέλεσμα την ανάπτυξη εντατικού πεδίου στο μοντέλο και την εμφάνιση κατακόρυφων μετατοπίσεων λόγω βαρύτητας. Στη δεύτερη φάση φόρτισης, δεν εφαρμόζεται πλέον η βαρυτική φόρτιση, αλλά απενεργοποιούνται τα απαραίτητα στοιχεία (deactivation) για το σχηματισμό του υπόγειου ανοίγματος και αναμένεται η ανακατανομή των τάσεων λόγω της δημιουργίας του ανοίγματος. Στα αποτελέσματα φαίνεται ότι με την έναρξη της δεύτερης φάσης φόρτισης (όπου δεν εφαρμόζεται πλέον η βαρυτική φόρτιση) το μοντέλο συμπεριφέρεται σαν να ανακουφίζεται από τη φόρτιση που έχει υποστεί και να μετατοπίζεται προς τα επάνω, χωρίς να λαμβάνει χώρα η αναμενόμενη ανακατανομή τάσεων. Εάν συνεχίσει να εφαρμόζεται βαρυτική φόρτιση και στη δεύτερη φάση φόρτισης, το μοντέλο δεν ανακουφίζεται αλλά συνεχίζει να μετατοπίζεται περαιτέρω προς τα κάτω σα να δέχεται την ίδια φόρτιση εκ νέου. Ταυτόχρονα, μετά το πέρας της πρώτης φάσης φόρτισης παραμορφώνεται το πλέγμα, με αποτέλεσμα η απενεργοποίηση των στοιχείων που διαμορφώνουν το άνοιγμα να καταλήγει σε παραμορφωμένη διατομή.

Αξίζει να αναφερθεί ότι με την επιλογή των κατάλληλων συναρτήσεων στους πίνακες φόρτισης (tables) υπάρχει η δυνατότητα επίλυσης διαδοχικών φορτίσεων μέσα σε μια φάση φόρτισης, αλλά στην παρούσα περίπτωση δεν εφαρμόζεται, καθώς δεν είναι δυνατό να απενεργοποιηθούν στοιχεία για τη δημιουργία του ανοίγματος, παρά μόνο μέσω του μενού των σταδίων φόρτισης.

4.2.2 Ενεργοποίηση εφαρμογής ίσων και αντίθετων δυνάμεων

Η δεύτερη προσέγγιση έχει στόχο την αποφυγή της περαιτέρω κατακόρυφης προς τα κάτω μετατόπισης του μοντέλου, όταν συνεχίζεται η εφαρμογή της βαρυτικής φόρτισης και στη δεύτερη φάση φόρτισης της πρώτης προσέγγισης. Αυτό

επιτυγχάνεται με τον υπολογισμό των δυνάμεων που αναπτύσσονται στους κόμβους κατά την εφαρμογή της βαρυτικής φόρτισης στην πρώτη φάση φόρτισης και την ενεργοποίηση εφαρμογής ίσων και αντίθετων δυνάμεων στη δεύτερη φάση φόρτισης (όπου συνεχίζει να εφαρμόζεται η βαρυτική φόρτιση και απενεργοποιούνται τα στοιχεία που σχηματίζουν το άνοιγμα) για να μην μετατοπίζεται το μοντέλο περαιτέρω προς τα κάτω. Απαραίτητο είναι να ενεργοποιηθεί η επιλογή *inertia relief* στην πρώτη φάση φόρτισης για τον υπολογισμό των δυνάμεων που ασκούνται στους κόμβους μετά το πέρας της πρώτης φάσης φόρτισης και η ενεργοποίηση της επιλογής *retain* στο υπομενού του μενού *inertia relief* για την εφαρμογή των ίσων και αντίθετων δυνάμεων. Η διαφορά των μετατοπίσεων της δεύτερης φάσης φόρτισης από το τελευταίο βήμα της πρώτης δίνει τη μετατόπιση που οφείλεται μόνο στο άνοιγμα.

Όπως και στην περίπτωση της ενότητας 4.2.1 των διαδοχικών φάσεων φόρτισης, μετά το πέρας της πρώτης φάσης φόρτισης, το πλέγμα έχει παραμορφωθεί λόγω της βαρυτικής φόρτισης και η απενεργοποίηση των στοιχείων που διαμορφώνουν το άνοιγμα καταλήγει σε μια παραμορφωμένη διατομή.

4.2.3 Εισαγωγή αρχικών συνθηκών από προηγούμενη φόρτιση

Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα του παραμορφωμένου πλέγματος μετά την εφαρμογή της βαρυτικής φόρτισης και πριν τη δημιουργία του υπόγειου ανοίγματος, κρίνεται απαραίτητο να γίνεται η απενεργοποίηση των στοιχείων για τη δημιουργία του ανοίγματος στο αρχικό πλέγμα. Στο μοντέλο απενεργοποιούνται τα στοιχεία που δημιουργούν το άνοιγμα και επιβάλλεται βαρυτική φόρτιση. Σαν αρχικές συνθήκες επιλέγονται τα αποτελέσματα ενός μοντέλου χωρίς άνοιγμα, στο οποίο έχει εφαρμοστεί βαρυτική φόρτιση. Επομένως, στο αρχικό στάδιο πριν την επίλυση το μοντέλο εμφανίζεται φορτισμένο, αλλά λόγω του ότι η επίλυση ξεκινά από το αρχικό πλέγμα, οι μετατοπίσεις των κόμβων είναι μηδενικές. Στο τελευταίο βήμα, οι μετατοπίσεις που εμφανίζονται στους κόμβους οφείλονται μόνο στη δημιουργία του υπόγειου ανοίγματος.

Η επιβολή αρχικών συνθηκών από προηγούμενη φόρτιση αποτελεί την πιο σωστή προσέγγιση, δεδομένου ότι η απενεργοποίηση των στοιχείων δεν οδηγεί σε παραμορφωμένη διατομή και ότι οι μετατοπίσεις που λαμβάνονται στο τελευταίο στάδιο οφείλονται μόνο στη δημιουργία του ανοίγματος στην ήδη βαρυτικά

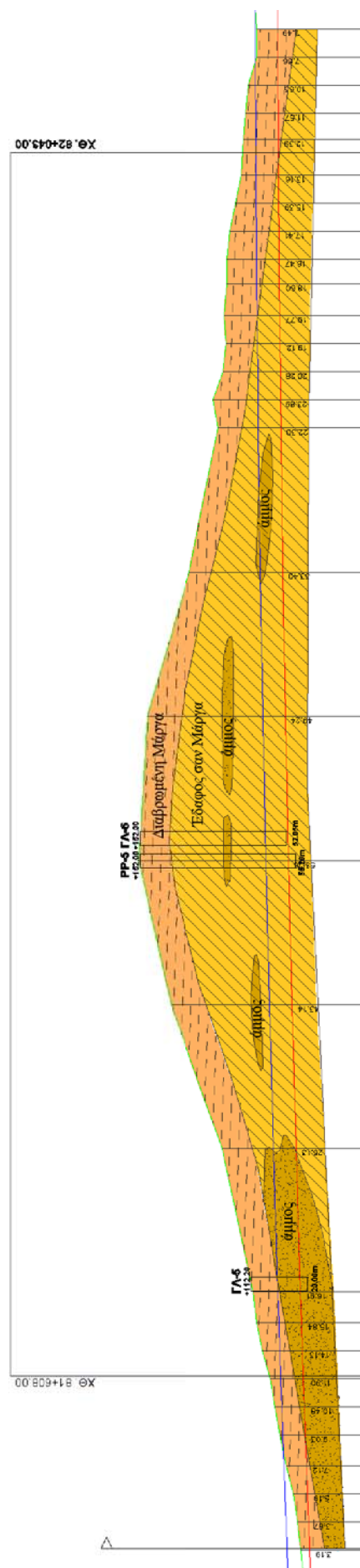
φορτισμένη βραχύμαζα. Η προσέγγιση αυτή ακολουθήθηκε για τη φόρτιση των μοντέλων της παρούσας εργασίας.

4.3 Διατύπωση του προβλήματος

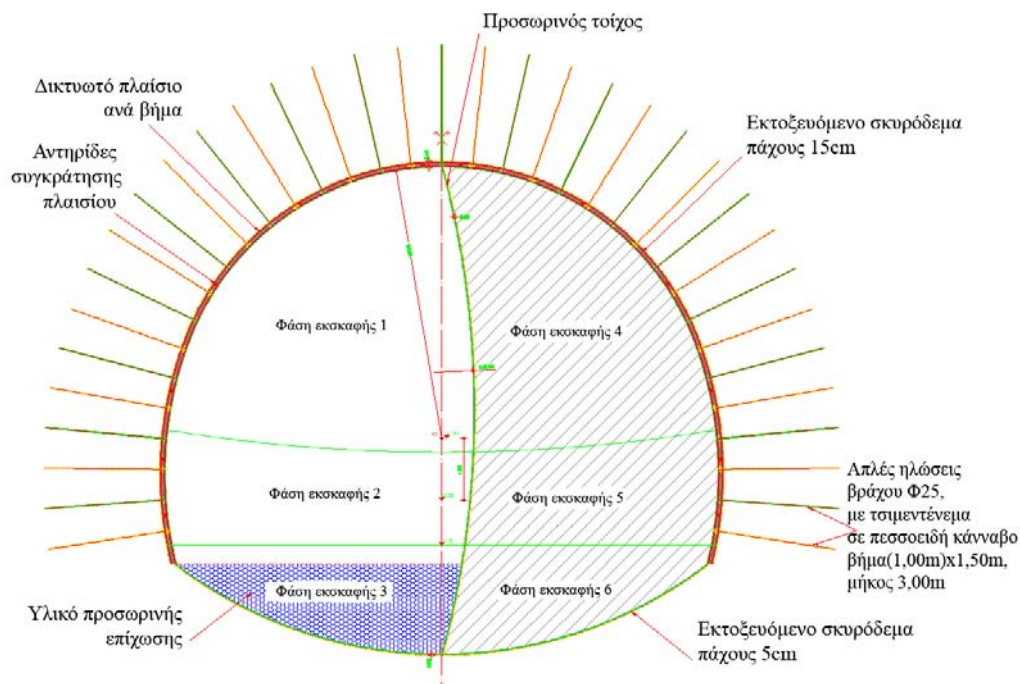
Πρόκειται να γίνει εκσκαφή σήραγγας στην περιοχή Μαύρα Λιθάρια, η οποία αποτελεί μέρος του νέου αυτοκινητοδρόμου Ελευσίνα-Κόρινθος-Πάτρα-Πύργος-Τσακώνα και διέρχεται από έδαφος, του οποίου η γεωλογική τομή φαίνεται στο Σχήμα 4.1. Η μπλε γραμμή είναι η κλείδα της σήραγγας και η κόκκινη γραμμή το επίπεδο του δρόμου. Οι διαστάσεις της σήραγγας είναι καθορισμένες και διερευνάται η επιλογή των απαιτούμενων μέτρων υποστήριξης. Έχουν προταθεί δύο διαφορετικές υποστηρίξεις για την ίδια σήραγγα διαμέτρου περίπου 12 m και πρέπει να επιλεγεί η καταλληλότερη. Ανάλογα με τα μέτρα υποστήριξης έχει επιλεγεί και ο αριθμός των φάσεων εκσκαφής. Σε περιπτώσεις λήψης ισχυρότερων μέτρων υποστήριξης, ο αριθμός των φάσεων εκσκαφής μειώνεται και αντιστρόφως. Όλα τα στοιχεία και οι δύο προτεινόμενες διατομές δόθηκαν από τη Γενική Μελετών Ίστρια και προέρχονται από την προδημοπρασιακή φάση των εταιρειών Hellenic Autopistas.

Στο Σχήμα 4.2 απεικονίζεται η πρώτη προτεινόμενη διατομή (Σήραγγα I), όπου φαίνονται τα επιλεγθέντα μέτρα υποστήριξης και οι φάσεις εκσκαφής της. Στο Σχήμα 4.3 δίνεται η μηκοτομή της Σήραγγας I, όπου φαίνονται τα μέτρα υποστήριξης και οι φάσεις προχώρησης, αλλά για την παρούσα εργασία αρκεί να εστιαστεί κανείς στην πεσσοειδή εφαρμογή των μέτρων υποστήριξης κατά μήκος της σήραγγας. Πρόκειται να επιλυθεί μία διατομή της Σήραγγας I, όπου εφαρμόζονται τα κόκκινα πλευρικά αγκύρια (Τομή A-A'). Η εκσκαφή της σήραγγας γίνεται σε έξι φάσεις και τα μέτρα υποστήριξης είναι μεταλλικά πλαίσια και αγκύρια μεγάλου μήκους.

Στο Σχήμα 4.4 απεικονίζεται η δεύτερη προτεινόμενη διατομή (Σήραγγα II), όπου φαίνονται τα επιλεγθέντα μέτρα υποστήριξης. Στο Σχήμα 4.5 δίνεται λεπτομέρεια της υποστήριξης (Λεπτομέρεια Α του Σχήματος 4.4). Στο Σχήμα 4.6 απεικονίζεται η μηκοτομή της Σήραγγας II, όπου φαίνονται τα μέτρα υποστήριξης και οι φάσεις προχώρησης, αλλά για την παρούσα εργασία αρκεί να εστιαστεί κανείς στην πεσσοειδή εφαρμογή των μέτρων υποστήριξης κατά μήκος της σήραγγας. Στη Σήραγγα II εφαρμόζεται προστατευτική ασπίδα με δοκούς προπορείας (forepoling) υπό κλίση και η υποστήριξη μετά την εκσκαφή γίνεται με μεταλλικά πλαίσια. Πρόκειται να επιλυθεί μία διατομή της Σήραγγας II, η τομή B-B (ελάχιστη διεύρυνση

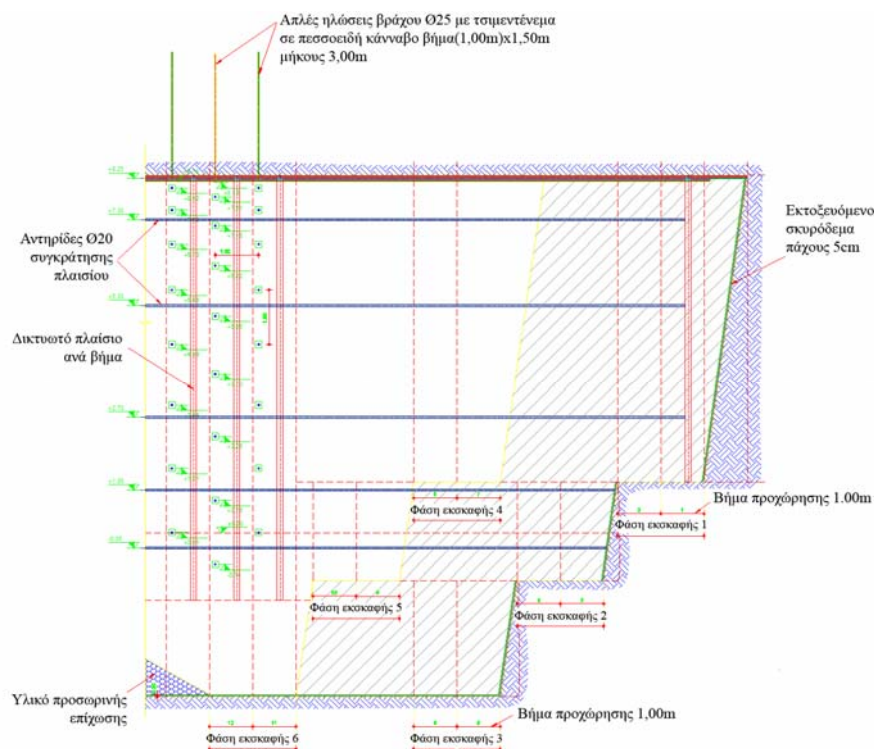


Σχήμα 4.1 Ανάντη κλάδου σήραγγας

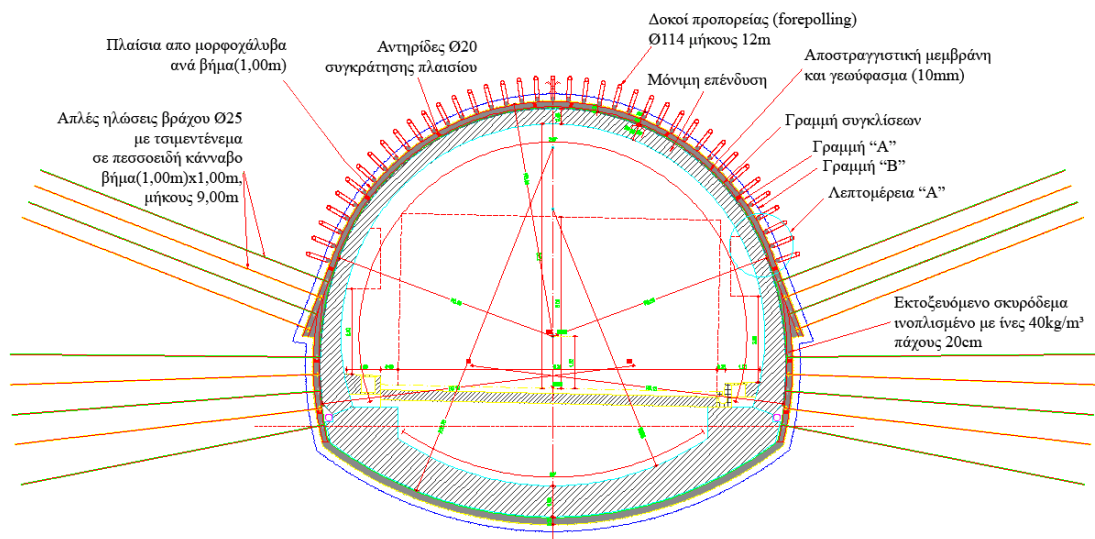


Σχήμα 4.2 Διατομή της Σήραγγας Ι, όπου φαίνεται το σύστημα υποστήριξης και οι φάσεις εκσκαφής

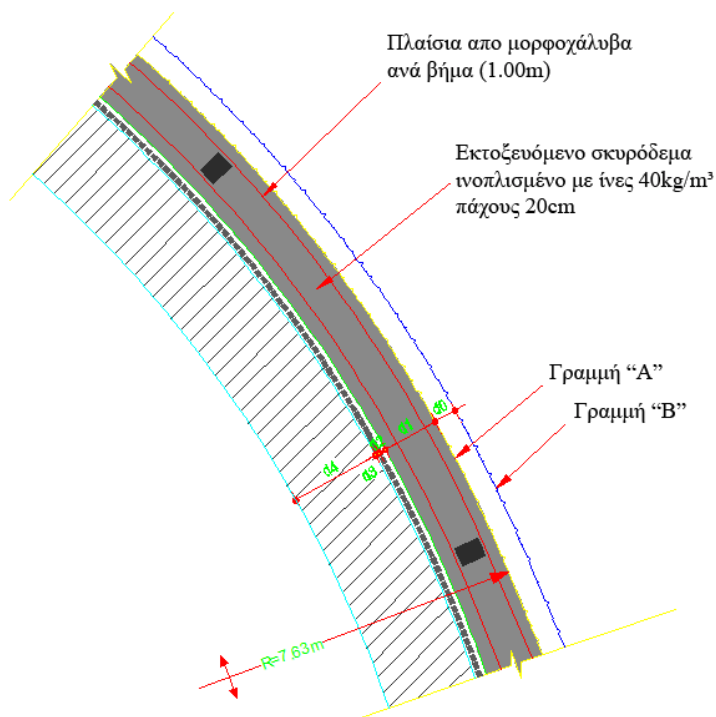
της σήραγγας), όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.7. Η εκσκαφή της σήραγγας γίνεται σε δύο φάσεις. Στην πρώτη φάση γίνεται η εκσκαφή της άνω ημιδιατομής, όπως αυτή φαίνεται στο Σχήμα 4.8.



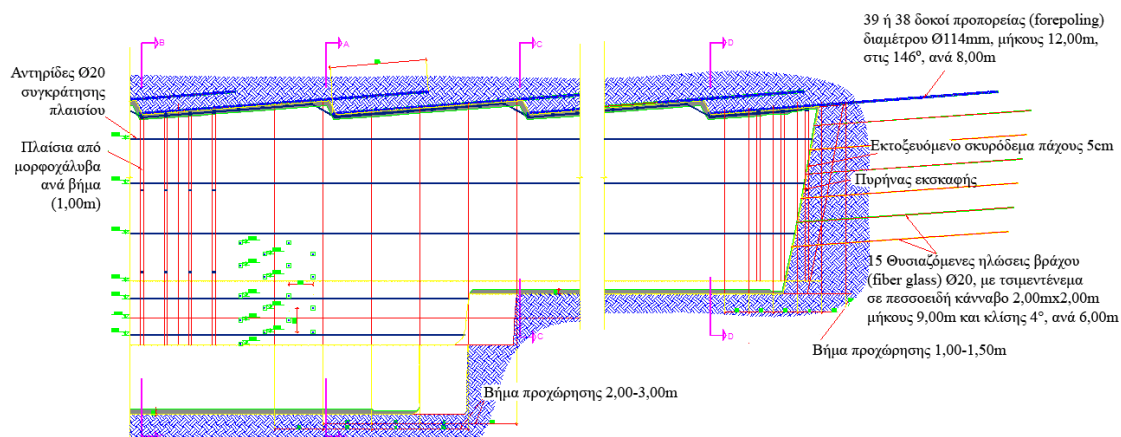
Σχήμα 4.3 Μηκοτομή της Σήραγγας Ι, όπου φαίνονται τα μέτρα υποστήριξης και οι φάσεις προχώρησης



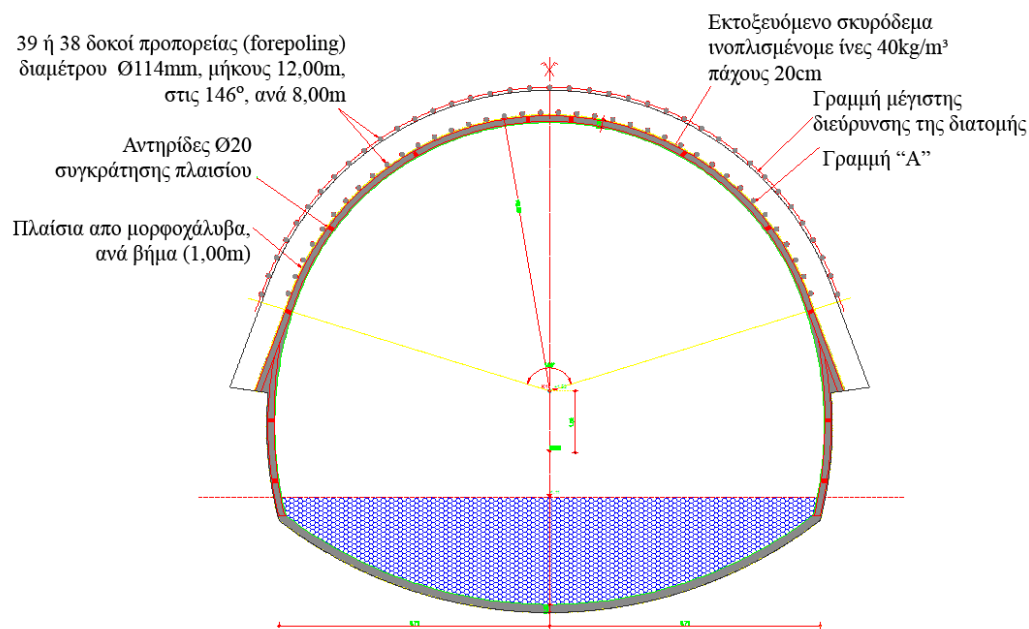
Σχήμα 4.4 Διατομή προσωρινής υποστήριξης για τη Σήραγγα Π



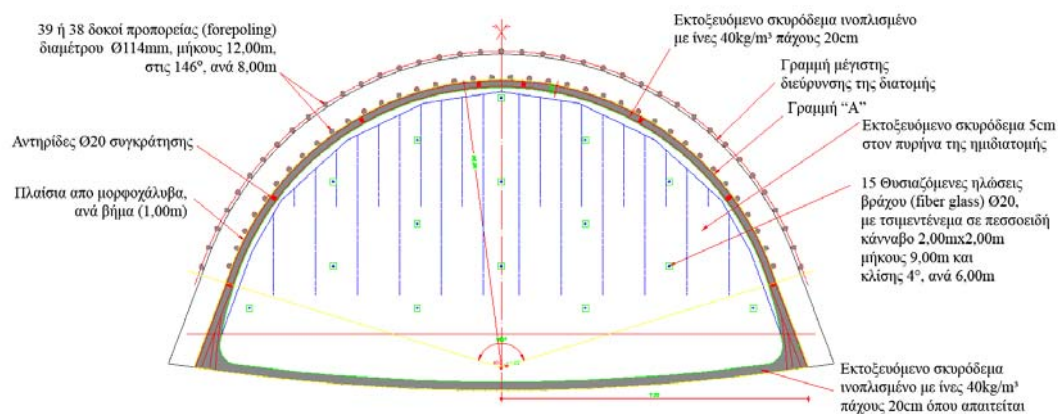
Σχήμα 4.5 Λεπτομέρεια της υποστήριξης στην περιοχή «Α» του Σχήματος 4.3



Σχήμα 4.6 Μηκοτομή Σήραγγας II



Σχήμα 4.7 Πλήρης διατομή τομής B-B (ελάχιστη διεύρυνση) της Σήραγγας II



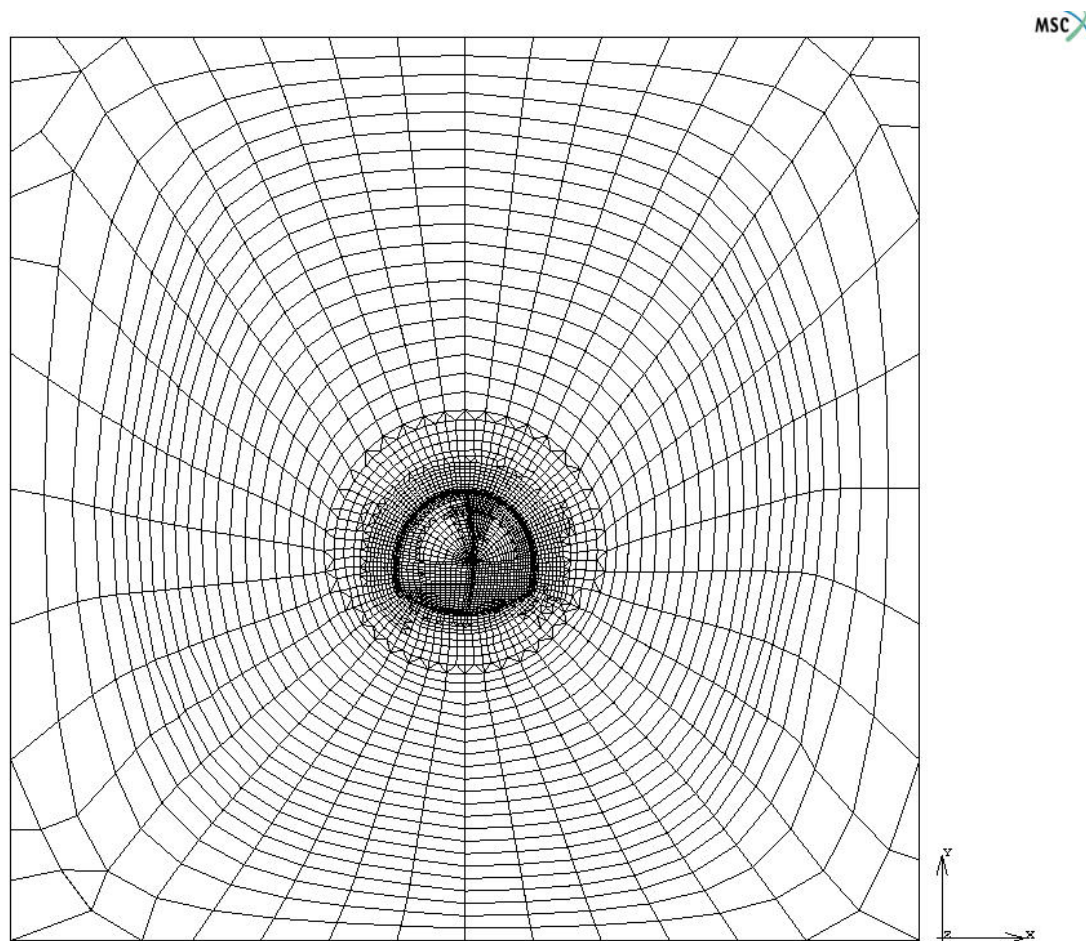
Σχήμα 4.8 Άνω ημιδιατομή (Φάση 1) τομής B-B (ελάχιστη διεύρυνση) της Σήραγγας II

4.4 Μοντελοποίηση του προβλήματος

Η μοντελοποίηση του προβλήματος έγινε σε δύο διαστάσεις με το εμπορικό λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων MSC Marc 2005 R3 της MSC Software Corporation. Η στέψη και των δύο σιράγγων επιλέχθηκε να βρίσκεται σε βάθος 45 m κάτω από την επιφάνεια, εφόσον είναι το σημείο όπου η σήραγγα βρίσκεται στο μεγαλύτερο βάθος (Σημείο Α του Σχήματος 4.1). Η επιλογή των διαστάσεων των μοντέλων έγινε για να αποφευχθούν φαινόμενα, όπως η επίδραση των συνόρων στην επίλυση γύρω από τη σήραγγα.

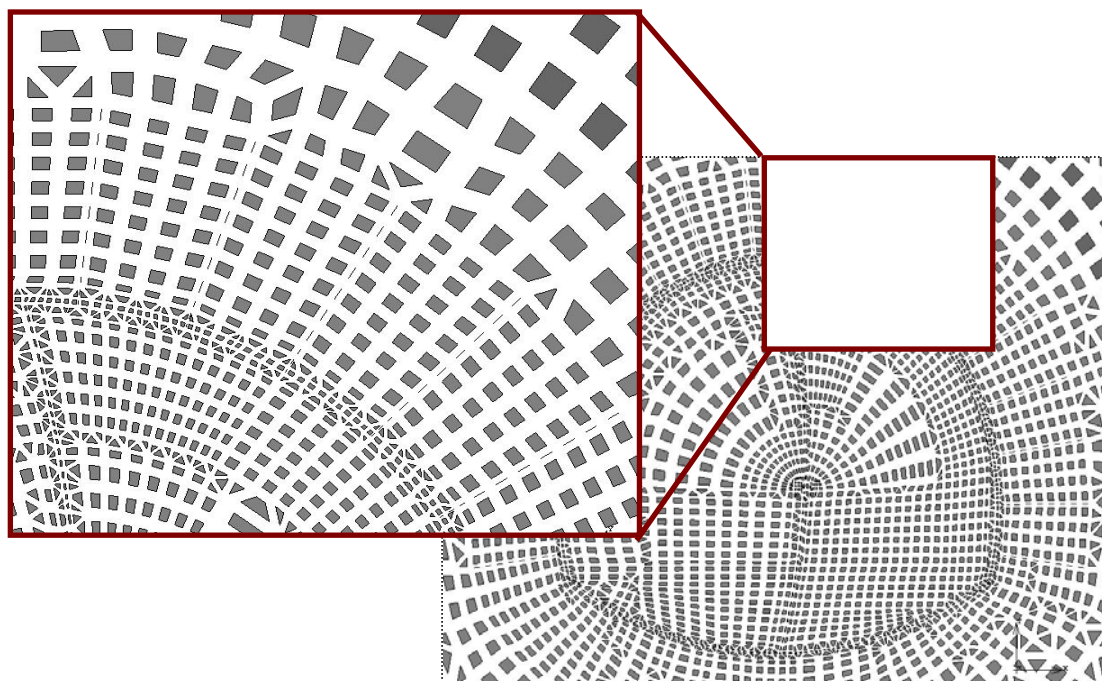
4.4.1 Μοντελοποίηση Σήραγγας I

Οι φάσεις εκσκαφής της Σήραγγας I δεν επέτρεπαν τη χρήση συμμετρίας και γι' αυτό η διατομή διακριτοποιήθηκε στο σύνολό της, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.9. Το ύψος και το πλάτος του μοντέλου είναι 90 m. Η στέψη της σήραγγας είναι 45 m κάτω από την επιφάνεια. Αναπτύχθηκαν 6 μοντέλα ίδιας γεωμετρίας, ένα για κάθε φάση εκσκαφής, τα οποία επιλύθηκαν υποστηριγμένα και ανυποστήρικτα, δηλαδή με



Σχήμα 4.9 Διακριτοποίηση Σήραγγας I

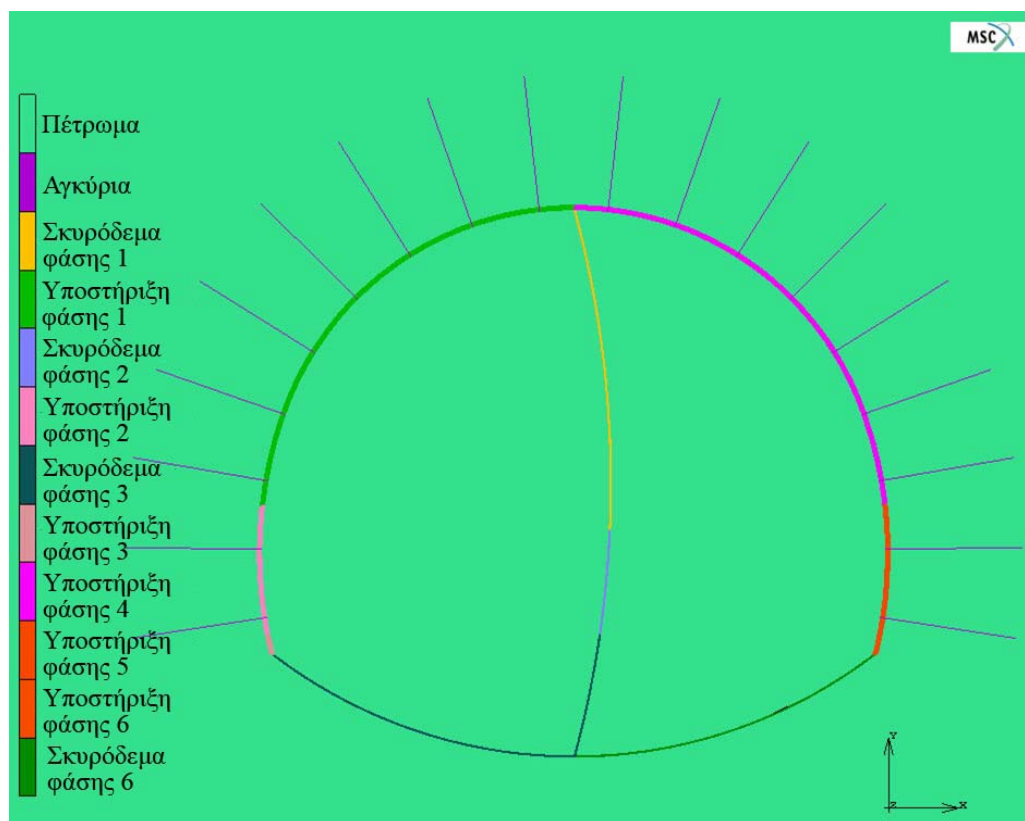
διαφορετικές ιδιότητες γεωμετρίας και υλικών. Όλα τα χρησιμοποιούμενα υλικά θεωρήθηκαν ελαστικά, ομογενή και ισότροπα. Όλα τα στοιχεία επιλέχθηκαν δισδιάστατα τετρακομβικά (quad4), ενώ για τα αγκύρια επιλέχθηκαν γραμμικά δικομβικά στοιχεία (line2). Λεπτομέρεια διακριτοποίησης της Σήραγγας Ι, όπου απεικονίζονται και τα γραμμικά στοιχεία των αγκυριών φαίνεται στο Σχήμα 4.10. Τιμές ιδιοτήτων υλικών και γεωμετρίας και για τις δύο σήραγγες δίνονται στον Πίνακα 4.1. Τα διαφορετικά υλικά της υποστηριγμένης Σήραγγας Ι φαίνονται στο Σχήμα 4.11. Το μοντέλο έχει 4641 στοιχεία και 3956 κόμβους, ενώ τα 180 από αυτά τα στοιχεία είναι γραμμικά. Οι συνοριακές συνθήκες που εφαρμόστηκαν και απεικονίζονται στο Σχήμα 4.12 είναι: α) Κύλιση στον άξονα X στη βάση του



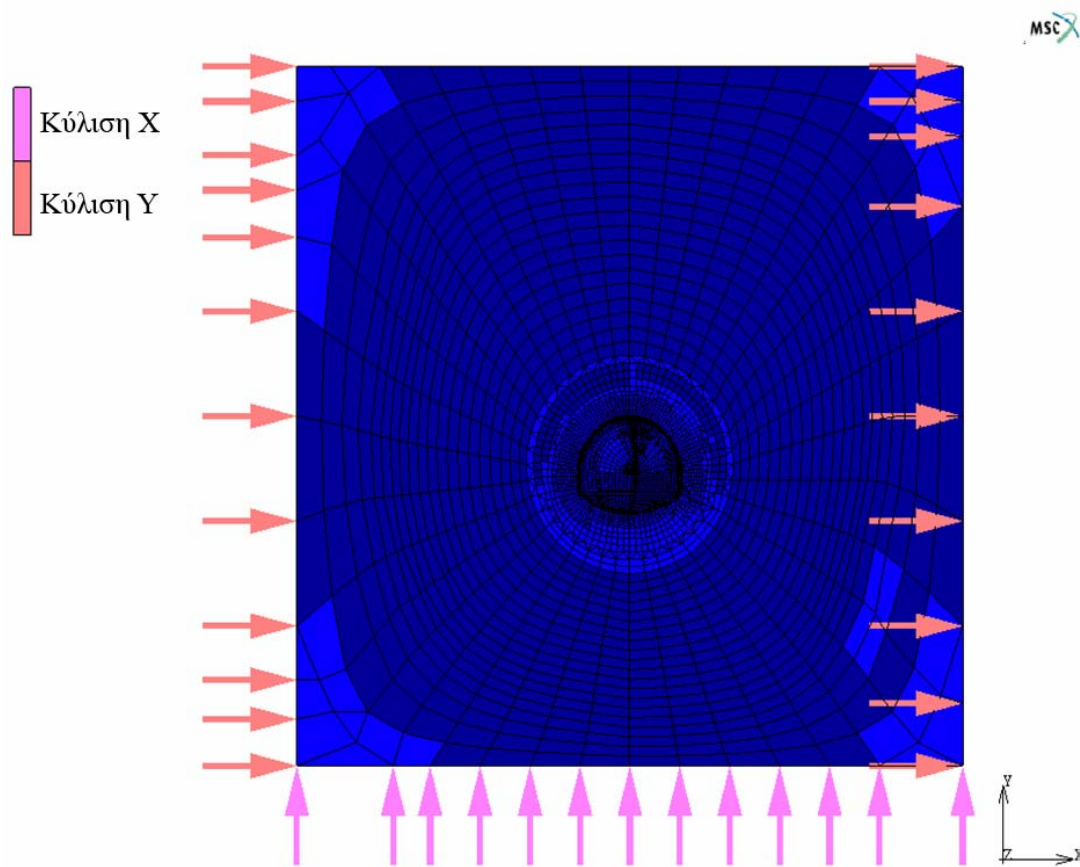
Σχήμα 4.10 Λεπτομέρεια διακριτοποίησης Σήραγγας Ι, όπου απεικονίζονται και τα γραμμικά στοιχεία των αγκυριών

Πίνακας 4.1 Τιμές ιδιοτήτων υλικού και γεωμετρίας

Παράμετρος	Πέτρωμα	Δοκοί προπορείας	Πλαίσιο	Σκυρόδεμα	Αγκύρια
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	0,150	210	80	40	210
Λόγος Poisson	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Ύψος (m)	-	-	-	-	0,032
Εμβαδόν (m ²)	-	-	-	-	0,000396
Διάμετρος (m)	-	0,14	-	-	-
Πυκνότητα (kg/m ³)	2548	7850	2400	2400	7850
Πάχος (m)	1	1	0,1	0,1	-



Σχήμα 4.11 Ιδιότητες υλικών Σήραγγας I

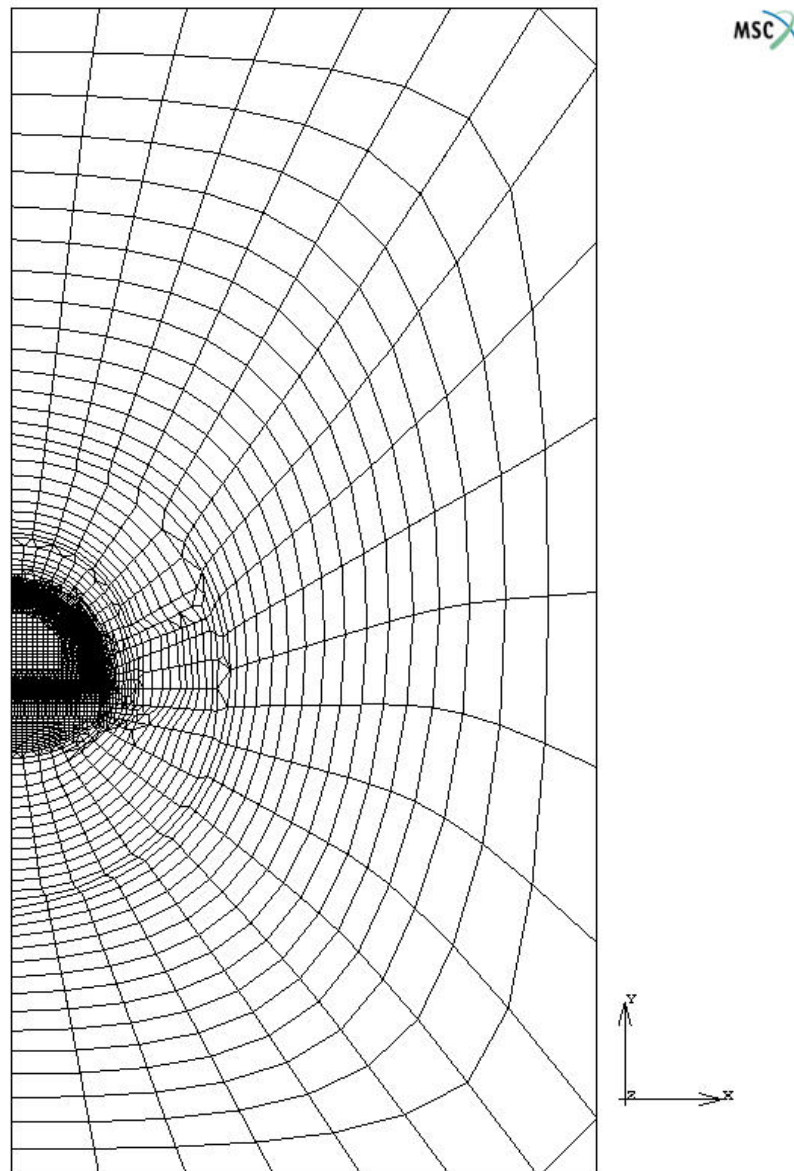


Σχήμα 4.12 Συνοριακές συνθήκες Σήραγγας I

μοντέλου και β) Κύλιση στον άξονα Y στις πλευρικές ακμές του μοντέλου. Σε όλα τα στοιχεία επιβλήθηκε βαρυτική φόρτιση ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$). Η επίλυση έγινε με παραδοχή επίπεδης παραμόρφωσης (Τύπος στοιχείων 11).

4.4.2 Μοντελοποίηση Σήραγγας II

Οι φάσεις εκσκαφής της Σήραγγας II επέτρεπαν τη χρήση συμμετρίας κατά Y και γι' αυτό η διατομή διακριτοποιήθηκε κατά το ήμισυ, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.13. Το ύψος του μοντέλου είναι 90 m και το πλάτος του 45 m. Η στέψη της σήραγγας είναι 45 m κάτω από την επιφάνεια. Αναπτύχθηκαν 2 μοντέλα ίδιας γεωμετρίας, ένα για κάθε φάση εκσκαφής, τα οποία επιλύθηκαν υποστηριγμένα και ανυποστήρικτα,

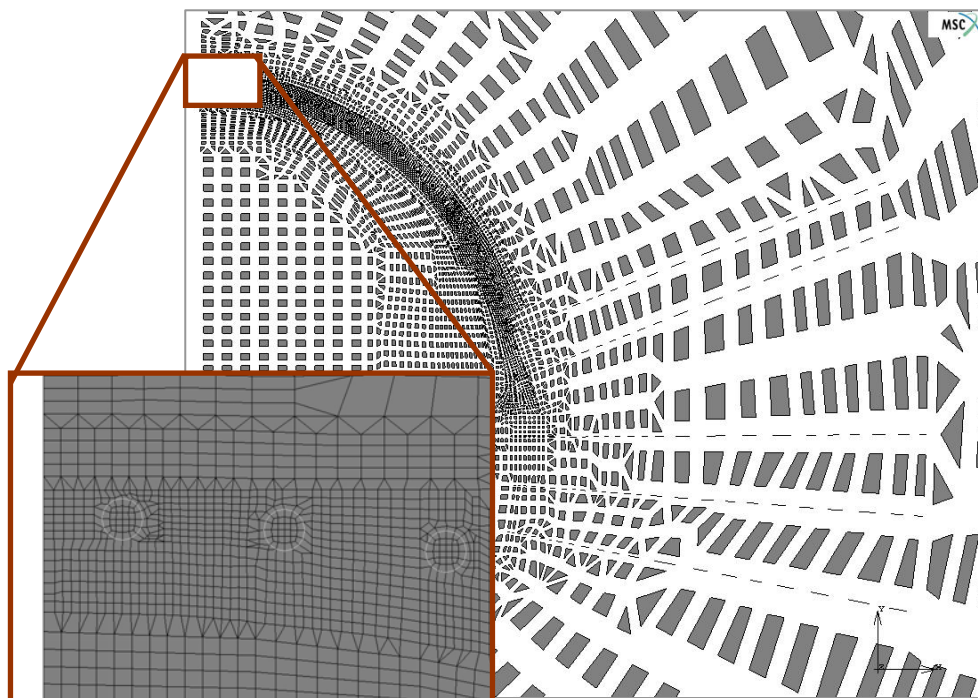


Σχήμα 4.13 Διακριτοποίηση Σήραγγας II

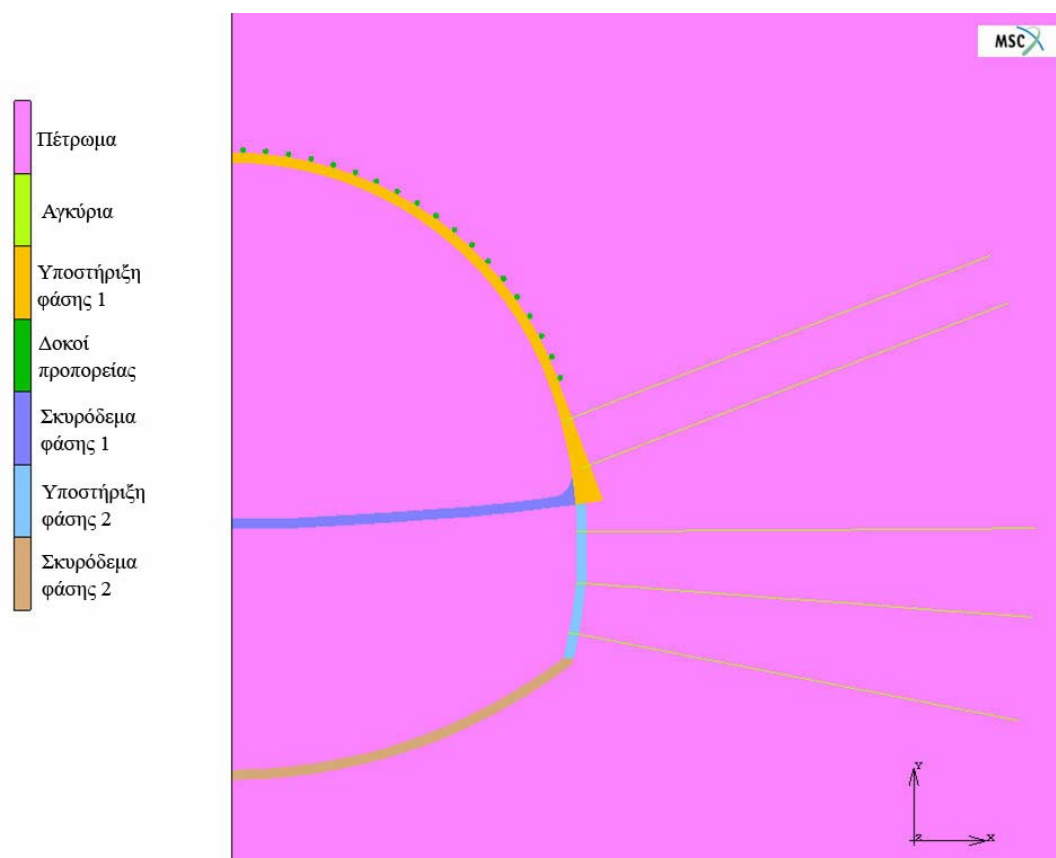
δηλαδή με διαφορετικές ιδιότητες γεωμετρίας και υλικών. Όλα τα χρησιμοποιούμενα υλικά θεωρήθηκαν ελαστικά, ομογενή και ισότροπα. Όλα τα στοιχεία επιλέχθηκαν δισδιάστατα τετρακομβικά (quad4), ενώ για τα αγκύρια επιλέχθηκαν γραμμικά δικομβικά στοιχεία (line2). Λεπτομέρεια διακριτοποίησης της Σήραγγας II, όπου απεικονίζονται και τα γραμμικά στοιχεία των αγκυριών και η διακριτοποίηση των δοκών προπορείας και της υποστήριξης φαίνεται στο Σχήμα 4.14. Τιμές ιδιοτήτων υλικών και γεωμετρίας ισχύουν και σε αυτή τη σήραγγα όπως έχουν δοθεί στον Πίνακα 4.1. Τα διαφορετικά υλικά της υποστηριγμένης Σήραγγας II φαίνονται στο Σχήμα 4.15. Το μοντέλο έχει 9483 στοιχεία και 8684 κόμβους, ενώ τα 131 από αυτά τα στοιχεία είναι γραμμικά. Οι συνοριακές συνθήκες που εφαρμόστηκαν και απεικονίζονται στο Σχήμα 4.16 είναι: α) Κύλιση στον άξονα X στη βάση του μοντέλου και β) Κύλιση στον άξονα Y στις πλευρικές ακμές του μοντέλου. Σε όλα τα στοιχεία επιβλήθηκε βαρυτική φόρτιση ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$). Η επίλυση έγινε με παραδοχή επίπεδης παραμόρφωσης (Τύπος στοιχείων 11).

4.5 Αποτελέσματα

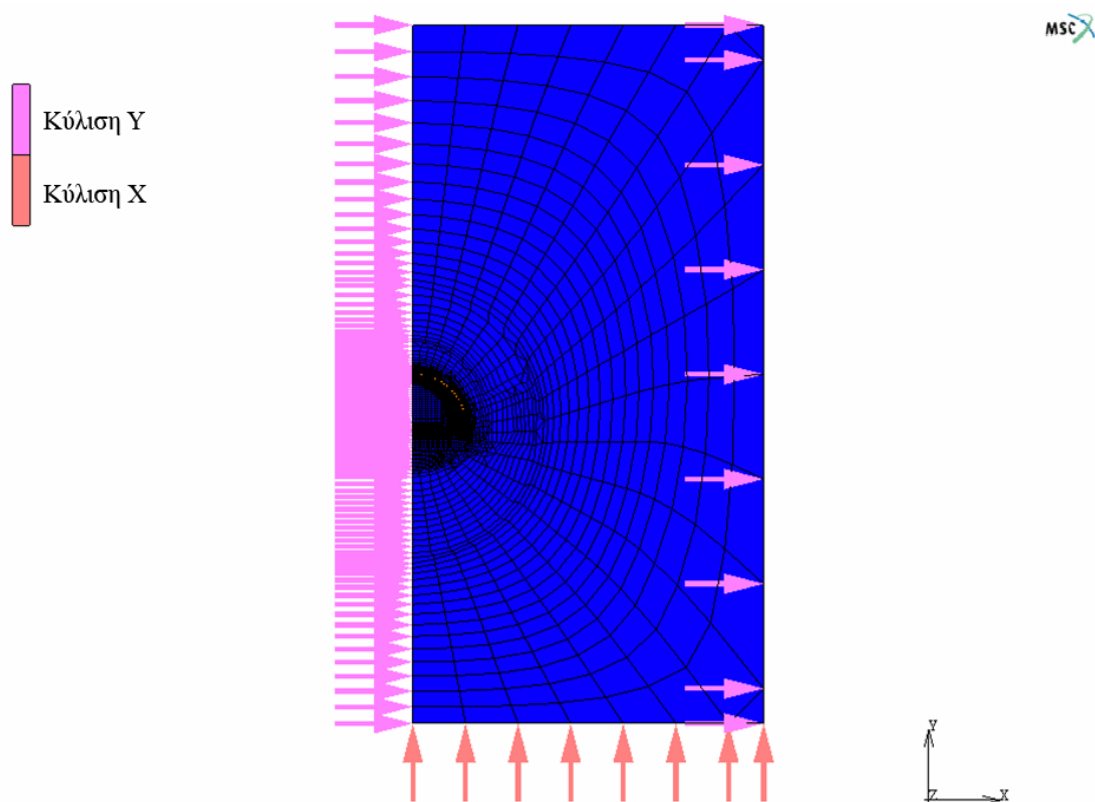
Για την εξαγωγή συμπερασμάτων όσον αφορά στη συμπεριφορά των δύο εναλλακτικών συστημάτων υποστήριξης, κρίνεται απαραίτητη η αναφορά



Σχήμα 4.14 Λεπτομέρειες διακριτοποίησης Σήραγγας II, όπου διακρίνονται τα γραμμικά στοιχεία των αγκυριών και η διακριτοποίηση των δοκών προπορείας και της υποστήριξης



Σχήμα 4.15 Ιδιότητες υλικών Σήραγγας II



Σχήμα 4.16 Συνοριακές συνθήκες Σήραγγας II

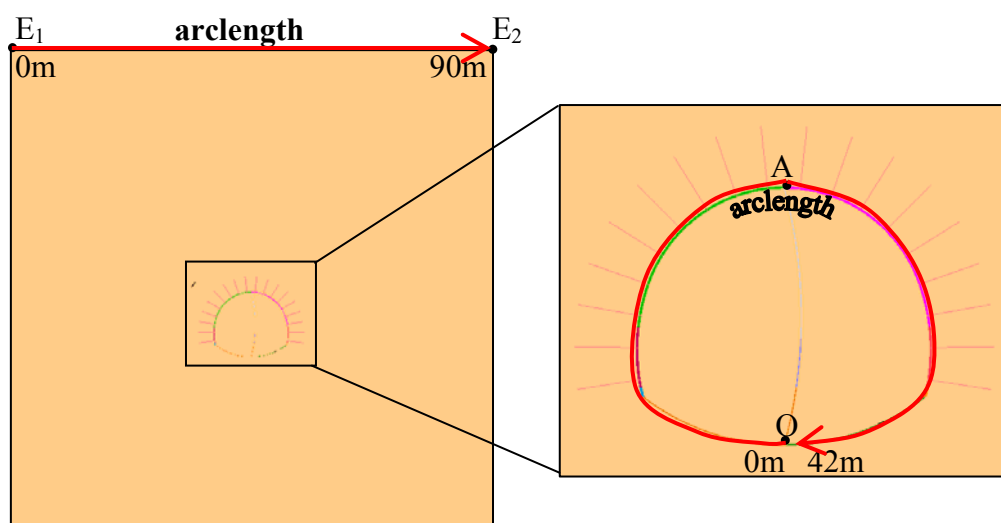
αποτελεσμάτων που αφορούν σε κατακόρυφες μετατοπίσεις επί συγκεκριμένων κρίσιμων σημείων και διαδρομών επί των μοντέλων. Αναφέρονται τα αποτελέσματα κάθε σήραγγας χωριστά για υποστηριγμένες και ανυποστήρικτες διατομές, ώστε να φανεί η επίδραση των μέτρων υποστήριξης στη μείωση των κατακόρυφων μετατοπίσεων και ακολουθεί σύγκριση των δύο διαφορετικά υποστηριγμένων διατομών.

4.5.1 Αποτελέσματα Οδικής Σήραγγας I

Αρχικά, επιλέχθηκε το σημείο A του Σχήματος 4.17, το οποίο βρίσκεται στη στέψη της σήραγγας, για τον έλεγχο των κατακόρυφων μετατοπίσεων ανά φάση εκσκαφής. Οι τιμές των κατακόρυφων μετατοπίσεων στο σημείο A για ανυποστήρικτη και υποστηριγμένη διατομή σε κάθε φάση εκσκαφής δίνονται στον Πίνακα 4.2 και απεικονίζονται γραφικά στο διάγραμμα του Σχήματος 4.18.

Παρατηρείται ότι στις τρεις πρώτες φάσεις εκσκαφής δεν υπάρχει αύξηση των κατακόρυφων μετατοπίσεων από φάση σε φάση, ενώ στην τέταρτη φάση μια απότομη αύξηση της μετατόπισης είναι αναμενόμενη λόγω της αύξησης της οριζόντιας διάστασης της σήραγγας. Υπενθυμίζεται ότι η τέταρτη φάση εκσκαφής αντιστοιχεί στο πάνω δεξιό τμήμα της σήραγγας (Σχήμα 4.2).

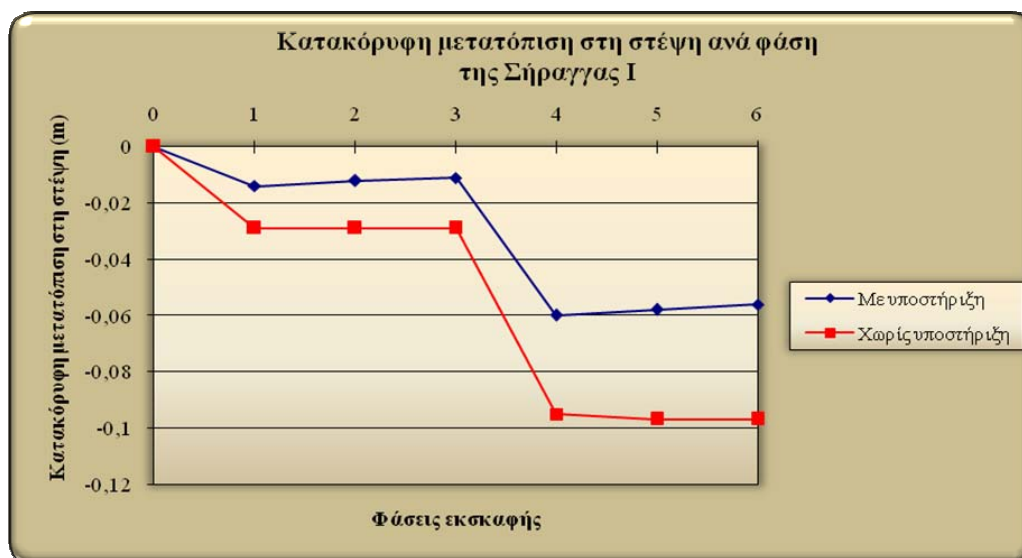
Στο Σχήμα 4.19 φαίνεται διάγραμμα των κατακόρυφων μετατοπίσεων για την ανυποστήρικτη διατομή ανά φάση εκσκαφής κατά μήκος της διαδρομής O - O του Σχήματος 4.17. Η διαδρομή O - O απεικονίζεται με ένα κόκκινο βέλος, το οποίο



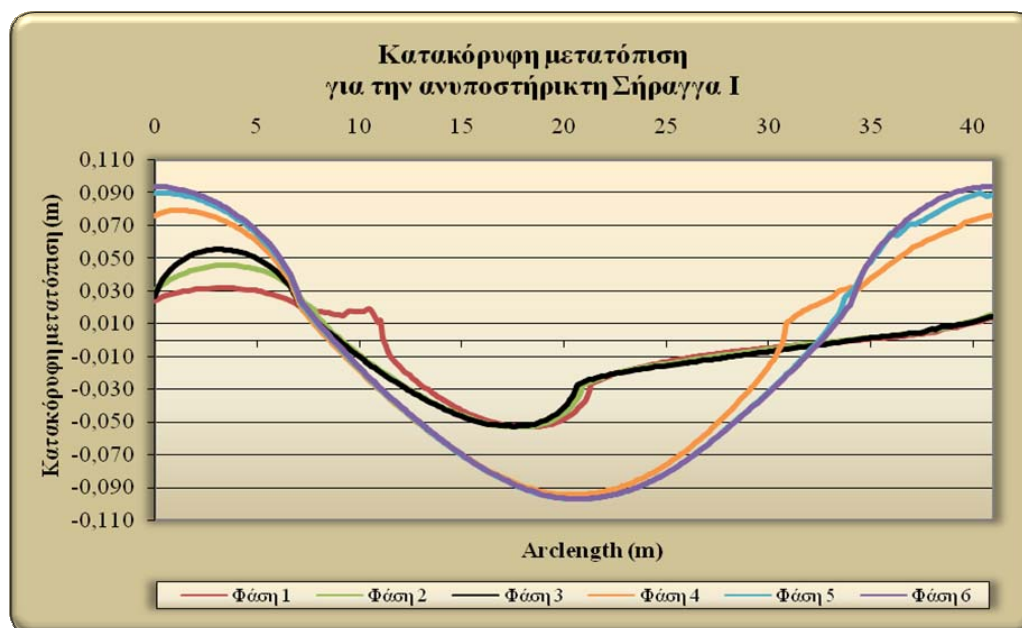
Σχήμα 4.17 Σημεία και διαδρομές επί των οποίων έχουν εξαχθεί τα διαγράμματα των αποτελεσμάτων της Σήραγγας I

Πίνακας 4.2 Κατακόρυφες μετατοπίσεις του σημείου Α του Σχήματος 4.17 ανά φάση εκσκαφής για υποστηριγμένη και ανυποστήρικτη διατομή

Κατακόρυφη Μετατόπιση Υ στη στέψη (m)		
Φάση	Με υποστήριξη	Χωρίς υποστήριξη
1	-0,014	-0,029
2	-0,012	-0,029
3	-0,011	-0,029
4	-0,060	-0,095
5	-0,058	-0,097
6	-0,056	-0,097



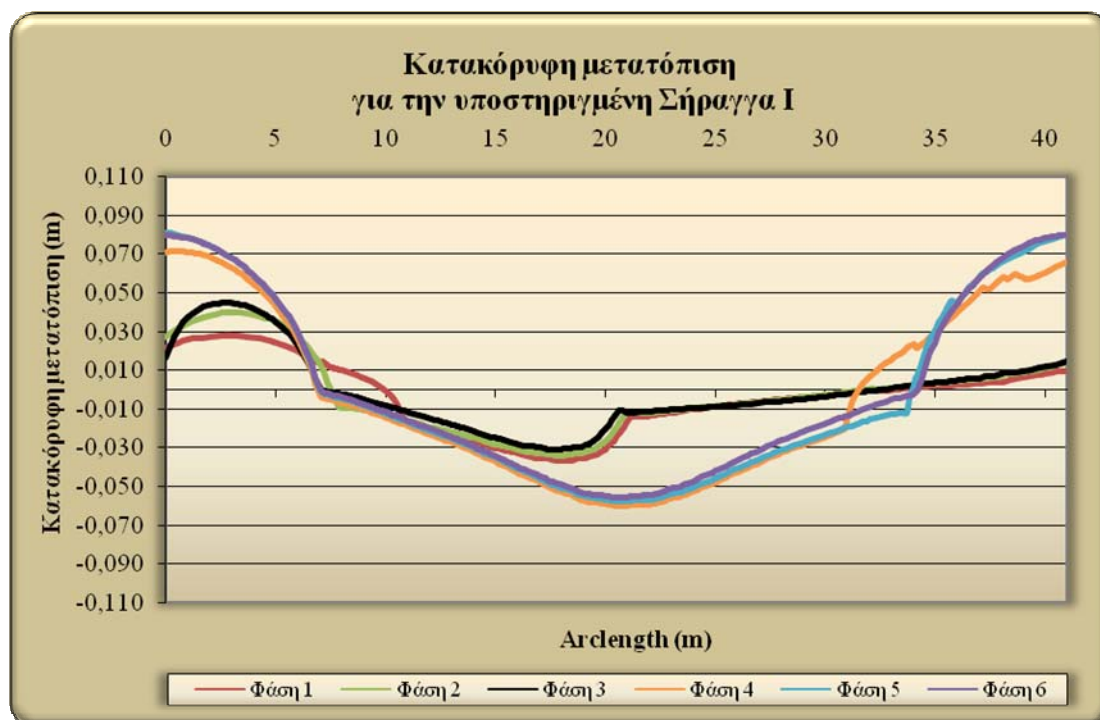
Σχήμα 4.18 Διάγραμμα των κατακόρυφων μετατοπίσεων στη στέψη της σήραγγας ανά φάση εκσκαφής για υποστηριγμένη και ανυποστήρικτη διατομή



Σχήμα 4.19 Διάγραμμα των κατακόρυφων μετατοπίσεων κατά μήκος της διαδρομής Ο - Ο του Σχήματος 4.17 (κόκκινο βέλος που διαγράφει την περίμετρο της σήραγγας) για την ανυποστήρικτη διατομή ανά φάση εκσκαφής

διαγράφει την περίμετρο της σήραγγας ξεκινώντας από το σημείο Ο και καταλήγοντας πάλι σε αυτό με δεξιόστροφη πορεία. Στο διάγραμμα αυτό παρατηρούμε ότι για τις τρεις πρώτες φάσεις οι μέγιστες κατακόρυφες μετατοπίσεις εμφανίζονται στο πάνω αριστερά τμήμα της περιμέτρου της σήραγγας, καθώς δεν έχει ακόμα ολοκληρωθεί η εκσκαφή του συνόλου της διατομής, ενώ κατά την εκσκαφή και των υπολοίπων φάσεων οι μέγιστες μετατοπίσεις μετατοπίζονται προς τη στέψη του ανοίγματος (Σημείο Α), στο οποίο αναμένεται και η μέγιστη τιμή. Στα τμήματα της περιμέτρου που αντιστοιχούν στο δάπεδο της σήραγγας εμφανίζονται θετικές τιμές μετατοπίσεων σε όλες τις φάσεις και αυτό μπορεί να εξηγηθεί με το φαινόμενο της ανάστροφης θόλωσης. Σύμφωνα με το φαινόμενο αυτό, το οποίο συναντάται σε σήραγγες που βρίσκονται σε μεγάλα βάθη, το δάπεδο της σήραγγας τείνει να μετατοπιστεί προς τα επάνω και να κλείσει το άνοιγμα. Η σκυροδέτηση του δαπέδου σε περιπτώσεις όπου αναμένεται ανάστροφη θόλωση κρίνεται απαραίτητη.

Στο Σχήμα 4.20 φαίνεται το αντίστοιχο διάγραμμα του Σχήματος 4.19 για την υποστηριγμένη διατομή ανά φάση εκσκαφής. Οι καμπύλες ακολουθούν την ίδια συμπεριφορά με αυτές του Σχήματος 4.19 με τη μόνη διαφορά ότι οι μετατοπίσεις είναι μικρότερες λόγω των μέτρων υποστήριξης.

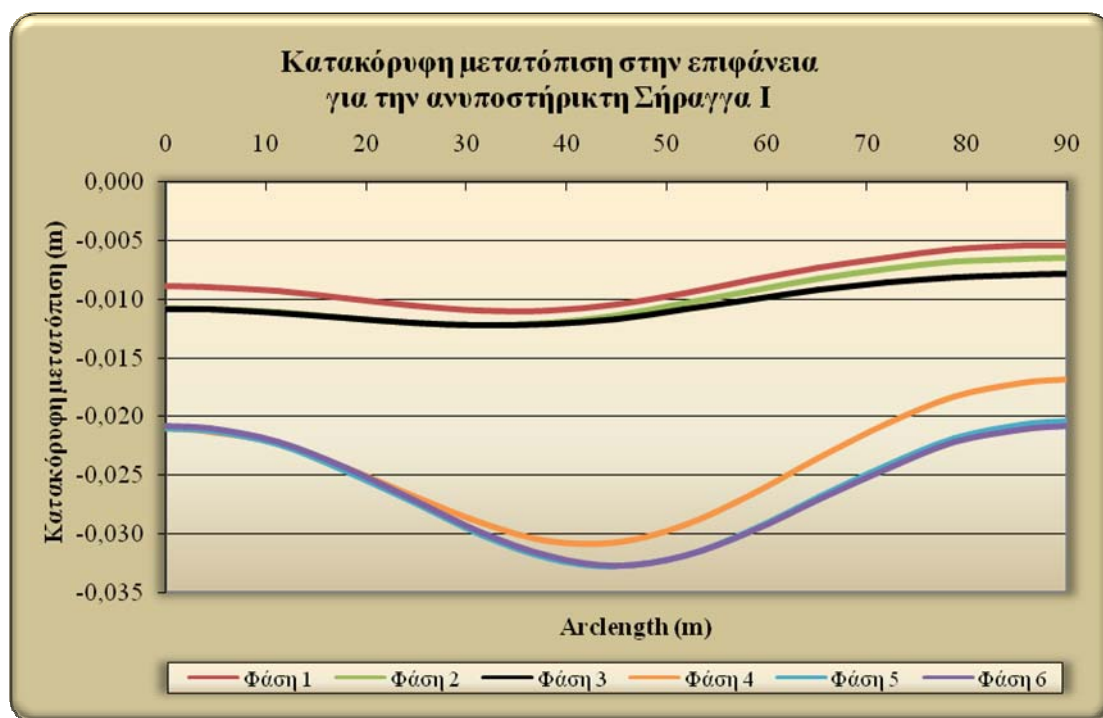


Σχήμα 4.20 Διάγραμμα των κατακόρυφων μετατοπίσεων κατά μήκος της διαδρομής Ο - Ο του Σχήματος 4.17 (κόκκινο βέλος που διαγράφει την περίμετρο της σήραγγας) για την υποστηριγμένη διατομή ανά φάση εκσκαφής

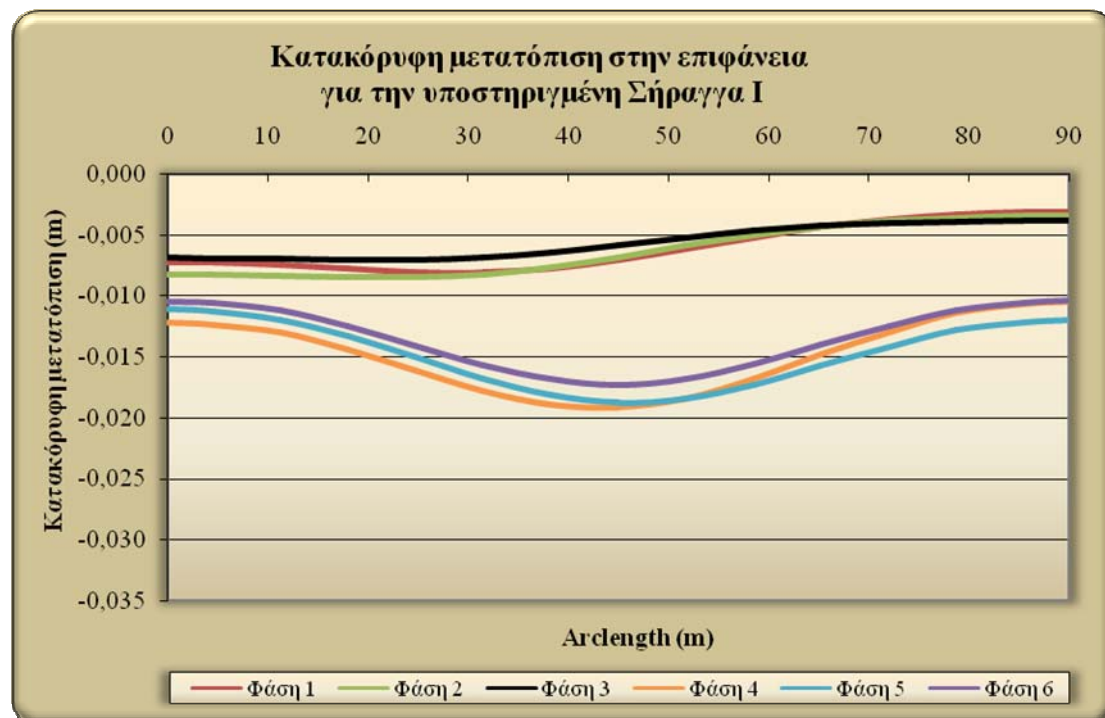
Στο Σχήμα 4.21 φαίνεται διάγραμμα των κατακόρυφων μετατοπίσεων για την ανυποστήρικτη διατομή ανά φάση εκσκαφής κατά μήκος της διαδρομής $E_1 - E_2$ του Σχήματος 4.17. Η διαδρομή $E_1 - E_2$ απεικονίζεται με ένα κόκκινο βέλος, το οποίο ξεκινά από το σημείο E_1 και καταλήγει στο E_2 , διαγράφοντας την άνω ακμή του μοντέλου, δηλαδή την επιφάνεια. Στο διάγραμμα αυτό παρατηρείται ότι για τις τρεις πρώτες φάσεις οι μέγιστες κατακόρυφες μετατοπίσεις εμφανίζονται στο αριστερό τμήμα της επιφανείας, καθώς δεν έχει ακόμα ολοκληρωθεί η εκσκαφή του συνόλου της διατομής, ενώ κατά την εκσκαφή και των υπολοίπων φάσεων οι μέγιστες μετατοπίσεις μετατοπίζονται στην περιοχή της επιφανείας που αντιστοιχεί πάνω από τη στέψη του ανοίγματος (Σημείο A του Σχήματος 4.17), όπου αναμένονται και οι μέγιστες τιμές.

Στο Σχήμα 4.22 φαίνεται το αντίστοιχο διάγραμμα του Σχήματος 4.21 για την υποστηριγμένη διατομή ανά φάση εκσκαφής. Οι καμπύλες ακολουθούν την ίδια συμπεριφορά με αυτές του Σχήματος 4.21 με τη μόνη διαφορά ότι οι μετατοπίσεις είναι μικρότερες λόγω των μέτρων υποστήριξης.

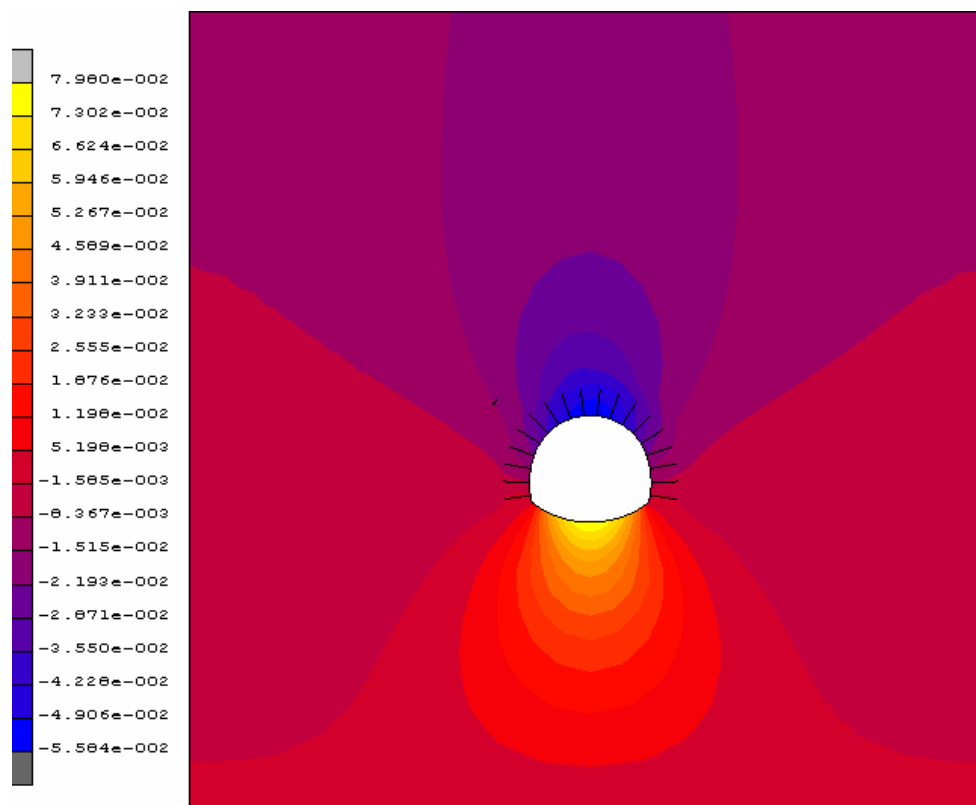
Στο Σχήμα 4.23 αναπαρίστανται γραφικά με χρωματικό κώδικα οι κατακόρυφες μετατοπίσεις (σε m) στην υποστηριγμένη Σήραγγα I. Μέγιστες αρνητικές τιμές



Σχήμα 4.21 Διάγραμμα των κατακόρυφων μετατοπίσεων κατά μήκος της διαδρομής $E_1 - E_2$ του Σχήματος 4.17 (κόκκινο βέλος που διαγράφει την άνω ακμή του μοντέλου που αντιστοιχεί στην επιφάνεια) για την ανυποστήρικτη διατομή ανά φάση εκσκαφής



Σχήμα 4.22 Διάγραμμα των κατακόρυφων μετατοπίσεων κατά μήκος της διαδρομής $E_1 - E_2$ του Σχήματος 4.17 (κόκκινο βέλος που διαγράφει την άνω ακμή του μοντέλου που αντιστοιχεί στην επιφάνεια) για την υποστηριγμένη διατομή ανά φάση εκσκαφής



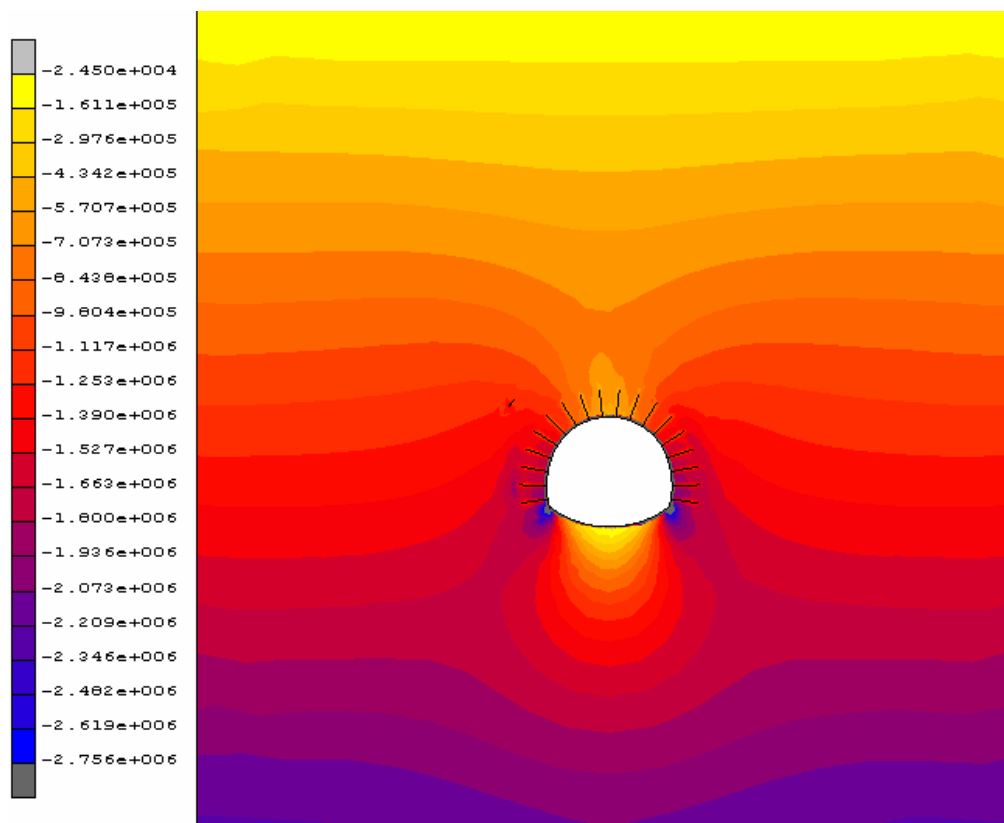
Σχήμα 4.23 Κατακόρυφες μετατοπίσεις (σε m) στην υποστηριγμένη Σήραγγα Ι

εμφανίζονται στην περιοχή πάνω από το άνοιγμα, ενώ στο δάπεδο του ανοίγματος, εμφανίζονται θετικές τιμές μετατοπίσεων λόγω του φαινομένου της ανάστροφης θόλωσης που προαναφέρθηκε. Αξίζει να αναφερθεί ότι οι μετατοπίσεις κοντά στο άνοιγμα είναι της τάξης των εκατοστών, τόσο για υποστηριγμένη όσο και για ανυποστήρικτη διατομή, ενώ στην επιφάνεια η υποστηριγμένη διατομή δίνει μετατοπίσεις της τάξης των χιλιοστών για τις τρεις πρώτες φάσεις και της τάξης των εκατοστών μετά την ολοκλήρωση του ανοίγματος.

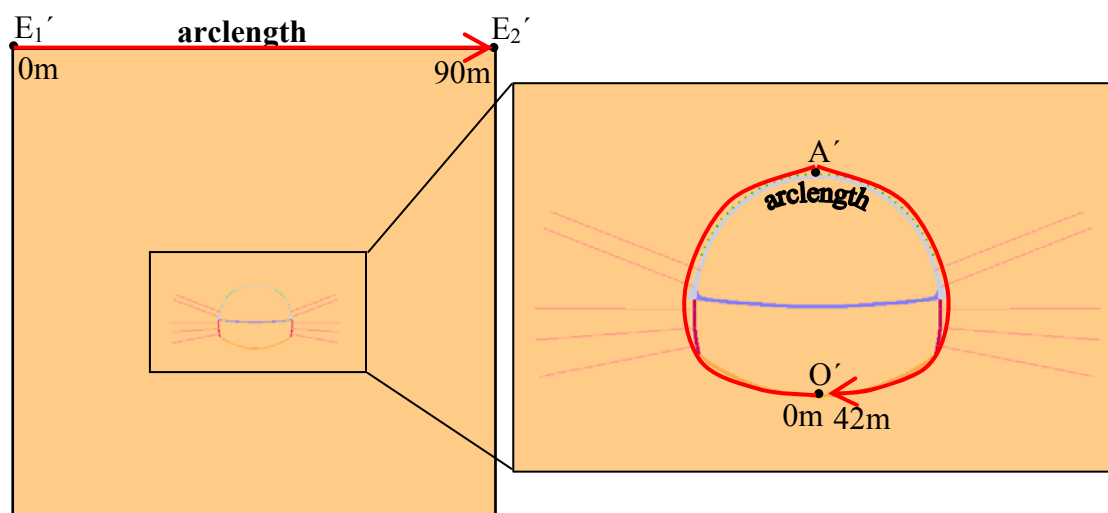
Το Σχήμα 4.24 απεικονίζει με χρωματικό κώδικα την κατανομή των κατακόρυφων τάσεων σ_{22} (σε Pa) στην υποστηριγμένη Σήραγγα I. Η ζώνωση που παρατηρείται στο μοντέλο οφείλεται στις τάσεις που αναπτύχθηκαν κατά την εφαρμογή της βαρυτικής φόρτισης πριν την εκσκαφή του ανοίγματος και εύκολα παρατηρεί κανείς ότι οι τάσεις αυξάνονται όσο μεγαλώνει το βάθος. Η διαταραχή της ζώνωσης αυτής οφείλεται στην ανακατανομή των αρχικών τάσεων μετά τη διάνοιξη της σήραγγας και γι' αυτό περιορίζεται γύρω από το άνοιγμα.

4.5.2 Αποτελέσματα Οδικής Σήραγγας II

Όμοια με τη Σήραγγα I, αρχικά επιλέχθηκε το σημείο Α' του Σχήματος 4.25, το οποίο βρίσκεται στη στέψη της σήραγγας, για τον έλεγχο των κατακόρυφων



Σχήμα 4.24 Τάσεις σ_{22} (σε Pa) στην υποστηριγμένη Σήραγγα I

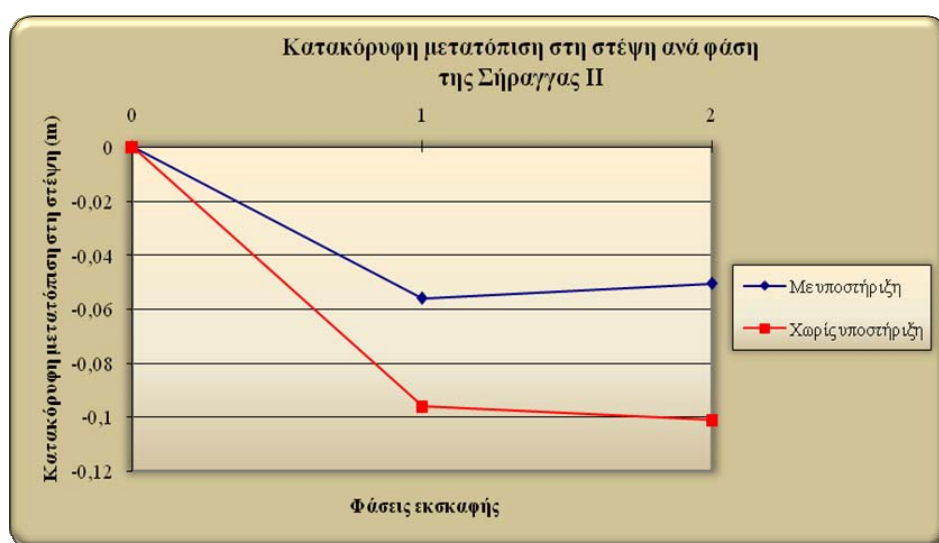


Σχήμα 4.25 Σημεία και διαδρομές επί των οποίων έχουν εξαχθεί τα διαγράμματα των αποτελεσμάτων της Σήραγγας II

μετατοπίσεων ανά φάση εκσκαφής. Οι τιμές των κατακόρυφων μετατοπίσεων στο σημείο A' για ανυποστήρικτη και υποστηριγμένη διατομή σε κάθε φάση εκσκαφής δίνονται στον Πίνακα 4.3 και απεικονίζονται γραφικά στο διάγραμμα του Σχήματος 4.26.

Πίνακας 4.3 Κατακόρυφες μετατοπίσεις του σημείου A' του Σχήματος 4.25 ανά φάση εκσκαφής για υποστηριγμένη και ανυποστήρικτη διατομή

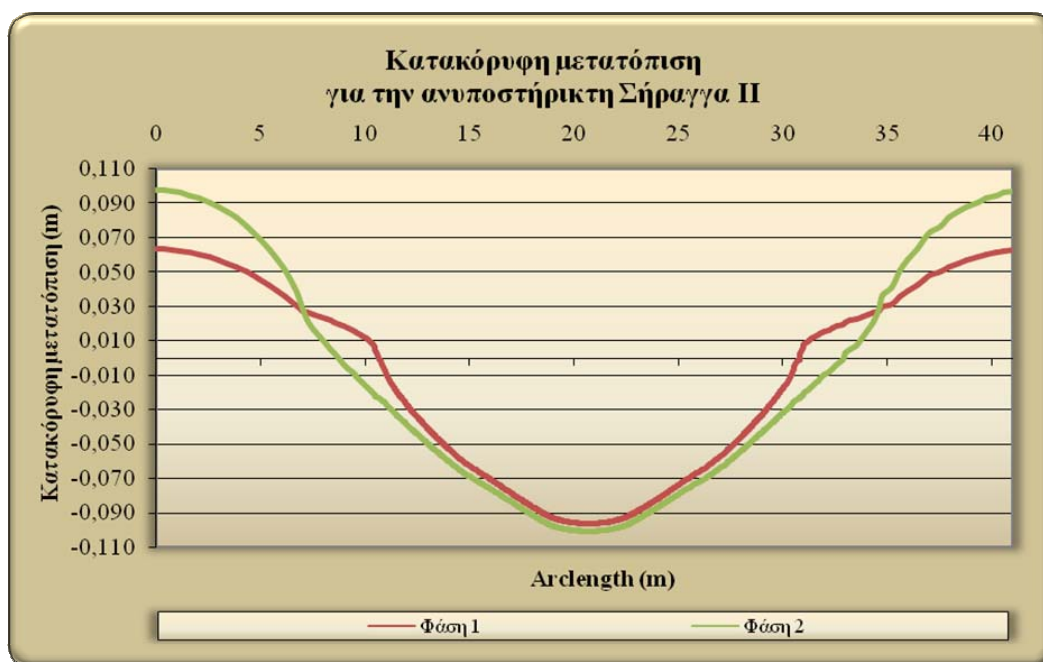
Φάση	Κατακόρυφη Μετατόπιση Υ στη στέψη (m)	
	Με υποστήριξη	Χωρίς υποστήριξη
1	-0,056	-0,096
2	-0,051	-0,101



Σχήμα 4.26 Διάγραμμα των κατακόρυφων μετατοπίσεων στη στέψη της σήραγγας ανά φάση εκσκαφής για υποστηριγμένη και ανυποστήρικτη διατομή

Παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής μετατόπισης της στέψης λαμβάνει χώρα στην πρώτη φάση εκσκαφής και αυτό οφείλεται στο ότι από την πρώτη κιόλας φάση δημιουργείται όλη η οριζόντια διάσταση του ανοίγματος.

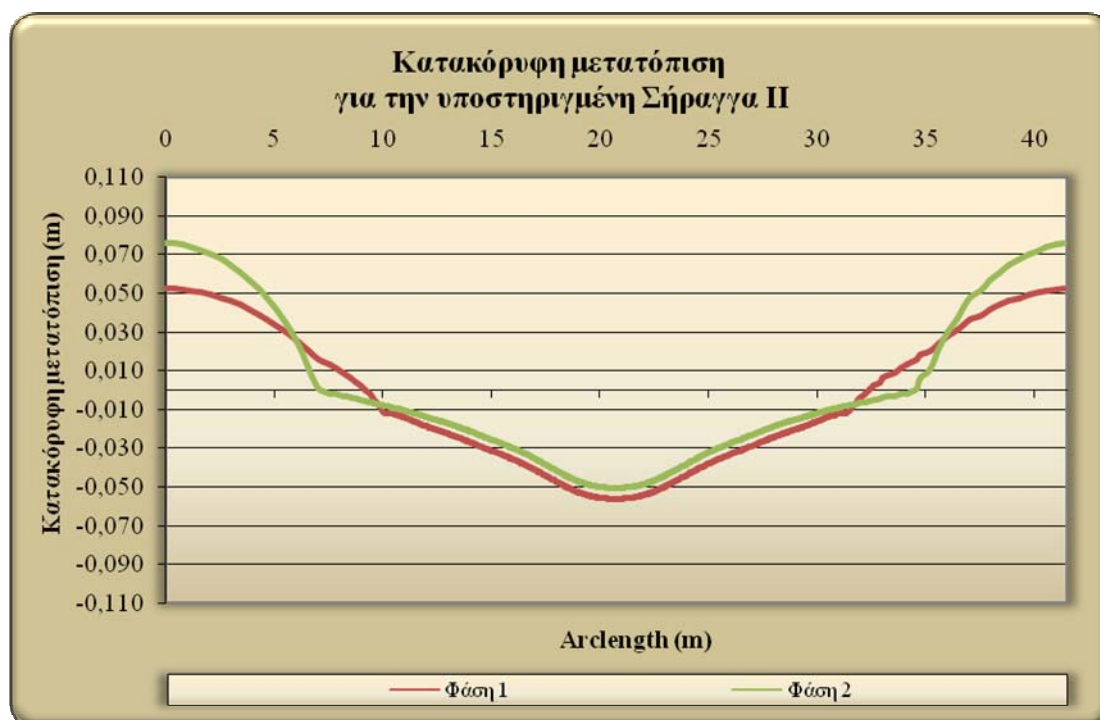
Στο Σχήμα 4.27 φαίνεται διάγραμμα των κατακόρυφων μετατοπίσεων για την ανυποστήρικτη διατομή ανά φάση εκσκαφής κατά μήκος της διαδρομής Ο' - Ο' του Σχήματος 4.25. Η διαδρομή Ο' - Ο' απεικονίζεται με ένα κόκκινο βέλος, το οποίο διαγράφει την περίμετρο της σήραγγας ξεκινώντας από το σημείο Ο' και καταλήγοντας πάλι σε αυτό με δεξιόστροφη πορεία. Η Σήραγγα ΙΙ λύθηκε κατά το ήμισυ λόγω συμμετρίας κατά τον άξονα τον Υ, αλλά στα διαγράμματα απεικονίζονται μετατοπίσεις για όλη τη περίμετρο της σήραγγας (οι οποίες υπολογίστηκαν λόγω συμμετρίας) για να υπάρχει άμεση σύγκριση με τα αντίστοιχα διαγράμματα της Σήραγγας Ι. Στο διάγραμμα αυτό παρατηρείται ότι από την πρώτη κιόλας φάση οι μέγιστες μετατοπίσεις εμφανίζονται στη στέψη του ανοίγματος (Σημείο Α' του Σχήματος 4.25), στο οποίο αναμένεται και η μέγιστη τιμή. Όπως προαναφέρθηκε, αυτό οφείλεται στο ότι από την πρώτη κιόλας φάση δημιουργείται όλη η οριζόντια διάσταση του ανοίγματος. Στα τμήματα της περιμέτρου που αντιστοιχούν στο δάπεδο της σήραγγας εμφανίζονται θετικές τιμές μετατοπίσεων σε όλες τις φάσεις και αυτό μπορεί να εξηγηθεί με το φαινόμενο της ανάστροφης θόλωσης, όπως και στη Σήραγγα Ι.



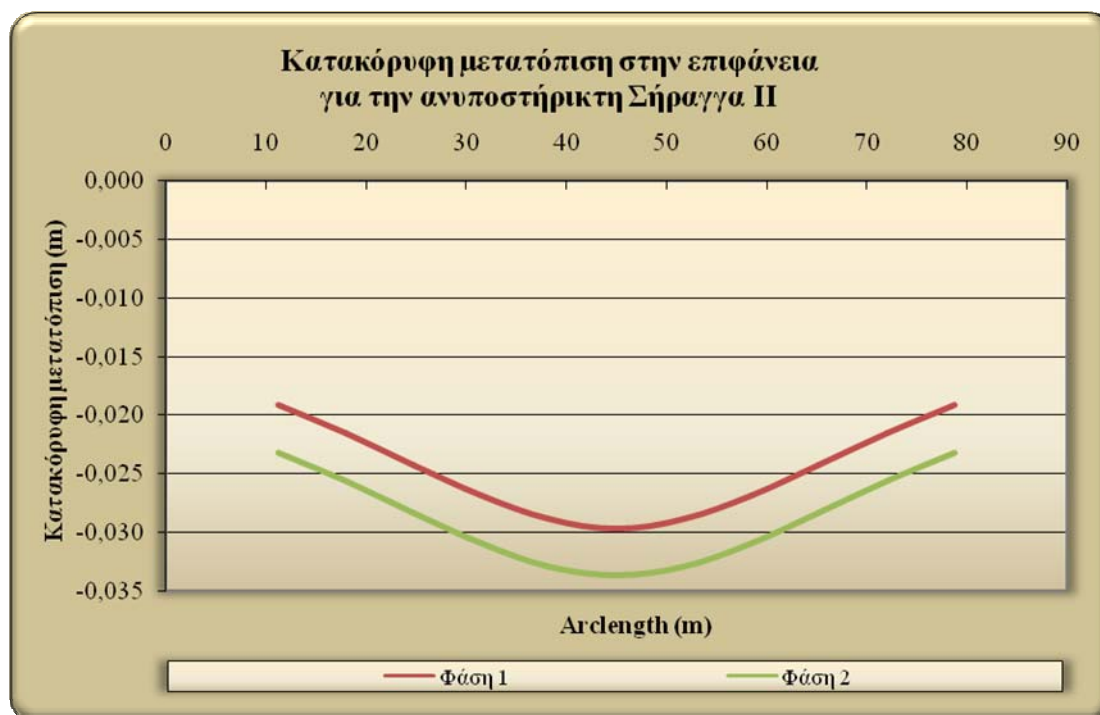
Σχήμα 4.27 Διάγραμμα των κατακόρυφων μετατοπίσεων κατά μήκος της διαδρομής Ο' - Ο' του Σχήματος 4.25 (κόκκινο βέλος που διαγράφει την περίμετρο της σήραγγας) για την ανυποστήρικτη διατομή ανά φάση εκσκαφής

Στο Σχήμα 4.28 φαίνεται το αντίστοιχο διάγραμμα του Σχήματος 4.27 για την υποστηριγμένη διατομή ανά φάση εκσκαφής. Οι καμπύλες ακολουθούν την ίδια συμπεριφορά με αυτές του Σχήματος 4.27 με τη μόνη διαφορά ότι οι μετατοπίσεις είναι μικρότερες λόγω των μέτρων υποστήριξης.

Στο Σχήμα 4.29 φαίνεται διάγραμμα των κατακόρυφων μετατοπίσεων για την ανυποστήρικτη διατομή ανά φάση εκσκαφής κατά μήκος της διαδρομής $E_1' - E_2'$ του Σχήματος 4.25. Η διαδρομή $E_1' - E_2'$ απεικονίζεται με ένα κόκκινο βέλος, το οποίο ξεκινά από το σημείο E_1' και καταλήγει στο E_2' , διαγράφοντας την άνω ακμή του μοντέλου, δηλαδή την επιφάνεια. Όπως προαναφέρθηκε, η Σήραγγα II λύθηκε κατά το ήμισυ λόγω συμμετρίας κατά τον άξονα τον Y, αλλά στα διαγράμματα απεικονίζονται μετατοπίσεις για όλο το μήκος της επιφάνειας (οι οποίες υπολογίστηκαν λόγω συμμετρίας) για να υπάρχει άμεση σύγκριση με τα αντίστοιχα διαγράμματα της Σήραγγας I. Στο διάγραμμα αυτό παρατηρούμε ότι από την πρώτη κιόλας φάση οι μέγιστες μετατοπίσεις εμφανίζονται στο τμήμα της επιφάνειας που αντιστοιχεί πάνω από τη στέψη του ανοίγματος (Σημείο A' του Σχήματος 4.25), όπου και αναμένονταν οι μέγιστες τιμές. Όπως προαναφέρθηκε, αυτό οφείλεται στο ότι από την πρώτη κιόλας φάση δημιουργείται όλη η οριζόντια διάσταση του ανοίγματος.



Σχήμα 4.28 Διάγραμμα των κατακόρυφων μετατοπίσεων κατά μήκος της διαδρομής $O'-O'$ του Σχήματος 4.25 (κόκκινο βέλος που διαγράφει την περίμετρο της σήραγγας) για την υποστηριγμένη διατομή ανά φάση εκσκαφής

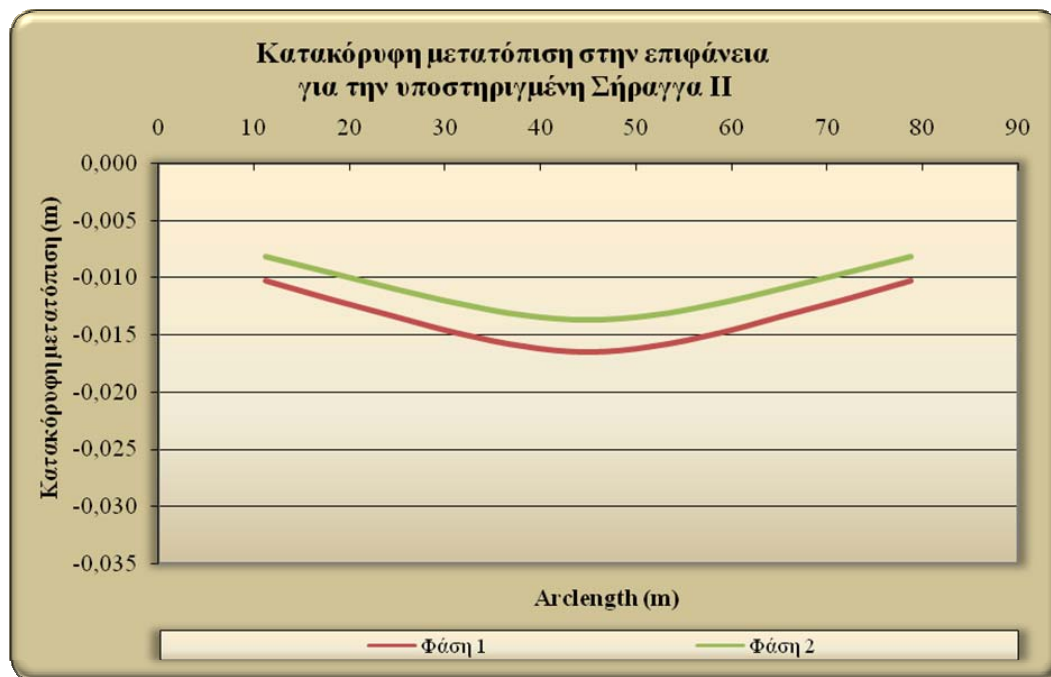


Σχήμα 4.29 Διάγραμμα των κατακόρυφων μετατοπίσεων κατά μήκος της διαδρομής $E_1' - E_2'$ του Σχήματος 4.25 (κόκκινο βέλος που διαγράφει την άνω ακμή του μοντέλου που αντιστοιχεί στην επιφάνεια) για την ανυποστήρικτη διατομή ανά φάση εκσκαφής

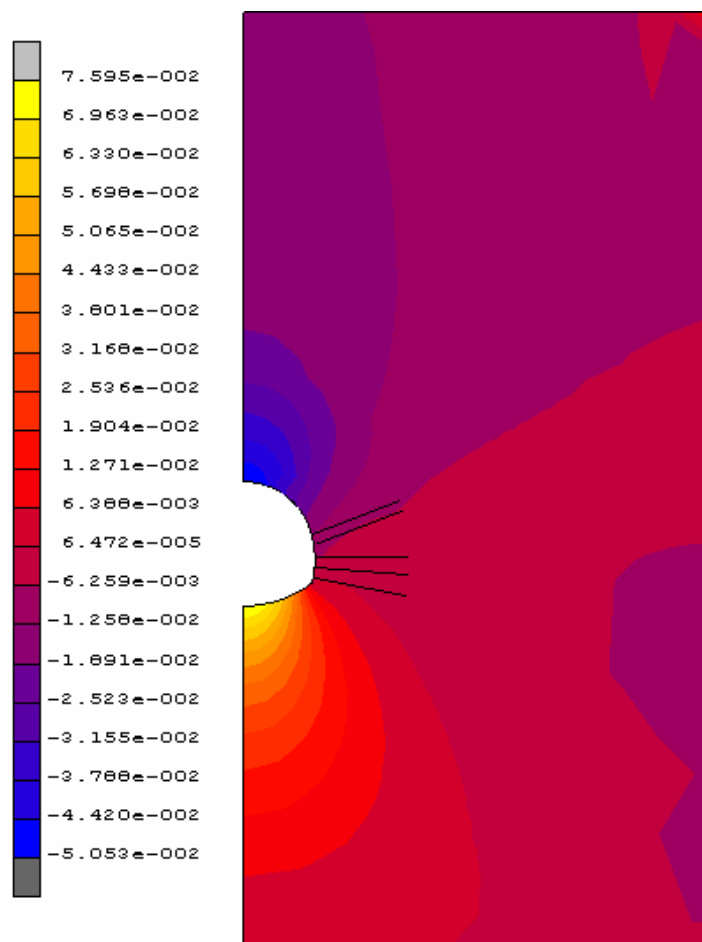
Στο Σχήμα 4.30 φαίνεται το αντίστοιχο διάγραμμα του Σχήματος 4.29 για την υποστηριγμένη διατομή ανά φάση εκσκαφής. Οι καμπύλες ακολουθούν την ίδια συμπεριφορά με αυτές του Σχήματος 4.29 με τη μόνη διαφορά ότι οι μετατοπίσεις είναι μικρότερες λόγω των μέτρων υποστήριξης.

Στο Σχήμα 4.31 αναπαρίστανται γραφικά με χρωματικό κώδικα οι κατακόρυφες μετατοπίσεις (σε m) στην υποστηριγμένη Σήραγγα II. Μέγιστες αρνητικές τιμές εμφανίζονται στην περιοχή πάνω από το άνοιγμα, ενώ στο δάπεδο του ανοίγματος, εμφανίζονται θετικές τιμές μετατοπίσεων λόγω του φαινομένου της ανάστροφης θόλωσης που προαναφέρθηκε. Αξίζει να αναφερθεί ότι οι μετατοπίσεις είναι της τάξης των εκατοστών, τόσο για υποστηριγμένη όσο και για ανυποστήρικτη διατομή από την πρώτη κιόλας φάση, εφόσον η οριζόντια διάσταση του ανοίγματος έχει τη μέγιστη τιμή του.

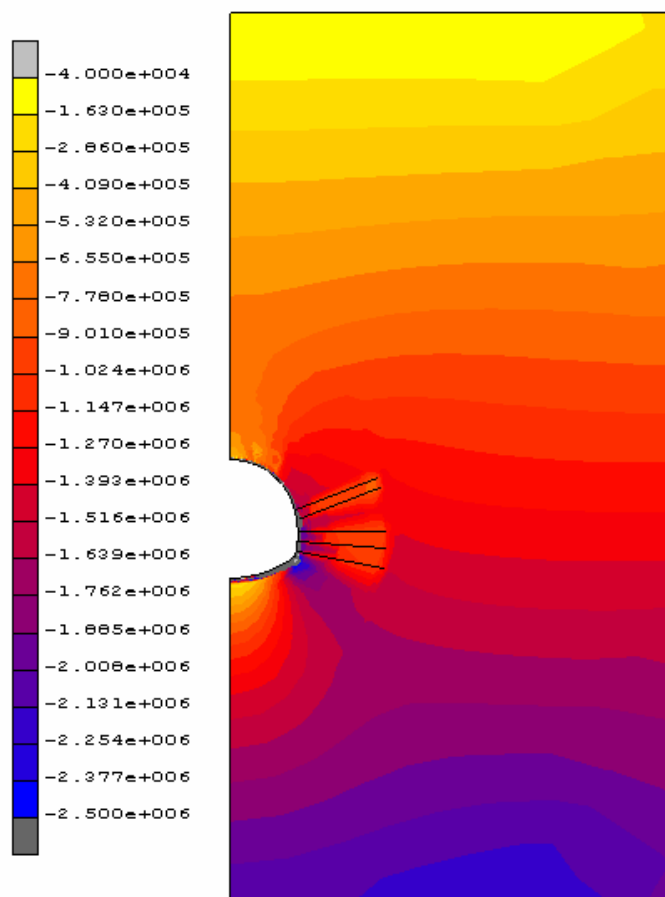
Το Σχήμα 4.32 απεικονίζει με χρωματικό κώδικα την κατανομή των κατακόρυφων τάσεων σ_{22} (σε Pa) στην υποστηριγμένη Σήραγγα II. Η ζώνωση που παρατηρείται στο μοντέλο οφείλεται στις τάσεις που αναπτύχθηκαν κατά την εφαρμογή της βαρυτικής φόρτισης πριν την εκσκαφή του ανοίγματος και εύκολα παρατηρεί κανείς ότι οι τάσεις αυξάνονται όσο μεγαλώνει το βάθος. Η διαταραχή της



Σχήμα 4.30 Διάγραμμα των κατακόρυφων μετατοπίσεων κατά μήκος της διαδρομής $E_1' - E_2'$ του Σχήματος 4.25 (κόκκινο βέλος που διαγράφει την άνω ακμή του μοντέλου που αντιστοιχεί στην επιφάνεια) για την υποστηριγμένη διατομή ανά φάση εκσκαφής



Σχήμα 4.31 Κατακόρυφες μετατοπίσεις (σε m) στην υποστηριγμένη Σήραγγα II



Σχήμα 4.32 Τάσεις σ_{22} (σε Pa) στην υποστηριγμένη Σήραγγα II

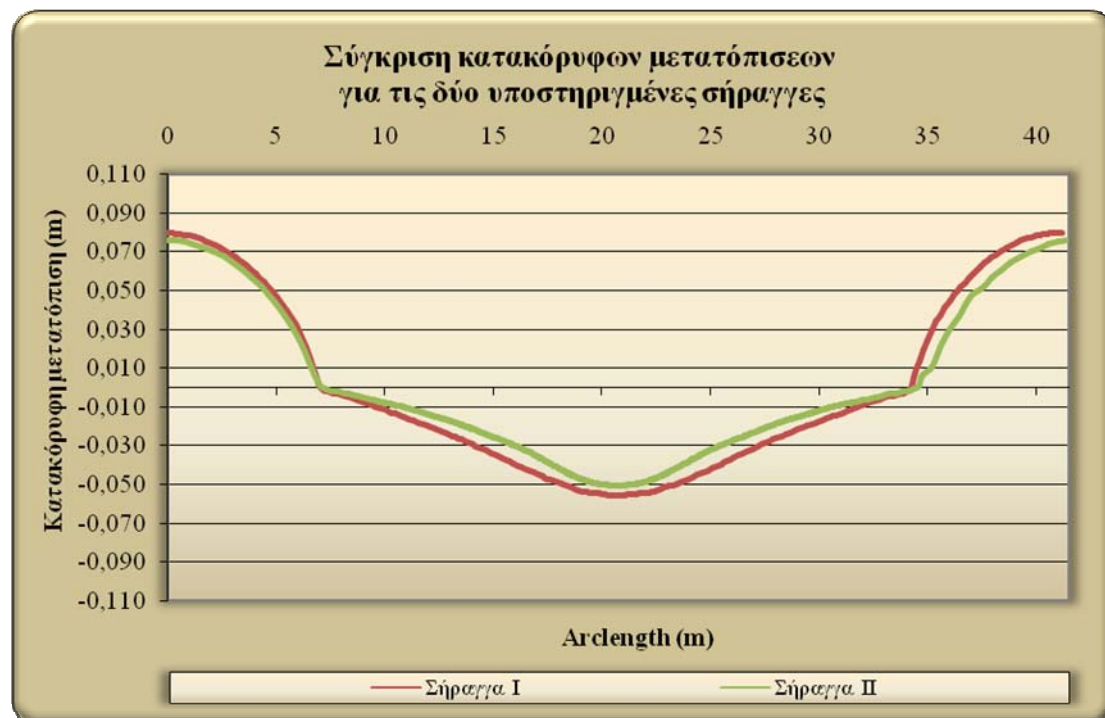
ζώνωσης αυτής οφείλεται στην ανακατανομή των αρχικών τάσεων μετά τη διάνοιξη της σήραγγας και γι' αυτό περιορίζεται γύρω από το άνοιγμα.

4.5.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων

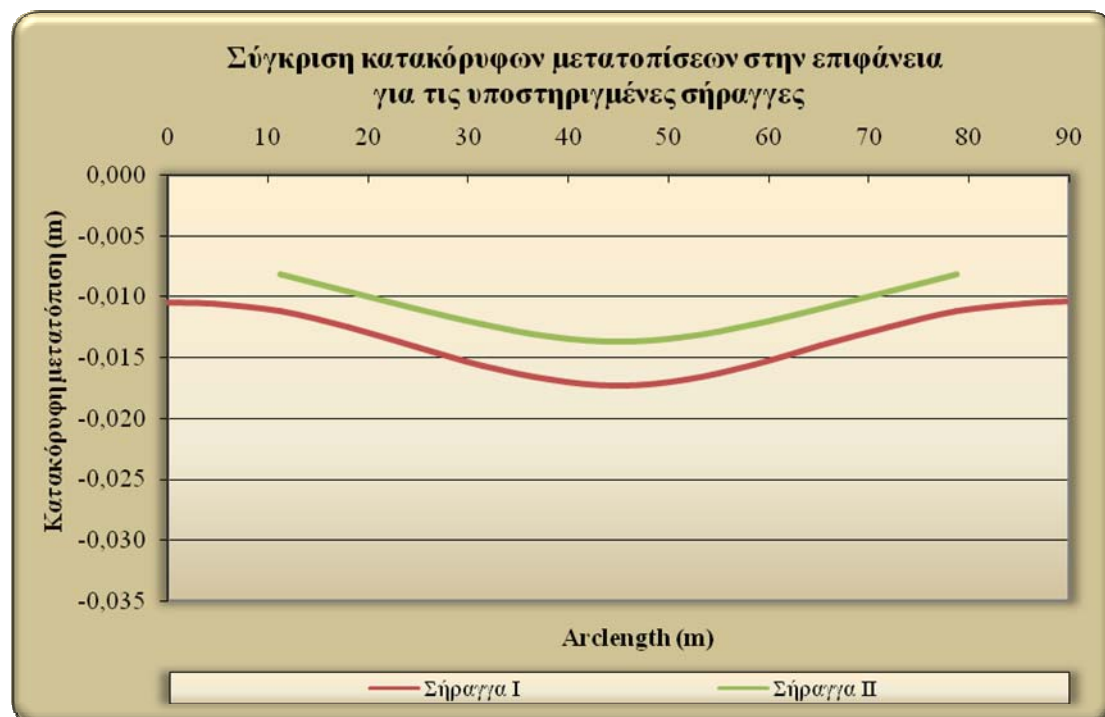
Οι δύο σήραγγες ακολουθούν την ίδια συμπεριφορά μετά το πέρας της εκσκαφής του συνόλου της διατομής τους. Το Σχήμα 4.33 συγκρίνει τις κατακόρυφες μετατοπίσεις των δύο υποστηριγμένων διατομών κατά μήκος της περιμέτρου τους (Μήκη O – O και O' – O' των Σχημάτων 4.17 και 4.25 των Σηράγγων I και II αντίστοιχα). Μικρότερες μετατοπίσεις εμφανίζει η Σήραγγα II, στην οποία έχουν εφαρμοστεί και τα ισχυρότερα μέτρα υποστήριξης. Το Σχήμα 4.34 συγκρίνει τις κατακόρυφες μετατοπίσεις των δύο υποστηριγμένων διατομών κατά μήκος της επιφάνειας (Μήκη E₁ – E₂ και E₁' – E₂' των Σχημάτων 4.17 και 4.25 των Σηράγγων I και II αντίστοιχα). Παρατηρείται ότι τόσο στην επιφάνεια όσο και στη στέψη της σήραγγας η διαφορά των μετατοπίσεων ανάμεσα στις δυο σήραγγες είναι ελάχιστη, της τάξης των χιλιοστών. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι οι κατακόρυφες

μετατοπίσεις κατά μήκος της επιφάνειας σε όλες τις περιπτώσεις (Σχήματα 4.21 - 4.22, 4.29 - 4.30 και 4.34) είναι διαφορετικές από αυτές που εμφανίζονται στην πραγματικότητα. Ακριβής πρόβλεψη μεγέθους και προφίλ μετατοπίσεων εδάφους είναι δύσκολη για τις συχνά χρησιμοποιούμενες μεθόδους μοντελοποίησης με πεπερασμένα στοιχεία. Οι μετατοπίσεις που υπολογίζονται από μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων με έλεγχο φορτίου είναι μικρότερες και εμφανίζονται σε μεγαλύτερο εύρος από αυτές που μετρώνται στο πεδίο. Για παράδειγμα, μετακινήσεις κοντά στο πεδίο είναι υποεκτιμημένες, ενώ μακριά από το πεδίο είναι υπερεκτιμημένες. Ακόμα και η προσέγγιση με τρισδιάστατα μοντέλα ή με μοντέλα που χρησιμοποιούν στοιχεία εδάφους παρουσιάζει περιορισμένη επιτυχία, καθώς οι μετακινήσεις μακριά από το πεδίο είναι υπερεκτιμημένες. Οι αναλυτικές λύσεις θεωρούν γραμμική ελαστικότητα και δεν λαμβάνουν υπόψη τη μη γραμμική συμπεριφορά του εδάφους (Cheng, 2007). Οι Addenbrooke et al. (1997) υποστηρίζουν ότι για να υπολογιστούν μετατοπίσεις εδάφους λόγω διάνοιξης σήραγγας απαιτείται η θεώρηση μη ρεαλιστικής ανισοτροπίας υλικού. Επομένως, ανάγκη για εναλλακτική απλή τεχνική μοντελοποίησης διάνοιξης σιράγγων με πεπερασμένα στοιχεία είναι επιτακτική. Οι Cheng et al. (2007) προτείνουν ένα μοντέλο με έλεγχο μετατόπισης, το οποίο δίνει προφίλ μετατοπίσεων επιφανείας πιο ρεαλιστικό/ακριβές, στο οποίο εφαρμόζεται έλεγχος μετατόπισης στους κόμβους γύρω από το άνοιγμα για προσομοίωση της ανακούφισης τάσεων. Στο Σχήμα 4.35 φαίνονται τα διαφορετικά προφίλ επιφανειακών καθιζήσεων που υπολόγισαν με διαφορετικούς τρόπους για την Τύπου 2 πιλοτική σήραγγα του Heathrow και είναι προφανής η ακρίβεια του μοντέλου με τον έλεγχο μετατόπισης.

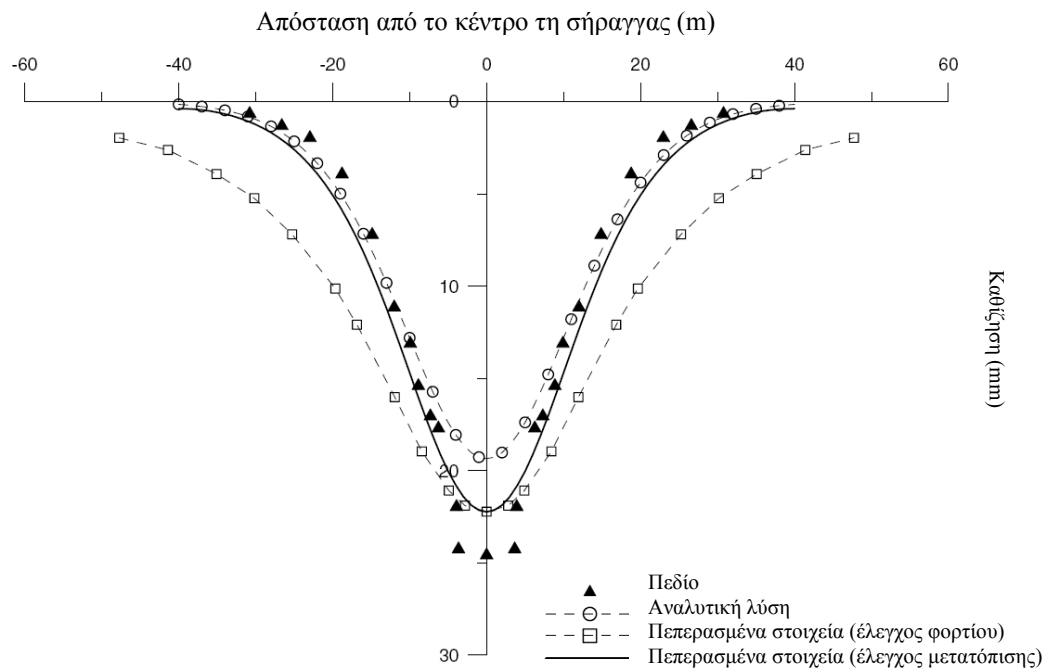
Όσον αφορά στην ανακατανομή των τάσεων μετά το άνοιγμα, η συμπεριφορά και των δύο σιράγγων είναι ίδια. Επομένως, η επιλογή της Σήραγγας I ή Σήραγγας II θα εξαρτηθεί από συνδυασμό άλλων παραγόντων, όπως το κόστος, η ασφάλεια των εργαζομένων, η σημασία των μετατοπίσεων στην επιφάνεια (αλληλεπίδραση με άλλες κατασκευές), κλπ. Για παράδειγμα, λαμβάνοντας υπόψη το κόστος προτείνεται η επιλογή της Σήραγγας I με τα λιγότερα μέτρα υποστήριξης, ενώ με γνώμονα την ασφάλεια των εργαζομένων προτείνεται η Σήραγγα II, η οποία έχει δοκούς προπορείας.



Σχήμα 4.33 Σύγκριση των κατακόρυφων μετατοπίσεων των δύο υποστηριγμένων διατομών κατά μήκος της περιμέτρου τους



Σχήμα 4.34 Σύγκριση των κατακόρυφων μετατοπίσεων των δύο υποστηριγμένων διατομών κατά μήκος της επιφάνειας



Σχήμα 4.35 Σύγκριση των επιφανειακών καθιζήσεων που υπολογίστηκαν με διαφορετικούς τρόπους για την Τύπου 2 πιλοτική σήραγγα του Heathrow (Πηγή: Cheng et al, 2007)

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα - Προτάσεις

5.1 Συμπεράσματα

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας έγινε καταγραφή και περιγραφή των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για την εκσκαφή οδικών σιράγγων, καθώς και περιγραφή του απαιτούμενου εξοπλισμού για την καθεμιά, με ταυτόχρονη επισήμανση των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων της κάθε μεθόδου. Συμπεραίνεται ότι η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου ανάλογα με τις συνθήκες της εκάστοτε περίπτωσης, είναι μια αρκετά σύνθετη διαδικασία κρίσιμης σημασίας για την επιτυχία, ασφαλή και οικονομική ολοκλήρωση του έργου.

Επιπρόσθετα, έγινε περιγραφή των μέτρων υποστήριξης που χρησιμοποιούνται σε οδικές σήραγγες, τόσο για την προσωρινή όσο και για τη μόνιμη υποστήριξή τους. Η σωστή επιλογή των μέτρων υποστήριξης είναι επίσης κρίσιμης σημασίας, αλλά πλέον, και σε συνδυασμό με τις σύγχρονες μεθόδους εκσκαφής, καθίσταται εφικτή η όρυξη σιράγγων οποιουδήποτε μήκους και μεγέθους ακόμα και στις πιο απαιτητικές γεωμηχανικές συνθήκες, πάντα με την κατάλληλη επιλογή.

Η μοντελοποίηση και προσομοίωση δύο εναλλακτικών συστημάτων υποστήριξης σε οδική σήραγγα που εξορύσσεται με τμηματική εκσκαφή έγινε με το εμπορικό λογισμικό πακέτο MSC Marc Mentat το οποίο βασίζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Με δεδομένο ότι το εμπορικό λογισμικό πακέτο MSC Marc Mentat είναι ένα πολύ καλό λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων για μη γραμμικά προβλήματα, αλλά δεν διαθέτει έτοιμες επιλογές για τη μοντελοποίηση της φόρτισης γύρω από υπόγεια ανοίγματα σε εδαφικά ή βραχώδη υλικά, όπως διαθέτουν άλλα εξειδικευμένα λογισμικά, διεξήχθη παραμετρική διερεύνηση για την επιλογή του κατάλληλου τρόπου φόρτισης για την προσομοίωση της τμηματικής εκσκαφής και υποστήριξης ενός υπόγειου ανοίγματος με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Στόχος ήταν να εφαρμοσθεί αντιπροσωπευτικά το βαρυτικό πεδίο στις υπό μελέτη διατομές αξιοποιώντας τις διάφορες επιλογές που προσφέρει το λογισμικό πακέτο Marc Mentat. Στα μοντέλα εφαρμόστηκε βαρυτική φόρτιση, η οποία είναι πιο ρεαλιστική

από την εφαρμογή μιας ισοδύναμης φόρτισης ακμής. Μετά από δοκιμή τριών διαφορετικών προσεγγίσεων τύπου φόρτισης, επιλέχθηκε η εφαρμογή αρχικών συνθηκών από προηγούμενη φόρτιση, κατά την οποία το εντατικό πεδίο που δημιουργεί η βαρυτική φόρτιση του μοντέλου πριν από την εκσκαφή του ανοίγματος χρησιμοποιείται σαν αρχική εντατική κατάσταση στο μοντέλο που απενεργοποιούνται τα στοιχεία για τη δημιουργία του ανοίγματος. Η προσέγγιση που επιλέχθηκε κατέληξε στα αναμενόμενα αποτελέσματα, εφόσον παρατηρήθηκε στα αποτελέσματα ανακατανομή των τάσεων του αρχικά διαμορφωμένου εντατικού πεδίου λόγω βαρυτικής φόρτισης γύρω από το άνοιγμα.

Για τη σύγκριση των δύο διαφορετικά υποστηριγμένων διατομών, υπολογίστηκαν οι κατακόρυφες μετατοπίσεις σε κρίσιμα σημεία και διαδρομές επί των μοντέλων. Οι δύο σήραγγες ακολουθούν την ίδια συμπεριφορά μετά το πέρας της εκσκαφής του συνόλου της διατομής τους. Παρατηρείται ότι τόσο στην επιφάνεια όσο και στη στέψη της σήραγγας η διαφορά των μετατοπίσεων ανάμεσα στις δυο σήραγγες είναι ελάχιστη, της τάξης των χιλιοστών. Πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι οι κατακόρυφες μετατοπίσεις κατά μήκος της επιφάνειας είναι διαφορετικές από αυτές που εμφανίζονται στην πραγματικότητα. Οι μετατοπίσεις που υπολογίζονται από μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων με έλεγχο φορτίου είναι μικρότερες και εμφανίζονται σε μεγαλύτερο εύρος από αυτές που μετρώνται στο πεδίο. Για παράδειγμα, μετακινήσεις κοντά στο πεδίο είναι υποεκτιμημένες, ενώ μακριά από το πεδίο είναι υπερεκτιμημένες. Όσον αφορά στην ανακατανομή των τάσεων μετά το άνοιγμα, η συμπεριφορά και των δύο σηράγγων είναι ίδια.

Στα τμήματα της περιμέτρου που αντιστοιχούν στο δάπεδο των σηράγγων εμφανίζονται θετικές τιμές μετατοπίσεων σε όλες τις φάσεις και αυτό μπορεί να εξηγηθεί με το φαινόμενο της ανάστροφης θόλωσης. Σύμφωνα με το φαινόμενο αυτό, το οποίο συναντάται σε σήραγγες που βρίσκονται σε μεγάλα βάθη, το δάπεδο της σήραγγας τείνει να μετατοπιστεί προς τα επάνω και να κλείσει το άνοιγμα. Η σκυροδέτηση του δαπέδου σε περιπτώσεις όπου αναμένεται ανάστροφη θόλωση κρίνεται απαραίτητη.

Επομένως, η επιλογή της Σήραγγας Ι ή Σήραγγας ΙΙ θα εξαρτηθεί από συνδυασμό άλλων παραγόντων, όπως το κόστος, η ασφάλεια των εργαζομένων, η σημασία των μετατοπίσεων στην επιφάνεια (αλληλεπίδραση με άλλες κατασκευές), κλπ. Για παράδειγμα, λαμβάνοντας υπόψη το κόστος προτείνεται η επιλογή της

Σήραγγας Ι με τα λιγότερα μέτρα υποστήριξης, ενώ με γνώμονα την ασφάλεια των εργαζομένων προτείνεται η Σήραγγα ΙΙ, η οποία έχει δοκούς προπορείας.

5.2 Προτάσεις

Για τη βελτιστοποίηση της προσομοίωσης των δύο εναλλακτικών συστημάτων υποστήριξης και τη ρεαλιστικότερη προσέγγιση του προβλήματος προτείνεται η θεώρηση ελαστοπλαστικών υλικών για να δοθεί η δυνατότητα εντοπισμού αστοχίας πετρώματος ή υποστήριξης.

Επιπρόσθετα, προτείνεται η δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων, όπου θα δοθεί η δυνατότητα να φανεί η επίδραση των δοκών προπορείας στην υποστήριξη της Σήραγγας ΙΙ, καθώς ο ρόλος τους στην υποστήριξη είναι η παραλαβή των φορτίων της οροφής σε όλο το μήκος τους και η μεταφορά τους στο έδαφος μέσω των πλαισίων, κάτι το οποίο δε μπορεί να ληφθεί υπόψη στα δισδιάστατα μοντέλα.

Τέλος, προτείνεται η δημιουργία ενός μοντέλου με έλεγχο μετατόπισης, το οποίο σύμφωνα με τους Cheng et al. (2007) δίνει προφίλ μετατοπίσεων επιφανείας πιο ρεαλιστικό/ακριβές, στο οποίο εφαρμόζεται έλεγχος μετατόπισης στους κόμβους γύρω από το άνοιγμα για προσομοίωση της ανακούφισης τάσεων.

Βιβλιογραφία

Ελληνική βιβλιογραφία

Αγιουτάντης, Ζ. (2001), «Στοιχεία Γεωμηχανικής, Μηχανική Πετρωμάτων», Εκδόσεις Ίων.

Βιόπουλος, Π. (2006), «Παραμετρική διερεύνηση εντατικής κατάστασης κατά τη διάνοιξη σήραγγας με τη μέθοδο της προπασσάλωσης οροφής», Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.

Δουβής, Π. (2002), «Παραμετρική ανάλυση ευστάθειας σήραγγας που εξορύσσεται με τη μέθοδο της προπασσάλωσης οροφής», Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.

Εξαδάκτυλος, Γ. και Μ. Σταυροπούλου (2006), «Σχεδιασμός και Μηχανική των Σηράγγων και των Υπογείων Έργων», Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Χανιά.

Καββαδάς, Μ. (2004), Σημειώσεις Σχεδιασμού Υπογείων Έργων, Έκδοση Ε.Μ.Πολυτεχνείου.

Μαραγκός, Χ. (1999), «Τεχνικά έργα υποδομής: κατασκευές στην επιφάνεια του βράχου, υπόγειες κατασκευές, φράγματα».

Μπούνου, Α. (2005), «Διαχείριση Κινδύνου Σε Υπόγεια Έργα», Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.

Σοφιανός, Α. Ι. (2002), Σημειώσεις μαθήματος, Έκδοση Ε. Μ. Πολυτεχνείου.

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

Addenbrooke, T.I., D. M. Potts and A.M. Puzrin (1997), “The influence of pre-failure soil stiffness on the numerical analysis of tunnel construction”, *Geotechnique*, Vol. 47, No 3, pp. 693-712.

Agioutantis, Z., P. Viopoulos, H. Papantoni and S. Maurigiannakis (2007), “Numerical Modeling of Forepoling Applications in Tunnel Construction”, Ecomining 2007, 24-26 October, Sovata Romania.

Atlas Copco (2005), Rock & Soil Reinforcement, third edition.

Cheng, C. Y., G. R. Dasari., Y. K. Chow and C. F. Leung (2007), “Finite element analysis of tunnel-soil-pile interaction using displacement controlled model”, Tunnelling and Underground Space technology, Vol. 22, pp. 450-466.

Coulter S. and C. Derek Martin Ground (2004), “Deformations Above a Large Shallow Tunnel Excavated Using Jet Grouting”, Proc. ISRM Symposium EUROCK 2004 and 53rd Geomechanics Colloquy, Edited by W. Schubert, pp. 155-160. VGE, Essen.

Harris, J. S. (1995), “Ground freezing in practice”, Thomas Telford Service Ltd, London.

Heiniö, M. (1999), “Rock excavation handbook”, Copyright Sandvik Tamrock Corp.

Hoek, E. (2000), “Rock Engineering”, Course Notes, published in the Web.

Lovat, R. P. (President & CEO, LOVAT Inc.) (2007), “TBM Design Considerations: Selection of Earth Pressure Balance or Slurry Pressure Balance Tunnel Boring Machines”, Ημερίδα ΕΕΣΥΕ 01/02/2007.

Mahtab, A. M. and P. Grasso (1992), “Geomechanics Principles in the Design of Tunnels and Caverns in Rocks”, Elsevier, 250p.

Peila D. and C. Oggeri (2006), “Various excavation & Auxiliary methods in tunneling”, ITA/AITES – Training course, Tunnel engineering, Seoul.

ROTEX OY (2002), “Forepoling in tunnels”.

Sinha, R. S. (1991), “Underground Structures”, Elsevier.

Tan, W. L and P. G. Ranjith (2003), “Numerical Analysis of Pipe Roof Reinforcement in Soft Ground Tunnelling”, American Society of Civil Engineers, 16th

Engineering Mechanics, Conference July 16 – 18, July 2003, University of Washington, Seattle.

Tonon, F., A. Mammino, D. Vanni, P. G. Borghi and A. Bertero (2005), “Pretunnel technology: applications and design methods”, Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 23, No 5, pp. 487-518.

US Army Corps of Engineers (USACE) (1997), “Tunnels and shafts in Rock”.

Διαδίκτυο

1. <http://www.robbinstbm.com> 2004
2. <http://www.atlascopco.com>, 2004
3. <http://www.dr-sauer.com>, 2004
4. [http://www.jet-grouting.com/Jet grouting technology overview](http://www.jet-grouting.com/Jet%20grouting%20technology%20overview), 2005
5. <http://www.iok.gr>, 2005
6. <https://engineering.purdue.edu/CEM/Research/epb.htm>, 2007
7. <http://www.therobbinscompany.com/products/tunnel>, 2007
8. <http://www.pipejacking.org>, 2007