

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ**



**ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΣΕ  
ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΥΣ ΕΛΑΦΙΚΟΥΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥΣ**



**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**  
**ΓΕΩΡΓΙΟΣ Ι. ΜΠΡΟΚΟΣ**

**Εξεταστική Επιτροπή:**

**Καθηγητής Ζ. ΑΓΙΟΥΤΑΝΤΗΣ (επιβλέπων)**

**Καθηγητής Γ. ΕΞΑΔΑΚΤΥΛΟΣ**

**Λέκτορας Ε. ΣΤΕΙΑΚΑΚΗΣ**

**Χανιά**  
**Ιούνιος, 2011**



### Περίληψη

Η ανάγκη για την κατασκευή σηράγγων ακόμα και στα πιο απαιτητικά πετρώματα κάτω από τις πλέον δύσκολες συνθήκες απαιτεί την πολύ καλή γνώση και αντίληψη πάνω στην μηχανική συμπεριφορά των πετρωμάτων, βάσει της οποίας αναπτύχθηκαν νέες μέθοδοι εκσκαφής υπογείων ανοιγμάτων. Αυτός ο συνδυασμός των νέων μεθόδων εκσκαφής σε συνεργασία με τις σύγχρονες μεθόδους υποστήριξης, κατέληξε στις μέρες μας στην δυνατότητα όρυξης σηράγγων υψηλών απαιτήσεων και προδιαγραφών.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία δημιουργήθηκαν τέσσερα διαφορετικά μοντέλα υποστήριξης, τα οποία διαφοροποιούνται όσον αφορά στην κατασκευή τους, στο πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος κατά την επένδυση της σήραγγας και στην πυκνότητα της κοχλίωσης τους. Η δημιουργία των παραπάνω μοντέλων έχει ως απώτερο στόχο την μελέτη της αντοχής τους και της μηχανικής συμπεριφοράς τους πάνω σε τρεις διαφορετικούς εδαφικούς σχηματισμούς (μάργα, φλύσχης, άργιλος) .

Η μοντελοποίηση πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού πακέτου Phase<sup>2</sup> V.6 της Rocscience όπου έγινε η επιλογή του πλέον κατάλληλου τύπου υποστήριξης ανά εδαφικό σχηματισμό, με κριτήρια τις μετακινήσεις των εδαφών, τις καμπτικές ροπές στην υποστήριξη της σήραγγας, και τις παραμορφώσεις των αγκυρίων.



### Abstract

Tunnel construction in rock and soil requires a thorough understanding of the mechanical behavior of rocks. The combination of new digging techniques in coordination with modern support methods allows successful tunnel construction in difficult geological settings. In this work the N.A.T.M. is analyzed in detail and a parametric analysis of the stress- strain regime around tunnels is attempted for situations where the N.A.T.M. is used.

In this thesis four different models of support were created, which vary in their construction, the thickness of the shotcrete lining in the tunnel and the density of bolting them. The creation of these models is the ultimate aim of studying the strength and mechanical behavior on three different soil formations (marl, flysch, clay).

The modeling was carried out by using the software package Phase 2 V.6 Rocscience of which was selected the most suitable type of support per soil formation, with the criteria of soil movements, the bending moments in support of the tunnel, and the deformation of anchors.

### Διάρθρωση διπλωματικής εργασίας

Η διάρθρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας έχει ως εξής:

Στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο δίδεται ο ορισμός των σιηράγγων, μία ιστορική αναδρομή και οι χρήσεις των σιηράγγων στις σύγχρονες κοινωνίες.

Στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται μια εκτενής αναφορά ως προς το εντατικό πεδίο, την αρχική εντατική κατάσταση του αδιατάρακτου πετρώματος την τασική κατάσταση γύρω από το υπόγειο άνοιγμα, τις παραμορφώσεις κατά την προχώρηση της σιηραγγας (καμπύλες Panet) καθώς και για την μακροχρόνια συμπεριφορά του εδάφους.

Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζονται οι αρχές υποστήριξης υπογείων ανοιγμάτων, όπου περιγράφονται τα μέσα προενίσχυσης πριν την εκσκαφή, μέσα στήριξης μετά την εκσκαφή και τα μέσα της εξωτερικής στήριξης του εδάφους.

Στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται μια αναφορά στις μεθόδους διάνοιξης υπογείων έργων, με έμφαση στην N.A.T.M. που αποτελεί και το αντικείμενο μελέτης καθώς γίνεται και μια ποιο εκτενής αναφορά όσον αφορά την φιλοσοφία, την αρχή της μεθόδου, τις φάσεις εκσκαφής και τις μετακινήσεις τόσο του πετρώματος όσο και της υποστήριξης.

Το κεφάλαιο 5<sup>ο</sup> μπαίνει ουσιαστικά στο θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας όπου γίνεται η μοντελοποίηση των τεσσάρων τύπων υποστήριξης στους τρεις διαφορετικούς εδαφικούς σχηματισμούς με το λογισμικό πρόγραμμα Phase 2 V6 της Rocscience, καθώς γίνεται και μια εισαγωγή στην αρχή του κεφαλαίου πάνω στην θεωρία των πεπερασμένων στοιχείων (finite elements).

Στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζονται με μορφή πινάκων διαγραμμάτων και σχημάτων τα αποτελέσματα της εργασίας και τα συμπεράσματα που προέκυψαν.

### Πρόλογος

Για την πραγματοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου για την πολύτιμη συμβολή τους :

- Στον **κ. Αγιουτάντη Ζαχαρία**, Καθηγητή και επιβλέποντα της διπλωματικής αυτής εργασίας, για την άριστη συνεργασία, τις πολύτιμες συμβουλές, καθώς και την καθοδήγησή του για την κατανόηση βασικών αρχών της μηχανικής πετρωμάτων και της θεωρίας των πεπερασμένων στοιχείων για την πραγματοποίηση της εργασίας αυτής.
- Στον **κ. Γεώργιο Εξαδάκτυλο**, Καθηγητή για την διόρθωση και την εξέταση της παρούσης εργασίας.
- Στον **κ. Εμμανουήλ Στειακάκη**, Λέκτορα για την διόρθωση και την εξέταση της παρούσης εργασίας.
- Στον **κ. Στυλιανό Μαυριγιαννάκη**, Μεταλλειολόγο Μηχανικό ΕΜΠ, για την υλικοτεχνική υποστήριξη και την διάθεση της αίθουσας του μηχανογραφικού κέντρου Η/Υ του τμήματος Μηχ.Ο.Π.
- Στην **Φωτεινή Σταθογιάννη**, Μηχανικό Ορυκτών Πόρων Πολυτεχνείου Κρήτης και επιστημονικό συνεργάτη του εργαστηρίου μηχανικής πετρωμάτων, για την πολύτιμη συνεισφορά της στην τελική διαμόρφωση της παρούσης αυτής.
- Στην Γεωλόγο Α.Π.Θ. **Ιζδράνη Ειρήνη** για την βοήθεια που μου προσέφερε κατά την συγγραφή και διόρθωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας
- Στην **Μπούνου Αικατερίνη**, Μηχανικό Ορυκτών Πόρων Πολυτεχνείου Κρήτης, για την καθοδήγηση και την βοήθεια της στη συλλογή πληροφοριών στην παρούσα διπλωματική εργασία.
- Στον Μηχανικό Ορυκτών Πόρων Πολυτεχνείου Κρήτης, Αθανάσιο Λαζαρόπουλο για την ψυχολογική υποστήριξη στην την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

**Αφιερώνεται**

**Στην οικογένεια μου**

**Γ.Μ.**



## Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη .....	i
Abstract .....	i
Διάρθρωση διπλωματικής εργασίας .....	ii
Πρόλογος .....	iii
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	4
1.1. Σήραγγες .....	4
1.2. Ιστορική αναδρομή σηράγγων .....	4
1.3. Χρήσεις σηράγγων.....	5
1.4. Πιθανά προβλήματα κατά τη διάνοιξη σηράγγων .....	6
2. ΕΝΤΑΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΥΠΟΓΕΙΑ ΑΝΟΙΓΜΑΤΑ .....	7
2.1. Αρχικό εντατικό πεδίο .....	7
2.2. Αρχική εντατική κατάσταση βραχομάζας. ....	8
2.3. Ανακατανομή τάσεων γύρω από υπόγεια ανοίγματα. ....	10
2.4. Εντατική κατάσταση γύρω από υπόγειο άνοιγμα .....	11
2.5. Παραμορφώσεις κατά την προχώρηση της σήραγγας (καμπύλες σύγκλισης αποτόνωσης) ....	14
2.6. Μέθοδος της ισοδύναμης χαλάρωσης της βραχομάζας.....	17
2.7. Μακροχρόνια συμπεριφορά της βραχομάζας. ....	18
3. ΑΡΧΕΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ.....	20
3.1. Γενικά.....	20
3.2. Εσωτερική στήριξη βραχομάζας.....	20
3.2.1. Μέσα προενίσχυσης .....	21
3.2.2. Μέσα στήριξης (μετά την εκσκαφή).....	22
3.2.3. Πλάκες στήριξης .....	32
3.3. Εξωτερική στήριξη βραχομάζας.....	32
3.3.1. Δικτύωμα οροφής.....	32
3.3.2. Μεταλλικά πλαίσια .....	32
3.3.3. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.....	39
3.4. Τελική επένδυση .....	41
4. ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ Ν.Α.Τ.Μ. ....	42
4.1. Γενικά.....	42
4.2. Μέθοδοι διάνοιξης υπογείων έργων .....	42
4.2.1. Μέθοδοι εκσκαφής για κατασκευές κλειστού τύπου:.....	42
4.2.1.1. Συνεχής εκσκαφή με μηχανές ολομέτωπης κοπής .....	42
4.2.1.2. Ασυνεχής εκσκαφή.....	46

4.2.1.2.1.	Διάτρηση – Ανατίναξη (drill & blast).....	46
4.2.1.2.2.	Μηχανική Όρυξη .....	49
4.2.1.2.3.	Νέα αυστριακή μέθοδος. (N.A.T.M.) .....	51
4.2.2.	Μέθοδοι εκσκαφής για κατασκευές ανοικτού τύπου.....	51
4.2.2.1.	Μέθοδος κοπής και επίχωσης (cut and cover) .....	51
4.3.	Νέα Αυστριακή Μέθοδος –New Austrian Tunneling Method (N.A.T.M.).....	52
4.3.1.	Γενικά.....	52
4.3.2.	Φιλοσοφία μεθόδου N.A.T.M. ....	53
4.3.3.	Αρχή της μεθόδου N.A.T.M. ....	53
4.3.4.	Φάσεις εκσκαφής .....	57
4.3.5.	Μέθοδοι διαστασιολόγησης και ανάλυσης της προσωρινής υποστήριξης των σήραγγων...58	
4.3.6.	Τυπικές διατομές σχεδιασμού .....	61
4.3.7.	Μετρήσεις των μετακινήσεων.....	66
4.3.7.1.	Μετακινήσεις του τοιχώματος της σήραγγας.....	66
4.3.7.2.	Μετακινήσεις της βραχώμαζας .....	66
4.3.7.3.	Μετακινήσεις (βυθίσεις) της επιφάνειας του εδάφους.....	67
4.3.7.4.	Μετρήσεις των πιέσεων.....	67
4.3.7.5.	Μετρήσεις δυνάμεων.....	68
4.3.7.6.	Μετρήσεις παροχών .....	68
4.3.8.	Πλεονεκτήματα της NATM σε σχέση με τις εναλλακτικές μεθόδους.....	69
5.	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ NATM ΜΕ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ.....	70
5.1.	Γενικά.....	70
5.2.	Βασική αρχή της μεθόδου.....	70
5.3.	Φιλοσοφία μεθόδου .....	71
5.4.	Διαίρεση του πεδίου.....	72
5.4.1.	Είδη στοιχείων.....	72
5.4.2.	Χαρακτηριστικά της διαίρεσης του πεδίου .....	72
5.5.	Σήραγγες σε μαλακά εδάφη .....	73
5.6.	Φόρτιση των υλικών και συνοριακές συνθήκες .....	74
5.7.	Τύποι συνοριακών συνθηκών .....	74
5.8.	Μοντελοποίηση .....	75
5.8.1.	Το Phase <sup>2</sup> V.6.....	75
5.8.2.	Γεωμετρία της διατομής.....	75
5.8.3.	Γενικές ρυθμίσεις .....	76
5.8.4.	Συνοριακές συνθήκες.....	76

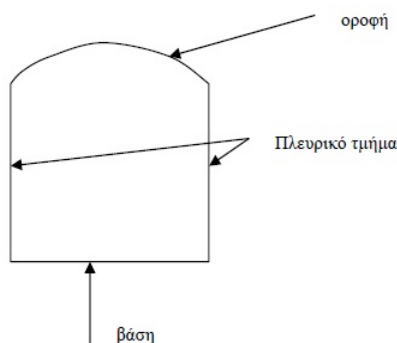
5.8.5. Ιδιότητες των υλικών .....	77
5.8.6. Υπολογιστικές φάσεις .....	80
6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ- ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	85
6.1. Γενικά.....	85
6.2. Ομαδοποίηση των μετρήσεων .....	86
6.2.1. Μάργα .....	87
6.2.1.1. Μοντέλο M1:.....	87
6.2.1.2. Μοντέλο M2:.....	89
6.2.1.3. Μοντέλο M3:.....	91
6.2.1.4. Μοντέλο M4:.....	93
6.2.2. Μαργαϊκός Φλύσχος .....	95
6.2.2.1. Μοντέλο Φ1:.....	95
6.2.2.2. Μοντέλο Φ2:.....	97
6.2.2.3. Μοντέλο Φ3:.....	99
6.2.2.4. Μοντέλο Φ4:.....	101
6.2.3. Στιφρή Άργιλος .....	103
6.2.3.1. Μοντέλο A1:.....	103
6.2.3.2. Μοντέλο A2:.....	105
6.2.3.3. Μοντέλο A3:.....	107
6.2.3.4. Μοντέλο A4:.....	109
6.3. Γενικός συγκεντρωτικός πίνακας .....	111
7. Συμπεράσματα.....	112
7.1. Συμπεράσματα .....	112
7.1.1. Μάργα .....	112
7.1.2. Μαργαϊκός Φλύσχος .....	112
7.1.3. Στιφρή Άργιλος .....	113
8. Προτάσεις.....	113
9. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....	115
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α-ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ .....	115
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β- ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	119
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	120

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1. Σήραγγες

Ως σήραγγα ορίζεται το υπόγειο εκείνο άνοιγμα μέσα σε συνεχές μη συνεχές η εδαφικό μέσο, είναι περίπου οριζόντιο και καταλήγει σε ένα δεύτερο άνοιγμα το οποίο οδηγεί στην επιφάνεια. Αποτελείται από την οροφή το πλευρικό τμήμα και την βάση.

Στην περίπτωση που δεν οδηγεί σε δεύτερο άνοιγμα προς την επιφάνεια λέγεται στοά, ενώ εάν το άνοιγμα αυτό είναι κατακόρυφο ονομάζεται φρέαρ. Στο Σχήμα 1.1 απεικονίζεται μια τυπική διατομή σήραγγας.



Σχήμα 1.1: Τμηματικός διαχωρισμός τυπικής διατομής σήραγγας (Κωμοδρόμος, 2006)<sup>i</sup>

### 1.2. Ιστορική αναδρομή σιράγγων

Το αρχαιότερο όρυγμα που έχει αποκαλυφθεί από την αρχαία Ελλάδα στην περιοχή της Σάμου. Πρόκειται για το Ευπαλίνειο όρυγμα (Σχήμα 1.2), το οποίο προκαλεί ακόμα και στις μέρες μας το θαυμασμό για τον τρόπο με τον οποίο διανοίχτηκε υπό τις τότε υπάρχουσες συνθήκες καθώς και για την τεχνοτροπία της εποχής χρησιμοποιώντας απλά και έξυπνα μέσα. Το Ευπαλίνειο όρυγμα είναι μια σήραγγα μήκους 1036 μέτρων κοντά στο Πυθαγόρειο της Σάμου, η οποία κατασκευάστηκε κατά τον 6ο αιώνα π.Χ. για να χρησιμεύσει ως υδραγωγείο. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του ήταν ότι ανοίχθηκε ταυτόχρονα και από τις δυο πλευρές του βουνού: το όρυγμα αυτό ήταν “αμφίστομον” όπως το χαρακτήρισε ο Ηρόδοτος, χάρις στον οποίον έγινε γνωστό. Οι δυο σήραγγες συναντήθηκαν περίπου στο μέσον με αξιοθαύμαστη ακρίβεια, κάτι που ήταν σημαντικό επίτευγμα για τα τεχνολογικά δεδομένα της εποχής. Ένα μέρος του ορύγματος είναι σήμερα επισκέψιμο. Η κατασκευή του ορύγματος έγινε με εντολή του τυράννου Πολυκράτη και εκτιμάται ότι κράτησε 10 χρόνια. Σχεδιαστής και μηχανικός του έργου ήταν ο Ευπαλίνος, γιος του Ναυστρόφου από τα

Μέγαρα. Το άνοιγμα της σήραγγας είναι περίπου 1.80x1.80 μ. και το μήκος της 1036 μέτρα. Μερικά μέτρα κάτω από την κύρια σήραγγα έχει σκαφτεί μια μικρότερη, από την οποία περνούσε το νερό.

Εκτιμάται ότι ο σκοπός του ορύγματος ήταν όχι μόνο να μεταφερθεί νερό από την πηγή πίσω από το βουνό προς στην πρωτεύουσα της Σάμου (το σημερινό Πυθαγόρειο), αλλά αυτό να γίνει με τρόπο που δεν ήταν ανιχνεύσιμος από επιδρομείς, οι οποίοι θα μπορούσαν εύκολα, αν έβλεπαν τον επιφανειακό αγωγό, να τον καταστρέψουν και να στερήσουν από την πόλη τον βασικότερο πόρο της. Από το ορύγμα λοιπόν το νερό οδηγούνταν μέσα από το τείχος της πόλης.

Ο λόγος για τον οποίο υπάρχουν δυο παράλληλες σήραγγες, είναι ότι κατά το χρόνο σχεδιασμού και υλοποίησης του έργου η πηγή βρισκόταν σε ορισμένο ύψος (υψηλότερο από το επίπεδο της στοάς), αλλά μετά την κατασκευή της κύριας στοάς, η πηγή άρχισε να αναβλύζει χαμηλότερα, συνεπώς δε μπορούσε πλέον με φυσική ροή να οδηγηθεί στη στοά αυτή. Για το λόγο αυτό έγινε αναγκαία η διάνοιξη μιας βοηθητικής, μικρότερης σήραγγας, σε χαμηλότερο επίπεδο. Η μικρότερη σήραγγα διανοίχτηκε μέσα από την κύρια στοά, με τη βοήθεια κάθετων ορυγμάτων (<http://el.wikipedia.org>).



Σχήμα 1.2: Ευπαλίνειο ορύγμα

([http://users.forthnet.gr/ath/deleps/Unknown\\_Hellenic\\_History/Eypalinio\\_orygma.html](http://users.forthnet.gr/ath/deleps/Unknown_Hellenic_History/Eypalinio_orygma.html))<sup>ii</sup>

### 1.3. Χρήσεις σηράγγων

Σήραγγες κατασκευάζονται σε (Καββαδάς, 2006):

- ❖ Οδικά και σιδηροδρομικά συγκοινωνιακά δίκτυα
- ✓ Για διάβαση ορεινών όγκων (Σιδηροδρομική σήραγγα Καλλίδρομου, σήραγγα Κακιάς Σκάλας).
- ✓ Για παράκαμψη δυσμενών γεωλογικών συνθηκών.
- ✓ Για περιβαλλοντικούς λόγους.
- ❖ Αστικά συστήματα μαζικής μεταφοράς (Μετρό).
- ❖ Υδραυλικά έργα.
- ✓ Υδραγωγεία (σήραγγες Μόρνου, Ευήνου, εκτροπής Αχελώου).

- ✓ Έργα αποταμίευσης (σήραγγες εκτροπής).
- ✓ Αποχετεύσεις και αποστραγγίσεις (σήραγγα Κάρλας και Θεσσαλίας).
- ✓ Έργα αποστράγγισης Σχήμα 1.3 για τη βελτίωση των συνθηκών ευστάθειας πρανών (σήραγγα Μαλακάσας).

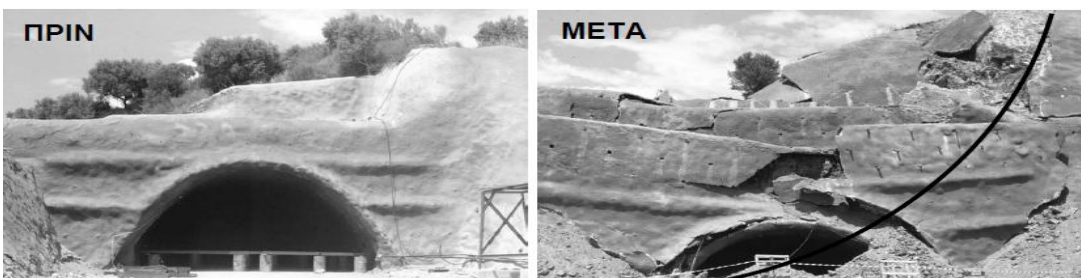


Σχήμα 1.3: Αποστραγγιστική σήραγγα φράγματος Γαδουρά Ρόδου. (Καββαδάς, 2006)<sup>iii</sup>

## 1.4. Πιθανά προβλήματα κατά τη διάνοιξη σπηραγγων

Τα πιθανά προβλήματα που προκύπτουν κατά τη διαδικασία διάνοιξης σπηραγγων είναι τα ακόλουθα (Καββαδάς, 2006):

- ❖ Στα στόμια:
  - ✓ Αστάθεια (ρωγμές στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, σημαντικές μετακινήσεις, γενικευμένη αστοχία), Σχήμα 1.4
- ❖ Στο μέτωπο εκσκαφής:
  - ✓ Αστοχία.
  - ✓ Εκτεταμένη εισροή υδάτων.
  - ✓ Αστάθεια της οροφής (υπέρ- εκσκαφή ή κατάρρευση) κατά την προώθηση του μετώπου.
- ❖ Πίσω από το μέτωπο εκσκαφής:
  - ✓ Μεγάλες και χρονικά εξελισσόμενες συγκλίσεις του τοιχώματος (βύθιση οροφής, σύγκλιση παρειών, ανύψωση πυθμένα).
  - ✓ Βύθιση των βάσεων του τόξου Α' Φάσης εκσκαφής (π.χ. βάσεις χαλύβδινων πλαισίων).
  - ✓ Εμφάνιση ρωγμών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (διαμήκεις ή εγκάρσιες).
  - ✓ Μεγάλες και χρονικά εξελισσόμενες υποχωρήσεις της επιφάνειας του εδάφους.



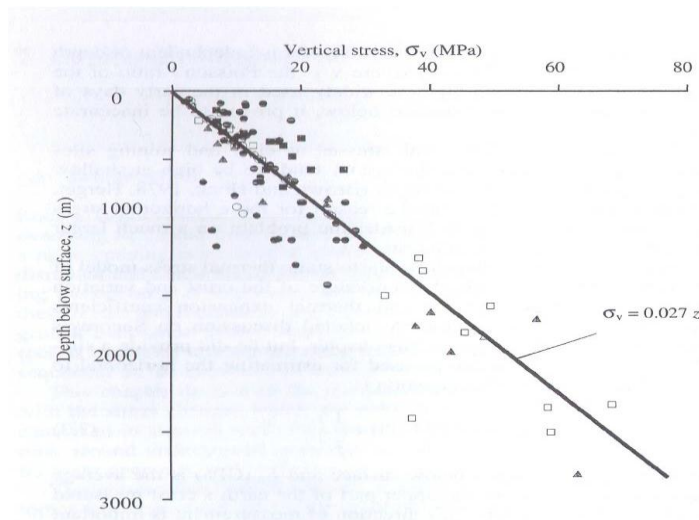
Σχήμα 1.4: Αστοχία οδικής σπηραγγας στο στόμιο (Καββαδάς, 2006)<sup>iv</sup>



## 2. ΕΝΤΑΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΥΠΟΓΕΙΑ ΑΝΟΙΓΜΑΤΑ

### 2.1. Αρχικό εντατικό πεδίο

Αδιατάρακτο, ονομάζεται το επί τόπου (in situ) εντατικό πεδίο, πριν από τη δημιουργία του υπόγειου ανοίγματος. Το μέγεθος και ο προσανατολισμός του πεδίου αυτού εξαρτάται από το βάρος των υπερκείμενων σχηματισμών και την γεωλογική ιστορία της περιοχής. Συνήθως ο προσανατολισμός των κυρίων τάσεων εμφανίζεται κατακόρυφος για την μέγιστη κύρια τάση και οριζόντιος για τις άλλες δύο κύριες τάσεις, η οποία εξαρτάται από το βάθος της εκσκαφής όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.1 (Hoek et al, 1995).



Σχήμα 2.1: Μετρήσεις της κατακόρυφης τάσης σε σχέση με το βάθος της εκσκαφής (Hoek et al, 1995).<sup>v</sup>

Ο πραγματικός προσανατολισμός των κυρίων τάσεων στο έδαφος εξαρτάται από της γεωλογικές συνθήκες της περιοχής. Ο καθορισμός τους πραγματοποιείται από την εξέταση της τεκτονικής της περιοχής και από επί τόπου μετρήσεις. Πολλές φορές δεν είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν αυτές οι μετρήσεις, οπότε ο ποσοτικός προσδιορισμός τους βασίζεται στη χρήση εμπειρικών σχέσεων και κανόνων (Goodman, 1989).

Η όρυξη ενός ανοίγματος στη μάζα του πετρώματος επιφέρει τη μεταβολή του εντατικού πεδίου του αδιατάρακτου πετρώματος (ground stresses), λόγω της ανακατανομής των τάσεων γύρω από το άνοιγμα, με σκοπό την αποκατάσταση της στατικής ισορροπίας του συστήματος. Οι μέγιστες τάσεις θα πρέπει να είναι μικρότερες από την αντοχή του πετρώματος για τις δεδομένες συνθήκες εξόρυξης ώστε να εξασφαλίζεται η ευστάθεια του ανοίγματος.

Οι επί τόπου τάσεις διακρίνονται σε αρχικές (virgin stresses) και επιφερόμενες (induced stresses) λόγω της διαταραχής του εντατικού πεδίου (Αγιουτάντης, 2001).

Οι αρχικές τάσεις διακρίνονται σε (Αγιουτάντης, 2002):

- Βαρυντικές τάσεις (gravitational stresses) που οφείλονται στη δράση του πεδίου βαρύτητας, οι οποίες μπορούν να υπολογιστούν εύκολα από την ισορροπία των δυνάμεων στον κατακόρυφο άξονα.
- 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.

### 2.2. Αρχική εντατική κατάσταση βραχομάζας.

Η εντατική κατάσταση της βραχομάζας πριν από την κατασκευή υπογείων έργων συνήθως είναι η γεωστατική, δηλαδή περιγράφεται από κατακόρυφες και οριζόντιες κύριες ενεργές τάσεις ( $\sigma'_v$  και  $\sigma'_h$  αντιστοίχως) με τιμές (Καββαδάς, 2000):

$$\sigma' = \gamma \cdot h - u$$

όπου  $h$ = το βάθος από την επιφάνεια του εδάφους

$\gamma$ = το ειδικό βάρος της εδαφικής μάζας

$u_0$ = η υδατική πίεση των πόρων

$K_0$ = ο συντελεστής ουδέτερης ώθησης

Το ειδικό βάρος της βραχομάζας κυμαίνεται από 23-26 kN/m<sup>3</sup>. Στην περίπτωση υδροστατικής πίεσης πόρων:  $u_0 = \gamma_w d$ , όπου ( $\gamma_w$ ) είναι το ειδικό βάρος του νερού (10 kN/m<sup>3</sup>) και ( $d$ ) είναι το πιεζομετρικό ύψος. Τέλος, ο συντελεστής ( $K_0$ ) συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 0.4-1.0 χωρίς να αποκλείονται και μικρότερες ή μεγαλύτερες τιμές. Ειδικότερα, σε υγιείς βραχομάζες χωρίς επιρροή από τεκτονικές πιέσεις:  $K_0 = 0.6-1.0$ . Σε αποσαθρωμένες βραχομάζες:  $K_0 = 0.4-0.7$ . Στην περίπτωση όπου η βραχομάζα 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 m) 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 ( $K_o$ ) είναι δυσχερής και τα αποτελέσματα δεν είναι εύκολα ερμηνεύσιμα. Οι μέθοδοι που συνήθως χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση του  $K_o$  είναι (Καββαδάς, 2000):

- Η δοκιμή πρεσσιομέτρου ή ντιλατομέτρου.
- Η μέθοδος της υδραυλικής θραύσης.
- Η μέθοδος της δειγματοληπτικής αποτόνωσης των τάσεων (overcoring).

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

- Κοντά στην επιφάνεια εδαφικών πρηνών. 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.
- Σε μεγάλα βάθη, εφόσον το καθεστώς των τεκτονικών τάσεων δεν ακολουθεί την κατακόρυφη και οριζόντια διεύθυνση.
- Σε έντονα ανισότροπους σχηματισμούς (π.χ. σχηματισμούς με έντονη στρωσιγένεια) εφόσον οι κύριες διευθύνσεις της ανισοτροπίας δεν συμπίπτουν με την κατακόρυφη ή την οριζόντια.

Το ( $K_o$ ) είναι παράμετρος που εξαρτάται από τα πετρώματα και την περιοχή όπου πραγματοποιείται η ανάλυση. Το ( $K_o$ ) είναι διαφορετικό για κάθε μία από τις δύο οριζόντιες τάσεις. Για ομογενές, αδιατάρακτο πέτρωμα, το ( $K_o$ ) μπορεί να θεωρηθεί ως ενιαίο για τις δύο οριζόντιες κύριες τάσεις.

Σε ασθενή πετρώματα, χωρίς την ικανότητα ανάληψης φορτίων με μεγάλες διαφορές στους αποκλίνοντες τανυστές τάσης, η κάθετη και οι οριζόντιες τάσεις, τείνουν να εξισωθούν κατά την πάροδο του γεωλογικού χρόνου. Αυτός είναι ο κανόνας του Heim, όπου (Καββαδάς, 2000):

$$\sigma_X = \sigma_Y \approx \sigma_Z$$

Η κατάσταση αυτή ονομάζεται λιθοστατική πίεση, και εμφανίζεται όταν όλες οι συνιστώσες τάσης, σε κάποιο σημείο είναι ίσες προς όλες τις κατευθύνσεις και το μέγεθος τους οφείλεται στο βάρος των υπερκείμενων σχηματισμών. Η έννοια αυτή χρησιμοποιείται αρκετά σε ασθενή αδιατάρακτα ιζήματα, τα οποία επιδεικνύουν πλαστική ή βισκοπλαστική συμπεριφορά. Πετρώματα με αυτή τη συμπεριφορά αποτελούν οι άργιλοι, οι σχιστόλιθοι, οι λιθάνθρακες κ.α. Ο κανόνας αυτός δίνει επίσης λογικά αποτελέσματα για εντατικό πεδίο σε πετρώματα που απαντώνται σε βάθη μεγαλύτερα των 1000m.

Στην περίπτωση υπόθεσης ελαστικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων, τα οποία υπόκεινται σε πλευρικό περιορισμό, δηλαδή δεν επιτρέπεται σε αυτά η οριζόντια παραμόρφωση, το ( $K_o$ )

κυμαίνεται σε τιμές χαμηλότερες της μονάδος. Η περίπτωση αυτή παρουσιάζεται σε ιζηματογενείς, αδιατάρακτους σχηματισμούς, μεγάλης οριζόντιας εξάπλωσης και σταθερού πάχους. Στις περιπτώσεις αυτές και με δεδομένη γραμμική ελαστική συμπεριφορά, ισχύει:

$$\sigma_x = \sigma_y = \gamma \cdot h \frac{\nu}{1 - \nu}$$

Ακόμα σημαντικό ρόλο παίζει το υπολειπόμενο εντατικό πεδίο (residual stress field). Πολλές φορές κάποιος γεωλογικός σχηματισμός ενδέχεται να έχει φορτιστεί κατά το παρελθόν από μεγαλύτερο εντατικό πεδίο, το οποίο για διάφορους λόγους έχει εξαλειφθεί. Παρόλο ότι το υλικό του σχηματισμού αποφορτίστηκε, δεν έχει επέλθει ανακούφιση των τάσεων στο πέτρωμα. Η ανακούφιση αυτή εμποδίζεται από την αλληλεμπλοκή τεμαχίων του πετρώματος (interlocking). Επομένως, η αρχική ανάλυση του επί τόπου εντατικού πεδίου ενδέχεται να παρουσιάσει χαμηλότερες από τις πραγματικές τιμές τάσεων.

Όταν η υπόγεια πρόσβαση δεν είναι εφικτή η μέτρηση των επιτόπου τάσεων είναι η υδρορωγμάτωση (hydrofracturing), στην οποία χρησιμοποιείται η απαιτούμενη υδραυλική πίεση για το άνοιγμα ήδη υπάρχουσών ρωγμών για την εκτίμηση των επιπέδων των επιτόπου τάσεων. Όταν η πρόσβαση στο υπέδαφος είναι επιτρεπτή, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τεχνικές overcoring (overcoring techniques) για επιτόπου μέτρηση και δεδομένου ότι δίνεται η δέουσα προσοχή κατά τη λήψη των μετρήσεων, τα αποτελέσματα είναι συνήθως επαρκή για σχεδιαστικούς σκοπούς (Hoek et al, 1995).

### 2.3. Ανακατανομή τάσεων γύρω από υπόγεια ανοίγματα.

Το πρόβλημα του σχεδιασμού υπογείων έργων ανάγεται ουσιαστικά στην κατανομή των τάσεων γύρω από το όρυγμα. Οι μέγιστες αυτές τάσεις θα πρέπει να είναι μικρότερες από την αντοχή του πετρώματος για τις δεδομένες συνθήκες όρυξης ώστε να εξασφαλίζεται η ευστάθεια.

Στην περίπτωση που η θεωρητική ανάλυση αλλά και η εμπειρία δείχνουν ότι το άνοιγμα δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ευσταθές τότε εξετάζεται το πώς και σε ποιο βαθμό μπορεί να υποστηριχθεί το πέτρωμα με τη βοήθεια υποστηριγμάτων (Αγιουτάντης, 2002).

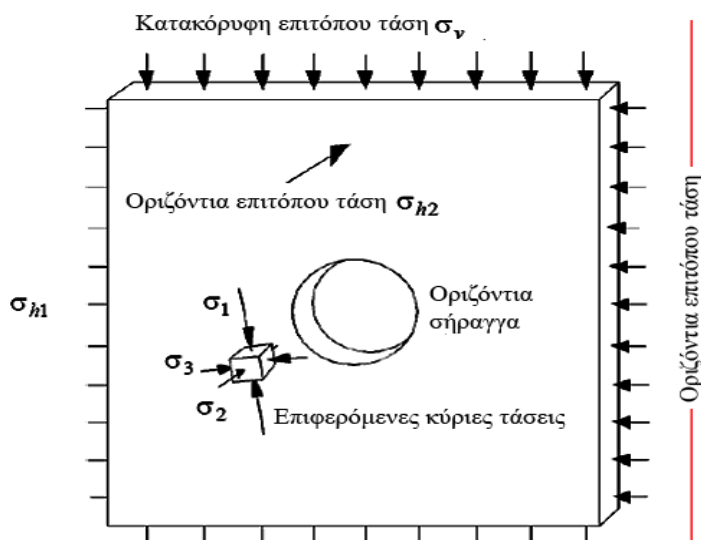
Σε κάθε περίπτωση όμως είναι απαραίτητη η γνώση της αντοχής του πετρώματος και των τάσεων που εξασκούνται στην περιφέρεια του ανοίγματος, καθώς και στον ευρύτερο χώρο, στον οποίο γίνεται η εξόρυξη. Όπως φαίνεται στη συνέχεια, η κατανομή των τάσεων γύρω από μια εκσκαφή εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, έτσι λοιπόν για τον αναλυτικό υπολογισμό των τάσεων γύρω από ανοίγματα έχουν γίνει οι ακόλουθες παραδοχές (Αγιουτάντης, 2002):

- Το πέτρωμα θεωρείται ελαστικό (ακολουθεί το νόμο του Hooke), ομογενές και ισότροπο.

- Το άνοιγμα έχει γίνει σε ένα αδιατάρακτο μέσο. Η συνθήκη αυτή πληρούται, όταν το πλησιέστερο σύνορο του μέσου βρίσκεται σε απόσταση μεγαλύτερη από το τριπλάσιο της μεγαλύτερης διάστασης του ανοίγματος.
- Το άνοιγμα έχει μήκος πολύ μεγαλύτερο από τις διαστάσεις της διατομής του και η κατανομή των τάσεων κατά τον επιμήκη άξονα είναι ανεξάρτητη του μήκους.
- Ο επιμήκης άξονας του ανοίγματος είναι οριζόντιος.
- Οι δύο άξονες αναφοράς της διατομής έχουν οριζόντια και κάθετη διεύθυνση αντίστοιχα.

### 2.4. Εντατική κατάσταση γύρω από υπόγειο άνοιγμα

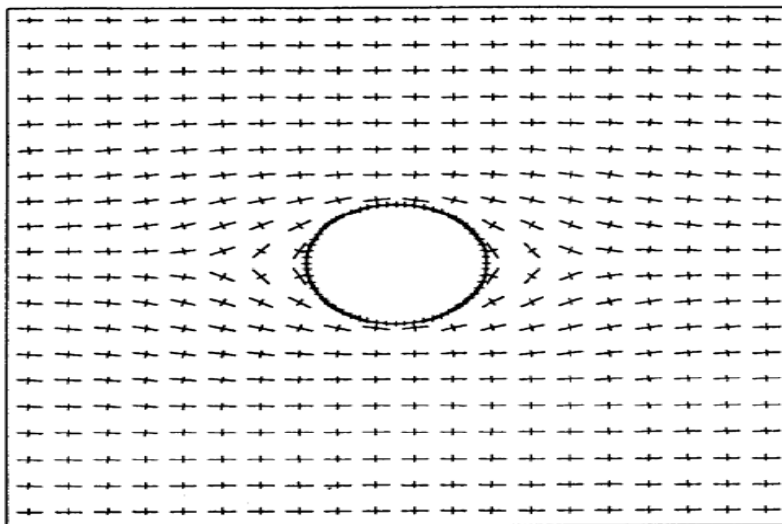
Η συμπεριφορά του πετρώματος γύρω από μία υπόγεια εκσκαφή συσχετίζεται, σε μεγάλο βαθμό, με τις τάσεις που επικρατούν στην περιοχή. Όταν μια υπόγεια εκσκαφή αναπτύσσεται η αρχική εντατική κατάσταση επηρεάζεται σε δεδομένες αποστάσεις γύρω από μια "διάμετρο εκσκαφής" από την περιφέρειά της. Οι κατακόρυφες τάσεις στη βραχομάζα είναι, γενικά, συνάρτηση του ύψους του ανοίγματος, του χρόνου και της πυκνότητας του πετρώματος. Οι οριζόντιες τάσεις ποικίλλουν αρκετά και στην περίπτωση που αυτές προκαλούνται τεκτονικά ή με κάποιο άλλο τρόπο μπορούν να φθάσουν στην ίδια τάξη μεγέθους με τις αντοχές του πετρώματος. Ανάλογα με τις ιδιότητες της βραχομάζας, μπορεί να εμφανιστεί αστοχία και κατάρρευση του ανοίγματος. Έτσι κατά την εκσκαφή του ανοίγματος δημιουργείται μια ανακατανομή των τάσεων και ένα νέο εντατικό πεδίο εμφανίζεται γύρω από το άνοιγμα.



Σχήμα 2.2: Ανακατανομή των τάσεων γύρω από υπόγειο άνοιγμα. (Hoek, 2000<sup>vi</sup>).

Πριν την εκσκαφή της σήραγγας οι επιτόπου τάσεις  $\sigma_v$  (κατακόρυφη τάση),  $\sigma_{h1}$  (οριζόντια επιτόπου τάση σε επίπεδο κάθετο στον άξονα της σήραγγας) και  $\sigma_{h2}$  (οριζόντια επιτόπου τάση σε

επίπεδο παράλληλο με τον άξονα της σήραγγας) κατανέμονται ομοιόμορφα στο τμήμα του πετρώματος που έχει θεωρηθεί (Σχήμα 2.1). Μετά την απομάκρυνση του πετρώματος για τη δημιουργία του ανοίγματος, οι τάσεις γύρω από τη σήραγγα αλλάζουν και προκύπτουν νέες τάσεις. Στο Σχήμα 2.3 φαίνονται οι επιφερόμενες κύριες τάσεις στο περιβάλλον πέτρωμα σε μια κατακόρυφη τομή κάθετη στον άξονα της σήραγγας.



Σχήμα 2.3: κατεύθυνση κυρίων τάσεων στο πέτρωμα όπου  $\sigma_h = 3\sigma_v$  όπου  $\sigma_v$ , κατακόρυφη κύρια τάση (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 2.3 που δείχνει τις διευθύνσεις των κυρίων τάσεων στο πέτρωμα που περιβάλλει μια οριζόντια σήραγγα που υπόκειται σε οριζόντια επιτόπου τάση  $\sigma_{h1}$  ίση με  $3\sigma_v$ , όπου  $\sigma_v$  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.

Η μελέτη των μεγίστων τάσεων, καθώς και των συντελεστών συγκεντρώσεων τάσεων που εμφανίζονται γύρω από κάθε άνοιγμα, λόγω της διαταραχής του εντατικού πεδίου επιτυγχάνεται εύκολα από διαγράμματα που προκύπτουν από θεωρητική ανάλυση των εξισώσεων ισορροπίας.

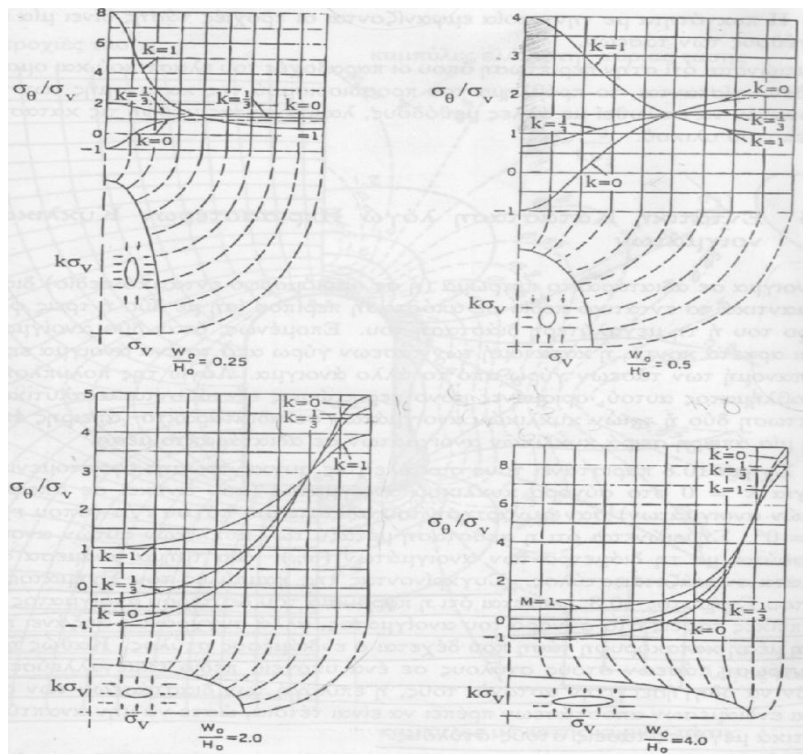
Το Σχήμα 2.4 παρουσιάζει την μεταβολή των εφαπτομενικών τάσεων στο σύνορο ελλειπτικών ανοιγμάτων, για  $k = 0, 1/3, 1$  και για διαφόρους λόγους  $w_0/h_0$  (πλάτος έλλειψης/ ύψος έλλειψης).

Από τη μελέτη των διαγραμμάτων αυτών προκύπτει ότι τα πλέον επικίνδυνα, σημεία από πλευράς συγκέντρωσης τάσεων, εμφανίζονται στα σημεία αλλαγής της καμπυλότητας της περιμέτρου της εκσκαφής, όπως είναι (Αγιουντάντης, 2002):

- Τα ανώτατα σημεία των ανοιγμάτων, όπου αναπτύσσονται εφελκυστικές τάσεις

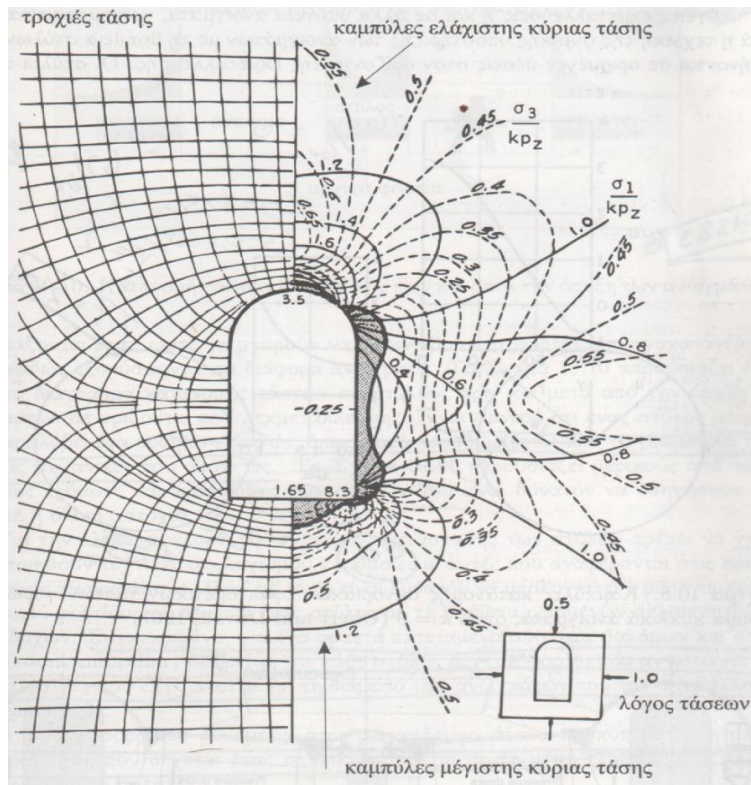
- Τα πλευρικά σημεία των ανοιγμάτων, όπου αναπτύσσονται θλιπτικές τάσεις
- Οι γωνίες ορθογωνικών ανοιγμάτων ή οι κορυφές ελλειψοειδών, ενώ αντίστοιχα οι τάσεις είναι ελάχιστες στα μέσα ευθυγράμμων συνόρων.

Στο Σχήμα 2.5 παρουσιάζεται η κατανομή ισοβαρικών καμπυλών καθώς και η κατανομή των τροχιών τάσης γύρω από ένα ελλειψοειδές άνοιγμα. Οι ισοβαρικές καμπύλες είναι καμπύλες, όπου οι κύριες τάσεις διατηρούν την ίδια τιμή. Υπάρχουν δύο οικογένειες ισοβαρικών καμπυλών, μία για την μέγιστη και μία για την ελάχιστη κύρια τάση. Οι τροχιές τάσεων ή ισοστατικές καμπύλες αποτελούν ένα ορθογώνιο σύστημα καμπυλών, οι διευθύνσεις των οποίων σε κάθε σημείο ταυτίζονται με τις διευθύνσεις των κυρίων αξόνων. Η πυκνότητα με την οποία εμφανίζονται οι τροχιές τάσης δίνει μια ένδειξη του μεγέθους των τάσεων (Αγιουτάντης, 2002).



Σχήμα 2.4: Καμπύλες κατανομής συνοριακών εφαπτομενικών τάσεων γύρω από ελλειπτικό άνοιγμα για εντατικό πεδίο όπου  $k=0, 1/3, 1$  για διαφόρους λόγους πλάτους προς ύψος έλλειψης (Αγιουτάντης, 2002 πηγή: Obert and Duvall, 1967)<sup>vii</sup>



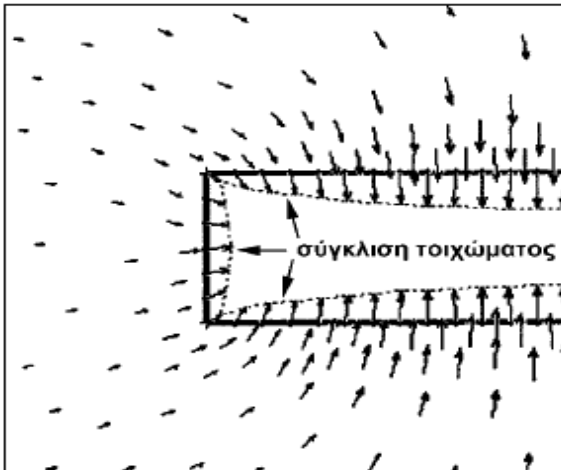


Σχήμα 2.5: Καμπύλες ισοτασικών καμπυλών και τροχιών τάσης γύρω από υπόγειο άνοιγμα (Αγιουτάντης, 2002 πηγή: Hoek and Brown, 1992)

### 2.5. Παραμορφώσεις κατά την προχώρηση της σήραγγας (καμπύλες σύγκλισης αποτόνωσης)

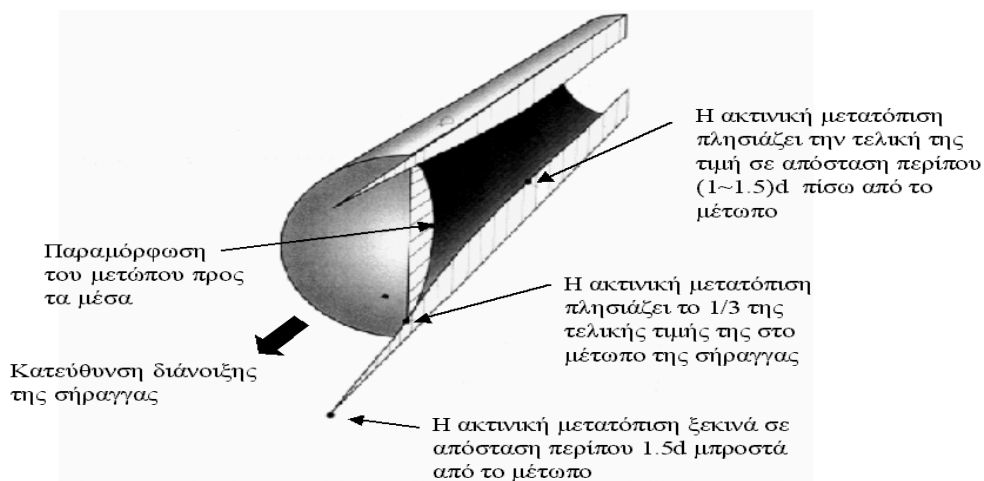
Κατά τη διάνοιξη σήραγγας οι μετατοπίσεις του εδάφους αρχίζουν σε θέσεις αρκετά μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής, δηλαδή πριν αυτό φτάσει σε κάποια συγκεκριμένη θέση (Καββαδάς, 2000). Στο Σχήμα 2.6 φαίνεται η παραμόρφωση της βραχόμαζας κατά την προώθηση μιας κυκλικής σήραγγας μέσα σε υδροστατικό τασικό πεδίο ( $K=1$ ) που βρίσκει εφαρμογή σε κατακόρυφο φρέαρ και σε διάνοιξη σε έντονο ανάγλυφο, μέσω μιας τρισδιάστατης ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία. Το σχήμα δείχνει τα διανύσματα μετατόπισης μέσα στη βραχόμαζα καθώς και τη μορφή της παραμόρφωσης της σήραγγας.

Η παραμόρφωση της βραχόμαζας ξεκινά σε απόσταση περίπου  $1.5d$  μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής, όπου  $d$  είναι η διάμετρος της σήραγγας και αποκτά τη μέγιστη τιμή της σε απόσταση περίπου  $(1 \div 1.5)d$  μπροστά από το μέτωπο. Στη θέση του μετώπου το  $1/3$  περίπου της συνολικής σύγκλισης έχει ήδη σημειωθεί και το μέτωπο της σήραγγας μετατοπίζεται προς τα μέσα, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.7 Κατά πόσο οι παραμορφώσεις αυτές προκαλούν ή όχι προβλήματα ευστάθειας στη σήραγγα εξαρτάται από τον βαθμό αντοχής της βραχόμαζας στο επίπεδο των επί τόπου τάσεων.



Σχήμα 2.6: Διανύσματα μετατόπισης μέσα στη βραχόμαζα που περιβάλλει προωθούμενη κυκλική σήραγγα (Hoek, 1980)<sup>viii</sup>

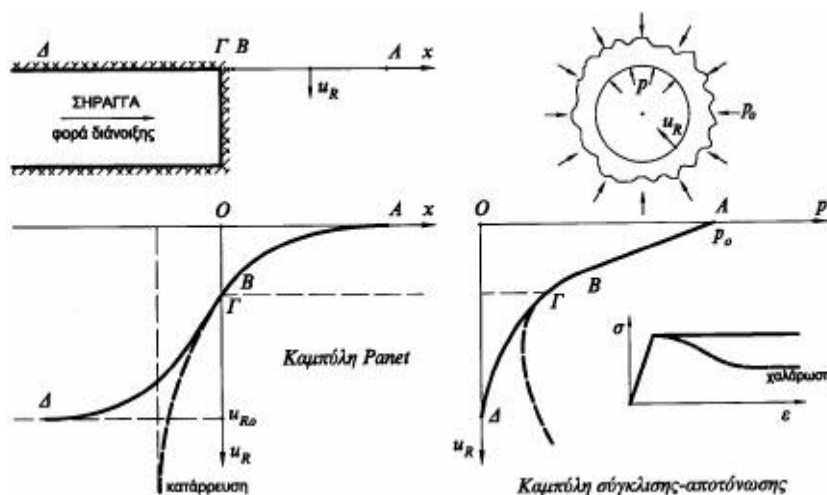
Εάν η συμπεριφορά του εδάφους παρουσιάζει χαρακτηριστικά έντονης χαλάρωσης (δηλαδή μείωση της αντοχής με παρατεταμένη παραμόρφωση) τότε η διατομή της σήραγγας δεν ισορροπεί, η σύγκλιση της οροφής αυξάνει απεριόριστα και η διατομή καταρρέει (Σακελαρίου, 2005).



Σχήμα 2.7: Μορφή της παραμόρφωσης στη βραχόμαζα που περιβάλλει μια υπό διάνοιξη σήραγγα (Hoek, 2000).

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 2.8 παρουσιάζει μια τέτοια καμπύλη (ΑΒΓΔ) εξέλιξης της σύγκλισης για ανυποστήρικτη σήραγγα, σε διάγραμμα  $x - uR$  όπου ( $uR$ ) είναι η σύγκλιση της οροφής της σήραγγας και ( $x$ ) είναι η απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής. Από το σχήμα φαίνεται ότι ένα σημαντικό ποσοστό ( $uRO$ ), 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  $x-uR$  μια τιμή της σύγκλισης του τοιχώματος ( $uR$ ). Για τη συγκεκριμένη τιμή ( $uR$ )

αντιστοιχεί μέσω της καμπύλης σύγκλισης-αποτόνωσης μια τιμή της πίεσης ( $p$ ), η οποία είναι μικρότερη από την αρχική γεωστατική πίεση ( $p_0$ ). 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.



Σχήμα 2.8: Καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης και καμπύλες Panet σε ανυποστήρικτη σήραγγα. (Καββαδάς, 2004)<sup>ix</sup>

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 βραχύμαζας πριν από την εφαρμογή των μέτρων υποστήριξης συντελεί στην αποτόνωση της βραχύμαζας 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. Στη συνέχεια 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 μπορεί να υπολογισθεί με αριθμητικές μεθόδους ανάλυσης της συμπεριφοράς της βραχομάζας κατά τη διάνοιξη της σήραγγας για μηδενική τιμή της εσωτερικής πίεσης.

$R$  = η ακτίνα της σήραγγας

$\xi = \frac{u_{R\infty}}{u_{R=0}}$  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 βραχομάζας  $N_s = 2p_o / \sigma_{cm}$  ( $\sigma_{cm}$  = αντοχή της βραχομάζας σε μονοαξονική θλίψη) (Καββαδάς, 2004).

### 2.6. Μέθοδος της ισοδύναμης χαλάρωσης της βραχομάζας

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην αρχή ότι η μείωση του μέτρου ελαστικότητας από την αρχική τιμή ( $E_o$ ) σε μια μικρότερη τιμή ( $E$ ) σε μια περιοχή της βραχομάζας (συγκεκριμένα: στην περιοχή όπου προβλέπεται να εκσκαφτεί η σήραγγα) προκαλεί σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας με τον ίδιο τρόπο που θα προκαλούσε η μείωση της εσωτερικής πίεσης από την αρχική τιμή ( $p_o$ ) σε μια μικρότερη τιμή ( $p$ ). Επομένως ισχύει ότι (Κωνσταντάς, 2009) :

(α) Η σύγκλιση του τοιχώματος εντός ελαστικού δίσκου ακτίνας ( $R$ ) λόγω ισότροπης πίεσης ( $p$ ) είναι:

$$u_R = \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)R}{E} p$$

Η μετακίνηση του τοιχώματος μιας κυκλικής οπής ακτίνας ( $R$ ) εντός ελαστικού χώρου λόγω ισότροπης πίεσης στο εσωτερικό της οπής είναι:

$$u_R = \frac{(1 - \nu)R}{E} p$$

Στη συνέχεια θεωρείται ότι η απομείωση του μέτρου ελαστικότητας στην περιοχή της "οπής" από ( $E_o$ ) σε ( $E$ ) προκαλεί μείωση της πίεσης στο τοίχωμα της οπής από ( $p_o$ ) σε ( $p$ ). Είναι προφανές ότι η σύγκλιση του τοιχώματος της οπής υπολογιζόμενη είτε μέσω του δίσκου είτε μέσω του χώρου που περιβάλλει την οπή θα πρέπει να είναι η ίδια. Συνεπώς:

(α) Σύγκλιση του τοιχώματος του δίσκου:

$$u_{R1} = - \left[ \frac{(1 - \nu)(1 - 2\nu)R}{E_o} p_o - \frac{(1 - \nu)(1 - 2\nu)R}{E} p \right]$$

Σύγκλιση του χώρου που περιβάλλει την οπή:

$$u_{R2} = \frac{(1 + \nu)R}{E_0} p_0 - \frac{(1 + \nu)R}{E_0} p$$

Εξίσωση των δυο συγκλίσεων δίνει:

$$\frac{E}{E_0} = \frac{(1 - 2\nu)\left(\frac{p}{p_0}\right)}{2(1 - \nu) - \left(\frac{p}{p_0}\right)} = \frac{(1 - 2\nu)(1 - \lambda)}{(1 - 2\nu) + \lambda}$$

Τυπικές περιπτώσεις εφαρμογής της τελευταίας σχέσης φαίνονται στον πίνακα ( $\lambda = 1 - p/p_0$ ) (Καββαδάς, 2004):

Πίνακας 2.1: Αντιστοιχία του συντελεστή αποτόνωσης των τάσεων ( $\lambda$ ) και του συντελεστή χαλάρωσης ( $E/E_0$ ) (Καββαδάς, 2004).

$\lambda$	$p/p_0$	Τιμές του $E/E_0$ για		
		$\nu = 0.25$	$\nu = 0.30$	$\nu = 0.35$
0.20	0.80	0.571	0.533	0.480
0.30	0.70	0.438	0.400	0.350
0.40	0.60	0.333	0.300	0.257
0.50	0.50	0.250	0.222	0.187
0.60	0.40	0.182	0.160	0.133
0.70	0.30	0.125	0.109	0.090
0.80	0.20	0.077	0.067	0.054
0.90	0.10	0.036	0.031	0.025

Ο πίνακας 2.1 δίνει την αντιστοιχία του συντελεστή αποτόνωσης των τάσεων ( $\lambda$ ) και του συντελεστή χαλάρωσης ( $E/E_0$ ) στο εσωτερικό της σήραγγας και συνεπώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του συντελεστή χαλάρωσης που ισοδυναμεί με κάποια τιμή του συντελεστή αποτόνωσης.

## 2.7. Μακροχρόνια συμπεριφορά της βραχομάζας.

Με την πάροδο του χρόνου, η βραχώμαζα που περιβάλλει ένα υπόγειο έργο υπόκειται σε ερπυστικές παραμορφώσεις με συνέπεια την αύξηση των παραμορφώσεων της βραχώμαζας (π.χ. σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας) εφόσον οι παραμορφώσεις δεν παρεμποδίζονται από έργα υποστήριξης (Καββαδάς, 2004).

Ο βαθμός ερπυσμού της βραχώμαζας ποικίλει μεταξύ πρακτικώς μηδέν (για βραχώμαζες με μεγάλες τιμές του δείκτη RMR) και αρκετά υψηλών τιμών (για βραχώμαζες 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 βραχώμαζας υπό μοναξονική θλίψη. Μια σχετικώς υψηλή τιμή του ερπυστικού συντελεστή (που αφορά κυρίως σφιφρές-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).

Το παραπάνω μοντέλο ερπυσμού της βραχόμαζας 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,  $\varepsilon^t$  είναι η ερπυστική παραμόρφωση τη χρονική στιγμή ( $t$ ),  $\varepsilon^e$  είναι η αρχική (ελαστική) παραμόρφωση,  $\varepsilon$  είναι η συνολική παραμόρφωση και ( $t^0$ ) είναι ο χρόνος έναρξης των ερπυστικών παραμορφώσεων.

Από την ανωτέρω σχέση προκύπτει ότι εάν  $\varepsilon_1$  και  $\varepsilon_2$  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 βραχόμαζας σε σχέση με τη βραχυχρόνια τιμή του. Στην περίπτωση αυτή, εάν  $E_0 \equiv \frac{\sigma}{\varepsilon^e}$  είναι η βραχυχρόνια τιμή του μέτρου ελαστικότητας (τη χρονική στιγμή  $t^0$ ) και  $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$  είναι η μειωμένη τιμή του μέτρου ελαστικότητας τη χρονική στιγμή ( $t$ ), τότε:

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

Ειδικότερα, η τιμή του μέτρου ελαστικότητας μετά από  $n$ -χρονικούς κύκλους ( $t = 10^n \cdot t_0$ ), θεωρώντας ότι  $t_0 = 1.2$  μήνες ( $n = 1$  για 1 έτος,  $n = 2$  για 10 έτη και  $n = 3$  για 100 έτη) θα είναι:

$$E = E_0 \frac{1}{1 + nk}$$

Τυπικές τιμές εφαρμογής της ανωτέρω σχέσης φαίνονται στον πίνακα 2.2:

Πίνακας 2.2: Απομείωση του ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας λόγω ερπυσμού (Καββαδάς, 2004).

Ερπυστικός συντελεστής $k$	Χρονική περίοδος		
	1 Έτος	10 Έτη	100 Έτη
0.02	0.980	0.961	0.943
0.05	0.952	0.909	0.870
0.10	0.909	0.833	0.769
0.15	0.870	0.769	0.690

Από τον πίνακα 2.2 φαίνεται ότι η απομείωση του ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας λόγω ερπυσμού μπορεί να φθάσει και το 30% στην περίπτωση εδαφών με έντονα ερπυστική συμπεριφορά.

### **3. ΑΡΧΕΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ**

#### **3.1. Γενικά**

Με τον όρο υποστήριξη καλούνται εκείνα τα μέτρα τα οποία είναι αναγκαίο να ληφθούν για τη διέλευση μέσα απ ένα υπόγειο άνοιγμα αλλά και για την διατήρηση του σχήματος του. Οι σύγχρονες τεχνικές σταθεροποίησης των πετρωμάτων προσπαθούν να μεταφέρουν όσο το δυνατόν περισσότερο φορτίο μέσα στο περιβάλλον πέτρωμα. Επομένως, ο όρος υποστήριξη με την ευρεία έννοια έχει αντικειμενικούς σκοπούς, (Brady and Brown, 1985):

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

#### **3.2. 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 βραχομάζας 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 οποιοσδήποτε μεθόδου εκσκαφής σε μη αυτοϋποστηριζόμενο πέτρωμα είτε τη στήριξη οροφής και τοιχωμάτων της σήραγγας μετά την εκσκαφή. Η προενίσχυσή 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).

### 3.2.1. Μέσα προενίσχυσης

Τα 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 βραχομάζα να αυτοϋποστηριχθεί και ενεργοποιεί την αντοχή της αντί να υποστηρίζει το βάρος της. Η προενίσχυση είναι οικονομικότερη τακτική από την υποστήριξη (USACE, 1997).

#### ➤ Αγκύρια συνεχούς πάκτωσης άκαμπτης ράβδου (Fully Grouted Pipe Bolts-Spiles)

Είναι όπως τα απλά αγκύρια συνεχούς πάκτωσης, με τη διαφορά ότι η εισαγόμενη ράβδος (συνήθως χαλύβδινη ή από σκληρό πλαστικό, υαλόνημα ή ανθρακόνημα κλπ.) 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 εκσκαπόμενου 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](http://www.iok.gr)).

#### ➤ Απλά αυτοδιατρώμενα αγκύρια/ήλοι

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), που φέρουν στο άκρο τους κοπτικό εργαλείο μίας χρήσης. Με αυτή την ράβδο ως διατρητικό στέλεχος διανοίγεται το διάτρημα, η ράβδος εγκαταλείπεται παραμένονσα ως τένοντας και το διάκενο γεμίζει με τσιμεντένεμα που εισπιέζεται από την κεντρική οπή, δημιουργώντας αγκύριο πακτωμένο σε όλο του το μήκος. Η ικανότητα ελέγχεται από την εφελκυστική αντοχή της

ράβδου και τις τάσεις τριβής μεταξύ ράβδου-τσιμεντενέματος και περιβάλλοντος πετρώματος. Η λειτουργία του έγκειται στην δυνατότητα ανάληψης εφελκυστικής δύναμης στο άκρο (που στερεώνεται με περικόχλιο και πλάκα διανομής στα στοιχεία της 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](http://www.iok.gr)).

➤ Αυτοδιατρώμενα αγκύρια/ήλοι σωληνωτού τύπου (self-drilling pipe bolts/spiles)

Τα αγκύρια αυτά κατασκευάζονται με τον ίδιο τρόπο όπως τα απλά αυτοδιατρώμενα αγκύρια 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](http://www.iok.gr)). 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 εφελκυόμενοι.

### 3.2.2. Μέσα στήριξης (μετά την εκσκαφή)

Πρόκειται για εφελκυόμενους 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.

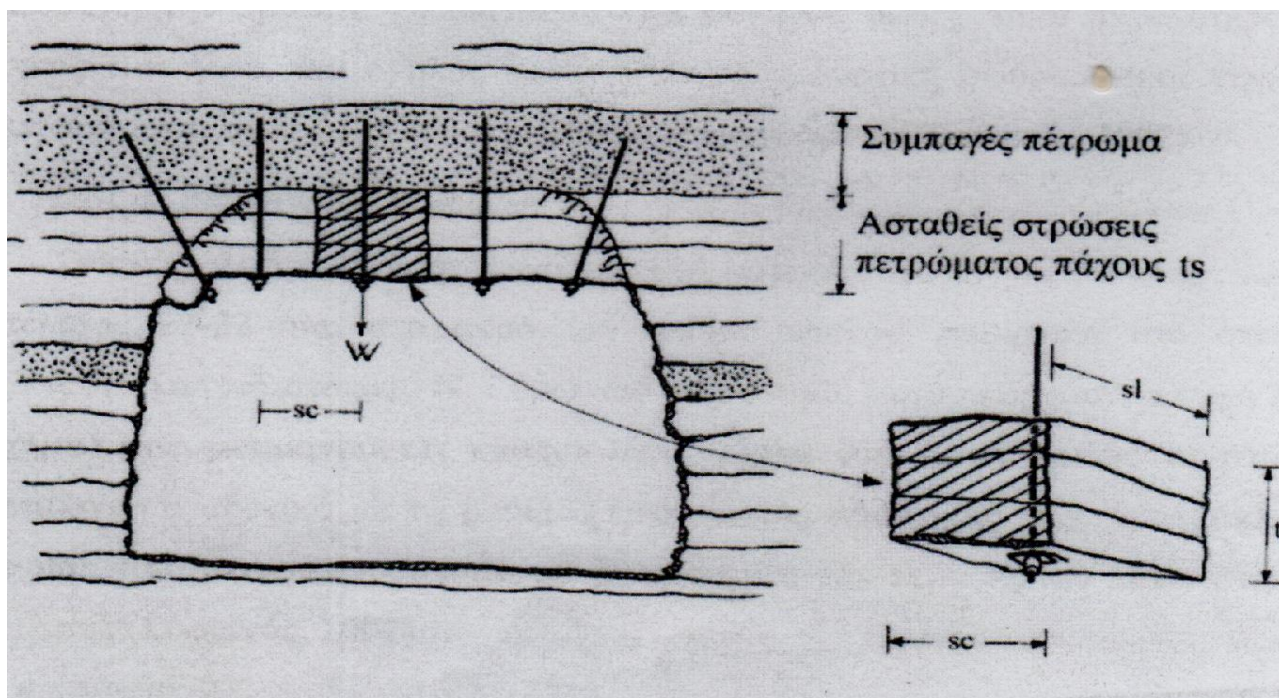
#### A. Αγκύρια σημειακής πάκτωσης

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. Η ανάρτηση της οροφής από ένα ανώτερο ισχυρό στρώμα προϋποθέτει την ύπαρξη του τελευταίου.

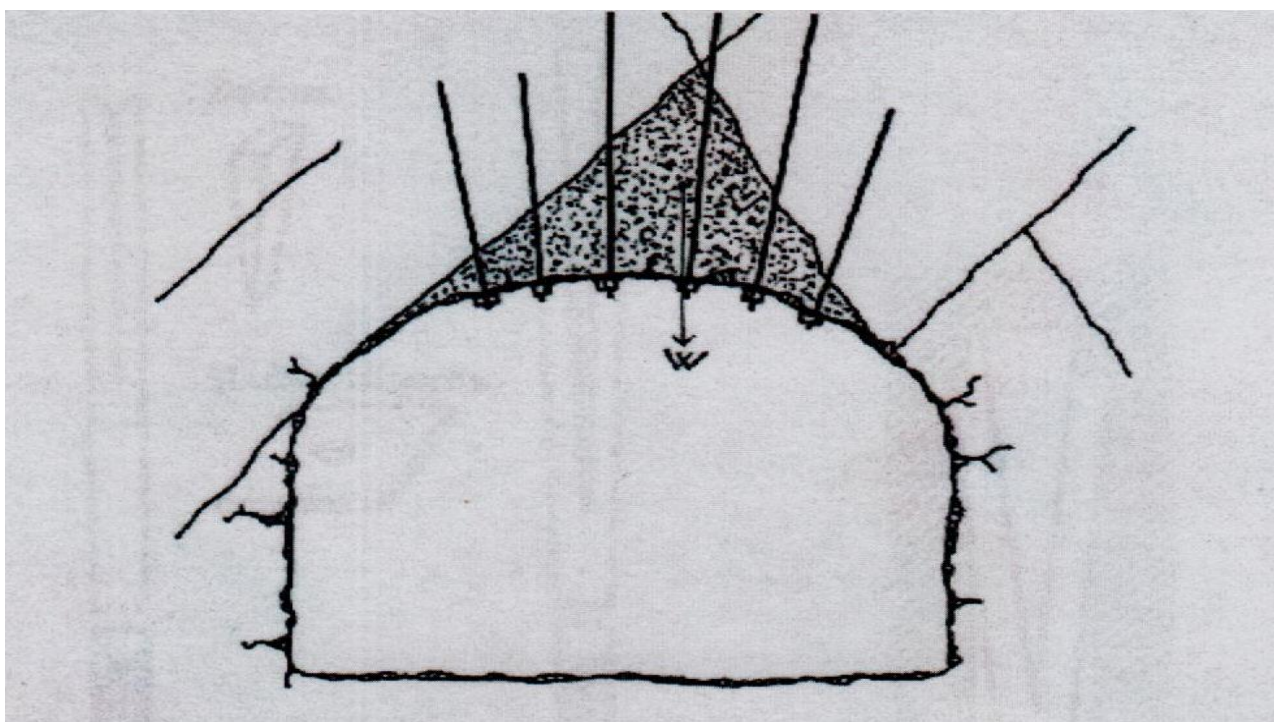
Ανάλογη περίπτωση αποτελεί και η συγκράτηση σφηνών από αγκύρια σημειακής / πάκτωσης. όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2 οι ασυνέχειες διαχωρίζουν τεμάχια πετρώματος, τα οποία είναι δυνατόν να πέσουν κατακόρυφα από την οροφή ή να ολισθήσουν επάνω σε μία από τις επιφάνειες



ασυνέχειας. Τα αγκύρια στην περίπτωση αυτή υποστηρίζουν το βάρος της σφήνας πάνω σε ευσταθές κομμάτι βραχώδους.



Σχήμα 3.1: Ασθενείς λεπτές στρώσεις πετρώματος αναρτημένες από συμπαγές πέτρωμα (Αγιουτάντης, 2002)<sup>x</sup>



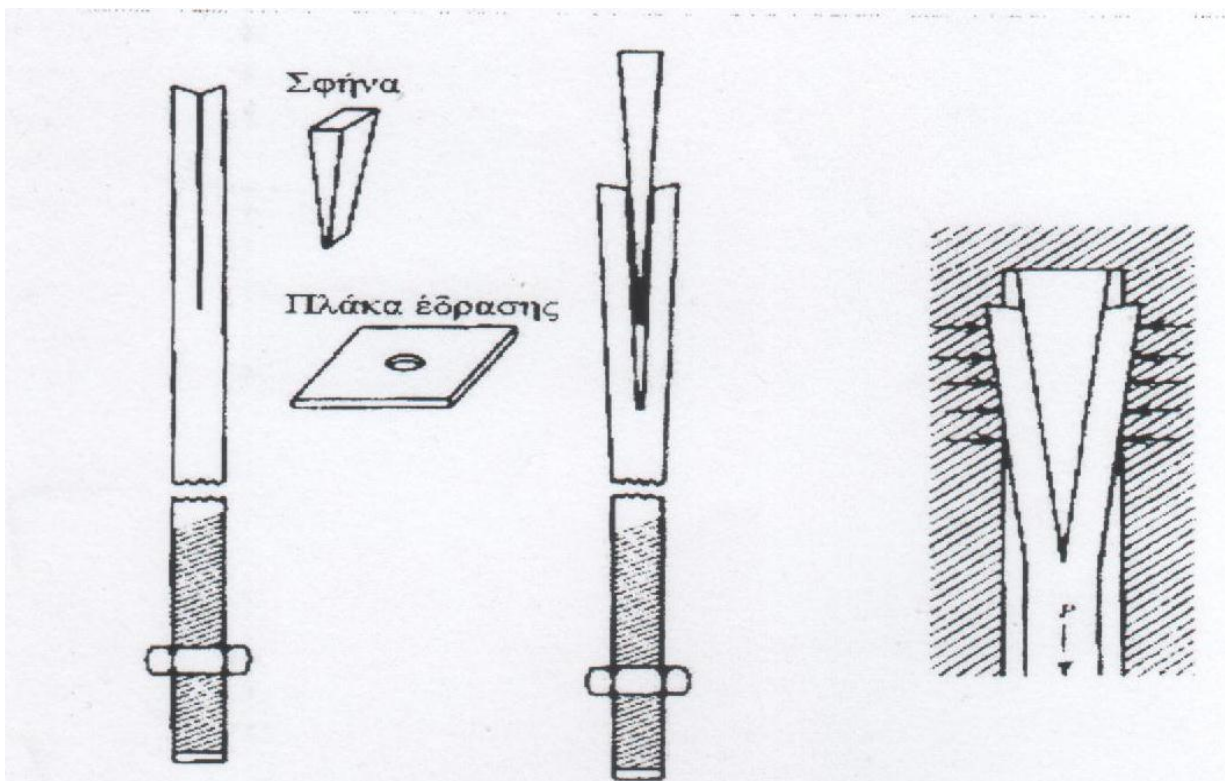
Σχήμα 3.2: Αγκύρωση σφήνας οροφής. (Αγιουτάντης, 2002)

### ➤ Ήλοι με εγκοπή και σφήνα

Τυπική μορφή τέτοιου ήλου φαίνεται στο Σχήμα 3.3. Ο ήλος κατασκευάζεται από ελάσιμο χάλυβα, και το στέλεχος 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).

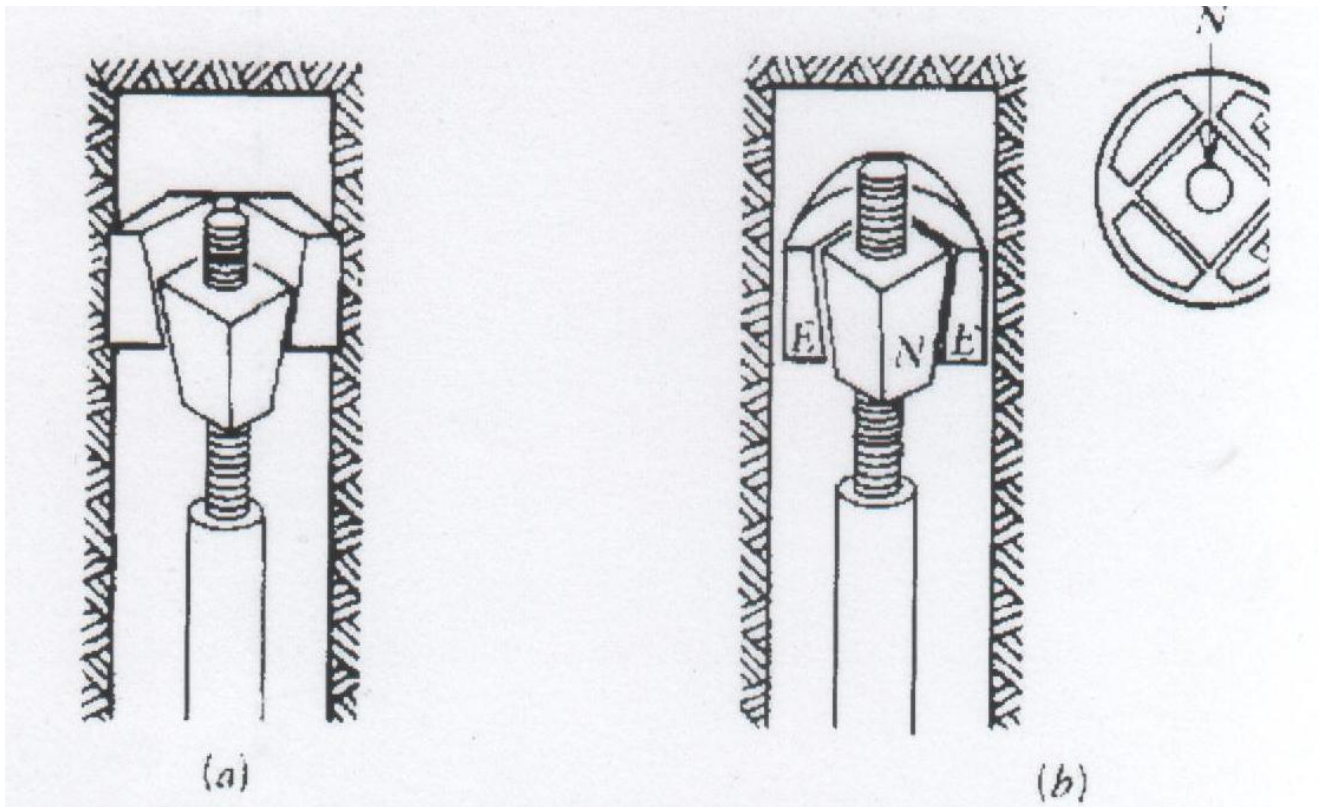
### ➤ Ήλοι με διευρυμένο κέλυφος

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: Ήλοι με διευρυμένο κέλυφος (Πηγή: Σοφιανός, 2002)<sup>xi</sup>

- 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](http://www.iok.gr)).

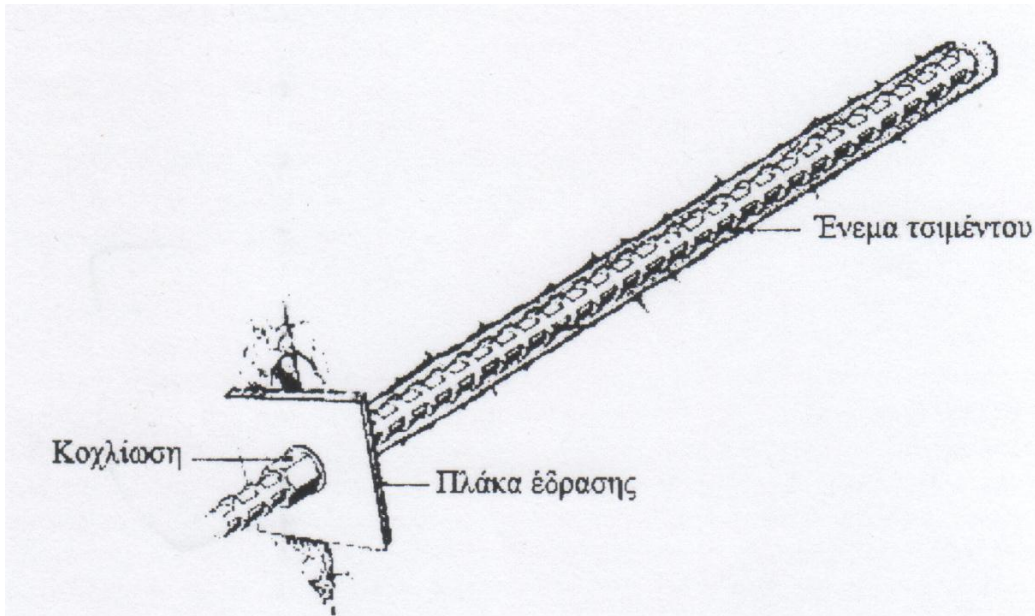
### ➤ Ήλοι/Αγκύρια σημειακής πάκτωσης μέσω ρητινικής κόλλας (resin rock bolts)

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 ασφαρίζεται 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](http://www.iok.gr)).

### B. 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/σύσφιξη, 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](http://www.iok.gr)).



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

### ➤ 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 είσοδο 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 ρωγματωμένο πέτρωμα που το νερό του ενέματος χάνεται εύκολα χρησιμοποιούνται ήλοι 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](http://www.iok.gr)).

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](http://www.iok.gr)).

### ➤ 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 ωρίμανση 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 όση με κατάλληλο μηχανήμα για 20-30 δευτερόλεπτα.

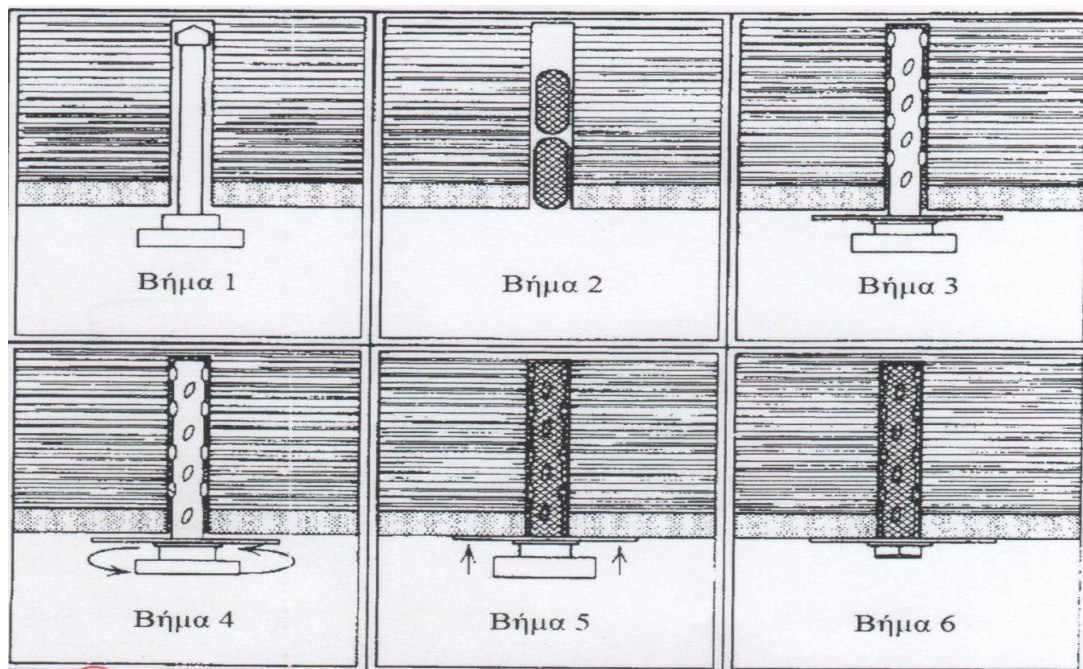


## C. Ήλοι τριβής

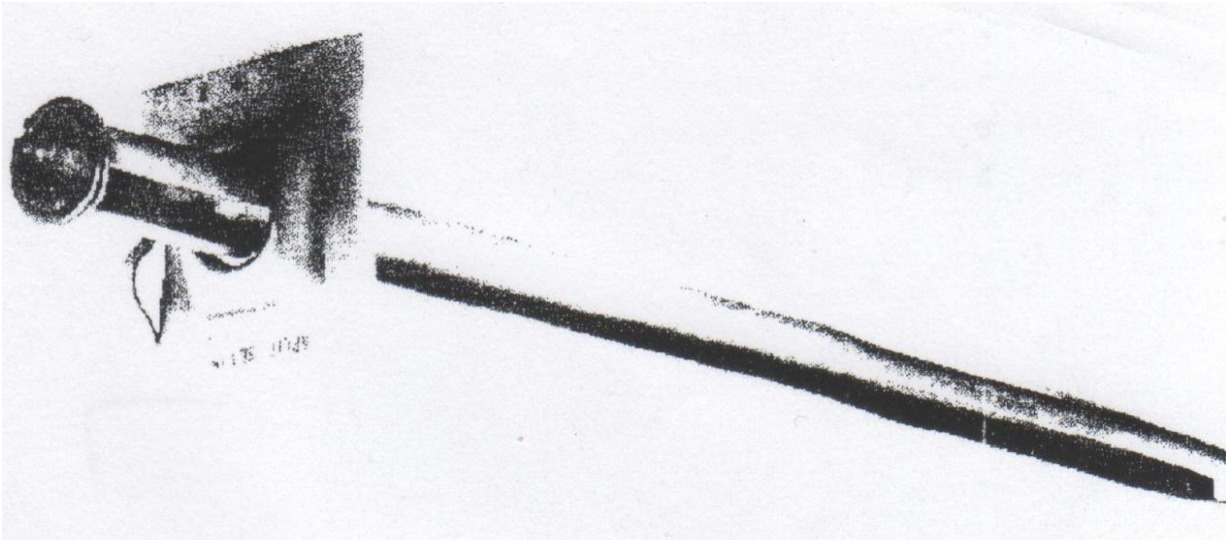
Οι ήλοι τριβής διακρίνονται σε ήλους με διαμήκη σχισμή και σε διογκούμενους ήλους. Στο εμπόριο οι πρώτοι ονομάζονται split set (Σχήμα 3.7), και οι δεύτεροι Swellex (Σχήμα 3.8).

### ➤ Ήλοι με διαμήκη σχισμή (split set)

Οι ήλοι split set αναπτύχθηκαν από τον Scott το 1976 και κατασκευάζονται και διανέμονται από την εταιρία Ingensor 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 ικανότητα τους, η οποία αναπτύσσεται αμέσως μετά την έμπηξη, εξαρτάται από την ανθεκτικότητα του πετρώματος ώστε να είναι 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](http://www.iok.gr)).



Σχήμα 3.6: Διαδικασία τοποθέτησης ηλώσεων ρητίνης, (1) Διάνοιξη διατρήματος, (2) τοποθέτηση φυσιγγίων ρητίνης, (3) εισχώρηση ήλου,(4) περιστροφή ήλου προκειμένου να αναμειχθούν τα συστατικά, (5) εφαρμογή ώσης με κατάλληλο μηχανήμα για 20-30 δευτερόλεπτα (Αγιουτάντης, 2002).

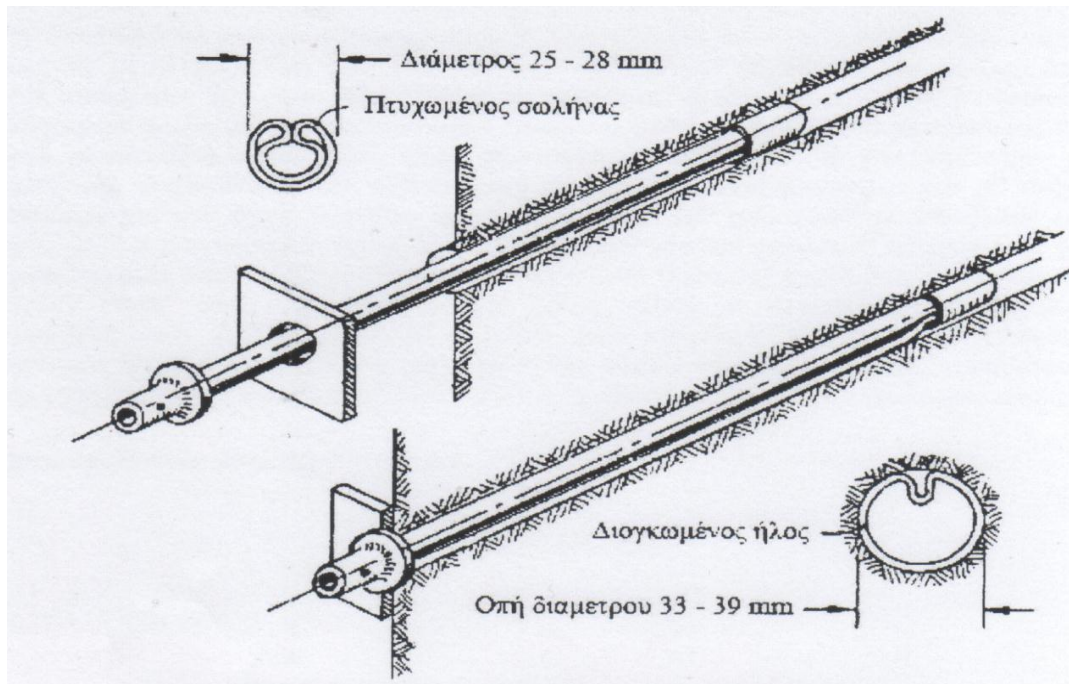


Σχήμα 3.7: Ήλοι τριβής split set (Hoeek, 2000)

➤ Διογκούμενοι ήλοι (Swelllex)

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 μειονέκτημα τους έγκειται 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 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](http://www.iok.gr)).





Σχήμα 3.8: Ήλος τριβής Swellex (Hoek, 2000)

Παράμετρος	Αγκυρωμένο μηχανικά	Αγκυρωμένο με ρητινικό ένεμα	Ενεματομένο με τσιμέντο	Split-set	Swellex
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. Μπορούν 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.
Μειονεκτήματα	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.

Σχήμα 3.9: Τυπικά τεχνικά χαρακτηριστικά συστημάτων αγκύρωσης (USACE, 1997).

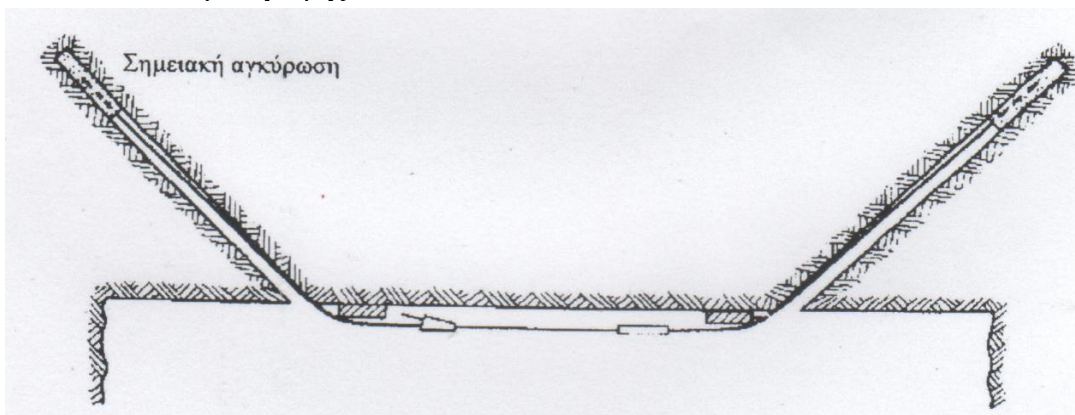
Σύγκριση χαρακτηριστικών των ήλων τριβής με τα υπόλοιπα αγκύρια, καθώς και περιγραφή των επιμέρους πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων γίνεται περιληπτικά στο Σχήμα 3.9.

### 3.2.3. Πλάκες στήριξης

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

### 3.3. Εξωτερική στήριξη βραχομάζας

#### 3.3.1. Δικτύωμα οροφής



Σχήμα 3.10: Δικτύωμα οροφής (πηγή: Σοφιανός, 2002)

Τα δικτυώματα οροφής (Σχήμα 3.10) σχεδιάσθηκαν σύμφωνα με την εξής πατέντα 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 μισό τους. Τα εν λόγω δικτυώματα εφαρμόζουν από κάτω πίεση στην οροφή, με αποτέλεσμα την εξάλειψη αυτών των ζωνών. Το δικτύωμα οροφής αποτελείται από σύστημα ακύρωσης 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) 2.5-3.5 m, επιτυγχάνονται για κλίσεις των διατρημάτων περίπου  $60^\circ$  (Σοφιανός, 2002).

#### 3.3.2. Μεταλλικά πλαίσια

Τα μεταλλικά πλαίσια που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι από χάλυβα και αποτελούνται γενικά από στοιχεία σχετικά δύσκαμπτα για το μέγεθος 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 ανεξάρτητο. Επίσης, σε σύγκριση με άλλα τέτοια συστήματα στήριξης, όπως οι ηλώσεις και η επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, διακρίνονται από τη σχετική ανεξαρτησία τους από το περιβάλλον πέτρωμα που αντιστηρίζουν. Τα πλαίσια μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνα ή σε συνδυασμό με άλλο μέτρα όπως μεταλλικά φύλλα, ήλους, επένδυση από σκυρόδεμα, δομικό πλέγμα, κλπ. Οι μορφές των μερών που το 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, ασυνεχή κατά μήκος του υπογείου ανοίγματος, κατασκευή υποστήριξης που τοποθετείται στο τοίχωμά του για την υποστήριξη 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:

- 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.
- 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 κι 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 τοποθέτησης 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).

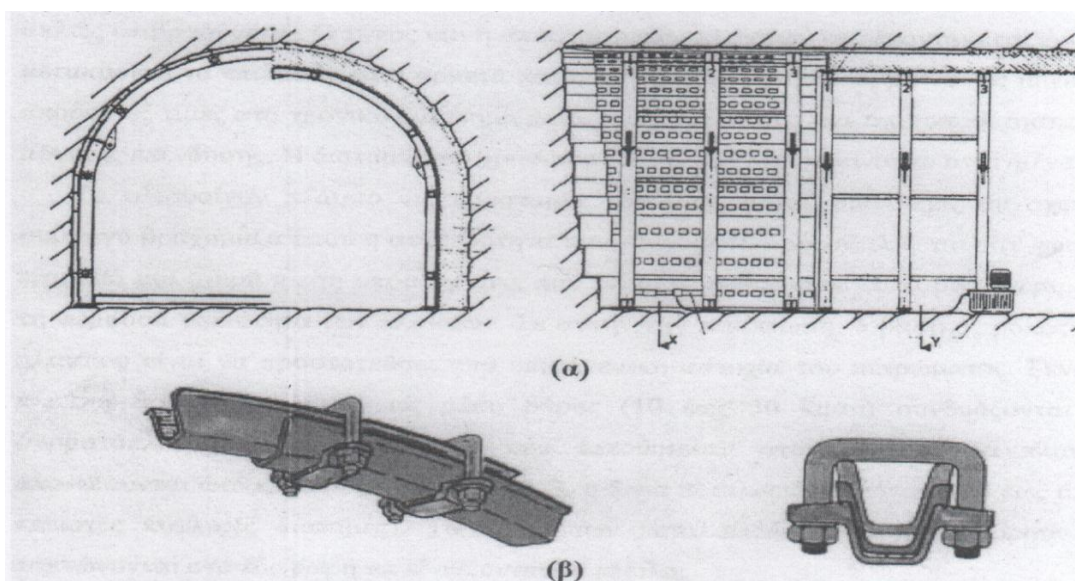
### A. Βαριά πλαίσια

Όσον αφορά τα βαριά πλαίσια, λόγω της μεγάλης αντίστασης 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 m<sup>2</sup>) 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 αφαίρεσης τους είναι οικονομικά συμφέρουσα. Αυτός είναι ο σκοπός των αρθρωτών πλαισίων (Σχήμα 3.11 ), 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.

## Β. Ελαφρά πλαίσια

Αυτά τα πλαίσια έχουν περιορισμένη φέρουσα ικανότητα και είναι ιδιαίτερα παραμορφώσιμα. Είναι πολύ ευκολότερα στον χειρισμό από τα βαριά πλαίσια και μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε μόνο για προστασία 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.



Σχήμα 3.11:(α) Αρθρωτικά πλαίσια (πηγή: Σοφιανός, 2002), (β) Συναρμολόγηση αρθρώσεων (Hoek, 2000).

Στην περίπτωση των ολισθαινόντων 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 σφικτήρες. 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 ανηγμένο 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.

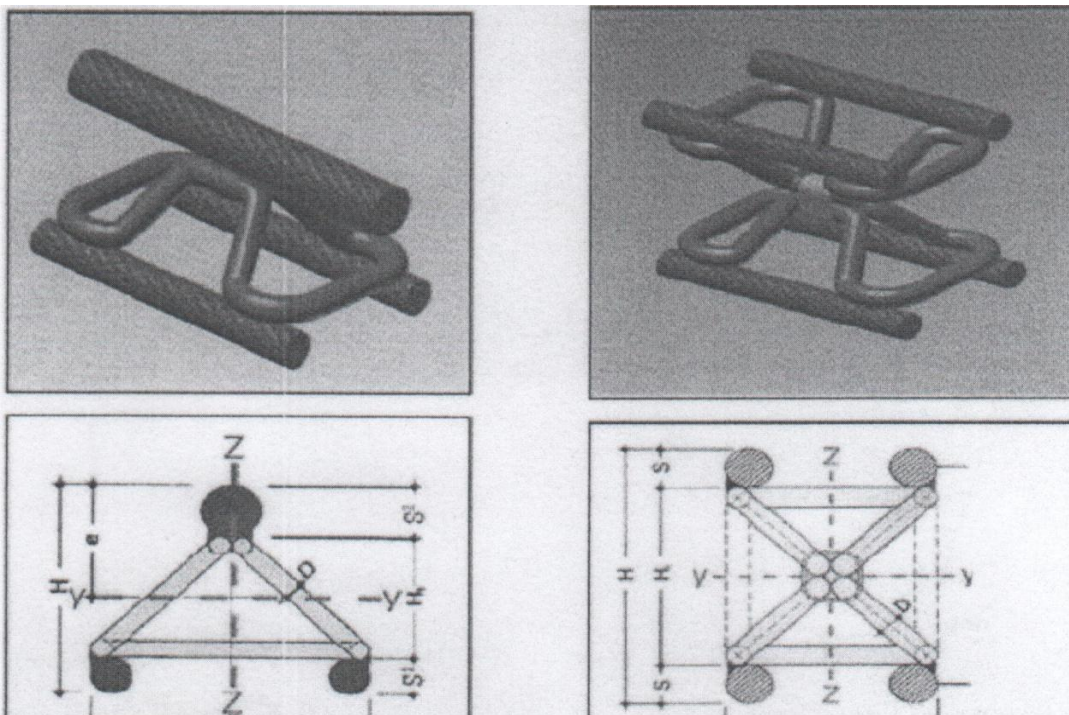
Το ολισθαίνον πλαίσιο ως υποστήριξη τοποθετείται για να επιβραδύνει την παραμόρφωση της βραχομάζας και τη σύγκλιση των τοιχωμάτων της σήραγγας.

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 ασίδες. Ολισθαίνοντα ή ελαφρά πλαίσια, μόνα τους ή σε συνδυασμό με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, αλλά

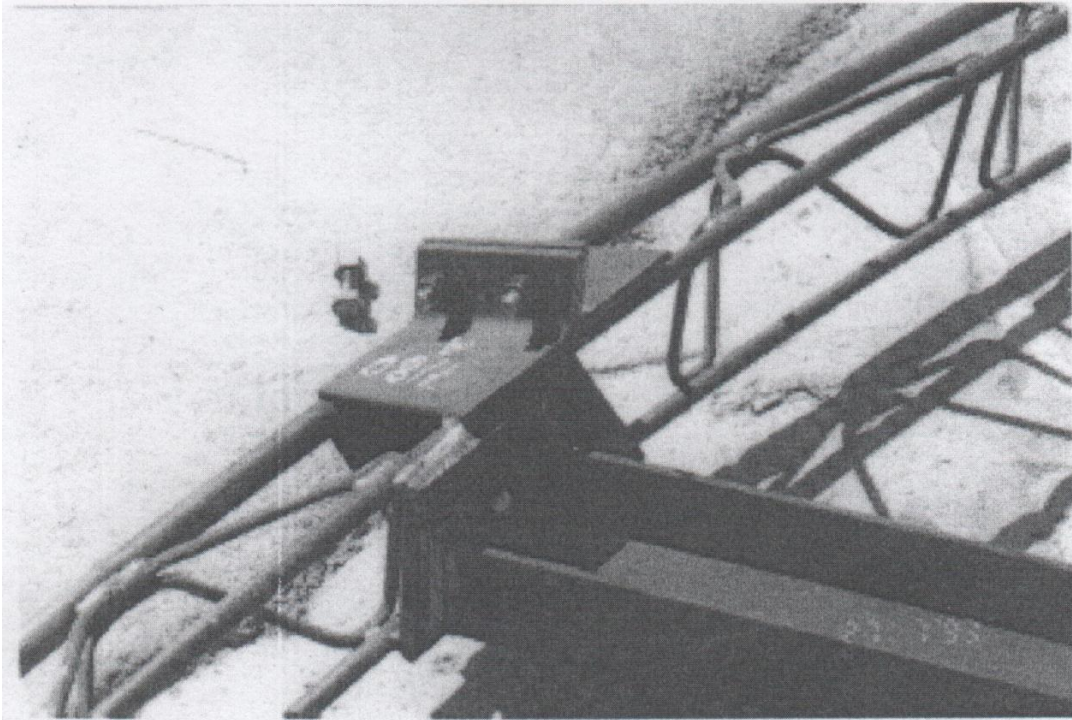


δίχως ηλώσεις, δεν χρησιμοποιούνται για τη διάνοιξη υπόγειων έργων που έχουν άνοιγμα που υπερβαίνει τα 6 έως 8 m.

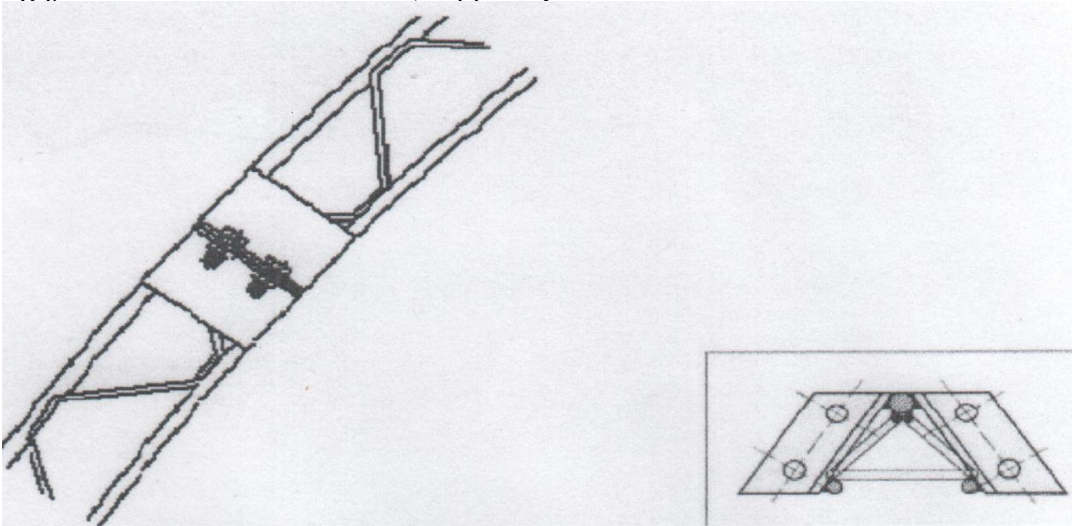
Στα δικτυωτά πλαίσια (δικτυώματα ράβδων – lattice girders) (Σχήματα 3.12-3.14), ο όρος «δικτυωτό» αναφέρεται σε μεταλλικό φορέα αποτελούμενο από στρογγυλές ράβδους. Τα πλαίσια αυτά μπορούν να θεωρηθούν ως πλαίσια σκυροδέματος, επειδή δεν χρησιμοποιούνται ποτέ μόνα τους αλλά για να ενισχύσουν το σκυρόδεμα. Λειτουργούν ως οπλισμός δοκού στην οποία οι διαμήκεις ράβδοι κάμπτονται στο σχήμα της εκσκαφής. Η διατομή αυτών των στοιχείων είναι γενικά τριγωνική. 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 m<sup>2</sup> ).



Σχήμα 3.12: Δικτυωτά πλαίσια τριών και τεσσάρων (διαμηκών) ράβδων (Σοφιανός, 2002).



Σχήμα 3.13: Δικτυωτά πλαίσια (Καββαδάς, 2004)



Σχήμα 3.14: Σύνδεση δικτυωτού πλαισίου (Σοφιανός, 2002)<sup>xiii</sup>

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).

Όσον αφορά τα στοιχεία έδρασης των πλαισίων, η μορφή των σταθερών εδράνων εξαρτάται από τον τύπο του πλαισίου και από την φέρουσα ικανότητα του εδάφους κάτω από το δάπεδο. Στην περίπτωση των βαριών μεταλλικών αψίδων, 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 (Σοφιανός, 2002):

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

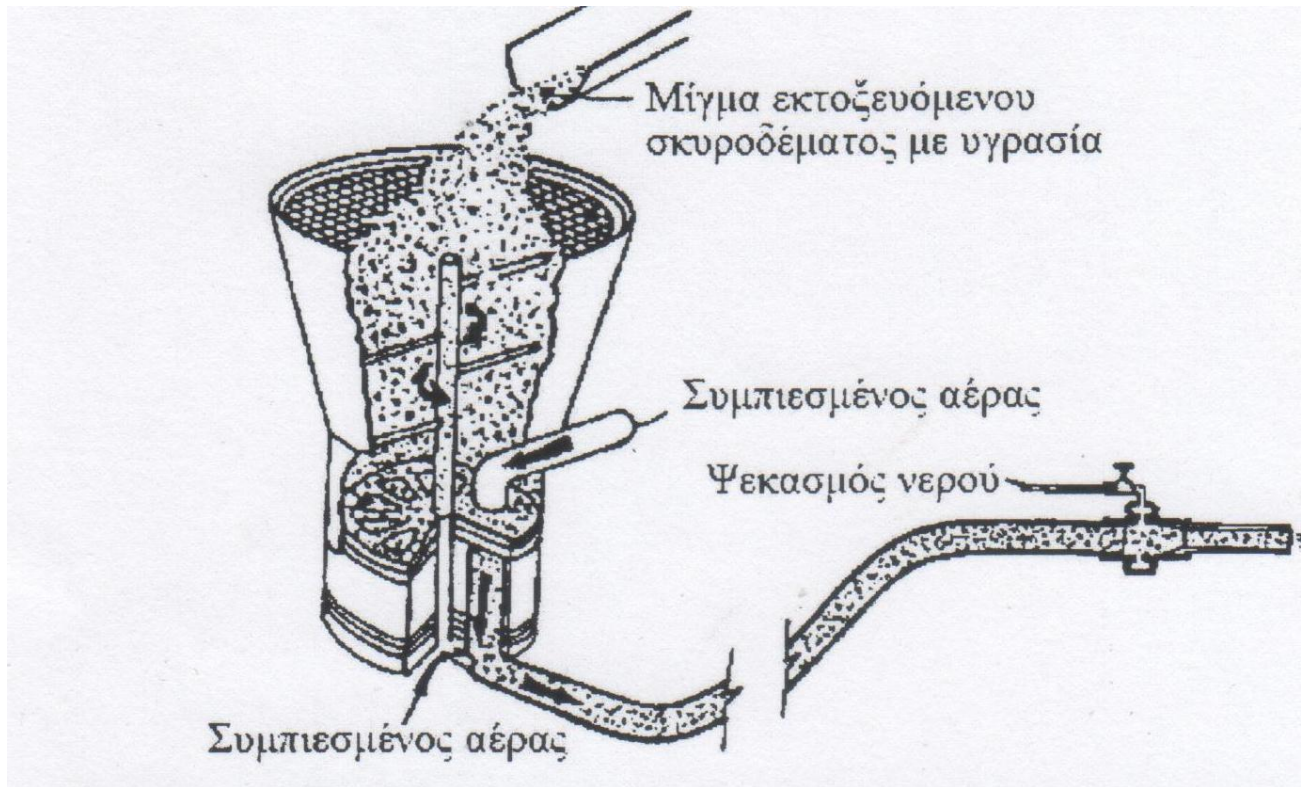
### 3.3.3. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

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 χρησιμοποιείται συχνότερα στις περιπτώσεις κατανάλωσης σκυροδέματος σε μεγάλες ποσότητες. Απλοποιημένη απεικόνιση τυπικού συστήματος ξηρής ανάμειξης εκτοξευόμενου σκυροδέματος φαίνεται στο Σχήμα 3.15. Κατά την παρασκευή εκτοξευόμενου σκυροδέματος η αναλογία ανάμειξης είναι η εξής (για την παραγωγή ενός κυβικού μέτρου βάρους 2.250-2350 kg):

- Τσιμέντο: 400-450 kg
- Αδρανή (Διάσταση κόκκου έως 10 mm): 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 «την αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος και τη μείωση της διαπερατότητας 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 3.15: Παραγωγή εκτοξευόμενου σκυροδέματος (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

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:

- Δεν προκαλεί αυξημένη αναπήδηση (rebound) του σκυροδέματος όπως το μεταλλικό πλέγμα.
- Δεν υπόκειται σε ηλεκτρολυτική διάβρωση επειδή οι ίνες δεν είναι συνεχείς όπως το μεταλλικό πλέγμα.
- Η χρήση των ινών είναι ταχύτερη και κατασκευαστικά ευκολότερη από ότι η χρήση μεταλλικού πλέγματος ιδίως στην περίπτωση που η επιφάνεια της βραχώμαζας είναι αρκετό 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 επιφάνεια της δεν είναι ικανοποιητική, το πλέγμα προσδίδει σημαντική ενίσχυση, ακόμη και χωρίς εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Οπότε, όταν απαιτείται σταθεροποίηση πρανών σε χαλαρή βραχομαζα, 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).

### 3.4. Τελική επένδυση

Η άμεση υποστήριξη της σήραγγας συνήθως ακολουθείται από την κατασκευή της τελικής επένδυσης η οποία αναλαμβάνει μέρος (ή το σύνολο) των φορτίων της περιβάλλουσας βραζόμενης. 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 (Καββαδας, 2000) η τελική επένδυση σχεδιάζεται να αναλάβει τα εξής φορτία (Καββαδάς, 2004):

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

### 4. ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ N.A.T.M.

#### 4.1. Γενικά

Στο παρακάτω κεφάλαιο γίνεται μια συνοπτική περιγραφή των μεθόδων εκσκαφής υπογείων έργων, ανοικτού και κλειστού τύπου, με ιδιαίτερη έμφαση στην μέθοδο N.A.T.M. η οποία αποτελεί και το αντικείμενο μελέτης στην παρούσα διπλωματική εργασία.

#### 4.2. Μέθοδοι διάνοιξης υπογείων έργων

Ο σχεδιασμός μιας εκσκαφής και της υποστήριξης αυτής, για την κατασκευή ενός υπόγειου χώρου, είναι ένα σύνθετο πρόβλημα εφαρμοσμένης μηχανικής. Ο σχεδιαστής πρέπει να λάβει υπόψη πολλούς παράγοντες (πχ. διαστάσεις και γεωμετρία ανοίγματος, προσδοκώμενες γεωλογικές συνθήκες, χρονοδιάγραμμα του έργου κ.ά.) προκειμένου να επιλεγεί το πιο κατάλληλο σύστημα εκσκαφής (Μπούνου, 2005).

Οι δύο βασικοί τύποι κατασκευής υπογείων έργων που υπάρχουν είναι οι:

- Ανοικτού τύπου (αναφέρεται στην εκσκαφή, η οποία πραγματοποιείται από την επιφάνεια του εδάφους).
- Κλειστού τύπου (αφορά την υπόγεια εκσκαφή)

##### 4.2.1. Μέθοδοι εκσκαφής για κατασκευές κλειστού τύπου:

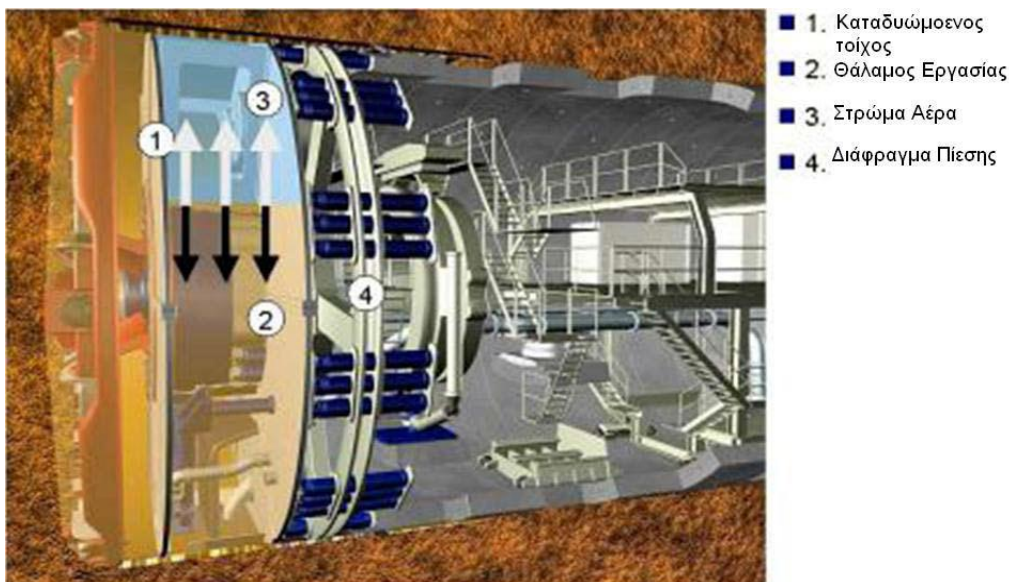
###### 4.2.1.1. Συνεχής εκσκαφή με μηχανές ολομέτωπης κοπής

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

Ένα TBM συνήθως αποτελείται από μία ή δύο ασπίδες, μεταλλικούς κυλίνδρους και από συστήματα υποστήριξης. Στο ένα άκρο της ασπίδας τοποθετείται η κοπτική κεφαλή. Πίσω από την κοπτική κεφαλή υπάρχει ένας θάλαμος στον οποίο, ανάλογα με τον τύπο του κοπτικού, τα



θραύσματα κοπής ανακατεύονται με πολφό (slurry), ή μένουν ως έχουν και μεταφέρονται στην έξοδο της σήραγγας. Η επιλογή της κοπτικής επαφής εξαρτάται από τις ιδιότητες του εδάφους. Πίσω από το θάλαμο βρίσκονται μια σειρά από υδραυλικοί γρύλοι (Σχήμα 4.1) οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την προώθηση του μηχανήματος. Οι γρύλοι τοποθετούνται στην επένδυση της σήραγγας που βρίσκεται πίσω από το μηχάνημα και εν συνεχεία το ωθούν προς την αντίθετη κατεύθυνση. Η κοπτική κεφαλή του TBM περιστρέφεται με γωνιακές ταχύτητες από 1 έως 10 rpm. Η ταχύτητα περιστροφής καθορίζεται από τις γεωλογικές συνθήκες καθώς και από τις δυνατότητες του μηχανήματος. Ανάλογα με τη γεωλογία μπορεί η σήραγγα να υποστηριχθεί ή να αφεθεί ανυποστήρικτη. Η υποστήριξη γίνεται με την εισαγωγή προκατασκευασμένων δακτυλίων σκυροδέματος, οι οποίοι τοποθετούνται στη θέση τους καθώς το μηχάνημα προωθείται προς τα εμπρός (Ντιούδη, 2010).



Σχήμα 4.1: Κεφαλή TBM (Εξαδάκτυλος, 2006)<sup>xiii</sup>

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

- TBM με σύστημα πλευρικής αντιστήριξης

Ένα gripper TBM είναι κατάλληλο για εξόρυξη βραχομαζών που η ευστάθεια του μετώπου και του ανυποστύλωτου τμήματος της σήραγγας μπορεί να επιτευχθεί με προσωρινά μέσα υποστύλωσης

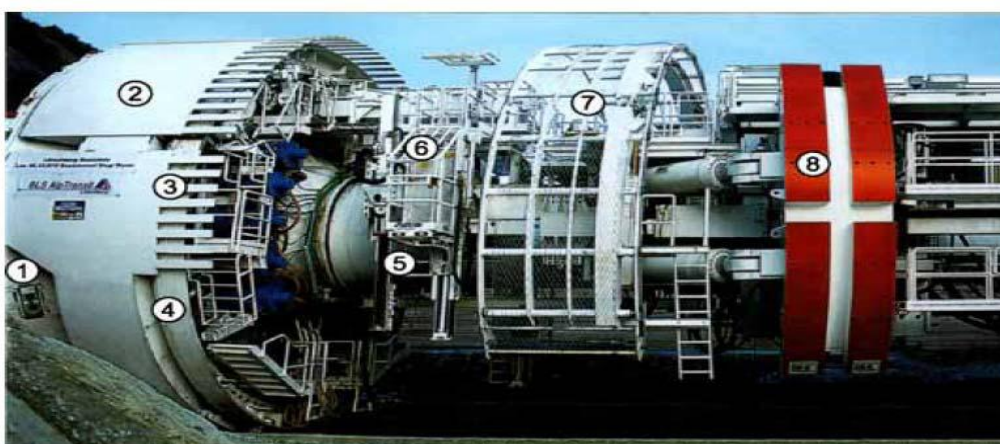
όπως κοχλίες, μεταλλικά πλαίσια και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Το gripper TBM αποτελείται από τέσσερα σύνολα συστημάτων:

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

Το σύστημα διάτρησης αποτελείται από την κοπτική κεφαλή, του δίσκους κοπής, το σύστημα μετάδοσης κίνησης της κεφαλής και το σύστημα οδήγησης (Σχήμα 4.2). Η κοπτική κεφαλή προωθείται και οδηγείται με ηλεκτρουδραυλικό σύστημα κινητήρων.

- TBM με ασπίδα

Τα μηχανήματα ολομέτωπης κοπής με ασπίδα χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις που η βραχύμαζα λόγω της μικρής της αντοχής δεν μπορεί να παραλάβει τις δυνάμεις στήριξης της μηχανής TBM με σύστημα πλευρικής αντιστήριξης, που είναι απαραίτητες για την μετάδοση των δυνάμεων πρόωσης. Μια μηχανή TBM τύπου ασπίδας χωρίς μηχανισμό υποστήριξης του μετώπου μπορεί επίσης να εφαρμοσθεί αν το περίγραμμα της σήραγγας δεν είναι ευσταθές με συνέπεια να μπορεί να επισυμβούν καταπτώσεις. Το κέλυφος της ασπίδας που καλύπτει όλο το μηχανήμα χρησιμεύει ως προσωρινή υποστήριξη της σήραγγας. Η μόνιμη επένδυση αποτελείται από προκατασκευασμένους δακτυλίους σκυροδέματος. Τα στοιχεία υποστύλωσης τοποθετούνται κάτω από την προστασία του ουραίου τμήματος της ασπίδας που ονομάζεται tail-skin (Ντιούδη, 2006).



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

Σχήμα 4.2: TBM με πλευρικούς grippers (Εξαδάκτυλος, 2006).



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

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

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

- Η αρχική επένδυση κεφαλαίου για τον εξοπλισμό είναι ιδιαίτερα υψηλή. Τα μηχανήματα κατασκευάζονται κατά παραγγελία και για συγκεκριμένες συνθήκες.
- Ο χρόνος παράδοσης του εξοπλισμού είναι μεγάλος.

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

### 4.2.1.2. Ασυνεχής εκσκαφή

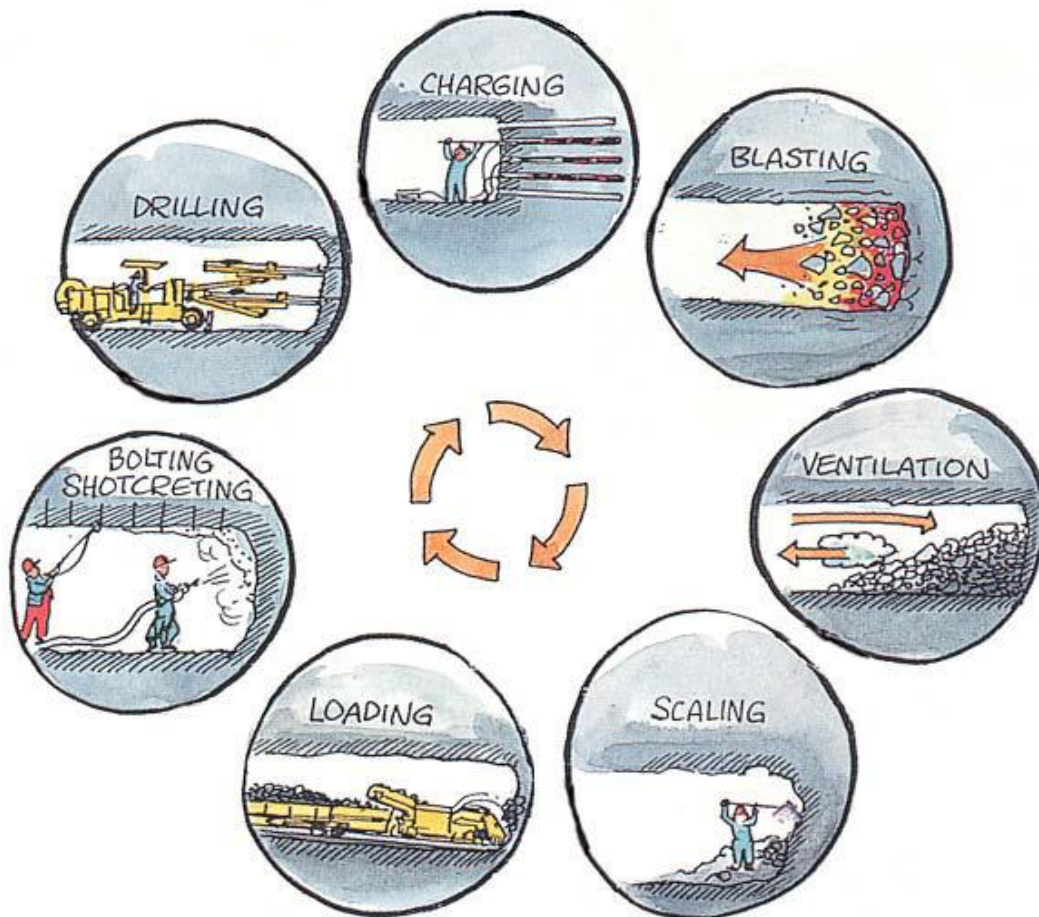
#### 4.2.1.2.1. Διάτρηση – Ανατίναξη (drill & blast)

Η εκσκαφή σηράγγων και άλλων υπόγειων ανοιγμάτων σε σκληρό πέτρωμα, πραγματοποιείται με τη χρήση της ασυνεχούς μεθόδου, διάτρησης και ανατίναξης. Είναι μια ιδιαίτερα ευπροσάρμοστη και αποδοτική μέθοδος εξόρυξης πετρώματος, που με το πέρασμα των χρόνων, έχει δεχθεί σημαντικές τεχνολογικές βελτιώσεις (Μπούνου, 2005 από Sinha, 1991).

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

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

Οι περισσότερες σήραγγες ορύσσονται με τη μέθοδο ολομέτωπης εκσκαφής όπου όλο το μέτωπο ανατινάσσεται σε ένα γύρο. Στο Σχήμα 4.3 φαίνεται η σήραγγα ΟΣΕ στην «Κακιά Σκάλα», σε συνδυασμό με τα επιφανειακά έργα που επίσης βασιζόταν σε μαζικές ανατινάξεις σε περιοχές βαριάς –συνεχούς κυκλοφορίας. Τα διατρήματα ανατίναξης έχουν μήκος μικρότερο από τη διάσταση του ανοίγματος και η ανατίναξη επηρεάζει το πέτρωμα μέχρι το 90% του μήκους των διατρημάτων. Τυπικοί κύκλοι προχώρησης είναι 2 με 4 m (7-13 ft) βάθος. Ανατίναξη του μετώπου σε φάσεις είναι μερικές φορές πιο πρακτική ή μπορεί ή μπορεί και να απαιτείται από τις συνθήκες του εδάφους ή από τους περιορισμένους εξοπλισμούς. Η πιο κοινή μέθοδος τμηματικής εκσκαφής είναι η «heading and bench» κατά την οποία το επάνω τμήμα του μετώπου (heading) ανατινάσσεται πρώτο, σε όλο του το πλάτος, και ακολουθεί μετά η ανατίναξη του υπόλοιπου (bench). Το κάτω τμήμα του μετώπου μπορεί να εκσκαφεί με οριζόντια ή κατακόρυφα διατρήματα (όμοια με των επιφανειακών ανατινάξεων).



Σχήμα 4.3: Ο κύκλος της μεθόδου διάτρησης – ανατίναξης (Ρόζος, 1989)<sup>xiv</sup>

Τα διατρήματα ορύσσονται συνήθως με υδραυλικά κρουστικά διατρητικά. Η απόδοση και η ταχύτητα της όρυξης βελτιώνονται γρήγορα, όπως και η φθορά των κοπτικών και η ακρίβεια κατά

τη διάτρηση, χάρη σε νέο σχεδιασμό των ράβδων και των κοπτικών. Τα jumbo κινούνται σε ράγες, σε πλατφόρμες ή σε τροχούς. Αυτά που κινούνται σε πλατφόρμες επιτρέπουν και την κίνηση του εξοπλισμού που απομακρύνει το υλικό εκσκαφής από το μέτωπο (USACE, 1997).

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

Ηλεκτρικές ή μη-ηλεκτρικές επιβραδύνσεις (electric or nonelectric delays) χρησιμοποιούνται για να ελέγξουν την ακολουθία και τις χρονικές στιγμές της έναυσης για τον περιορισμό της ποσότητας των εκρηκτικών που ανατινάσσονται μια χρονική στιγμή. Στο παρελθόν η έναυση γινόταν με ηλεκτρικά μέσα, αλλά εναύσεις και επιβραδύνσεις μη-ηλεκτρικές είναι διαθέσιμες σήμερα, οι οποίες προτιμώνται, διότι δεν επηρεάζονται από τυχαία ηλεκτρικά ρεύματα. Ποικίλλουν ανάλογα με την πυκνότητα φόρτισης ανά μήκος διατρήματος, διάμετρο, ταχύτητα έναυσης, χαρακτηριστικά αερίων, ανθεκτικότητα στο νερό, κ.α. Σε ξηρό πέτρωμα συνήθως χρησιμοποιείται ANFO.

Τα διατρήματα έχουν τυπικό μέγεθος 45 με 50 mm και φυσίγγια εκρηκτικών μέσων είναι συνήθως διαμέτρου 40 mm. Τα κενά διατρήματα είναι μικρότερης, ίσης ή και μεγαλύτερης διαμέτρου (USACE, 1997).

Δύο παράμετροι υπολογίζονται συνήθως σε ένα σχεδιασμό ανατίναξης: ο συντελεστής κατανάλωσης εκρηκτικών ( $\text{kg/m}^3$ ) εξορυσσόμενου πετρώματος και ο συντελεστής διάτρησης (συνολικό μήκος διατρημάτων ανά όγκο εξορυσσόμενου πετρώματος). Αυτές οι παράμετροι είναι δείκτες της οικονομίας της ανατίναξης και επιτρέπουν εύκολη σύγκριση μεταξύ σχεδιασμών ανατίναξης.

Ο συντελεστής κατανάλωσης εμφανίζει διακυμάνσεις ανάλογα με τις συνθήκες. Για παράδειγμα, είναι μεγαλύτερο όσο μικραίνει η σήραγγα ή όσο το πέτρωμα είναι πιο σκληρό και εύκαμπτο. Πετρώματα με κενά εμφανίζουν μεγάλες τιμές ειδικών φορτίων. Τυπικές τιμές του συντελεστή κατανάλωσης είναι  $0,6 - 5 \text{ kg/m}^3$  ( $1 \text{ kg/m}^3$  για σήραγγες διατομής μεγαλύτερης από  $30 \text{ m}^2$  και πάνω από  $3 \text{ kg/m}^3$  για μεγέθη κάτω από  $10 \text{ m}^2$  για τον ίδιο τύπο βραχώμαζας). Τυπικές τιμές του συντελεστή διάτρησης κυμαίνονται από  $0,8 - 6 \text{ m/m}^3$ . Η ιδανική ανατίναξη πρέπει να καταλήγει στην ελάχιστη βλάβη στο παραμένον πετρώματος και στην ελάχιστη υπερεκσκαφή (overbreak) (USACE, 1997).



#### 4.2.1.2.2. Μηχανική Όρυξη

α. Με μηχανές συνεχούς σημειακής κοπής (Road header)



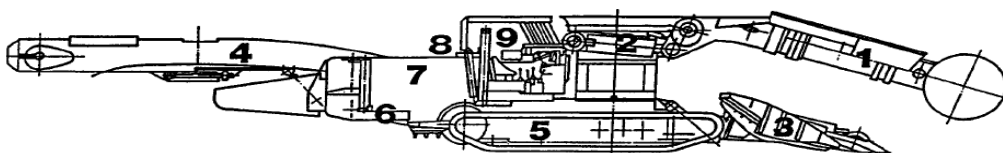
Σχήμα 4.4: Μηχανή όρυξης Road header (Εξαδάκτυλος, 2006)

Τα πρώτα μηχανήματα σημειακής κοπής (roadheaders), χρησιμοποιήθηκαν για διάνοιξη σηράγγων τη δεκαετία του 60. Μέσα σε λίγα χρόνια περίπου 150 –200 τέτοια μηχανήματα χρησιμοποιούνταν στην κατασκευή υπογείων έργων (Καλιαμπάκος, 2004) Σχήμα 4.4.

Τα βασικά τμήματα ενός εκσκαπτικού μηχανήματος σημειακής κοπής φαίνονται στο Σχήμα 4.5

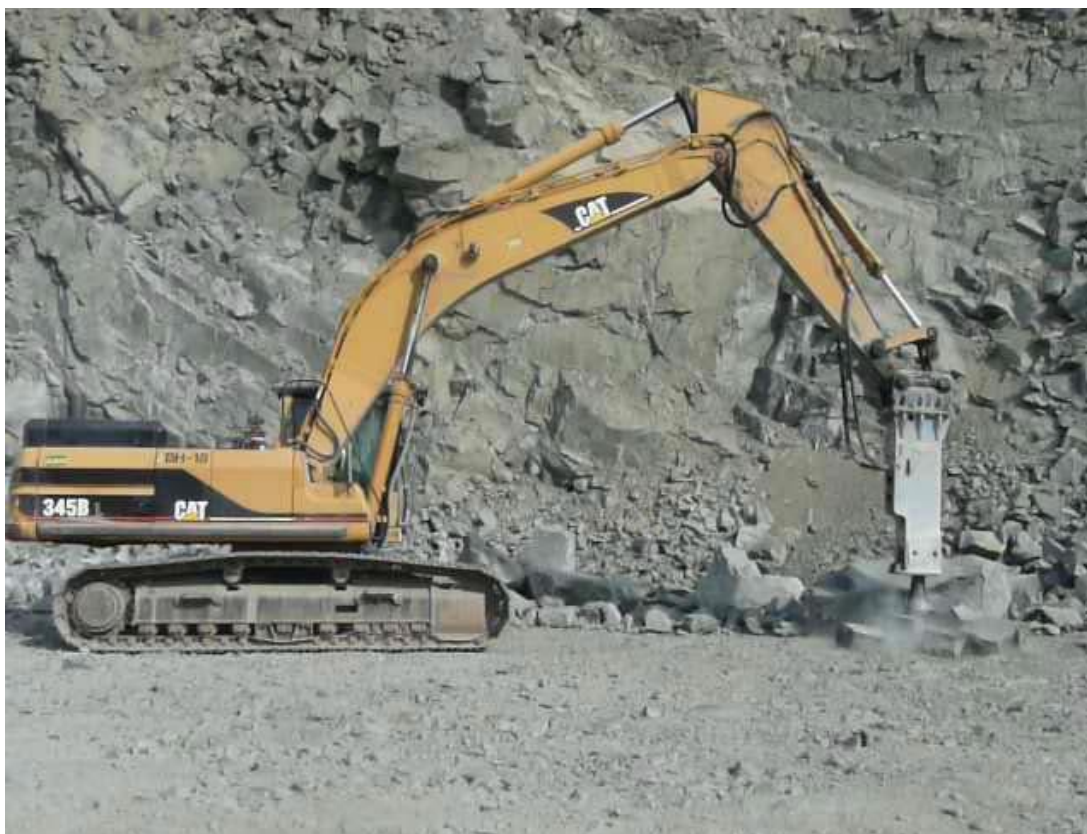
Οι κοπτικοί βραχίονες αποτελούν το εργαλείο προσβολής του μετώπου. Τα βασικά του τμήματα είναι η μηχανή του βραχίονα και οι κοπτικές κεφαλές. Υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες κοπτικών κεφαλών:

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



- |                           |                   |
|---------------------------|-------------------|
| 1. Cutter Boom            | 6. Base Frame     |
| 2. Turret                 | 7. Electrics      |
| 3. Loading Device         | 8. Hydraulics     |
| 4. Chain Conveyor         | 9. Operator's Cab |
| 5. Crawler Track Assembly |                   |

Σχήμα 4.5: Τα βασικά τμήματα ενός Roadheader (Εξαδάκτυλος, 2006)



Σχήμα 4.6: Υδραυλική κρουστική σφύρα.(Ντιούδη, 2010)<sup>xv</sup>

### **b. Με συμβατικά μέσα εκσκαφής**

Αποτελεί ασυνεχή μέθοδο εκσκαφής, η οποία πραγματοποιείται με συμβατικά μέσα (πχ. εκσκαφείς, μπουλντόζες κτλ.). Εφαρμόζεται συνήθως σε μαλακούς ή αποσπασμένους σχηματισμούς, σε ρέον έδαφος, κατακερματισμένο (fragmented) ή συμπιεσμένο (squeezing) πέτρωμα (Μπούνου, 2005).

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

Η κρουστική σφύρα αποτελείται συνήθως από ένα κοπίδι άκμονα αυτό-ακονιζόμενο (Σχήματα 4.6). Η τεχνική είναι κατάλληλη για σήραγγες που υπερβαίνουν τα 30 m<sup>2</sup> αλλά σε μικρότερων διαστάσεων σήραγγες μπορεί να προκαλέσουν λειτουργικά προβλήματα εξαιτίας του περιορισμένου χώρου. Σε στενές σήραγγες (πλάτος < 8 m) μόνο ένας εκσκαφέας που φέρει σφύρα μπορεί να



χωρίσει και να λειτουργήσει. Η εργασία χωρίζεται στις εξής διακριτές λειτουργίες (Ντιούδη, 2010 από Ratan Raj Tatiya, 2005):

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

#### **4.2.1.2.3. Νέα αυστριακή μέθοδος. (N.A.T.M.)**

Η λεγόμενη «Νέα Αυστριακή Μέθοδος Διάνοιξης Σηράγγων» (New Austrian Tunnelling Method - NATM) ουσιαστικά δεν αποτελεί μια «μέθοδο» αλλά περιλαμβάνει ένα σύνολο τεχνικών διάνοιξης και υποστήριξης σηράγγων οι οποίες εφαρμόστηκαν συστηματικά κατά τη διάνοιξη σηράγγων στις Αυστριακές Άλπεις στις αρχές της δεκαετίας του 1960. Οι τεχνικές αυτές είχαν εφαρμοσθεί και πριν το 1960 τόσο στην Αυστρία όσο και σε άλλα μέρη του κόσμου αλλά η συστηματοποίηση και ονομασία τους (NATM) έγινε από Αυστριακούς μηχανικούς (Rabczewicz, Mueller, Brunner και Pacher) περί το 1960. Έτσι η NATM παρόλο που δεν είναι ούτε νέα ούτε Αυστριακή διατήρησε διεθνώς μέχρι σήμερα το όνομα της.

Η NATM αποτελεί το αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας και έτσι εξετάζεται διεξοδικά παρακάτω.

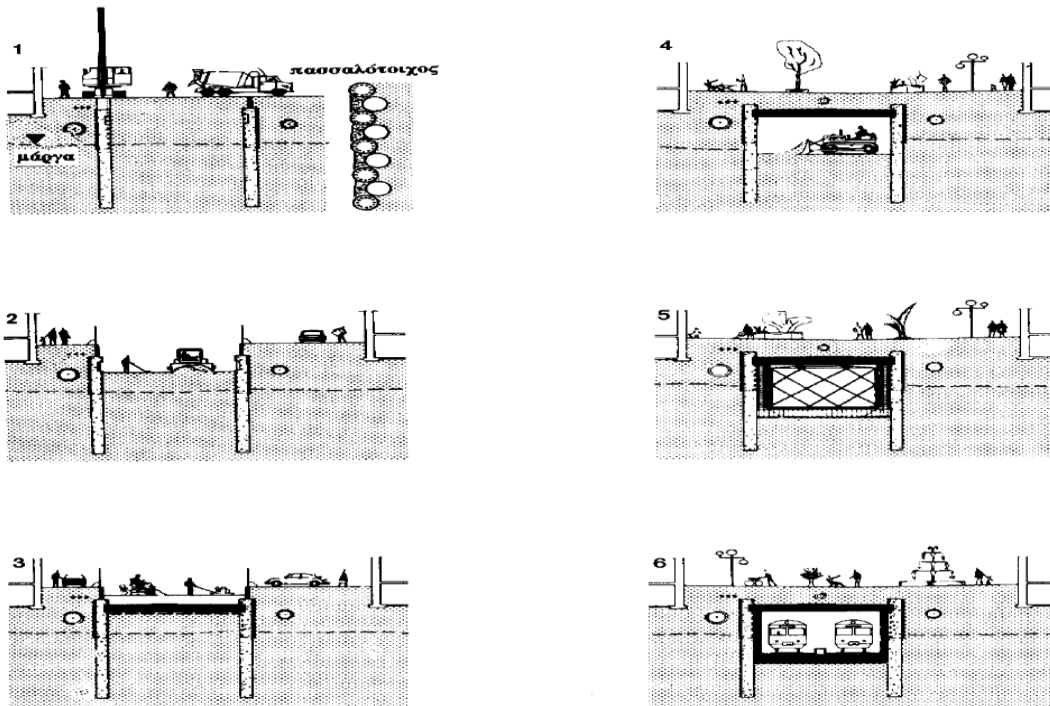
#### **4.2.2. Μέθοδοι εκσκαφής για κατασκευές ανοικτού τύπου**

##### **4.2.2.1. Μέθοδος κοπής και επίχωσης (cut and cover)**

Η μέθοδος κοπής και επίχωσης Σχήμα 4.7, εντάσσεται στις μεθόδους ανοικτού τύπου, 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 τις 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).



Σχήμα 4.7: Μέθοδος κοπής και επιχωμάτωσης. (Μαραγκός, 1999)<sup>xvi</sup>

### 4.3. Νέα Αυστριακή Μέθοδος –New Austrian Tunneling Method (N.A.T.M.)

#### 4.3.1. Γενικά

Η συνήθης εφαρμογή της μεθόδου NATM είναι η διάνοιξη της διατομής της σήραγγας σε μια ή περισσότερες φάσεις και η άμεση υποστήριξη του τοιχώματος με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (απλό, ινοπλισμένο, οπλισμένο με χαλύβδινο πλέγμα ή ενισχυμένο με χαλύβδινες νευρώσεις από ράβδους ή διατομές I) και αγκύρια (παθητικά ή προεντεταμένα). Σημειώνεται ότι η υποστήριξη του τοιχώματος της σήραγγας μόνον με αγκύρια χωρίς εκτοξευόμενο σκυρόδεμα υπάγεται επίσης στην κατηγορία της μεθόδου NATM. Τέλος, κατά τη μέθοδο NATM η ως άνω άμεση υποστήριξη συνήθως ακολουθείται σε μεταγενέστερο χρόνο από την κατασκευή της "τελικής επένδυσης" της σήραγγας η οποία θεωρείται ως φέρον στοιχείο (σε ορισμένες περιπτώσεις δεν κατασκευάζεται τελική επένδυση αλλά η άμεση υποστήριξη σχεδιάζεται ώστε να αναλάβει το σύνολο των φορτίων της περιβάλλουσας βραχώμαζας).

### 4.3.2. Φιλοσοφία μεθόδου N.A.T.M.

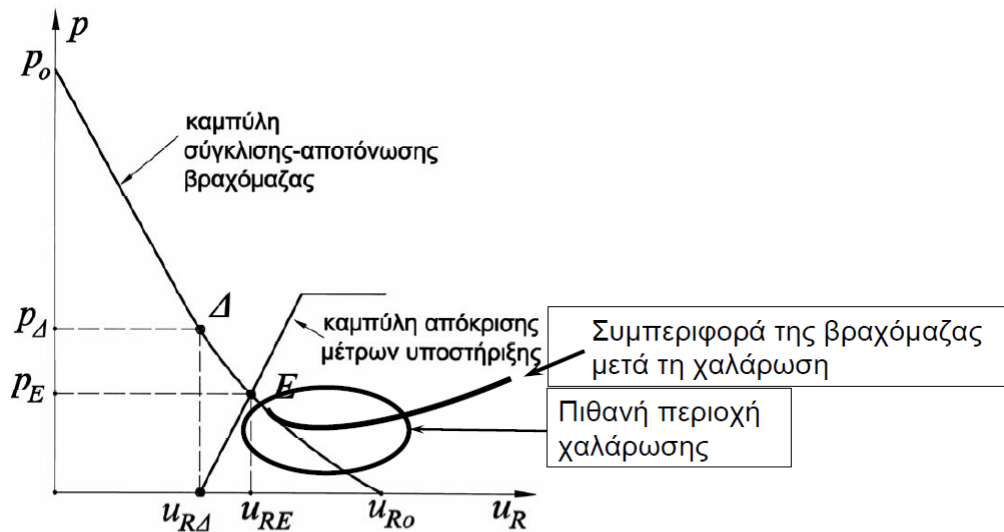
Η βασική ιδέα πίσω από τη μέθοδο NATM είναι η ενεργοποίηση της αντοχής της περιβάλλουσας της εκσκαφής ώστε να περιοριστεί στο ελάχιστο η αποσυμπίεση και η χαλάρωσή της βραχομάζας. Αυτό επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση άμεσης υποστήριξης κυρίως από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αγκύρια που ενισχύουν την περιβάλλουσα βραχομάζα και συμβάλλουν στην πίεση σταθεροποίησης που προκύπτει από το φαινόμενο της θολωτής δράσης. Η σχεδιασμός της διάνοιξης εξαρτάται από την επιφάνεια της τελικής διατομής και από την ποιότητα της βραχομάζας. Συνήθως γίνεται εκσκαφή που πραγματοποιείται σε τρεις φάσεις από πάνω προς τα κάτω. Η πρώτη φάση εκσκαφής περιλαμβάνει το θόλο ή την τοξωτή άνω ημιδιατομή η οποία μπορεί να εσκαπτεί και σε περισσότερες υποφάσεις κατά πλάτος της σήραγγας. Η δεύτερη φάση γίνεται στο υπόλοιπο τμήμα παραλληλόγραμμου σχήματος. Η τρίτη φάση περιλαμβάνει το ανεστραμμένο τόξο. Είναι επίσης δυνατή η εκσκαφή με πλευρικές στοές η οποία εφαρμόζεται σε περιπτώσεις έργων μεγάλων διαστάσεων ή μεγάλης διατομής σήραγγες που κατασκευάζονται σε βραχομάζα χαμηλής ποιότητας.

### 4.3.3. Αρχή της μεθόδου N.A.T.M.

Η σήραγγα διανοίγεται κατά τρόπο ώστε να ενεργοποιηθεί στο μέγιστο βαθμό η αντοχή της περιβάλλουσας βραχομάζας (μέσω της ελεγχόμενης σύγκλισης του τοιχώματος) Έτσι μειώνονται οι πιέσεις της βραχομάζας στην άμεση υποστήριξη (τόσο περισσότερο όσο αυξάνει η σύγκλιση του τοιχώματος). Εάν η σύγκλιση αυξηθεί υπέρμετρα, μπορεί να προκληθεί αποδιοργάνωση της βραχομάζας και αύξηση των πιέσεων

Χαρακτηριστικά της σύγκλισης (Καββαδάς, 2004):

1. Ένα σημαντικό ποσοστό της σύγκλισης του τοιχώματος της σήραγγας συμβαίνει εμπρός από το μέτωπο εκσκαφής
2. Η σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας αυξάνει με ταχείς ρυθμούς στην περιοχή του μετώπου εκσκαφής

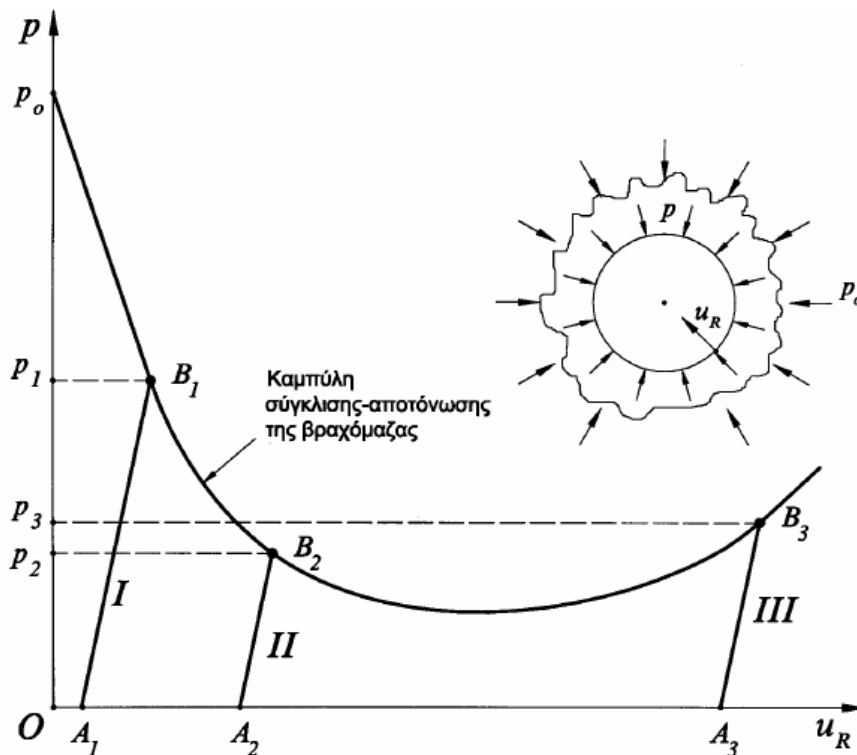


Σχήμα 4.8: Καμπύλη σύγκλισης αποτόνωσης βραχομάζας (Καββαδάς, 2004)

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

Η παραπάνω αρχή της μεθόδου NATM εξειδικεύεται ως εξής:

1. Η εκσκαφή της διατομής της σήραγγας συνήθως γίνεται σε περισσότερες της μιας φάσεις. 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 βραχομάζας.
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 βραχομάζας. Τούτο επιτυγχάνεται με την προώθηση της κάθε φάσης εκσκαφής σε μικρά βήματα της τάξεως των 1-2 μέτρων αναλόγως της ποιότητας της βραχομάζας. Το μήκος του βήματος εκσκαφής μειώνεται όσο πτωχότερη είναι η ποιότητα της βραχομάζας (επειδή στις περιπτώσεις αυτές η αποδιοργάνωση της δομής της βραχομάζας είναι ταχύτερη).



Σχήμα 4.9: Επιρροή του χρόνου τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης στην πίεση της βραχομάζας επί της υποστήριξης της σήραγγας (Καββαδάς, 2004)

- I. πολύ νωρίς. Η πίεση στην άμεση υποστήριξη ( $p_1$ ) είναι πολύ μεγάλη.
  - II. κανονικός χρόνος κατασκευής της άμεσης υποστήριξης. Η πίεση ( $p_2$ ) έχει μειωθεί σημαντικά.
  - III. πολύ αργά. Η πίεση ( $p_3$ ) έχει αυξηθεί λόγω αποδιοργάνωσης (χαλάρωσης της βραχομάζας, με συνέπεια τον κίνδυνο κατάρρευσης).
3. Η άμεση υποστήριξη της διατομής θα πρέπει να αναλάβει φορτία κατά το δυνατόν ταχύτερα ώστε να περιορισθεί η περαιτέρω σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας και συνεπώς η αποδιοργάνωση της δομής της βραχομάζας (Σχήματα 4.8-4.9). Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πλεονεκτεί ως προς την άποψη αυτή επειδή βρίσκεται σε απόλυτη επαφή με την περιβάλλουσα βραχομάζα (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 βραχομάζα και συντελεί στην καλύτερη ανάπτυξη της λειτουργίας τόξου στη βραχομάζα. Πράγματι, η τάση της βραχομάζας να παραμορφωθεί διατμητικά προκαλεί (μέσω της διασταλτικότητας) την ανάπτυξη εφελκυσμού στα αγκύρια και συνεπώς θλίψης στη βραχομάζα. Η θλίψη της βραχομάζας αυξάνει την αντοχή της και μειώνει



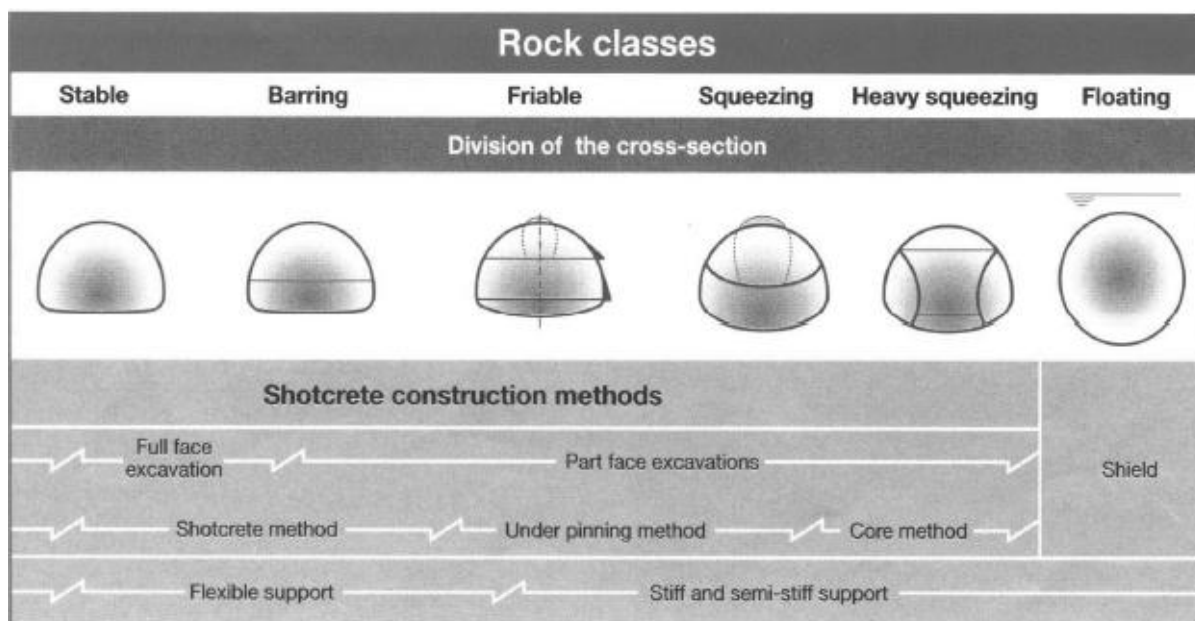
την παραμορφωσιμότητα της λόγω εγκιβωτισμού (λειτουργία ανάλογη με αυτή του σπειροειδούς οπλισμού στα υποστυλώματα).

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

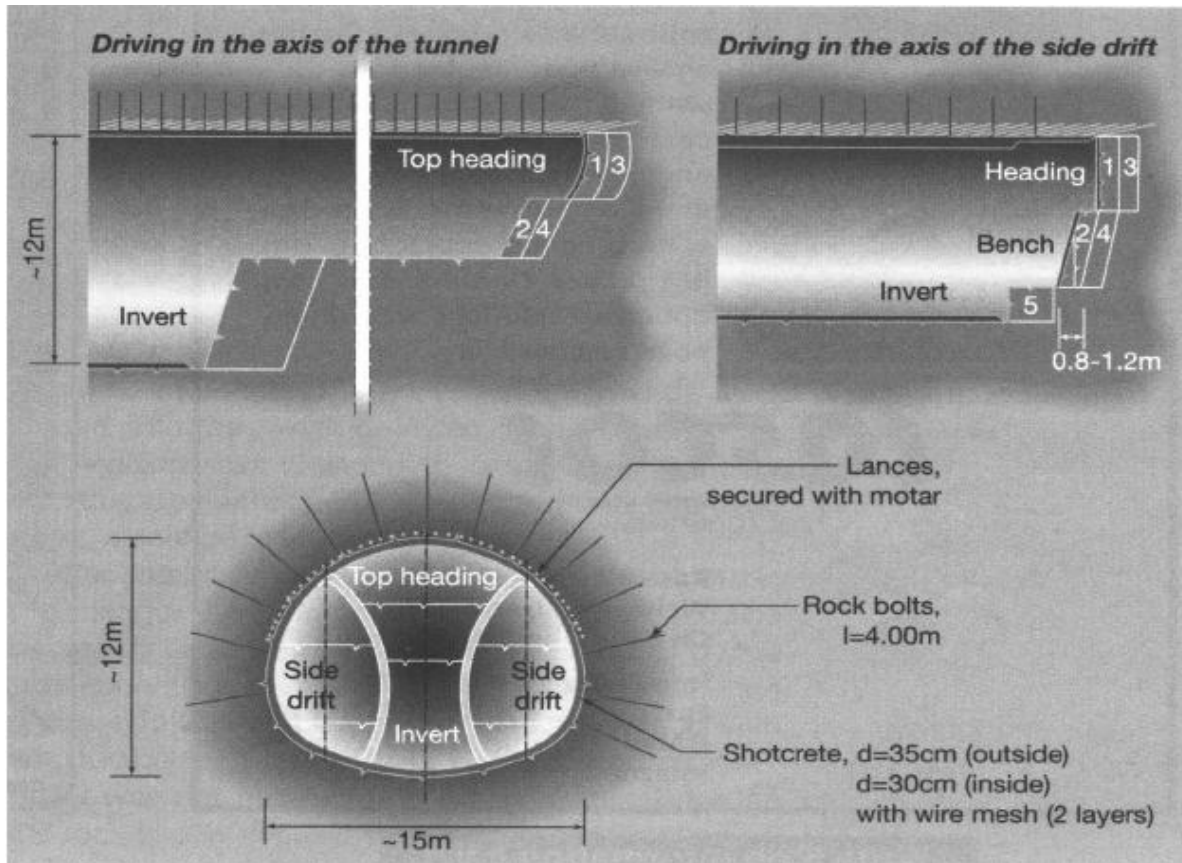
#### 4.3.4. Φάσεις εκσκαφής

Η εκσκαφή σήραγγων με τη μέθοδο NATM συνήθως γίνεται σε περισσότερες της μιας φάσεις. Τα κυριότερα συστήματα εκσκαφής είναι:

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.
2. Εκσκαφή με πλευρικές στοές (side-wall drifts). Η μέθοδος εφαρμόζεται σε σήραγγες μεγάλου εύρους σε βραχώμαζες με σχετικά πτωχά χαρακτηριστικά ή στις περιπτώσεις όπου είναι κρίσιμος ο περιορισμός της σύγκλισης του τοιχώματος (π.χ. σε αστικές περιοχές). Περιλαμβάνει την υποδιαίρεση της διατομής κατά το πλάτος και διάνοιξη πρώτα της μιας πλευράς και στη συνέχεια της άλλης πλευράς. Σε ιδιαιτέρως δύσκολες συνθήκες η μέθοδος μπορεί να περιλάβει δυο πλευρικές στοές και ενδιάμεσο πυλώνα (twin side-wall drifts with central pillar). Στην περίπτωση αυτή πρώτα διανοίγονται οι πλευρικές στοές και στο τέλος διανοίγεται ο κεντρικός πυλώνας, Σχήματα: 4.10-4.11.



Σχήμα 4.10: Φάσεις εκσκαφής ανά είδος πετρώματος (Καββαδάς, 2004)



Σχήμα 4.11: Εκσκαφή με την μέθοδο Ν.Α.Τ.Μ. Όπου διακρίνονται οι φάσεις εκσκαφής και οι πλευρικές στοές (Καββαδάς, 2004)

### 4.3.5. Μέθοδοι διαστασιολόγησης και ανάλυσης της προσωρινής υποστήριξης των σηράγγων

Κατηγορίες μεθόδων:

1. Εμπειρικές.
2. Ημι-εμπειρικές.
3. Αναλυτικές.
4. Αριθμητικές.

#### 1. Οι εμπειρικές μέθοδοι περιλαμβάνουν τα εξής:

- a) Γεωτεχνική ταξινόμηση της βραχώμαζας.
- b) Επιλογή και διαστασιολόγηση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης με βάση την ταξινόμηση της βραχώμαζας και τη γεωμετρία της σήραγγας.



Σχήμα 4.12: Μέθοδος Q (NGI) (Καββαδάς, 2004)

## 2. Οι ημι-εμπειρικές μέθοδοι περιλαμβάνουν τα εξής:

1. Γεωτεχνική ταξινόμηση της βραχώμαζας
2. Επιλογή των μέτρων υποστήριξης με βάση την ταξινόμηση της βραχώμαζας και κάποια εμπειρική μέθοδο (π.χ. Bieniawski - 1989)
3. Εκτίμηση των φορτίων της βραχώμαζας στην υποστήριξη με κάποια εμπειρική μέθοδο (π.χ. Terzaghi, Bieniawski, Protodyakonov, κλπ)
4. Έλεγχος επάρκειας των μέτρων υποστήριξης με στατική ανάλυση Πλεονεκτήματα: Σχετικώς απλές, επίφαση ανάλυσης και υπολογισμών Μειονεκτήματα: Τα θεωρούμενα φορτία εκ της βραχώμαζας συνήθως αναφέρονται σε διαφορετικές συνθήκες και συνεπώς δεν είναι ορθά.

- **Protodyakonov:** Για σήραγγες του Μετρό της Μόσχας (μικρά βάθη). Σε βαθύτερες σήραγγες τα υπολογιζόμενα φορτία είναι πολύ μικρά.
- **Bieniawski:** Για σχετικώς καλής ποιότητας βραχώμαζες (RMR>50). Για βραχώμαζες με RMR<50, τα υπολογιζόμενα φορτία είναι πολύ μικρά (Σχήμα 4.13).
- **Terzaghi:** Για σήραγγες εύρους 4-6m, υποστηριζόμενες με ξύλινα στοιχεία και λιθοδομή. Για σήραγγες NATM εύρους 10-15m, τα υπολογιζόμενα φορτία είναι πολύ μεγάλα (Σχήμα 4.14).



**Επιλογή μέτρων προσωρινής υποστήριξης κατά Bieniawski (1989)**  
**Σήραγγα πεταλοειδούς διατομής, εύρους 10m**

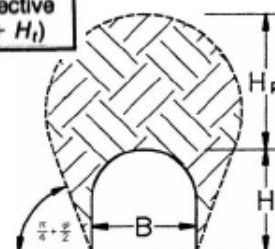
Rock Mass Class	Excavation	Support		
		Rock Bolts (20-mm Dia, Fully Grouted)	Shotcrete	Steel Sets
Very good rock I RMR: 81–100	Full face 3-m advance	Generally, no support required except for occasional spot bolting		
Good rock II RMR: 61–80	Full face 1.0–1.5-m advance Complete support 20 m from face	Locally, bolts in crown 3 m long, spaced 2.5 m, with occasional wire mesh	50 mm in crown where required	None
Fair rock III RMR: 41–60	Top heading and bench 1.5–2-m advance in top heading Commence support after each blast Complete support 10 m from face	Systematic bolts 4 m long, spaced 1.5–2 m in crown and walls with wire mesh in crown	50–100 mm in crown and 30 mm in sides	None
Poor rock IV RMR: 21–40	Top heading and bench 1.0–1.5-m advance in top heading. Install support concurrently with excavation 10 m from face	Systematic bolts 4–5 m long, spaced 1–1.5 m in crown and wall with wire mesh	100–150 mm in crown and 100 mm in sides	Light to medium ribs spaced 1.5 m where required
Very poor rock V RMR: <20	Multiple drifts 0.5–1.5-m advance in top heading. Install support concurrently with excavation. Shotcrete as soon as possible after blasting	Systematic bolts 5–6 m long, spaced 1–1.5 m in crown and walls with wire mesh. Bolt invert	150–200 mm in crown, 150 mm in sides, and 50 mm on face	Medium to heavy ribs spaced 0.75 m with steel lagging and forepoling if required. Close invert

Σχήμα 4.13: Μέθοδος Bieniawski (Καββαδάς, 2004)

**Φορτία βραχώδους κατά Terzaghi (1946) - Τροποποίηση κατά Deere (1970)**

Rock Condition	RQD	Rock Load $H_p$
1. Hard and intact	95–100	Zero
2. Hard stratified or schistose	90–99	0–0.5 $B$
3. Massive, moderately jointed	85–95	0–0.25 $B$
4. Moderately blocky and seamy	75–85	0.25 $B$ –0.20 $(B + H_t)$
5. Very blocky and seamy	30–75	(0.20–0.60) $(B + H_t)$
6. Completely crushed but chemically intact	3–30	(0.60–1.10) $(B + H_t)$
6a. Sand and gravel	0–3	(1.10–1.40) $(B + H_t)$
7. Squeezing rock, moderate depth	NA	(1.10–2.10) $(B + H_t)$
8. Squeezing rock, great depth	NA	(2.10–4.50) $(B + H_t)$
9. Swelling rock	NA	Up to 80m irrespective of value of $(B + H_t)$

Σήραγγα εύρους  $B$  και ύψους  $H_t$   
 $H_p$  = ύψος φορτίζουσας βραχώδους



Σχήμα 4.14: Μέθοδος Terzaghi (Καββαδάς, 2004)



### 3. Οι αναλυτικές μέθοδοι περιλαμβάνουν τα εξής:

1. Γεωτεχνική ταξινόμηση της βραχώμαζας.
2. Επιλογή των μέτρων υποστήριξης με βάση την ταξινόμηση της βραχώμαζας και κάποια εμπειρική μέθοδο (π.χ. Q, Bieniawski -1989) ή την εμπειρία του μελετητή από ανάλογα έργα.
3. Εκτίμηση των φορτίων της βραχώμαζας στην υποστήριξη με αναλυτική μέθοδο (συνήθως τη μέθοδο σύγκλισης-αποτόνωσης ή τη μέθοδο Rabcewicz).
4. Έλεγχος επάρκειας των μέτρων υποστήριξης με στατική ανάλυση Πλεονεκτήματα: Συνδυάζουν απλότητα και επάρκεια υπολογισμών για προμελέτες σιδηράγων.

Μειονεκτήματα: Αγνόηση ειδικών γεωτεχνικών συνθηκών (π.χ. κεκλιμένες στρώσεις βράχου, αποσφηνώσεις, κλπ), ή θεώρησή τους μέσω σημαντικής απλοποίησης.

### 4. Οι αριθμητικές μέθοδοι περιλαμβάνουν τα εξής:

1. Γεωτεχνική ταξινόμηση της βραχώμαζας.
2. Εκτίμηση των γεωτεχνικών παραμέτρων της βραχώμαζας με βάση την ταξινόμηση.
3. Επιλογή των μέτρων υποστήριξης με βάση την ταξινόμηση της βραχώμαζας και κάποια εμπειρική μέθοδο (π.χ. Q, Bieniawski -1989) ή την εμπειρία του μελετητή από ανάλογα έργα.
4. Έλεγχος επάρκειας των μέτρων υποστήριξης με ανάλυση της αλληλεπίδρασης βραχώμαζας-υποστήριξης με αριθμητική μέθοδο (συνήθως με πεπερασμένα στοιχεία).

Πλεονεκτήματα: Η ακριβέστερη μέθοδος (εφόσον οι παραδοχές είναι ορθές).

Μειονεκτήματα: Σχετικώς σύνθετη ανάλυση. Η ακρίβεια των προβλέψεων επηρεάζεται από παραδοχές για τις οποίες συχνά δεν υπάρχουν δεδομένα (π.χ. ακριβής στρωματογραφία και μηχανικές παράμετροι). Συνεπώς, συχνά η ακρίβεια των υπολογισμών δεν αντιστοιχεί με ακρίβεια προβλέψεων.

#### 4.3.6. Τυπικές διατομές σχεδιασμού

Οι τυπικές διατομές σχεδιασμού:

- Διακρίνονται ως προς τον αριθμό των φάσεων εκσκαφής, το είδος, τις ποσότητες και τον τρόπο εφαρμογής των μέτρων προσωρινής υποστήριξης
- Θα πρέπει να καλύπτουν το σύνολο των αναμενόμενων γεωτεχνικών συνθηκών (από πολύ καλές έως πολύ κακές) και του ύψους των υπερκείμενων γαιών.
- Οι φάσεις εκσκαφής πρέπει να είναι οι ελάχιστες δυνατές. Το κόστος κατασκευής αυξάνει σημαντικά με την αύξηση του αριθμού των φάσεων εκσκαφής.

- Κατά την εκπόνηση της μελέτης, η επιλογή του είδους, των ποσοτήτων και του τρόπου εφαρμογής των μέτρων προσωρινής υποστήριξης γίνεται με βάση την εμπειρία. Κατά την κατασκευή, τα ανωτέρω προσαρμόζονται στις επιτόπου συνθήκες.
- Πεδίο εφαρμογής των τυπικών διατομών δηλαδή σε ποιούς συνδυασμούς κατηγορίας βραχόμαζας και ύψους γαιών εφαρμόζεται η κάθε τυπική διατομή.
- Το κόστος εκσκαφής διαφέρει ανά κατηγορία βραχόμαζας. Αρα, χωριστές τυπικές διατομές για σημαντικά διαφορετικές κατηγορίες βραχόμαζας, ακόμη και εάν τα μέτρα υποστήριξης είναι τα ίδια.

GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR BLOCKY JOINTED ROCKS		SURFACE CONDITIONS				
<p>From a description of the structure and surface conditions of the rock mass, pick an appropriate box in this chart. Estimate the average value of GSI from the contours. Do not attempt to be too precise. Quoting a range from 36 to 42 is more realistic than stating that GSI = 38. It is also important to recognize that the Hoek-Brown criterion should only be applied to rock masses where the size of individual blocks or pieces is small compared with the size of the excavation under consideration. When the individual block size is more than about one quarter of the excavation size, the failure will be structurally controlled and the Hoek-Brown criterion should not be used.</p>		STRUCTURE				
		DECREASING SURFACE QUALITY				
<p>DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES</p>		VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces	GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces	POOR Stickensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments	VERY POOR Stickensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
		90	80	N/A	N/A	N/A
		80	70	60	50	40
		70	60	50	40	30
		60	50	40	30	20
		50	40	30	20	10
<p>INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities</p>						
<p>BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets</p>						
<p>VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets</p>						
<p>BLOCKY/DISTURBED - folded, tilted, tilted with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets</p>						
<p>DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces</p>						
<p>FOLIATED/LAMINATED - folded and tectonically sheared. Lack of blockiness due to schistosity prevailing over other discontinuities</p>						

### Μέθοδος σχεδιασμού σηράγγων

1. Ταξινόμηση της βραχόμαζας :  
π.χ. GSI (E. Hoek, 1998)
  - Βαθμός αλληλεμπλοκής
  - Κατάσταση ασυνεχειών
2. Εκτίμηση παραμέτρων αντοχής και παραμορφωσιμότητας (μέσω του GSI) :  
Αστοχία : κριτήριο Hoek-Brown
 
$$E = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \log \left( \frac{GSI - 10}{40} \right)$$
3. Τυπικές διατομές σχεδιασμού (γεωμετρία εκσκαφής και μέτρα υποστήριξης)
4. Αναλύσεις επάρκειας με πεπερασμένα στοιχεία

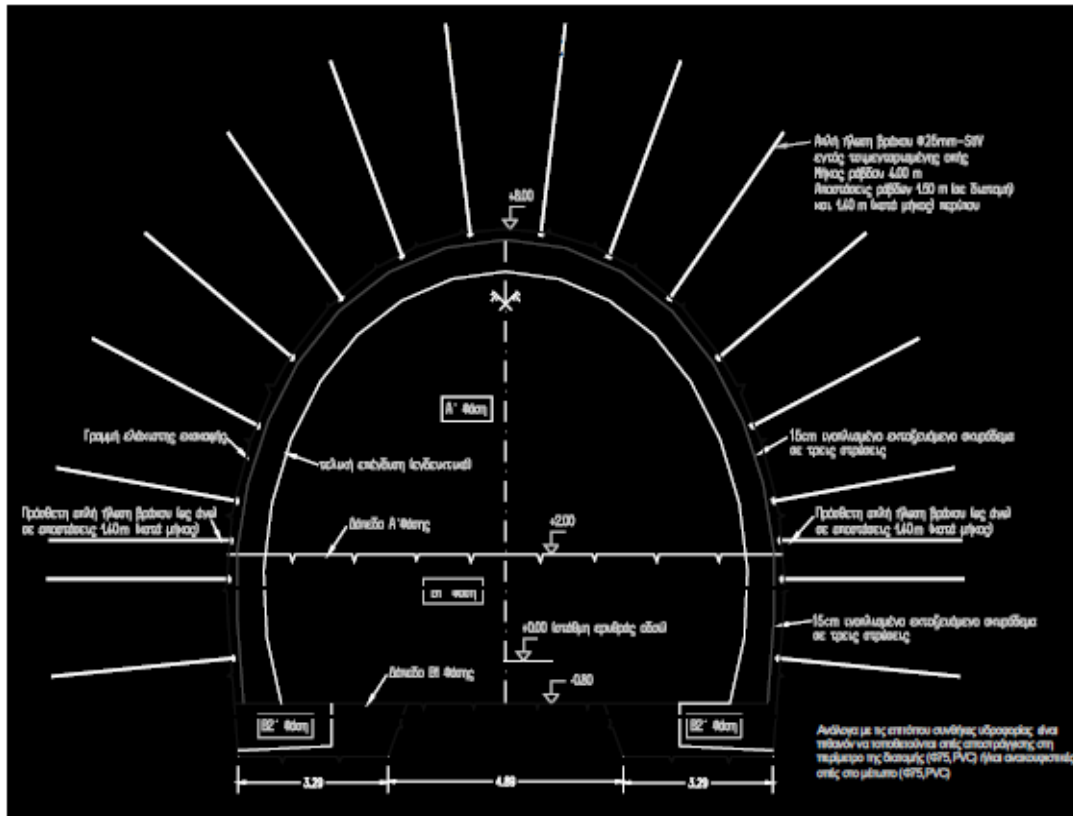
Σχήμα 4.15: Ταξινόμηση βραχόμαζας κατά GSI (Καββαδάς, 2004)

Ορισμένες τυπικές διατομές σχεδιασμού παρουσιάζονται στα Σχήμα 4.16-4.20.

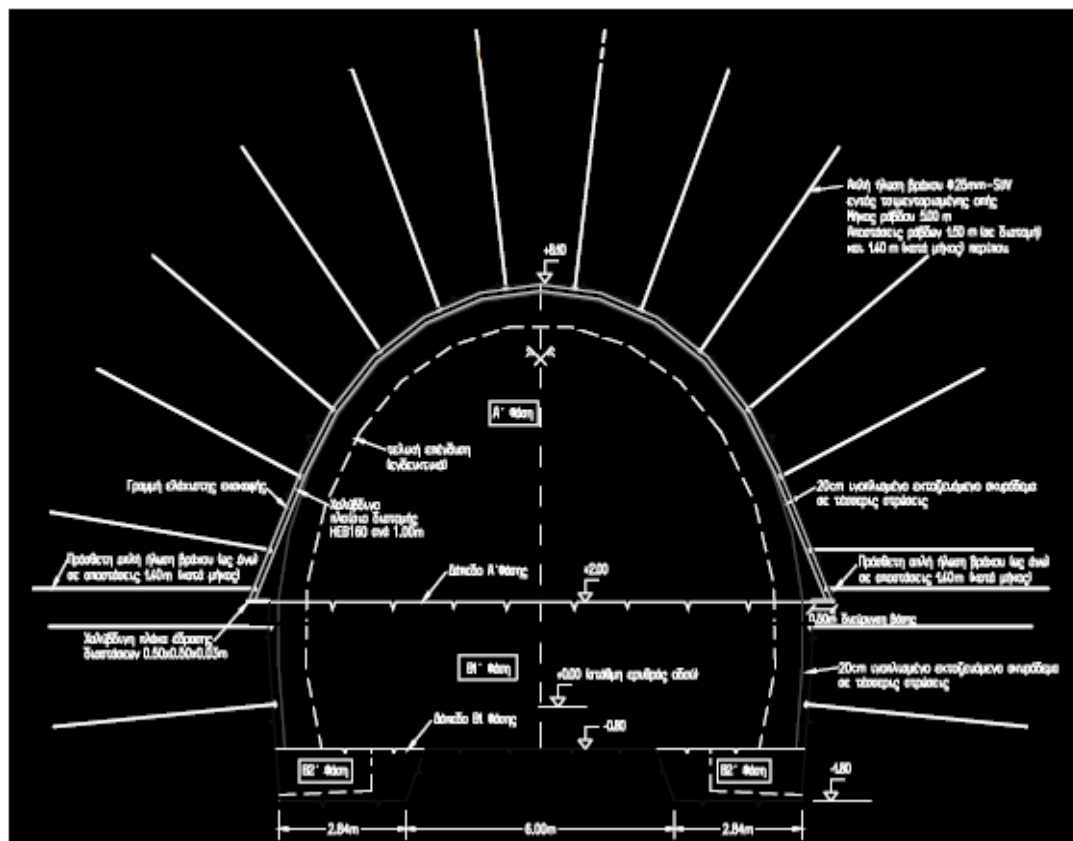
### Παράδειγμα:

Σχήμα 4.16: Τυπικές διατομές σηράγγων (Καββαδάς, 2004)





Σχήμα 4.18: Τυπικές διατομές σχεδιασμού σπιδράγγων με την N.A.T.M. (Καββαδάς, 2004)



Σχήμα 4.19: Τυπικές διατομές σχεδιασμού σιδηράγων με την Ν.Α.Τ.Μ. (Καββαδάς, 2004).





### 4.3.7. Μετρήσεις των μετακινήσεων

#### 4.3.7.1. Μετακινήσεις του τοιχώματος της σήραγγας

1. **Τοπογραφική αποτύπωση της μετακίνησης σε τρεις άξονες (3-D convergency).** Αμέσως μετά την εκσκαφή της σήραγγας τοποθετούνται στο τοίχωμα (με κατάλληλα βλήτρα) οπτικοί ανακλαστήρες (reflex targets). Οι συντεταγμένες στο χώρο των ανακλαστήρων μετρούνται σε τακτά διαστήματα με τοπογραφικό όργανο (total station). Με τον τρόπο αυτό μπορεί να παρακολουθείται η χρονική εξέλιξη της μετακίνησης ενός σημείου του τοιχώματος της σήραγγας ή η σχετική απόσταση μεταξύ δυο σημείων του τοιχώματος. Η ακρίβεια των μετρήσεων εξαρτάται από την απόσταση σκόπευσης, την ακρίβεια του οργάνου αλλά και άλλους παράγοντες όπως η θερμοκρασία του αέρα και η παρουσία καυσαερίων στη σήραγγα. Η συνήθης ακρίβεια τέτοιων μετρήσεων είναι 2-4mm.
2. **Χωροσταθμική υψομετρική αποτύπωση (levelling).** Με τοπογραφικό όργανο (χωροβάτη) μετράται το υψόμετρο στόχων που τοποθετούνται στο δάπεδο και τις παρειές της σήραγγας. Η συνήθης ακρίβεια των μετρήσεων αυτών είναι 1-2mm.
3. **Μέτρηση της απόστασης μεταξύ δυο σημείων στο τοίχωμα της σήραγγας με μεταλλική μεροταινία (tape extensometer).** Η ακρίβεια των μετρήσεων είναι της τάξεως του 0.5mm.

#### 4.3.7.2. Μετακινήσεις της βραχόμαζας

1. **Εκτασιόμετρα ράβδου τοποθετούμενα εντός γεωτρήσεων (multi-point rod extensometers).** Εντός γεώτρησης τοποθετούνται μεταλλικές ράβδοι των οποίων το ένα άκρο πακτώνεται εντός της γεώτρησης (με κάποιο σύστημα αγκύρωσης) και το άλλο άκρο προεξέχει ελαφρώς από το στόμιο της γεώτρησης. Στην ίδια γεώτρηση μπορούν να τοποθετηθούν περισσότερες της μιας ράβδοι που πακτώνονται σε διάφορα βάθη. Με το όργανο αυτό μετράται η σχετική μετακίνηση του σημείου πακτώσεως της ράβδου ως προς το στόμιο της γεώτρησης (δηλαδή ως προς το τοίχωμα της σήραγγας, εφόσον οι γεωτρήσεις γίνονται από το εσωτερικό της σήραγγας).
2. **Μαγνητικά εκτασιόμετρα τοποθετούμενα εντός γεωτρήσεων (magnetic probe extensometers).** Εντός γεώτρησης τοποθετείται πλαστικός σωλήνας ο οποίος φέρει μεταλλικούς δακτυλίους σε τακτά διαστήματα (π.χ. ανά 0.50m). Ο σωλήνας πακτώνεται εντός της γεωτρήσεως με τσιμεντένεμα. Κατά τη μέτρηση, εισάγεται στο σωλήνα μια βολίδα η οποία με μαγνητική μέθοδο μετρά την απόσταση μεταξύ των δακτυλίων. Η σχετική μετακίνηση των

δακτυλίων δίνει την παραμόρφωση της βραχόμαζας αφού οι δακτύλιοι παρακολουθούν τη μετακίνηση της βραχόμαζας.

3. **Ολισθαίνοντα εκτασιόμετρα (sliding micrometer).** Εντός γεώτρησης τοποθετείται ειδικός πλαστικός σωλήνας ο οποίος σε τακτά διαστήματα φέρει μεταλλικούς δακτυλίους κατάλληλου σχήματος (measuring marks). Ο σωλήνας πακτώνεται εντός της γεώτρησης με τσιμεντένεμα. Κατά τη μέτρηση εισάγεται στο σωλήνα μεταλλικό στέλεχος που ολισθαίνει κατά μήκος του σωλήνα και σταματά (κλειδώνει) στις θέσεις των μεταλλικών δακτυλίων. Με τον τρόπο αυτό μετράται η σχετική απόσταση μεταξύ των δακτυλίων με μεγάλη ακρίβεια (της τάξεως του 0.01mm). Η σχετική μετακίνηση των δακτυλίων δίνει την παραμόρφωση της βραχόμαζας αφού οι δακτύλιοι παρακολουθούν τη μετακίνηση της βραχόμαζας.
4. **Αποκλισιόμετρα (inclinometers).** Εντός γεώτρησης τοποθετείται (και πακτώνεται με τσιμεντένεμα) ειδικός πλαστικός σωλήνας. Κατά τη μέτρηση εισάγεται εντός του σωλήνα ειδική βολίδα η οποία εφαρμόζει ακριβώς και ολισθαίνει κατά μήκος του σωλήνα. Η βολίδα διαθέτει ένα ηλεκτρονικό σύστημα (ηλεκτρονικό εκκρεμές) με το οποίο καταγράφεται η απόκλιση από την κατακόρυφο της βολίδας σε κάθε θέση. Με ολοκλήρωση των αποκλίσεων μπορεί να υπολογισθεί η μετακίνηση του σωλήνα σε διεύθυνση εγκάρσια προς τον άξονά του. Τα αποκλισιόμετρα συνήθως τοποθετούνται από την επιφάνεια του εδάφους σε κατακόρυφη διεύθυνση και μετρώνται οι οριζόντιες αποκλίσεις του σωλήνα με την πάροδο του χρόνου.

#### 4.3.7.3. Μετακινήσεις (βυθίσεις) της επιφάνειας του εδάφους

Οι βυθίσεις (καθιζήσεις) της επιφάνειας του εδάφους λόγω της κατασκευής υπογείων έργων μπορούν να μετρηθούν με τα εξής όργανα:

1. Με χωροσταθμική υψομετρική αποτύπωση (levelling) με χρήση χωροβάτη.
2. Με οριζοντίως διατεταγμένα αποκλισιόμετρα (electro-levels). Με τα όργανα αυτά μετράται η απόκλιση από την οριζόντια διεύθυνση σε διάφορα σημεία μιας πρακτικώς οριζόντιας γραμμής (π.χ. κατά μήκος του δαπέδου ενός κτιρίου). Με ολοκλήρωση των αποκλίσεων μπορεί να υπολογισθούν οι βυθίσεις των σημείων της αρχικώς οριζόντιας γραμμής.
3. Με όργανα μέτρησης του ανοίγματος ρωγμών (crack meters). Τέτοια όργανα τοποθετούνται π.χ. στη μεσοτοιχία γειτονικών κτιρίων με σκοπό να μετρηθεί η σχετική απομάκρυνσή τους.

#### 4.3.7.4. Μετρήσεις των πιέσεων

1. Οι εδαφικές πιέσεις στην επένδυση της σήραγγας μπορούν να μετρηθούν με κύτταρα πίεσεως (pressure cells) που τοποθετούνται στη διεπιφάνεια κατά την κατασκευή της επένδυσης.

2. Οι υδατικές πιέσεις στο έδαφος γύρω από μια σήραγγα μπορούν να μετρηθούν με πιεζόμετρα. Τα πιεζόμετρα είναι διαφόρων τύπων: υδραυλικά (stand-pipe), ηλεκτρικά (vibrating wire, strain gauge) ή πνευματικά (pneumatic).

### 4.3.7.5. Μετρήσεις δυνάμεων

Φορτία εφελκυσμένων ή θλιβόμενων στοιχείων (π.χ. αγκύρια, χαλύβδινα πλαίσια κλπ) μπορούν να μετρηθούν με την τοποθέτηση ηλεκτρομηκυνσιομέτρων (strain gauges) ή μετρητών φορτίου (load cells) κατά την κατασκευή των φορτιζόμενων στοιχείων. Στην περίπτωση που είναι επιθυμητή η μέτρηση του φορτίου σε ένα φορτιζόμενο στοιχείο στο οποίο δεν έχει τοποθετηθεί εκ των προτέρων σύστημα μέτρησης, η συνηθέστερη μέθοδος είναι η μέθοδος της αποφόρτισης με δειγματοληψία (overcoring). Κατά τη μέθοδο αυτή ανοίγεται μια μικρή οπή στο φορτιζόμενο στοιχείο, τοποθετείται ένα σύστημα τριών ηλεκτρομηκυνσιομέτρων τα οποία στη συνέχεια πακτώνονται εντός της οπής με εποξειδική ρητίνη. Στη συνέχεια αφαιρείται ένα αρκετά μεγάλο τμήμα του φορτιζόμενου στοιχείου που περιλαμβάνει και τα ηλεκτρομηκυνσιόμετρα. Κατά την αφαίρεση (overcoring) το στοιχείο αποφορτίζεται και τα ηλεκτρομηκυνσιόμετρα φορτίζονται με φορτίο ίσο και αντίθετο με το φορτίο του στοιχείου πριν αφαιρεθεί.

### 4.3.7.6. Μετρήσεις παροχών

Η μέτρηση υδατικών παροχών εντός της σήραγγας γίνεται με παροχόμετρα ή με σύστημα ελεγχόμενης υπερχειλίσης.

Κατά τη διάνοιξη και υποστήριξη σιηράγγων συνήθως μετρούνται τα εξής:

1. Μετακινήσεις: του τοιχώματος της σήραγγας, της βραχομάζας που περιβάλλει τη σήραγγα και της επιφάνειας του εδάφους.
2. Πιέσεις: της βραχομάζας στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, υδατικές πιέσεις στο έδαφος που περιβάλλει τη σήραγγα.
3. Δυνάμεις: εφελκυσμός στα αγκύρια, θλίψη/κάμψη στα χαλύβδινα πλαίσια.
4. Παροχή διηθήσεων υπογείων υδάτων.

### 4.3.8. Πλεονεκτήματα της NATM σε σχέση με τις εναλλακτικές μεθόδους

- Προσαρμόζεται εύκολα σε μεταβαλλόμενες γεωτεχνικές συνθήκες. Συνεπώς δύσκολα αποτυγχάνει ακόμη και σε περιπτώσεις όπου οι παραδοχές της μελέτης διαφέρουν σημαντικά από τις επιτόπου συνθήκες.
- Πλεονεκτεί σε περιπτώσεις έντονα διογκούμενων εδαφών όπου η μηχανική διάνοιξη (TBM) μπορεί να αποτύχει πλήρως.
- Προσαρμόζεται εύκολα σε μεταβολές της γεωμετρίας της διατομής (π.χ. διευρύνσεις της διατομής).
- Πλεονεκτεί σε διατομές μεγάλου μεγέθους (πολλαπλές φάσεις).
- Μπορεί να εφαρμοσθεί στη διάνοιξη μή-κυκλικών διατομών.
- Επιτρέπει ευκολότερη στεγάνωση της σήραγγας με συνθετική μεμβράνη (που τοποθετείται μεταξύ της άμεσης και της τελικής επένδυσης).
- Περιλαμβάνει μηχανικό εξοπλισμό σχετικά μικρού κόστους και συνεπώς πλεονεκτεί οικονομικά σε σήραγγες μικρού μήκους.
- Δεν απαιτεί μεγάλη αρχική οικονομική επένδυση, αλλά έχει υψηλό κόστος προσωπικού διαδικασίας τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης, πύκνωση ή αραίωση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης, τροποποίηση του πάχους του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, τροποποίηση του μήκους των αγκυρίων, προσθήκη αγκυρίων σε χαρακτηριστικές θέσεις κλπ). Η παρακολούθηση της συμπεριφοράς της σήραγγας γίνεται μέσω συστηματικών μετρήσεων και κατάλληλης αξιολόγησής των.

## 5. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΝΑΤΜ ΜΕ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ

### 5.1. Γενικά

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων εμφανίστηκε το 1943 σε μια μαθηματική μελέτη που εκπονήθηκε από τον Courant (Desai and Abel, 1972).

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων ανήκει στην κατηγορία των αριθμητικών μεθόδων της υπολογιστικής μηχανικής για την προσομοίωση φυσικών προβλημάτων. Αναπτύχθηκε στην δεκαετία του 50 (Argyris and Kelsey, 1960).

Αναπτύχθηκε πολύ με την πάροδο των χρόνων ακόμα μέχρι και σήμερα παράλληλα με την εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Ο ρυθμός ανάπτυξης της μεθόδου ήταν πολύ πιο γρήγορος από τις άλλες αριθμητικές μεθόδους και γρήγορα αποδείχθηκε εφαρμόσιμη σε ένα ευρύτατο πεδίο προβλημάτων. Η τρομακτική ανάπτυξη της τεχνολογίας των υπολογιστικών συστημάτων την κατέστησε κυρίαρχο εργαλείο στα χέρια των μηχανικών την τελευταία δεκαετία. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι να υπάρχει αυτή τη στιγμή στο εμπόριο ένας πολύ μεγάλος αριθμός προγραμμάτων (software) τα οποία λύνουν προβλήματα με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

### 5.2. Βασική αρχή της μεθόδου

Στις Μεθόδους των Πεπερασμένων Στοιχείων (ΜΠΣ), ο υπό μελέτη χώρος (domain) διαιρείται σε επιμέρους τμήματα (πεπερασμένα στοιχεία). Ο αριθμός των διαστάσεων των στοιχείων αυτών είναι συνήθως αντίστοιχος με τον αριθμό των διαστάσεων του υπό μελέτη χώρου (Αγιουτάντης, 2002).

Το κάθε στοιχείο αποτελείται από κόμβους κι ένα στοιχείο μπορεί να έχει περισσότερους από τους ελάχιστους κόμβους. (Πίνακας 5.1). Η συμπεριφορά του κάθε τμήματος περιγράφεται μέσα από διαφορικές εξισώσεις. Εξασφαλίζοντας τις απαιτήσεις συνέχειας και ισορροπίας μεταξύ των στοιχείων αυτών, μπορεί να ληφθεί μια μοναδική λύση από το γραμμικό σύστημα των αλγεβρικών εξισώσεων (Αγιουτάντης, 2002 ).

Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικοί τύποι στοιχείων (Αγιουτάντης, 2002)

Διάσταση Στοιχείου	Τύπος στοιχείου	Ελάχιστος αριθμός κόμβων	Εναλλακτικοί αριθμοί κόμβων
1	Ράβδος	2	3,4,...
2	Τρίγωνο	3	6,...
2	Τετράπλευρο	4	5,6,8,9,...
3	Πυραμίδα	4	10,...
3	Τριγωνικό πρίσμα	6	13,15,...



Οι ΜΠΣ ανήκουν στις διαφορικές μεθόδους και περιλαμβάνουν τη μέθοδο κατά Ritz, τη μέθοδο των σταθμισμένων υπολοίπων, τη μέθοδο ελαχιστοποίησης συναρτησοειδών μιας συνάρτησης. Οι άγνωστες ποσότητες υπολογίζονται στους κόμβους του καννάβου των πεπερασμένων στοιχείων και μέσω γραμμικών ή μη γραμμικών συναρτήσεων παρεμβολής υπολογίζονται στα υπόλοιπα σημεία του μέσου (Αγιουτάντης, 2002 )

Η εφαρμογή της ΜΠΣ σε προβλήματα ελαστικότητας (ή γενικότερα παραμόρφωσης των υλικών) σε δύο ή τρεις διαστάσεις περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια, (Desai, 1979):

- Διαίρεση του πεδίου το οποίο εξετάζεται σε κατάλληλα στοιχεία. Η διαίρεση πεδίων με ακανόνιστη γεωμετρία γίνεται προσεγγιστικά με μικρά ευθύγραμμα τμήματα .
- Επιλογή των κατάλληλων συναρτήσεων για την κατανομή των άγνωστων μεταβλητών σε κάθε στοιχείο.
- Προσδιορισμό των συναρτήσεων που συνδέουν την ανηγμένη παραμόρφωση με την 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).
- Υπέρθεση (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.

Όπως φαίνεται η ΜΠΣ αποτελεί βασικά μια αριθμητική μέθοδο επίλυσης διαφορικών εξισώσεων με συγκεκριμένο γεωμετρικό τόπο εφαρμογής, στον οποίο τίθενται και οι συνοριακές συνθήκες. (Αγιουτάντης, 2002).

### 5.3. Φιλοσοφία μεθόδου

Η επίλυση προβλημάτων με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων πραγματοποιείται με γνώμονα τα ακόλουθα (Αγιουτάντης, 2002):

- Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί μια βασική αριθμητική μέθοδο επίλυσης διαφορικών εξισώσεων σε συγκεκριμένο πεδίο ορισμού και με συγκεκριμένους περιορισμούς.

- Το πεδίο ορισμού (domain) των εξισώσεων αυτών απαιτεί κυρίως συνεχή μέσα. Όταν υπάρχει ανάγκη να συμπεριληφθούν ασυνέχειες στην περιγραφή του μέσου, τότε χρησιμοποιούνται ειδικά στοιχεία ασυνεχειών, τα οποία εξασφαλίζουν μεν μια μαθηματική συνέχεια με το υπόλοιπο μέσο, αλλά χαρακτηρίζονται από μια χαλαρότητα σε σχέση με τα συνήθη στοιχεία.
- Στην περίπτωση επίλυσης προβλημάτων μηχανικής, μεταφοράς θερμότητας, κίνησης ρευστών σε πορώδη μέσα, κλπ, είναι δυνατό να δοθεί μια γεωμετρική περιγραφή της διαφορικής εξίσωσης που περιγράφει το πρόβλημα και επομένως είναι εύκολη η κατανόηση της λειτουργίας της μεθόδου. Η επίλυση γενικευμένων διαφορικών εξισώσεων ξεφεύγει από το αντικείμενο αυτής της ενότητας.
- Η καταστατική εξίσωση της συμπεριφοράς του υλικού, η οποία επιλύεται στο συγκεκριμένο μέσο, συνδέει ουσιαστικά το αίτιο (π.χ. δύναμη, τάση) με το αποτέλεσμα (π.χ. μετατόπιση) που αποτελεί και το άγνωστο μέγεθος.

### 5.4. Διαίρεση του πεδίου

#### 5.4.1. Είδη στοιχείων

Απαραίτητο στοιχείο για την εφαρμογή της ΜΠΣ είναι η διακριτοποίηση του μέσου σε στοιχεία ή τμήματα (elements) με τη βοήθεια ιδεατών γραμμών ή επιφανειών. Τα στοιχεία αυτά αποτελούνται από δύο ή περισσότερους κόμβους, οι οποίοι συνδέονται με ευθύγραμμο ή καμπύλο τμήματα. Οι κορυφές των στοιχείων ορίζουν τους κόμβους (nodes) του πλέγματος ή κανάββου διακριτοποίησης του προβλήματος (Αγιουτάντης, 2002).

Χαρακτηριστικές μορφές στοιχείων είναι τα μονοδιάστατα ή γραμμικά, τα τριγωνικά και ορθογωνικά ή γενικότερα τετραπλευρικά (quadrilateral) σε δύο διαστάσεις και τα πυραμιδοειδή και πρισματικά (τρισδιάστατα). Οι απλούστερες μορφές στοιχείων είναι αυτές που χαρακτηρίζονται από το ότι ο αριθμός των κόμβων του στοιχείου είναι ίσος με τον αριθμό των πλευρών, όπως για παράδειγμα τριγωνικά και τρικομβικά στοιχεία, τετραπλευρικά και τετρακομβικά (στερεά) στοιχεία, κλπ. Υπάρχουν, όμως, και περιπτώσεις όπου υπάρχουν παραπάνω κόμβοι που περιγράφουν ένα στοιχείο, όπως τριγωνικά και εξακομβικά στοιχεία, τετραπλευρικά και οκτακομβικά (επίπεδα) στοιχεία, κλπ (Αγιουτάντης, 2002).

#### 5.4.2. Χαρακτηριστικά της διαίρεσης του πεδίου

Η επιτυχής προσομοίωση της συμπεριφοράς ενός σώματος με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων είναι η κατάλληλη διαίρεση του σώματος (πεδίου) σε επιμέρους σώματα (στοιχεία). Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει τις ακόλουθες παραμέτρους (Αγιουτάντης, 2002):

- Την επιλογή της γεωμετρικής μορφής του στοιχείου.

- Την επιλογή του αριθμού κόμβων του στοιχείου και κατ' επέκταση των βαθμών ελευθερίας κάθε στοιχείου.
- Την επιλογή των συναρτήσεων μορφής κάθε στοιχείου .
- Την επιλογή της πυκνότητας του καννάβου.

Η επιλογή των συναρτήσεων που εκφράζουν την κατανομή των αγνώστων μεταβλητών (π.χ. μετατοπίσεων) σε κάθε στοιχείο συναρτήσει των τιμών των μεταβλητών στους κόμβους, συνδέεται άμεσα με την επιθυμητή ακρίβεια στους υπολογισμούς, αλλά και με τον χρόνο επίλυσης του προβλήματος. Η διαίρεση του πεδίου γίνεται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε το μέγεθος των στοιχείων να είναι μικρό στα σημεία όπου απαιτείται μεγάλη ακρίβεια στους υπολογισμούς, ή εκεί που αναμένεται έντονη μεταβολή του ζητούμενου μεγέθους, ενώ το μέγεθος των στοιχείων είναι μεγαλύτερο στις υπόλοιπες περιοχές του πεδίου (Αγιουτάντης, 2002).

### 5.5. Σήραγγες σε μαλακά εδάφη

Στις κατασκευές σηράγγων είναι πολύ σημαντική η κατανόηση της αλληλεπίδρασης της υποστήριξης του ανοίγματος με το περιβάλλον έδαφος. Κατά την διαδικασία της διάνοιξης, το εντατικό πεδίο στο έδαφος διαταράσσεται αρκετά μέτρα εμπρός από το μέτωπο, ενώ ταυτόχρονα η υποστήριξη στις περισσότερες περιπτώσεις αναλαμβάνει μικρό μέρος του επιφερόμενου εντατικού πεδίου. Έτσι το μεγαλύτερο μέρος των τάσεων αναδιανέμεται στις παρειές της εκσκαφής και επομένως η πραγματική συμπεριφορά του εδάφους στο μέτωπο της εκσκαφής, κατά τα στάδια εκσκαφής και τοποθέτησης της υποστήριξης, είναι μια αρκετά πολύπλοκη διεργασία (Αγιουτάντης, 2002).

Η μοντελοποίηση και προσομοίωση των διαδικασιών αυτών είναι μία αρκετά πολύπλοκη διαδικασία που απαιτεί πολύ προσπάθεια και κόπο (Youakim et al., 1999).

Σε μαλακά εδάφη, ο καθοριστικός παράγοντας ευστάθειας του ανοίγματος είναι η μεγάλου μέτρου ελαστικότητας υποστήριξη. Για την αντιμετώπιση τέτοιων προβλημάτων, χρησιμοποιείται η κλασσική θεωρία ανάλυσης σε επίπεδη κατάσταση. Σύμφωνα με τον Duddeck (1988), τέσσερα τέτοια μοντέλα χρησιμοποιούνται σήμερα για τον προσεγγιστικό σχεδιασμό υπογείων ανοιγμάτων με βάση τα στοιχεία για το βάθος που βρίσκεται το άνοιγμα και τη συσχέτιση μέτρου ακαμψίας εδάφους και υποστήριξης, το σχεδιαστικό μοντέλο μπορεί να λάβει είτε τη μορφή στρωσιγενούς δοκού (partially bedded beam), είτε τη μορφή ενός δακτυλίου υποστήριξης σε επίπεδο συνεχές μέσο με ολόκληρο ή μειωμένο φορτίο στέψης, είτε ενός δακτυλίου που υπόκειται σε φορτία που προσδιορίζονται εμπειρικά. Τα μοντέλα αυτά είχαν προταθεί πριν την εισαγωγή των αριθμητικών μεθόδων, και λόγω της ύπαρξης αναλυτικής λύσης για τα κυκλικά ανοίγματα (Αγιουτάντης, 2002).

Μετά την επεξεργασία των παραπάνω μετρήσεων, έγινε επιτακτική η ανάγκη χρήσης ποιο πολύπλοκων λύσεων. Με τη χρήση των αριθμητικών μεθόδων είναι δυνατή η ενσωμάτωση στην ανάλυση διαφορετικών κριτηρίων αστοχίας ανάλογα με τον τύπο του υλικού. Εξειδικευμένες αριθμητικές μέθοδοι είναι ιδιαίτερα χρήσιμες στην ανάλυση περίπλοκων συσχετισμών μεταξύ εδάφους και υποστήριξης, όπως είναι η περίπτωση βελτίωσης συνοχής εδάφους με εισπίεση ρευστοποιημένων κονιαμάτων (Duddeck, 1988).

### 5.6. Φόρτιση των υλικών και συνοριακές συνθήκες

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

- Επιβολή δυνάμεων πεδίου στη μάζα του στοιχείου
- Επιβολή σημειακών δυνάμεων στους κόμβους του στοιχείου
- Επιβολή κατανεμημένων δυνάμεων στις πλευρές του στοιχείου
- Επιβολή μετατοπίσεων στους κόμβους του στοιχείου

Σε τελική ανάλυση όλες οι δυνάμεις πρέπει να αναλυθούν με κατάλληλο τρόπο σε κομβικές δυνάμεις, καθώς οι κομβικές δυνάμεις είναι αυτές που συμμετέχουν στην επίλυση κάθε προβλήματος.

Η εισαγωγή συνοριακών συνθηκών είναι απαραίτητη για την επίλυση του προβλήματος και συνήθως εκφράζεται με τις συνθήκες ισορροπίας του πεδίου. Η φόρτιση του υλικού αποτελεί επίσης κατά κάποιο τρόπο μια συνοριακή συνθήκη, καθώς, σε αντίθετη περίπτωση, η υπολογιζόμενη παραμόρφωση είναι μηδενική. Στην περίπτωση που φορτιστεί ένα σώμα και όλοι οι κόμβοι του είναι ελεύθεροι να μετακινηθούν, τότε δεν υφίσταται παραμόρφωση, αλλά απλή μετακίνηση (Αγιουτάντης, 2002).

### 5.7. Τύποι συνοριακών συνθηκών

Οι τύποι των συνοριακών συνθηκών που συναντώνται είναι τρεις όπως φαίνεται και από τα προηγούμενα:

- Προσδιορισμός της ζητούμενης παραμέτρου (μετατόπισης). Οι συνθήκες αυτές ονομάζονται και γεωμετρικές και είναι γνωστές και ως συνθήκες Dirichlet.
- Προσδιορισμός της μεταβολής της ζητούμενης παραμέτρου. Οι συνθήκες αυτές ονομάζονται και φυσικές συνοριακές συνθήκες (slope or gradient, natural boundary conditions) και είναι γνωστές και ως συνθήκες Neumann.
- Προσδιορισμός και των δύο παραπάνω παραμέτρων ή μεικτές συνθήκες

Σημειώνεται ότι με την αξιοποίηση της συμμετρίας ενός προβλήματος και την κατάλληλη χρήση συνοριακών συνθηκών είναι δυνατό να μειωθεί σημαντικά ο αριθμός των κόμβων ενός προβλήματος και επομένως να μειωθεί ο χρόνος επίλυσης (Αγιουτάντης, 2002).

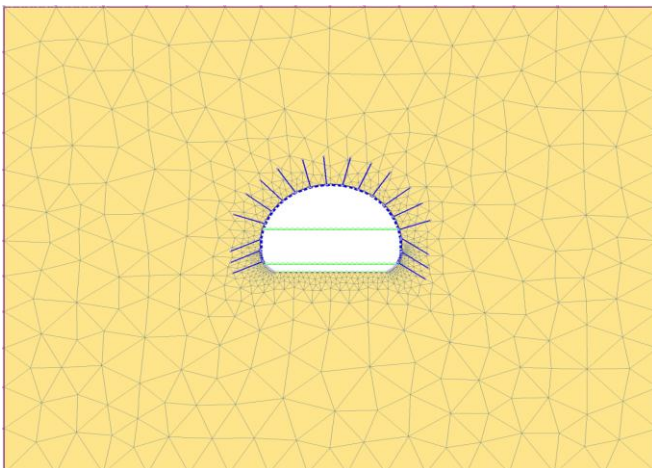
### 5.8. Μοντελοποίηση

#### 5.8.1. Το Phase<sup>2</sup> V.6

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας επιλέχθηκε το λογισμικό πακέτο (πεπερασμένων στοιχείων) phase<sup>2</sup> V.6 της Καναδικής εταιρίας Rocscience. Ο λόγος που επιλέχθηκε το συγκεκριμένο εμπορικό πακέτο είναι ότι μπορεί να και προσεγγίζει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο το θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας δίνοντας σαφή και αξιόπιστα αποτελέσματα όσον αφορά τα το εντατικό πεδίο και τις παραμορφώσεις, είναι εύκολο στην εισαγωγή δεδομένων μπορεί να εξάγει εικόνες κατευθείαν σε μορφή jpg, tiff και bmp, είναι γρηγορότερο κατά την υπολογιστική φάση από τα υπόλοιπα εμπορικά πακέτα, μπορεί και συνεργάζεται και με άλλα πακέτα όπως το Roclab κάνοντας το ακόμα πιο λειτουργικό και εύχρηστο.

#### 5.8.2. Γεωμετρία της διατομής

Η γεωμετρία της διατομής που επιλέχθηκε παραμένει σταθερή σε όλα τα μοντέλα με πλάτος εκσκαφής 13m και το ύψος της συνολικής εκσκαφής να φθάνει τα 9,5 m (Σχήμα 5.1). Η εκσκαφή έγινε συνολικά σε 3 φάσεις καθότι υπάρχουν μαλακοί εδαφικοί σχηματισμοί που το απαιτούν. Τα μοντέλα συνολικά έχουν ύψος 50m εκτείνονται δηλαδή σε βάθος 50m από την επιφάνεια του εδάφους. Έχουν μήκος 60m εκτείνονται δηλαδή 23,5m δεξιά και αριστερά από τα πλάγια όρια της εκσκαφής, απόσταση που μας εξασφαλίζει ότι επιλέγεται το μεγαλύτερο εύρος τιμών των μετατοπίσεων, των τάσεων και των παραμορφώσεων γύρω από το άνοιγμα. Η στέψη της σήραγγας γίνεται σε βάθος 30,1m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.



Σχήμα 5.1: Τυπική γεωμετρία διατομής.



### 5.8.3. Γενικές ρυθμίσεις

Στον πίνακα 5.2 παρουσιάζονται οι γενικές ρυθμίσεις των μοντέλων. Παρουσιάζονται το είδος του εδαφικού σχηματισμού, τα μοντέλα υποστήριξης που αντιστοιχούν σε κάθε εδαφικό σχηματισμό, τον τύπο ανάλυσης, τον τύπο επίλυσης και το είδος των στοιχείων.

Πίνακας 5.2: Γενικές ρυθμίσεις

	τύπος υποστήριξης 1	τύπος υποστήριξης 2	τύπος υποστήριξης 3	τύπος υποστήριξης 4
μάργα	M1	M2	M3	M4
φλύσχος	Φ1	Φ2	Φ3	Φ4
άργιλος	A1	A2	A3	A4
τύπος ανάλυσης: επιπεδη ανηγμένη παραμορφωση				
τύπος επίλυσης: Gaussian elimination				
είδος στοιχείων: 3-κομβικά (3-node)				

Το σύστημα μονάδων που χρησιμοποιείται είναι το μετρικό (metric). Επομένως οι βασικές μονάδες λαμβάνονται ως εξής:

- Μήκος: m
- Δύναμη: MN (Τάση: MPa)

Η διακριτοποίηση των μοντέλων είναι λεπτομερής κοντά στην περιφέρεια των σπράγγων και αραιότερη στα όρια του καννάβου για εξοικονόμηση υπολογιστικού χρόνου. Σε όλα τα μοντέλα χρησιμοποιείται η επιλογή διαβαθμισμένης διακριτοποίησης (graded) ενώ ελέγχεται η ποιότητα δικτύωματος μέσω της επιλογής show mesh quality. Η διαδικασία αυτή διευκολύνει την αναζήτηση φτωχής ποιότητας στοιχείων δικτύωματος (poor quality mesh elements – bad elements) τα οποία λόγω της μορφής τους, είναι δυνατόν να θεωρηθούν υπεύθυνα για πιθανή αδυναμία επίλυσης η εξαγωγή μη αντιπροσωπευτικών αποτελεσμάτων. Σε περίπτωση δε που ανιχνευτούν τέτοιου είδους στοιχεία, τότε με μη αυτόματο τρόπο γίνεται αύξηση της πυκνότητας δικτύωματος της περιοχής στην οποία ανήκει το κάθε ελαττωματικό στοιχείο ξεχωριστά (increase mesh element density) (Κωνσταντάς, 2009).

### 5.8.4. Συνοριακές συνθήκες

Τα όρια του καννάβου εκτείνονται σε επαρκή απόσταση από τις σπράγγες (αριστερά και δεξιά της σπράγγας εκτείνεται σε μήκος ίσο με 6 φορές την διατομή της) ώστε τα αποτελέσματα να μην

επηρεάζονται από τις συνοριακές συνθήκες. Η γεωμετρία του καννάβου παραμένει τύπου Π και επομένως επιλέγεται:

- κύλιση στο κατώτερο οριζόντιο όριο,
- κύλιση στο δεξί και αριστερό όριο του μοντέλου ως προς τον άξονα y.

### 5.8.5. Ιδιότητες των υλικών

Το λογισμικό Phase2 δίνει την δυνατότητα της χρήσης ιδιοτήτων των γεωυλικών απο μια βάση δεδομένων που χρησιμοποιούνται σε κάθε μοντέλο, μέσω της επιλογής properties. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά στα μοντέλα οι ιδιότητες των υλικών (Σχήματα 5.2-5.4)

- Για τους εδαφικούς σχηματισμούς παρατηρείται:

**Define Material Properties**

Material Selection: ☒ marl ☐ flysch ☐ soft clay ☐ Material 4 ☐ Material 5 ☐ Material 6 ☐ Material 7

Name:  Material Colour:

Initial Element Loading:  Unit Weight: (MN/m3):

**Elastic Properties**

Elastic Type:

Young's Modulus (MPa):  Poisson's Ratio:

E1 (MPa):  E2 (MPa):  Ez (MPa):

v12:  v1z:  v2z:

**Strength Parameters**

Failure Criterion:  Material Type:

Tensile Strength (MPa):  Dilation Angle (deg):

Fric. Angle (peak) (deg):  Fric. Angle (resid) (deg):

Cohesion (peak) (MPa):  Cohesion (resid) (MPa):

☐ Stage Properties ☐ Datum Dependent

Unsaturation Shear Strength

Phi b:  Air Entry (MPa):

☐ Show only properties used in model

Σχήμα 5.2: Ιδιότητες Μάργας

The screenshot shows the 'Define Material Properties' dialog box for a material named 'flysch'. The 'Initial Element Loading' is set to 'Field Stress & Body Force' and the 'Unit Weight' is 0.027 MN/m3. Under 'Elastic Properties', the 'Elastic Type' is 'Isotropic', 'Young's Modulus' is 2000 MPa, and 'Poisson's Ratio' is 0.3. The 'Strength Parameters' section shows a 'Failure Criterion' of 'Mohr Coulomb', 'Material Type' of 'Elastic', 'Tensile Strength' of 2 MPa, 'Fric. Angle (peak)' of 36.6 deg, 'Cohesion (peak)' of 0.136 MPa, 'Dilation Angle' of 0 deg, 'Fric. Angle (resid)' of 35 deg, and 'Cohesion (resid)' of 10.5 MPa. The 'Datum Dependent' checkbox is checked. The 'Unsaturated Shear Strength' section has 'Phi b' and 'Air Entry' both set to 0.

Σχήμα 5.3: Ιδιότητες Μαργαικού Φλύσχη.

The screenshot shows the 'Define Material Properties' dialog box for a material named 'soft clay'. The 'Initial Element Loading' is set to 'Field Stress & Body Force' and the 'Unit Weight' is 0.017 MN/m3. Under 'Elastic Properties', the 'Elastic Type' is 'Isotropic', 'Young's Modulus' is 4000 MPa, and 'Poisson's Ratio' is 0.25. The 'Strength Parameters' section shows a 'Failure Criterion' of 'Mohr Coulomb', 'Material Type' of 'Elastic', 'Tensile Strength' of 2 MPa, 'Fric. Angle (peak)' of 21 deg, 'Cohesion (peak)' of 5 MPa, 'Dilation Angle' of 0 deg, 'Fric. Angle (resid)' of 35 deg, and 'Cohesion (resid)' of 10.5 MPa. The 'Datum Dependent' checkbox is checked. The 'Unsaturated Shear Strength' section has 'Phi b' and 'Air Entry' both set to 0.

Σχήμα 5.4: Ιδιότητες στιφρής Αργίλου

- Παραπάνω παρουσιάζονται οι ιδιότητες των εδαφικών υπό μελέτη εδαφικών σχηματισμών. Στα Σχήματα 5.5-5.6 που ακολουθούν παρουσιάζονται οι ιδιότητες των μέτρων υποστήριξης

The screenshot shows the 'Define Liner Properties' dialog box with the 'concrete' material selected. The 'Name' field is 'concrete' and the 'Colour' is orange. The 'Elastic Properties' section has 'Young's Modulus (MPa)' set to 17000 and 'Poisson's Ratio' set to 0.2. The 'Strength Parameters' section has 'Material Type' set to 'Elastic' and values for 'Compressive Strength (peak) (MPa)' (35), 'Compressive Strength (residual) (MPa)' (5), 'Tensile Strength (peak) (MPa)' (5), and 'Tensile Strength (residual) (MPa)' (0). The 'Liner Type' section has 'Beam' selected with 'Formulation' set to 'Timoshenko'. The 'Geometry' section has 'Thickness (m)' set to 0.2, 'Area (m2)' set to 0.1, and 'Moment of Inertia (m4)' set to 8.3e-005. The 'Include Unit Weight in Analysis' checkbox is unchecked, and 'Unit Weight: (MN/m3)' is set to 0.02. The 'Sliding Gap' section has 'Strain at Locking' set to 50%. The 'Stage Liner Properties' checkbox is unchecked, and the 'Define Factors...' button is visible. The 'Copy To...' button and 'Show only properties used in model' checkbox are at the bottom left. The 'OK' and 'Cancel' buttons are at the bottom right.

Σχήμα 5.5: Ιδιότητες σκυροδέματος

The screenshot shows the 'Define Liner Properties' dialog box with the 'lattice girder' material selected. The 'Name' field is 'lattice girder' and the 'Colour' is purple. The 'Elastic Properties' section has 'Young's Modulus (MPa)' set to 210000 and 'Poisson's Ratio' set to 0.3. The 'Strength Parameters' section has 'Material Type' set to 'Elastic' and values for 'Compressive Strength (peak) (MPa)' (35), 'Compressive Strength (residual) (MPa)' (5), 'Tensile Strength (peak) (MPa)' (5), and 'Tensile Strength (residual) (MPa)' (0). The 'Liner Type' section has 'Beam' selected with 'Formulation' set to 'Timoshenko'. The 'Geometry' section has 'Thickness (m)' set to 0.1, 'Area (m2)' set to 0.1, and 'Moment of Inertia (m4)' set to 8.3e-005. The 'Include Unit Weight in Analysis' checkbox is unchecked, and 'Unit Weight: (MN/m3)' is set to 0.02. The 'Sliding Gap' section has 'Strain at Locking' set to 50%. The 'Stage Liner Properties' checkbox is unchecked, and the 'Define Factors...' button is visible. The 'Copy To...' button and 'Show only properties used in model' checkbox are at the bottom left. The 'OK' and 'Cancel' buttons are at the bottom right.

Σχήμα 5.6: Ιδιότητες Lattice girders

- Στο Σχήμα 5.7 παρουσιάζονται οι ιδιότητες των αγκυρίων.

Σχήμα 5.7: Ιδιότητες Αγκυρίων.

Στον Πίνακα 5.3 παρουσιάζονται συνοπτικά οι παράμετροι των ιδιοτήτων των 4 μοντέλων υποστήριξης.

Πίνακας 5.3: Παράμετροι των μοντέλων

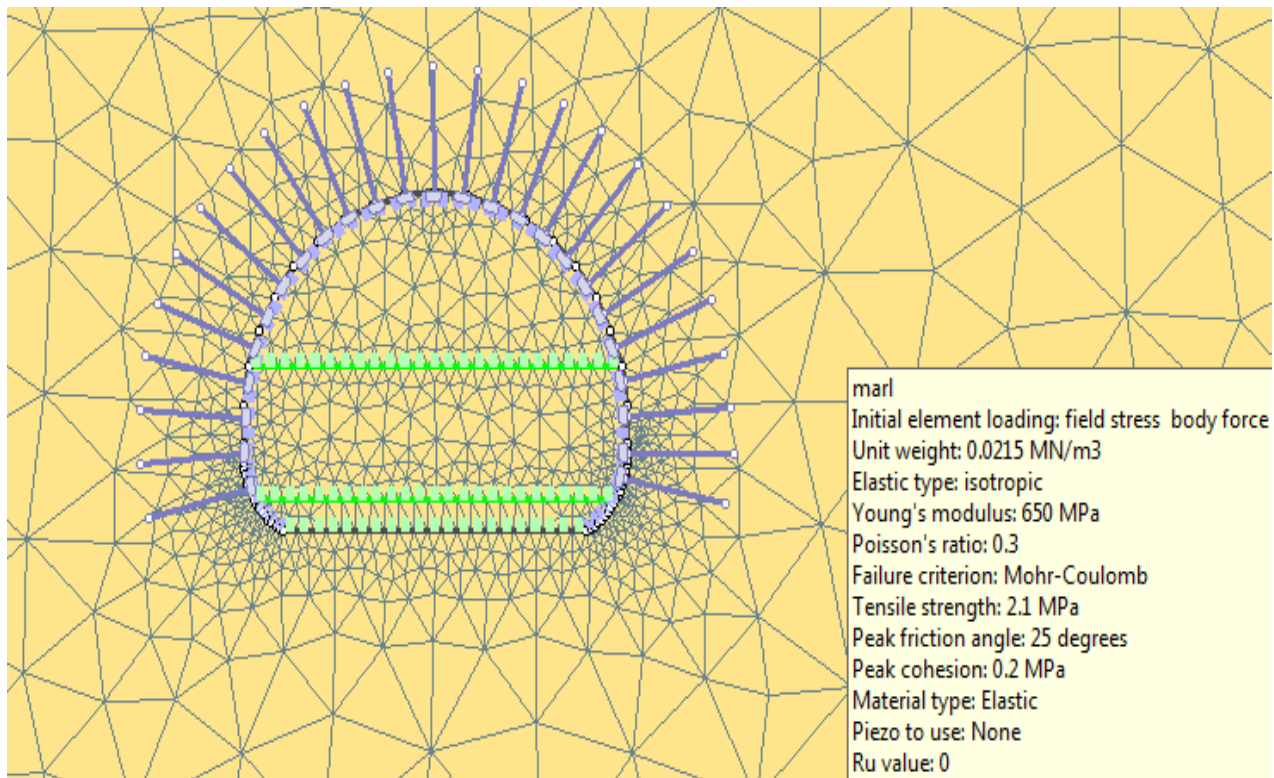
	MONTELO 1	MONTELO 2	MONTELO 3	MONTELO 4
Πάχος σκυροδέματος	0,2 m	0,35 m	0,35 m	0,2 m
Πυκνότητα κοχλίωσης	Ανά 2 m	Ανά 1 m	Ανά 2 m	Ανά 1 m
Συρματόπλεγμα	Αμετάβλητο	Αμετάβλητο	Αμετάβλητο	Αμετάβλητο

## 5.8.6. Υπολογιστικές φάσεις

Στα Σχήματα 5.8-5.14 αναλύονται οι υπολογιστικές φάσεις των μοντέλων. Επειδή ο τρόπος φόρτισης των μοντέλων είναι πανομοιότυπος οι υπολογιστικές φάσεις θα αναλυθούν για ένα μόνο μοντέλο ενός σχηματισμού.

- Υπολογιστική φάση 1-Αρχικό εντατικό πεδίο

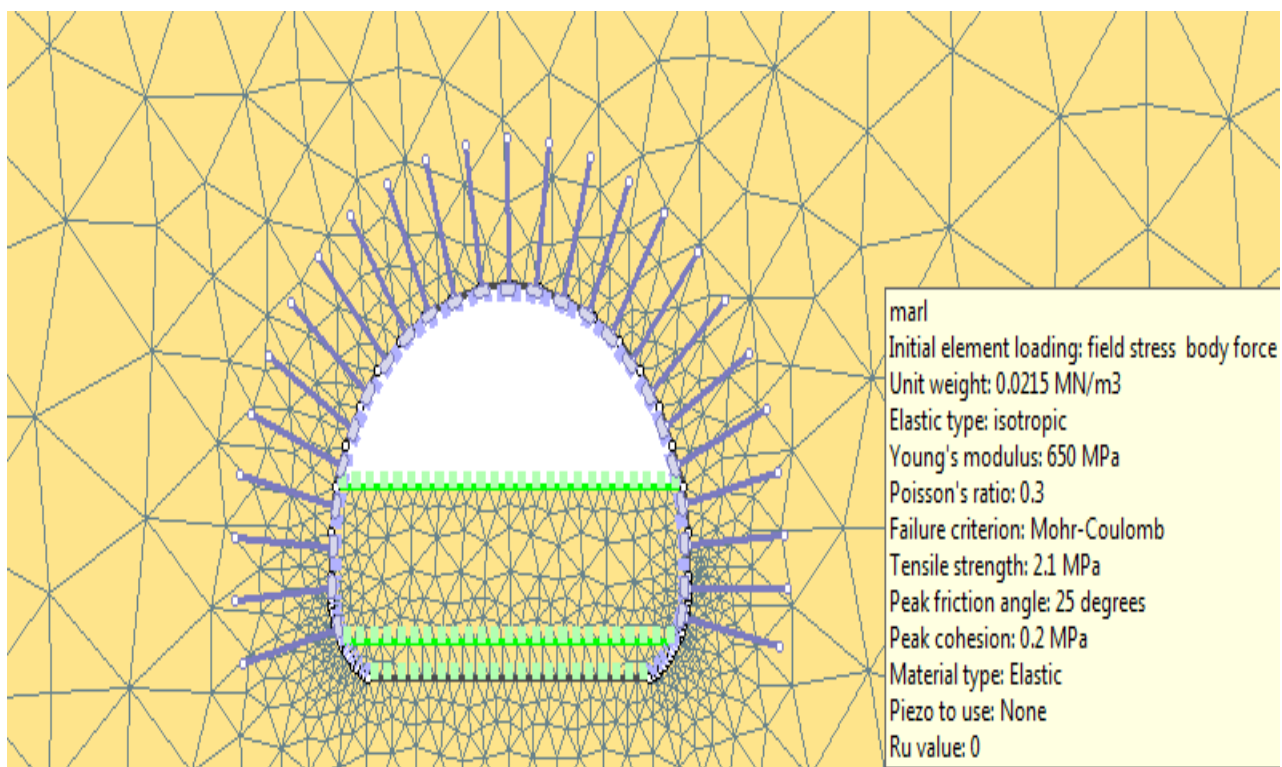




Σχήμα 5.8: Αρχικό εντατικό πεδίο

Στην πρώτη φάση παρουσιάζεται το αδιατάρακτο εντατικό πεδίο πριν την εκσκαφή.

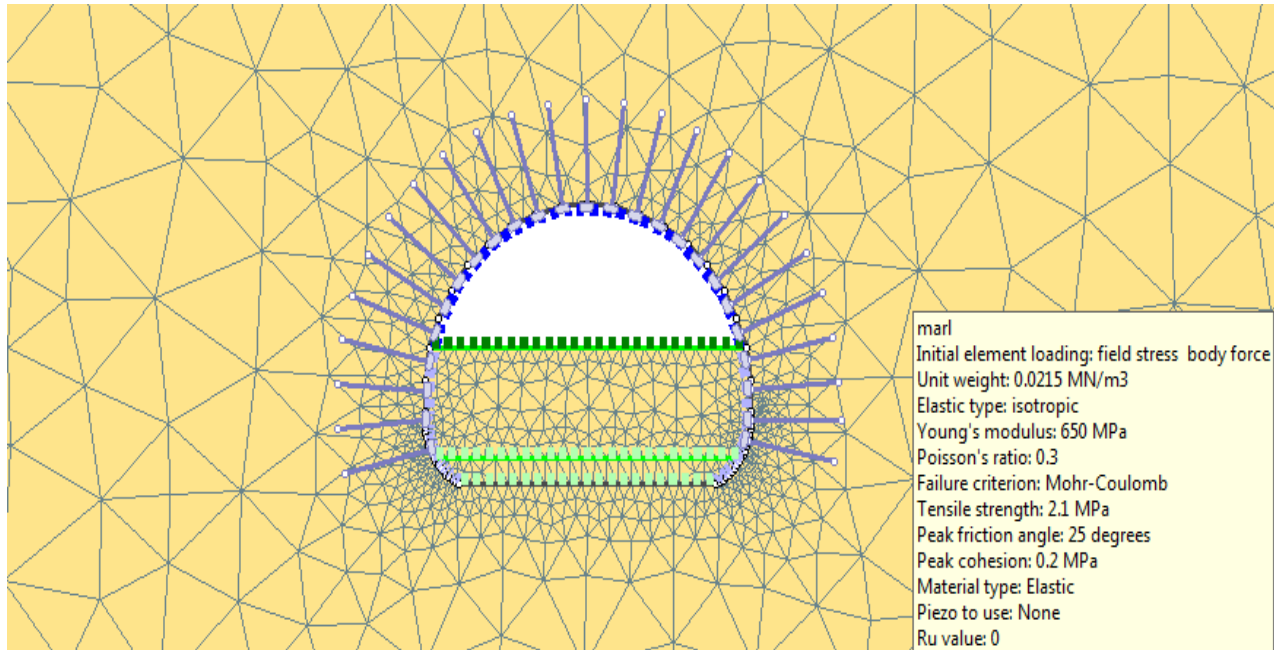
- Υπολογιστική φάση 2- Φάση εκσκαφής 1.



Σχήμα 5.9: Αρχική φάση εκσκαφής.

Κατά την πρώτη φάση εκσκαφής παρουσιάζεται το ανυποστήρικτο πέτρωμα τα πρώτης φάσης να αλληλεπιδρά με το γύρω εδαφικό σχηματισμό.

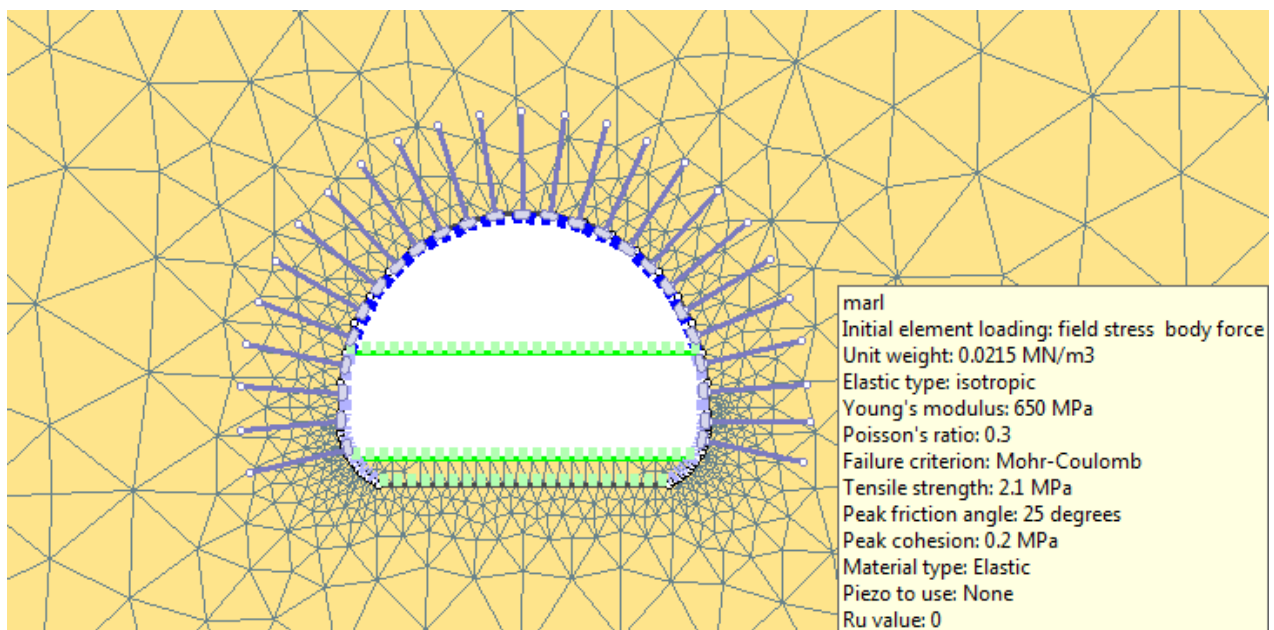
- Υπολογιστική φάση 3- Υποστήριξη αρχικής φάσης εκσκαφής.



Σχήμα 5.10: Υποστήριξη αρχικής φάσης

Στην φάση αυτή παρουσιάζεται η υποστήριξη της αρχικής φάσης εκσκαφής.

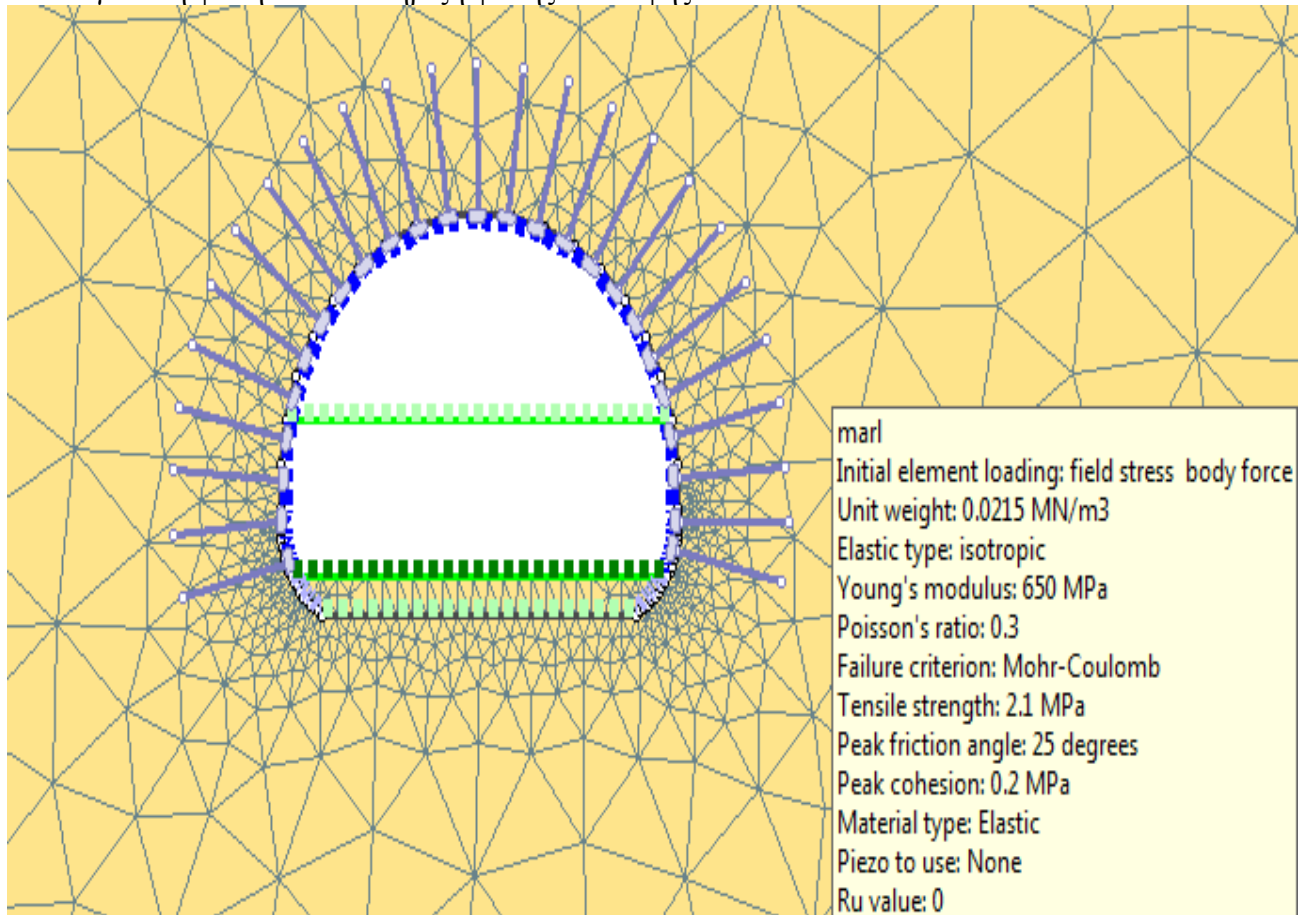
- Υπολογιστική φάση 4 – Φάση εκσκαφής 2.



Σχήμα 5.11: Φάση εκσκαφής 2.

Κατά την δεύτερη φάση της εκσκαφής παρουσιάζεται η εκσκαφή της δεύτερης φάσης ανυποστήρικτης να αλληλεπιδρά με την εδαφική μάζα.

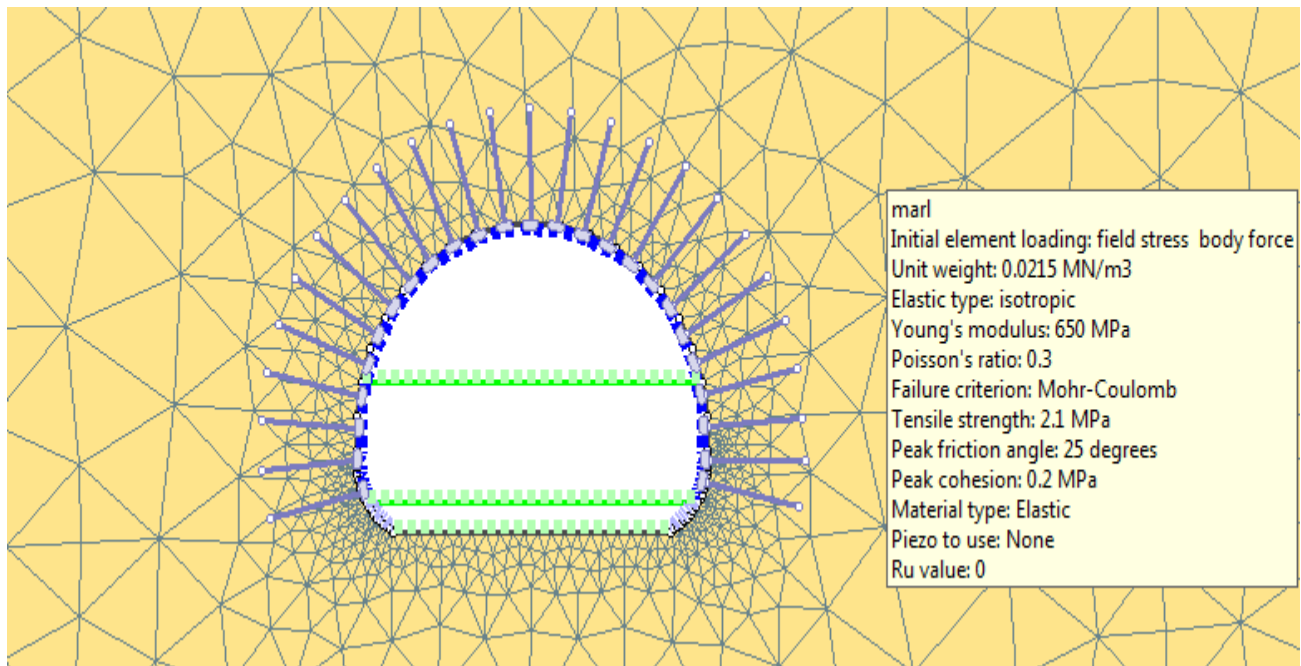
Υπολογιστική φάση 5- Υποστήριξη φάσης εκσκαφής 2.



Σχήμα 5.12: Υποστήριξη φάσης εκσκαφής 2.

Σε αυτή την φάση της εκσκαφής παρουσιάζεται η υποστήριξη της δεύτερης φάσης της σήραγγας.

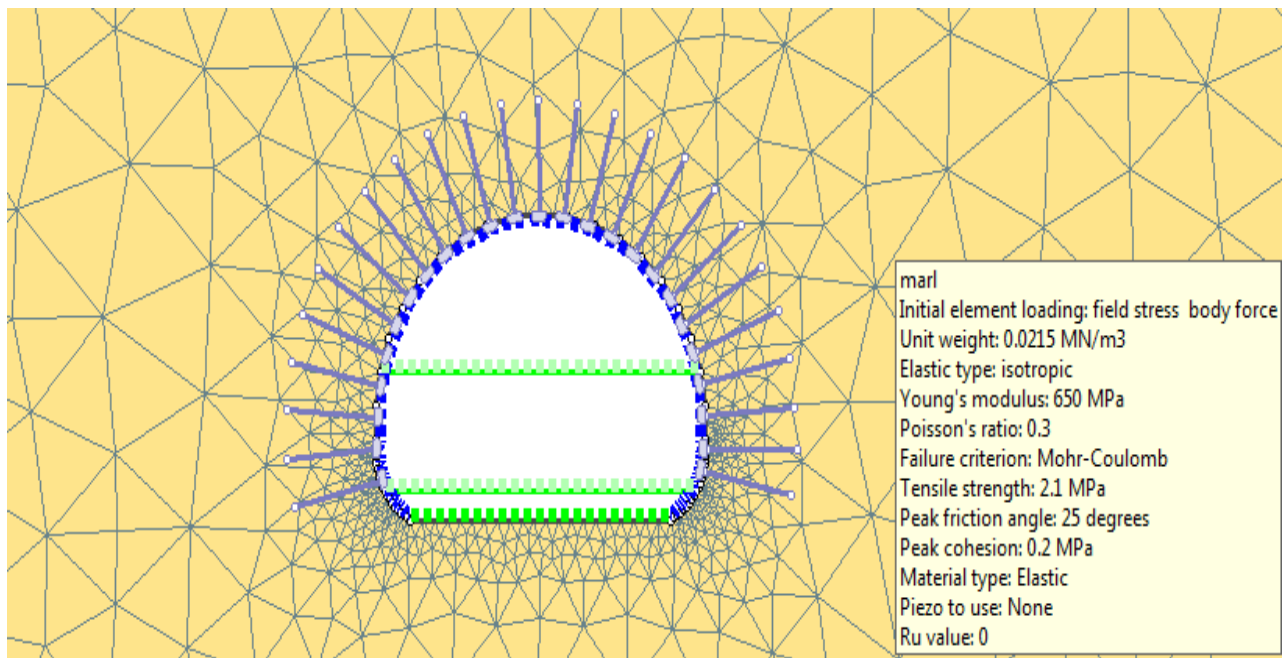
- Υπολογιστική φάση 6 – Φάση εκσκαφής 3.



Σχήμα 5.13: Φάση εκσκαφής 3.

Στην φάση αυτή παρουσιάζεται η εκσκαφή της τρίτης φάσης με ανυποστήρικτο τον ανεστραμμένο θόλο.

- Υπολογιστική φάση 7 – Τελική υποστήριξη σήραγγας.



Σχήμα 5.14: Τελική υποστήριξη σήραγγας.

Στην τελική αυτή φάση εκσκαφής παρουσιάζεται η τελική υποστήριξη της σήραγγας.

## **6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ- ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

### **6.1. Γενικά**

Στην παρούσα εργασία σκοπός είναι η μοντελοποίηση τεσσάρων διαφορετικών τύπων υποστήριξης με σταθερή την μεθοδολογία, τα υλικά, τον τρόπο καθώς και την γεωμετρία της κατασκευής. Στους διαφορετικούς αυτούς τύπους κατασκευής οι παράμετροι που εξετάζονται είναι το πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος κατά την επένδυση της σήραγγας και η πυκνότητα της κοχλίωσης.

Έτσι δημιουργούνται τέσσερα διαφορετικά μοντέλα όπου:

- Στο πρώτο μοντέλο υπάρχει ένα πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος 20cm και πυκνότητα κοχλίωσης ανά 2 m.
- Στο δεύτερο μοντέλο υπάρχει πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος 35 cm και πυκνότητα κοχλίωσης ανά 1 m.
- Στο τρίτο μοντέλο το πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι 35cm και η πυκνότητα της κοχλίωσης είναι ανά 2 m.
- Στο τέταρτο και τελευταίο μοντέλο το πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι 20 cm και η πυκνότητα της κοχλίωσης είναι ανά 1 m.

Τα τέσσερα αυτά μοντέλα εφαρμόζονται πάνω σε τρεις διαφορετικούς εδαφικούς σχηματισμούς, με διαφορετικές ανάγκες αντοχής και ιδιότητες, οι οποίες έχουν αναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο καθώς αναλύονται και στη συνέχεια.

Βάσει διαγραμμάτων και ανάλυσης μοντέλων που εξετάζουν τόσο την απόκριση του εδάφους, πάνω σε συγκεκριμένα σημεία (που θεωρούνται κρίσιμα πάνω στην εκσκαφή), μελετώντας τις τάσεις και τις μετακινήσεις των σημείων αυτών ανά φάση εκσκαφής όσο και διαγραμμάτων και μοντέλων που εξετάζουν την απόκριση της υποστήριξης των μοντέλων, με διαγράμματα που εμφανίζουν την στιγμιαία κάμψη της υποστήριξης και την μετατόπιση των αγκυρίων, επιλέγεται ο πλέον κατάλληλος τύπος υποστήριξης από τα τέσσερα αυτά παρουσιαζόμενα μοντέλα ανά είδος εδαφικού σχηματισμού.

Οι εδαφικοί αυτοί σχηματισμοί είναι:

- Μάργα
- Μαργαϊκός Φλύσχης
- Στιφρή Άργιλος



Κατόπιν παρουσιάζεται το κόστος του κάθε μοντέλου ανά μέτρο προχώρησης της σήραγγας. Τέλος μετά από την παρουσίαση όλων αυτών των μεγεθών θα επιλέγεται ο πλέον κατάλληλος τύπος υποστήριξης από τους τέσσερις για τον κάθε ένα εδαφικό σχηματισμό ξεχωριστά.

### 6.2. Ομαδοποίηση των μετρήσεων

Ξεκινώντας λοιπόν την ομαδοποίηση προκύπτει ο Πίνακας 6.1 στον οποίο παρουσιάζεται ο τρόπος που λαμβάνει χώρα η ομαδοποίηση.

Πίνακας 6.1: Ομαδοποίηση μοντέλων ανά κατηγορία εδαφικού σχηματισμού.

Έδαφος	Μοντέλο 1	Μοντέλο 2	Μοντέλο 3	Μοντέλο 4
Μάργα	M1	M2	M3	M4
Φλύσχη	Φ1	Φ2	Φ3	Φ4
Άργιλος	A1	A2	A3	A4

Από τον Πίνακα 6.1 προκύπτει ότι τα μοντέλα θα εξετάζονται ανά κατηγορία εδαφικού σχηματισμού, θα συγκρίνονται ανά κατηγορία εδαφικού σχηματισμού και τέλος θα συγκρίνονται και σε θέμα κόστους, ώστε στο τέλος να επιλεγεί στο πλέον κατάλληλο μοντέλο υποστήριξης ανά έδαφος. Σε κάθε μοντέλο έχουν επιλεγεί οκτώ σημεία περιμετρικά του ανοίγματος που υπολογίζεται η εδαφική απόκριση, με μετρούμενες ποσότητες την εντατική κατάσταση των σημείων καθώς και τις μετατοπίσεις τους ανά φάση εκσκαφής και υποστήριξης. Ακόμα υπολογίζεται και η απόκριση της υποστήριξης με μετρούμενες ποσότητες τη στιγμιαία κάμψη της υποστήριξης καθώς και τις μετατοπίσεις των αγκυρίων.

Τα αποτελέσματα αυτά φαίνονται παρακάτω ως εξής:

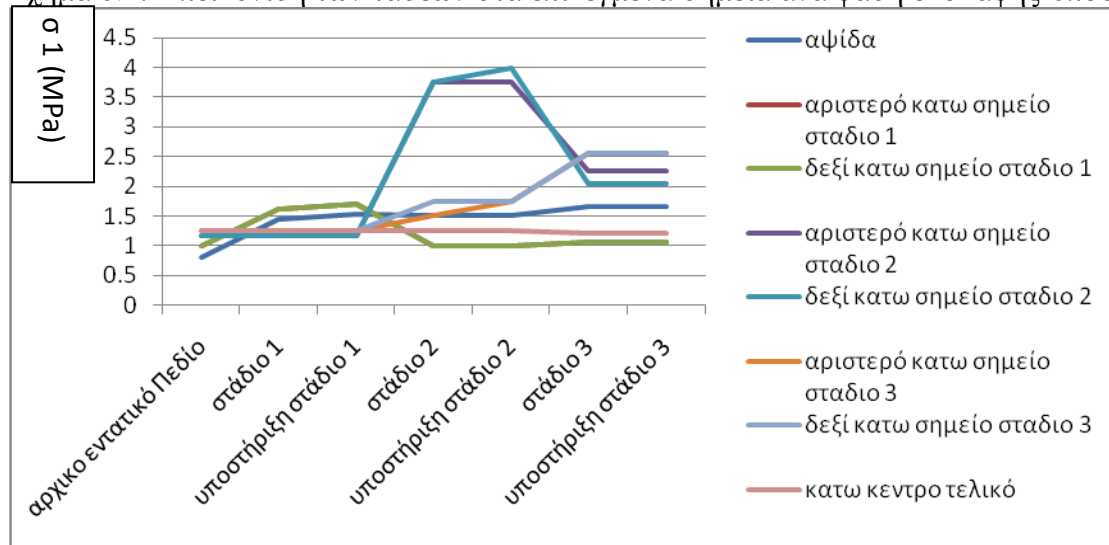
### 6.2.1. Μάργα

#### 6.2.1.1. Μοντέλο M1:

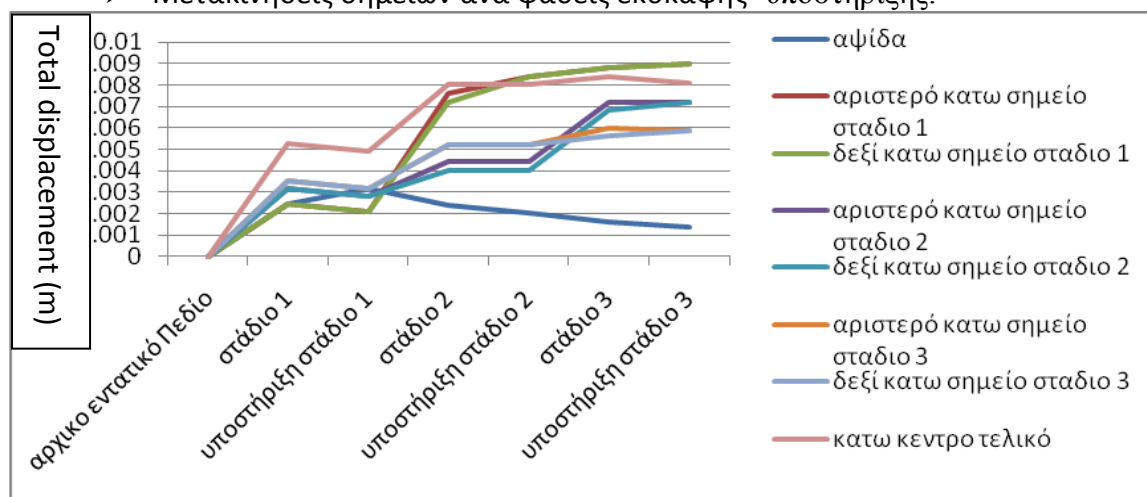
- Απόκριση εδάφους στα σημεία του ανοίγματος.

- Τάσεις σημείων ανά φάσεις εκσκαφής- υποστήριξης.

Σχήμα 6.1: Απεικόνιση των τάσεων στα επιλεγμένα σημεία ανά φάση εκσκαφής-υποστήριξης.

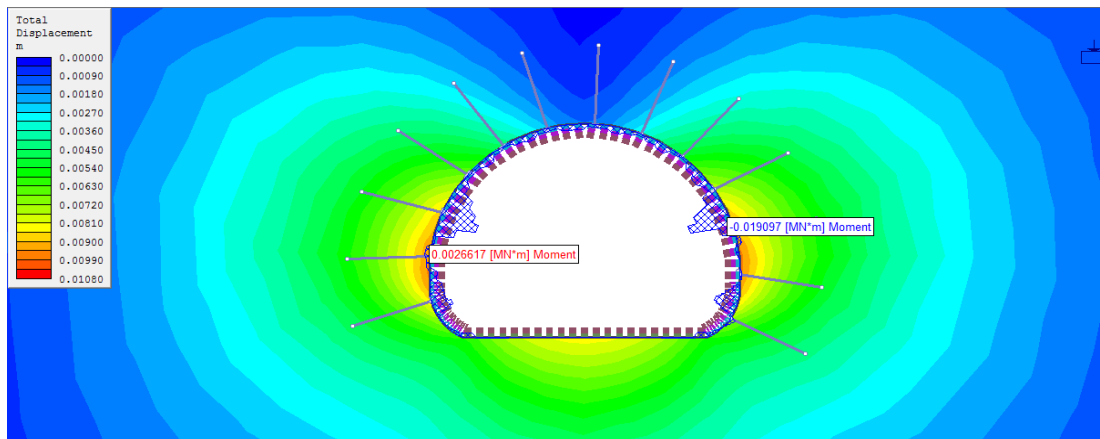


- Μετακινήσεις σημείων ανά φάσεις εκσκαφής- υποστήριξης.



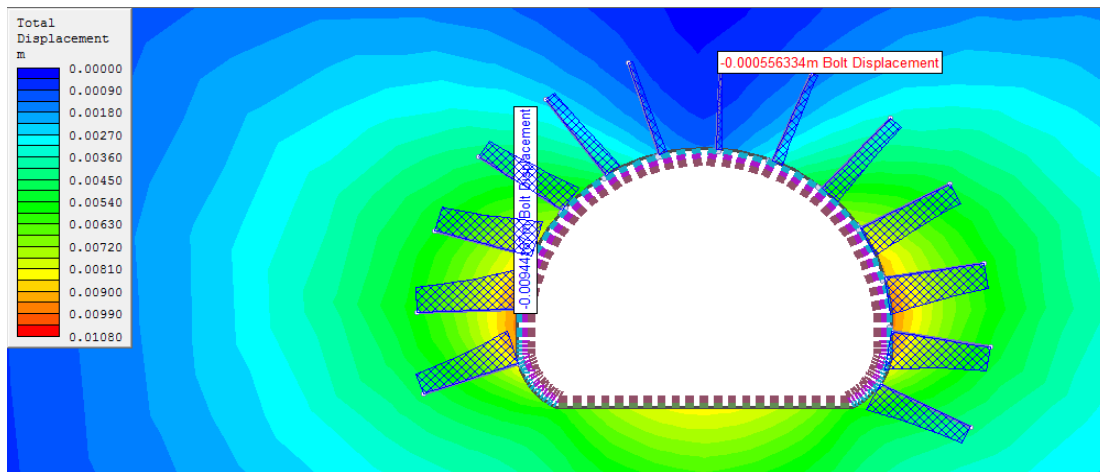
Σχήμα 6.2: Απεικόνιση των μετακινήσεων στα επιλεγμένα σημεία ανά φάση εκσκαφής-υποστήριξης.

- Απόκριση υποστήριξης M1:



Σχήμα 6.3: Καμπτική ροπή υποστήριξης M1.

Σύμφωνα με το Σχήμα 6.3 προκύπτει μια μέγιστη θετική τιμή της τάξεως του 0,019 MN\*m και μια μέγιστη αρνητική τιμή της τάξης του 0,0026617 MN\*m.



Σχήμα 6.4: Μετακινήσεις αγκυρίων.

Από το Σχήμα 6.4 παρατηρείται μια μέγιστη τιμή μετακίνησης της τάξεως του 0,00944m και μια ελάχιστη τιμή 0,0005563m.

Έτσι συνοπτικά για το M1 προκύπτει:

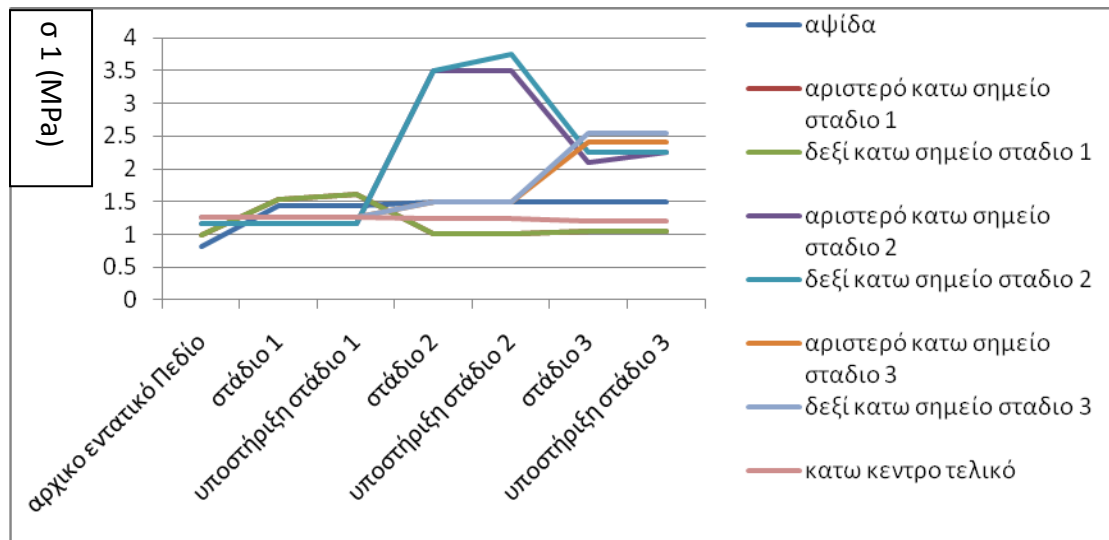
Πίνακας 6.2: Μοντέλο M1

Μέγιστη τάση MPa	Μέγιστη μετακίνηση m	Καμπτική ροπή (+) MN*m	Καμπτική ροπή (-) MN*m	Μέγιστη μετ. αγκυρίου m	Ελάχιστη μετ. αγκυρίου m
4	0,009	0,019	0,0026	0,00944	0,0005563

### 6.2.1.2. Μοντέλο M2:

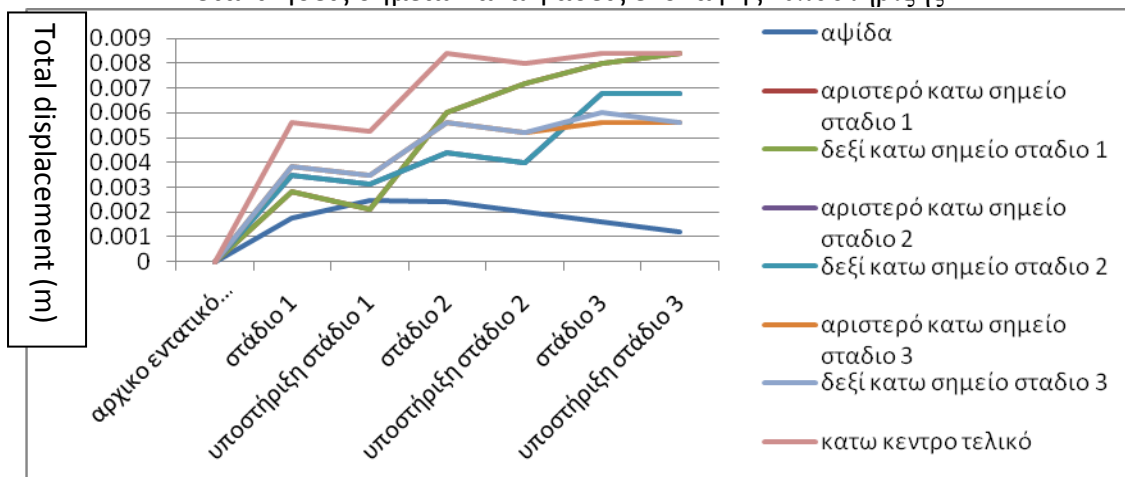
- Απόκριση εδάφους στα σημεία του ανοίγματος.

➤ Τάσεις σημείων ανά φάσεις εκσκαφής- υποστήριξης.



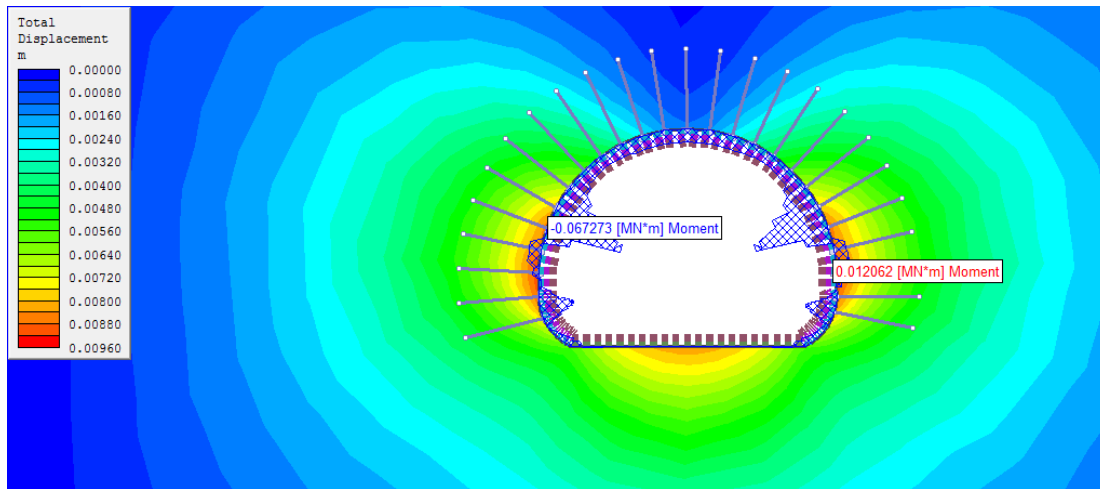
Σχήμα 6.5: Απεικόνιση των τάσεων στα επιλεγμένα σημεία ανά φάση εκσκαφής-υποστήριξης.

➤ Μετακινήσεις σημείων ανά φάσεις εκσκαφής- υποστήριξης.



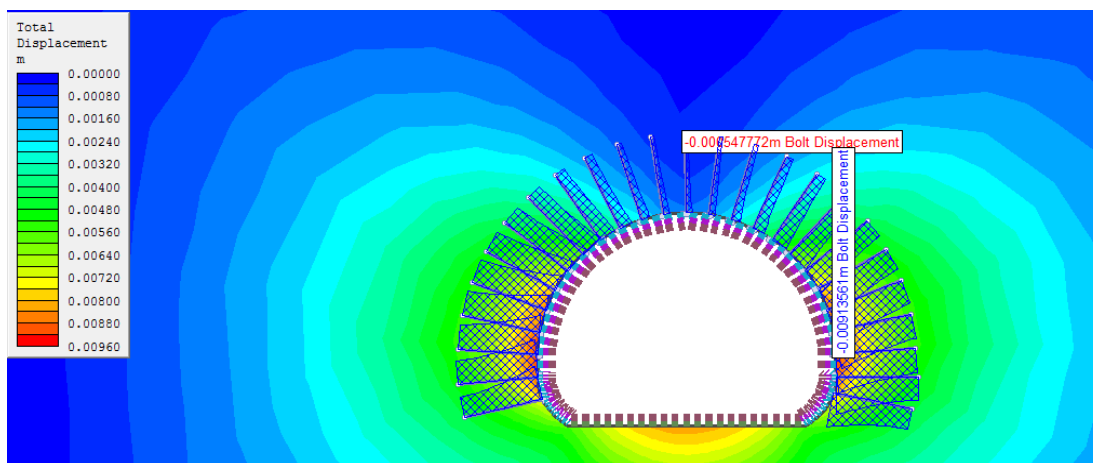
Σχήμα 6.6: Απεικόνιση των μετακινήσεων στα επιλεγμένα σημεία ανά φάση εκσκαφής-υποστήριξης.

- Απόκριση υποστήριξης M2:



Σχήμα 6.7: Καμπτική ροπή υποστήριξης M2.

Σύμφωνα με το Σχήμα 6.7 προκύπτει μια μέγιστη θετική τιμή της τάξεως του 0,0672 MN\*m και μια μέγιστη αρνητική τιμή της τάξης του 0,0120 MN\*m.



Σχήμα 6.8: Μετακινήσεις αγκυρίων

Από το Σχήμα 6.8 παρατηρείται μια μέγιστη τιμή μετακίνησης της τάξεως του 0,0091m και μια ελάχιστη τιμή 0,00054m.

Έτσι συνοπτικά για το M2 προκύπτει:

Πίνακας 6.3: Μοντέλο M2

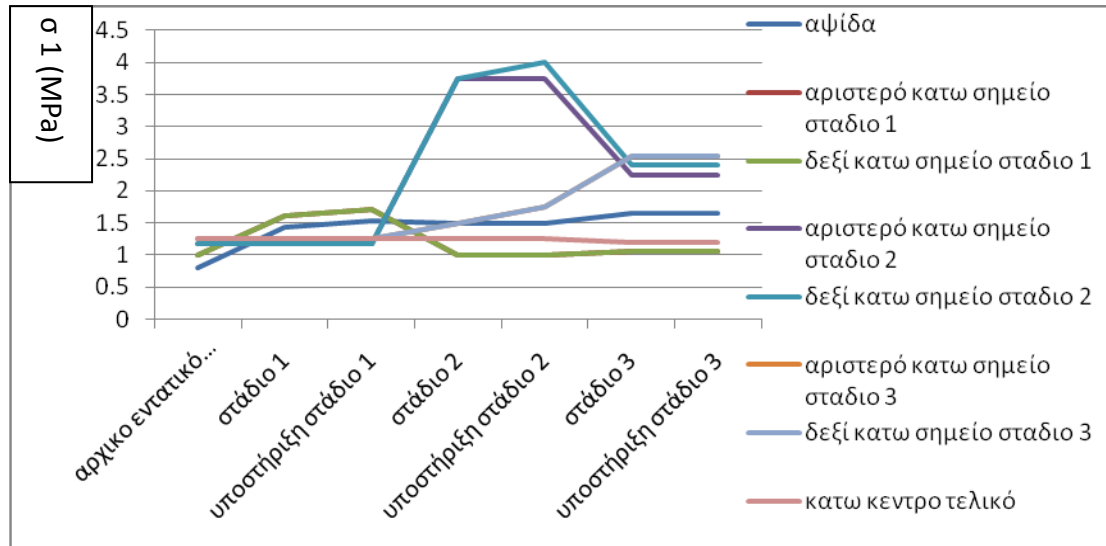
Μέγιστη τάση MPa	Μέγιστη μετακίνηση m	Καμπτική ροπή (+) MN*m	Καμπτική ροπή (-) MN*m	Μέγιστη μετ. αγκυρίου m	Ελάχιστη μετ. αγκυρίου m
3,75	0,0084	0,0672	0,0120	0,0091	0,00054



## 6.2.1.3. Μοντέλο M3:

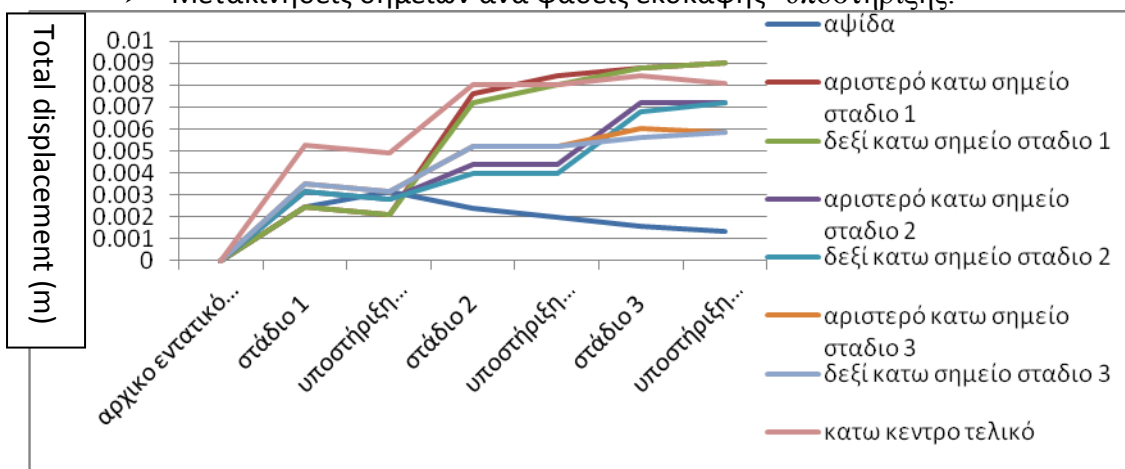
- Απόκριση εδάφους στα σημεία του ανοίγματος.

➤ Τάσεις σημείων ανά φάσεις εκσκαφής-υποστήριξης.



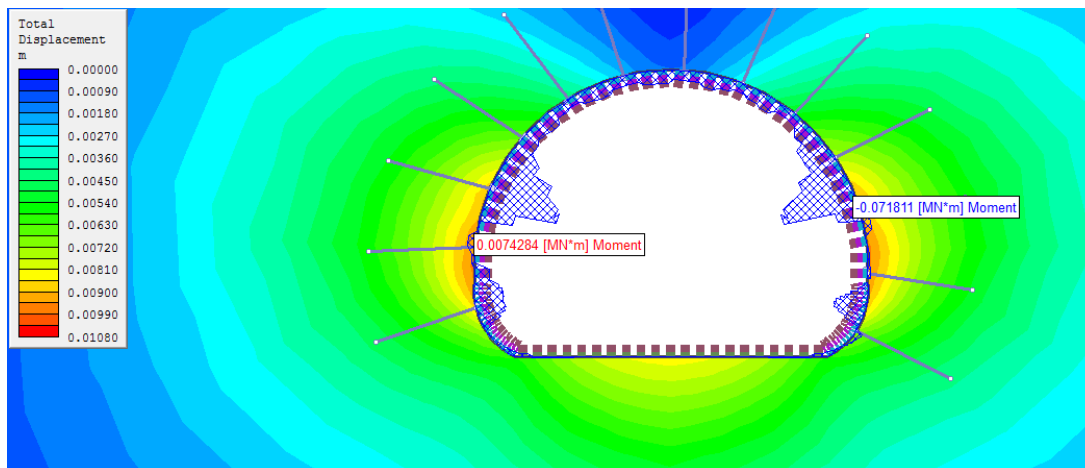
Σχήμα 6.9: Απεικόνιση των τάσεων στα επιλεγμένα σημεία ανά φάση εκσκαφής-υποστήριξης.

➤ Μετακινήσεις σημείων ανά φάσεις εκσκαφής- υποστήριξης.



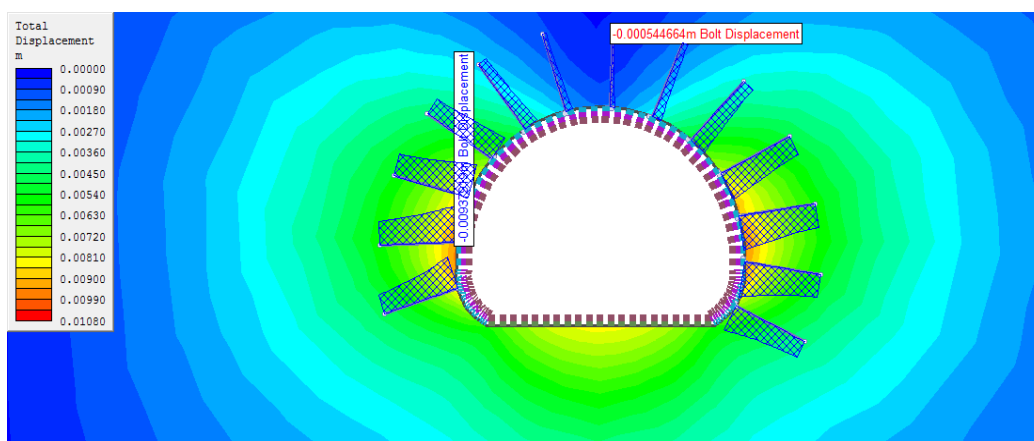
Σχήμα 6.10: Απεικόνιση των μετακινήσεων στα επιλεγμένα σημεία ανά φάση εκσκαφής-υποστήριξης.

- Απόκριση υποστήριξης M3:



Σχήμα 6.11: Καμπτική ροπή υποστήριξης M3.

Σύμφωνα με το Σχήμα 6.11 προκύπτει μια μέγιστη θετική τιμή της τάξεως του 0,0718 MN\*m και μια μέγιστη αρνητική τιμή της τάξης του 0,0074 MN\*m.



Σχήμα 6.12: Μετακινήσεις αγκυρίων.

Από το Σχήμα 6.12 παρατηρείται μια μέγιστη τιμή μετακίνησης της τάξεως του 0,00937m και μια ελάχιστη τιμή 0,000544m.

Έτσι συνοπτικά για το M3 προκύπτει:

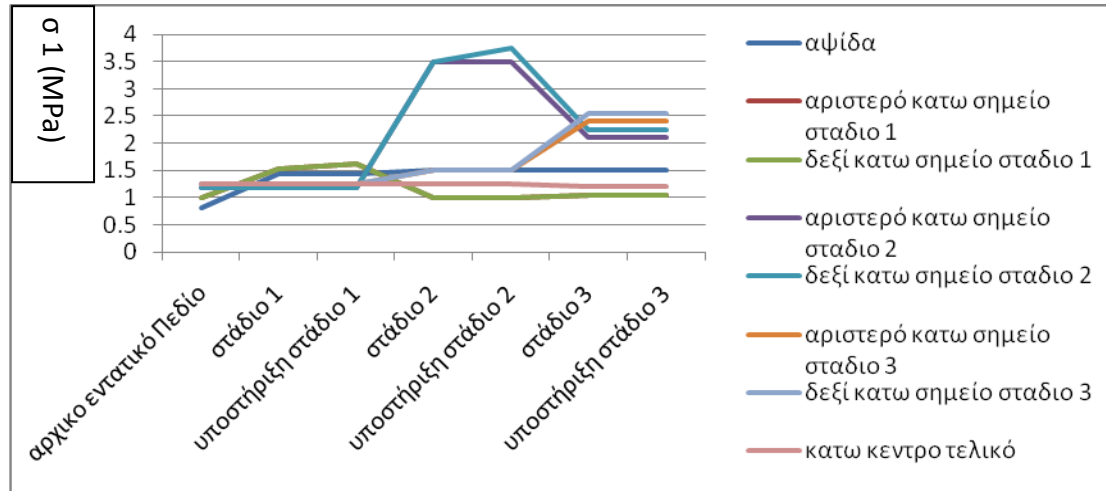
Πίνακας 6.4: Μοντέλο M3

Μέγιστη τάση MPa	Μέγιστη μετακίνηση m	Καμπτική ροπή (+) MN*m	Καμπτική ροπή (-) MN*m	Μέγιστη μετ. αγκυρίου m	Ελάχιστη μετ. αγκυρίου m
4	0,009	0,0718	0,0074	0,00937	0,000544

## 6.2.1.4. Μοντέλο M4:

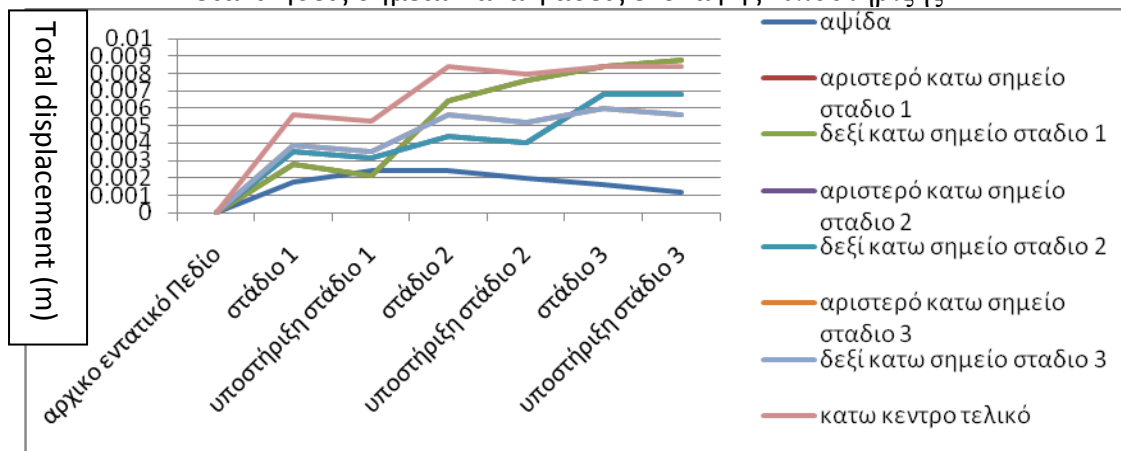
- Απόκριση εδάφους στα σημεία του ανοίγματος.

➤ Τάσεις σημείων ανά φάσεις εκσκαφής- υποστήριξης.



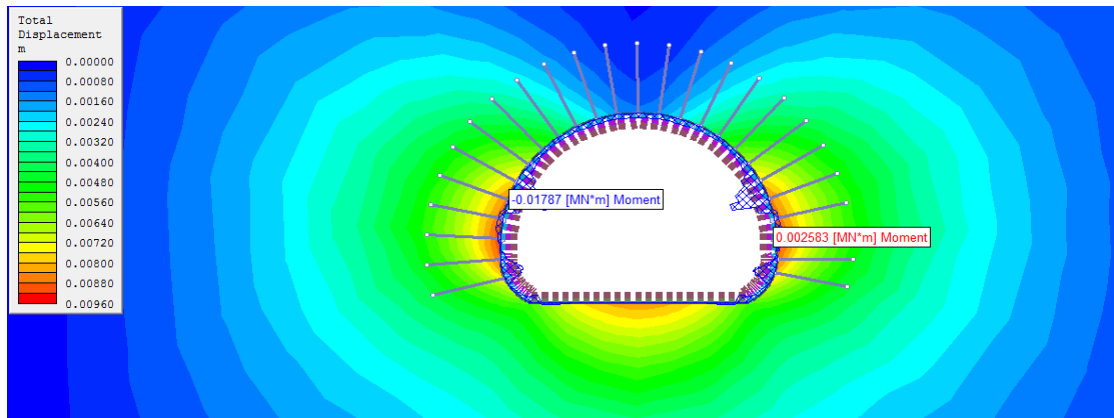
Σχήμα 6.13: Απεικόνιση των τάσεων στα επιλεγμένα σημεία ανά φάση εκσκαφής-υποστήριξης.

➤ Μετακινήσεις σημείων ανά φάσεις εκσκαφής- υποστήριξης.



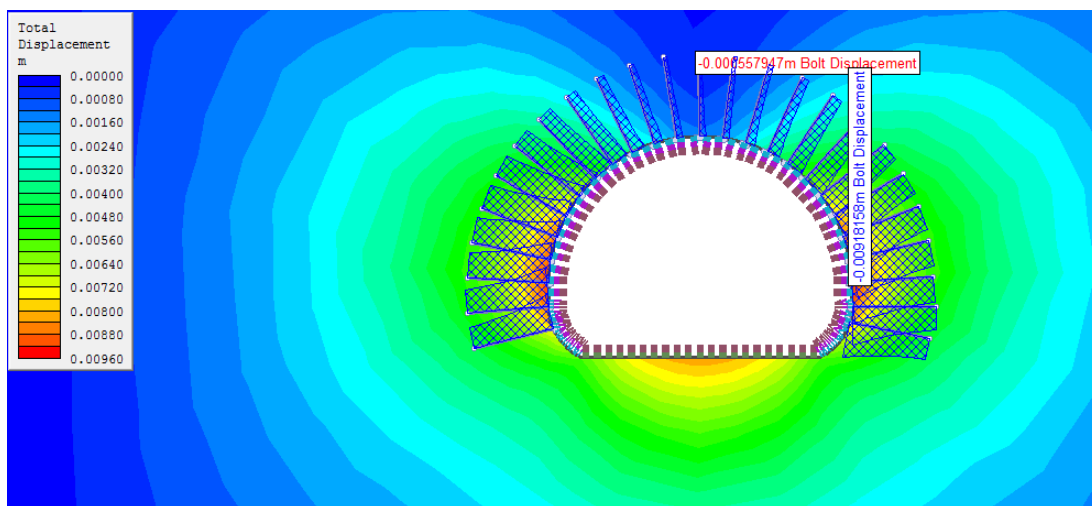
Σχήμα 6.14: Απεικόνιση των μετακινήσεων στα επιλεγμένα σημεία ανά φάση εκσκαφής-υποστήριξης.

- Απόκριση υποστήριξης M4:



Σχήμα 6.15: Καμπτική ροπή υποστήριξης M4

Σύμφωνα με το Σχήμα 6.15 προκύπτει μια μέγιστη θετική τιμή της τάξεως του 0,01787MN\*m και μια μέγιστη αρνητική τιμή της τάξης του 0,002583 MN\*m.



Σχήμα 6.16: Μετακινήσεις αγκυρίων.

Από το Σχήμα 6.16 παρατηρείται μια μέγιστη τιμή μετακίνησης της τάξεως του 0,00937m και μια ελάχιστη τιμή 0,000544m.

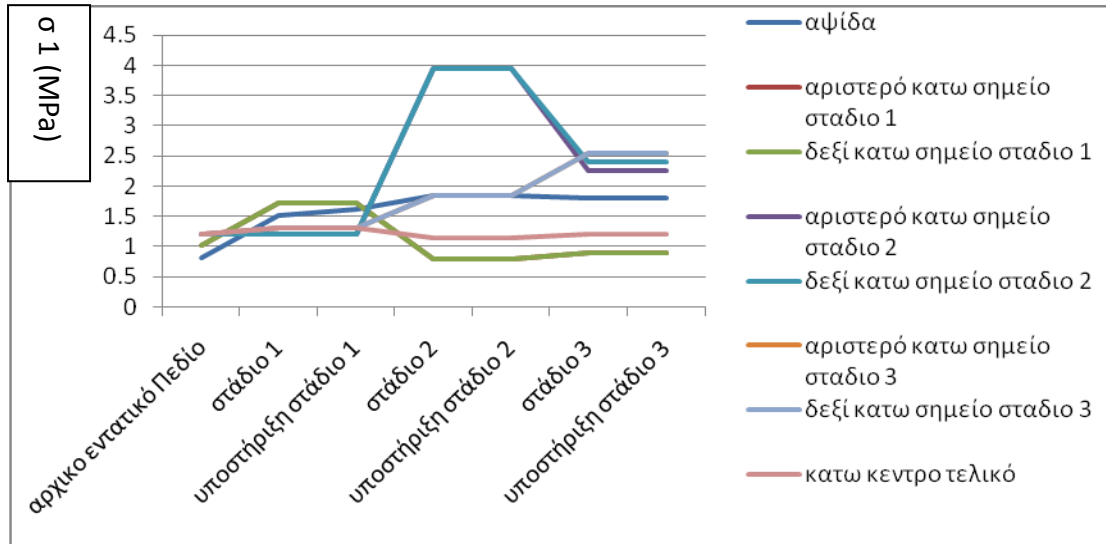
Πίνακας 6.5: Μοντέλο M4

Μέγιστη τάση MPa	Μέγιστη μετακίνηση m	Καμπτική ροπή (+) MN*m	Καμπτική ροπή (-) MN*m	Μέγιστη μετ. αγκυρίου m	Ελάχιστη μετ. αγκυρίου m
3,75	0,009	0,01787	0,002583	0,00937	0,000544

## 6.2.2. Μαργαϊκός Φλύσχος

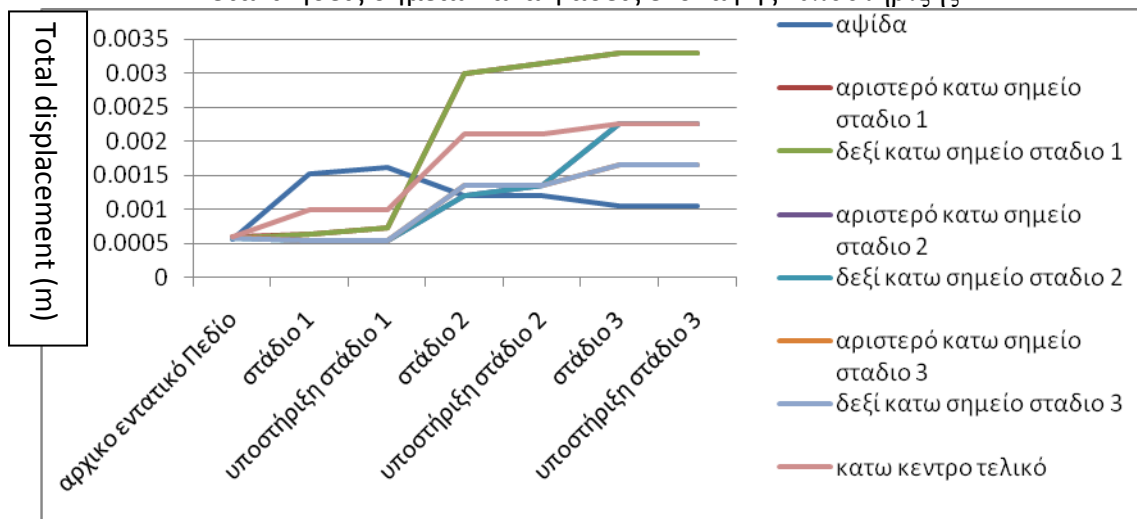
### 6.2.2.1. Μοντέλο Φ1:

- Απόκριση εδάφους στα σημεία του ανοίγματος.
- Τάσεις σημείων ανά φάσεις εκσκαφής- υποστήριξης.



Σχήμα 6.17: Απεικόνιση των τάσεων στα επιλεγμένα σημεία ανά φάση εκσκαφής-υποστήριξης.

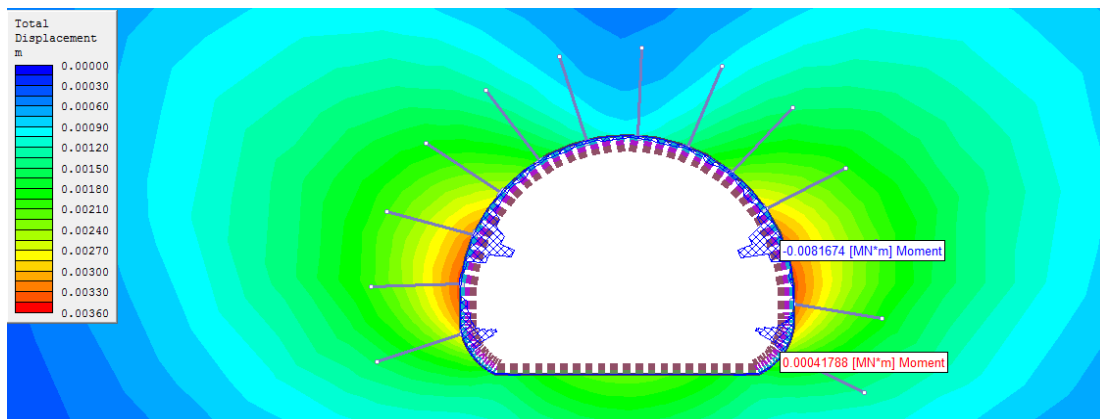
- Μετακινήσεις σημείων ανά φάσεις εκσκαφής- υποστήριξης.



Σχήμα 6.18: Απεικόνιση των μετακινήσεων στα επιλεγμένα σημεία ανά φάση εκσκαφής-υποστήριξης.

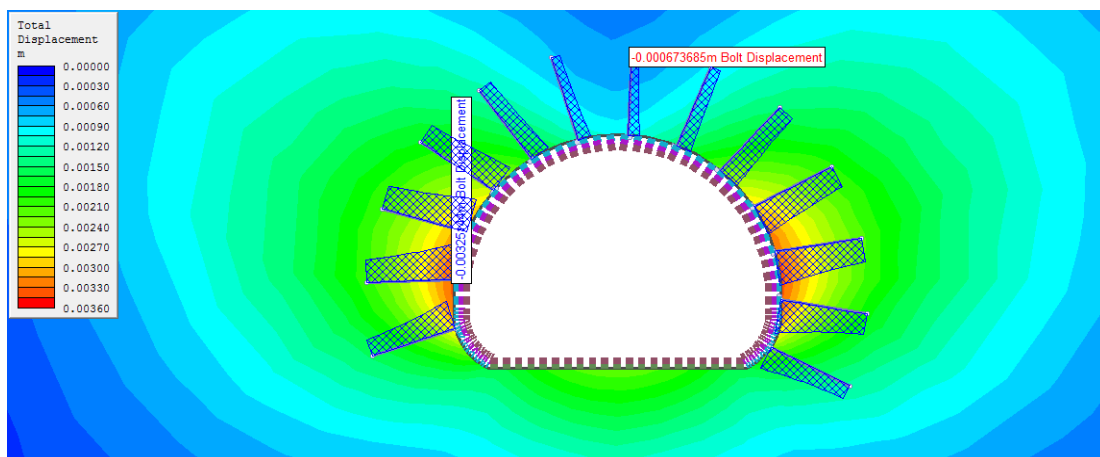


- Απόκριση υποστήριξης Φ1:



Σχήμα 6.19: Καμπτική ροπή υποστήριξης Φ1.

Σύμφωνα με το Σχήμα 6.19 προκύπτει μια μέγιστη θετική τιμή της τάξεως του 0,00816MN\*m και μια μέγιστη αρνητική τιμή της τάξης του 0,000417 MN\*m.



Σχήμα 6.20: Μετακινήσεις αγκυρίων.

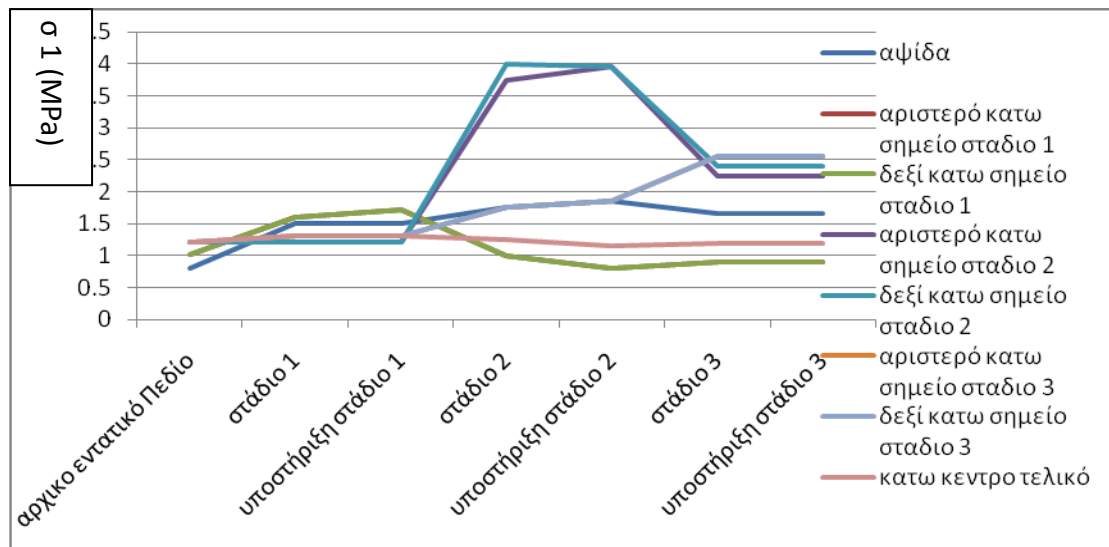
Από το Σχήμα 6.20 παρατηρείται μια μέγιστη τιμή μετακίνησης της τάξεως του 0,00325m και μια ελάχιστη τιμή 0,000673m.

Πίνακας 6.6: Μοντέλο Φ1

Μέγιστη τάση MPa	Μέγιστη μετακίνηση m	Καμπτική ροπή (+) MN*m	Καμπτική ροπή (-) MN*m	Μέγιστη μετ. αγκυρίου m	Ελάχιστη μετ. αγκυρίου m
4	0,0033	0,00816	0,000417	0,00325	0,000673

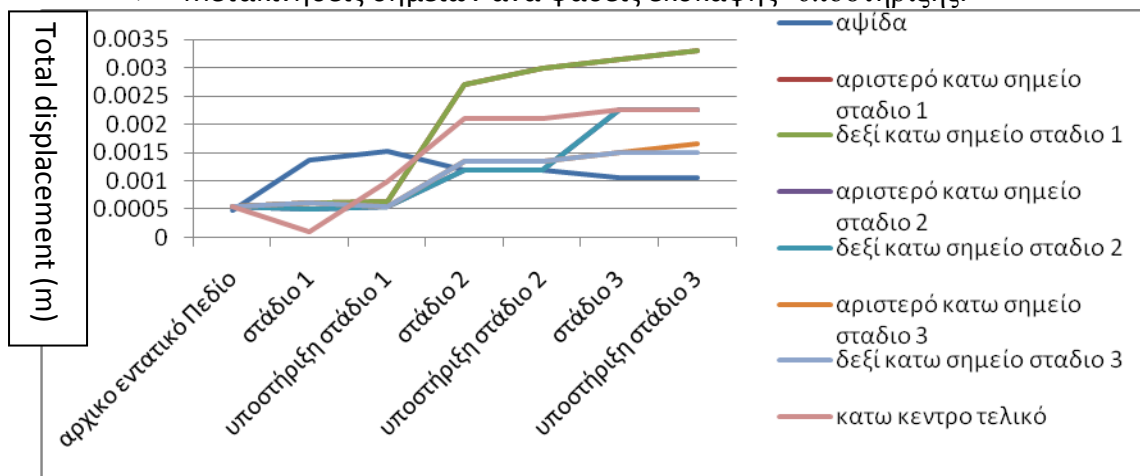
## 6.2.2.2. Μοντέλο Φ2:

- Απόκριση εδάφους στα σημεία του ανοίγματος.
- Τάσεις σημείων ανά φάσεις εκσκαφής- υποστήριξης.



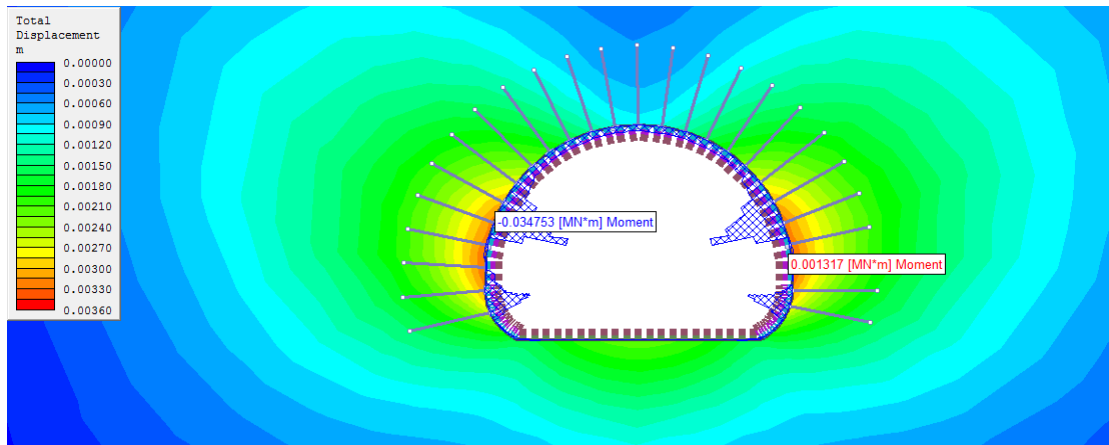
Σχήμα 6.21: Απεικόνιση των τάσεων στα επιλεγμένα σημεία ανά φάση εκσκαφής-υποστήριξης.

- Μετακινήσεις σημείων ανά φάσεις εκσκαφής- υποστήριξης.



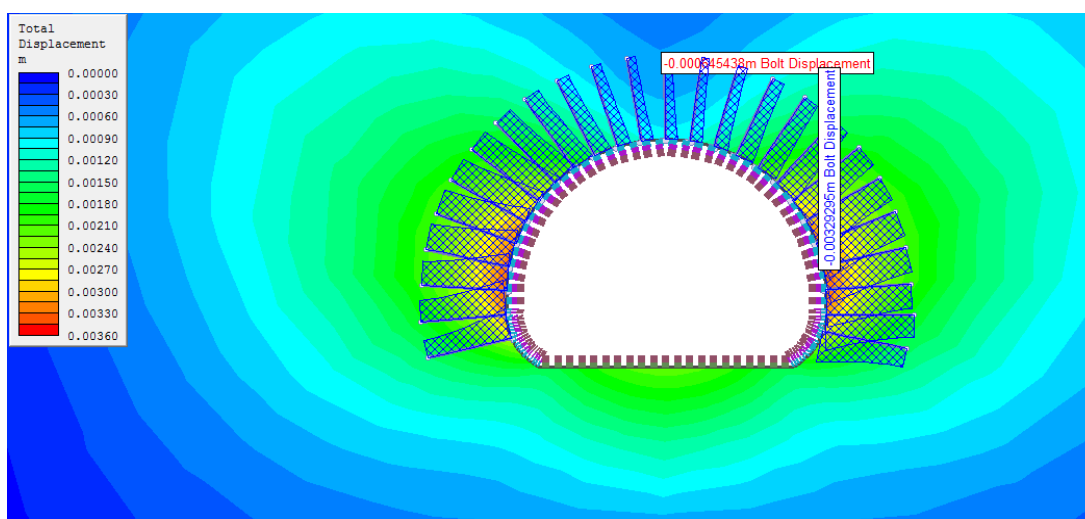
Σχήμα 6.22: Απεικόνιση των μετακινήσεων στα επιλεγμένα σημεία ανά φάση εκσκαφής-υποστήριξης.

- Απόκριση υποστήριξης Φ2:



Σχήμα 6.23: Καμπτική ροπή υποστήριξης Φ2.

Σύμφωνα με το Σχήμα 6.23 προκύπτει μια μέγιστη θετική τιμή της τάξεως του 0,0347MN\*m και μια μέγιστη αρνητική τιμή της τάξης του 0,00131MN\*m.



Σχήμα 6.24 Μετακινήσεις αγκυρίων.

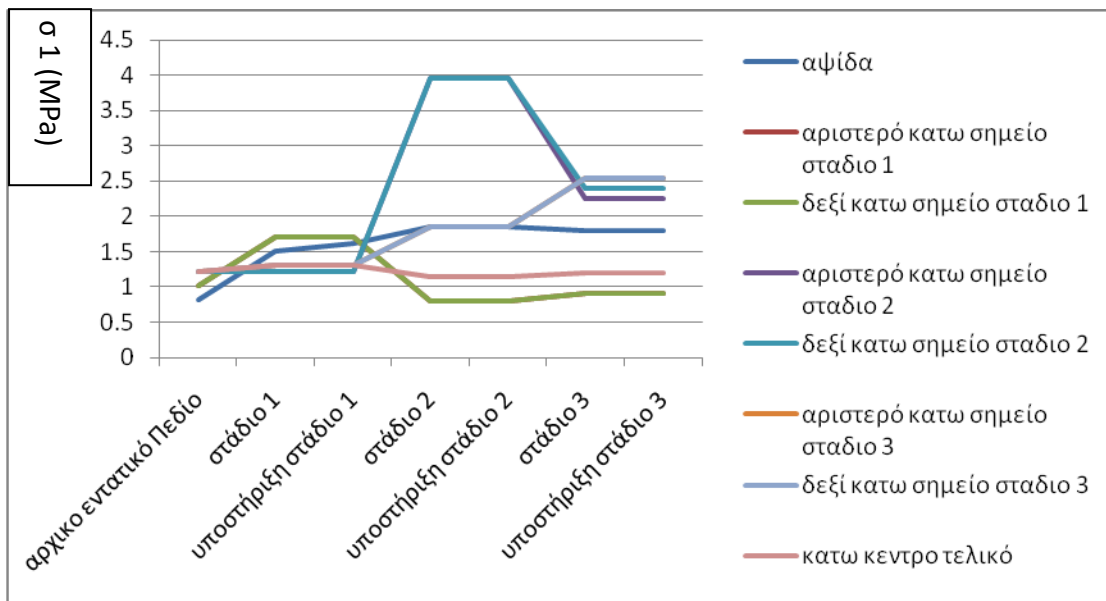
Από το Σχήμα 6.24 παρατηρείται μια μέγιστη τιμή μετακίνησης της τάξεως του 0,00329m και μια ελάχιστη τιμή 0,000545m.

Πίνακας 6.7: Μοντέλο Φ2

Μέγιστη τάση MPa	Μέγιστη μετακίνηση m	Καμπτική ροπή (+) MN*m	Καμπτική ροπή (-) MN*m	Μέγιστη μετ. αγκυρίου m	Ελάχιστη μετ. αγκυρίου M
4	0,0033	0,0347	0,00131	0,00329	0,000545

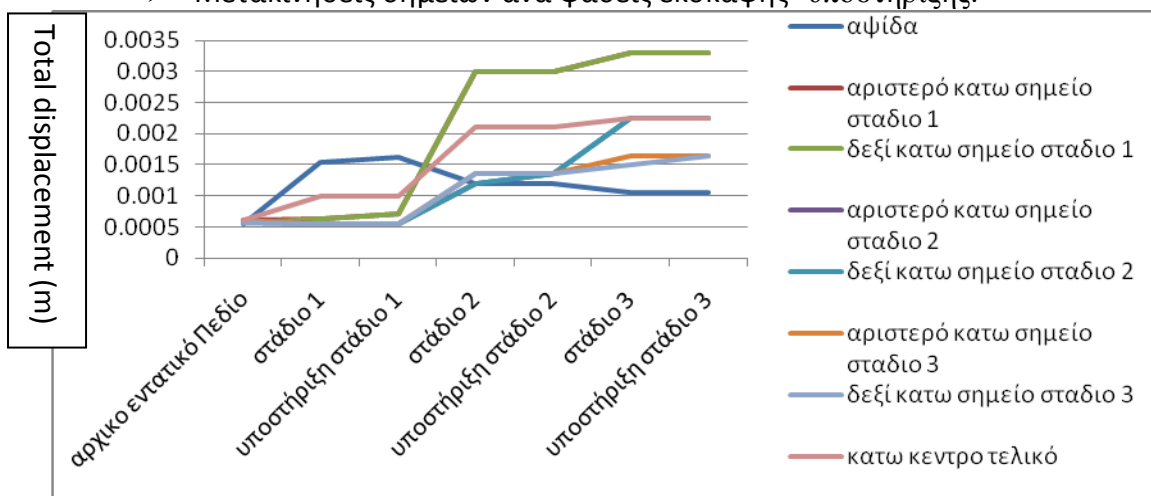
## 6.2.2.3. Μοντέλο Φ3:

- Απόκριση εδάφους στα σημεία του ανοίγματος.
- Τάσεις σημείων ανά φάσεις εκσκαφής- υποστήριξης.



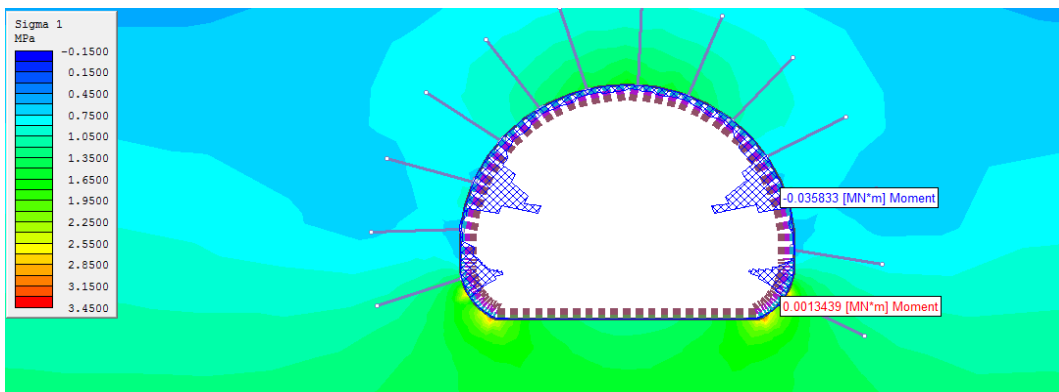
Σχήμα 6.25: Απεικόνιση των τάσεων στα επιλεγμένα σημεία ανά φάση εκσκαφής-υποστήριξης.

- Μετακινήσεις σημείων ανά φάσεις εκσκαφής- υποστήριξης.



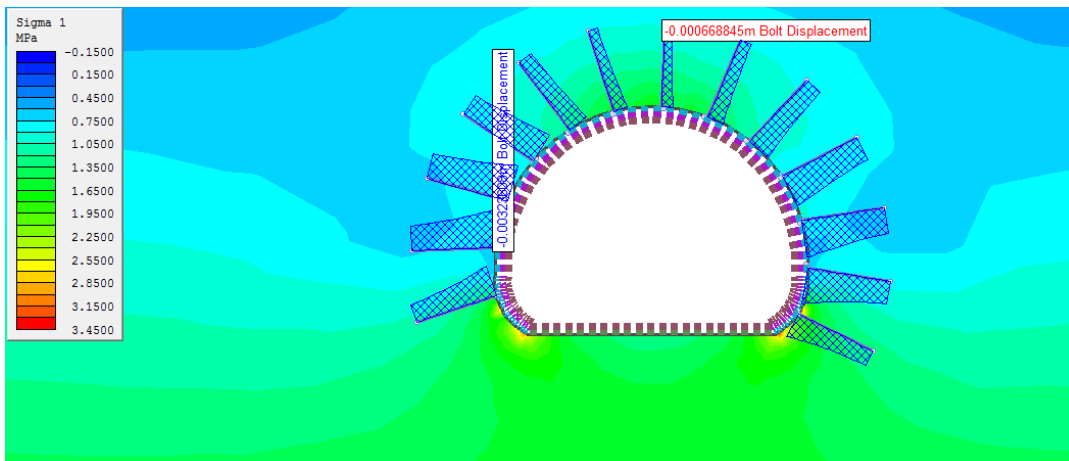
Σχήμα 6.26: Απεικόνιση των μετακινήσεων στα επιλεγμένα σημεία ανά φάση εκσκαφής-υποστήριξης.

- Απόκριση υποστήριξης Φ3:



Σχήμα 6.27: Καμπτική ροπή υποστήριξης Φ3.

Σύμφωνα με το Σχήμα 6.27 προκύπτει μια μέγιστη θετική τιμή της τάξεως του 0,0358MN\*m και μια μέγιστη αρνητική τιμή της τάξης του 0,0013439MN\*m.



Σχήμα 6.28: Μετακινήσεις αγκυρίων.

Από το Σχήμα 6.28 παρατηρείται μια μέγιστη τιμή μετακίνησης της τάξεως του 0,00323m και μια ελάχιστη τιμή 0,0006688m.

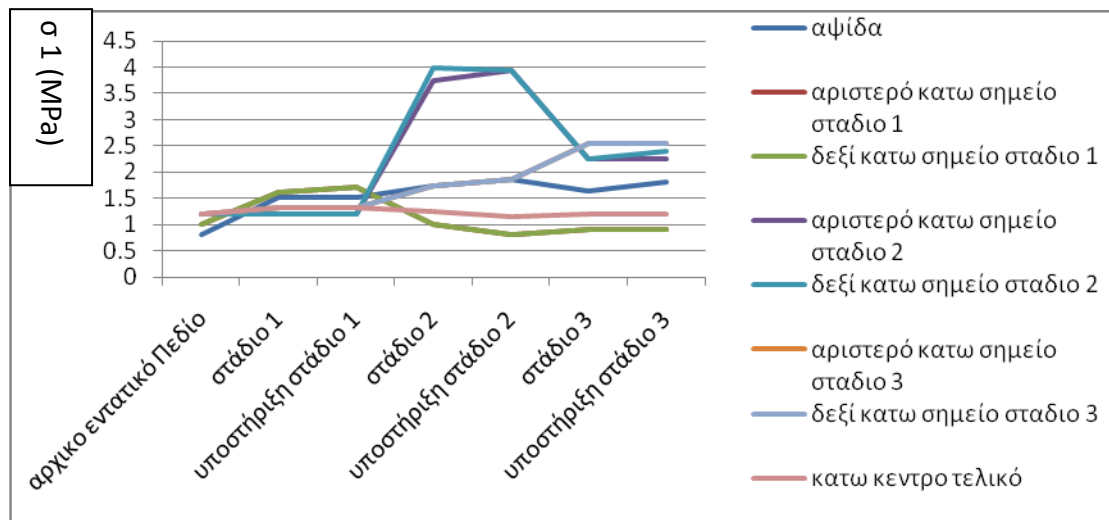
Πίνακας 6.8: Μοντέλο Φ3

Μέγιστη τάση MPa	Μέγιστη μετακίνηση m	Καμπτική ροπή (+) MN*m	Καμπτική ροπή (-) MN*m	Μέγιστη μετ. αγκυρίου m	Ελάχιστη μετ. αγκυρίου M
3,95	0,0033	0,0358	0,0013439	0,00323	0,0006688



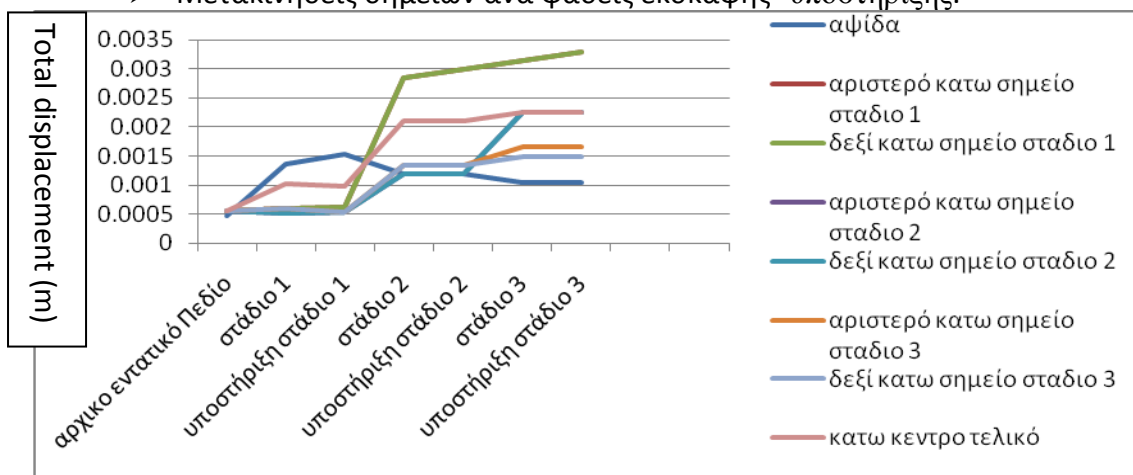
#### 6.2.2.4. Μοντέλο Φ4:

- Απόκριση εδάφους στα σημεία του ανοίγματος.
- Τάσεις σημείων ανά φάσεις εκσκαφής- υποστήριξης.



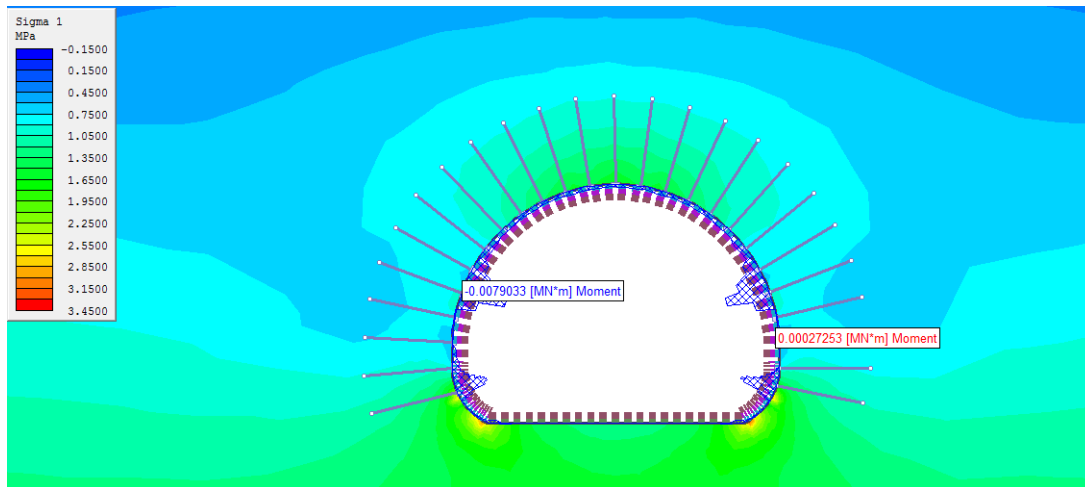
Σχήμα 6.29: Απεικόνιση των τάσεων στα επιλεγμένα σημεία ανά φάση εκσκαφής-υποστήριξης.

- Μετακινήσεις σημείων ανά φάσεις εκσκαφής- υποστήριξης.



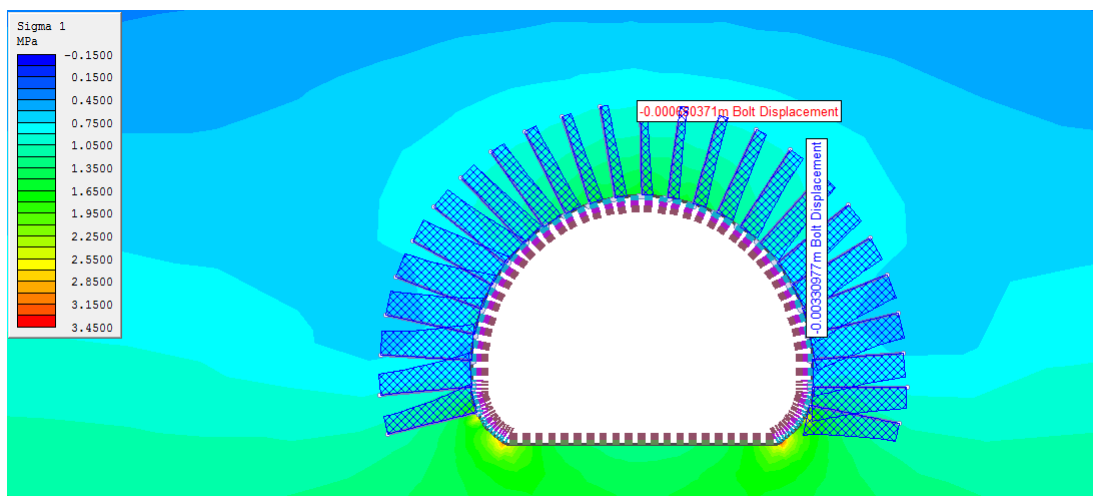
Σχήμα 6.30: Απεικόνιση των μετακινήσεων στα επιλεγμένα σημεία ανά φάση εκσκαφής-υποστήριξης.

## • Απόκριση υποστήριξης Φ4:



Σχήμα 6.31: Καμπτική ροπή υποστήριξης Φ4.

Σύμφωνα με το Σχήμα 6.31 προκύπτει μια μέγιστη θετική τιμή της τάξεως του 0,00790MN\*m και μια μέγιστη αρνητική τιμή της τάξης του 0,000272MN\*m.



Σχήμα 6.32: Μετακινήσεις αγκυρίων.

Από το Σχήμα 6.32 παρατηρείται μια μέγιστη τιμή μετακίνησης της τάξεως του 0,00330m και μια ελάχιστη τιμή 0,00065m.

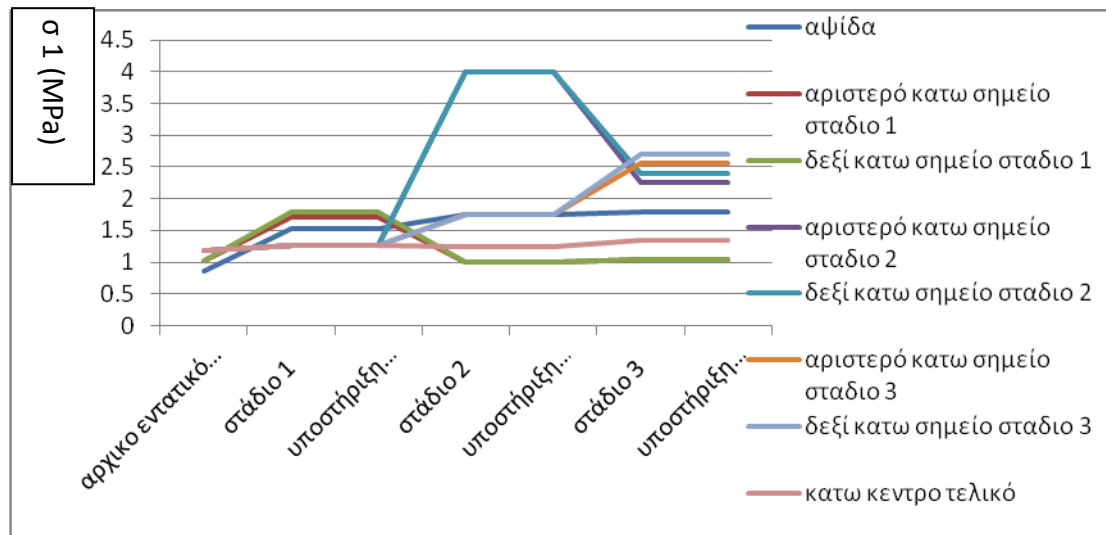
Πίνακας 6.9: Μοντέλο Φ4

Μέγιστη τάση MPa	Μέγιστη μετακίνηση m	Καμπτική ροπή (+) MN*m	Καμπτική ροπή (-) MN*m	Μέγιστη μετ. αγκυρίου m	Ελάχιστη μετ. αγκυρίου M
4	0,0033	0,00790	0,000272	0,00330	0,00065

### 6.2.3. Στιφρή Άργιλος

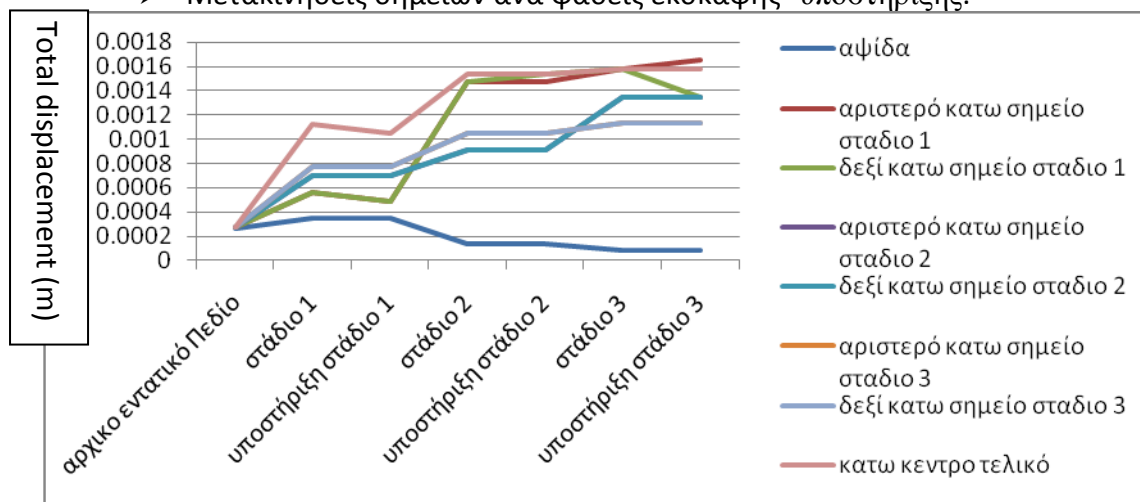
#### 6.2.3.1. Μοντέλο A1:

- Απόκριση εδάφους στα σημεία του ανοίγματος.
- Τάσεις σημείων ανά φάσεις εκσκαφής- υποστήριξης.



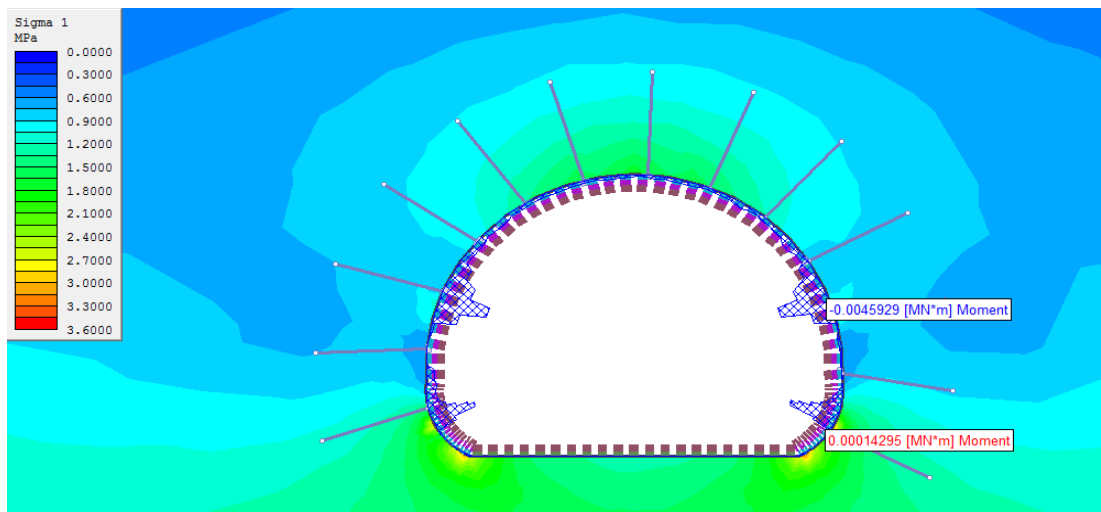
Σχήμα 6.33: Απεικόνιση των τάσεων στα επιλεγμένα σημεία ανά φάση εκσκαφής-υποστήριξης.

- Μετακινήσεις σημείων ανά φάσεις εκσκαφής- υποστήριξης.



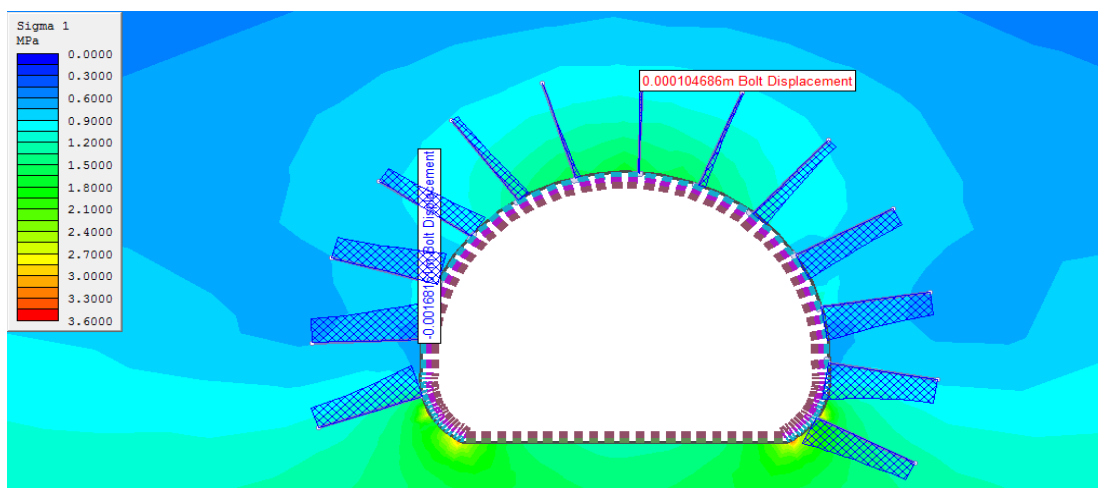
Σχήμα 6.34: Απεικόνιση των μετακινήσεων στα επιλεγμένα σημεία ανά φάση εκσκαφής-υποστήριξης.

- Απόκριση υποστήριξης A1:



Σχήμα 6.35: Καμπτική ροπή υποστήριξης A1.

Σύμφωνα με το Σχήμα 6.35 προκύπτει μια μέγιστη θετική τιμή της τάξεως του 0,00459MN\*m και μια μέγιστη αρνητική τιμή της τάξης του 0,000142MN\*m.



Σχήμα 6.36: Μετακινήσεις αγκυρίων.

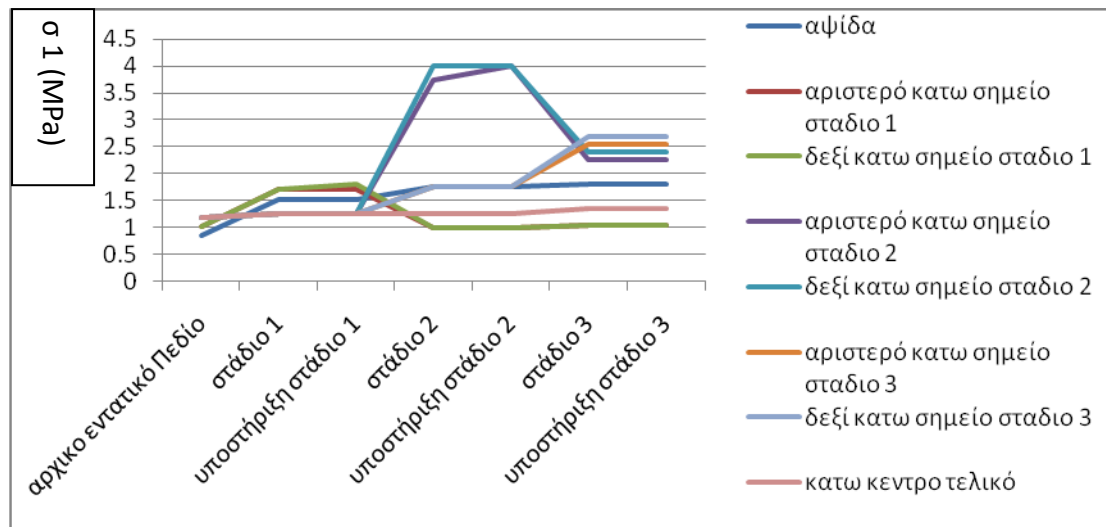
Από το Σχήμα 6.36 παρατηρείται μια μέγιστη τιμή μετακίνησης της τάξεως του 0,00168m και μια ελάχιστη τιμή 0,000104m.

Πίνακας 6.10: Μοντέλο A1

Μέγιστη τάση MPa	Μέγιστη μετακίνηση m	Καμπτική ροπή (+) MN*m	Καμπτική ροπή (-) MN*m	Μέγιστη μετ. αγκυρίου m	Ελάχιστη μετ. αγκυρίου M
4	0,00165	0,00459	0,000142	0,00168	0,000104

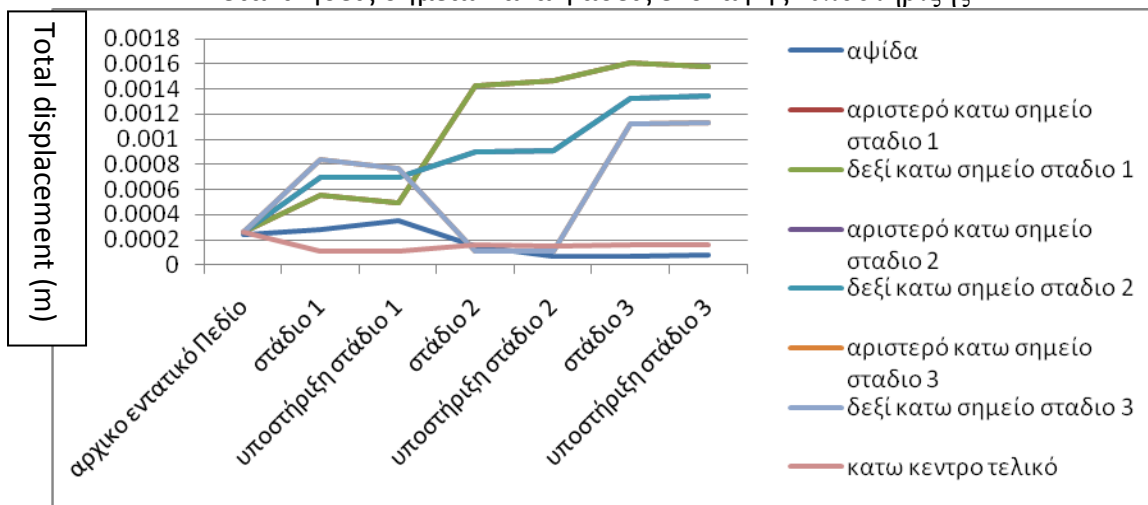
### 6.2.3.2. Μοντέλο A2:

- Απόκριση εδάφους στα σημεία του ανοίγματος.
- Τάσεις σημείων ανά φάσεις εκσκαφής- υποστήριξης.



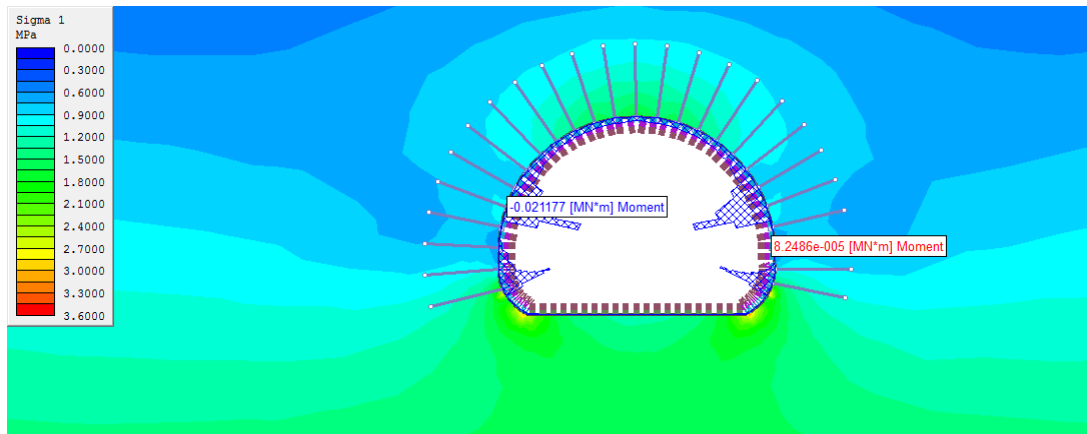
Σχήμα 6.37: Απεικόνιση των τάσεων στα επιλεγμένα σημεία ανά φάση εκσκαφής-υποστήριξης.

- Μετακινήσεις σημείων ανά φάσεις εκσκαφής- υποστήριξης.



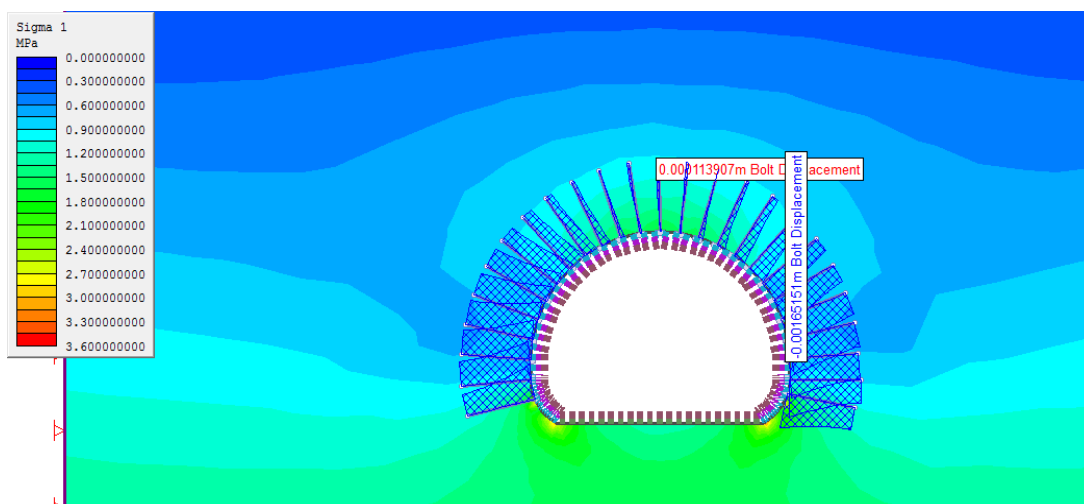
Σχήμα 6.38: Απεικόνιση των μετακινήσεων στα επιλεγμένα σημεία ανά φάση εκσκαφής-υποστήριξης.

- Απόκριση υποστήριξης A2:



Σχήμα 6.39: Καμπτική ροπή υποστήριξης A2.

Σύμφωνα με το Σχήμα 6.39 προκύπτει μια μέγιστη θετική τιμή της τάξεως του 0,0211 MN\*m και μια μέγιστη αρνητική τιμή της τάξης του 0,0000824 MN\*m.



Σχήμα 6.40: Μετακινήσεις αγκυρίων.

Από το Σχήμα 6.40 παρατηρείται μια μέγιστη τιμή μετακίνησης της τάξεως του 0,00165m και μια ελάχιστη τιμή 0,00011390m.

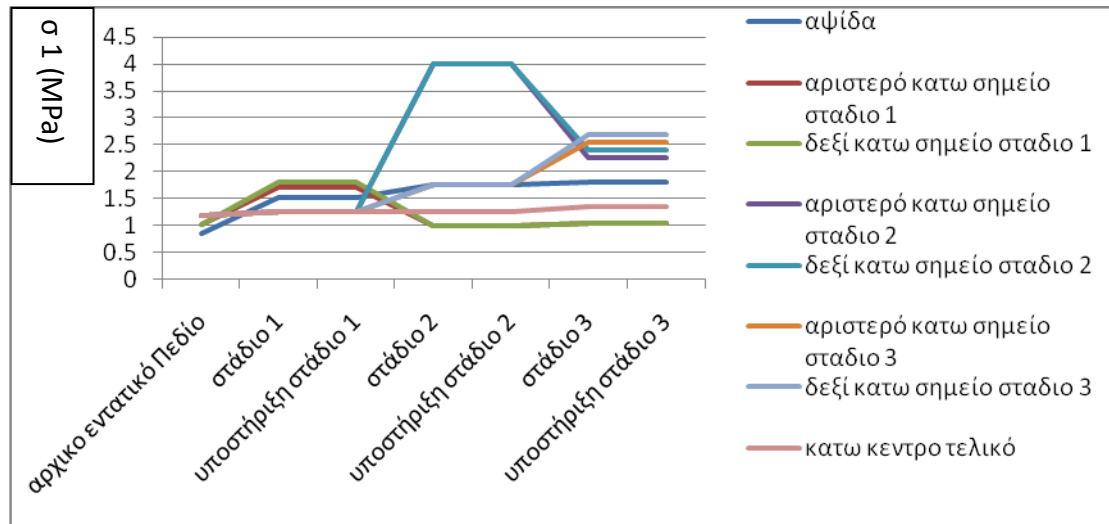
Πίνακας 6.11: Μοντέλο A2

Μέγιστη τάση MPa	Μέγιστη μετακίνηση m	Καμπτική ροπή (+) MN*m	Καμπτική ροπή (-) MN*m	Μέγιστη μετ. αγκυρίου m	Ελάχιστη μετ. αγκυρίου m
4	0,00161	0,0211	0,0000824	0,00165	0,00011390



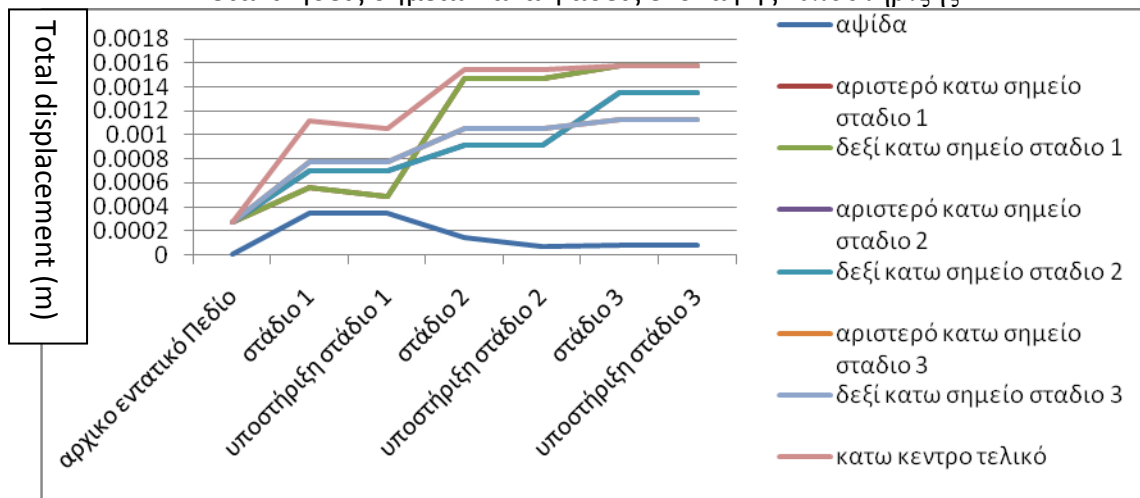
### 6.2.3.3. Μοντέλο A3:

- Απόκριση εδάφους στα σημεία του ανοίγματος.
- Τάσεις σημείων ανά φάσεις εκσκαφής- υποστήριξης.



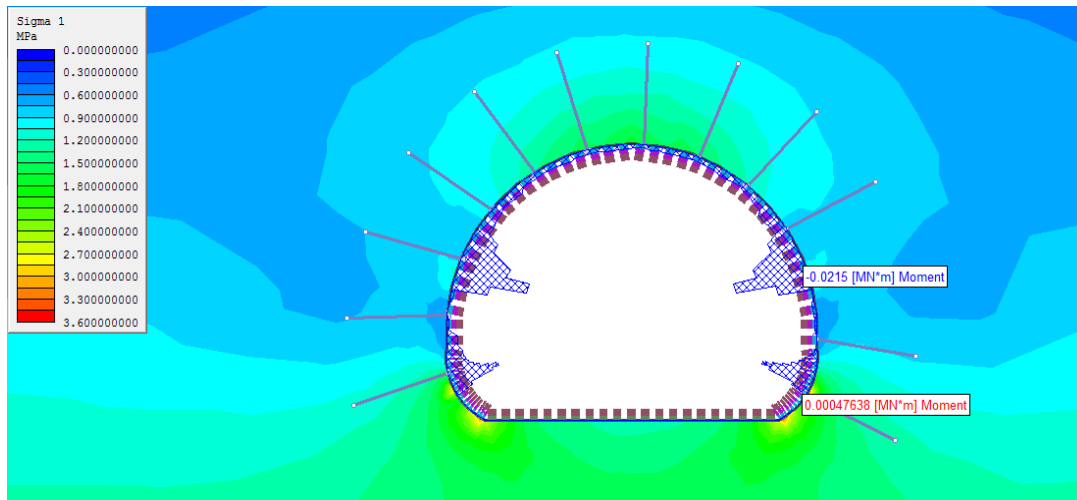
Σχήμα 6.41: Απεικόνιση των τάσεων στα επιλεγμένα σημεία ανά φάση εκσκαφής-υποστήριξης.

- Μετακινήσεις σημείων ανά φάσεις εκσκαφής- υποστήριξης.



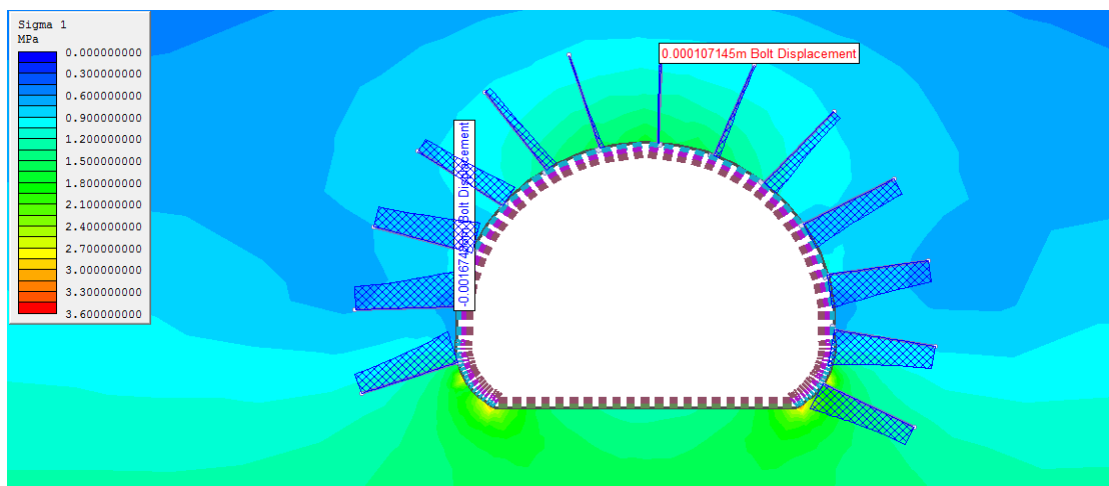
Σχήμα 6.42: Απεικόνιση των μετακινήσεων στα επιλεγμένα σημεία ανά φάση εκσκαφής-υποστήριξης.

- Απόκριση υποστήριξης A3:



Σχήμα 6.43: Καμπτική ροπή υποστήριξης A3.

Σύμφωνα με το Σχήμα 6.43 προκύπτει μια μέγιστη θετική τιμή της τάξεως του  $0,0215 \text{ MN} \cdot \text{m}$  και μια μέγιστη αρνητική τιμή της τάξεως του  $0,000476 \text{ MN} \cdot \text{m}$ .



Σχήμα 6.44: Μετακινήσεις αγκυρίων.

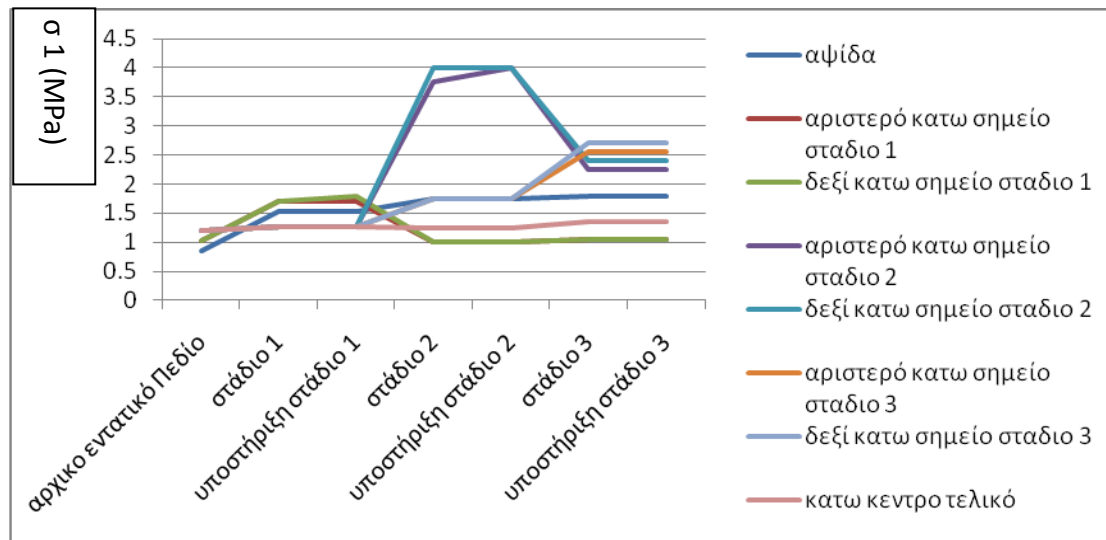
Από το Σχήμα 6.44 παρατηρείται μια μέγιστη τιμή μετακίνησης της τάξεως του  $0,00167 \text{ m}$  και μια ελάχιστη τιμή  $0,000107 \text{ m}$ .

Πίνακας 6.12: Μοντέλο A3

Μέγιστη τάση MPa	Μέγιστη μετακίνηση m	Καμπτική ροπή (+) MN*m	Καμπτική ροπή (-) MN*m	Μέγιστη μετ. αγκυρίου m	Ελάχιστη μετ. αγκυρίου m
4	0,0016	0,0215	0,000476	0,00167	0,000107

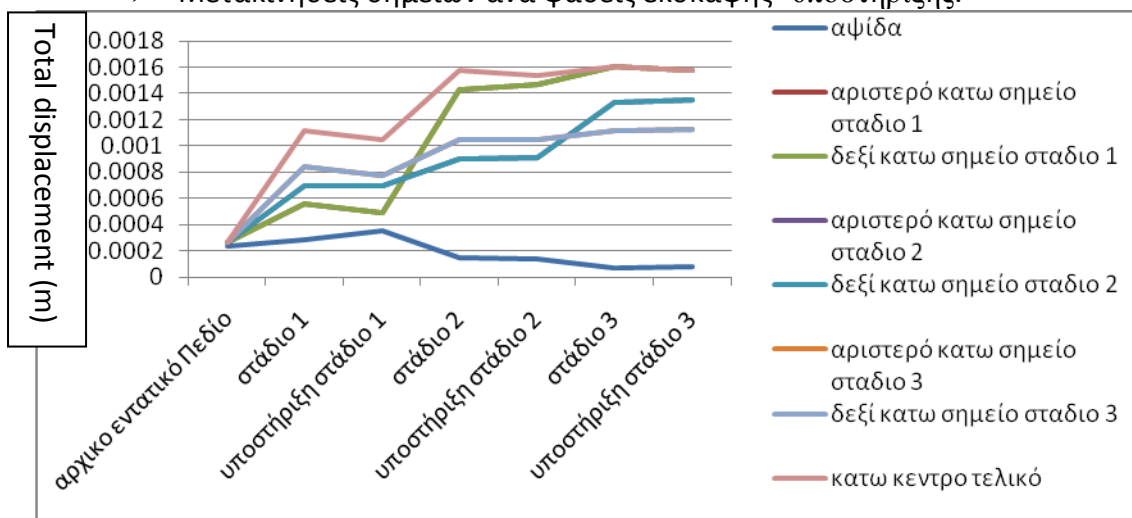
#### 6.2.3.4. Μοντέλο A4:

- Απόκριση εδάφους στα σημεία του ανοίγματος.
- Τάσεις σημείων ανά φάσεις εκσκαφής- υποστήριξης.



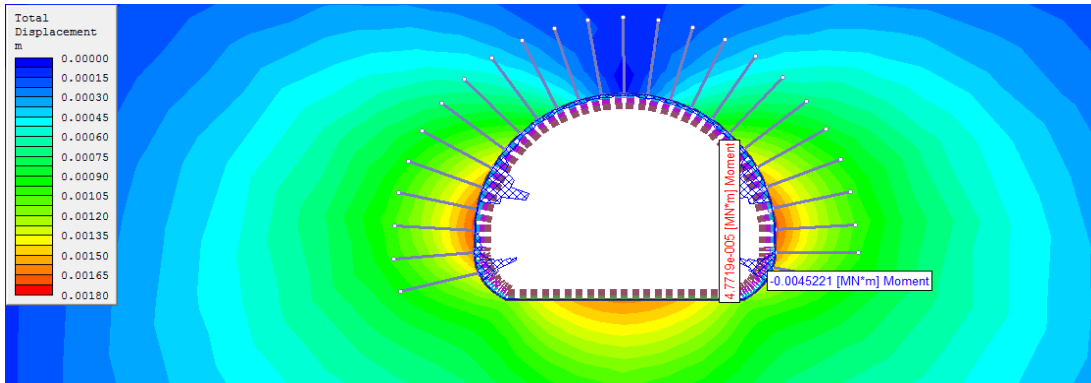
Σχήμα 6.45: Απεικόνιση των τάσεων στα επιλεγμένα σημεία ανά φάση εκσκαφής-υποστήριξης.

- Μετακινήσεις σημείων ανά φάσεις εκσκαφής- υποστήριξης.



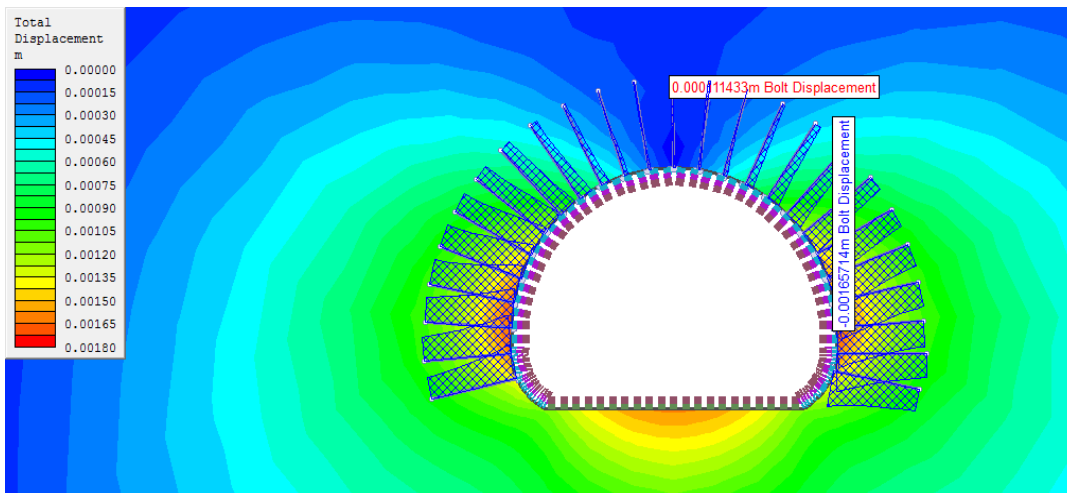
Σχήμα 6.46: Απεικόνιση των μετακινήσεων στα επιλεγμένα σημεία ανά φάση εκσκαφής-υποστήριξης.

- Απόκριση υποστήριξης A4:



Σχήμα 6.47: Καμπτική ροπή υποστήριξης A4.

Σύμφωνα με το Σχήμα 6.47 προκύπτει μια μέγιστη θετική τιμή της τάξεως του 0,00452MN\*m και μια μέγιστη αρνητική τιμή της τάξης του 0,000047719MN\*m.



Σχήμα 6.48: Μετακινήσεις αγκυρίων.

Από το Σχήμα 6.48 παρατηρείται μια μέγιστη τιμή μετακίνησης της τάξεως του 0,00165m και μια ελάχιστη τιμή 0,0001114m.

Πίνακας 6.13: Μοντέλο A4

Μέγιστη τάση MPa	Μέγιστη μετακίνηση m	Καμπτική ροπή (+) MN*m	Καμπτική ροπή (-) MN*m	Μέγιστη μετ. αγκυρίου m	Ελάχιστη μετ. αγκυρίου m
4	0,0016	0,00452	0,000047719	0,00165	0,0001114

## 6.3. Γενικός συγκεντρωτικός πίνακας

Στον Πίνακα 6.14 παρατίθενται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των εκτιμώμενων τιμών καμπτικών ροπών και μετατοπίσεων για κάθε μοντέλο.

Πίνακας 6.14: Γενικός συγκεντρωτικός πίνακας

soil	model	Soil reply		Support reply			
		Sigma1 MPa	Total displacement m	Bending moment (+/-) MN*m		Bolt displacement m	
MARL	M1	4	0,009	0,019	0,0026	0,00944	0,000556
	M2	3,75	0,0084	0,0672	0,0120	0,0091	0,00054
	M3	4	0,009	0,0718	0,0074	0,00937	0,000544
	M4	3,75	0,009	0,01787	0,002583	0,00937	0,000544
FLYSCH	F1	4	0,0033	0,00816	0,000417	0,00325	0,000673
	F2	4	0,0033	0,0347	0,00131	0,00329	0,00065
	F3	3,95	0,0033	0,0358	0,001343	0,00330	0,000668
	F4	4	0,0033	0,00790	0,000272	0,00323	0,000545
CLAY	C1	4	0,00165	0,00459	0,000142	0,00168	0,000104
	C2	4	0,00161	0,0211	0,000082	0,00165	0,000113
	C3	4	0,0016	0,0215	0,000476	0,00167	0,000107
	C4	4	0,0016	0,00452	0,000047	0,00165	0,000111

### 7. Συμπεράσματα

#### 7.1. Συμπεράσματα

Το αρχικό πρόβλημα συνίσταται στην εύρεση του καταλληλότερου μοντέλου υποστήριξης με την μέθοδο N.A.T.M. σε κάθε εδαφικό σχηματισμό μέσα από την σύγκριση στις τάσεις και τις μετακινήσεις των εδαφών αλλά και από τις καμπτικές ροπές και τις παραμορφώσεις των αγκυρίων της υποστήριξης. Στην ενότητα αυτή παρατίθενται τα συμπεράσματα για κάθε μοντέλο ανά εδαφικό σχηματισμό.

##### 7.1.1. Μάργα

Οι μάργες αποτελούν μείγμα αργίλων με ανθρακικό ασβέστιο ( $\text{CaCO}_3$ ) σε ποσοστό 35-65%. Επειδή το ανθρακικό ασβέστιο δεν παρουσιάζει τις παραπάνω ιδιότητες των αργιλικών ορυκτών αυτονόητο είναι ότι η μηχανική συμπεριφορά των μαργών είναι πολύ καλύτερη απ'αυτήν των αργίλων.

Η μάργα θεωρείται το πιο συνεκτικό εδαφικό υλικό και από τα τρία εξεταζόμενα οπότε το λογικό θα ήταν και στα αποτελέσματα να παρουσιάζει τις μικρότερες τιμές τάσεων, μετακινήσεων, και παραμορφώσεων.

Όπως προκύπτει από την μικρότερη τιμή της  $\sigma_1$  παρουσιάζουν τα μοντέλα M2 και M4, ενώ την μικρότερη μετατόπιση παρουσιάζει το μοντέλο M2.

Στην απόκριση της υποστήριξης παρατηρείται ότι τα μικρότερα μεγέθη καμπτικής ροπής παρατηρούνται στο μοντέλο M4, όσον αναφορά την απόκριση των αγκυρίων οι μικρότερες τιμές των μετατοπίσεων παρατηρούνται στα μοντέλα M2 και M4 με πολύ μικρές διαφορές μεταξύ τους.

Συμπεραίνεται λοιπόν ότι από τα αποτελέσματα που δίνονται καλύτερα μοντέλα υποστήριξης είναι το M4 δηλαδή πάχος σκυροδέματος 0,20 m και πυκνότητα κοχλίωσης ανά ένα μέτρο.

##### 7.1.2. Μαργαϊκός Φλύσχης

Φλύσχης είναι ο όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει μια σειρά από εναλλαγές στρωμάτων αργίλων, ψαμμιτών, μαργών, ασβεστολίθων και κροκαλοπαγών. Για το Μηχανικό έχει μεγάλη σημασία το υλικό από το οποίο αποτελείται ο φλύσχης διότι για παράδειγμα άλλες είναι οι



ιδιότητες της αργίλου (πλαστικότητα, υδατοστεγανότητα, συμπιεστότητα και τάση για κατολίσθηση) και άλλες του ψαμμίτη ιδίως όταν πρόκειται για παχιά στρώματα ψαμμίτη το υλικό χαρακτηρίζεται από ευστάθεια των κλιτύων, υψηλή αντοχή σε φορτία κ.λ.π.

Στον φλύσχη δεν αναμένονται τόσο καλές ιδιότητες όσο στην μάργα και όπως έδειξαν και τα αποτελέσματα από τον γενικό συγκεντρωτικό πίνακα προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

Όσον αναφορά την εδαφική απόκριση, η μικρότερη τιμή της  $\sigma_1$  παρατηρείται στο μοντέλο Φ3 ενώ οι μετατοπίσεις και στα τέσσερα μοντέλα είναι οι ίδιες.

Όσον αναφορά την απόκριση της υποστήριξης πάλι οι μικρότερες τιμές της καμπτικής ροπής εμφανίζονται στο μοντέλο Φ4 ενώ και οι μετατοπίσεις των αγκυρίων στο συγκεκριμένο μοντέλο είναι μικρότερες.

Επομένως και στον φλύσχη το βέλτιστο μοντέλο υποστήριξης N.A.T.M. είναι το Φ4 με πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος 0,20 m και πυκνότητα κοχλίωσης ανά 1 m.

### 7.1.3. Στιφρή Άργιλος

Η άργιλος ανήκει στην κατηγορία των ιζηματογενών πετρωμάτων, αφού σχηματίζεται από την καθίζηση διάφορων προϊόντων αποσάθρωσής μέσα στο νερό (ποταμοί, λίμνες, θάλασσες κ.λ.π.). Είναι πέτρωμα μαλακό, εύπλαστο, χωρίς συνοχή, με ειδικό βάρος 2-2,2 g/cm<sup>3</sup> περίπου και χωρίς σκληρότητα.

Όπως παρατηρείται λοιπόν η στιφρή άργιλος παρουσιάζει χειρότερες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με τους άλλους δυο εδαφικούς σχηματισμούς που χρησιμοποιήθηκαν και παρουσιάστηκαν και αυτό φαίνεται και από τα αποτελέσματα των μετρήσεων που διεξήχθησαν.

Όσον αναφορά την εδαφική απόκριση οι τιμές της  $\sigma_1$  και των μετατοπίσεων και στα τέσσερα μοντέλα είναι οι ίδιες.

Όσον αναφορά την απόκριση της υποστήριξης οι μικρότερες τιμές της καμπτικής ροπής παρατηρούνται στο μοντέλο A4, στο οποίο παρατηρούνται και οι μικρότερες τιμές των μετατοπίσεων των αγκυρίων.

## 8. Προτάσεις

Η N.A.T.M. είναι μία μέθοδος πολύ ευέλικτη που εδώ και πολλά χρόνια εξελίσσεται πάνω σε όποιο πρόβλημα μπορεί να αφορά μια υπόγεια διάνοια, καταφέροντας να επικρατήσει και να παραγκωνήσει όλες τις άλλες μεθόδους εκσκαφής.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αναφέρεται σε τρεις εδαφικούς σχηματισμούς που θεωρήθηκαν αντιπροσωπευτικοί. Σημειώνεται όμως ότι δεν έχουν συμπεριληφθεί ιδιαίζουσες περιπτώσεις με ασυνέχειες και παρουσία υδροφόρου ορίζοντα, παράγοντες που ίσως διαδραμάτιζαν σημαντικό ρόλο και έδιναν μια άλλη τροπή στην εργασία αυτή.

Για μια πιο ολοκληρωμένη προσέγγιση στο ως άνω θέμα προτείνεται:

- ✓ Η διερεύνηση της επίδρασης παραγόντων όπως οι ασυνέχειες, υπόγεια ύδατα κ.τ.λ.
- ✓ Η διερεύνηση σε τρεις διαστάσεις ώστε να εκτιμηθεί και η απόκριση του μετώπου
- ✓ Η διερεύνηση σε διαφορετικά βάθη ώστε να διαφανεί και η επίδραση του βαρυτικού πεδίου.

## 9. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

### ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α-ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1: Τμηματικός διαχωρισμός τυπικής διατομής σήραγγας (Κωμοδρόμος, 2006) .....	4
<u>Σχήμα 1.2: Ευπαλίνιο όρυγμα</u> ( <a href="http://users.forthnet.gr/ath/deleps/Unknown_Hellenic_History/Eypalinio_orygma.html">http://users.forthnet.gr/ath/deleps/Unknown_Hellenic_History/Eypalinio_orygma.html</a> ) .....	5
Σχήμα 1.3: Αποστραγγιστική σήραγγα φράγματος Γαδουρά Ρόδου. (Καββαδάς, 2006) .....	6
Σχήμα 1.4: Αστοχία οδικής σήραγγας στο στόμιο (Καββαδάς, 2006) .....	6
Σχήμα 2.1: Μετρήσεις της κάθετης τάσης σε σχέση με το βάθος της εκσκαφής (Hoek et al, 1995)...7	
Σχήμα 2.2: Ανακατανομή των τάσεων γύρω από υπόγειο άνοιγμα. (Hoek, 2000). ....	11
Σχήμα 2.3: κατεύθυνση κυρίων τάσεων στο πέτρωμα όπου $\sigma_h = 3\sigma_v$ όπου $\sigma_v$ , κατακόρυφη κύρια τάση (Hoek, 2000). ....	12
Σχήμα 2.4: Καμπύλες κατανομής συνοριακών εφαπτομενικών τάσεων γύρω από ελλειπτικό άνοιγμα για εντατικό πεδίο όπου $k=0, 1/3, 1$ για διαφόρους λόγους πλάτους προς ύψος έλλειψης (Αγιουτάντης, 2002 πηγή: Obert and Duvall, 1967).....	13
Σχήμα 2.5: Καμπύλες ισοτασικών καμπυλών και τροχιών τάσης γύρω από υπόγειο άνοιγμα (Αγιουτάντης, 2002 πηγή: Hoek and Brown, 1992) .....	14
Σχήμα 2.6: Διανύσματα μετατόπισης μέσα στη βραχόμαζα που περιβάλλει προωθούμενη κυκλική σήραγγα (Hoek, 1980) .....	15
Σχήμα 2.7: Μορφή της παραμόρφωσης στη βραχόμαζα που περιβάλλει μια υπό διάνοιξη σήραγγα (Hoek, 2000). ....	15
Σχήμα 2.8: Καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης και καμπύλες Panet σε ανυποστήρικτη σήραγγα. (Καββαδάς, 2004) .....	16
Σχήμα 3.1: Ασθενείς λεπτές στρώσεις πετρώματος αναρτημένες από συμπαγές πέτρωμα (Αγιουτάντης, 2002) .....	23
Σχήμα 3.2: Αγκύρωση σφήνας οροφής. (Αγιουτάντης, 2002) .....	23
Σχήμα 3.3: Ήλος με εγκοπή και σφήνα (Πηγή: Σοφιανός, 2002) .....	24
Σχήμα 3.4: Ήλοι με διευρυμένο κέλυφος (Πηγή: Σοφιανός, 2002) .....	25
Σχήμα 3.5: Ραβδοχάλυβας πακτωμένος με ένεμα (Πηγή: Σοφιανός, 2002).....	27
Σχήμα 3.6: Διαδικασία τοποθέτησης ηλώσεων ρητίνης, (1) Διάνοιξη διατρήματος, (2) τοποθέτηση φυσιγγίων ρητίνης, (3) εισχώρηση ήλου,(4) περιστροφή ήλου προκειμένου να αναμειχθούν τα συστατικά, (5) εφαρμογή ώσης με κατάλληλο μηχανήμα για 20-30 δευτερόλεπτα .(Αγιουτάντης, 2001). ....	29
Σχήμα 37: Ήλοι τριβής split set (Hoek, 2000).....	30
Σχήμα 3.8: Ήλος τριβής Swellex (Hoek, 2000).....	31
Σχήμα 3.9: Τυπικά τεχνικά χαρακτηριστικά συστημάτων αγκύρωσης (USACE, 1997). ....	31
Σύγκριση χαρακτηριστικών των ήλων τριβής με τα υπόλοιπα αγκύρια, καθώς και περιγραφή των επιμέρους πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων γίνεται περιληπτικά στο Σχήμα 3.2.2.10. ....	31
Σχήμα 3.10: Δικτύωμα οροφής (πηγή: Σοφιανός, 2002) .....	32
Σχήμα 3.11:(α) Αρθρωτικά πλαίσια (πηγή: Σοφιανός, 2002), (β) Συναρμολόγηση αρθρώσεων (Hoek, 2000). ....	35
Σχήμα 3.12: Δικτυωτά πλαίσια τριών και τεσσάρων (διαμηκών) ράβδων (Σοφιανός, 2002). ....	37
Σχήμα 3.13: Δικτυωτά πλαίσια (Καββαδάς, 2004).....	38
Σχήμα 3.14: Σύνδεση δικτυωτού πλαισίου (Σοφιανός, 2002) .....	38

Σχήμα 3.15: Παραγωγή εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Hoek, 2000).....	40
Σχήμα 4.1: Κεφαλή TBM (Εξαδάκτυλος, 2006) .....	43
Σχήμα 4.2: TBM με πλευρικούς grippers (Εξαδάκτυλος, 2006). ....	44
Σχήμα 4.3: Ο κύκλος της μεθόδου διάτρησης – ανατίναξης (Ρόζος, 1989).....	47
Σχήμα 4.4: Μηχανή όρυξης Road header (Εξαδάκτυλος, 2006).....	49
Σχήμα 4.5: Τα βασικά τμήματα ενός Roadheader (Εξαδάκτυλος, 2006).....	49
Σχήμα 4.6: Υδραυλική κρουστική σφύρα.(Ντιούδη, 2010) .....	50
Σχήμα 4.7: Μέθοδος κοπής και επιχωμάτωσης. (Μαραγκός, 1999) .....	52
Σχήμα 4.8: Καμπύλη σύγκλισης αποτόνωσης βραχομάζας (Καββαδάς, 2004) .....	54
Σχήμα 4.9: Επιρροή του χρόνου τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης στην πίεση της βραχομάζας επί της υποστήριξης της σήραγγας (Καββαδάς, 2004) .....	55
Σχήμα 4.10: φάσεις εκσκαφής ανά είδος πετρώματος (Καββαδάς, 2004) .....	57
Σχήμα 4.11: Εκσκαφή με την μέθοδο N.A.T.M. Όπου διακρίνονται οι φάσεις εκσκαφής και οι πλευρικές στοές (Καββαδάς, 2004) .....	58
Σχήμα 4.12: Μέθοδος Q (NGI) (Καββαδάς, 2004) .....	59
Σχήμα 4.13: Μέθοδος Bieniawski (Καββαδάς, 2004).....	60
Σχήμα 4.14: Μέθοδος Terzaghi (Καββαδάς, 2004).....	60
Σχήμα 4.15: Ταξινόμηση βραχομάζας κατά GSI (Καββαδάς, 2004) .....	62
Σχήμα 4.16: Τυπικές διατομές σηράγγων (Καββαδάς, 2004) .....	63
Σχήμα 4.17: Τυπικές διατομές σχεδιασμού σηράγγων με την N.A.T.M. (Καββαδάς, 2004) .....	63
Σχήμα 4.18: Τυπικές διατομές σχεδιασμού σηράγγων με την N.A.T.M. (Καββαδάς, 2004) .....	64
Σχήμα 4.19: Τυπικές διατομές σχεδιασμού σηράγγων με την N.A.T.M. (Καββαδάς, 2004) .....	64
Σχήμα 4.20: Τυπικές διατομές σχεδιασμού σηράγγων με την N.A.T.M. (Καββαδάς, 2004) .....	65
Σχήμα 5.1: Τυπική γεωμετρία διατομής. ....	75
Σχήμα 5.2: Ιδιότητες Μάργας.....	77
Σχήμα 5.3: Ιδιότητες Φλύσχη. ....	78
Σχήμα 5.4: Ιδιότητες Αργίλου .....	78
Σχήμα 5.5: Ιδιότητες σκυροδέματος.....	79
Σχήμα 5.6: Ιδιότητες Lattice girders .....	79
Σχήμα 5.7: Ιδιότητες Αγκυρίων. ....	80
Σχήμα 5.8: Αρχικό εντατικό πεδίο.....	81
Σχήμα 5.9: Αρχική φάση εκσκαφής.....	81
Σχήμα 5.10: Υποστήριξη αρχικής φάσης .....	82
Σχήμα 5.11: Φάση εκσκαφής 2.....	82
Σχήμα 5.12: Υποστήριξη φάσης εκσκαφής 2. ....	83
Σχήμα 5.13: Φάση εκσκαφής 3.....	84
Σχήμα 5.14: Τελική υποστήριξη σήραγγας. ....	84
Σχήμα 6.1: Απεικόνιση των τάσεων στα επιλεγμένα σημεία ανά φάση εκσκαφής-υποστήριξης. ....	87
Σχήμα 6.2: Απεικόνιση των μετακινήσεων στα επιλεγμένα σημεία ανά φάση εκσκαφής-υποστήριξης. ....	87
Σχήμα 6.3: Καμπτική ροπή υποστήριξης M1. ....	88
Σχήμα 6.4: Μετακινήσεις αγκυρίων. ....	88
Σχήμα 6.5: Απεικόνιση των τάσεων στα επιλεγμένα σημεία ανά φάση εκσκαφής-υποστήριξης. ....	89
Σχήμα 6.6: Απεικόνιση των μετακινήσεων στα επιλεγμένα σημεία ανά φάση εκσκαφής-υποστήριξης. ....	89
Σχήμα 6.7: Καμπτική ροπή υποστήριξης M2. ....	90
Σχήμα 6.8: Μετακινήσεις αγκυρίων .....	90

[illegible]

Σχήμα 6.47: Καμπτική ροπή υποστήριξης A4.....	110
Σχήμα 6.48: Μετακινήσεις αγκυρίων. ....	110



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β- ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1: αντιστοιχία του συντελεστή αποτόνωσης των τάσεων ( $\lambda$ ) και του συντελεστή χαλάρωσης ( $E/E_0$ ) .....	18
Πίνακας 2.2: απομείωση του ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας λόγω ερπυσμού .....	19
Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικοί τύποι στοιχείων.....	70
Πίνακας 5.2: Γενικές ρυθμίσεις .....	76
Πίνακας 5.3: Παράμετροι των μοντέλων.....	80
Πίνακας 6.1: Ομαδοποίηση μοντέλων ανά κατηγορία εδαφικού σχηματισμού.....	86
Πίνακας 6.2: Μοντέλο M1.....	88
Πίνακας 6.3: Μοντέλο M2.....	90
Πίνακας 6.4: Μοντέλο M3.....	92
Πίνακας 6.5: Μοντέλο M4.....	94
Πίνακας 6.6: Μοντέλο Φ1 .....	96
Πίνακας 6.7: Μοντέλο Φ2 .....	98
Πίνακας 6.8: Μοντέλο Φ3 .....	100
Πίνακας 6.9: Μοντέλο Φ4 .....	102
Πίνακας 6.10: Μοντέλο A1 .....	104
Πίνακας 6.11: Μοντέλο A2 .....	106
Πίνακας 6.12: Μοντέλο A3 .....	108
Πίνακας 6.13: Μοντέλο A4 .....	110
Πίνακας 6.14: Γενικός συγκεντρωτικός πίνακας.....	111

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### ❖ Αναφορές από Ελληνική βιβλιογραφία:

1. Αγιουτάντης, Ζ., (2002), «Στοιχεία Γεωμηχανικής, Μηχανική Πετρωμάτων», Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα.
2. Βιόπουλος, Π. (2006), «Παραμετρική διερεύνηση εντατικής κατάστασης κατά τη διάνοιξη σήραγγας με τη μέθοδο της προπασσάλωσης οροφής», διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών, Πολυτεχνείο Κρήτης
3. Δουβής, Π. (2002), «Παραμετρική ανάλυση ευστάθειας σήραγγας που εξορύσσεται με τη μέθοδο της προπασσάλωσης οροφής», Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.
4. Εξαδάκτυλος Γ. (2000), «Συστήματα Υπογείων Έργων», Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών, Πολυτεχνείο Κρήτης.
5. Εξαδάκτυλος, Γ. και Μ. Σταυροπούλου (2006), «Σχεδιασμός και Μηχανική των Σηράγγων και των Υπογείων Έργων», Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης
6. Καββαδάς Μ. (2007), «Υπολογιστικές μέθοδοι ανάλυσης υπογείων έργων». Πανεπιστημιακές σημειώσεις ΕΜΠ, Αθήνα.
7. Κωμοδρόμος, Αιμ., (2006), «Τεχνική Γεωλογία και Σήραγγες», Πανεπιστημιακές σημειώσεις μαθήματος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
8. Κωμοδρόμος Αιμ. (2008), «Σήραγγες και υπόγεια έργα», Πανεπιστημιακές σημειώσεις μαθήματος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
9. Κωνσταντάς Ι. (2009), «Μοντελοποίηση εντατικο – παραμορφωσιακού πεδίου κατά την προχώρηση σήραγγας με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων» διπλωματική εργασία, τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.
10. Μαραγκός Χ. (1999), «Τεχνικά έργα Υποδομής» Μαραγκός Χ., Θεσσαλονίκη
11. Ντιούδη Α. (2010), «Παραμετρική διερεύνηση μέτρων υποστήριξης οδικής σήραγγας με αριθμητικό προσομοίωμα», μεταπτυχιακή διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης.
12. Παγάνης Λ. (2009), «Μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς ινοπλισμένου σκυροδέματος με πιθανές εφαρμογές στην υποστήριξη υπογείων τεχνικών έργων», διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης.
13. Παπαντώνη Χ. (2007), «Παραμετρική διερεύνηση εναλλακτικών συστημάτων υποστήριξης σε οδική σήραγγα», μεταπτυχιακή διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης.

14. Ρόζος (1989), «Εγχειρίδιο τεχνικής γεωλογίας Ι» 13η διάλεξη Ηλεκτρονικές σημειώσεις Ε.Μ. Πολυτεχνείου, Αθήνα.
15. Σοφιανός, Α.Ι (2000), «Υποστήριξη Υπογείων Ανοιγμάτων», Πανεπιστημιακές σημειώσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα.
16. Σοφιανός Α.Ι., (2002), «Τεχνικές διάνοιξης σηράγγων», Τόμος Ι Πανεπιστημιακές σημειώσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα.
17. Σοφιανός Α. (2008), «Μέτρα υποστήριξης σηράγγων», Πανεπιστημιακές Σημειώσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα.

### ❖ Αναφορές από διεθνή βιβλιογραφία:

18. 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.
19. Argyris, J.H. and Kelsey, S. (1960) «Energy Theorems and Structural Analysis», Plenum press
20. Atlas Copco (2005), «Rock & Soil Reinforceme», third edition
21. Brown and Hoek, (1978)
22. Bieniawski, Z.T. (1979) , «The geomechanics classification in rock engineering applications».
23. Brady, B.H.G and E.T. Brown (1985), «Rock Mechanics for underground mining», George Allen and Unwin
24. Desai, C., (2001), «Introductory Finite Element Method», CRC Press.
25. Duddeck H., (1988), Application of Numerical Analyses for Tunneling, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics.
26. E.Hoek - E.T. Brown, (1980), «Underground Excavations in rock».
27. Fagan, M.J. (1996), «Finite Element Analysis», Theory and Practice, Longman.
28. Goodman, (1989), «Introduction to Rock mechanics», 2<sup>nd</sup> edition
29. Koukis, G., Rozos, D., (1993), «Mineralogical composition and texture of the Miocene sediments of the NW Peloponnesus», Greece. Proc of Int. Symp. on Geotechnical Engineering
30. Panet M. (1995), «Le calcul des tunnels par la methode convergence-confinement», Presses de l' Ecole Nationale des Ponts et Chaussees.
31. Rabcewicz L. & Golser J., (1973), «Principles of dimensioning the supporting system for the New Austrian Tunnelling Method», Water Power of Hard Soils – Soft Rocks, Athens, Balkema, Rotterdam.
32. Ratan Raj Tatiya, (2005) «Surface and underground excavations methods

Techniques and Equipment»

33. Sinha R.S.: «Underground Structures, Design and Instrumentation», (1989) Tamuz M.:

“Understanding accident precursors”.

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

35. Youakim et al., (1999), «Nonlinear Analysis Of tunnels In Clayey/Sandy Soil with Concrete Lining», Engineering Structures

### ❖ Αναφορές από ηλεκτρονικά περιοδικά σχετικά με σήραγγες

36. <http://www.tunnelonline.info/digitaledition>

37. <http://tunnellingjournal.com/>

38. [http://tunnellingjournal.com/feature...lapses'/](http://tunnellingjournal.com/feature...lapses/)

### ❖ Αναφορές από διαδύκτιο:

39. [www.iok.gr](http://www.iok.gr)

40. <http://www.tunnel-online.info/en/index.html>

41. <http://www.railsystem.net/natm.htm>

42. <http://www.natm.at/>

43. <http://at.devel.dywidag-systems.com/de/produkte/geotechnik/dywidag-felsbolzen/uebersicht.html>

44. [www.atlascopco.com](http://www.atlascopco.com)

45. ([http://users.forthnet.gr/ath/deleps/Unknown\\_Hellenic\\_History/Eypalinio\\_orygma.html](http://users.forthnet.gr/ath/deleps/Unknown_Hellenic_History/Eypalinio_orygma.html))

46. <http://www.tunneltalk.com/Brightwater-under-pressure.php>

### ❖ Βιβλιογραφία Σχημάτων- Πινάκων:

---

<sup>i</sup> Κωμοδρόμος Αιμ., (2008), «Σήραγγες και υπόγεια έργα», Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

<sup>ii</sup> ([http://users.forthnet.gr/ath/deleps/Unknown\\_Hellenic\\_History/Eypalinio\\_orygma.html](http://users.forthnet.gr/ath/deleps/Unknown_Hellenic_History/Eypalinio_orygma.html))

<sup>iii</sup> Εποπτικό υλικό διαλέξεων του μαθήματος «Ειδικά Γεωτεχνικά Έργα - Γεωτεχνική Σηράγγων» 9ο Εξ. ΠΟΑ. ΜΗΧ. - Ακαδ. Έτος 2005 - 06

<sup>v</sup> Hoek et al,(1995) «Support of underground excavations in hard rock»

<sup>vi</sup> Hoek, E. (2000), “Rock Engineering”, Course Notes, published in the Web.

<sup>vii</sup> Αγιουτάντης, Ζ., (2002), Στοιχεία Γεωμηχανικής, Μηχανική Πετρωμάτων, Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα.

<sup>viii</sup> Hoek, E. and Brown, E.T. (1980), «Empirical strength criterion for rock masses. J. Geotech. Engng Div».

<sup>ix</sup> Καββαδάς, Μ. (2004), Σημειώσεις Σχεδιασμού Υπογείων Έργων, Έκδοση Ε.Μ.Πολυτεχνείου

<sup>xi</sup> US Army Corps of Engineers (USACE) (1997), “Tunnels and shafts in Rock”.

<sup>xii</sup> Σοφιανός, Α.Ι, (2002), Υποστήριξη Υπογείων Ανοιγμάτων, Ε.Μ.Π.

<sup>xiii</sup> Εξαδάκτυλος Γ.( 2000), «Συστήματα Υπογείων Έργων».

<sup>xiv</sup> Ρόζος 1989, Εγχειρίδιο τεχνικής γεωλογίας Ι, 13η διάλεξη Ηλεκτρονικές σημειώσεις Ε.Μ. Πολυτεχνείου.

<sup>xv</sup> Ντιούδη Α. (2010), «Παραμετρική διερεύνηση μέτρων υποστήριξης οδικής σήραγγας με αριθμητικό προσωμοίωμα», μεταπτυχιακή διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης.

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