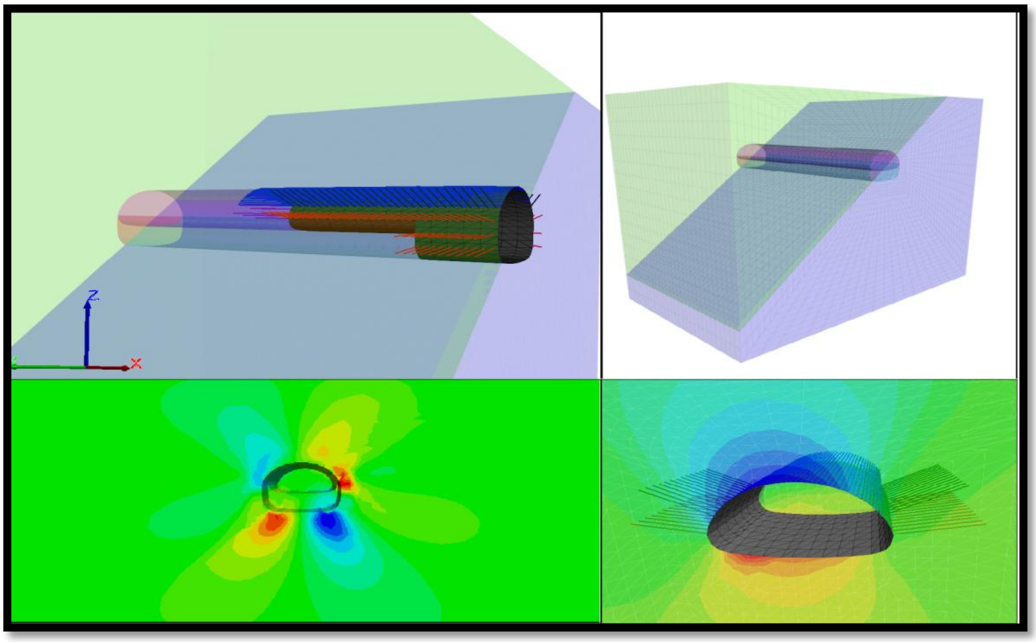
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

# *«Τρισδιάστατη αριθμητική διερεύνηση εντατικοπαραμορφωσιακού πεδίου σήραγγας σε ημίσκληρα πετρώματα»*



Διπλωματική Εργασία

Ευθύμιος Χ. Παπαχρήστος

Εξεταστική επιτροπή

Ζαχαρίας Αγιουτάντης, Καθηγητής (επιβλέπων)

Εμμανουήλ Στειακάκης, Λέκτορας

Dr. Κωνσταντίνος Κακλής

*Χανιά, Σεπτέμβριος 2011*

*Αφιερώνεται,*

*στην οικογένεια μου*

# Πρόλογος

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης. Θα ήθελα λοιπόν να ευχαριστήσω όλους όσους βοήθησαν στην πραγματοποίηση της. Αναλυτικότερα:

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου, κύριο Αγιουτάντη Ζαχαρία, για την ανάθεση του θέματος, τη διόρθωση της εργασίας, τις πολύτιμες συμβουλές του, τη βοήθεια που μου προσέφερε σε κάθε πρόβλημα που εμφανίστηκε, τη συνεχή ενθάρρυνση που μου έδινε και την άριστη συνεργασία μας καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Τον λέκτορα του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Στειακάκη Εμμανουήλ, για το χρόνο που διέθεσε στην διόρθωση και αξιολόγηση της εργασίας, τις συμβουλές του και για τη συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή.

Τον Dr. Κωνσταντίνο Κακλή, για το χρόνο που διέθεσε στη διόρθωση της εργασίας και για τη συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή.

Τον Καθηγητή του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Παενεπιστημίου Θεσσαλίας Κωμοδρόμο Α. και την Dr. Μπαρέκα Σ. για τις πολύτιμες συμβουλές τους και τη βοήθεια που μου προσέφεραν σχετικά με το Flac3D.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιστημονικό συνεργάτη του εργαστηρίου μηχανικής πετρωμάτων Σ. Μαυριγιαννάκη, τον επιστημονικό συνεργάτη του εργαστηρίου Μελέτης και σχεδιασμού εκμεταλλεύσεων Γ. Σαράτση και τον υποψήφιο διδάκτορα Λιαράκο Βαγγέλη για τη βοήθειά τους σε θέματα αριθμητικής επίλυσης προβλημάτων μηχανικής. Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη μεταπτυχιακή φοιτήτρια Στεφανία Βογιατζή για την παροχή τεχνικού αλλά και φωτογραφικού υλικού.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιστημονική συνεργάτιδα του εργαστηρίου μηχανικής πετρωμάτων Φωτεινή Σταθογιάννη για την αμέριστη βοήθεια της και την υποστήριξή της καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Κλείνοντας θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, τους φίλους μου και όσους ήταν πραγματικά δίπλα μου και βοήθησαν να φέρω σε πέρας τις σπουδές μου και να περάσω πέντε υπέροχα χρόνια στα Χανιά.

# Περίληψη


Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο τη διερεύνηση σε τρεις διαστάσεις του πεδίου τάσεων - ανηγμένων παραμορφώσεων που διαμορφώνεται γύρω από σήραγγα κατά τη διάνοιξή της σε επαφή σχηματισμών. Αφορμή για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας αποτέλεσε η κατασκευή σήραγγας στην περιοχή της Α. Βαρβάρας στα σύνορα του νομού Ρεθύμνου – Ηρακλείου. Στο μεγαλύτερο μήκος της σήραγγας η διατομή τέμνεται από την επαφή δύο στρωμάτων ημίβραχου η οποία δημιουργεί σημαντικά γεωτεχνικά προβλήματα.

Σε πολλές περιπτώσεις, στα σημεία της τομής σήραγγας – επαφής παρατηρούνται σημαντικές συγκλίσεις κατά την εκσκαφή – προσωρινή υποστήριξη. Για τη διερεύνηση της επίδρασης της επαφής στην ευστάθεια της σήραγγας επιλέχθηκε η ανάλυση σε τρεις διαστάσεις λόγω της φύσης του προβλήματος.

Για τις τρισδιάστατες παραμετρικές αναλύσεις χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πεπερασμένων διαφορών Flac3D της εταιρίας Itasca Consulting Group. Ο καθαρά γεωτεχνικός χαρακτήρας του λογισμικού, η πληθώρα καταστατικών μοντέλων και στοιχείων υποστήριξης, καθώς και η ταχύτητα επίλυσης και η ακρίβεια που προσφέρει, καθιστούν το συγκεκριμένο λογισμικό κατάλληλο για την ανάλυση του θέματος.

Η προσομοίωση περιλαμβάνει τη σταδιακή εκσκαφή σήραγγας, βασισμένη σε πραγματικό έργο, σε ομογενή σχηματισμό ημίβραχου και σε επαφή σχηματισμών ημίβραχου, την εφαρμογή μέτρων προενίσχυσης βραχομάζας και προσωρινής υποστήριξης.

Τα αποτελέσματα περιλαμβάνουν κατανομές κύριων τάσεων, οριζόντιων και κατακόρυφων μετατοπίσεων, διαγράμματα μετατόπισης για τους κόμβους στη στέψη και τις παρειές, διαγράμματα απόκρισης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης ή προενίσχυσης και διαγράμματα αλληλεπίδρασης πετρώματος – υποστήριξης.

# Περίληψη σε διεθνή γλώσσα (abstract)

This diploma thesis presents a 3D numerical analysis of stress-strain fields for excavated tunnels in soft rocks. The motive for working on this project was the construction of a shallow road tunnel about 150km from the university. There are two geological formations of poor geotechnical properties soft rocks and their contact follows the tunnel's longitude and intersects it for a significant length

In several cases, significant convergences during excavation and temporary support are observed in areas where the tunnel intersects contacting layers.  In order to obtain a better understanding of this phenomenon, a 3-dimensional parametric analysis was carried out.

In order to complete these studies, several numerical models were applied using the finite differences software Flac3D of Itasca Consulting Group. The reason for considering Flac3D as adequate software tool for this project was the fact that Flac3D is a package developed for geotechnical applications, and it provides a wide variety of constitutive models and structural elements, fast analysis and accurate results.

The current analysis includes incremental excavation in a soft rock – hard soil formation or in contacting soft rock – hard soil formations and is based on a specific tunnel construction case study. Installation of temporary support and presupport measures is also included.

The analysis results include principal stresses countours, vertical and horizontal displacements contours, vertical and horizontal displacement tables for nodes in crown and sides, tables of support measures response to loading, and tables for rock-support interaction.

# Περιεχόμενα

# Κατάλογος εικόνων

# Κατάλογος Πινάκων

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια, η κατασκευή σηράγγων βρίσκει ολοένα και μεγαλύτερη εφαρμογή. Στα αστικά περιβάλλοντα εξυπηρετεί τις μεταφορές αλλά και τα δίκτυα, λόγω χωρικών περιορισμών στην επιφάνεια. Σε μη αστικά περιβάλλοντα εξασφαλίζει τη μείωση των αποστάσεων των οδικών και σιδηροδρομικών δικτύων και παράλληλα αυξάνει την ασφάλεια τους.

Όταν αυτές διανοίγονται μέσα σε ημίσκληρους σχηματισμούς, κατά τη διάνοιξη τους, συνήθως αντιμετωπίζονται αρκετά προβλήματα ευστάθειας. Η εργασία αυτή λοιπόν, με βάση κάποια προβλήματα που προέκυψαν σε ένα τέτοιο έργο καλείται να αναλύσει το εντατικό-παραμορφωσιακό πεδίο που δημιουργείται κατά την εκσκαφή μιας σήραγγας μέσα σε επαφή ημίσκληρων σχηματισμών.

Το *Κεφάλαιο 2* αποτελεί μια αναφορά στην τεχνολογία διάνοιξης σηράγγων με συμβατικά ή μη μέσα. Η πρώτη παράγραφος επικεντρώνεται στη διάνοιξη με συμβατικές μεθόδους ενώ η δεύτερη στη διάνοιξη με ολομέτωπη κοπή.

Στο *Κεφάλαιο 3* αναφέρονται τα κυριότερα μέσα πρωτογενούς υποστήριξης που χρησιμοποιούνται. Τα περισσότερα από αυτά χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση (Κεφάλαιο $5^{ο}$).

Στο *Κεφάλαιο 4* γίνεται μια σύντομη περιγραφή των γνωστότερων αριθμητικών μεθόδων προσομοίωσης και στη συνέχεια αναλύεται εκτενέστερα η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών.

Στο *Κεφάλαιο 5* περιγράφεται η διαδικασία τρισδιάστατης ανάλυσης σηράγγων με τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών και συγκεκριμένα με το λογισμικό $\text{Flac}^{3D}$. Παράλληλα με τη διαδικασία αναλύεται και το απαιτούμενο θεωρητικό υπόβαθρο που απαιτείται για κάθε βήμα της ανάλυσης. Στην τελευταία παράγραφο του κεφαλαίου παρατίθενται τα αποτελέσματα της ανάλυσης και γίνεται ποιοτικός και ποσοτικός σχολιασμός τους.

Στο *Κεφάλαιο 6* συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση, αναφέρονται δυσκολίες που αντιμετωπίστηκαν και προτείνονται τρόποι περαιτέρω διερεύνησης του θέματος.

# Κεφάλαιο 2

# Μέθοδοι Διάνοιξης Σηράγγων

## 2.1 Μέθοδος ανοιχτής διάνοιξης

Η μέθοδος αυτή, γνωστή και ως μέθοδος «εκσκαφής και επίχωσης» (Cut & Cover), βρίσκει εφαρμογή σε κατασκευή τάφρων, υπογείων σταθμών μετρό, σε αστικά περιβάλλοντα καθώς και σε περιπτώσεις χαμηλών υπερκειμένων ή ανισόπεδων κόμβων. Όταν η διάνοιξη γίνεται σε μη αστικό περιβάλλον, η διαδικασία απαιτεί δημιουργία κατάλληλων κλίσεων των παρειών της εκσκαφής αλλά καθόλου ή ελάχιστη χρήση μέτρων προσωρινής υποστήριξης. Μετά την εκσκαφή, εγκαθίσταται η τελική υποστήριξη που θα φέρει όλα τα φορτία.

Εικόνα 2:1 Εκσκαφή σηράγγων τύπου εκσκαφής και επίχωσης (http://www.yde.co.il/)

Η χρήση της μεθόδου σε αστικά περιβάλλοντα απαιτεί μηδενικές μετακινήσεις σε γειτονικές κατασκευές. Αυτό επιτυγχάνεται με τη δημιουργία πασσαλότοιχων έγχυτων ή εμπηγνιόμενων οπλισμένων πασσάλων, διαφραγματικών τοίχων, πασσαλοσανίδων, αντηρίδων και άλλων παρόμοιων μέτρων σταθεροποίησης πρανών. Μετά την εκσκαφή στο επιθυμητό βάθος κατασκευάζεται η πλάκα κάλυψης. Στη συνέχεια επιχωματώνεται η τάφρος και επανέρχεται το τοπογραφικό της περιοχής.

Εικόνα 2:2 : Δημιουργία στομίου σήραγγας με μέθοδο εκσκαφής και επίχωσης (http://www.tunnels.mottmac.com/)

## 2.2 Μέθοδος κλειστής διάνοιξης

Η διαδικασία κλειστής διάνοιξης σηράγγων ακολουθεί έναν κύκλο εργασιών που αποτελείται από τρία βασικά, διακριτά μέρη. Πρώτα γίνεται η εξόρυξη (excavation) της εδαφο-βραχομάζας. Στη συνέχεια απομακρύνονται τα προϊόντα της εξόρυξης (mucking). Τέλος τοποθετείται η προσωρινή υποστήριξη (temporary support) που αποσκοπεί στην ευστάθεια του υπόγειου ανοίγματος. Με βάση τα παραπάνω έχει προταθεί ένας διαχωρισμός των μεθόδων διάνοιξης σε δύο κατηγορίες (Kolymbas, 2008):

- Τη συνεχή μέθοδο (continuous), όπου η διαδικασία της εξόρυξης, αποκομιδής και προσωρινής υποστήριξης γίνεται σχεδόν ταυτόχρονα.
- Τη συμβατική μέθοδο (conventional ή incremental ή cyclic), όπου το κάθε τμήμα του κύκλου εργασιών γίνεται διακριτά και αποτελεί μια ξεχωριστή φάση.

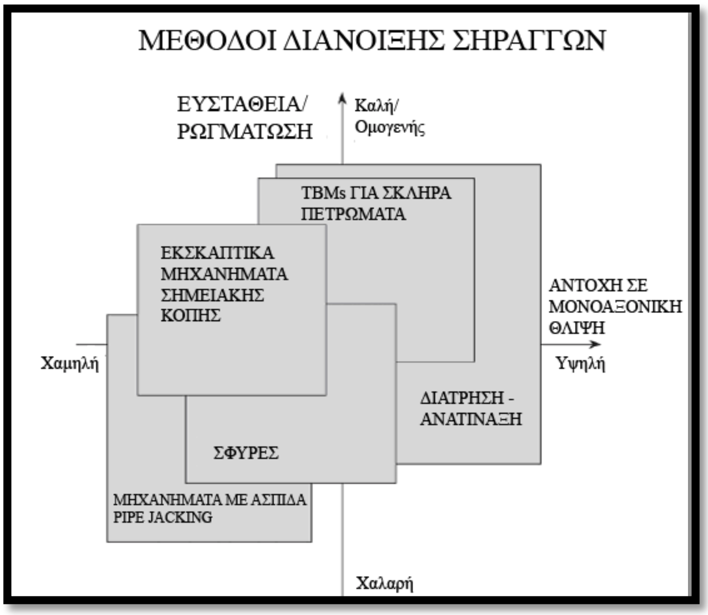
Ένας ακόμη διαχωρισμός είναι αυτός που χωρίζει τις μεθόδους ανάλογα με το μέσο που χρησιμοποιείται για τη διάνοιξη. Έτσι, οι μέθοδοι χωρίζονται σε:

- Διάτρησης – Ανατίναξης (drill & blast).
- Μηχανικής Όρυξης.

Στις σύγχρονες εκσκαφές σηράγγων υπάρχει μεγάλη ποικιλία για την επιλογή της αποδοτικότερης μεθόδου εκσκαφής. Οι παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την επιλογή της μεθόδου εκσκαφής μιας σήραγγας, είναι οι ακόλουθοι (Βιόπουλος, 2009):

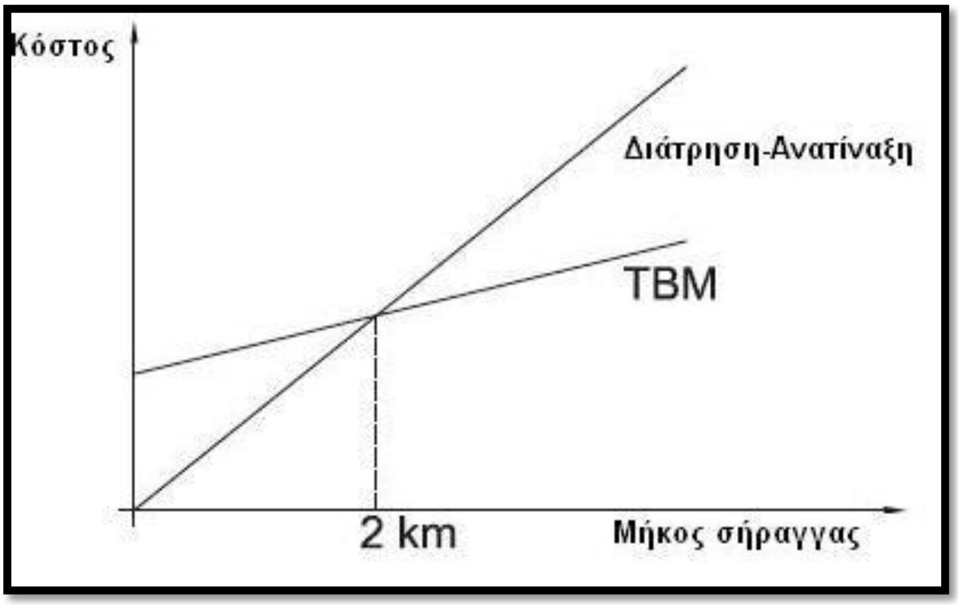
- Οι διαστάσεις των σηράγγων.
- Η γεωμετρία των σηράγγων.
- Το μήκος των σηράγγων και ο συνολικός όγκος εκσκαφής.
- Γεωλογικές και μηχανικές ιδιότητες πετρώματος.
- Επίπεδο υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα και αναμενόμενη εισροή υδάτων.
- Περιορισμοί δονήσεων.
- Επιτρεπόμενες καθιζήσεις επιφανείας.

Ένας πρακτικός «οδηγός» επιλογής της μεθόδου προτείνεται από Heiniö (1999):




Εικόνα 2:3 :Επιλογή κατάλληλης μεθόδου εκσκαφής ανάλογα με τις διαφορετικές συνθήκες πετρώματος/εδάφους (Παπαντώνη, 2007 από Heiniö, 1999).

Ενώ ο Kolymbas (2008) προτείνει, με βάση το κόστος:

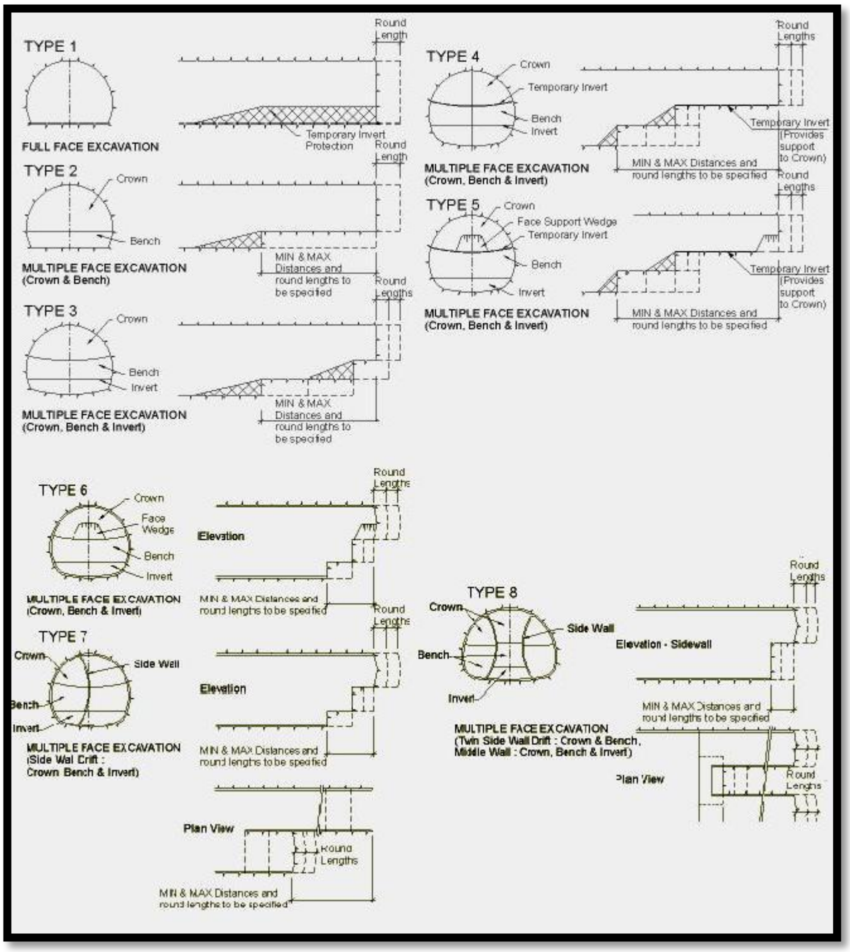



Εικόνα 2:4 Επιλογή της μεθόδου με βάση το κόστος (από Kolymbas, 2008)

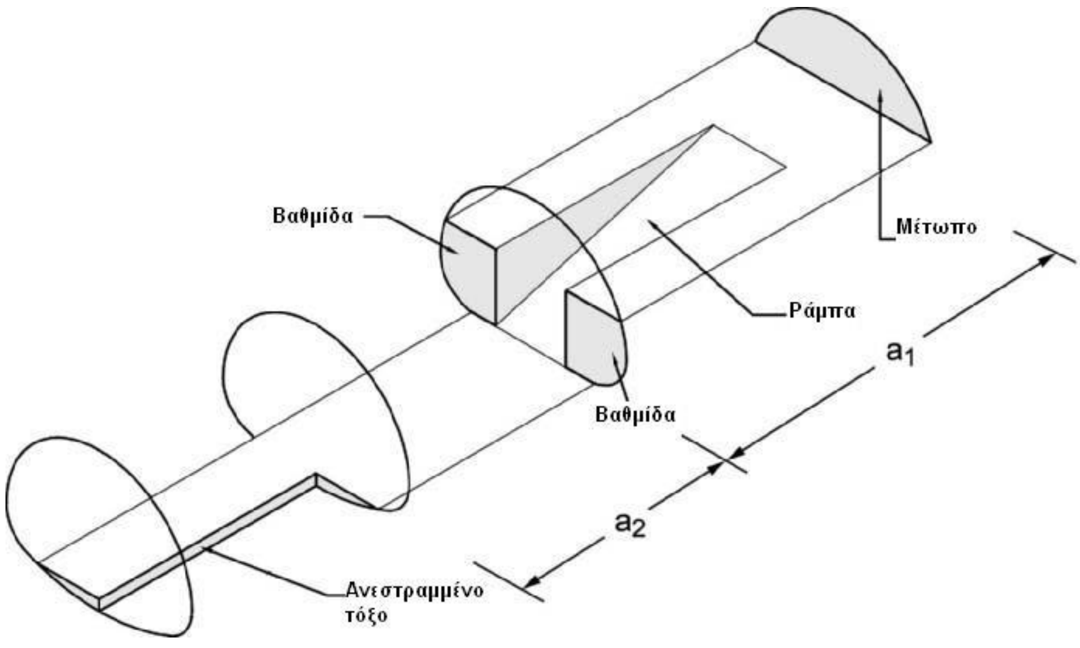
### 2.2.1 Συμβατική μέθοδος

Κατά τη μέθοδο αυτή, η διάνοιξη γίνεται με μηχανικά μέσα όταν το περιβάλλον αποτελείται από εδαφικούς σχηματισμούς, ημίσκληρα ή αποσαθρωμένα πετρώματα ή έντονα αποσαθρωμένους βράχους. Σε αντίθετη περίπτωση (δηλαδή σκληρός βράχος ή βράχος που χαρακτηρίζεται από ατελώς διαμορφωμένα ή μεγάλα στοιχεία κατάτμησης) η διάνοιξη γίνεται με τη χρήση εκρηκτικών υλών (Μαραγκός, 2006).

Η προχώρηση μπορεί να γίνει με εκσκαφή του μετώπου σε διαφορετικά στάδια (partial face excavation) ώστε να ελέγχεται η συμπεριφορά της εδαφο – βραχομάζας, ή εξολοκλήρου σε ένα (full face excavation). Στην **Εικόνα 2-5**, φαίνονται οι διάφορες τεχνικές διάνοιξης:




Εικόνα 2:5 : Μέθοδοι πλήρους ή τμηματικής διάνοιξης (Εξαδάκτυλος και Σταυροπούλου, 2006)



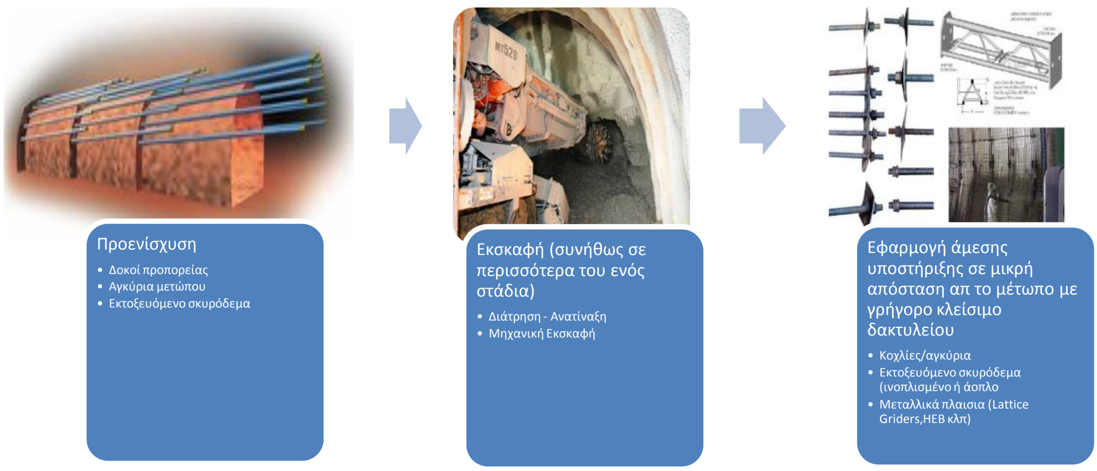

Εικόνα 2:6 : Η μέθοδος "Top Heading" σε τρεις διαστάσεις (τροποποιημένη από Kolymbas, 2008)

Ανεξάρτητα από τη συμβατική μέθοδο η οποία θα χρησιμοποιηθεί για τη διάνοιξη της σήραγγας, έχει επικρατήσει η τεχνική της λεγόμενης «Νέας Αυστριακής Μεθόδου Διάνοιξης Σηράγγων» ή αλλιώς NATM (New Austrian Tunneling Method).

Η βασική αρχή της μεθόδου NATM είναι ότι η διάνοιξη της σήραγγας και η κατασκευή της άμεσης υποστήριξης γίνονται κατά τρόπο ώστε να ενεργοποιηθεί η αντοχή της περιβάλλουσας βραχομάζας (μέσω της ελεγχόμενης σύγκλισης του τοιχώματος της σήραγγας) σε ικανό βαθμό ώστε να μειωθούν αρκετά οι πιέσεις επί της άμεσης υποστήριξης αλλά όχι τόσο ώστε να προκληθεί αποδιοργάνωση της βραχομάζας με συνέπεια την αύξηση των πιέσεων στην άμεση υποστήριξη και τελικώς την κατάρρευση της διατομής της σήραγγας (Καββαδάς, 2005).

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 (Καββαδάς, 2005).

Η διαδικασία της NATM συνοψίζεται στην **Εικόνα 2-7**



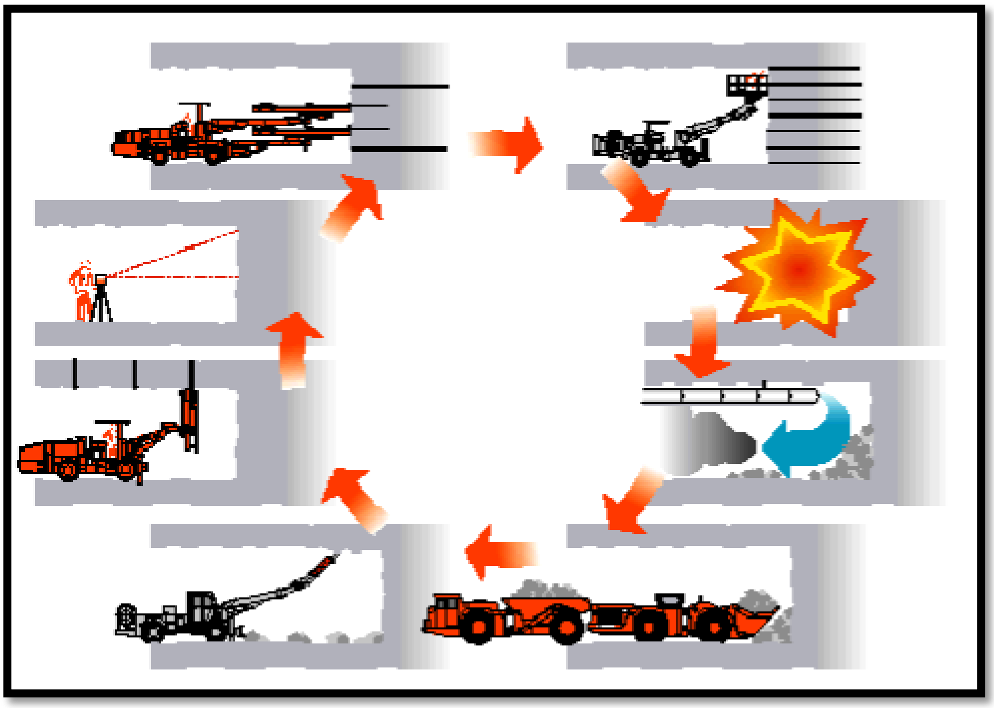

**Εικόνα 2:7 : Διαδικασία της NATM**

Σημειώνεται ότι η χρήση αγκυρίων βράχου σε κανονικό κάναβο οπλίζει την περιβάλλουσα βραχομάζα και συντελεί στην καλύτερη ανάπτυξη της λειτουργίας τόξου στη βραχομάζα. 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 παραμορφωσιμότητά της λόγω εγκιβωτισμού (Καββαδάς, 2005).

Η τελική επένδυση, κατασκευάζεται αρκετά πίσω από το μέτωπο ή μετά το τέλος της εκσκαφής (το πιο σύνηθες), εφόσον η σήραγγα ισορροπεί με την προσωρινή υποστήριξη, και αναλαμβάνει μέρος (ή το σύνολο) των φορτίων της περιβάλλουσας βραχομάζας. Συνήθως σχεδιάζεται για να αναλάβει φορτία όπως αυτό των προσωρινών αγκυρίων, μέρος του φορτίου του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και φορτία από μεταγενέστερες μεταβολές στο εντατικό πεδίο όπως σεισμοί, ερπυστική συμπεριφορά της βραχομάζας, διάνοιξη καινούριας παρακείμενης σήραγγας κ.α.

### *2.2.1.1 Εξόρυξη με εκρηκτικές ύλες*

Η εξόρυξη με εκρηκτικές ύλες είναι μια μέθοδος η οποία έχει μακροχρόνια εφαρμογή. Ακολουθεί τον κύκλο: Διάτρηση, γόμωση, ανατίναξη, αερισμός, αποκομιδή, ξεσκάρωμα, υποστήριξη (**Εικόνα 2.8**).

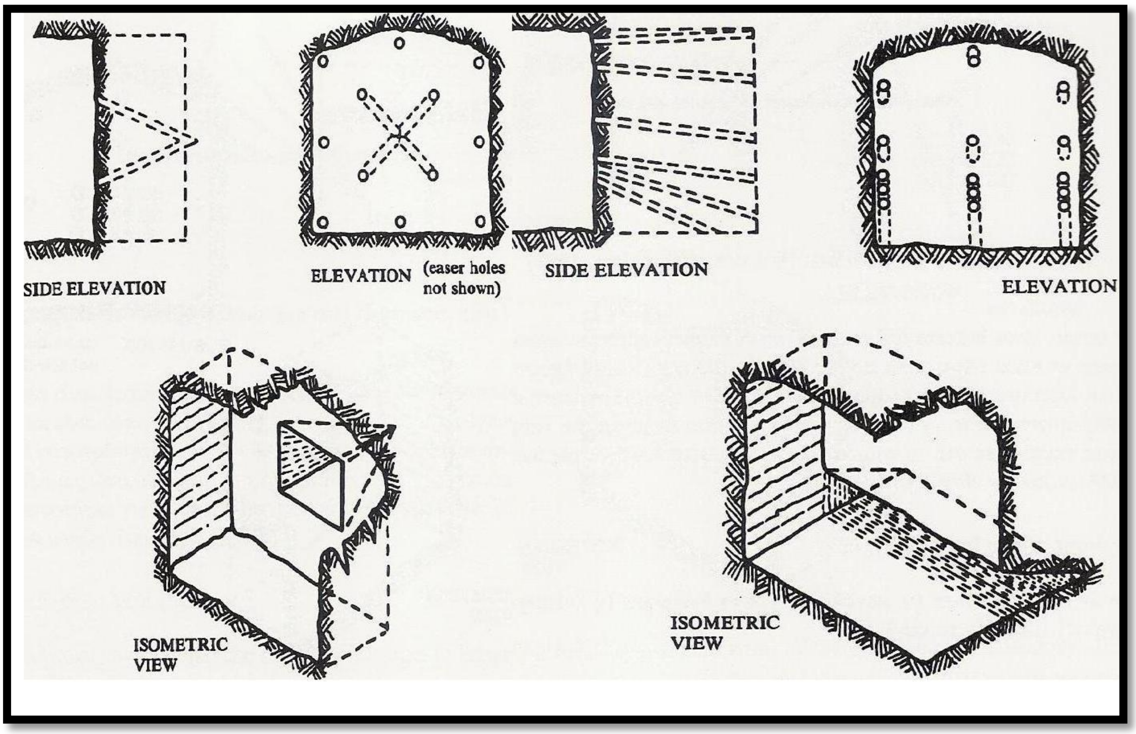


**Εικόνα 2:8 : Κύκλος εργασιών κατά τη μέθοδο διάνοιξης με εκρηκτικά (Heiniö, 1999)**

Πλεονεκτεί έναντι των άλλων μεθόδων σε μικρές κυρίως διατομές και σε ιδιαίτερα σκληρούς σχηματισμούς ενώ μπορεί να προσαρμοστεί σε κάθε σχήμα διατομής. Η διαταραχή της περιβάλλουσας βραχομάζας όμως και οι δονήσεις που προκαλεί την καθιστούν σχεδόν απαγορευτική κοντά σε κατοικημένες περιοχές. Επίσης με τη μέθοδο αυτή είναι αναπόφευκτες οι σχετικά μεγάλες υπερεκσκαφές. Ο ρυθμός προχώρησης είναι συνήθως 1-3 m/day.

Η όρυξη των διατρημάτων γίνεται με κρουστική και περιστροφική διάτρηση (rotary-percussive drilling) από διατρητικά μηχανήματα υπογείων (jumbo ή boomer). Μεγάλη σημασία για την υπόγεια ανατίναξη έχει η επιλογή αρχικής κοπής (opening cut). Η βασική λειτουργία της είναι να δημιουργήσει ελεύθερες επιφάνειες για τη βελτίωση του μηχανισμού θραύσης του πετρώματος από την ανατίναξη των υπολοίπων διατρημάτων. Οι δύο βασικοί τύποι αρχικών κοπών είναι (Αγιουτάντης, 2009, από Dick et al., 1983):

- Κοπές υπό γωνία (**Εικόνα 2-9 Αριστερά**).
- Παράλληλες κοπές (**Εικόνα 2-9 Δεξιά**).




**Εικόνα 2:9 : Αριστερά: Πυραμιδοειδής κοπή (υπό γωνία) , Δεξιά: Χαμηλή κοπή (παράλληλη), (Αγιουτάντης, 2009, από Gregory, 1984)**

Η γόμωση των διατρημάτων γίνεται με μη υγροσκοπικά εκρηκτικά όπως: δυναμίτη, ζελατινοδυναμίτη ή με γαλακτώματα ANFO (Ammonium Nitrate- Fuel Oil). Χαρακτηριστικά αναφέρονται οι εκρηκτικές ζελατίνες Ammonogelite και Gelamon, οι οποίες είναι πλαστικές, παράγουν όγκο αερίων της τάξης των 800 L/kg,είναι ιδιαίτερα διαρρηκτικές αφού η ταχύτητα έναυσης τους είναι περίπου 6500 m/s και τέλος είναι ανθεκτικές στο νερό (δεν είναι υγροσκοπικές) (Kolymbas, 2008).

Σε περίπτωση που χρησιμοποιείται γαλάκτωμα ANFO, ο όγκος των αερίων είναι της τάξης των 1000 L/m$^3$ όμως οι ταχύτητες έναυσης είναι μικρότερες (της τάξης των 5700 m/s) οπότε απαιτείται μια αύξηση στον αριθμό των διατρημάτων περίπου 10% (Kolymbas, 2008).

Τέλος, τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούνται και τα λεγόμενα «μη εκρηκτικά- εκρηκτικά» (non explosive – explosives) όπως το BRISTAR και το CALMMITE. Πρόκειται για διογκούμενα τσιμέντα τα οποία αναμιγνύονται με νερό και εισάγονται στα διατρήματα. Οι πιέσεις που παράγονται από τη διόγκωση μπορούν να φτάσουν τα 60 MPa (600 bar) συνθλίβοντας το πέτρωμα (Kolymbas, 2008).

Η έναυση γίνεται με ακαριαία θρυαλλίδα και ηλεκτρικά καψύλλια ή με συστήματα NONEL. Το δεύτερο αυξάνει το κόστος της ανατίναξης, αλλά λόγω των πολλών διαφορετικών χρόνων επιβραδύνσεων που προσφέρει, καταφέρνει καλύτερης ποιότητας ανατίναξη και λιγότερες δονήσεις. Τέλος, η εξομάλυνση των ορίων της διατομής μπορεί να γίνει με (smooth blasting), δηλαδή γόμωση των διατρημάτων μόνο με ακαριαία θρυαλλίδα.

Μετά την ανατίναξη ο χώρος κοντά στο μέτωπο πρέπει να καθαριστεί από σκόνη και αέρια της ανατίναξης, μέσω του κυκλώματος αερισμού, έτσι ώστε να επανέλθουν συνθήκες που να επιτρέπουν την ασφαλή παραμονή του προσωπικού. Ακολουθεί η αποκομιδή, το ξεσκάρωμα και η υποστήριξη.

#### *2.2.1.2 Μηχανική εκσκαφή*

Η μηχανική εκσκαφή μπορεί να γίνει με υδραυλικά πτύα, υδραυλικές σφύρες ή μηχανήματα σημειακής κοπής (roadheaders). Τα μέσα αυτά δημιουργούν τη μικρότερη δυνατή διαταραχή στη βραχομάζα ενώ μπορούν να λειτουργήσουν σε οποιοδήποτε σχήμα διατομής. Συνήθως η μέθοδος ακολουθεί τη διαδικασία της NATM.

Η μέθοδος σημειακής κοπής ανήκει στις μεθόδους μηχανικής όρυξης και περιγράφει την όρυξη της σήραγγας είτε με συμβατικά μηχανήματα όπως σφύρες (hammers) και εκσκαφείς ανεστραμμένου κάδου, είτε με ειδικά μηχανήματα σημειακής κοπής (roadheaders). Σε σχέση με τη μέθοδο διάτρησης ανατίναξης πλεονεκτεί στο ότι δημιουργεί περιορισμένο όγκο υπερεκσκαφών, προκαλεί μικρότερη διαταραχή της περιβάλλουσας βραχομάζας και προκαλεί ελάχιστες δονήσεις και τέλος, το μέτωπο παραμένει πάντα προσβάσιμο για μετρήσεις.

Αντίστοιχα πλεονεκτεί απέναντι στη μέθοδο ολομέτωπης κοπής στο ότι έχει την ικανότητα διάνοιξης σε διατομή οποιασδήποτε γεωμετρίας, μπορεί να προσαρμοστεί εύκολα στις τυχόν τροποποιήσεις της μεθόδου εκσκαφής και στις εναλλαγές των σχηματισμών, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για σήραγγες με μικρή γωνία καμπυλότητας και τέλος το κόστος αγοράς των μηχανημάτων είναι πολύ μικρότερο από εκείνο των μηχανημάτων ολομέτωπης κοπής.

Κατά την εκσκαφή με συμβατικά μηχανήματα, σε διατομές 30-70$m^2$ εργάζεται μια σφύρα (ή εκσκαφέας), και η όρυξη ακολουθεί την κλασσική διαδικασία των συμβατικών μεθόδων. Συγκεκριμένα η διαδικασία εξόρυξης διενεργείται σε πέντε φάσεις (Παπαντώνη, 2007):

1. Εκσκαφή.
2. Μεταφορά του εξορυσσόμενου υλικού.
3. Απομάκρυνση των επισφαλών όγκων.
4. Μεταφορά του εξορυσσόμενου υλικού που προήλθε από τους επισφαλείς όγκους.
5. Ενίσχυση και υποστήριξη των τοιχωμάτων της σήραγγας.

Σε σήραγγες με εμβαδό διατομής μεγαλύτερο από 70$m^2$, η εξόρυξη και η μεταφορά του υλικού μπορεί να γίνεται ταυτόχρονα γιατί σε σήραγγες τέτοιου μεγέθους μπορούν να εργαστούν ταυτόχρονα μια σφύρα, ένας φορτωτής κι ένα φορτηγό. Έτσι η διαδικασία εξόρυξης διενεργείται σε δυο φάσεις (Παπαντώνη, 2007):

1. Εκσκαφή (και απομάκρυνση των επισφαλών όγκων) και μεταφορά του εξορυσσόμενου υλικού.
2. Ενίσχυση και υποστήριξη των τοιχωμάτων της σήραγγας.

Σε σήραγγες με ύψος μεγαλύτερο από 7m, είναι αδύνατο ένας εκσκαφέας να εξορύξει υλικό από τόσο ψηλά και η διαδικασία γίνεται σε δύο στάδια (Παπαντώνη, 2007):

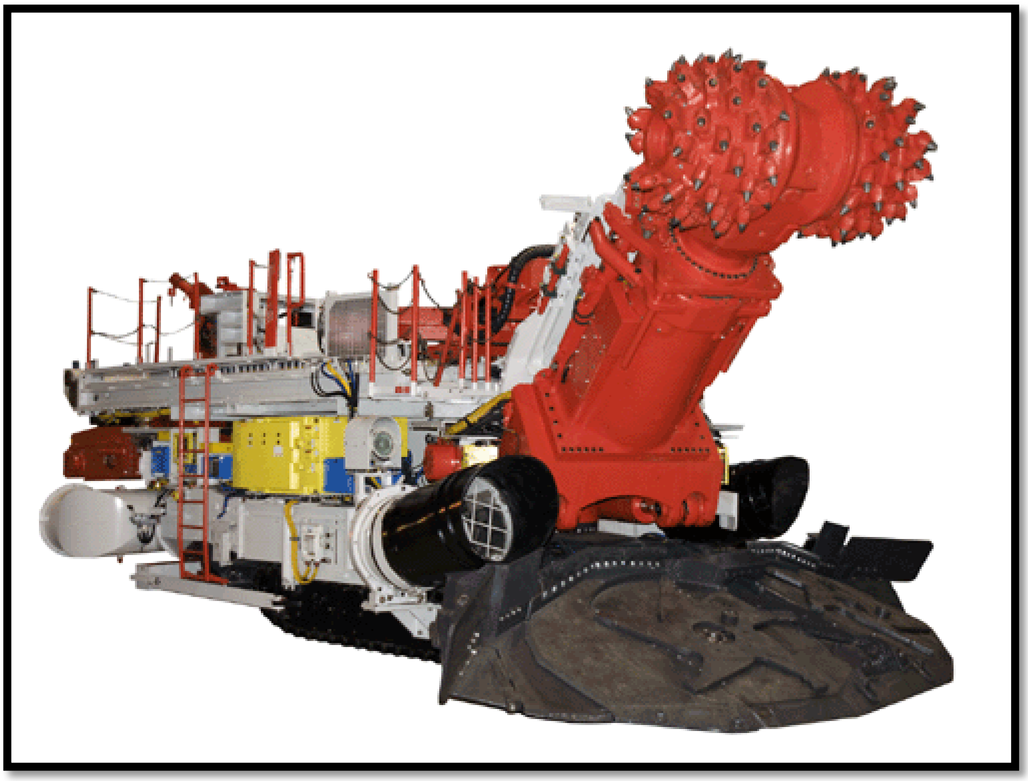
1. Εκσκαφή της σήραγγας από τον εκσκαφέα με τη σφύρα μέχρι ένα συγκεκριμένο ύψος (μικρότερο των 7m).
2. Ένας ακόμη συνδυασμός εκσκαφέα – σφύρας ξεκινά περίπου 150m πίσω από τον πρώτο εκσκαφέα και μεγαλώνει το βάθος της σήραγγας μέχρι αυτή να αποκτήσει την επιθυμητή διατομή..

Αυτός ο τρόπος διάνοιξης είναι αποδοτικός σε βραχομάζα με χαμηλή έως μέση αντοχή σε θλίψη. Σε σκληρή βραχομάζα η χρήση τους δεν συνίσταται, λόγω περιορισμένου ρυθμού παραγωγής (Heiniö, 1999).

Η διάνοιξη με μηχανήματα σημειακής κοπής χρησιμοποιείται σε χαμηλής αντοχής κερματισμένα έως μέτριας αντοχής πετρώματα.

Ο βασικότερος σχεδιασμός των roadheaders περιλαμβάνει (Εξαδάκτυλος, 2007):

- Το κοπτικό μπράτσο (μπούμα) το οποίο φέρει την κοπτική κεφαλή.
- Την κοπτική κεφαλή, στην οποία καταλήγει το μπράτσο. Η κεφαλή αυτή, που έρχεται σε επαφή με το μέτωπο, συνίσταται από έναν κυλινδρικό υψηλής ανθεκτικότητας ατσάλινο πυρήνα. Ο πυρήνας αυτός περιβάλλεται από ένα ενισχυμένο σπιράλ, πάνω στο οποίο βρίσκονται υποδοχές που εμπεριέχουν τα κοπτικά άκρα.
- Την βάση επί της οποίας εδράζεται το κοπτικό μπράτσο.
- Μονάδα φορτώσεως του θρυμματισμένου υλικού μπορεί να είναι είτε βραχίονες συγκεντρώσεως (gathering arms) ή ατέρμων μεταφορική ταινία (encircling flight conveyor).
- Σύστημα απομάκρυνσης της σκόνης.



Εικόνα 2:10 : Roadheader MR 620 της εταιρίας SANDVIK (http://mc.sandvik.com/ )

### 2.2.2 Συνεχής Μέθοδος

Η συνεχής μέθοδος διάνοιξης γίνεται με μηχανήματα ολομέτωπης κοπής (Tunnel Boring Machines ή TBMs). Τα TBMs μπορούν πλέον να χρησιμοποιηθούν σε περιπτώσεις από εδάφη έως σκληρά πετρώματα. Οι διάμετροι διάνοιξης κυμαίνονται από 1 – 15m (με τάση να φθάσουν τα 19m) και οι ταχύτητες προχώρησης, ανάλογα με τις γεωλογικές συνθήκες, από μερικά cm/εβδομάδα ως και 130m/εβδομάδα (Εξαδάκτυλος και Σταυροπούλου, 2006).

Το TBM αποτελείται από τα εξής τρία ευδιάκριτα δομικά μέρη (Παπαντώνη, 2007, από Sinha,1991) :

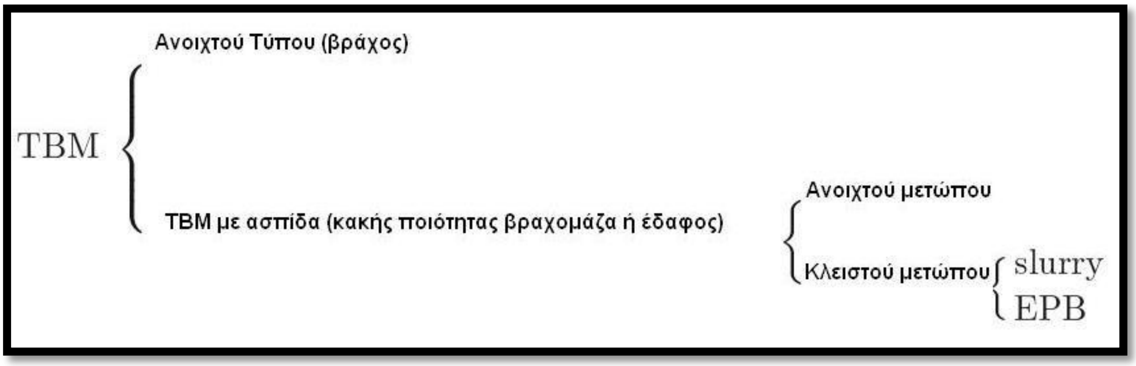
- Την ουρά, η οποία περιέχει τους ανυψωτικούς μηχανισμούς για την εγκατάσταση της επένδυσης, την πλατφόρμα τσιμεντενέσεων (grouting platform), τα υδραυλικά συστήματα αγκυρώσεων (shove jacks), το σύστημα μεταφορέων και άλλα βοηθητικά συστήματα.

- Το σώμα, το οποίο περιέχει τις πλευρικές αγκυρώσεις, τις δαγκάνες σταθεροποίησης, την αίθουσα του χειριστή, τα υδραυλικά και ηλεκτρικά συστήματα, τις μηχανές, τις γεννήτριες, και την πλατφόρμα εργασίας.

- Την κεφαλή, η οποία είναι το περιστρεφόμενο μέρος του συστήματος, το οποίο περιέχει την κοπτική κεφαλή και, όταν κρίνεται απαραίτητο καλύπτεται από ασπίδα.

Η προώθηση του TBM γίνεται μέσω μιας σειράς υδραυλικών γρύλλων (grippers), οι οποίοι ασκούν στα τοιχώματα της σήραγγας πίεση στην αντίθετη κατεύθυνση από αυτή της κίνησης. Αυτό προϋποθέτει επαρκή αντοχή της περιβάλλουσας εδαφο – βραχομάζας ή της μόνιμης υποστήριξης. Υπάρχουν δύο ειδών TBM με βάση το σύστημα προώθησης: με μονό gripper και με διπλό, το οποίο χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις ασταθών σχηματισμών αφού επιτρέπει καλύτερη κατανομή των τάσεων.

Σε περιπτώσεις σχηματισμών με φτωχές γεωτεχνικές ιδιότητες, υπάρχει κίνδυνος καταπτώσεων ή αστάθειας μετώπου και παρειών. Κάτι τέτοιο θέτει σε κίνδυνο το προσωπικό, το ίδιο το TBM ή και ολόκληρο το έργο. Σε τέτοιες περιπτώσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί προστατευτική χαλύβδινη ασπίδα. Έτσι ανάλογα την εδαφο – βραχομάζα που πρόκειται να συναντηθεί κατά την εκσκαφή, επιλέγεται το αν θα χρησιμοποιηθεί TBM με προστασία ή όχι. Σε γενικές γραμμές για την επιλογή TBM μπορεί να ακολουθηθεί το παρακάτω σχήμα (**Εικόνα 2-11)**



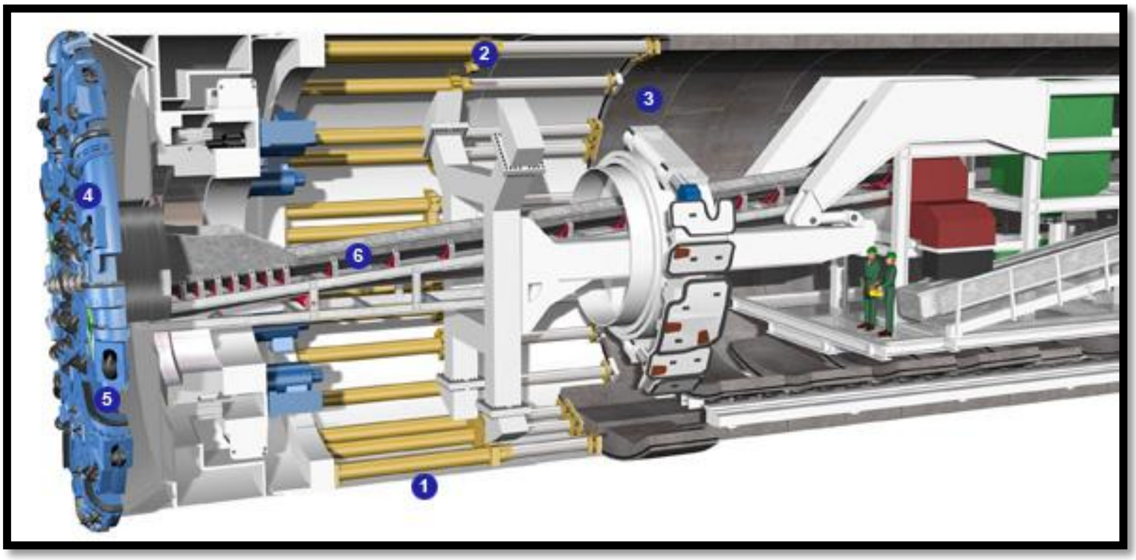

2:11 : Επιλογή TBM (Τροποποιημένη από Kolymbas, 2008)

Τα TBMs ανάλογα εάν προστατεύονται ή όχι χωρίζονται σε:

- *Ανοιχτού τύπου TBM* (Open ή 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 (Εξαδάκτυλος και Σταυροπούλου, 2006) (**Εικόνα 2:12**).

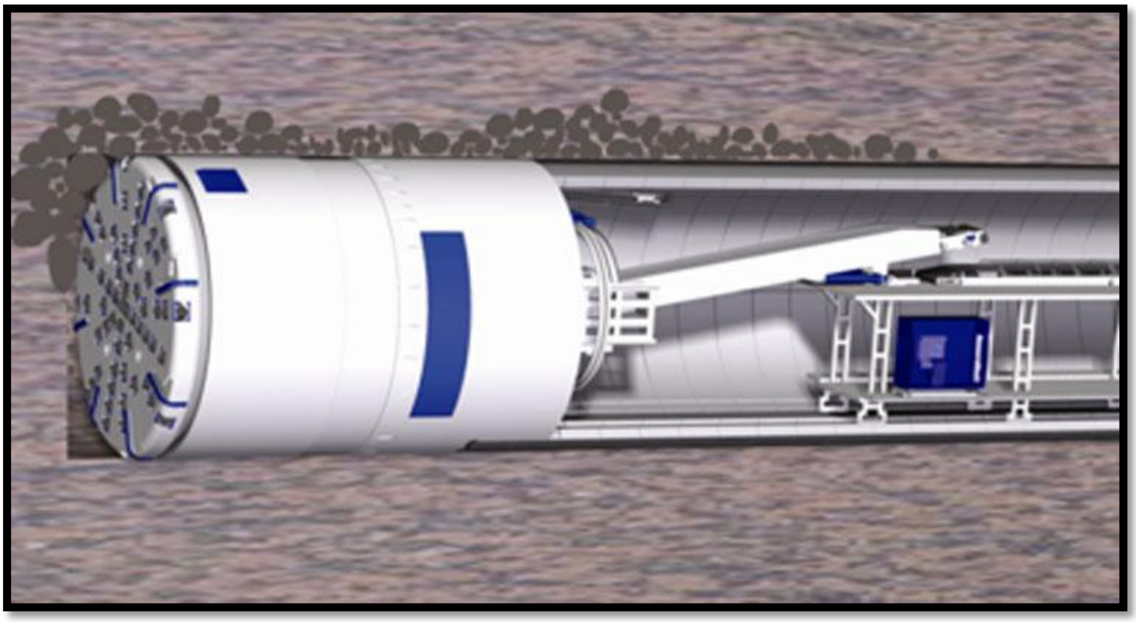
Εικόνα 2:12 : Το gripper TBM S 210 της Herrenknecht που χρησιμοποιήθηκε στη διάνοιξη του Gotthard Base Tunnel (http://www.tunneltalk.com/Gotthard-TBM-safely-across-the-Piora-Mulda.php)

- *TBM με ασπίδα (Shielded TBM).* Τα μηχανήματα ολομέτωπης κοπής με ασπίδα χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις που η βραχομάζα λόγω της μικρής της αντοχής δεν μπορεί να παραλάβει τις δυνάμεις στήριξης της μηχανής Gripper TBM, που είναι απαραίτητες για την μετάδοση των δυνάμεων πρόωσης. Ακόμη προστατεύει το TBM και το προσωπικό από τυχόν καταπτώσεις (Εξαδάκτυλος και Σταυροπούλου, 2006). Χρησιμοποιούνται σε χαλαρά εδάφη και μικτό υπέδαφος και σε συνθήκες που αναμένεται υψηλή εισροή νερού. Η πρόωση βασίζεται στους δακτυλίους σκυροδέματος που αποτελούν την τελική υποστήριξη (**Εικόνα 2:13**).




**Εικόνα 2:13 : TBM με ασπίδα. (1) Ασπίδα. (2) Υδραυλικοί γρύλοι προώθησης που στηρίζονται στο τελευταίο δαχτυλίδι επένδυσης (3).(4) Κοπτική κεφαλή. (5) Δίσκοι τύπου muck bucket lips για τη συλλογή του θραυσμένου υλικού πίσω από τους δίσκους κοπής (http://www.herrenknecht.com/process-technology/machine-technology/single-shield-tbm.html)**

- *TBM με διπλή ασπίδα (Double Shield TBM).* Η ασπίδα αποτελείται από δύο μέρη. Στην μπροστινή ασπίδα τοποθετείται η κεφαλή. Στη δεύτερη (gripper shield) εγκαθίστανται τα grippers και η συσκευή τοποθέτησης της μόνιμης υποστήριξης. Σε καλής ποιότητας βραχομάζα λειτουργεί σαν Gripper TBM με την τελική υποστήριξη να τοποθετείται παράλληλα με την εκσκαφή. Σε ασθενής σχηματισμούς ή ζώνες αδυναμίας, λειτουργεί σαν TBM με μονή ασπίδα και η εκσκαφή σταματάει για να τοποθετηθεί η τελική επένδυση (Kolymbas, 2008) (**Εικόνα 2:14**).



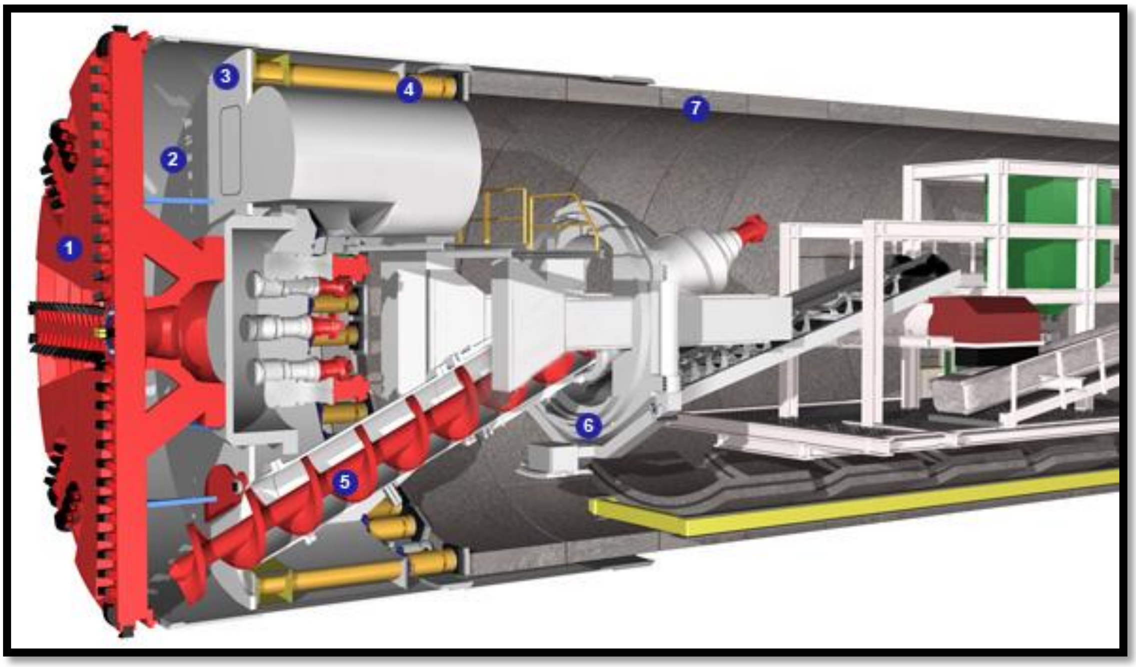
**Εικόνα 2:14 : TBM διπλής ασπίδας (http://www.tunneltalk.com/Large-diameter-rock-tunnels-Apr10-Robbins.php)**

Τα τελευταία χρόνια εκσκαφές σε κατοικημένες περιοχές ή εκσκαφές χαμηλών υπερκειμένων, οι οποίες απαιτούν μηδενικές επιφανειακές καθιζήσεις, οδήγησαν στην ανάπτυξη μηχανών με την ικανότητα προστασίας του μετώπου εκσκαφής. Αυτό γίνεται εφαρμόζοντας αντισταθμιστική πίεση στο μέτωπο. Τέτοια μηχανήματα «κλειστού μετώπου» (closed face) είναι:

*Τα μηχανήματα ολομέτωπης κοπής με εφαρμογή εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης (Earth Pressure Balance Machines ή EPB – TBMs)* είναι μηχανήματα ειδικά σχεδιασμένα για λειτουργία σε μαλακά εδάφη που περιέχουν νερό υπό πίεση. Η ασπίδα των EPB – TBMs αντέχει πιέσεις εισροής ύδατος έως και 10 bar και ελέγχουν την ευστάθεια του μετώπου της σήραγγας και την καθίζηση της επιφανείας παρακολουθώντας και ρυθμίζοντας την πίεση μέσα στο θάλαμο της κοπτικής κεφαλής, ώστε να έρθει σε ισορροπία με την πίεση που υπάρχει μπροστά από την κοπτική κεφαλή (**Εικόνα 2:15**).

Το μέτωπο συγκρατείται με τη χρήση του εξορυγμένου εδάφους ή πετρώματος που έχουν λάβει τη μορφή λάσπης. Η λάσπη αυτή σχηματίζεται με τη βοήθεια των κοπτικών εργαλείων και των εργαλείων ανάμιξης στο μέτωπο και στον θάλαμο εκσκαφής και με τη βοήθεια υγρών ή αφρωδών μέσων. Ο θάλαμος εκσκαφής, που βρίσκεται υπό πίεση (το πολύ 5 atm), είναι διαχωρισμένος από την υπόλοιπη σήραγγα με τη χρήση στεγανών διαφραγμάτων (Εξαδάκτυλος και Σταυροπούλου, 2007).

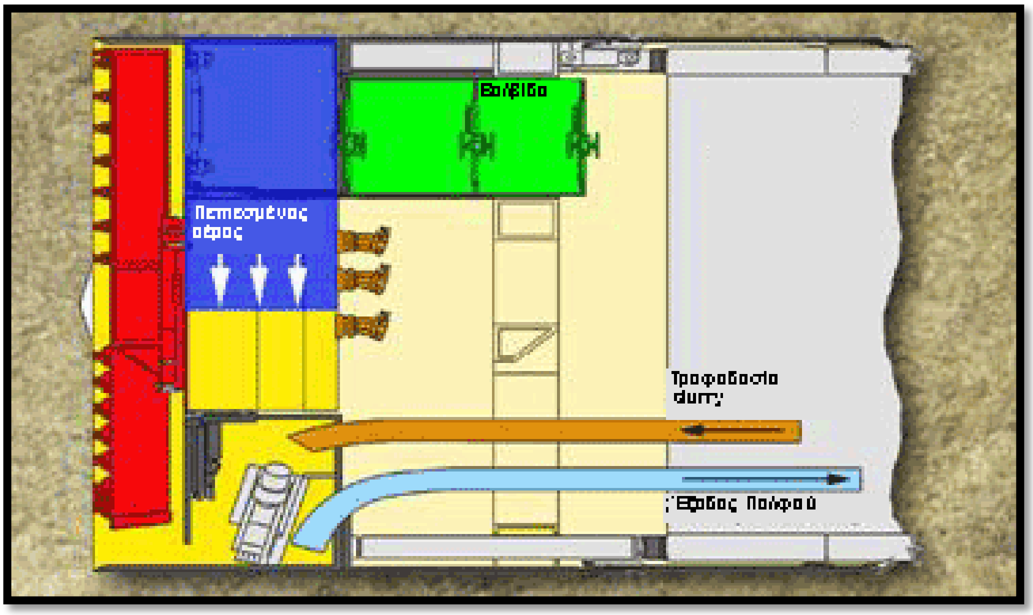
Ο έλεγχος της διαδικασίας εκσκαφής και η απόδοση του EPB - TBM εξαρτάται από τις ιδιότητες του εδάφους που εξορύσσεται. Ρύθμιση του εδάφους με εισπίεση αφρών, πολυμερών νερού, μπετονίτη, ή οποιοδήποτε συνδυασμού τους απαιτείται συνήθως για την τροποποίηση των ιδιοτήτων του εδάφους που εξορύσσεται για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




Εικόνα 2:15 : EPB-TBM. (1) Κοπτική κεφαλή. (2) Υπό πίεση θάλαμος εκσκαφής. (3) Διάφραγμα. (4) Γρύλοι προώθησης. (5) Κοχλιωτός μεταφορέας. (6) Μηχανισμός τοποθέτησης μόνιμης επένδυσης. (7) προκατασκευασμένη μόνιμη επένδυση (http://www.herrenknecht.com/process-technology/machine-technology/epb-shield.html)

*Μηχανήματα ολομέτωπης κοπής με εφαρμογή πίεσης μίγματος μπεντονίτη – εδάφους στο μέτωπο (Slurry Shields- TBM).* Μοιάζουν σχεδιαστικά με τα EPBs, με κύρια διαφοροποίηση τη χρήση πολφού μπετονίτη – εδάφους για τον έλεγχο της ευστάθειας του μετώπου της σήραγγας και της καθίζησης της επιφανείας. Χρησιμοποιούνται σε εδάφη που απαιτούν υποστήριξη και σε περιπτώσεις που πρέπει να αποφευχθεί η εισροή νερού σε διαπερατά εδάφη (**Εικόνα 2:16**).

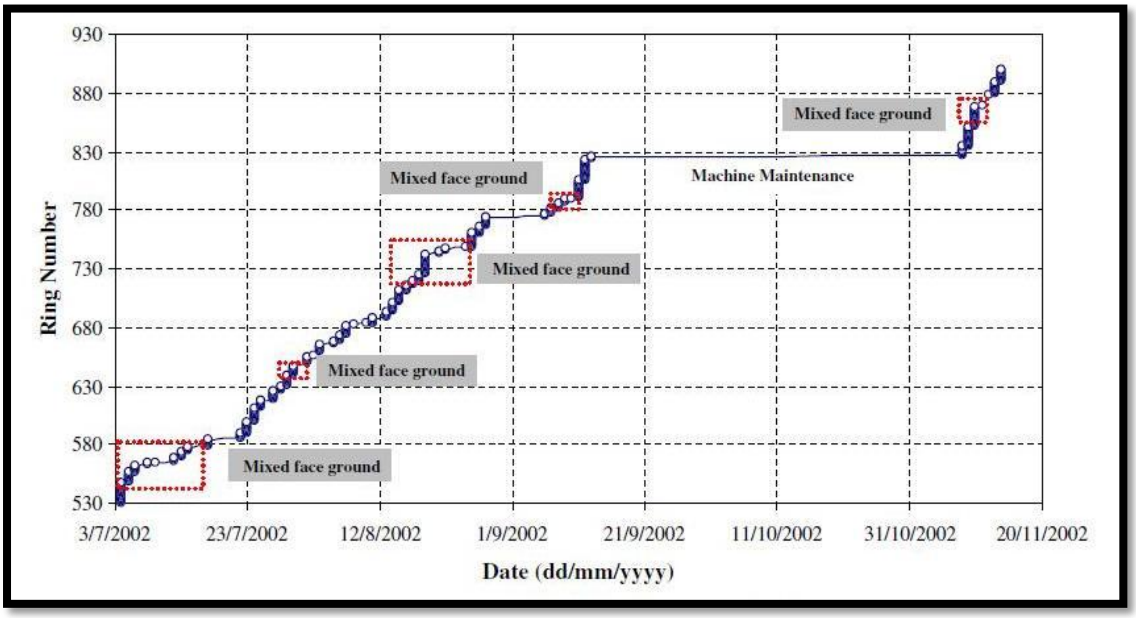
Ο θάλαμος εκσκαφής (ή θάλαμος πίεσης), βρίσκεται πίσω από την κοπτική κεφαλή και σφραγίζεται από τη σήραγγα με έναν τοίχο πίεσης. Η πίεση υποστήριξης πρέπει να εξισορροπεί τουλάχιστον την πίεση του εδάφους και την πίεση του ύδατος. Ο πολφός μπετονίτη που έχει αναμιχθεί με έδαφος μεταφέρεται σε διαχωριστή εκτός της σήραγγας, όπου και διαχωρίζεται πριν εισέλθει και πάλι ως πολφός μπετονίτη (Εξαδάκτυλος και Σταυροπούλου, 2006).




Εικόνα 2:16 : Slurry Shield TBM (http://www.fhwa.dot.gov/bridge/tunnel/pubs/nhi09010/07.cfm)

Η επιλογή του σχήματος των κοπτικών δίσκων πάνω στην κεφαλή, το υλικό τους καθώς και η γεωμετρία τους εξαρτάται από τις ιδιότητες της εδαφο – βραχομάζας. Αυτό αποτελεί και κύριο μειονέκτημα αυτής της μεθόδου διάνοιξης. Σε μικτούς ή εναλλασσόμενους σχηματισμούς ο ρυθμός προχώρησης μειώνεται και προκαλούνται καταστροφές στα κοπτικά άκρα (σε τέτοιες περιπτώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν νέα μηχανήματα τύπου Mixshield). Οι καθυστερήσεις στην πρόοδο του έργου από την αλλαγή κοπτικών ή της διάταξής τους είναι σημαντικές καθώς η διαδικασία της εξόρυξης πρέπει να σταματήσει και το προσωπικό να επισκεφτεί την κοπτική κεφαλή.

Χαρακτηριστικά αναφέρεται το παράδειγμα του Karnji Tunnel του συστήματος DTSS (Deep Tunnel Sewerage System) στη Σιγκαπούρη. Εκεί, λόγω απρόβλεπτων γεωλογικών συνθηκών, εμφανίστηκε μια σειρά από προβλήματα κατά τη διάνοιξη με δύο μηχανήματα EPB TBMs. Τα προβλήματα είχαν να κάνουν με αστοχία/αστάθεια μετώπου, εισροές νερού, λάθος επιλογή κοπτικών κ.α.  Στην **Εικόνα 2-17** φαίνεται το χρονοδιάγραμμα και οι σημαντικές καθυστερήσεις όταν τα μηχανήματα συναντούσαν μικτό έδαφος αλλά και κατά την τροποποίηση τους για να ανταπεξέλθουν (Zhao et al., 2006):




Εικόνα 2:17 : Χρονοδιάγραμμα διάνοιξης σήραγγας σε εναλλασσόμενα εδάφη (Zhao et al, 2006)

# Κεφάλαιο 3

## Μέτρα υποστήριξης σηράγγων

Η αρχική υποστήριξη στις σήραγγες συνίσταται από μεθόδους ενίσχυσης εδαφο-βραχομάζας (ground reinforcement) όπως κοχλίωση, και η τοποθέτηση μικροπασσάλων, από μεθόδους βελτίωσης εδαφο-βραχομάζας (ground improvement) όπως ενεμάτωση υψηλής πίεσης, ψύξη εδάφους, ηλεκτρώσμωση και αποστράγγιση και από μεθόδους προσωρινής υποστήριξης σηράγγων ή προϋποστήριξης (pre-support) όπως προπασσάλωση οροφής, η χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος, η εγκατάσταση μεταλλικών πλαισίων η περιφερειακή πρότμηση και η μέθοδος pretunnel (Βιόπουλος, 2006).

### 3.1 Μέτρα ενίσχυσης βραχομάζας

Τα μέτρα ενίσχυσης της βραχομάζας έχουν ως αρχή λειτουργίας την αύξηση της ικανότητας αυτοϋποστήριξης του γεωυλικού. Τα στοιχεία ενίσχυσης τοποθετούνται μέσα στο γεωυλικό, γίνονται μέρος του και ενεργοποιούν τη φυσική αντοχή του πετρώματος. Τα συνηθέστερα μέτρα ενίσχυσης αποτελούν οι κοχλίες (bolts) και οι μικροπάσσαλοι (micropiles) (USACE, 1997). Τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούνται ευρέως και προεντεταμένα συρματόσκοινα.

Η κοχλίωση είναι η διαδικασία με την οποία ένα ασταθές τμήμα βράχου ή μια χαλαρωμένη ζώνη, αγκυρώνεται στο υγιές πέτρωμα μέσω μεταλλικού ή μεταλλικών στελεχών. Η διαδικασία είναι η εξής (Αγιουτάντης, 2002):

- Όρυξη του διατρήματος κατάλληλου μήκους και διαμέτρου.
- Καθαρισμός του διατρήματος.
- Εισαγωγή του κοχλία και του υλικού αγκύρωσης αν προβλέπεται.
- Τοποθέτηση του περικόχλιου και της πλάκας εφαρμογής τάσεων.
- Τάνυση του κοχλία.

Ο κλασσικός κοχλίας αποτελείται από μια μεταλλική ράβδο, σύστημα αγκύρωσης, περικόχλιο και μεταλλική πλάκα. Ανάλογα με τον τρόπο αγκύρωσης στο υγιές πέτρωμα χωρίζονται σε κατανεμημένης αγκύρωσης και σημειακής αγκύρωσης ενώ με το αν φέρουν προένταση ή όχι χωρίζονται σε :

- Προεντεταμένους κοχλίες (rock bolts). Οι γνωστότεροι από τους οποίους είναι οι ακόλουθοι (Αγιουτάντης, 2002):

  - Ο προεντεταμένος κοχλίας σημειακής αγκύρωσης με μεταλλική σφήνα ο οποίος βασίζεται στη διαστολή του κοχλία λόγω της σφήνας. Λόγω της επαφής τελικά του κοχλία με το πέτρωμα αναπτύσσονται δυνάμεις τριβής

  - Ο προεντεταμένος κοχλίας σημειακής αγκύρωσης με αναπτυσσόμενο στέλεχος. Το κέλυφος αναπτύσσεται κατά την είσοδο του κοχλία. Συχνά συνδυάζεται και με κατανεμημένη αγκύρωση από τσιμέντο.

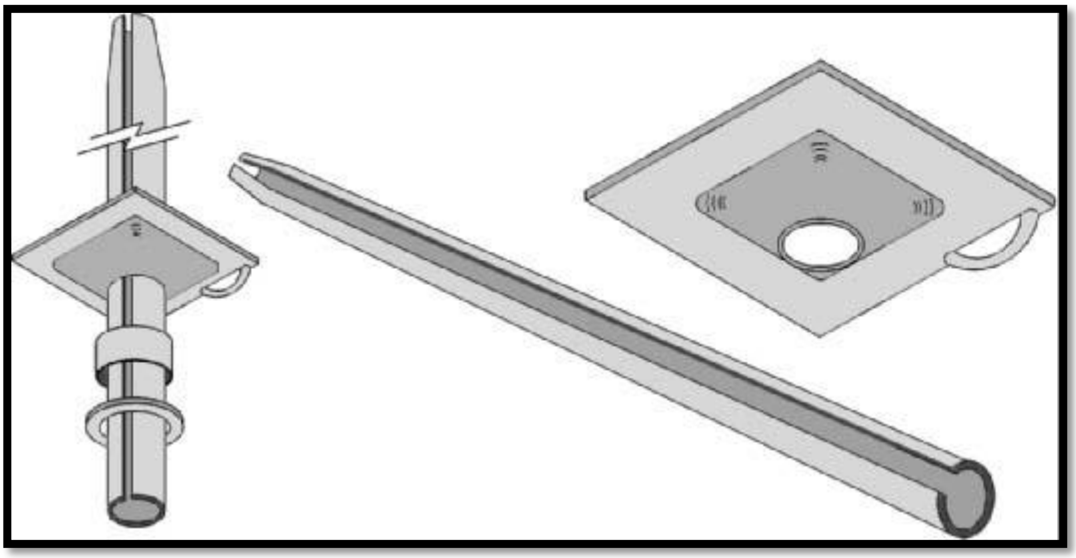
  - Ο προεντεταμένος κοχλίας κατανεμημένης αγκύρωσης με τσιμέντο.

  - Ο προεντεταμένος κοχλίας κατανεμημένης αγκύρωσης με ρητίνη. Πριν την εισαγωγή του κοχλία εισάγονται φυσίγγια που περιέχουν ρητίνες και κάποιον καταλύτη σκλήρυνσης. Κατά την εισαγωγή του ο κοχλίας σπάει τα φυσίγγια και η ρητίνη αναμιγνύεται με τον καταλύτη δημιουργώντας ισχυρή αγκύρωση σε μερικά δευτερόλεπτα.

- Μη προεντεταμένους κοχλίες ή ηλώσεις (dowels). Αναφέρονται οι ακόλουθοι:

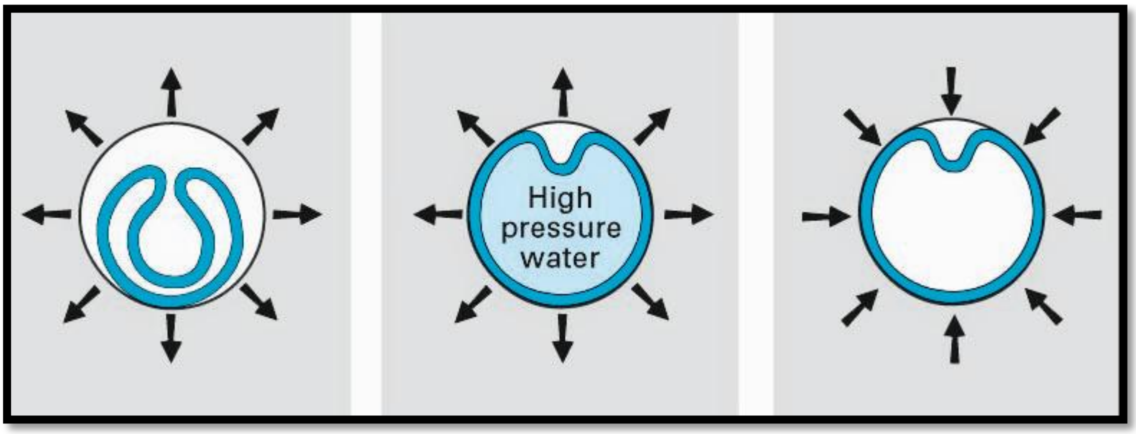
  - Ηλώσεις κατανεμημένης αγκύρωσης με τσιμέντο

  - Ηλώσεις διαχωριζόμενου κοχλία σημειακής αγκύρωσης (split set). Η κοχλίωση επιτυγχάνεται με αναδίπλωση του άκρου.



**Εικόνα 3:1 Μη προεντεταμένος κοχλίας τύπου Splitsel (Kolymbas, 2008) .**

- Ηλώσεις σωληνωειδών κοχλιών κατανεμημένης αγκύρωσης (swellex). Το σύστημα συνίσταται από ένα σωλήνα λεπτού τοιχώματος, ο οποίος είναι κλειστός από το ένα άκρο ενώ το άλλο μπορεί να προσαρμοστεί σε αντλία νερού. Η εισπίεση του νερού προκαλεί διαστολή του κοχλία επιτυγχάνοντας άμεση κατανεμημένη αγκύρωσης (**Εικόνα 3:1**).




Εικόνα 3:2 Ήλωση τύπου Swellex (Atlas Copco, 2007).

- Ηλώσεις κατανεμημένης αγκύρωσης με τσιμέντο, αποτελούμενες από συρματόσχοινα (cable bolts).

Σε ότι αφορά του μικροπασσάλους, είναι εύκαμπτα δομικά στοιχεία που κατασκευάζονται ή εισπιέζονται εντός του εδάφους. Η διάμετρος τους κυμαίνεται από 150-300mm και η αρχή λειτουργίας τους είναι η ίδια με αυτή της κοχλίωσης. Το φορτίο παραλαμβάνεται μέσω του χαλύβδινου στελέχους και μεταβιβάζεται στο έδαφος μέσω του τσιμεντενέματος.

## 3.2 Μέτρα βελτίωσης βραχομάζας

Υπάρχουν γενικά 4 κύριοι τρόποι βελτίωσης βραχομάζας που χρησιμοποιούνται όταν οι συνθήκες το επιβάλουν. Αυτές είναι *ενεμάτωση με χαμηλή πίεση* (grouting), *ενεμάτωση με υψηλή πίεση* (jet grouting) *ψύξη του εδάφους* (ground freezing) και *αποστράγγιση* (drainage) (Βιόπουλος, 2006 από Peila et al.,2006).

Η ενεμάτωση χαμηλής πίεσης έχει σκοπό να βελτιώσει να σταθεροποιήσει και να στεγανοποιήσει εδαφο-βραχομάζες χωρίς να διαταράξει τη δομή του μέσου. Η ενεμάτωση μπορεί να γίνει από την επιφάνεια ή από το μέτωπο (με την προϋπόθεση ότι το δεύτερο βρίσκεται τουλάχιστον 20-40m πίσω από τη ζώνη αδυναμίας.

Η ενεμάτωση υψηλής πίεσης από την άλλη πλευρά αποσκοπεί στην καταστροφή του εδαφικού ιστού. Το εδαφικό υλικό αφού μεταφερθεί στην επιφάνεια επιστρέφει με τη μορφή τσιμεντοπολφού και στερεοποιείται. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτει ένα νέο ομογενοποιημένο εδαφικό υλικό με καλύτερες γεωτεχνικές ιδιότητες. Η τεχνική αυτή καλείται και τεχνική τσιμεντοεδαφοπασσάλων.

Η ψύξη εδάφους αποσκοπεί στον έλεγχο της ροής υδάτων στη σήραγγα και γύρω απ αυτή. Η ψύξη γίνεται σε 4 στάδια. Αυτά είναι η εγκατάσταση του ψυκτικού συστήματος, η ενεργή ψύξη για τη δημιουργία ζώνης ψύξης, η συντήρηση ψύξης όσο γίνεται η εκσκαφή και ο έλεγχος της απόψυξης και των συνεπειών της (Βιόπουλος, 2006).

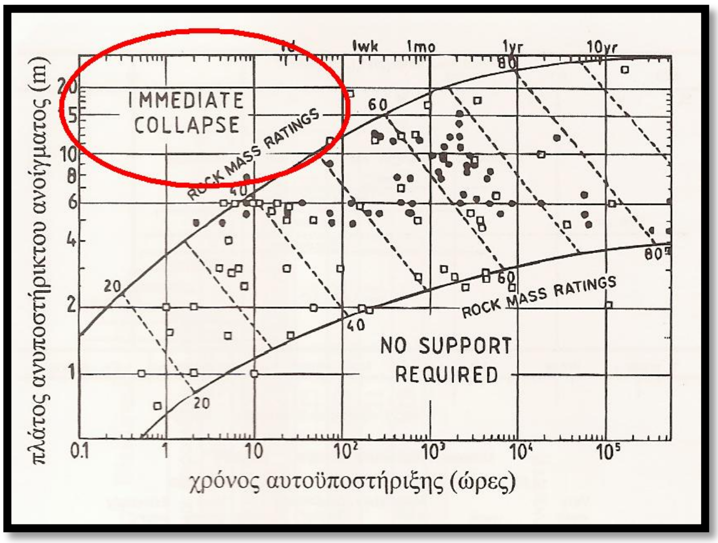
Τέλος, η αποστράγγιση πρέπει να γίνει μπροστά από το μέτωπο μιας σήραγγας. Αστράγγιστες συνθήκες ή επικρεμάμμενοι υδροφόροι ορίζοντες θα πρέπει να αποφεύγονται καθώς οι πιέσεις πόρων προκαλούν μείωση γεωτεχνικών ιδιοτήτων και αλλαγές στο τασικό πεδίο και ευθύνονται για πολλές περιπτώσεις αστοχιών σε υπόγεια έργα (**Εικόνα 3:2)**. Σε μικρά βάθη η αποστράγγιση γίνεται με απλούς σωλήνες και χωρίς έλεγχο υδάτων ενώ σε μεγαλύτερα βάθη χρησιμοποιούνται μεγάλα συστήματα αποστράγγισης με ποικιλία μεθόδων ελέγχου ροής.

**Εικόνα 3:3 Αστοχία σήραγγας λόγω επικρεμάμενου υδροφόρου ορίζοντα. (από αρχείο Βογιατζή, Σ.)**

## 3.3 Προσωρινή υποστήριξη

### 3.3.1 Προϋποστήριξη

Υπάρχουν περιπτώσεις (κυρίως σε αβαθείς σήραγγες) όπου η ο χρόνος αυτοϋποστήριξης της βραχομάζας είναι μικρότερος από το χρόνο που απαιτείται για την εφαρμογή της προσωρινής υποστήριξης ή ακόμη και μηδενικός (**Εικόνα 3:1**). Τότε εφαρμόζονται μέτρα για την προϋποστήριξη της βραχομάζας μπροστά από το μέτωπο και περιμετρικά της σήραγγας έτσι ώστε οι εργασίες προχώρησης να γίνονται υπό την προστασία των μέτρων προενίσχυσης (**Εικόνα 3:5**).



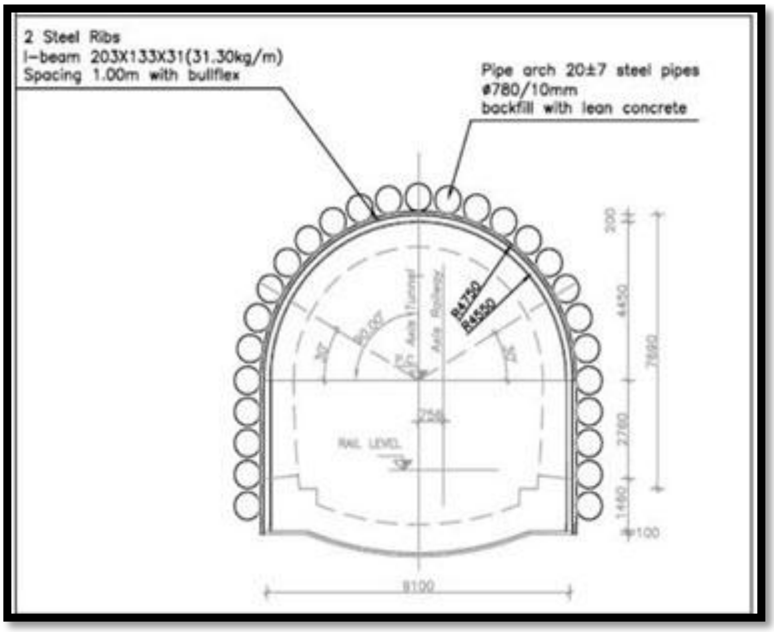

Εικόνα 3:4 : Σχέση ανάμεσα στον δείκτη RMR και στον χρόνο αυτοϋποστήριξης ανυποστήρικτων ανοιγμάτων (Αγιουτάντης, 2002 , από Bieniawski, 1979)

Ακόμη, ένα σημαντικό μέρος των επιφανειακών καθιζήσεων οφείλονται σε προ-συγκλίσεις, οι οποίες προκαλούνται από την χαλάρωση του γεωυλικού πριν την τοποθέτηση της υποστήριξης. Μείωση των προσυγκλίσεων μπορεί να επιτευχθεί με τη εφαρμογή μέτρων βελτίωσης της βραχομάζας μπροστά απ το μέτωπο ή με την εφαρμογή μέτρων προϋποστήριξης με επαρκές μέτρο ακαμψίας (Aksoy, Onargan 2010).

Η προϋποστήριξη μπορεί να γίνει με τους εξής τρόπους:

- Περιφερειακή πρότμηση (mechanical precut).
- Μέθοδος pretunnel.
- Προπασσάλωση οροφής με ενεμάτωση υψηλής πίεσης.
- Προπασσάλωση οροφής pipe roof
- Προπασσάλωση οροφής με χαλύβδινες δοκούς προπορείας

Σε όλες τις μεθόδους η αρχή λειτουργίας βασίζεται στην εισαγωγή στοιχείων μεγάλης αντοχής και ακαμψίας πίσω από το μέτωπο έτσι ώστε να συγκρατούν τον σχηματισμό μέχρι να εφαρμοστεί η υποστήριξη. Οι μέθοδοι pretunnel, περιφερειακής πρότμησης και προπασσάλωσης οροφής με ένεμα υψηλής πίεσης δημιουργούν μια αψίδα πάνω από το μέτωπο ενώ οι υπόλοιπες αποτελούνται από μεμονωμένα στοιχεία.




Εικόνα 3:5 Προπασσάλωση οροφής (www.tunneltalk.com)

Τέλος, σε περιπτώσεις όπου υπάρχει προσέγγιση της σήραγγας από άλλη γειτονική της, προενίσχυση μπορεί να γίνει και με προεντεταμένα συρματόσχοινα μεγάλης διαμέτρου.

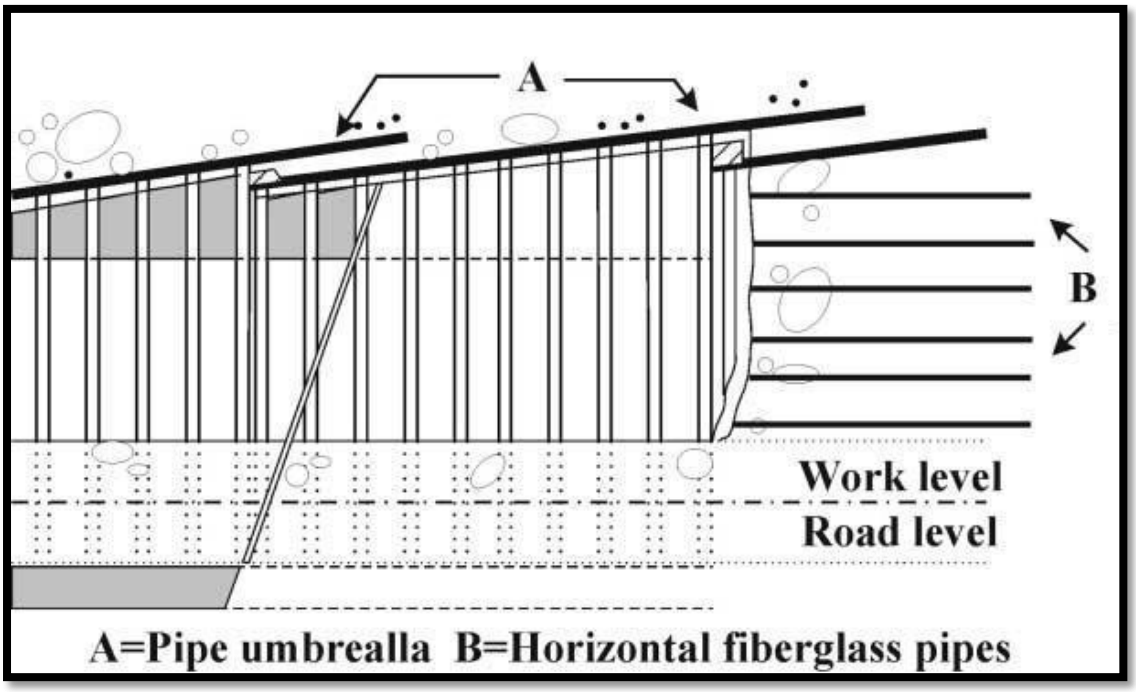
### 3.3.2 Μέτρα προσωρινής υποστήριξης

Στα μέτρα προσωρινής υποστήριξης κατατάσσονται το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και τα χαλύβδινα πλαίσια. Η υποστήριξη που παρέχουν είναι παθητική. Τα χαλύβδινα πλαίσια αποτελούνται από άκαμπτα στοιχεία με άκαμπτες συνήθως αρθρώσεις σύνδεσης. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε ως αυτόνομη ασυνεχή υποστήριξη ή σε συνδυασμό με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (λειτουργεί ως οπλισμός). Ανάλογα τη χρήση τους μπορεί να είναι βαριά πλαίσια τύπου HEB 100-180 για άκαμπτες διατομές που παρεμποδίζουν τη σύγκλιση ή πιο ελαφρά δικτυωτά πλαίσια τύπου lattice girder. Τα τελευταία αποτελούνται από ράβδους οπλισμού και συνδετήρες με μορφή χωροδικτυώματος.

Σε ότι αφορά το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, αποτελείται από τσιμέντο νερό και λεπτόκκοκα αδρανή (έως 10mm) και κάποιον επιταχυντή πήξεως. Εφαρμόζεται στη διατομή ή στο μέτωπο με εκτόξευση με τη βοήθεια πεπιεσμένου αέρα. Καλείται υγρό μίγμα όταν η ανάμιξη με νερό γίνεται στον αναδευτήρα και ξηρό μίγμα όταν το νερό προστίθεται στο στόμιο εκτοξεύσεως. Με τη χρήση του εξασφαλίζεται η παθητική αντίσταση έναντι της πλαστικοποίησης του περιβάλλοντος υλικού καθώς κατασκευάζεται μια φέρουσα υποστήριξη κατά μήκος της σήραγγας. Τα τελευταία χρόνια, έχει διαδοθεί ιδιαίτερα η χρήση του ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Με την προσθήκη μεταλλικών ινών αυξάνεται η αντοχή και η πλαστικότητα του. Δρα δηλαδή σαν οπλισμός (Καββαδάς, 2000).

### 3.3.3 Υποστήριξη Μετώπου

Ασταθή μέτωπα μπορούν να υποστηριχθούν με μια ποσότητα προϊόντων εξόρυξης ή να ενισχυθούν με ηλώσεις τύπου fiberglass και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Και οι δύο μέθοδοι είναι προσωρινές και πρέπει να απομακρυνθούν πριν το επόμενο βήμα εκσκαφής. Σε μαλακά εδάφη και διαμέτρους άνω των 4m το μέτωπο πρέπει να είναι κεκλιμένο κατά 60 – 70ο από την οριζόντιο (Kolymbas,2008).




3:6 : Μηκοτομή σήραγγας με προϋποστήριξη τύπου ομπρέλας δοκών προπορείας, ενίσχυση μετώπου με αγκύρια fiberglass και προσωρινή υποστήριξη χαλύβδινων πλαισίων και εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Yoo Chungsik, 2005)

# Κεφάλαιο 4

# Αριθμητική Ανάλυση σηράγγων

## 4.1 Γενικά

### 4.1.1 Προσέγγιση προβλήματος

Στη μελέτη των προβλημάτων ευστάθειας σηράγγων υπάρχουν τρεις τρόποι προσέγγισης: ο εμπειρικός, ο αναλυτικός και ο αριθμητικός. Ο εμπειρικές λύσεις βασίζονται σε εμπειρικές παρατηρήσεις από την κατασκευή παρόμοιων έργων ή παρόμοιων έργων σε παρόμοιους σχηματισμούς (Στειακάκης, 2001). Από τις παρατηρήσεις αυτές δημιουργούνται «πίνακες» για γρήγορη ταξινόμηση ευστάθειας σχηματισμών, απαιτούμενη υποστήριξη καθώς και περιπτώσεις με ιδιαίτερο ενδιαφέρον (π.χ. ανυδρίτες, φακοί αργίλου κλπ). Οι πίνακες αυτοί δε χαρακτηρίζονται από μεγάλη ακρίβεια και μάλιστα αναφέρονται σε συγκεκριμένες γεωτεχνικές συνθήκες. Αποτέλεσμα είναι η χρήση μεγάλων συντελεστών ασφαλείας κατά την ανάλυση αυτού του είδους.

Οι αναλυτικές λύσεις όπως: μέθοδοι οριακής ισορροπίας, μέθοδοι οριακής αναλύσεως, εξισώσεις κλειστής μορφής (ανάλυση εντατικού πεδίου με μιγαδικά δυναμικά ή πραγματικές διαρμονικές συναρτήσεις ελαστικότητας), μπορούν να δώσουν ακριβή αποτελέσματα και, σε πολλές περιπτώσεις απλοποιημένων προβλημάτων, η επίλυση των εξισώσεων είναι αρκετά απλή και γρήγορη διαδικασία. Σε περιπτώσεις όμως όπου το πρόβλημα χαρακτηρίζεται από ανομοιογένεια, ανισοτροπία, ή περίπλοκη γεωμετρία, οι αναλυτικές λύσεις μπορεί να είναι από δυσεπίλυτες και χρονοβόρες έως μη επιλύσιμες.

Τα τελευταία χρόνια, με την ταχεία ανάπτυξη των υπολογιστών, στον τομέα της μηχανικής σηράγγων αλλά και της γεωμηχανικής γενικότερα χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο οι αριθμητικές μέθοδοι. Αυτός ο τρόπος ανάλυσης τείνει να γεφυρώσει το χάσμα μεταξύ εμπειρικών και αναλυτικών λύσεων και να καλύψει κάποια από τα μειονεκτήματά τους. Μπορεί να δώσει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα σε δύο και τρεις διαστάσεις για πολύπλοκες γεωμετρίες, πολυστρωματικά μέσα και με διάφορους καταστατικούς νόμους.

Οι αριθμητικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τα κλασσικά προβλήματα ανάλυσης τάσεων παραμορφώσεων χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες: διαφορικές μέθοδοι (differential) και ολοκληρωτικές μέθοδοι (integral). Στις διαφορικές μεθόδους το συνεχές σώμα (domain) διαιρείται σε υποπεριοχές, κόμβους ή στοιχεία. Στη συνέχεια η διαδικασία επίλυσης βασίζεται σε αριθμητικές προσεγγίσεις των εξισώσεων ισορροπίας, κίνησης, ασυμβίβαστο τροπών, καταστατικών νόμων κ.α. και κατανομή της άγνωστης μεταβλητής σε όλη την υπό μελέτη περιοχής. (Brady & Brown, 2004). Στις μεθόδους αυτές ανήκουν η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (ΜΠΣ ή FEM), πεπερασμένων διαφορών (ΜΠΔ ή FDM) και διακριτών στοιχείων (ΜΔΣ ή DEM).

### 4.1.2 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM ή ΜΠΣ)

Στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, το συνεχές σώμα διαιρείται σε επιμέρους στοιχεία (πεπερασμένα στοιχεία) αποτελούμενα από κόμβους. Η διαδικασία καλείται διακριτοποίηση. Η συμπεριφορά των στοιχείων διέπεται από διαφορικές εξισώσεις ισορροπίας, κίνησης, συνέχειας και καταστατικών νόμων. Η άγνωστες ποσότητες υπολογίζονται στους κόμβους. Στη συνέχεια με βάση πολυωνυμικές συναρτήσεις (συναρτήσεις παρεμβολής), η άγνωστη ποσότητα κατανέμεται στο κάθε σημείο του συνεχούς μέσου (Αγιουτάντης, 2002).

Πλεονεκτήματα της μεθόδου αποτελούν η ικανότητα γρήγορης διακριτοποίησης οποιασδήποτε γεωμετρίας, η γραμμική ή μη γραμμική ανάλυση και τα ακριβή αποτελέσματα. Βασικό μειονέκτημα όμως αποτελεί η δημιουργία πολύ μεγάλων και δυσεπίλυτων μητρωικών εξισώσεων ιδίως σε τρισδιάστατα μη γραμμικά προβλήματα που ακόμη και με τα σύγχρονα μηχανήματα μπορούν να καταστήσουν την ανάλυση εξαιρετικά χρονοβόρα. Μερικά εμπορικά προγράμματα του είδους αποτελούν τα: Msc-Marc & Mentat, Msc-Nastran, ABAQUS, ANSYS.

### 4.1.3 Μέθοδος Πεπερασμένων Διαφορών (FDM ή ΜΠΔ)

Οι κώδικες πεπερασμένων διαφορών λύνουν τις διαφορικές εξισώσεις που ελέγχουν τη συμπεριφορά του συνεχούς, σε πεπερασμένο πεδίο ορισμού του προβλήματος, με βάση τις αρχικές και συνοριακές συνθήκες και τους καταστατικούς νόμους που το διέπουν.

Το γεγονός ότι είναι μέθοδος μη πεπλεγμένης μορφής (explicit) σημαίνει ότι οι άγνωστες μεταβλητές του προβλήματος προσδιορίζονται απευθείας μέσω των εξισώσεων διαφορών σε κάθε βήμα επίλυσης από γνωστές ποσότητες. Κύριο πλεονέκτημα της τεχνικής αυτής αποτελεί το γεγονός ότι δε δημιουργούνται μεγάλα και δυσεπίλυτα μητρώα που απαιτούν μεγάλο υπολογιστικό κόστος, ενώ βασικό μειονέκτημα είναι οι τυχόν πολλές επαναλήψεις που θα χρειαστεί η μέθοδος μέχρι να έρθει σε ισορροπία (Brady & Brown, 2004)

Το συνεχές διακριτοποιείται σε ζώνες (zones), στις κορυφές των οποίων βρίσκονται οι κόμβοι (grid points). Στους κόμβους γίνεται η επίλυση των διαφορικών εξισώσεων και υπολογίζονται οι άγνωστες μεταβλητές. Σε κάθε κόμβο αντιστοιχεί ένας αντιπροσωπευτικός όγκος του συνεχούς (ή επιφάνεια σε δισδιάστατα προβλήματα).

Η διαφορική εξίσωση εκφράζεται με βάση την τιμή της συνάρτησης στους κόμβους και βάση της παραγώγου της γύρω από αυτούς. Ανάλογα με τον τρόπο υπολογισμού των παραγώγων χωρίζονται σε: προς τα εμπρός διαφορές, κεντρικές διαφορές και προς τα πίσω διαφορές (forward differences, central, backward) (Εξαδάκτυλος & Σταυροπούλου, 2006).

### 4.1.4 Μέθοδος Διακριτών Στοιχείων (DEM ή ΜΔΣ)

Σε περιπτώσεις όπου η βραχομάζα τέμνεται από πολλές ασυνέχειες, ρήγματα ή είναι κερματισμένη, πλεονεκτεί η χρήση της ΜΔΣ. Η βραχομάζα συμπεριφέρεται σαν ένα σύνολο διακριτών τεμαχών τα οποία αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και είναι ελεύθερα να περιστραφούν να μετατοπιστούν και να υποστούν μεγάλες παραμορφώσεις όπως για παράδειγμα συμβαίνει κατά την κατάπτωση σφήνας (Hoek et al., 2005). Ο αλγόριθμος επίλυσης βασίζεται στο νόμο δύναμης μετατόπισης που καθορίζει την αλληλεπίδραση μεταξύ των τεμαχών καθώς και στις εξισώσεις κίνησης.

Για να διακριτοποιηθούν και να επιλυθούν τέτοια εξαιρετικά μη γραμμικά προβλήματα, οι ΜΠΣ και ΜΠΔ μπορεί να χρειαστούν πολλά στοιχεία διεπιφάνειας προκειμένου να περιγράψουν ρεαλιστικά (εάν αυτό είναι δυνατό) το πρόβλημα το οποίο σημαίνει αύξηση της πολυπλοκότητας του μοντέλου και ταυτόχρονα αύξηση του υπολογιστικού κόστους. Χαρακτηριστικοί εμπορικοί κώδικες του είδους αυτού είναι οι UDEC (Universal Distinct Element Code) και 3DEC της Itasca Consulting Group, Inc.

### 4.1.5 Μέθοδος Συνοριακών Στοιχείων (BEM ή ΜΣΣ)

Οι ολοκληρωτικές μέθοδοι χαρακτηρίζονται από το γεγονός ότι ένα πρόβλημα ορίζεται και επιλύεται σε όρους επιφανειακών μεταβλητών τάσεων (ελκυστών) και μετατόπισης. Αυτό σημαίνει μείωση της διάστασης του προβλήματος κατά μια. Τέτοια μέθοδος είναι η μέθοδος συνοριακών στοιχείων (ΜΣΣ ή BEM).

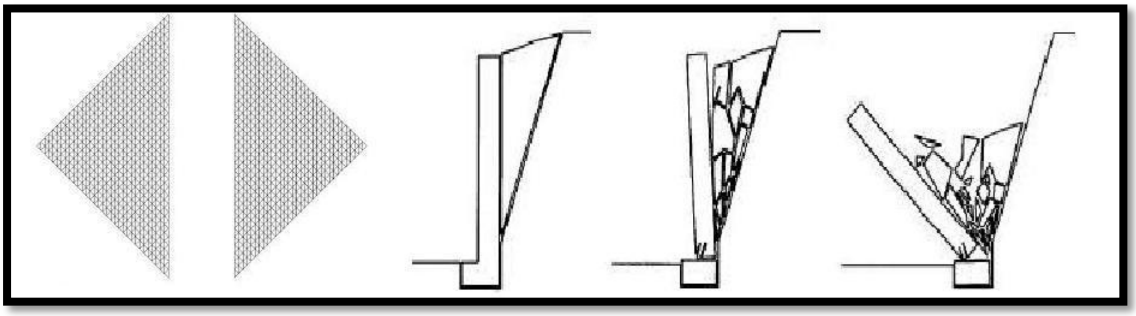
Στη μέθοδο αυτή διακριτοποιείται το σύνορο του πεδίου και όχι ολόκληρο το πεδίο (αντίθετα με τις ΜΠΣ και ΜΠΔ). Η διακριτοποίηση θα χωρίσει το όριο σε κόμβους πάνω στο οποίο θα υπολογιστούν οι ζητούμενες μεταβλητές. Στη συνέχεια με κατάλληλες συναρτήσεις συσχέτισης, η μεταβλητή κατανέμεται και στα υπόλοιπα σημεία του σώματος. Η επίλυση του αλγορίθμου βασίζεται στο αντίστροφο θεώρημα Betti το οποίο συνδέεται άμεσα με την αρχή του εικονικού έργου και μπορεί να διατυπωθεί ως εξής (Αγιουτάντης, 2002):

$$Φορτίσεις\ A\ \times Μετατοπίσεις\ B = Φορτίσεις\ B\ \times Μετατοπίσεις\ A$$

Στα πλεονεκτήματα της μεθόδου κατατάσσονται η ταχύτητα επίλυσης και η ικανότητα παραλαβής τάσεων μακρινού πεδίου χωρίς ενδιάμεση διακριτοποίηση ενώ βασικά μειονεκτήματα αποτελούν η μαθηματική πολυπλοκότητα των εξισώσεων και η αδυναμία κατά την επίλυση μη ομογενών προβλημάτων. Ένα παράδειγμα τέτοιου εμπορικού κώδικα αποτελεί το Examin2D της Rocscience.

### 4.1.6 Υβριδικές Μέθοδοι

Σε μια προσπάθεια να ξεπεραστούν κάποια μειονεκτήματα των αναφερθέντων μεθόδων και να συνδυαστούν τα πλεονεκτήματά τους, αναπτύχθηκαν κάποιες υβριδικές μέθοδοι. Παραδείγματα τέτοιων μεθόδων αποτελούν ο συνδυασμός ΠΣ-ΣΣ (ΠΣ στις ζώνες που απαιτείται μη γραμμική ανάλυση ή παρουσιάζεται ανομοιογένεια και ΣΣ για στα σύνορα του προβλήματος), ΠΔ-ΠΣ και ΔΣ-ΠΣ (ΠΣ για τη προσομοίωση δομικών στοιχείων σε κάνναβο ΠΔ και σε τεμάχια ΔΣ αντίστοιχα). Τέλος σε προβλήματα μετάβασης από συνεχές σε ασυνεχές σώμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος συνδυασμού ΠΣ-ΔΣ (**Εικόνα 4:1**).



Εικόνα 4:1 Αριστερά: Διακριτά Πεπερασμένα στοιχεία. Δεξιά: Αρχική κατάσταση, αστοχία και κατάρρευση πρανούς (μετάβαση από συνεχές σε ασυνεχές πρόβλημα) (Munjiza, 2004).

## 4.2 Στοιχεία της μεθόδου Πεπερασμένων Διαφορών

### 4.2.1 Διαδικασία της ΜΠΔ

Στόχος της διαδικασίας των πεπερασμένων διαφορών είναι να έρθει το συνεχές σε ισορροπία, ξεκινώντας από τις αρχικές και συνοριακές συνθήκες. Στη συνέχεια μεταφέρονται οι φορτίσεις, με τη μορφή δυνάμεων-μετατοπίσεων, στους κόμβους. Ο αλγόριθμος δουλεύει σε επαναλήψεις μέχρι να επέλθει ισορροπία (ή κατάσταση κοντά σε αυτή) στους κόμβους.

Η εξίσωση συνέχειας βασίζεται στο θεώρημα απόκλισης του Gauss. Ξεκινώντας από ένα μικρό όγκο του συνεχούς, η ταχύτητα μετατόπισης υπολογίζεται από:

$$\int_V u_{ij} dV = \int_S u_i n_j dS \ , \ i,j = 1,2,3 \tag{4.1}$$

Αν θεωρηθεί ο όγκος αυτός ως τετράεδρο με σταθερό ρυθμό παραμόρφωσης, το πεδίο ταχύτητας είναι γραμμικό και η εξίσωση παίρνει τη διακριτή μορφή:

$$V\, u_{i,j} = \sum_{f=1}^{4} \overline{u}_i^{(f)} n_j^{(f)} S^{(f)} \tag{4.2}$$

ή

$$V\, u_{i,j} = \frac{1}{3}\sum_{l=1}^{4} u_i^l \sum_{l=1, l\neq f}^{4} n_j^{(f)} S^{(f)} \quad (4.3)$$

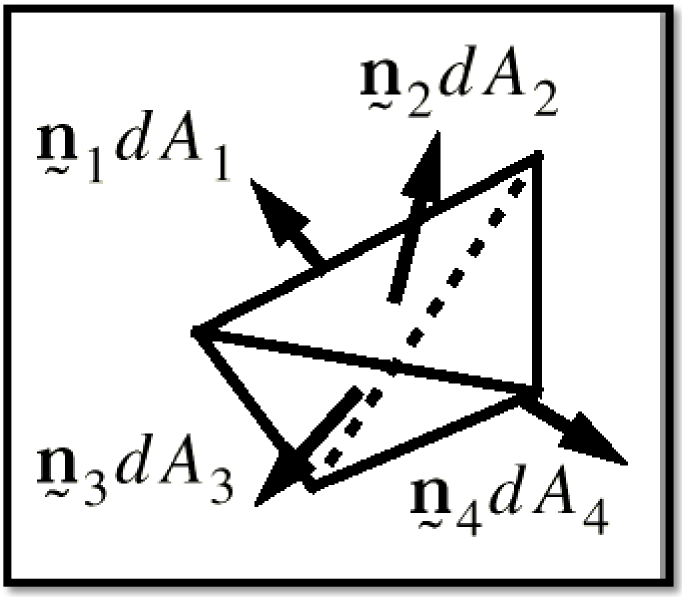
Όπου $\overline{u}_\iota^{(f)}$= μέση ταχύτητα

Για κλειστή επιφάνεια ισχύει :

$$\int_S n_j dS = 0 \quad (4.4)$$

Αντικαθιστώντας το $u_i$ με μονάδα, η εξίσωση **4.1** καταλήγει στην **4.3** και, επειδή πρόκειται για τετράεδρο (**Εικόνα 4:2**), γράφεται διακριτά:

$$\sum_{f=1}^{4} n_j^{(f)} S^{(f)} = 0 \quad (4.5)$$




Εικόνα 4:2 Τετράεδρο του Cauchy

Άρα τελικά η χωρική παράγωγος της ταχύτητας στον κάθε κόμβο δίνεται ως:

$$u_{i,j} = -\frac{1}{3V}\sum_{l=1}^{4} u_i^l n_j^l S^l \quad (4.6)$$

Και επειδή ο ρυθμός παραμόρφωσης για απειροελάχιστο χρόνο δίνεται από :

$$\xi_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (4.7)$$

Μπορεί τελικά να εκφραστεί σε κάθε κόμβο ως:

$$\xi_{ij} = -\frac{1}{6V}\sum_{l=1}^{4}(u_i^l n_j^l + u_j^l n_i^l)\, S^l \quad (4.8)$$

Σε ότι αφορά τις εξισώσεις κίνησης στους κόμβους, λύνονται ψευδο-στατικά. Το μέσο διακριτοποιείται σε στοιχειώδη τετράεδρα σταθερής παραμόρφωσης τα οποία υπόκεινται σε δυνάμεις πεδίου [$B_i$]. Οι επικόμβιες δυνάμεις [f]$^n$ σε ένα τετράεδρο σε κατάσταση ισορροπίας ανακτώνται από το θεώρημα πραγματικού έργου. Από την άσκηση μιας επικόμβιας ταχύτητας δ[u]$^n$ ,η οποία δημιουργεί ένα γραμμικό πεδίο ταχύτητας δ[u] και ένα σταθερό ρυθμό παραμόρφωσης δ[ξ] μέσα στο τετράεδρο, εξισώνεται ο ρυθμός μεταβολής εξωτερικού έργου, που παράγεται από τις επικόμβιες δυνάμεις και τις δυνάμεις πεδίου, με τον ρυθμό μεταβολής εσωτερικού έργου που παράγεται από τις τάσεις που προκαλεί αυτή η ταχύτητα (Itasca, 2003).

Η εξίσωση κίνησης του Cauchy :

$$\sigma_{ij,j} + \rho b_i = \rho \frac{dv_i}{dt} \qquad (4.9)$$

$\sigma_{ij}$ = τανυστής τάσης

$b_i$ = διάνυσμα δυνάμεων πεδίου

ρ = πυκνότητα

t = χρόνος

$v_i$ = διάνυσμα ταχύτητας

ή αλλιώς:

$$\sigma_{ij,j} + \rho B_i = 0 \qquad (4.10)$$

όπου : $B_i = \rho( b_i - \frac{dv_i}{dt})$

Σε όρους επικόμβιων δυνάμεων γράφεται ως:

$$f_i^{<l>} = M^{<l>} (\frac{dv_i}{dt})^{<l>} \qquad (4.11)$$

$M^{<l>}$ = [[m]]$^{<l>}$ = ιδεατή μάζα κόμβου

$f^{<l>}$ = επικόμβια δύναμη

Ο ρυθμός μεταβολής εσωτερικού έργου δίνεται ως:

$$I = \int_V \delta\xi_{ij}\sigma_{ij}\, dV \qquad (4.12)$$

Από την (**4.8**) :

$$I = -\frac{1}{6}\sum_{l=1}^{4}( \delta v_i{}^l \sigma_{ij} n_j{}^{(l)} + \delta v_j{}^l \sigma_{ij} n_i{}^{(l)}) S^{(l)} \tag{4.13}$$

Ο τανυστής τάσης είναι συμμετρικός άρα θεωρείται ελκυστής τέτοιος ώστε:

$$T_i{}^l = \sigma_{ij} n_j{}^{(l)}\, S^{(l)} \tag{4.14}$$

Άρα το I δίνεται διακριτά για κάθε τετράεδρο από :

$$I = -\frac{1}{3}\sum_{l=1}^{4} \delta v_i{}^l T_i{}^l \tag{4.15}$$

Αντίστοιχα ο ρυθμός μεταβολής εξωτερικού έργου (έργο από επικόμβια φορτία και έργο από δυνάμεις πεδίου):

$$E = \sum_{n=1}^{4} \delta v_i{}^n f_i^n + \int_V \delta v_i B_i dV \tag{4.16}$$

ή

$$E = \sum_{n=1}^{4} \delta v_i{}^n f_i^n + E^b + E^I \tag{4.17}$$

Όπου $E^b$ το έργο των βαρυτικών δυνάμεων *ρbi:*

$$E^b = \rho b_i \int_V \delta v_i\, dV \tag{4.18}$$

Παίρνοντας σαν σύστημα αναφοράς ένα τοπικό σύστημα (x΄1, x΄2, x΄3) ως προς το κεντροειδές του τετραέδρου θερούνται γραμμικές συναρτήσεις της μορφής:

$$N^n = c_0^n + c_1^n x_1' + c_2^n x_2' + c_3^n x_3' \,,\ n = 1{,}4 \tag{4.19}$$

Όπου $c_0^n, c_1^n, c_2^n, c_3^n$ , σταθερές από την επίλυση του συστήματος :

$$N^n\left(x_1'^j, x_2'^j, x_3'^j\right) = \delta_{nj}\,, \qquad \delta_{nj} = Kronecker\ delta \tag{4.20}$$

Έτσι μπορεί να οριστεί το $\delta u_i$ ως:

$$\delta v_i = \sum_{n=1}^{4} \delta v_i{}^n N^n \tag{4.21}$$

Εξ ορισμού του κεντροειδούς όλα τα ολοκληρώματα της μορφής $\int_V x'_j dV$ απαλείφονται και αντικαθιστώντας την (**4.20**) και την (**4.21**) στην (**4.22**) προκύπτει:

$$E^b = \rho b_i \sum_{n=1}^{4} \delta v_i^n c_0^n V \tag{4.22}$$

Λύνοντας όμως το σύστημα της (**4.19**) (με τον κανόνα του Cramer) και χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες του κεντροειδούς προκύπτει:

$$c_0^n = \frac{1}{4} \tag{4.23}$$

Άρα η διακριτή μορφή του $E^b$ είναι τελικά:

$$E^b = \sum_{n=1}^{4} \delta v_i^n \frac{\rho b_i V}{4} \tag{4.24}$$

Το έργο των άλλων αδρανειακών δυνάμεων $E^I$ ορίζεται ως:

$$E^I = -\int_V \rho \delta v_i \frac{dv_i}{dt} dV \tag{4.25}$$

Και από (**4.21**):

$$E^I = -\sum_{n=1}^{4} \delta v_i^n \int_V \rho N^n \frac{dv_i}{dt} dV \tag{4.26}$$

Άρα το συνολικό εξωτερικό έργο:

$$E = \sum_{n=1}^{4} \delta {v_i}^n \left[ f_i^n + \frac{\rho b_i V}{4} - \int_V \rho N^n \frac{dv_i}{dt} dV \right] \tag{4.27}$$

Εξισώνοντας εσωτερικό με εξωτερικό έργο στην κατάσταση ισορροπίας:

$$-{f_i}^n = \frac{{T_i}^n}{3} + \frac{\rho b_i V}{4} - \int_V \rho N^n \frac{dv_i}{dt} dV \tag{4.28}$$

Αν θεωρηθούν μηδαμινές μεταβολές της επιτάχυνσης μέσα στο τετράεδρο :

$$\int_V \rho N^n \frac{dv_i}{dt} dV = \left(\frac{dv_i}{dt}\right)^n \int_V \rho N^n dV \tag{4.29}$$

Και χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες του κεντροειδούς :

$$\left(\frac{dv_i}{dt}\right)^n \int_V \rho N^n dV = \frac{\rho V}{4} \left(\frac{dv_i}{dt}\right)^n \tag{4.30}$$

Αντικαθιστώντας τον όρο *ρV/4* με μια πλασματική μάζα του κόμβου $m^n$:

$$\frac{\rho V}{4} \left(\frac{dv_i}{dt}\right)^n = m^n \left(\frac{dv_i}{dt}\right)^n \tag{4.31}$$

Άρα στην κατάσταση ισορροπίας:

$$-{f_i}^n = \frac{{T_i}^n}{3} + \frac{\rho b_i V}{4} - m^n \left(\frac{dv_i}{dt}\right)^n \tag{4.32}$$

Σε γενική μορφή ο καταστατικός νόμος γράφεται ως:

$$\dot{\sigma_{ij}} = H_{ij}(\sigma_{ij}, \xi_{ij}, k) \tag{4.33}$$

$k$ = Παράγοντας που σχετίζεται με το ιστορικό της φόρτισης.

Η χρονική διακριτοποίηση της εξίσωσης κίνησης γίνεται από τη συμβολή του καταστατικού νόμου (**4.33**), του ρυθμού παραμόρφωσης (**4.8**), και τους όρους της εξίσωσης κίνησης (**4.9**) και (**4.11)** (Konietzky et al. ,2001):

$$\frac{d{v_i}^{<l>}}{dt} = \frac{1}{M^{<l>}} f_i^{<l>}\left(t, \left(v_i^{<1>}, v_i^{<2>}, \dots, v_i^{<p>}\right)^{<l>}, k\right) \tag{4.34}$$

Γενικά, η διακριτοποίηση μιας συνεχούς συνάρτησης σε ένα σύνολο εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών ακολουθεί την εξής διαδικασία. Θεωρείται μια συνεχής συνάρτηση, *f(x)*,γνωστή σε συγκεκριμένα σημεία που απέχουν *Δx=h* μεταξύ τους. Τότε η «εμπρός» σειρά Taylor για την *f(x)* γύρω από ένα σημείο $x_i$ δίνει (Chakrabarty, 2006):

$$f(x_i + h) = f(x_i) + \ hf'(x_i) + \frac{1}{2}h^2 f'(x_i) + \ \dots \tag{4.35}$$

Αν από την (**4.35**) αποκοπούν οι όροι δεύτερης ή μεγαλύτερης τάξης παραγώγου προκύπτει η προς τα εμπρός διαφόριση της *f(x)*.

$$f'(x_i) \approx \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{h} + \ 0(h) \tag{4.36}$$

Όπου 0(h) το σφάλμα αποκοπής των όρων στο ανάπτυγμα Taylor.

Ανάλογα για την «πίσω» σειρά Taylor προκύπτει:

$$f(x_i - h) = f(x_i) + \ hf'(x_i) + \frac{1}{2}h^2 f'(x_i) + \ \dots \tag{4.37}$$

Και η προς τα πίσω διαφόριση:

$$f'(x_i) \approx \frac{f(x_i) - f(x_{i+1})}{h} + \ 0(h) \tag{4.38}$$

Αφαιρώντας την 4.35 από την 4.37 προκύπτει η εξίσωση κεντρικών διαφορών:

$$f'(x) \approx \frac{f(x_i+h)-f(x_i-h)}{2h} + 0(h^2) \quad (4.39)$$

Έτσι, η αριθμητική επίλυση, γίνεται, μετά από τη μετατροπή του διαφορικού όρου σε εξίσωση κεντρικών διαφορών σε κάθε κόμβο:

$$v_i^{<l>}\left(t+\frac{\Delta t}{2}\right) = v_i^{<l>}\left(t-\frac{\Delta t}{2}\right) + \frac{\Delta t}{M^{<l>}} f_i^{<l>}\left(t, \left(v_i^{<1>}, v_i^{<2>}, \dots, v_i^{<p>}\right)^{<l>}, k\right) \quad (4.40)$$

Τελικά, οι μετατοπίσεις προκύπτουν από την αριθμητική ολοκλήρωση των ταχυτήτων:

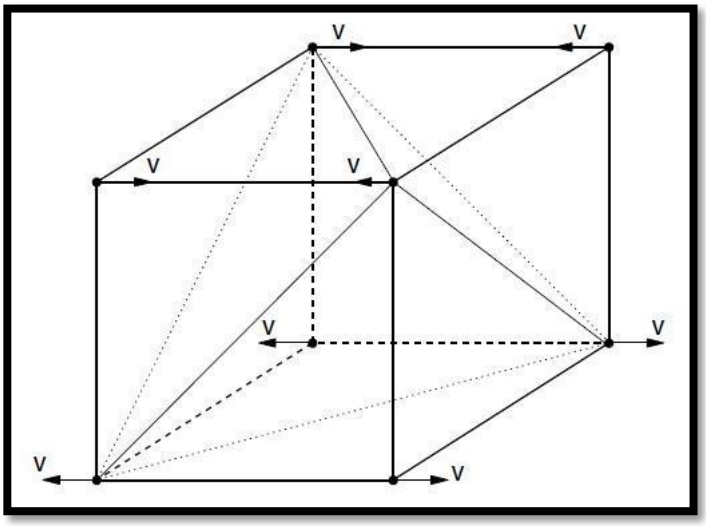
$$u_i^{<l>}(t+\Delta t) = u_i^{<l>}(t) + \Delta t v_i^{<l>}\left(t+\frac{\Delta t}{2}\right) \quad (4.41)$$

### 4.2.2 Διακριτοποίηση

Η διαδικασία της διακριτοποίησης (discretization) αφορά τη διαίρεση της γεωμετρίας του προβλήματος σε στοιχειώδη τμήματα, τις ζώνες (zones), και κόμβους (nodes ή gridpoints). Πυκνό πλέγμα διακριτοποίησης με πολλούς κόμβους και ζώνες προσφέρει πιο αξιόπιστα αποτελέσματα, κάτι τέτοιο όμως αυξάνει το υπολογιστικό κόστος της προσομοίωσης. Η γενική αρχή που ακολουθείται είναι πύκνωση του καννάβου σε περιοχές που αναμένεται απότομη μεταβολή του ζητούμενου εντατικού μεγέθους ή στην «περιοχή ενδιαφέροντος» και αραίωση μακριά από αυτό.

Σημαντικό είναι ακόμη, για εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων, η διακριτοποίηση να μην παρουσιάζει έντονες μεταβολές αλλά να μεταβάλλεται σταδιακά. Για παράδειγμα η απότομη μεταβολή από ζώνες μεγάλου όγκου σε ζώνες μικρού όγκου ή από ζώνες έντονης καμπυλότητας σε ορθογωνικές οδηγεί σε αριθμητικά σφάλματα ή θέματα μη σύγκλισης του αλγορίθμου. Συνήθως δίνονται κάποια όρια για το λόγο όγκων γειτονικών ζωνών (aspect ratio) και της «ορθογωνικότητας» (orthogonality).

Η ανάλυση μέσω των τετραέδρων σταθερού ρυθμού παραμόρφωσης που προαναφέρθηκε, δε μπορεί να περιγράψει ακριβώς πλαστικές παραμορφώσεις. Για να αποφευχθεί αυτό το πρόβλημα γίνεται χρήση της «μικτής διακριτοποίησης» (mixed discretization), μια τεχνική που δημιουργήθηκε από τους Marti και Cundall (1982). Η βασική αρχή της είναι η δημιουργία πιο ευέλικτων, με βάση τον όγκο, στοιχείων, προσαρμόζοντας κατάλληλα την πρώτη αναλλοίωτη του τανυστή παραμόρφωσης του τετραέδρου, αφού ο τελευταίος αποτελεί ένα μέτρο διόγκωσης του τετραέδρου. Τελικά, η διακριτοποίηση γίνεται όπως φαίνεται στην **Εικόνα 4:3** σε ζώνες τριών διαστάσεων που αποτελούνται από τετράεδρα (Itasca, 2003).




Εικόνα 4:3 Τεχνική της "μικτής διακριτοποίησης" (Itasca, 2003)

### 4.2.3 Συνοριακές συνθήκες

Η επίλυση με αριθμητικές μεθόδους είναι στην ουσία επίλυση διαφορικών εξισώσεων που εκφράζουν τους εκάστοτε καταστατικούς νόμους που επιλέγονται. Για να έχει νόημα λοιπόν ένα πρόβλημα, θα πρέπει να ορισθούν κάποιες συνοριακές ή αρχικές συνθήκες και να λυθεί σαν πρόβλημα αρχικών τιμών (Π.Α.Τ.), αλλιώς, καταλήγει σε μια «προφανή» λύση (trivial solution). Γενικά ένα σύστημα εξισώσεων (έστω γραμμικό) παρουσιάζει τις εξής λύσεις:

$$F = AE\frac{\Delta l}{l} \Leftrightarrow \begin{cases} \text{Προφανής λύση της μορφής } 0 = 0 \\ \text{Επιθυμητή λύση} \end{cases}$$

Οι συνοριακές συνθήκες εκφράζουν αφενός μεν τους γεωμετρικούς περιορισμούς που υπάρχουν από την μορφή του σώματος και την έκταση που καταλαμβάνει στο χώρο, αφετέρου τις εξωτερικές δυνάμεις που ασκούνται σε αυτό (Λιαράκος, 2006).

Μπορούν δε να οριστούν τρεις τύποι συνοριακών συνθηκών (Αγιουτάντης, 2002):

- Οι *γεωμετρικές συνοριακές συνθήκες* ή *συνθήκες Dirichlet*. Ορίζονται ως ο προσδιορισμός των τιμών *της ζητούμενης μεταβλητής* σε κάποιον ή κάποιους κόμβους.
- Οι *φυσικές συνοριακές συνθήκες* ή *συνθήκες Newmann*. Ορίζονται ως ο προσδιορισμός των τιμών της *παραγώγου της ζητούμενης μεταβλητής* σε κάποιον ή κάποιους κόμβους.
- Οι *μικτές συνοριακές συνθήκες* οι οποίες ορίζονται ως ο προσδιορισμός και των δύο παραπάνω παραμέτρων σε κάποιον ή κάποιους κόμβους.

Μπορούν να είναι πραγματικές ή τεχνητές. Οι πραγματικές προσομοιώνουν κάποιο πραγματικό σύνορο της γεωμετρίας του προβλήματος ή μια πραγματική φόρτιση (σημειακή ή κατανεμημένη).

Οι τεχνητές χωρίζονται σε σύνορα αποκοπής (τέλος καννάβου) ή σύνορα συμμετρίας και βοηθούν στην προσομοίωση του προβλήματος βάση συμμετρίας. Συνήθως οριοθετούν τη γεωμετρία. Για παράδειγμα αν υπάρχει ένα επίπεδο συμμετρίας, όλες οι κάθετες σε αυτό μετατοπίσεις θα είναι μηδενικές. Άρα η συμπεριφορά προσομοιώνεται με συνοριακές συνθήκες μηδενικής μετατόπισης ως προς τη διεύθυνση κάθετη στο επίπεδο. Σε ότι αφορά το σύνορο αποκοπής, όταν η γεωμετρία ενός προβλήματος είναι άπειρη, όπως στην περίπτωση της σήραγγας, πρέπει να τεθεί ο κάνναβος σε πεπερασμένα όρια.

Η φόρτιση του υλικού ή αντίστοιχα η φόρτιση του διαιρεμένου πεδίου που αντιπροσωπεύει το υλικό στη ΜΠΔ, είναι δυνατό να επιτευχθεί με έναν από του ακόλουθους τρόπους:

- επιβολή δυνάμεων πεδίου.
- επιβολή επιφανειακών ελκυστών.
- επιβολή τάσεων.
- επιβολή ταχύτητας μετατοπίσεων στους κόμβους.

Μεγάλη προσοχή πρέπει να δίνεται στην επιλογή των κατάλληλων συνοριακών συνθηκών έτσι ώστε κατά την επίλυση να προκύψουν όσο το δυνατόν πιο ακριβή αποτελέσματα.

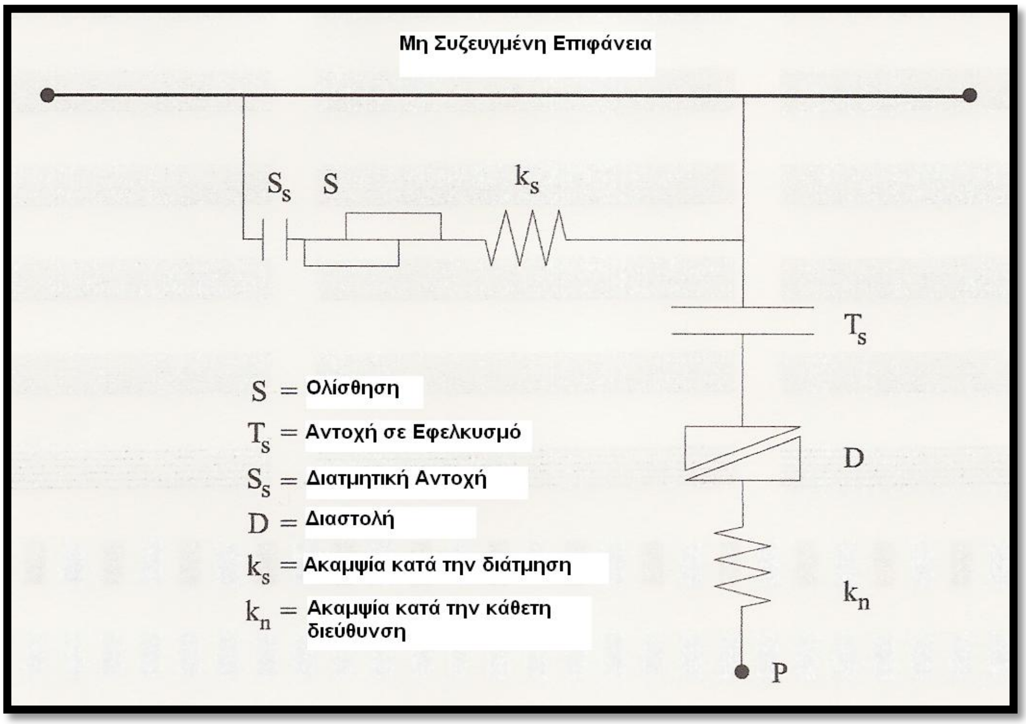
### 4.2.4 Στοιχεία «διεπιφάνειας»

Σε πολλές περιπτώσεις στη γεωμηχανική επιθυμείται η προσομοίωση περιοχής που διακόπτει τη συνέχεια του υπό διακριτοποίηση συνεχούς σώματος. Τέτοια παραδείγματα αποτελούν τα ρήγματα, οι επαφές γεωλογικών σχηματισμών, επαφή δομικών στοιχείων και εδαφοβραχομάζας, «σιλό» αποκομιδής μεταλλεύματος σε υπόγειες εκμεταλλεύσεις κ.α. Στις περιπτώσεις αυτές χρησιμοποιούνται ειδικά στοιχεία διεπιφάνειας (interface elements). Τα στοιχεία αυτά, επιτρέπουν τη δημιουργία ενός επιπέδου που έχει τη δυνατότητα να συρθεί, να ολισθήσει ή και να αποκολληθεί από το συνεχές μέσο αλλά και να ενώσει το συνεχές μέσο σε σημεία με διαφορετική πύκνωση διακριτοποίησης (**Εικόνα 4:4**).

Ανάλογα με το λόγο χρήσης τους, οι διεπιφάνειες μπορούν να χωριστούν σε τρεις διαφορετικές κατηγορίες. Σύμφωνα μ’ αυτές τους προσδίδονται και ανάλογες ιδιότητες (Itasca, 2003) :

- Τεχνητές διεπιφάνειες. Χρησιμοποιούνται για την ένωση καννάβων με διαφορετική πύκνωση.
- Πραγματικές επιφάνειες, άκαμπτες σχετικά με το συνεχές, που μπορούν να προσομοιώσουν όμως τριβή ή ολίσθηση.
- Πραγματικές εύκαμπτες επιφάνειες σε σχέση με το συνεχές.

Στο Flac$^{3D}$ η διεπιφάνεια δημιουργείται από τριγωνικά-τρικομβικά επιφανειακά στοιχεία διατεταγμένα έτσι ώστε κάθε ζώνη πεπερασμένων διαφορών να καλύπτεται από 2 (τουλάχιστον) στοιχεία επιφάνειας. Όπως και στις ζώνες Π.Δ. έτσι και στα στοιχεία αυτά, η επιφάνεια διαιρείται έτσι ώστε να αντιστοιχεί μια αντιπροσωπευτική περιοχή σε κάθε κόμβο ανάλογα με τις συναρτήσεις μορφής. Κάθε κόμβος προσκολλάται στη συνορεύουσα επιφάνεια του ενός εκ των δύο στερεών που πρόκειται να έρθουν σε επαφή. Ο καταστατικός νόμος που χρησιμοποιείται είναι γραμμικό κριτήριο Coulomb.




**Εικόνα 4:4 : Εξιδανικευμένο φυσικό προσομοίωμα συμπεριφοράς διεπιφανειών που παρουσιάζουν συνοχή (Itasca, 2003).**

Σε κάθε βήμα, υπολογίζεται η κάθετη μετατόπιση προς τη μη συζευγμένη επιφάνεια καθώς και η σχετική διατμητική μετατόπιση. Οι τιμές αυτές εισάγονται στον καταστατικό νόμο και υπολογίζονται στη συνέχεια τα διανύσματα κάθετης και διατμητικής δύναμης. Η αλληλεπίδραση μπορεί να είναι ελαστική ή μη ελαστική. Για την ελαστική αλληλεπίδραση ισχύει (Itasca, 2003):

$$F_n^{(t+\Delta t)} = k_n u_n A + \sigma_n A \tag{4.42}$$

$$F_{si}^{(t+\Delta t)} = F_{si}^{(t)} + k_s \Delta u_{si}^{\left(t+\left(\frac{1}{2}\right)\Delta t\right)} A + \sigma_{si} A \tag{4.43}$$

Όπου:

$F_n^{(t+\Delta t)}$ = η κάθετη δύναμη στο βήμα (t + Δt)

$F_{si}^{(t+\Delta t)}$ = η διατμητική δύναμη στο βήμα (t + Δt)

$u_n$ = προσχώρηση του κόμβου επαφής στη μη συζευγμένη επιφάνεια

$\Delta u_{si}$ = διαφορικό σχετικής διατμητικής μετατόπισης

$\sigma_n$ = πρόσθετη ορθή τάση στη διεπιφάνεια

$\sigma_{si}$ = πρόσθετη διατμητική τάση στη διεπιφάνεια

$k_n$ = ακαμψία κατά τη διεύθυνση των ορθών τάσεων

$k_s$ = ακαμψία κατά τη διεύθυνση των διατμητικών τάσεων

A = η αντιπροσωπευτική περιοχή του κάθε κόμβου επαφής

Η ελαστοπλαστική θεώρηση επαφής ακολουθεί τρία στάδια: συνδεδεμένη διεπιφάνεια (Bonded), ολισθαίνουσα συνδεδεμένη διεπιφάνεια (Slip while bonded) και τέλος ολίσθηση κατά Coulomb.

Η συνδεδεμένη διεπιφάνεια συμπεριφέρεται ελαστικά μέχρι την υπέρβαση της αντοχής του δεσμού (σε διάτμηση ή εφελκυσμό). Στη συνέχεια ο δεσμός αστοχεί. Η διατμητική αστοχία μπορεί να προκαλέσει ολίσθηση χωρίς να σπάσει ο δεσμός. Τέλος, η επιφάνεια ολισθαίνει ακολουθώντας κριτήριο αστοχίας Coulomb:

$$F_{smax} = cA + tan\varphi\ (F_n + pA) \tag{4.44}$$

Ενώ κατά τη διάρκεια της ολίσθησης η διατμητική μετατόπιση μπορεί να προκαλέσει μία αύξηση της ορθής τάσης στην ασυνέχεια. Η αύξηση δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_n = \sigma_n + \frac{|F_s|_o - F_{smax}}{Ak_s}\ tan\psi\ k_n \tag{4.45}$$

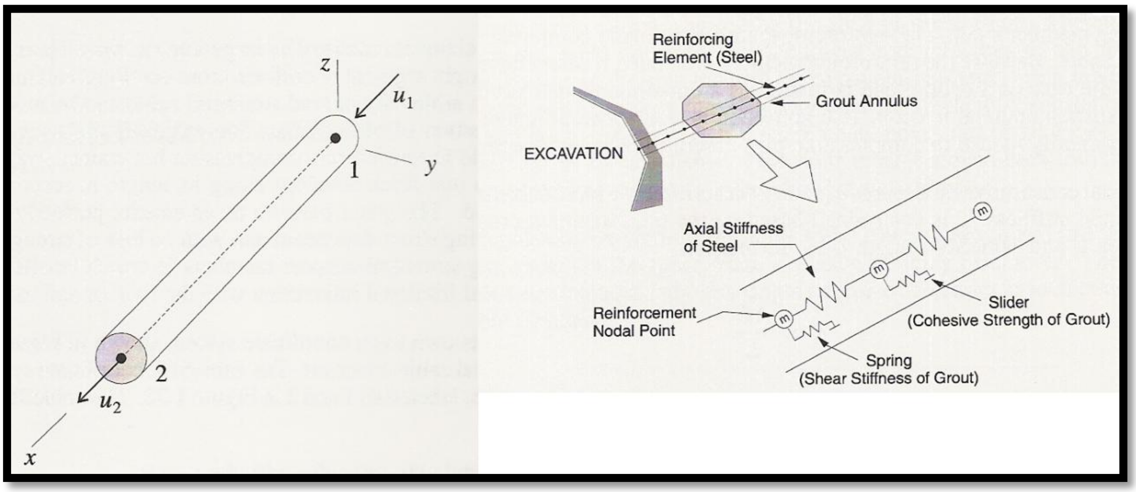
ψ = γωνίας διαστολής της διεπιφάνειας [μοίρες]

$|Fs|_o$ = τιμή της διατμητικής δύναμης πριν τη διόρθωση

### 4.2.5 Δομικά στοιχεία

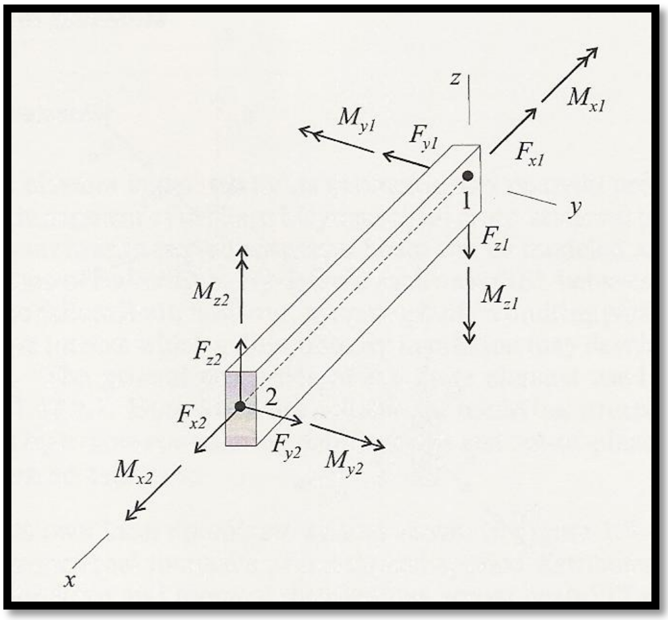
Τα δομικά στοιχεία (Structural Elements) χρησιμοποιούνται στα γεωτεχνικά προβλήματα για την ευστάθεια ή ενίσχυση της εδαφο-βραχομάζας. Στο Flac$^{3D}$ υπάρχει η δυνατότητα χρήσης τέτοιου είδους στοιχείων είτε ανεξάρτητα από τον κάνναβο διακριτοποίησης είτε σε αλληλεπίδραση μ' αυτόν. Προσφέρονται έξι είδη δομικών στοιχείων: στοιχεία δοκού (beam element), κοχλία/αγκυρίου (cable), κελύφη πακτωμένα στο πλέγμα (shell), κελύφη με επαφή (liner), γεωυφάσματα (geogrid) και τέλος στοιχεία πασσάλων (Itasca, 2003). Χρησιμοποιήθηκαν τριών ειδών δομικά στοιχεία :

1. Στοιχεία κοχλίωσης / αγκύρωσης (**Εικόνα 4:5**), τα οποία είναι δι-κομβικά, γραμμικά πεπερασμένα στοιχεία με ένα βαθμό ελευθερίας ανά κόμβο. Μπορούν να συμπεριφερθούν ελαστοπλαστικά κατά την έννοια της αξονικής παραμόρφωσης αλλά δε μπορούν να παραλάβουν ροπές. Ακόμη μπορούν να συμπεριφερθούν είτε ως κοχλίες σημειακής αγκύρωσης είτε ως κοχλίες πλήρους πάκτωσης με ανάπτυξη διατμητικής τάσης στη διεπιφάνεια τσιμέντου/ρητίνης - πετρώματος.




Εικόνα 4:5 : Στοιχείο κοχλίωσης και μηχανική συμπεριφορά πλήρους πάκτωσης (Itasca, 2003)

2. Στοιχεία δοκού (**Εικόνα 4:6**), τα οποία αποτελούνται από δι-κομβικά, γραμμικά πεπερασμένα στοιχεία με έξι βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο. Κάθε τέτοιο στοιχείο μπορεί να συμπεριφερθεί ως απείρως ελαστικό μέσο ή ως τέλεια ελαστοπλαστικό εφόσον του ορισθεί ροπή πλαστικοποίησης. Οι κόμβοι τους μπορούν είτε να πακτωθούν στο πλέγμα είτε να δράσουν κάτω από σημειακό ή κατανεμημένο φορτίο.




Εικόνα 4:6 : Σύμβαση προσήμου για δυνάμεις και ροπές σε στοιχείο δοκού (Itasca, 2003)

3. Στοιχεία κελύφους επένδυσης, με επαφή. Τα στοιχεία επένδυσης αποτελούνται από τρι-κομβικά, τριγωνικά, επίπεδα στοιχεία. Εκτός από τη δυνατότητά τους να παραλάβουν ορθές τάσεις και ροπές, εμφανίζουν δυνάμεις τριβής με το περιβάλλον πέτρωμα, εφαπτομενικά ως προς το κέλυφος.

Στους ελεύθερους κόμβους των πεπερασμένων στοιχείων πρέπει να ορισθούν συνοριακές ή αρχικές συνθήκες. Αυτές μπορεί να είναι «Φυσικές» ή «Τεχνητές» (για λόγους συμμετρίας) συνοριακές συνθήκες.

Ακόμη, για τη σωστή προσομοίωση της συμπεριφοράς αλλά και σωστή αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, προσοχή πρέπει να δοθεί στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων των πεπερασμένων στοιχείων. Για παράδειγμα, στα στοιχεία επένδυσης, το σύστημα συντεταγμένων από τη στέψη έως τις παρειές, πρέπει να μεταβάλλεται και να ακολουθεί την καμπυλότητα του κελύφους.

# Κεφάλαιο 5

# Τρισδιάστατη προσομοίωση διάνοιξης-προσωρινής υποστήριξης σήραγγας

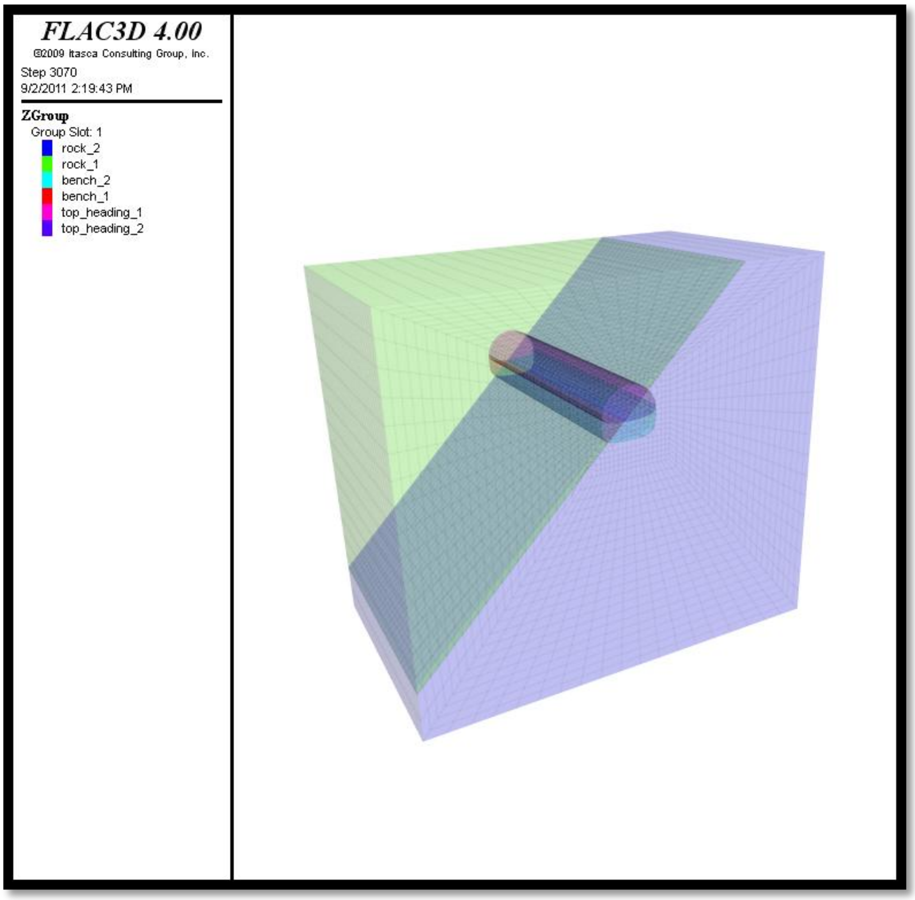
## 5.1 Διακριτοποίηση

Λόγω της γεωμετρίας του προβλήματος, η διακριτοποίηση έγινε σε δύο διαστάσεις, με το λογισμικό Flac v6.00 και στη συνέχεια ο δισδιάστατος κάνναβος πεπερασμένων διαφορών επεκτάθηκε στην τρίτη διάσταση (κατά z) μέσω του εργαλείου «*Extrude*». Η γεωμετρία αποτελείται από δύο γεωλογικά στρώματα με κλίση 45 μοιρών κατά την παράταξη και μία σήραγγα σταδιακής εκσκαφής.

Για να διακριτοποιηθεί η συγκεκριμένη γεωμετρία χωρίζεται 6 υποπεριοχές. Γενική αρχή της διακριτοποίησης είναι η πύκνωση του καννάβου σε περιοχές που αναμένονται μεγάλες μεταβολές. Έτσι ο κάνναβος πυκνώθηκε γύρω από τη σήραγγα ενώ μακριά από αυτή αραιώθηκε σταδιακά. Τα τελικά όρια του καννάβου είναι:

- xmin = -50m (πέντε φορές η ακτίνα της σήραγγας)
- xmax = 50m
- ymin = 0m
- ymax = 60m
- zmin = 60m
- zmax =30m (επιφάνεια εδάφους)

Χρησιμοποιήθηκαν τελικά 115290 ζώνες πεπερασμένων διαφορών. Η γεωμετρία χωρίστηκε σε έξι ομάδες (groups) κάθε μία από τις οποίες μπορεί να ελέγχεται με μία ξεχωριστή μακροεντολή. Η διακριτοποίηση και οι ομάδες φαίνονται στην **Εικόνα 5:1**.

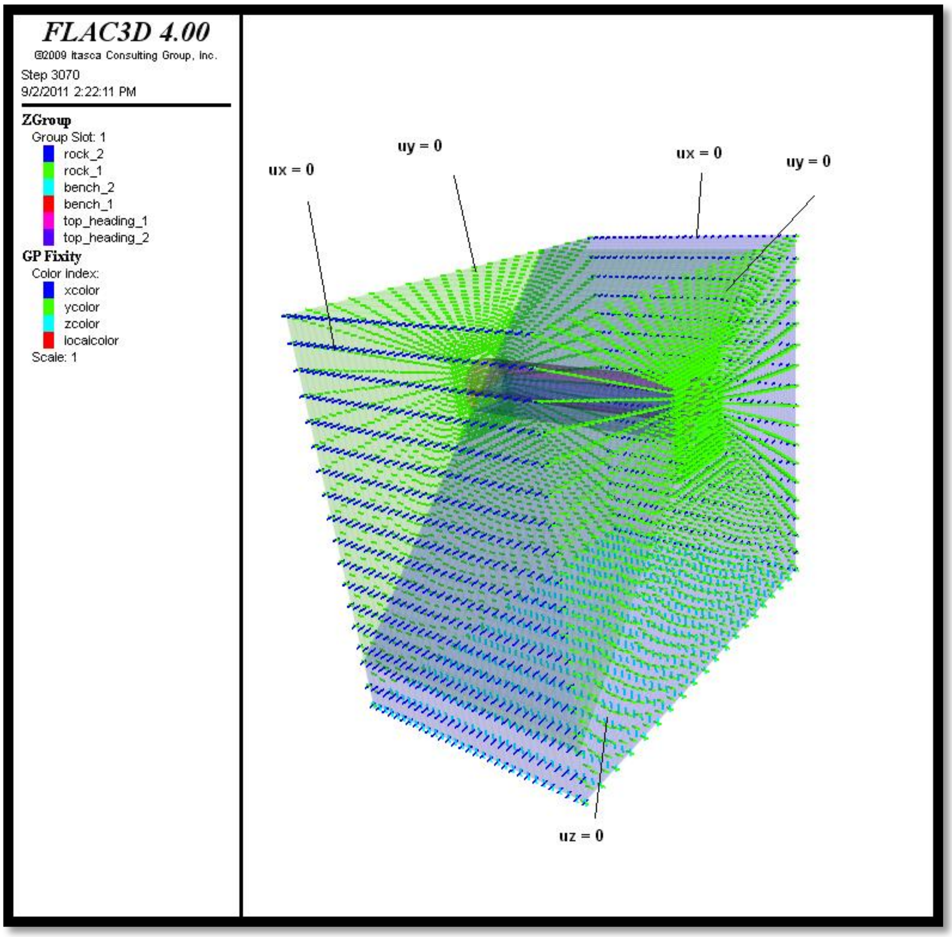



Εικόνα 5:1 Κάνναβος Διακριτοποίησης Σήραγγας

## 5.2 Συνοριακές συνθήκες

Οι συνοριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση του προβλήματος είναι μικτές. Η άνω επιφάνεια θεωρείται ελεύθερη, προσομοιώνοντας την πραγματική επιφάνεια του εδάφους. Πλευρικά, χρησιμοποιήθηκαν πλασματικές συνοριακές συνθήκες κύλισης κατά x,z και y,z αντίστοιχα και στο κάτω όριο κύλιση x,y όπως φαίνονται στην **Εικόνα 5:2**. Κάτι τέτοιο επιτεύχθηκε με την επιβολή:

1. Μηδενικής μετατόπισης κατά x για x = min και x = (max) (κύλιση y,z)
2. Μηδενική μετατόπισης κατά z για z = min (κύλιση κατά x,y)
3. Μηδενική μετατόπισης y = min και y = max (κύλιση κατά x,z)




Εικόνα 5:2 Συνοριακές Συνθήκες Κύλισης

Εκτός από τις συνθήκες κύλισης, στο μοντέλο χρησιμοποιήθηκαν συνοριακές συνθήκες φόρτισης. Αυτές αποτελούνται από δυνάμεις πεδίου (βαρύτητα) και τριγωνική φόρτιση κατά τον κατακόρυφο άξονα (z) και δύο πλευρικές τριγωνικές φορτίσεις κατά x και y. Οι συνοριακές αυτές θα προσομοιώσουν το πρωτογενές τασικό πεδίο. Για την επιβολή τριγωνικής φόρτισης μεγάλη προσοχή πρέπει να δοθεί στη «διόρθωση» των υπερκειμένων. Η εντολή για την τριγωνική φόρτιση λειτουργεί ως:

*Αρχική τάση επί διαφορικό μεταβολής κατά x y και z*

Κάτι τέτοιο δεν απαιτεί καμία διόρθωση όταν όλα τα στοιχεία του καννάβου βρίσκονται κάτω από το z=0 αφού το αρνητικό πρόσημο της θέσης κατά z επιφέρει θλιπτικές τάσεις. Επειδή όμως συνηθίζεται να σχεδιάζεται το μοντέλο με βάση την «ερυθρά» της σήραγγας (το z=0 βρίσκεται κοντά στη σήραγγα), τα υπερκείμενα δημιουργούν, με βάση την εντολή, εφελκυστικές τάσεις. Έτσι ως αρχική τάση επιλέγεται η γεωστατική τάση των υπερκειμένων.

Επίσης, η κύλιση στα πλάγια δίνει ένα k=0.3 (από λόγο Poisson) έτσι στην τριγωνική φόρτιση πρέπει να προστεθεί μόνο 1/3 της γεωστατικής τάσης για να προκύψει τελικά k=0.6.

## 5.3 Γεωτεχνικές παράμετροι βραχομάζας

Η στρωματογραφία της περιοχής αποτελείται από ένα στρώμα λατυποπαγούς μάργας και μαργαϊκό υπόβαθρο. Πάνω από το λατυποπαγές υπάρχει ένας λεπτός μανδύας αποσάθρωσης ο οποίος όμως δεν επηρεάζει την ανάλυση και δε λαμβάνεται υπόψη.

Στην επαφή λατυποπαγούς μάργας – μάργας θεωρήθηκε ότι θα παρατηρηθεί μια αύξηση διατμητικής αντοχής. Αυτή οφείλεται στο «κλείδωμα» των λατυπών στη μάργα, αυξάνοντας έτσι την γωνία εσωτερικής τριβής της διεπιφάνειας. Η αύξηση θεωρήθηκε ότι είναι της τάξης του 10% της διατμητικής αντοχής του λατυποπαγούς, κατά το κριτήριο Mohr Coulomb, και οφείλεται εξ ολοκλήρου σε αύξηση της γωνίας εσωτερικής τριβής.

Οι παράμετροι αντοχής για το λατυποπαγές και τη μάργα δόθηκαν όπως φαίνονται στον **Πίνακα 1**, ενώ για την επαφή υπολογίστηκαν από το κριτήριο διατμητικής αντοχής.

$$|\tau_1| = C + \sigma * tan\varphi_1 \tag{5.1}$$

Για σ=0 και σ=10 kPa προκύπτει αντίστοιχα:

$\tau_1$= C = 20kPa , $\tau_1$=25,54 kPa

$\tau_2$= C = 20kPa, $\tau_2$= 1,1*25,54=28,10 kPa ➔ $\varphi_2 = \tan^{-1}$ ((28,10-20)/10) = 39°

Πίνακας 1 : Γεωτεχνικές Ιδιότητες Ημίβραχου

| Ιδιότητες | Λατυποπαγές Μάργας (mb) | Μάργα (ms) | Επαφή |
|---|---|---|---|
| Συνοχή C [kPa] | 30 | 60 | 30 |
| Γωνία εσωτερικής τριβής φ [°] | 29 | 34 | 39 |
| Μέτρο Ελαστικότητας Ε [MPa] | 45 | 150 | |
| Μέτρο ακαμψίας K [MPa] | 50 | 100 | |
| Μέτρο διάτμησης G [MPa] | 16,7 | 60 | |
| Λόγος Poisson v | 0.35 | 0.25 | |
| Διασταλτικότητα δ (φ/4) | 7,25 | 8,5 | 9,75 |
| Μοναδιαίο βάρος γ [kN/m³] | 20 | 17,2 | |

Όπου τα K και G υπολογίστηκαν από :

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \tag{5.2}$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \tag{5.3}$$

## 5.4 Καταστατικοί Νόμοι

Καταστατικός νόμος (constitutive model) είναι μια σχέση η οποία συνδέει το αίτιο με το αποτέλεσμα. Η σχέση αυτή δηλαδή ελέγχει τη συμπεριφορά του εκάστοτε υλικού κάτω από συγκεκριμένη φόρτιση. Όταν είναι ανεξάρτητη του χρόνου, η καταστατική εξίσωση γράφεται γενικά (Αγιουτάντης, 2002):

$$\sigma_{ij} = f(\varepsilon_{ij}) \tag{5.4}$$

Η συμπεριφορά των φυσικών υλικών, εξαιτίας της πολύπλοκης αντίδρασής τους σε εξωτερικές φορτίσεις, περιγράφεται με την υπέρθεση διάφορων καταστατικών μοντέλων ανάλογα με την περιοχή τάσεων-παραμορφώσεων που εξετάζεται. Σε κάθε μορφή συμπεριφοράς του υλικού αντιστοιχούν και διαφορετικές καταστατικές εξισώσεις (Αγιουτάντης, 2002).

Όταν η περιοχή τάσεων-παραμορφώσεων επιτρέπει τη θεώρηση ότι η συμπεριφορά του υλικού περιγράφεται από το ελαστικό, γραμμικό ή μη μοντέλο, η καταστατική εξίσωση αποδίδεται σύμφωνα με το γενικευμένο νόμο του Hooke ως:

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl}\varepsilon_{kl} \tag{5.5}$$

$c_{ijkl}$ = τανυστής τέταρτης τάξης που εξαρτάται από τις ελαστικές σταθερές του σώματος

Στα περισσότερα προβλήματα μηχανικής πετρωμάτων, το γεωυλικό συμπεριφέρεται ελαστοπλαστικά. Η ελαστική συμπεριφορά του υλικού σταματάει όταν η εντατική κατάσταση εξισωθεί με το όριο διαρροής του. Στη συνέχεια μπορεί να συμπεριφερθεί τέλεια πλαστικά, πλαστικό με κρατυνόμενη συμπεριφορά (strain hardening) ή με συμπεριφορά τροπικής χαλάρωσης (strain softening). Και στις τρεις αυτές περιπτώσεις οι παραμορφώσεις είναι μόνιμες.

Επειδή η πλαστική παραμόρφωση συνοδεύεται από αλλαγές στη μοριακή δομή του υλικού, η εντατική κατάσταση δε μπορεί να υπολογιστεί μονοσήμαντα από τις παραμορφώσεις αλλά είναι συνάρτηση του ιστορικού φόρτισης. Έτσι, το καταστατικό μοντέλο πλαστικότητας πρέπει να έχει διαφορικό χαρακτήρα και να υπολογίζει την τελική παραμόρφωση από το άθροισμα των παραμορφώσεων του κάθε βήματος (Brady & Brown, 2004).

Τα γενικά πλαίσια της θεωρίας πλαστικότητας διατυπώνονται ως εξής:

Το τελικό διαφορικό παραμόρφωσης $\{\dot{\varepsilon}\}$ είναι το άθροισμα των διαφορικών ελαστικών και πλαστικών παραμορφώσεων:

$$\{\dot{\varepsilon}\} = \{\dot{\varepsilon^p}\} + \{\dot{\varepsilon^e}\} \tag{5.6}$$

Ορίζεται συνάρτηση πλαστικού δυναμικού **Q**({σ})τέτοια ώστε το διαφορικό πλαστικής παραμόρφωσης $d\varepsilon_{ij}^{p}$ (πλαστική ροή ή plastic flow) να δίνεται ως:

$$\{\dot{\varepsilon^p}\} = \lambda \left\{\frac{\partial Q}{\partial \sigma}\right\} \tag{5.7}$$

λ = σταθερά αναλογίας που μπορεί να διαφέρει κατά το ιστορικό φόρτισης

Q = το κάθετο διάνυσμα στη συνάρτηση πλαστικού δυναμικού

Κατά συνέπεια λοιπόν το διάνυσμα πλαστικής ροής είναι κάθετο στην επιφάνεια Q. Από το γενικευμένο νόμο του Hooke :

$$[\sigma] = [D][\varepsilon] \tag{5.8}$$

[D] = μητρώο ελαστικότητας

Έτσι από τις σχέσεις **5.6 5.7** και **5.8** δίνεται η σχέση για το τελικό διαφορικό παραμόρφωσης:

$$\{\dot{\varepsilon}\} = [D]^{-1}\{\dot{\sigma}\} + \lambda \left\{\frac{\partial Q}{\partial \sigma}\right\} \tag{5.9}$$

Παράλληλα είναι απαραίτητο να υπολογιστεί η εντατική κατάσταση στην οποία το υλικό θα αρχίσει να παραμορφώνεται πλαστικά. Αυτό γίνεται μέσω μιας συνάρτησης διαρροής **F**({σ}) τέτοιας ώστε F=0 στο όριο διαρροής (Brady & Brown, 2004).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον, λόγω της απλότητας της, παρουσιάζει η περίπτωση κατά την οποία η συνάρτηση διαρροής **F** ταυτίζεται με τη συνάρτηση πλαστικού δυναμικού **Q**, άρα και η επιφάνεια φόρτισης συμπίπτει με την επιφάνεια διαρροής. Αυτό εκφράζεται ως (Κωμοδρόμος, 2008):

$$\{\dot{\varepsilon^p}\} = \lambda \left\{\frac{\partial F}{\partial \sigma}\right\} \tag{5.10}$$

Η σχέση **5.10** είναι γνωστή και ως συζευγμένος κανόνας ροής (associated flow rule) και έχει ως άμεσο συμπέρασμα είναι την καθετότητα ανάμεσα στο διάνυσμα πλαστικών παραμορφώσεων (διαφορικό πλαστικών παραμορφώσεων) και της επιφάνειας διαρροής. Οι καταστατικοί νόμοι που βασίζονται σ’ αυτή τη σχέση ονομάζονται συζευγμένοι, λόγω της σύζευξης της συνάρτησης πλαστικού δυναμικού με το κριτήριο διαρροής (Κωμοδρόμος, 2008).

Στη μηχανική πετρωμάτων έχει επικρατήσει η χρήση του κριτηρίου διαρροής (θραύσης) Mohr-Coulomb. Ο κύριος λόγος γιαυτό είναι η αποδεδειγμένη ισχύς του στα περισσότερα είδη ψαθυρών πετρωμάτων και εδαφών. Ακόμη τα πειραματικά δεδομένα που απαιτεί προσδιορίζονται εύκολα με μη ιδιαίτερα απαιτητικές δοκιμές.

Βασίζεται στη θεώρηση ότι η μέγιστη διατμητική τάση είναι το μόνο κρίσιμο μέγεθος στην επικείμενη αστοχία. Εφόσον όμως θεωρεί τη μέγιστη διατμητική τάση σαν συνάρτηση της ορθής τάσης που ασκείται στο επίπεδο ισχύει (Βιόπουλος, 2009):

$$|\tau| = f(\sigma) \tag{5.11}$$

Όπου f(σ) μια πειραματικά ορισμένη συνάρτηση.

Μαθηματικά μπορεί να εκφραστεί με τη γραμμική σχέση:

$$|\tau| = c + \sigma \tan\varphi \tag{5.12}$$

Από την τομή της ευθείας της σχέσης **5.12** και του κύκλου του Mohr προκύπτει η εξίσωση με βάση τις κύριες τάσεις:

$$\frac{\sigma_1-\sigma_2}{2} = \frac{\sigma_1+\sigma_3}{2}\sin\varphi \ + c * cos\ \varphi \tag{5.13}$$

Ή αλλιώς:

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_{11}-\sigma_{33}}{2}\right)^2 + \sigma_{12}{}^2} = \frac{\sigma_{11}+\sigma_{33}}{2} sin\varphi + c * cos\varphi \tag{5.14}$$

Έτσι μπορεί να εκφραστεί στον τασικό χώρο Haigh-Westergaard εάν εκφραστεί με τις αναλλοίωτες τανυστή τάσης και αποκλίνοντα τανυστή τάσης όπως στην εξίσωση **5.15**.

$$f(I_1, J_2, \varphi) = \frac{1}{3} I_1 sin\varphi + \sqrt{2}\sin\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) + \sqrt{\frac{J_2}{3}}\cos(\theta + \frac{\pi}{3})\sin\varphi - c * \cos\varphi = 0 \tag{5.15}$$

Η μορφή της επιφάνειας Mohr Coulomb στον τασικό χώρο είναι μη κανονική εξαγωνική πυραμίδα, ανοικτή προς το σφαιρικό άξονα και με κορυφή το σημείο $\sqrt{3}c * \cot\varphi$. Όταν η γωνία εσωτερικής τριβής είναι μηδέν, η πυραμίδα του Mohr-Coulomb εκφυλίζεται σε επιφάνεια τύπου Tresca.

Στην παρούσα εργασία έγινε ελαστοπλαστική ανάλυση με κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb καθώς συγκεκριμένο κριτήριο δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για μαργαϊκούς σχηματισμούς. Οι παράμετροι συνοχής και γωνίας τριβής δόθηκαν μετά από πειραματικές μετρήσεις.

## 5.5 Επιτόπου πεδίο τάσεων

Το επιτόπου πεδίο τάσεων διακρίνεται σε πρωτογενές, το οποίο περιλαμβάνει τις αρχικές τάσεις (virgin stresses) πριν την παρέμβαση (π.χ. διάνοιξη της σήραγγας), και δευτερογενές, το οποίο οφείλεται στην διαταραχή του πρωτογενούς. Οι αρχικές τάσεις διακρίνονται σε : βαρυτικές τάσεις, τεκτονικές τάσεις και παραμένουσες τάσεις (Αγιουτάντης, 2002).

Σε ότι αφορά τις βαρυτικές τάσεις μπορούν να υπολογιστούν από τη συμβολή των διαφόρων πετρωμάτων (Jaeger et al., 2007):

$$\sigma_v = \int_0^z \rho(z) g dz \approx \bar{\rho} g z \approx \bar{\gamma} z \qquad (5.16)$$

z = το βάθος από την επιφάνεια του εδάφους

$\bar{\gamma}$ = το ειδικό βάρος της βραχομάζας

Όπου $\bar{\rho}$ για ρωγματωμένο ή πορώδες μέσο, είναι η μέση πυκνότητα των ορυκτών και των ρευστών των πόρων :

$$\bar{\rho} = (1-\varphi)\rho_m + \varphi \rho_f \qquad (5.18)$$

φ = το πορώδες

$\rho_m$= η πυκνότητα των ορυκτών

$\rho_f$ = η πυκνότητα του ρευστού

Τελικά για πολυστρωματικό μέσο:

$$\sigma_v = \sum_{i=1}^{n} \gamma_i z_i \qquad (5.19)$$

Για υποθαλάσσιες περιοχές διορθώνεται το βάθος του πυθμένα (Zoback, 2010) :

$$\sigma_v = \rho_w g z_w + \int_{z_w}^{z} \rho(z) g dz \approx \rho_w g z_w + \bar{\rho} g (z - z_w) \qquad (5.20)$$

γw = είναι το ειδικό βάρος του νερού (10 kN/$m^3$)

Παράλληλα αναπτύσσονται και «οριζόντιες» τάσεις δεδομένου ότι δεν επιτρέπεται πλευρική παραμόρφωση του πετρώματος. Η οριζόντια τάση, σε ελαστικές συνθήκες, ορίζεται ως:

$$\sigma_h = \frac{v}{1-v} \sigma_v \qquad (5.21)$$

*ή*

$$\sigma_h = k\sigma_v \tag{5.22}$$

*ν* = ο λόγος Poisson

k = ο συντελεστής οριζόντιας πίεσης

Ο k συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 0.4-1.0 χωρίς να αποκλείονται και μικρότερες ή μεγαλύτερες τιμές. Ειδικότερα, σε υγιείς βραχόμαζες χωρίς επιρροή από τεκτονικές πιέσεις: k = 0.6-1.0. Σε αποσαθρωμένες βραχόμαζες: $k$ = 0.4-0.7. Στην περίπτωση όπου η βραχομάζα επηρεάζεται από τεκτονικές πιέσεις ο συντελεστής $k$ 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 = 0-0.3 στην περίπτωση έντονου εφελκυστικού τεκτονικού καθεστώτος).

Η διεθνής εμπειρία δείχνει ότι σε μεγάλα βάθη (άνω των 400-500 μέτρων) η γεωστατική εντατική κατάσταση είναι πρακτικώς ισότροπη ($k$ = 1), ενώ αντίθετα, σε μικρά βάθη (100-400m) συνήθως μετρούνται τιμές του k αρκετά μεγαλύτερες από τη μονάδα. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τιμές του k που υπερβαίνουν τη μονάδα έχουν μετρηθεί σε χώρες που τελούν υπό έντονο θλιπτικό τεκτονικό καθεστώς (Καββαδάς, 2005).

Σημειώνεται ότι η αξιόπιστη μέτρηση του συντελεστή (k) είναι δυσχερής και τα αποτελέσματα δεν είναι εύκολα ερμηνεύσιμα. Οι μέθοδοι που συνήθως χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση του $K_o$ είναι: 1. Η δοκιμή πρεσσιομέτρου ή ντιλατομέτρου (flatjack).2. Η μέθοδος της υδραυλικής θραύσης (hydraulic fracturing).3. Η μέθοδος της δειγματοληπτικής αποτόνωσης των τάσεων (overcoring) (Καββαδάς, 2005).

Κάποιες ακόμη μέθοδοι για την εκτίμηση του επιτόπου εντατικού πεδίου, οι οποίες προσφέρουν ευκολία στην ανάκτηση των μετρήσεων είναι (Brady & Brown, 2004):

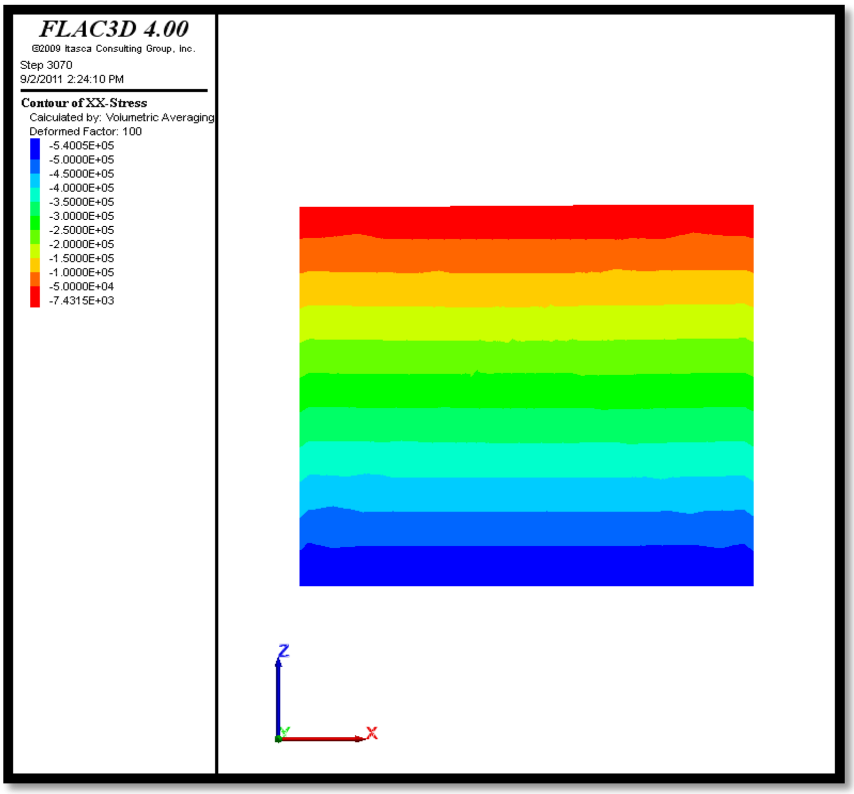
1. Μέθοδος breakout γεώτρησης (borehole breakout method), (Zobak et al., 1985).
2. Φαινόμενο Kaiser (Kaiser effect), (Villaescusa et al., 2002).
3. Ανάκτηση ανελαστικών παραμορφώσεων (anelastic strain recovery), (Voight, 1968).
4. Ανάλυση ρυθμού παραμόρφωσης (deformation rate analysis), (Villaescusa et al., 2002).

Για να προσομοιωθεί το πρωτογενές εντατικό πεδίο στη ΜΠΔ, ακολουθείται η εξής διαδικασία:

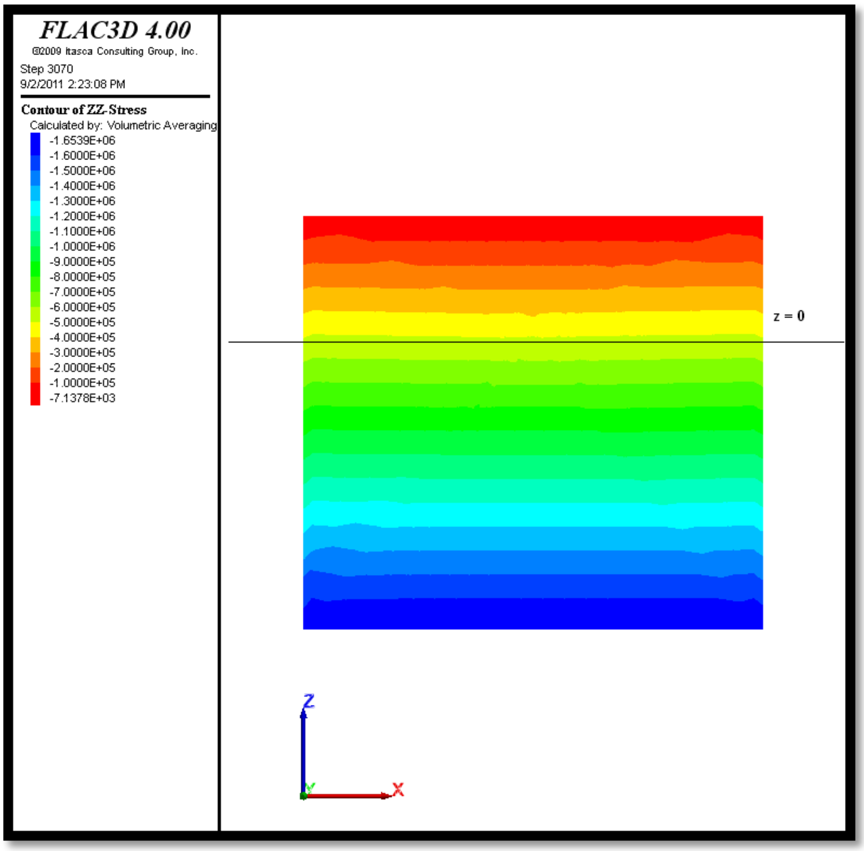
Αρχικά, ορίστηκε το μέσο μοναδιαίο βάρος των στρωμάτων ως $\gamma_{avg}$= 18200 Pa/m κι θεωρήθηκε συντελεστής πλευρικών ωθήσεων k = 0.6 . Στη συνέχεια δόθηκαν στο δακριτοποιημένο σώμα τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των στρωμάτων. Η συνοχή τους όμως καθώς και η αντοχή σε εφελκυσμό αυξήθηκαν πολύ έτσι ώστε να αποφευχθεί τυχόν πλαστική ροή από εξαιρετικά ανισότροπο πεδίο τάσεων. Το τελευταίο προκαλείται από την ταλάντωση του καννάβου πεπερασμένων διαφορών στα πρώτα βήματα επίλυσης (mechanical damping), ενώ σταδιακά αποσβένει καθώς το σύστημα βαίνει στην ισορροπία.

Η διακύμανση των τάσεων ελέγχεται από το χρωματικό χάρτη (**Εικόνα 5:3** και **Εικόνα 5:4**), από την εξίσωση **5.16** και από διάγραμμα ιστορικού φόρτισης μιας συγκεκριμένης ζώνης. Μόλις σταθεροποιηθούν οι τάσεις διορθώνονται οι τιμές αντοχής σε εφελκυσμό και συνοχής και συνεχίζεται η φόρτιση μέχρι τη σύγκλιση του αλγορίθμου (χαμηλές τιμές μη ισορροπημένης δύναμης).

Αφού έρθει το προσομοίωμα σε ισορροπία, σειρά έχει η διόρθωση των μετατοπίσεων και συγκεκριμένα μηδενισμός τους διατηρώντας τις τάσεις ως έχουν.



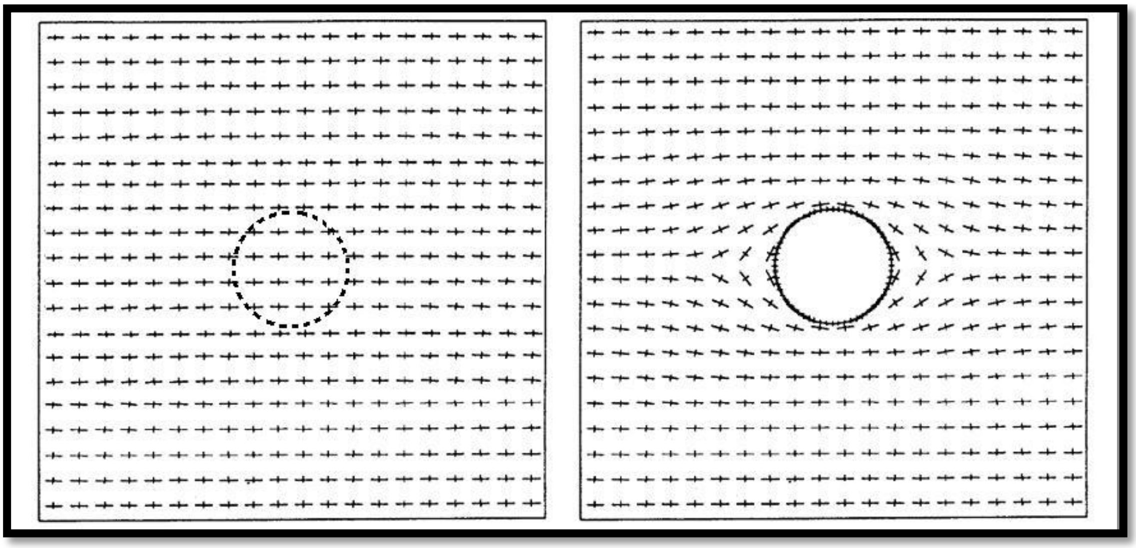

Εικόνα 5:3 Πρωτογενές τασικό πεδίο σxx.




**Εικόνα 5:4 Πρωτογεννές τασικό πεδίο σzz.**

## 5.6 Διάνοιξη σήραγγας

Η επέμβαση στο αρχικό, στο πρωτογενές τασικό πεδίο με τη διάνοιξη μιας υπόγειας εκσκαφής, προκαλεί μια έντονη ανακατανομή των τάσεων στην περιοχή που γειτνιάζει την εκσκαφή (Μαραγκός, 1999). Το νέο αυτό εντατικό πεδίο αποτελεί το δευτερογενές τασικό πεδίο (Εικόνα 5:5).



Εικόνα 5:5 Πρωτογενές και δευτερογενές πεδίο τάσεων σε ελαστικο ομογενές και ισότροππο υλικό (Hoek et al., 2005).

Κατά την κατασκευή υπογείων έργων είναι γεγονός ότι οποιοσδήποτε τύπος εδαφικής μάζας ή βραχομάζας - εκτός από την κινούμενη άμμο - αναπτύσσει «φυσικό θόλο» στην γειτονιά αυτών. Αυτή η ιδιότητα των γεωϋλικών είναι που επιτρέπει την όρυξη ανοιγμάτων σ’ αυτά. Η τέχνη της σηραγγοποιΐας έγκειται στην μικρότερη δυνατή διαταραχή αυτού του τόξου κατά την εξόρυξη και στην πρόβλεψη των τάσεων και των παραμορφώσεων και όχι στην εκ των υστέρων αντιμετώπιση υψηλών τάσεων και μετατοπίσεων με μέτρα υποστήριξης (Εξαδάκτυλος, 2003).

Για την όσο το δυνατόν μικρότερη διατάραξη της περιβάλλουσας εδαφο-βραχομάζας, αποφυγή δονήσεων σε παρακείμενες κατοικίες αλλά και τη μείωση των υπερεκσκαφών η εκσκαφή της σήραγγας έγινε με μηχανικά μέσα (υδραυλική σφύρα και εκσκαφέας ανεστραμμένου κάδου) και τη διαδικασία της NATM.

Η μέθοδος αυτή μεταφράστηκε στον αλγόριθμο επίλυσης ως διαδοχικά βήματα «χαλάρωσης» της εδαφοβραχομάζας. Κατά το βήμα προχώρησης δηλαδή, το υλικό δεν απομακρύνεται απευθείας (κάτι που θα ίσχυε σε περίπτωση εκσκαφής με εκρηκτικά) αλλά μειώνεται το μέτρο ελαστικότητάς του σε διαδοχικά βήματα μέχρι να μηδενιστεί και τότε αφαιρείται. Σε κάθε βήμα «χαλάρωσης» επιλύεται το πρόβλημα, έρχεται σε ισορροπία, και τότε ακολουθεί το επόμενο βήμα. Συγκεκριμένα γίνονται πέντε τέτοια βήματα χαλάρωσης σε κάθε βήμα προχώρησης ενώ η ίδια λογική ακολουθείται και κατά την εκσκαφή του τελικού ανεστραμμένου τόξου (invert).

Στο ελαστικό μοντέλο δεν αναμένονται διαφορετικά αποτελέσματα από την ακαριαία εκτόνωση του μετώπου. Στο ελαστοπλαστικό μοντέλο όμως, αποφεύγεται η πλαστική ροή του σχηματισμού από την απότομη διάνοιξη. Το βήμα προχώρησης ορίστηκε 2m για λόγους υπολογιστικού κόστους.

## 5.7 Μέτρα υποστήριξης

Η περιβάλλουσα εδαφο-βραχομάζα χαρακτηρίζεται από μικρό χρόνο αυτοϋποστήριξης και φτωχές γεωτεχνικές ιδιότητες. Έτσι για τη μείωση των συγκλίσεων/ καθιζήσεων αλλά και την ευστάθεια του μετώπου κατά το βήμα προχώρησης, πριν την εφαρμογή των προσωρινών μέτρων υποστήριξης, θεωρήθηκε απαραίτητη η προενίσχυση της βραχομάζας.

### 5.7.1 Προενίσχυση

Για την προενίσχυση, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος προπασσάλωσης οροφής με δοκούς προπορίας (forepoling). Επιτεύχθηκε με την εισπίεση 47 χαλύβδινων δοκών σε σχηματισμό ομπρέλας εύρους 120° στη στέψη της σήραγγας. Τα χαρακτηριστικά τους αναφέρονται στον **Πίνακα 2**.

**Πίνακας 2 : Δεδομένα δοκών προπορείας**

| **Δοκοί προπορείας** | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Διάμετρος οπής [mm] | Πάχος δοκού t [mm] | Διάμετρος δοκού Φ [mm] | Κλίση (ακτινικά) [°] | Επικάλυψη [m] | Μήκος [m] | Εύρος ομπρέλας [m] |
| 180 | 7 | 140 | 6 | 4 | 9 | 120 |

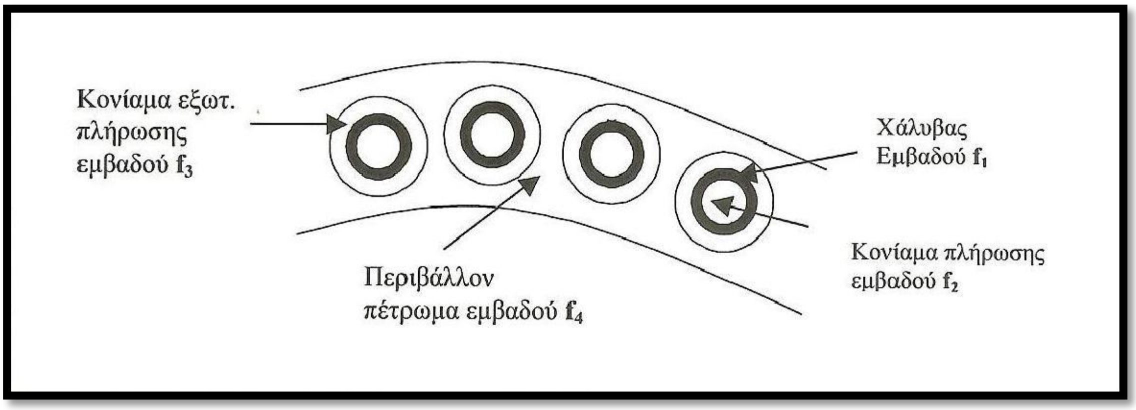
Η πολική ροπή αδράνειας και οι δεύτερες ροπές κατά y και z (στα άκρα) αντίστοιχα υπολογίστηκαν ως:

$$J = \int_A r^2 dA = \int_0^{2\pi} \int_0^r r^2\, r dr\, d\theta = \frac{\pi r^4}{2} \quad (5.23)$$

$$I_y = I_z \Leftrightarrow \int_A z^2 dA = \int_A y^2 dA = \int_A r^2 dA = J \quad (5.24)$$

Ενώ για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας (Ε) και της πυκνότητας (ρ) αναλύθηκαν οι δοκοί προπορείας σαν σύμμεικτοι δοκοί. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον **Πίνακα 3**. Η άγνωστη ιδιότητα μπορεί να προσδιορισθεί ως (Δουβής, 2003) :

$$\frac{\textit{Ισοδύναμο Υλικό}}{\textit{Μέτρο Ελαστικότητας}} \atop \textit{Πυκνότητα} = \frac{\frac{\textit{Χάλυβας}}{\textit{Αντίστοιχη Ιδιότητα}} \times f_1 + \frac{\textit{Τσιμεντένεμα}}{\textit{Αντίστοιχη Ιδιότητα}} \times (f_2+f_3)}{f_1+f_2+f_3} \tag{5.25}$$




Εικόνα 5:6 : Δοκός προπορείας σαν σύμμεικτη δοκός (Δουβής, 2002).

Πίνακας 3: Σύμμεικτη διατομή δοκών προπορείας

| Δοκοί προπορείας | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Διάμετρος οπής [mm] | Πάχος δοκού t [mm] | Διάμετρος δοκού Φ [mm] | Κλίση (ακτινικά) [$^o$] | Επικάλυψη [m] | Μήκος [m] | Εύρος ομπρέλας [m] |
| 180 | 7 | 140 | 6 | 4 | 9 | 120 |
| | | | | | | |
| E (Gpa) | steel | concrete | | f1 | f2+f3 | |
| 45.834399 | 200 | 25 | | 0.0029248 | 0.021642 | |
| | | | | | | |
| ρ (kg/m$^{3)}$ | steel | concrete | | f1 | f2+f3 | |
| 2784.5588 | 7850 | 2500 | | | | |

Επειδή η ομπρέλα προπορείας δρα αρκετά μακριά από το σύστημα υποστήριξης, καθοριστικής σημασίας για την ευστάθεια αποτελεί η επάρκεια ακαμψίας της προενίσχυσης κάτω από το καθεστώς των γεωστατικών τάσεων αλλά και της ανακατανομής τους κατά τη χαλάρωση της βραχομάζας.

Η προσομοίωση στο Flac3D έγινε με στοιχεία δοκού (Beam Structural Elements). Τα πεπερασμένα αυτά στοιχεία, έχουν την ιδιότητα να δημιουργούν συνδέσμους πλήρους πάκτωσης στους κόμβους τους με το συνεχές των πεπερασμένων διαφορών. Παραμορφώνονται ή φορτίζονται δηλαδή εξαρτώμενα πλήρως από το συνεχές. Επίσης οι 6 βαθμοί ελευθερίας ανά κόμβο, τους επιτρέπουν να συμπεριφερθούν με τρόπο πολύ κοντά στην πραγματικότητα και να προσφέρουν δεδομένα όπως δυνάμεις στις τρεις διευθύνσεις ή ροπές.

Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι καθώς τα στοιχεία των δοκών είναι γραμμικά στοιχεία και όχι ζώνες Π.Δ., παραλαμβάνουν τις φορτίσεις σαν επικόμβια φορτία/ επικόμβιες μετατοπίσεις. Έτσι δε μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αναλύσεις που απαιτούν απ' την προϋποστήριξη τη δημιουργία φαινομένου τόξου (arching) μεταξύ των δοκών.

Στον **Πίνακα 4** φαίνονται τα ορίσματα εισόδου στο Flac3D:

Πίνακας 4 : Ορίσματα εισόδου για στοιχεία δοκών προπορείας

| Ιδιότητα | Παράμετροι εισόδου | Τιμή |
|---|---|---|
| Πυκνότητα ρ [$kg/m^3$] | **density** | 2784.56 |
| Μέτρο ελαστικότητας Ε [Pa] | **emod** | 45.83e9 |
| Λόγος poisson ν | **nu** | 0.25 |
| Εμαδό διατομής Α [$m^2$] | **xcarea** | 0.0255 |
| Δεύτερη ροπή αδράνειας ως προς local-y $I_y$ [$m^4$] | **xciy** | 0.000103 |
| Δεύτερη ροπή αδράνειας ως προς local-z $I_z$ [$m^4$] | **xciz** | 0.000103 |
| Πολική ροπή αδράνειας | **xcj** | 0.000103 |

### 5.7.2 Προσωρινή υποστήριξη

Για την προσωρινή υποστήριξη χρησιμοποιήθηκε ένα λεπτό, ελαφρύ στρώμα ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (gunite) σε κλειστό δακτύλιο, ενισχυμένο με κοχλίες πλήρους πάκτωσης κατά μονάδες ή κατά ζεύγη, δομικά πλέγματα, και πλαίσια. Με αυτό τον τρόπο η προσωρινή υποστήριξη επιτρέπει την ενεργοποίηση της αυτοϋποστήριξης του πετρώματος μέσω της ανακατανομής των τάσεων.

Οι κοχλίες είναι πλήρους πάκτωσης και βρίσκονται διατεταγμένοι σε κάνναβο 2×1m περιμετρικά και κατά μήκος αντίστοιχα (τοπικές μεμονωμένες κοχλιώσεις που αποβλέπουν σε σταθεροποίηση σφηνών δε λαμβάνονται υπόψη εδώ). Συγκεκριμένα 2 κοχλίες κατά μονάδες στο ύψος της προπασσάλωσης περίπου και 6 ζεύγη κοχλιώσεων που συμβάλλουν εκτός των άλλων και στην εξασφάλιση της πλήρους επαφής του πλαισίου στις παρειές.

Η σειρά τοποθέτησης κοχλιών ανά μέτρο προχώρησης (1m) είναι : δύο κοχλίες κάτω από την ομπρέλα προπορείας και δύο ζεύγη σε απόσταση 2m από τους πρώτους κατά το στάδιο του top heading. Συνεχίζει δε με τέσσερα ζεύγη στη δεύτερη φάση διάνοιξης.

Το μέτρο διάτμησης G του ενέματος με λόγο νερό : τσιμέντο 0.35 υπολογίζεται σε G=5GPa. Στη συνέχεια υπολογίζεται το μέτρο ακαμψίας του ενέματος (St. John and Van Dillen, 1983):

$$K_g = \frac{2\pi G}{10\ln\left(1+\frac{2t}{D}\right)} \quad [GPa] \tag{5.26}$$

Ενώ η συνοχή της διεπιφάνειας μεταξύ ενέματος-πετρώματος υπολογίζεται από τη σχέση **5.27**

$$c_g = \pi(D + 2t)\tau_{peak} \; [\frac{MN}{m}] \tag{5.27}$$

Όπου $\tau_{peak}$ η διατμητική αντοχή του ασθενέστερου μέσου της διεπιφάνειας. Εδώ ασθενέστερο είναι το λατυποπαγές μάργας με και χρησιμοποιήθηκε η παραδοχή ότι :

$$\tau_{\text{peak}} \approx \frac{\sigma_c}{2}$$

Για $\sigma_c$ = 0.272 MPa προκύπτει διατμητική αντοχή $\tau_{peak}$ = 0.136 MPa

Από τους υπολογισμούς και τα αρχικά δεδομένα προκύπτουν τα ορίσματα εισόδου (input parameters) που θα χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση (**Πίνακας 5**).

Πίνακας 5 : Ορίσματα εισόδου για κοχλίες

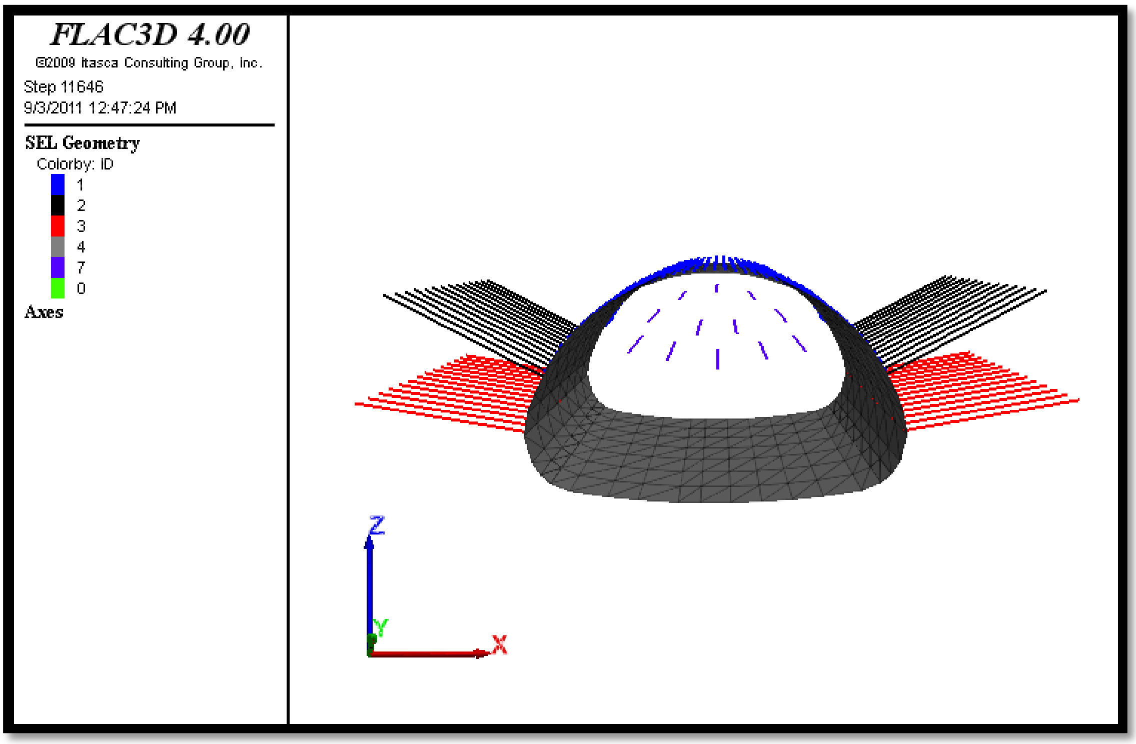
| | Κοχλίες | | | Ζεύγη κοχλιών | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Τιμές | Παράμετροι εισόδου | | Τιμές | Παράμετροι εισόδου | |
| **Διάμετρος κοχλία D [mm]** | 0,025 | **Xcarea [m$^2$]** | 0,0025 | 0,050 | **Xcarea [m$^2$]** | 0,0099 |
| **Διάμετρος οπής (D+2t) [mm]** | 0,056 | | | 0,112 | | |
| **Μέτρο ελαστικότητας κοχλία E [GPa]** | 200 | **emod** | 200e9 | 200 | **emod** | 200e9 |
| **Φέρουσα ικανότητα κοχλία $F_t$ [MN]** | 0,20 | **ytens** | 200e3 | 0,4 | **ytens** | 400e3 |
| **Συνοχή διεπιφάνειας ενέματος-βράχου $C_g$ [MN/m]** | 0,024 | **gr_coh** | 24e3 | 0,048 | **gr_coh** | 48e3 |
| **Μέτρο ακαμψίας σε διάτμηση του ενέματος $k_g$ [GPa]** | 2,5 | **gr_k** | 2,5e9 | 2,5 | **gr_k** | 2.5e9 |
| **Πυκνότητα [Kg/m$^3$]** | 5979 | **density** | 5979 | 5979 | **density** | 5979 |
| **Γωνία εσωτερικής τριβής $\varphi$ [$^o$]** | 30 | **gr_fric** | 30 | 30 | **gr_fric** | 30 |

Η υποστήριξη με ινοπλισμένο σκυρόδεμα και πλαίσια τύπου HEB 140 μοντελοποιήθηκε με βάση τη θεωρία των σύμμεικτων διατομών. Έτσι το μέτρο ελαστικότητας της υποστήριξης ορίσθηκε ως:

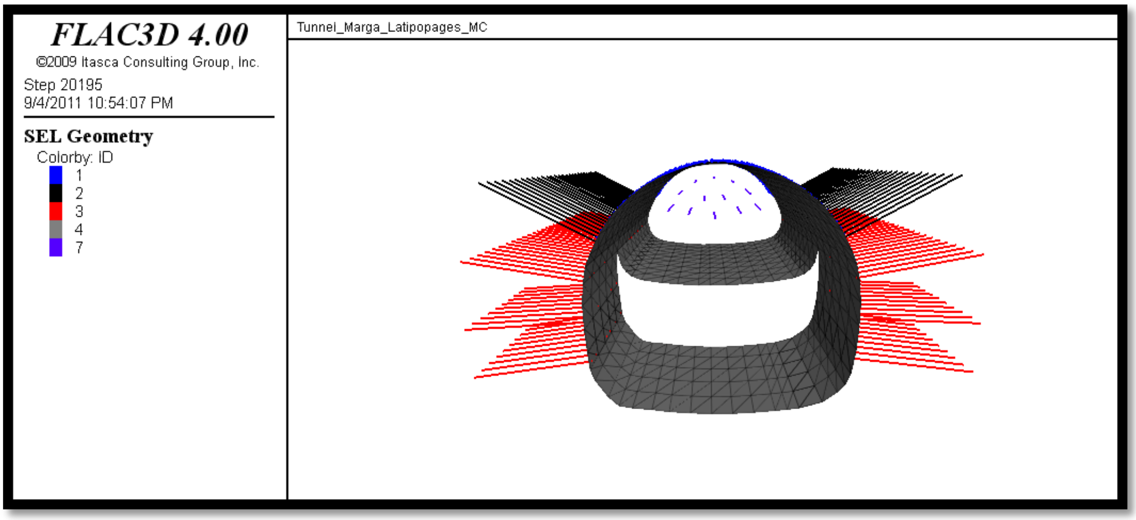
$$E = \frac{(A_{shot}*E_{shot} + A_{HEB}*E_{HEB})}{A_{shot}+A_{HEB}} \tag{5.28}$$

Για τη μοντελοποίηση χρησιμοποιήθηκαν πεπερασμένα στοιχεία κελύφους με επαφή. Έτσι μπορούν να ολισθήσουν εάν η εντατική κατάσταση ξεπεράσει την αντοχή. Για τη συνοχή της διεπιφάνειας στοιχείου πετρώματος χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από Itasca (2003).

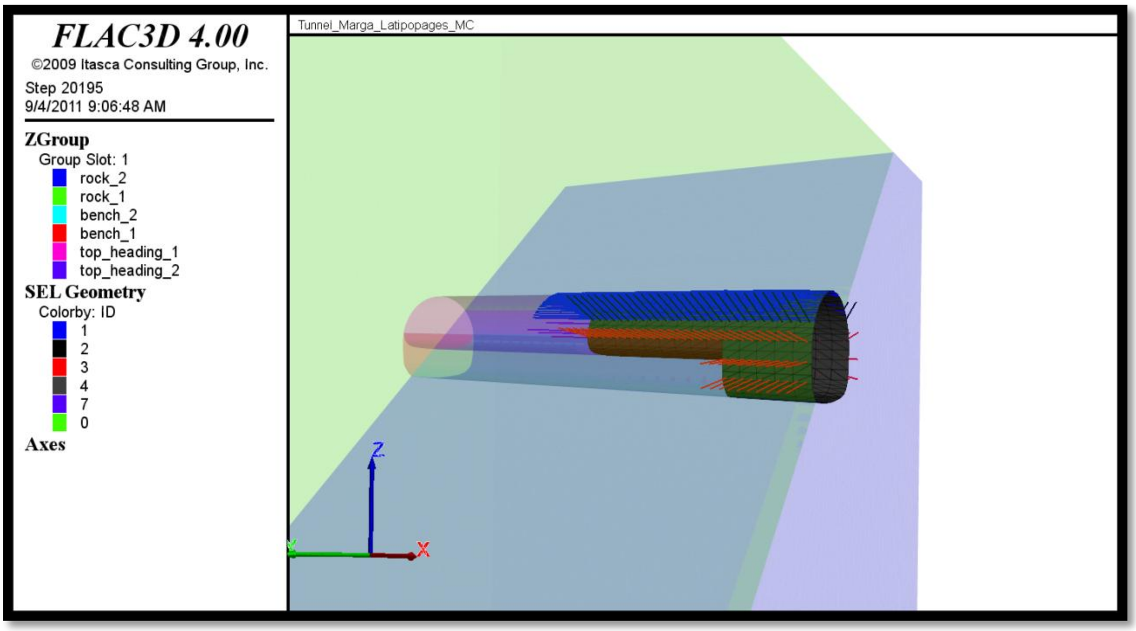
Οι φάσεις υποστήριξης φαίνονται στις **Εικόνες 5:7-5:9**




Εικόνα 5:7 Πρώτο στάδιο υποστήριξης




Εικόνα 5:8 1ο και 2ο στάδιο υποστήριξης




Εικόνα 5:9 Εκσκαφή με πρώτο και δεύτερο στάδιο υποστήριξης

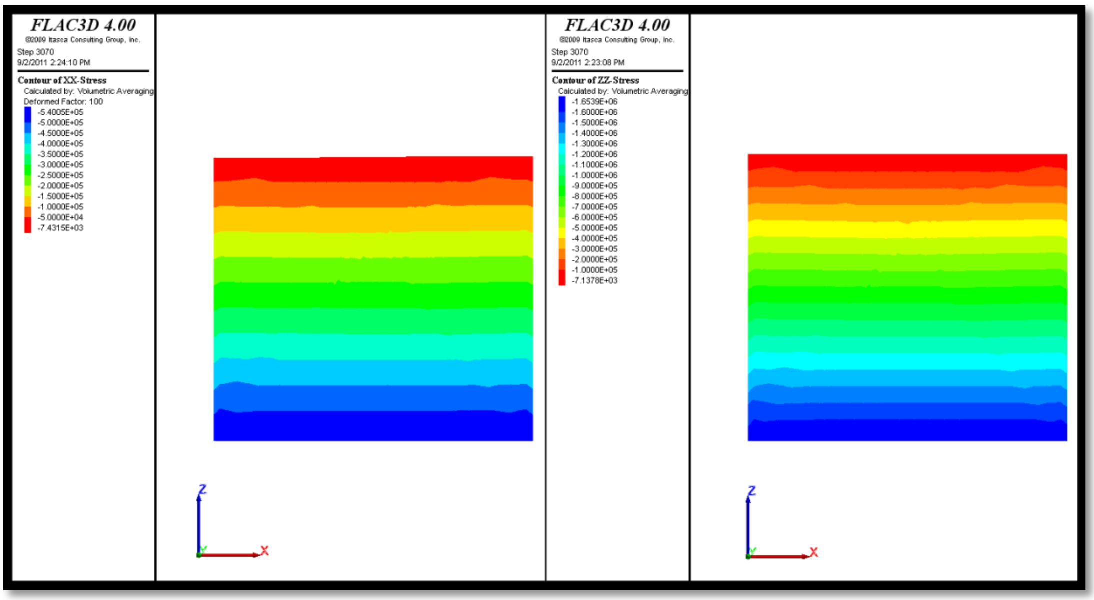
## 5.8 Συζήτηση αποτελεσμάτων

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την τρισδιάστατη ελαστοπλαστική επίλυση του προβλήματος διάνοιξης σήραγγας σε επαφή σχηματισμών ημίβραχου. Σκοπός είναι η ανάλυση του εντατικοπαραμορφωσιακού πεδίου που δημιουργείται γύρω από τη σήραγγα κατά τη διάνοιξη της. Γι αυτό το λόγο θα αναλυθούν τα αποτελέσματα κατά τη διάνοιξη της «τελικής» ,η οποία αναφέρεται σε ταυτόχρονη εκσκαφή πρώτης και, μακριά απ' το μέτωπο της δεύτερης (bench) φάσης.

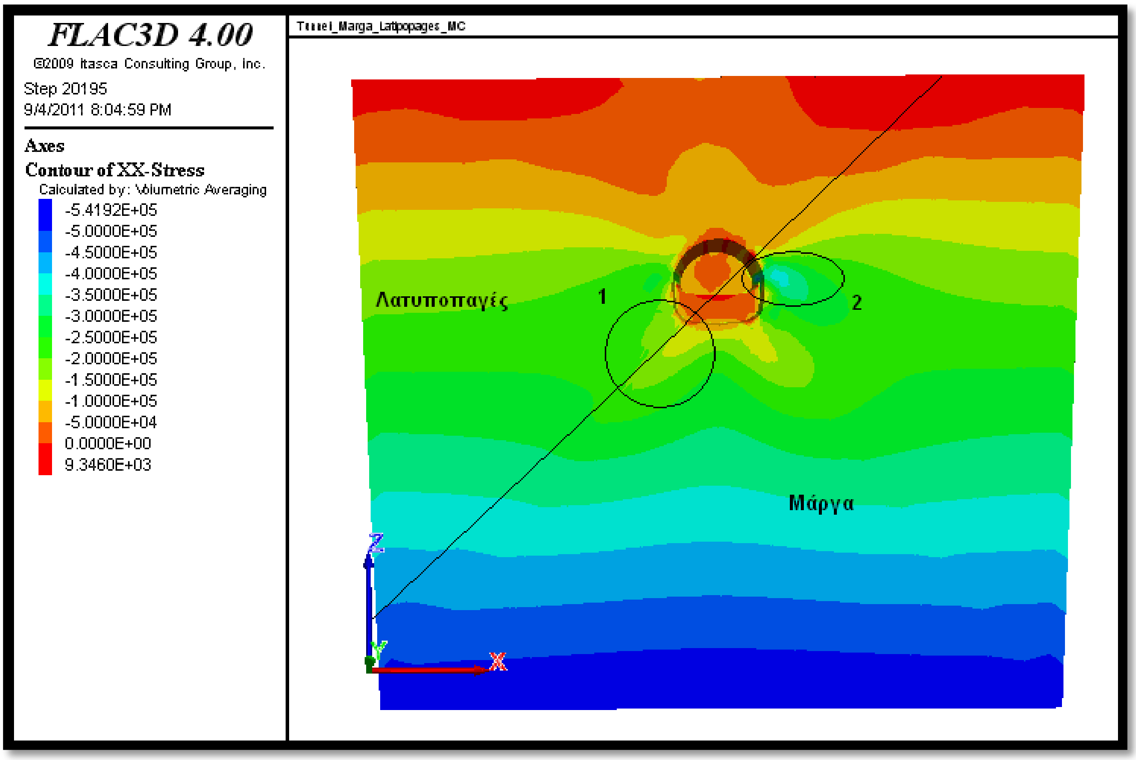
### 5.8.1 Ποιοτική ανάλυση

Αρχικά παρουσιάζονται στις **Εικόνες 5:11** και **5:12** οι μεταβολές στο πρωτογενές πεδίο τάσεων (**Εικόνα 5:3**). Η $\sigma_{max}$ αντιστοιχεί στη $\sigma_{zz}$ με τη σύμβαση προσήμου της βραχομηχανικής ενώ η $\sigma_{min}$ στη $\sigma_{xx}$. Η $\sigma_{yy}$ είναι ίση με τη $\sigma_{xx}$ στο πρωτογενές πεδίο, ενώ στο δευτερογενές παίζει το ρόλο της ενδιάμεσης κύριας τάσης. Από τις κατανομές των τάσεων παρατηρείται ότι η αυξημένη ακαμψία του ενός στρώματος (μάργα) σε σχέση με το άλλο, μετατοπίζει τον «φυσικό θόλο». Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η τοπική αύξηση της τάσης στην επαφή των στρωμάτων όπως φαίνεται στο **σημείο 1** της εικόνας **5.11**.

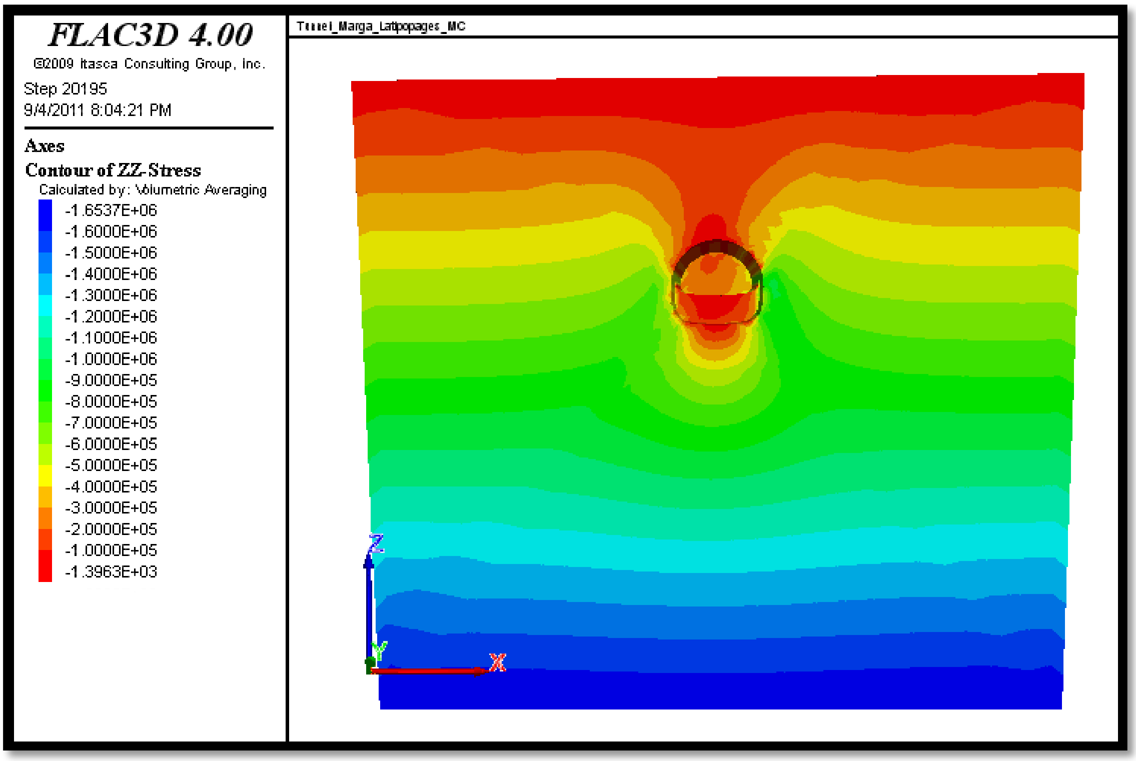
Μεταξύ της μάργας και της σχετικά άκαμπτης υποστήριξης, δημιουργείται μια συγκέντρωση τάσης (αύξηση της θλιπτικής τάσης $\sigma_{xx}$) στο σχηματισμό της μάργας δίπλα στη σήραγγα όπως φαίνεται στο **σημείο 2** της εικόνας **5.11**.




**Εικόνα 5:10 Πρωτογενές εντατικό πεδίο (σxx=σyy=σmin σzz=σmax).**

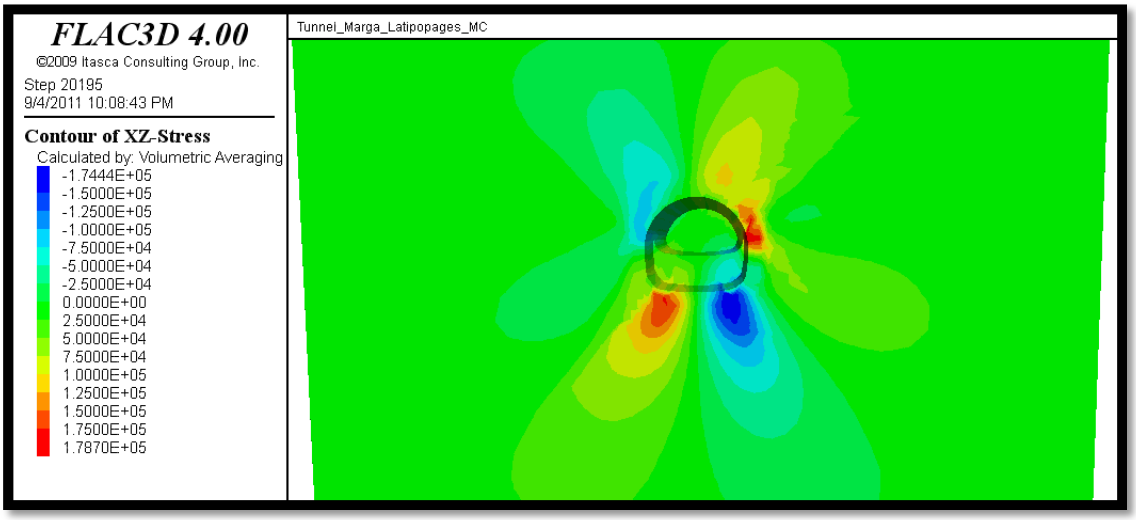



Εικόνα 5:11 Δευτερογενές εντατικό πεδίο (σxx = σmin).



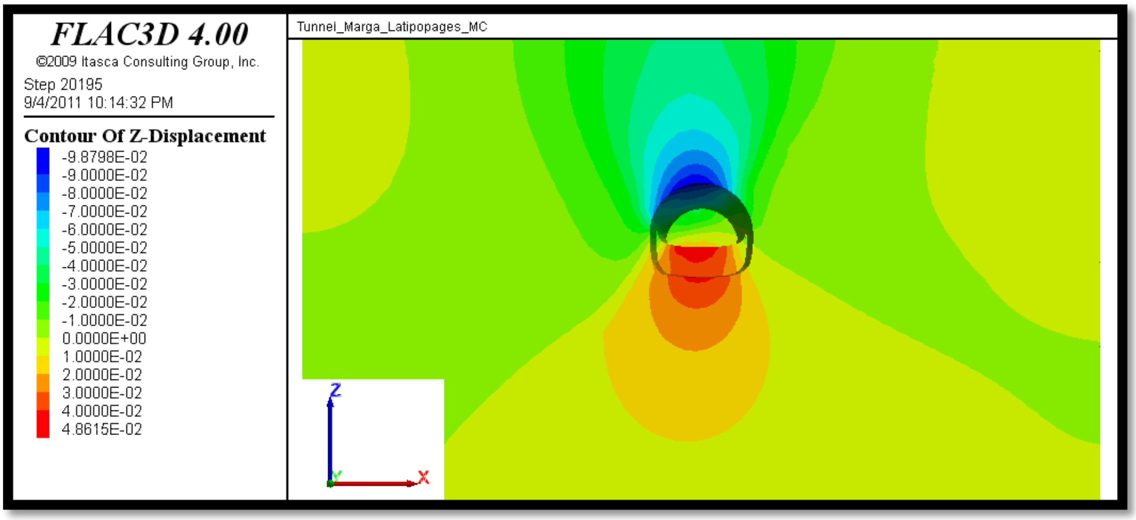

Εικόνα 5:12 Δευτερογενές εντατικό πεδίο (σzz=σmax).

Άμεσο συμπέρασμα από την ανομοιόμορφη διαφοροποίηση του εντατικού πεδίου, είναι η τοπική συγκέντρωση διατμητικών τάσεων μεταξύ σήραγγας και σχηματισμού μάργας,. Κάτι που επιβεβαιώνεται από το χρωματικό χάρτη κατανομής διατμητικών τάσεων στην **Εικόνα 5:13**. Επίσης, παρατηρείται η παρουσία εντονότερων διατμητικών τάσεων στη μάργα, λόγω της αντοχής της, σε σχέση με το λατυποπαγές.



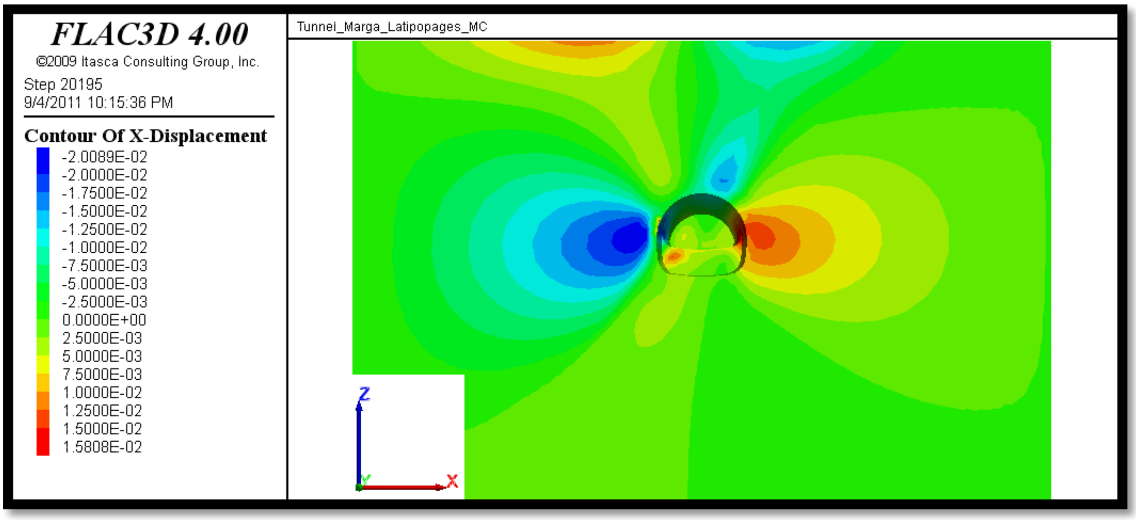

Εικόνα 5:13 Κατανομή διατμητικών τάσεων $\sigma_{xz}$.

Σε ότι αφορά το πεδίο μετατοπίσεων, είναι εμφανώς μεγαλύτερες στο σχηματισμό του λατυποπαγούς. Συγκεκριμένα, οι μετατοπίσεις κατά z ακολουθούν τον θόλο των τάσεων. Παρατηρούνται έτσι μεγάλες συγκλήσεις στη στέψη «μακριά» από τη μάργα και αντίστοιχη ανύψωση του δαπέδου (**Εικόνα 5:14**).



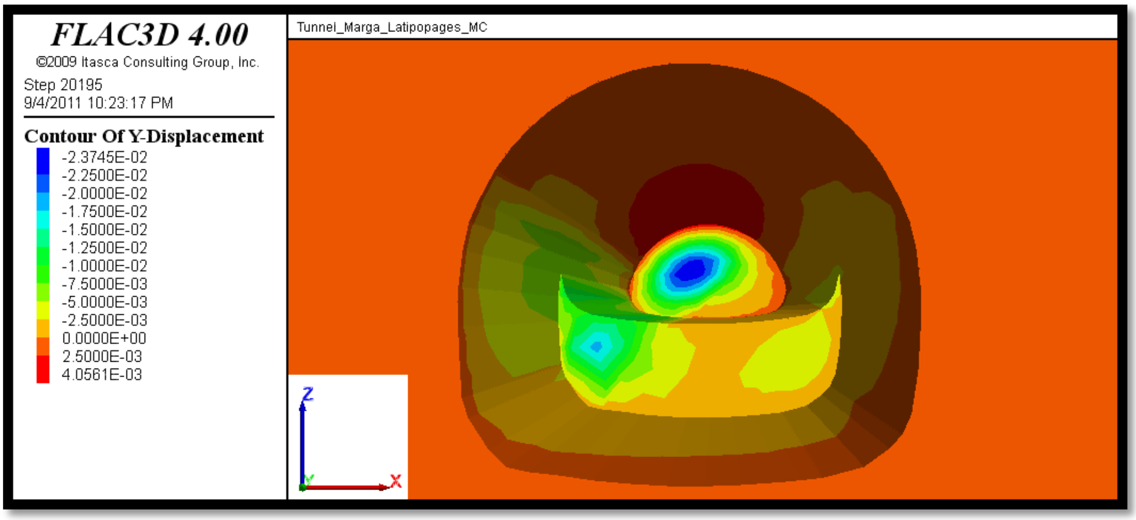

Εικόνα 5:14 Μετατοπίσεις κατά τον άξονα z.

Σε ότι αφορά τις μετατοπίσεις κατά τον άξονα x, γενικά ακολουθούν την επαφή των στρωμάτων όπου η μάργα «σπρώχνει» το λατυποπαγές. Γύρω από τη σήραγγα όμως ελέγχονται και από την ακαμψία της υποστήριξης. Αναλυτικότερα, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 5:15** στα σημεία όπου έχει τοποθετηθεί υποστήριξη οι μετατοπίσεις αποκλίνουν από τη σήραγγα. Σε σημεία που δεν έχει τοποθετηθεί, όπως κάτω από το ανεστραμμένο τόξο της πρώτης φάσης εκσκαφής, στο σχηματισμό του λατυποπαγούς τείνει να συγκλίνει αρκετά, ενώ στο σχηματισμό της μάργας δεν παρουσιάζει σημαντικές μετατοπίσεις.

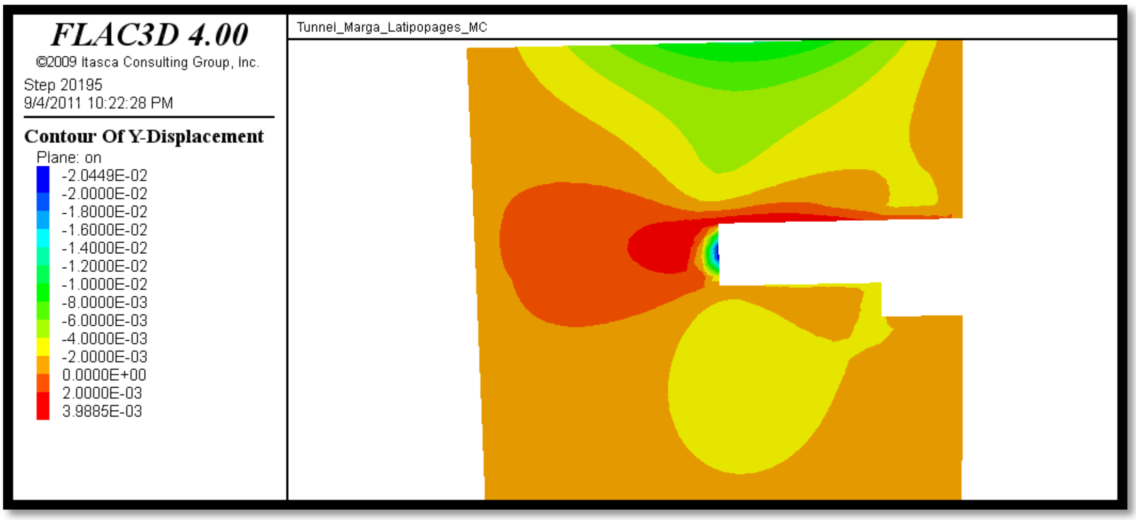



Εικόνα 5:15 Μετατοπίσεις κατά τον άξονα x.

Τέλος, σχετικά με τις μετατοπίσεις κατά τον άξονα y, παρατηρείται μια μερική εκτόνωση της τάσης στην περιοχή του λατυποπαγούς που προκαλεί σημαντικές μετατοπίσεις στο κύριο μέτωπο και το μέτωπο της βαθμίδας όπως φαίνεται στην **Εικόνα 5:16**, ενώ στην **Εικόνα 5:17** φαίνεται η κατανομή της μετατόπισης κατά y σε μηκοτομή στο κέντρο της σήραγγας.

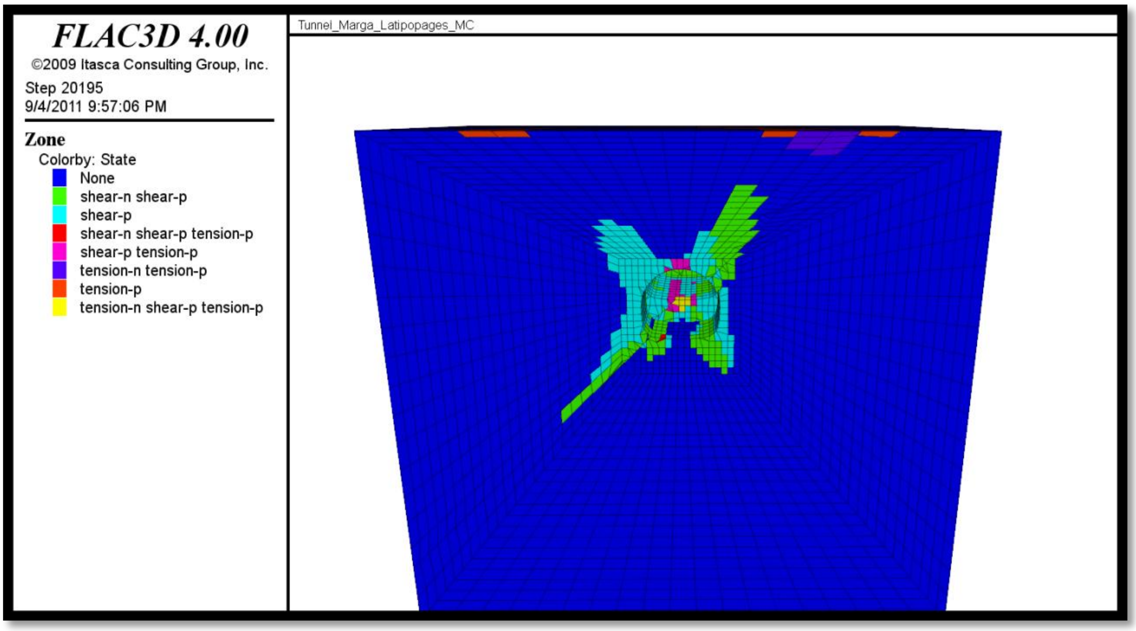



Εικόνα 5:16 Μετατοπίσεις κατά τον άξονα y.



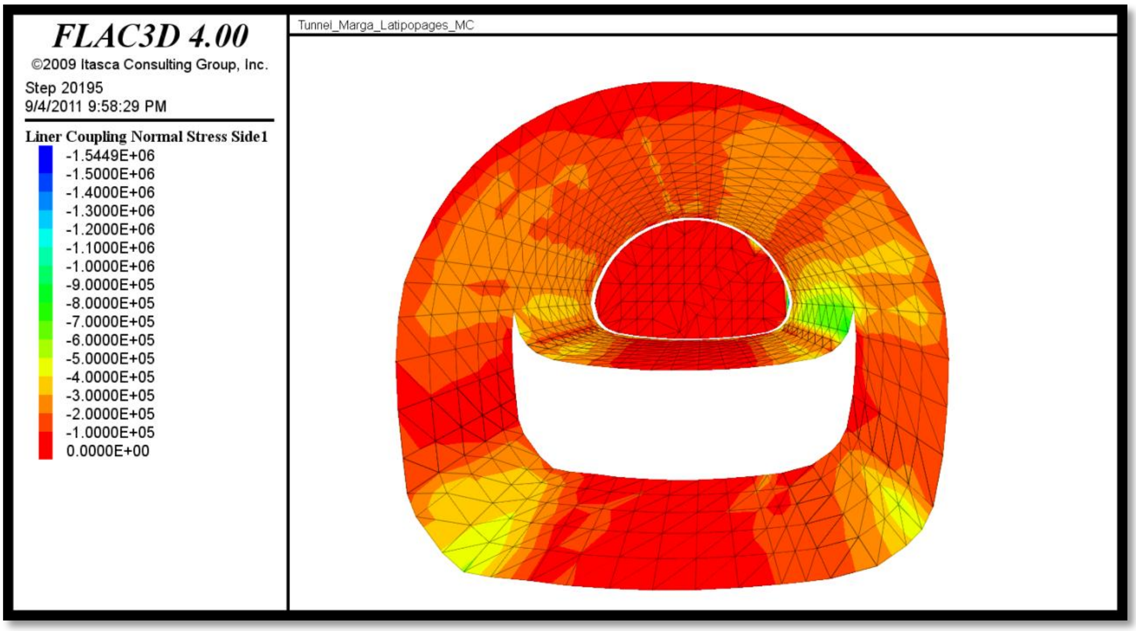

Εικόνα 5:17 Μετατοπίσεις κατά y σε μηκοτομή x=0

Από την ανάλυση τάσεων παραμορφώσεων προέκυψαν οι πλαστικές περιοχές που εκτείνονται από τη γειτονική περιοχή της σήραγγας μέχρι την επιφάνεια του εδάφους και φαίνονται στην **Εικόνα 5:18** ως πλαστικές ζώνες. Παρατηρείται ένα έντονο πεδίο διάτμησης στο λατυποπαγές, το οποίο ακολουθεί την επαφή καθώς και ένα εφελκυστικό πεδίο στην επιφάνεια του εδάφους, κυρίως λόγω των μετακινήσεων κατά x και καθιζήσεων κατά z.



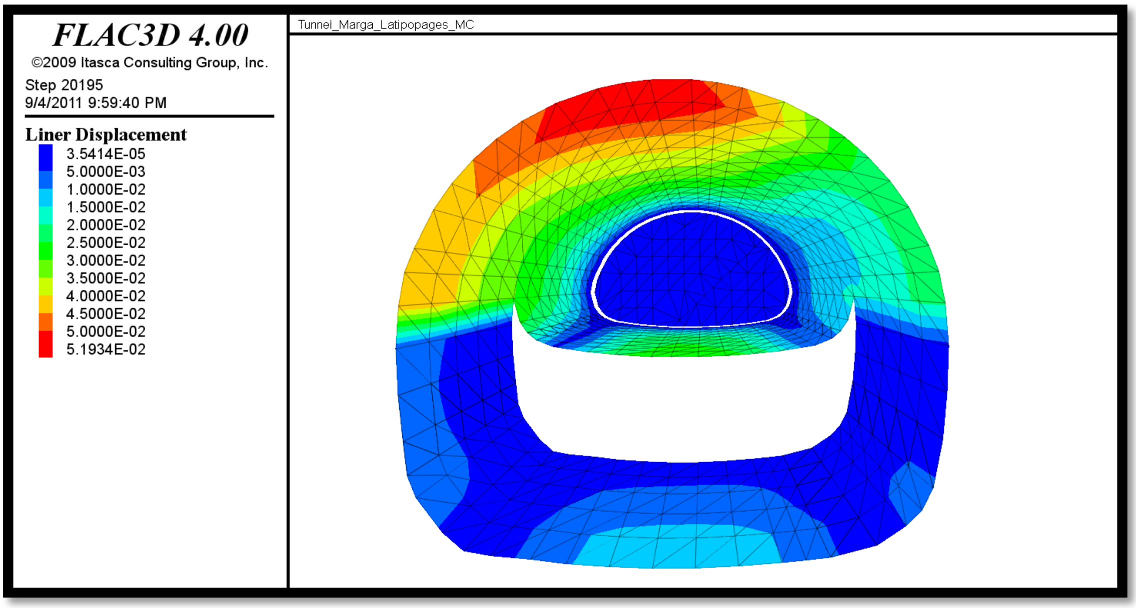

Εικόνα 5:18 Πλαστικές ζώνες.

Το συγκεκριμένο εντατικοπαραμορφωσιακό πεδίο, προκάλεσε στην προσωρινή επένδυση από ινοπλισμένο σκυρόδεμα και πλαίσια την ανάπτυξη ορθών τάσεων και ακτινικών μετατοπίσεων που φαίνονται στις **Εικόνες 5:19** και **5:20**.




Εικόνα 5:19 Ορθές τάσεις στην προσωρινή υποστήριξη

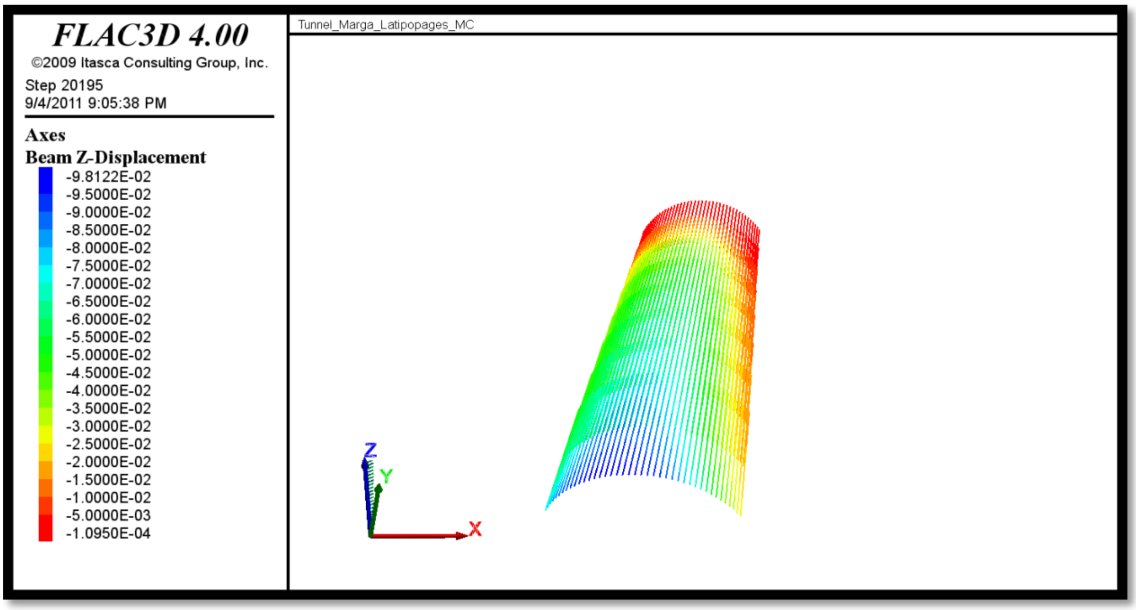
Η περιοχή ενδιαφέροντος περιορίζεται, στην περίπτωση των ορθών τάσεων, στην περιοχή τομής σήραγγας μάργας. Όπως αναμενόταν από την κατανομή της $\sigma_{xx}$ υπάρχει μια έντονη καταπόνηση σε θλίψη της τάξης των 0,7MPa.




Εικόνα 5:20 Ακτινικές μετατοπίσεις προσωρινής υποστήριξης.

Οι μετατοπίσεις στην προσωρινή υποστήριξη της πρώτης φάσης εκσκαφής ακολουθούν τη μετατόπιση κατά z. Στην επένδυση της δεύτερης φάσης εκσκαφής πιθανώς από το ταχύτατο κλείσιμο του δακτυλίου (δεν υπάρχει ανυποστήρικτη διατομή κατά την εκσκαφή νέου βήματος), οι μετατοπίσεις του ανεστραμμένου τόξου είναι αρκετά μικρότερες.

Τέλος, σε ότι αφορά την προενίσχυση, οι δοκοί προπορείας ακολουθούν τις μετακινήσεις του σχηματισμού αφού βρίσκονται πακτωμένοι μέσα σ’ αυτόν. Η κατανομή της μετατόπισης κατά z φαίνεται στην **Εικόνα 5:21**. Είναι εμφανής η διαφορά της κατανομής μετατόπισης μεταξύ της δεξιάς πλευράς όπου οι δοκοί βρίσκονται σε μάργα και της αριστερής, όπου οι οι δοκοί βρίσκονται σε λατυποπαγές.



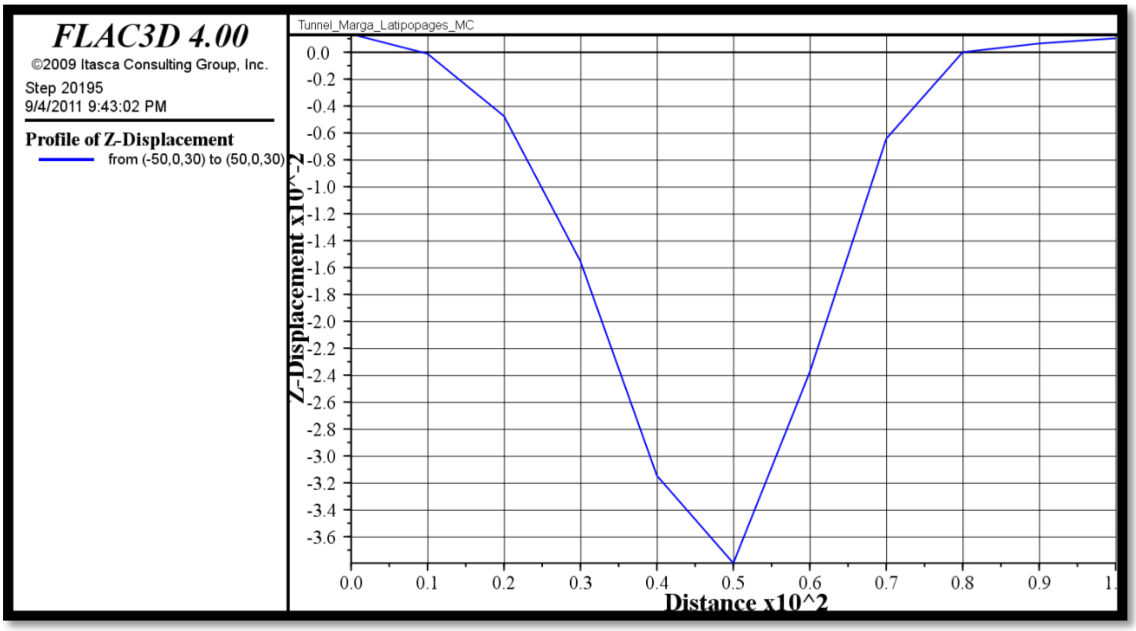

Εικόνα 5:21 Μετατόπιση κατά z σε δοκούς προπορείας.

### 5.8.2 Ποσοτική ανάλυση

Από τα διαγράμματα όλων των κόμβων κατά μήκος μιας γραμμής προέκυψαν για την τελική φάση του προσομοιώματος τα παρακάτω διαγράμματα μετατοπίσεων.

Για την εκτίμηση επιφανειακών καθιζήσεων υπολογίστηκαν τα διαγράμματα για

- x= -50 y = 0 z = 30 μέχρι x=50 y=0 z = 30 (**Εικόνα 5:22**)

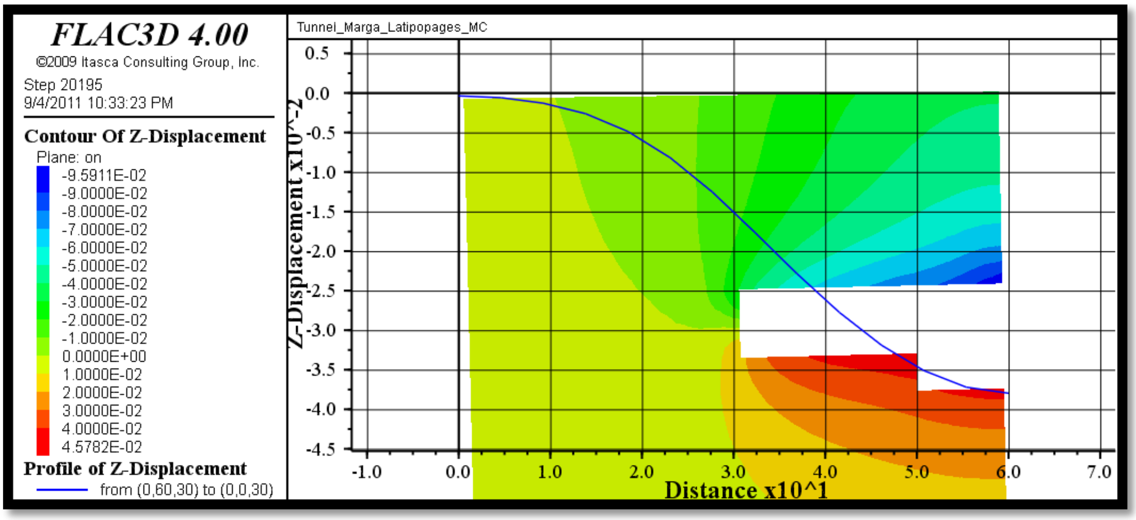



Εικόνα 5:22 Μετατόπιση κατά z από (-50,0,30) μέχρι (50,0,30).

Από το διάγραμμα προκύπτει ότι για την τελική φάση εκσκαφής και μακριά από το μέτωπο η επιφανειακές καθιζήσεις δεν ακολουθούν ακριβώς την, τύπου κατανομής Gauss, καμπύλη, αλλά από τη μεριά του πιο ρηχού μαργαϊκού υποβάθρου η καθίζηση εξασθενεί μεγαλύτερη κλίση, περίπου dz/dx = 0,0016. Το μέγιστο παρατηρείται πάνω από τη στέψη της σήραγγας και αντιστοιχεί σε -3,8cm ενώ για πάνω από 50m η καθίζηση ξεπερνάει το 1cm.

- x=0 y=60 z=30 μέχρι x=0 y=0 z=30 (**Εικόνα 5:23**)

Στο διάγραμμα παρουσιάζεται η καθίζηση της επιφάνειας του εδάφους 30m μπροστά από το μέτωπο μέχρι 30m πίσω από αυτό. Η καθίζηση φτάνει το 1.5cm ακριβώς πάνω απ το μέτωπο. Η μέγιστη κλίση δίνεται σ' αυτή την κατεύθυνση dz/dx = 0.001




Εικόνα 5:23 Μετατόπιση κατά z από (0,60,30) μέχρι (0,0,30).

Έτσι τελικά οι χειρότερες περιπτώσεις με βάση τον **Πίνακα 6** είναι:

- Για την επιφανειακή καθίζηση εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας, σε απόσταση 10 με 20m από τον άξονά της (από την πλευρά του λατυποπαγούς) με dx/dz = 0.0026 και dzmax = -2.6cm. που χαρακτηρίζεται ως μέτριας επικινδυνότητας
- 10m μπροστά από το μέτωπο ή πάνω από αυτό με dx/dz=0.001 και dzmax=-1.5cm χαρακτηρίζεται χαμηλής έως μέτριας επικινδυνότητας.
- Αρκετά πίσω από το μέτωπο με dzmax=-3.8cm που χαρακτηρίζεται ως χαμηλής επικινδυνότητας.

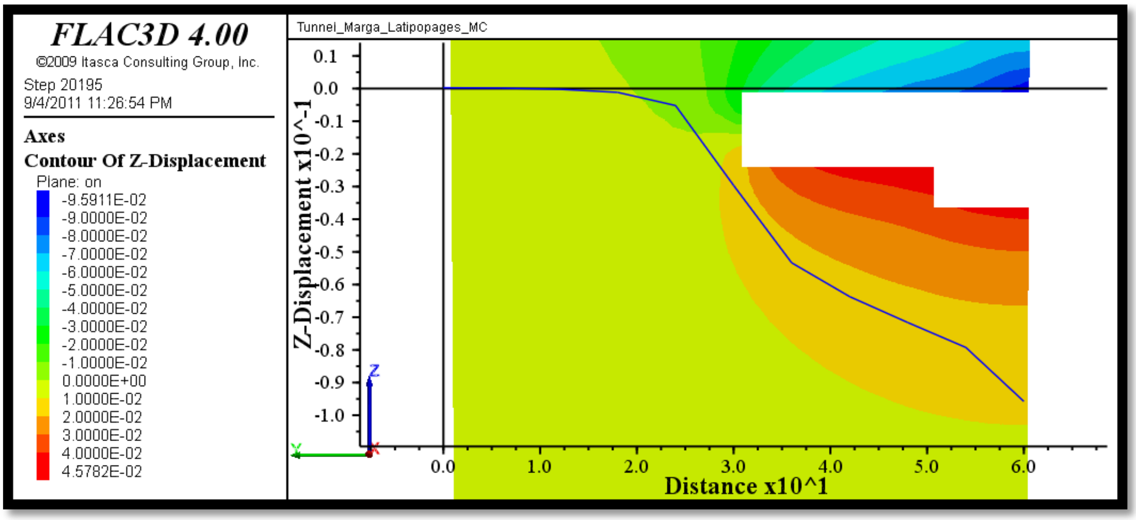
Πίνακας 6 Επικινδυνότητα Καθιζήσεων (Attawell et al., 1986, Heath, 1997)

| dz/dx | dzmax [m] | Επικινδυνότητα |
|---|---|---|
| <0.0002 | <0.01 | Αμελητέα |
| 0,0002-0,0005 | 0,010-0,050 | Χαμηλή |
| 0,0005-0,02 | 0,050-0,075 | Μέτρια |
| >0,02 | >75 | Υψηλή |

Για την εκτίμηση των συγκλίσεων

- x=0 y=60 z=8.29 μέχρι x=0 y=0 z=0.29 **(Εικόνα 5:24)**

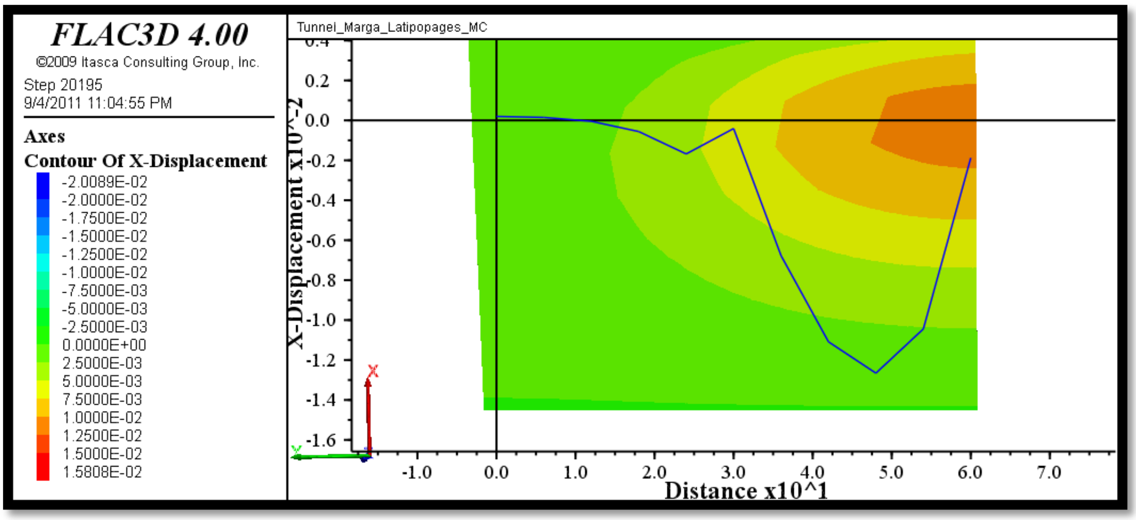
Η μετατόπιση κατά z στο επίπεδο της στέψης 30 μέτρα μπροστά από το μέτωπο μέχρι 30 μέτρα πριν από αυτό δίνεται από αυτό το διάγραμμα.




Εικόνα 5:24 Μετατόπιση κατά z στη στέψη από (0,60,8,29) μέχρι (0,0,8,29).

Το ποσοστό των προσυγκλίσεων ανέρχεται στο 30% της τελικής δηλαδή 3cm ενώ η μέγιστη σύγκλιση παρατηρείται στα 30m πίσω από το μέτωπο και είναι ίση με 10cm.

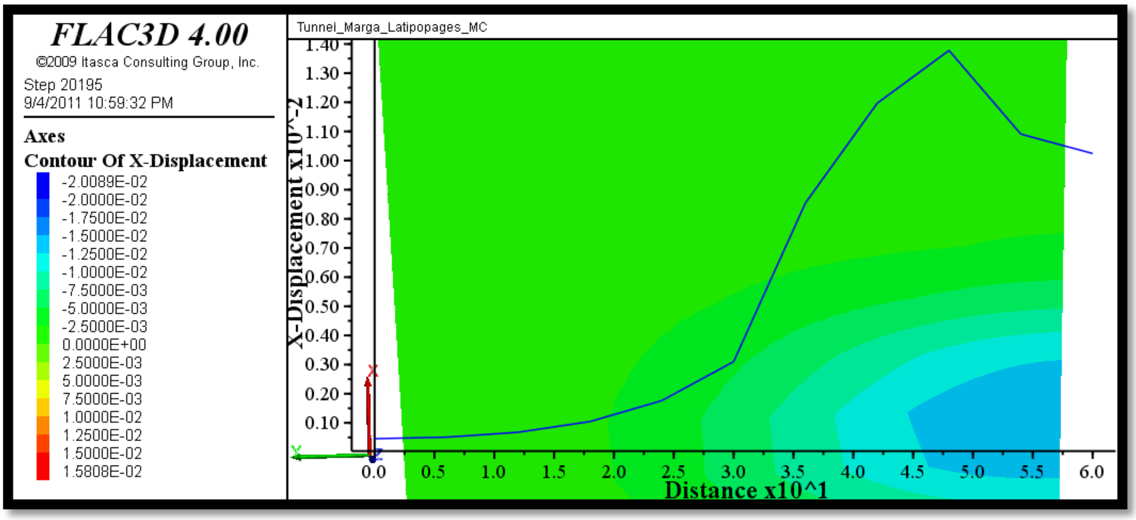
- x= -6.55 y=60 z=0 μέχρι x=-6.55 y=0 z=0 (**Εικόνα 5:25**)




Εικόνα 5:25 Μετατόπιση κατά x παρειάς σε λατυποπαγές.

Η μέγιστη κατά x μετατόπιση στην αριστερή πλευρά της σήραγγας ανέρχεται σε -1.3cm. και εμφανίζεται στο τέλος της πρώτης φάσης εκσκαφής- υποστήριξης.

- x= 6.55 y=60 z=0 μέχρι x=6.55 y=0 z=0 (**Εικόνα 5:26**)

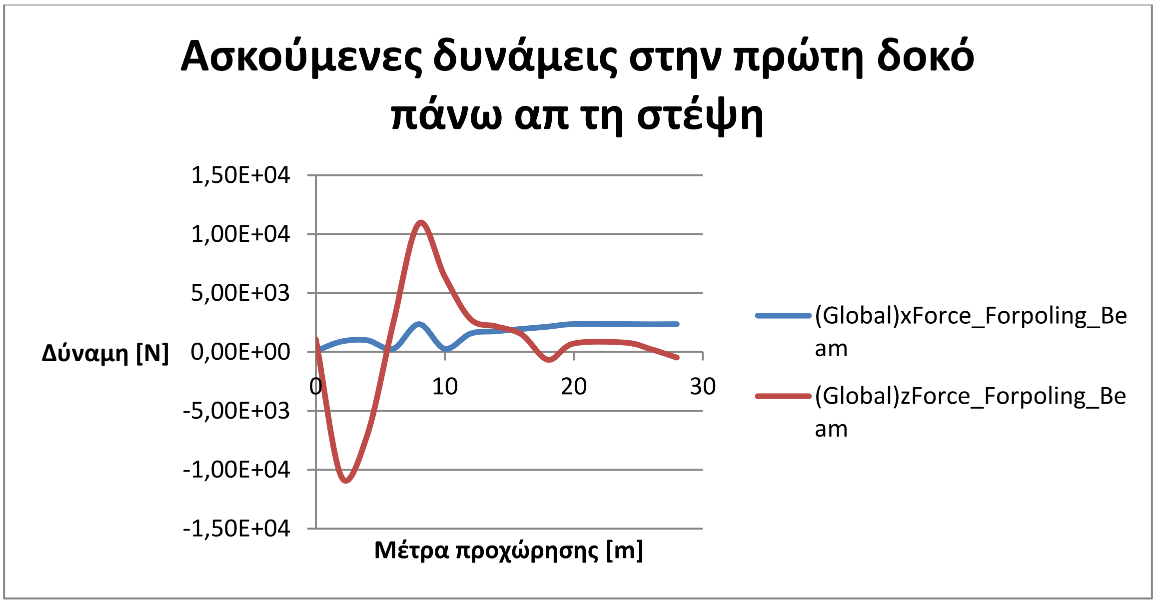



Εικόνα 5:26 Μετατόπιση κατά x παρειάς σε μάργα.

Ανάλογα είναι και τα αποτελέσματα από τη δεξιά πλευρά της σήραγγας.

Τέλος σε ότι αφορά το σύστημα προϋποστήριξης, η κατακόρυφη δύναμη δίνει όπως αναμενόταν την ελάχιστη τιμή τη στιγμή που το βήμα εκσκαφής βρίσκεται πάνω κάτω από το στοιχείο υποστήριξης ενώ τη μέγιστη όταν το βήμα εκσκαφής βρίσκεται κάτω από το άλλο άκρο της δοκού (**Εικόνα 5:27**).

Η οριζόντια δύναμη αυξάνεται σταδιακά με την πρόοδο της εκσκαφής και τείνει να σταθεροποιηθεί αφού το μέτωπο βρεθεί αρκετά μακριά από το στοιχείο και οι επιδράσεις του πλέον στο πεδίο ενδιάμεσης και ελάχιστης κύριας τάσης είναι μηδαμινές.




Εικόνα 5:27 Γράφημα ασκούμενων δυνάμεων σε δοκό προπορείας πάνω από τη στέψη.

# Κεφάλαιο 6

## Συμπεράσματα-Προτάσεις

### 6.1 Συμπεράσματα

Στην εργασία αυτή παρουσιάστηκε η τρισδιάστατη προσομοίωση διάνοιξης-υποστήριξης σήραγγας σε επαφή ημίσκληρων πετρωμάτων με τη συμβατική μέθοδο. Ιδιαίτερο βάρος δόθηκε στην επαφή των σχηματισμών.

Η τρισδιάστατη ανάλυση προσέφερε την καλύτερη δυνατή κατανόηση της μεταβολής του εντατικού πεδίου, γύρω από τη σήραγγα κατά την εκσκαφή της, την έκταση των καθιζήσεων στο χώρο και καθώς και την επίδραση της ενδιάμεσης κύριας τάσης η οποία στις συνήθεις δισδιάστατες αναλύσεις θεωρείται αμελητέα.

Από την ανάλυση προκύπτει ότι:

- ✓ Το βήμα προχώρησης δύο μέτρων επιφέρει μεγάλα φορτία στο ανυποστήρικτο τμήμα του λατυποπαγούς. Αυτό έρχεται γρήγορα σε πλαστική ροή επιτρέποντας μεγάλες συγκλίσεις πριν τοποθετηθεί η υποστήριξη.
- ✓ Η εμφάνιση της επαφής των στρωμάτων έχει ως άμεση συνέπεια την αύξηση της διατμητικής πλαστικής ζώνης. Η ζώνη διάτμησης εκτείνεται κατά μήκος της επαφής των σχηματισμών.
- ✓ Παρατηρούνται πλαστικοποιημένες εφελκυόμενες περιοχές στην επιφάνεια.
- ✓ Οι καθιζήσεις και διαφορικές καθιζήσεις στην επιφάνεια βρίσκονται σε ανεκτά όρια και στο σύνολο τους χαρακτηρίζονται ως μέτριας επικινδυνότητας.
- ✓ Οι οριζόντιες μετατοπίσεις μπροστά από το μέτωπο στο λατυποπαγές ελέγχονται και από την ενδιάμεση κύρια τάση, ενώ στη μάργα όχι.

## 6.2 Προτάσεις

Το συγκεκριμένο θέμα μπορεί να μελετηθεί εκτενέστερα και να προκύψουν ενδιαφέροντα αποτελέσματα, εφόσον όμως επιλυθούν κάποια προβλήματα τα οποία προέκυψαν κατά τη μοντελοποίηση. Αναλυτικότερα :

- Η γεωμετρία του προβλήματος απαιτεί μοντελοποίηση σε Flac2D και στη συνέχεια επέκταση κατά την τρίτη διάσταση. Κάτι τέτοιο όμως δε παράγει πάντα καλού επιπέδου διακριτοποίηση. Κυριότερα πρόβλημα αποτελεί η έλλειψη ορθογωνικότητας σε κάποια στοιχεία του τελικού καννάβου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μη σωστή κατανομή τάσεων γύρω από την προβληματική περιοχή ή τοπικές συγκεντρώσεις τάσεων (ειδικά στα αρχικά στάδια επίλυσης όπου η ταλάντωση του συστήματος είναι ακόμη υψηλή). Αυτό μπορεί να προκαλέσει ολίσθηση της επαφής και επιφερόμενες πλαστικές παραμορφώσεις σε χαμηλότερο εντατικό πεδίο απ το κρίσιμο.

- Επίσης, η διακριτοποίηση επαφής με παράταξη υπό γωνία σε σχέση με τον άξονα της σήραγγας δε μπορεί να γίνει με την προηγούμενη διαδικασία. Για να λυθούν τα δύο αυτά προβλήματα προτείνονται:

  - Χρήση εξειδικευμένου λογισμικού διακριτοποίησης (Mesh Generator) πεπερασμένων διαφορών (προτείνεται το KUBRIX).

  - Δημιουργία υπορουτίνας διακριτοποίησης (σε Fortran, C++ ή Matlab) από οποιοδήποτε προ-επεξεργαστή πεπερασμένων στοιχείων σε ζώνες (π.χ. τετράεδρα ή εξάεδρα) πεπερασμένων διαφορών FLAC3D.

- Το μεγάλο υπολογιστικό κόστος της προσομοίωσης αποτέλεσε περιοριστικό παράγοντα στην παραμετρική ανάλυση. Η επίλυση του προβλήματος στην τελική του μορφή χρειάζεται περίπου 10 ώρες σε υπολογιστή με επεξεργαστή Intel® Core™2 Duo 2.66GHz και μνήμη RAM 2GB. Το υπολογιστικό κόστος ήταν πολύ μεγαλύτερο πριν γίνουν απλοποιήσεις που αφορούν τα βήματα επίλυσης.

  - Η χρήση ταχύτερων συστημάτων μπορεί να βελτιώσει την ταχύτητα επίλυσης.

- Μια ιδανική παραμετρική ανάλυση του φαινομένου που πραγματεύεται η παρούσα εργασία θα περιείχε:

  - Επίλυση για διάφορες κλίσεις επαφής (π.χ. ανά 10 μοίρες).

  - Προσομοίωση επαφής ως ζώνη και όχι ως επιφάνεια.

  - Επίλυση του προηγούμενου βήματος για διάφορες παρατάξεις επαφής.

- Επίλυση των ανωτέρω σε στραγγιζόμενες και αστράγγιστες συνθήκες.
- Χρήση στοιχείων δοκών για την προσομοίωση των πλαισίων .
- Ανάλυση επάρκειας υποστήριξης σε κάθε μία απ τις περιπτώσεις.
- Έλεγχος αλληλεπίδρασης βραχομάζας κατασκευής σε όλες τις περιπτώσεις.
- Ανάλυση με διαφορετικούς καταστατικούς νόμους και κριτήρια αστοχίας.

# Βιβλιογραφία

## Ελληνική


1. Αγιουτάντης, Ζ.: "*Στοιχεία Γεωμηχανικής – Μηχανική πετρωμάτων* ", Εκδόσεις Ίων, 2002.

2. Αγιουτάντης, Ζ.: *"Στοιχεία Διάτρησης – Ανατίναξης"*, Εκδόσεις Ίων , 2009.

3. Βιόπουλος, Π. *"Αριθμητική Διερεύνηση Ελαστοπλαστικών Κριτηρίων Αστοχίας με Εφαρμογή σε Σήραγγες",* Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2009.

4. Βιόπουλος, Π. "*Παραμετρική διερεύνηση εντατικής κατάστασης κατά τη διάνοιξη σήραγγας με τη μέθοδο της προπασσάλωσης οροφής*", Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2006.

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

6. Εξαδάκτυλοα, Γ.: *"Σχεδιασμός Γεωτεχνικών και Λατομικών Έργων"*, Χανιά, 2007.

7. Εξαδάκτυλος, Γ., Σταυροπούλου, Μ.: "*Κατασκευή και Μηχανική των Σηράγγων και των Υπογείων Έργων* ", Χανιά, 2006

8. Εξαδάκτυλος, Γ.: *"Ανάλυση ΕυστάθειαςΥπαίθριων και Υπογείων Έργων" , Χανιά, 2003.*

9. Καββαδάς, Μ.: *"Σημειώσεις Σχεδιασμού Υπογείων Έργων"*, Ε.Μ. Πολυτεχνείο, 2005.

10. Κωμοδρόμος, Α.: *"Υπολογιστική Γεωτεχνική Μηχανική -Αλληλεπίδραση Εδάφους Κατασκευών",* Εκδόσεις Κλειδάριθμος , 2008.

11. Λιαράκος, Ε.: *"Σεισμική ανάλυση υπογείων τεχνικών έργων από οπλισμένο σκυρόδεμα"*, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2005.

12. Μαραγκός, Χ.: "*Τεχνικά Έργα Υποδομής, Κατασκευές στην επιφάνεια του βράχου, Υπόγειες κατασκευές, Φράγματα"*, Χρήστος Μαραγκός, Θεσσαλονίκη, 2006.

13. Ντούλης Γ.: *Οριστική μελέτη τεχνικών έργων: Σήραγγα Αγίας Βαρβάρας Μήκους L=499.00 m από Χ.Θ. 24+311.00 έως 24+810.00, Μελέτη Σήραγγας*, Αύγουστος 2008.

14. Παπαντώνη, Χ. "*Παραμετρική Διερεύνηση Εναλλακτικών Συστημάτων Υποστήριξης σε Οδική Σήραγγα*", Μεταπτυχιακή διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2007.

15. Στειακάκης, Χ.: "*Γεωτεχνική Ανάλυση Σηράγγων με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων"*, Μεταπτυχιακή διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2001.

## Ξενόγλωσση

1. Aksoy, C.O., Onargan, T.: "*The role of umbrella arch and face bolt as deformation preventing support system in preventing building damages*", Tunneling and Underground Space Technology 25, Elsevier, 2010, pp 553-559.

2. Atlas Copco, *"Rock & Soil Reinforcement"*, Third Edition.

3. Brady B.H.G. & Brown E.T.: "*Rock Mechanics for underground mining*", Third Edition, Kluwer Academic Publishers, 2004.

4. Dick, R.A., Fletcher, L.R. and D'Andrea, D.V.: *"Explosives and Blasting Manual"*, Information Circular 8925, US Bureau of Mines, Washington, DC, 1983.

5. Gregory, C.E.: *"Explosives for North American engineers"*, 3rd Edition, Trans Tech Publications, 1984.

6. Heiniö, M.: *"Rock excavation handbook"*, Copyright Sandvik Tamrock Corp., (1999).

7. Hoek E., Kaiser P.T., Bawden W.F.: "*Support of Underground Excavations in Hard Rock*", Taylor & Francis , 2005

8. Itasca Consulting Group, Inc.: "*FLAC3D Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions "Theory and Background"*, Minneapolis, Minnesota, 2003.

9. Itasca Consulting Group, Inc.: "*FLAC3D Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions "Structural Elements"*, Minneapolis, Minnesota, 2003.

10. Jaeger, J.C., Cook, N.G.W., Zimmerman, R.W.: *"Fundamentals of Rock Mechanics",* Blackwell Publishing, 2007.

11. Kolymbas, D.: "*Tunneling and Tunnel Mechanics, A Rational Approach to Tunneling*", Springer, 2008.

12. Konietzky, H.,L. te Kamp, Hammer, H., Niedermeyer, S. : *"Numerical modeling of in situ stress conditions as an aid route selection for rail tunnels in complex geological formations in South Germany"*, Computers and Geotechnics, 2001, pp 495-516.

13. Lovat, R. P.: *"TBM Design Considerations: Selection of Earth Pressure Balance or Slurry Pressure Balance Tunnel Boring Machines"*, Ημερίδα ΕΕΣΥΕ 01/02/2007, 2007.

14. Marti, J. and P. Cundall. *"Mixed Discretization Procedure for Accurate Modelling of Plastic Collapse"*, International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics, 1982, pp 129-139.

15. Munjiza, A.: "*The Combined Finite-Discrete Element Method"*, Wiley, 2004.

16. St. John and Van Dillen: "*Rockbolts: A New Numerical Representation And Its Application In Tunnel Design",* The 24th U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS), June 20 - 23, College Station, TX, 1983, pp 13-25.

17. Villaescusa, E., Seto, M. and Baird, G.: *"Stress measurements from oriented core"*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, pp 603-615.

18. Voight, B.: *"Determination of the virgin state of stress in the vincinity of a borehole from measurements of a partial anelastic strain tensor in drill cores"*, Felsmech. Ingenieurgeol, 1968.

19. Yoo, Chungsik.: *"Finite-element analysis of tunnel face reinforced by longitudinal pipes"*, Computers and Geotechnics 29, 2001, pp 73-94.

20. Zhao, J., Gong, Q.M., Eisensten, Z.: "*Tunneling through a frequently changing and mixed ground: A case history in Singapore"*, Tunneling and Underground Space Technology, 2006, pp 388-400.

21. Zoback M., *"Reservoir Geomechanics"*, Cambridge, 2010.

22. Zoback, M. D., Barton, C. A., Brudy, M., Castillo, D. A., Finkerbeiner, T., Grollimund, B. R., Moos, D. B., Peska, P., Ward, C. D. and Wiprut, D. J. Q.: *"Determina-*

*tion of stress orientation and magnitude in deep wells"*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, pp 1049-1076.

23. Zoback, M. D., Moos, D., Mastin, L. and Anderson, R. N.: *"Wellbore breakouts and in situ stress"*, Journal of Geophysics, 1985, 5523-5530.

## Δικτυακοί Τόποι:

1. http://www.tunnels.mottmac.com/ , Mott MacDonald Group Limited 2010.
2. http://www.yde.co.il/ I. Stern - Y.D.E. Engineers, LTD, 15 Gershon Street, Tel Aviv, Israel.
3. http://mc.sandvik.com/ , Sandvik Mining and Construction.
4. http://www.tunneltalk.com/

## Φωτογραφικό Υλικό

1. Βογιατζή, Σ., Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Προσωπικό Αρχείο.