



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ – ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ**

---

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΔΙΔΑΣΤΑΤΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥ  
ΜΕΤΩΠΟΥ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ**



**ΦΕΣΣΑ ΑΛΕΞΙΑ**

*ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : ΚΑΒΒΑΔΑΣ ΜΙΧΑΗΛ*

Τριμελής Επιτροπή :

Καββαδάς Μιχαήλ, Καθηγητής

Παπαδημητρίου Αχιλλέας, Αναπληρωτής Καθηγητής

Μαρίνος Βασίλης, Επίκουρος Καθηγητής

**ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2021**

Copyright © Φεσσά Αλεξία

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

## Ευχαριστίες

Καταρχήν θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου, κ. Μιχάλη Καββαδά, με τον οποίον για άλλη μια φορά είχαμε μια άψογη συνεργασία. Τόσο το μάθημά του περί βραχομηχανικής και σηράγγων, κατανοητό, ουσιώδες και ενδιαφέρον, όσο και η ενασχόληση της επιστημονικής του ομάδας με τις σήραγγες τα τελευταία χρόνια, ήταν αυτά που με οδήγησαν να επιλέξω το θέμα της εργασίας αυτής. Η συνεργασία μας βασίστηκε για άλλη μια φορά στην άμεση επικοινωνία που είχαμε και στις κατευθυντήριες γραμμές που έθετε σε κάθε στάδιο της εργασίας ώστε να μορφωθεί αυτό το τελικό αποτέλεσμα.

Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Δημήτρη Γεωργίου, Διδάκτορα του Γεωτεχνικού Τομέα της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ, για την συνεργασία μας. Και ένα μεγάλο ευχαριστώ που αφιέρωσε μέρος του προσωπικού του χρόνου για την επίτευξη αυτού του εγχειρήματος. Με δίδαξε τη χρήση του προγράμματος RS2.2019 και με βοήθησε καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας μου, παρέχοντας τις επιστημονικές του γνώσεις και επιλύοντας κάθε πρόβλημα που πρόκυπτε. Συνέβαλε με τις υποδείξεις του στην ολοκλήρωση και στην οργάνωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στους φίλους μου από τη σχολή, με τους οποίους πέρασα πολύ όμορφες στιγμές και πολλά ξενύχτια αυτήν τη χρονιά, κάνοντάς την πιο όμορφη!

Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ το οφείλω στην οικογένεια μου, στους γονείς μου Άρτεμις και Στέργιο και στις αδερφές μου Κατερίνα και Νικολέτα που με τη βοήθεια τους χάραξα το δρόμο μου έως εδώ. Είναι εκεί, πάντα και παντού. Ελπίζω να φαίνομαι πάντα αντάξιά τους.

## **Πίνακας Περιεχομένων**

I.	Περίληψη .....	IX
II.	Abstract .....	X
1.	Εισαγωγή.....	1
2.	Σήραγγες και Υπόγεια Έργα .....	3
2.1.	Ορισμός της Σήραγγας.....	3
2.2.	Ιστορική Εξέλιξη των Σηράγγων.....	3
2.3.	Είδη Σηράγγων .....	5
3.	Μέθοδοι Διάνοιξης Σηράγγων.....	7
3.1.	Μέθοδος NATM .....	7
3.1.1.	Το χρονικό ανάπτυξης της τεχνικής.....	7
3.1.2.	Η φιλοσοφία της τεχνικής-αρχές.....	9
3.1.3.	Η εφαρμογή της τεχνικής.....	10
3.1.4.	Πλεονεκτήματα της μεθόδου NATM .....	14
3.1.5.	Μειονεκτήματα της μεθόδου NATM .....	15
3.2.	Μηχανοποιημένη διάνοιξη σηράγγων –TBM.....	15
3.2.1.	Περιγραφή της μεθόδου.....	15
3.2.2.	Παράγοντες οι οποίοι ευνοούν την επιλογή του TBM.....	17
3.2.3.	Παράγοντες που αποτρέπουν την επιλογή του TBM.....	17
3.2.4.	Επιλογή μεταξύ συμβατικής διάνοιξης NATM ή με TBM .....	17
3.2.5.	Γενικά χαρακτηριστικά του TBM .....	18
3.2.6.	Κατασκευή επένδυσης σήραγγας με TBM .....	19
4.	Σχεδιασμός Σηράγγων .....	21
4.1.	Εμπειρικές Μέθοδοι Σχεδιασμού .....	21
4.1.1.	Σύστημα Ταξινόμησης RMR.....	21
4.1.2.	Σύστημα Ταξινόμησης Q.....	24
4.1.3.	Σύστημα Ταξινόμησης GSI .....	27
4.2.	Αριθμητικές Μέθοδοι Σχεδιασμού .....	31
4.2.1.	Διδιάστατες Αριθμητικές Αναλύσεις (2D) .....	32
4.2.2.	Τριδιάστατες Αριθμητικές Αναλύσεις (3D).....	33
5.	Χρήση της Μεθόδου Σύγκλισης – Αποτόνωσης στον Σχεδιασμό Σηράγγων .....	35

5.1.	Μέθοδος Σύγκλισης – Αποτόνωσης (Ducan – Fama, 1993) .....	44
5.2.	Μέθοδος Σύγκλισης – Αποτόνωσης (Kanvadas M. , 1998).....	46
5.3.	Μέθοδος Σύγκλισης – Αποτόνωσης (Carranza Torres & Fairhurst, 1999) .....	49
5.4.	Μέθοδος Σύγκλισης – Αποτόνωσης (Carranza Torres, 2002) .....	52
6.	Ευστάθεια Μετώπου Εκσκαφής Σηράγγων.....	57
6.1.	Προϋποστήριξη του Μετώπου Εκσκαφής με Αγκύρια Τύπου Fiberglass .....	61
6.2.	Προϋποστήριξη του Μετώπου Εκσκαφής με Ομπρέλα Δοκών Προπορείας.....	64
7.	Περιγραφή Αναλύσεων και Βασικών Παραμέτρων .....	69
7.1.	Σκοπός Αναλύσεων .....	69
7.2.	Παράμετροι Προσομοίωσης.....	71
7.3.	Αναλύσεις με το Λογισμικό Rocsupport.....	73
7.4.	Αναλύσεις με τον Κώδικα Πεπερασμένα Στοιχείων RS2 .....	75
7.5.	Συντελεστής Ευστάθειας Μετώπου Εκσκαφής (Georgiou D. et al., 2021).....	80
8.	Αποτελέσματα Παραμετρικών Αναλύσεων.....	83
8.1.	Μεθοδολογία.....	83
8.2.	Αποτελέσματα μεθόδου Ducan – Fama (1993).....	88
8.3.	Αποτελέσματα μεθόδου Kanvadas M. (1998) .....	90
8.4.	Αποτελέσματα μεθόδου Carranza Torres & Fairhurst (1999) .....	93
8.5.	Αποτελέσματα μεθόδου Carranza Torres (2002) .....	96
8.6.	Αποτελέσματα αναλύσεων με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων RS2 .....	99
8.7.	Μόρφωση σχέσης για τον υπολογισμού του βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στο μέτωπο εκσκαφής .	102
9.	Εφαρμογή προτεινόμενης μεθοδολογίας .....	105
9.1.	Περίπτωση εφαρμογής ρηχής σήραγγας .....	105
9.2.	Περίπτωση εφαρμογής βαθιάς σήραγγας.....	108
10.	Συμπεράσματα – Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	111
11.	Βιβλιογραφία.....	113

## **Λίστα Εικόνων**

Εικόνα 1. 1. Τριδιάστατη αριθμητική προσομοίωση της προϋποστήριξης του μετώπου εκσκαφής σηράγγων. 2

Εικόνα 2. 1, Ευπαλίνειο όρυγμα (Πηγή: [naftemporiki.gr](http://naftemporiki.gr)) .....

Εικόνα 3 1. Κατασκευή τελικού ανάστροφου τόξου (final invert) (Πηγή: Geodata).	13
Εικόνα 3 2. Τοπογραφική παρακολούθηση των συγκλίσεων της σήραγγας (Πηγή: Geodata).	14
Εικόνα 3 3. Κοπτική κεφαλή TBM (Πηγή: Robins).	16
Εικόνα 3 4. Επιλογή τύπου TBM, βάσει τύπου εδάφους (Πηγή: Y.L. Zheng et al.)	18
Εικόνα 3 5. Επένδυση σήραγγας με προκατασκευασμένα στοιχεία - segments (Πηγή: AGJV).	20
Εικόνα 4. 1. Διδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα (2D) σε έργο σήραγγας με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων RS2 – Rocscience (Πηγή: Γεωργίου Δ.).	33
Εικόνα 4. 2. Τριδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα διάνοιξης σήραγγας σε άμεση αλληλεπίδραση με άλλες κατασκευές (Πηγή: Rocscience).	34
Εικόνα 6. 1. Αστοχία μετώπου εκσκαφής α) σε βαθιά σήραγγα b) σε ρηχή σήραγγα με πρόκληση επιφανειακών βλαβών (Πηγή: SkyscraperCity).	57
Εικόνα 6. 2. Εφαρμογή αγκυρίων μετώπου τύπου fiberglass για την ενίσχυση της ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής α) Διάταξη στο μέτωπο εκσκαφής b) Διαμήκης διάταξη (Πηγή: Lunardi P. , 2008).	63
Εικόνα 6. 3. Τυπική διάταξη αγκυρίων μετώπου τύπου fiberglass (Πηγή: ELEBOR A.E.B.E.).	64
Εικόνα 6. 4. Τρόπος στήριξης ομπρέλας δοκών προπορείας (Πηγή: Pamco Engineering Ltd.).	65
Εικόνα 7. 1. Προσομοίωση της ομπρέλας των δοκών προπορείας σε διδιάστατη αριθμητική ανάλυση μέσω της μεθόδου της ενισχυμένης ζώνης (Πηγή: Γεωργίου Δ.).	70
Εικόνα 9. 1. Σύγκριση ολικών μετακινήσεων στην περιοχή του μετώπου εκσκαφής για το έδαφος Α, μεταξύ τριδιάστατης (3D) και διδιάστατης (2D) αριθμητικής ανάλυσης.	106
Εικόνα 9. 2. Σύγκριση ολικών μετακινήσεων στην περιοχή του μετώπου εκσκαφής για το έδαφος Β, μεταξύ τριδιάστατης (3D) και διδιάστατης (2D) αριθμητικής ανάλυσης.	107
Εικόνα 9. 3. Σύγκριση ολικών μετακινήσεων στην περιοχή του μετώπου εκσκαφής για την βραχώμαζα με τιμή GSI = 25, μεταξύ τριδιάστατης (3D) και διδιάστατης (2D) αριθμητικής ανάλυσης.	109
Εικόνα 9. 4. Σύγκριση ολικών μετακινήσεων στην περιοχή του μετώπου εκσκαφής για την βραχώμαζα με τιμή GSI = 45, μεταξύ τριδιάστατης (3D) και διδιάστατης (2D) αριθμητικής ανάλυσης.	110

## **Λίστα Σχημάτων**

Σχήμα 3. 1, Τμηματική εκσκαφή σήραγγας (Πηγή: Ocak et al., 2015)	12
Σχήμα 4. 1. Σύστημα ταξινόμησης βραχώμαζας RMR (Πηγή: Rocscience).	22
Σχήμα 4. 2. Προσδιορισμός χρόνου αυτοϋποστήριξης υπόγειου ανοίγματος βάσει του συστήματος ταξινόμησης βραχώμαζας RMR (Πηγή: Rocscience).	24
Σχήμα 4. 3. Βαθμονόμηση παραμέτρων συστήματος ταξινόμησης βραχώμαζας Q (Πηγή: Rocscience)..	25

Σχήμα 4. 4. Προτεινόμενη μεθοδολογία προσωρινής υποστήριξης σηράγγων, βάσει της ταξινόμησης βραχώμαζας Q (Πηγή: Rocscience).....	26
Σχήμα 4. 5. Προτεινόμενη μεθοδολογία εκτίμησης της μέγιστης σύγκλισης και της προσωρινής υποστήριξης σηράγγων, βάσει της αντοχής της βραχώμαζας ( $\sigma_{cm}$ ) (Πηγή: Marinis & Hoek, 2000). .....	30
Σχήμα 4. 6. Διάγραμμα συμπεριφοράς εκσκαφής (TBC) ανάλογα την δομή της βραχώμαζας, το επιτόπου τασικό πεδίο και την αντοχή του άρρηκτου πετρώματος (Πηγή: Marinis V. , 2010). .....	31
Σχήμα 4. 7. Εξέλιξη των συγκλίσεων της σήραγγας ( $u_R$ ) συναρτήσει της απόστασης από το μέτωπο εκσκαφής (Πηγή: Καββαδά Μ.).....	36
Σχήμα 4. 8. Καμπύλες εξέλιξης των συγκλίσεων ανυποστήρικτης σήραγγας, σύμφωνα με την μεθοδολογία Panet για διαφορετικές τιμές του συντελεστή υπερφόρτωσης ( $N_s$ ) (Πηγή: Καββαδά Μ.).....	38
Σχήμα 4. 9. Καμπύλες εξέλιξης των συγκλίσεων ανυποστήρικτης σήραγγας, σύμφωνα με την μεθοδολογία Chern et al. για διαφορετικές τιμές του συντελεστή υπερφόρτωσης ( $N_s$ ) (Πηγή: Καββαδά Μ.).....	39
Σχήμα 4. 10. Εξέλιξη βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) κατά μήκος της σήραγγας (Πηγή: Καββαδά Μ.).....	40
Σχήμα 4. 11. Χαρακτηριστική μορφή καμπύλης σύγκλισης – αποτόνωσης (Πηγή: Καββαδά Μ.).....	41
Σχήμα 6. 1. Μηχανισμός συμπεριφοράς μετώπου εκσκαφής σηράγγων και πρόκληση εξώθηση μετώπου εκσκαφής (Πηγή: Lunardi P. , 2008). .....	58
Σχήμα 6. 2. Μηχανισμοί αστοχίας του μετώπου εκσκαφής, ανάλογα την συμπεριφορά της γεώμαζας του πυρήνα προώθησης του μετώπου εκσκαφής (Πηγή: Lunardi P. , 2008). .....	60
Σχήμα 6. 3. Διάταξη δοκών προπορείας στην τρίτη διάσταση (Πηγή: Hoek E. , 2004).....	66
Σχήμα 6. 4. Τοποθέτηση ομπρέλας δοκών προπορείας a) Διάταξη στο μέτωπο εκσκαφής b) Διαμήκης διάταξη (Πηγή: Lunardi P. , 2008).....	67
Σχήμα 7. 1. Διαμόρφωση συγκλίσεων στην περίμετρο της σήραγγας, βάσει της αναπτυσσόμενης εξώθησης του μετώπου εκσκαφής (Πηγή: Hoek E. , 2007).....	69
Σχήμα 7. 2. Εξεταζόμενες γεωμετρικές εκσκαφής a) Ολομέτωπη εκσκαφή διαμέτρου 10 m b) Ολομέτωπη εκσκαφή διαμέτρου 6 m c) Τμηματική εκσκαφή ισοδύναμης διαμέτρου 6 m.....	72
Σχήμα 7. 3. Ανάλυση ρηχής σήραγγας με το λογισμικό Rocsupport και την παρουσία μέτρων υποστήριξης.	75
Σχήμα 7. 4. Διδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα για διάμετρο εκσκαφής $D = 6$ m. ....	76
Σχήμα 7. 5. Διδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα για διάμετρο εκσκαφής $D = 10$ m. ....	77
Σχήμα 7. 6. Προσομοίωση βαθιάς εκσκαφής με την προσθήκη κατανεμημένου φορτίου ( $Q$ ) στο άνω όριο του μοντέλου (+40 m).....	78

Σχήμα 7. 7. Προσομοίωση της μεθόδου αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στο αριθμητικό προσομοίωμα με την επιβολή απομειωμένης εσωτερικής πίεσης.....	79
Σχήμα 7. 8. Επιβληθείς συνοριακές συνθήκες αριθμητικού προσομοιώματος.....	79
Σχήμα 7. 9. Θέσεις καταγραφής των συγκλίσεων της σήραγγας, ανά βήμα αποτόνωσης.....	80
Σχήμα 8. 1. Συσχέτιση απώλειας εδαφικού όγκου λόγω εξώθησης μετώπου εκσκαφής (Vh) με την απώλεια εδαφικού όγκου λόγω σύγκλισης της σήραγγας (VR).....	83
Σχήμα 8. 2. Εξέλιξη των συγκλίσεων κατά μήκος της σήραγγας (Πηγή: Hoek E. , 2003). .....	85

### **Λίστα Διαγραμμάτων**

Διάγραμμα 7. 1. Συσχέτιση συντελεστή ασφαλείας $\Lambda F_0$ με εξώθηση μετώπου εκσκαφής $\Omega F$ (Πηγή: Γεωργίου Δ.).....	82
Διάγραμμα 8. 1. Καμπύλη σύγκλισης – αποτόνωσης για ρηχή σήραγγα ( $H/D = 2$ ) και συντελεστή υπερφόρτωσης ( $N_s = 12.7$ ).....	86
Διάγραμμα 8. 2. Καμπύλη σύγκλισης – αποτόνωσης για βαθιά σήραγγα ( $H/D = 15$ ) και συντελεστή υπερφόρτωσης ( $N_s = 18.3$ ).....	87
Διάγραμμα 8. 3. Συσχέτιση του βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στο μέτωπο εκσκαφής με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου ( $\Lambda F_0$ ) για απόσταση ισορροπίας ( $L = 0.8 D$ ) βάσει της μεθόδου Duncan – Fama (1993). 89	89
Διάγραμμα 8. 4. Συσχέτιση του βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στο μέτωπο εκσκαφής με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου ( $\Lambda F_0$ ) για απόσταση ισορροπίας ( $L = 1 D$ ) βάσει της μεθόδου Duncan – Fama (1993). 89	89
Διάγραμμα 8. 5. Συσχέτιση του βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στο μέτωπο εκσκαφής με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου ( $\Lambda F_0$ ) για απόσταση ισορροπίας ( $L = 1.5 D$ ) βάσει της μεθόδου Duncan – Fama (1993). 90	90
Διάγραμμα 8. 6. Συσχέτιση του βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στο μέτωπο εκσκαφής με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου ( $\Lambda F_0$ ) για απόσταση ισορροπίας ( $L = 0.8 D$ ) βάσει της μεθόδου Kanvadas M. (1998). 91	91
Διάγραμμα 8. 7. Συσχέτιση του βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στο μέτωπο εκσκαφής με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου ( $\Lambda F_0$ ) για απόσταση ισορροπίας ( $L = 1 D$ ) βάσει της μεθόδου Kanvadas M. (1998). 92	92
Διάγραμμα 8. 8. Συσχέτιση του βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στο μέτωπο εκσκαφής με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου ( $\Lambda F_0$ ) για απόσταση ισορροπίας ( $L = 1.5 D$ ) βάσει της μεθόδου Kanvadas M. (1998). 93	93



Διάγραμμα 8. 9. Συσχέτιση του βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στο μέτωπο εκσκαφής με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου ( $\Lambda_{Fo}$ ) για απόσταση ισορροπίας ( $L = 0.8 D$ ) βάσει της μεθόδου Carranza Torres & Fairhurst (1999).....	94
Διάγραμμα 8. 10. Συσχέτιση του βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στο μέτωπο εκσκαφής με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου ( $\Lambda_{Fo}$ ) για απόσταση ισορροπίας ( $L = 1 D$ ) βάσει της μεθόδου Carranza Torres & Fairhurst (1999).....	95
Διάγραμμα 8. 11. Συσχέτιση του βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στο μέτωπο εκσκαφής με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου ( $\Lambda_{Fo}$ ) για απόσταση ισορροπίας ( $L = 1.5 D$ ) βάσει της μεθόδου Carranza Torres & Fairhurst (1999).....	95
Διάγραμμα 8. 12. Συσχέτιση του βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στο μέτωπο εκσκαφής με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου ( $\Lambda_{Fo}$ ) για απόσταση ισορροπίας ( $L = 0.8 D$ ) βάσει της μεθόδου Carranza Torres (2002). 97	97
Διάγραμμα 8. 13. Συσχέτιση του βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στο μέτωπο εκσκαφής με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου ( $\Lambda_{Fo}$ ) για απόσταση ισορροπίας ( $L = 1 D$ ) βάσει της μεθόδου Carranza Torres (2002). 97	97
Διάγραμμα 8. 14. Συσχέτιση του βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στο μέτωπο εκσκαφής με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου ( $\Lambda_{Fo}$ ) για απόσταση ισορροπίας ( $L = 1.5 D$ ) βάσει της μεθόδου Carranza Torres (2002). 98	98
Διάγραμμα 8. 15. Συσχέτιση του βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στο μέτωπο εκσκαφής με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου ( $\Lambda_{Fo}$ ) για απόσταση ισορροπίας ( $L = 0.8 D$ ) βάσει διδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων RS2.....	99
Διάγραμμα 8. 16. Συσχέτιση του βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στο μέτωπο εκσκαφής με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου ( $\Lambda_{Fo}$ ) για απόσταση ισορροπίας ( $L = 1 D$ ) βάσει διδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων RS2.....	100
Διάγραμμα 8. 17. Συσχέτιση του βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στο μέτωπο εκσκαφής με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου ( $\Lambda_{Fo}$ ) για απόσταση ισορροπίας ( $L = 1.5 D$ ) βάσει διδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων RS2.....	101
Διάγραμμα 8. 18. Σχέση μεταξύ της ακτινικής σύγκλισης ( $UR$ ) στο μέτωπο εκσκαφής μεταξύ αποτελεσμάτων από τριδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις και από την Εξ. 3 για μήκος $L=0.8*D$ . ....	103
Διάγραμμα 8. 19. Συσχέτιση του βαθμού αποτόνωσης στο μέτωπο εκσκαφής με τον συντελεστή ασφαλείας του μετώπου εκσκαφής ( $\Lambda_{Fo}$ ).....	104

## **Λίστα Πινάκων**

Πίνακας 4. 1. Προτεινόμενη μεθοδολογία διάνοιξης και προσωρινής υποστήριξης της σήραγγας, βάσει του συστήματος ταξινόμησης βραχώμαζας RMR (Πηγή: Μαρίνος Β.).....	23
---	----

Πίνακας 4. 2. Χαρακτηρισμός βραχόμαζας βάσει της βαθμονόμησης Q (Πηγή: Rocscience).....	26
Πίνακας 4. 3. Τιμή παραμέτρου ESR για την εκτίμηση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης στην ταξινόμηση βραχόμαζας Q (Πηγή: Rocscience)..	27
Πίνακας 4. 4. Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής – GSI (Πηγή: Marinos & Hoek, 2000).	28
Πίνακας 7. 1. Παράμετροι εδάφους.	73
Πίνακας 7. 2. Παράμετροι βραχόμαζας.	73
Πίνακας 7. 3. Χαρακτηριστικά αριθμητικών προσομοιωμάτων.	77
Πίνακας 8. 1. Συσχέτιση σύγκλισης μετώπου εκσκαφής (UR) με την εξώθηση του μετώπου εκσκαφής (Uh), ανάλογα την απόσταση ισορροπίας (L) πίσω από το μέτωπο εκσκαφής.	85
Πίνακας 8. 2. Σύγκριση παράγωγων μεγεθών της καμπύλης σύγκλισης – αποτόνωσης για ρηχές σήραγγες με βάσει όλες τις εξεταζόμενες μεθοδολογίες.	87
Πίνακας 8. 3. Σύγκριση παράγωγων μεγεθών της καμπύλης σύγκλισης – αποτόνωσης για βαθιές σήραγγες με βάσει όλες τις εξεταζόμενες μεθοδολογίες.	88
Πίνακας 9. 1. Μηχανικές ιδιότητες εδάφους για ρηχές σήραγγες.	105
Πίνακας 9. 2. Προσδιορισμός ισοδύναμου βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στην περιοχή του μετώπου εκσκαφής για τις εξεταζόμενες περιπτώσεις ρηχών σηράγγων.	105
Πίνακας 9. 3. Μηχανικές ιδιότητες βραχόμαζας για βαθιές σήραγγες.	108
Πίνακας 9. 4. Προσδιορισμός ισοδύναμου βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στην περιοχή του μετώπου εκσκαφής για τις εξεταζόμενες περιπτώσεις βαθιών σηράγγων.	108

## I. Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία ως έχει ως αντικείμενο την προσπάθεια προσομοίωσης της ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής σηράγγων που αποτελεί ένα τριδιάστατο πρόβλημα, σε πρόβλημα δύο διαστάσεων μέσω της χρήσης του ισοδύναμου βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ).

Η παρούσα έρευνα βασίζεται σε ένα σύνολο από δεδομένα τριδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων, όπου μέσω της εξώθησης του ανυποστήρικτου μετώπου εκσκαφής θα γίνει προσπάθεια προσδιορισμού της ισοδύναμος σύγκλισης στην περιοχή του μετώπου εκσκαφής και στην συνέχεια θα προσδιοριστεί ο ισοδύναμος βαθμός αποτόνωσης ( $\lambda$ ).

Στην έρευνα εξετάζονται περιπτώσεις τόσο ρηχών όσο και βαθιών σηράγγων, με διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες και διαφορετικό συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων ( $K_0$ ). Ο προσδιορισμός του ισοδύναμου βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ), βασίστηκε στην χρήση της μεθόδου των καμπυλών σύγκλισης – αποτόνωσης εδάφους με εμπειρικές μεθόδους αλλά και με διδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις.

Η διάρθρωση της εργασίας έχει την ακόλουθη δομή:

- ✓ Αρχικά γίνεται παρουσίαση της μηχανικής των σηράγγων καθώς και των μεθόδων διάνοιξης και σχεδιασμού αυτών.
- ✓ Ακολουθεί η παρουσίαση των διαθέσιμων εμπειρικών μεθόδων σύγκλισης – αποτόνωσης στις οποίες βασίστηκε η παρούσα εργασία. Επίσης γίνεται αναφορά στην σημασία της ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής, του μηχανισμού αστοχίας του, καθώς και των διαθέσιμων τεχνικών για την υποστήριξη του.
- ✓ Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι μέθοδοι των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία καθώς και οι βασικές παραδοχές και παράμετροι που ελήφθησαν υπόψιν.
- ✓ Σε επόμενο στάδιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων ανά μέθοδο ανάλυσης και προτείνεται η κατάλληλη μεθοδολογία για τον προσδιορισμό του βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στο μέτωπο εκσκαφής.
- ✓ Τέλος γίνεται εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας για τον προσδιορισμό του βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) και παρατίθενται τα βασικά συμπεράσματα της παρούσας εργασίας καθώς και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

## II. Abstract

In the present thesis, it is going to be investigated the effect of the tunnel face extrusion and tunnel face stability in the formation of the radial displacements in the tunnel face area. Based on the equivalent tunnel radial displacements in the tunnel face area, it is going to be correlated the tunnel face extrusion with the equivalent deconfinement ratio ( $\lambda$ ). Thus, the complex three dimensional problem of the tunnel face stability it will be converted to a two dimensional problem, based on the equivalent deconfinement ratio ( $\lambda$ ).

The present investigation based on data from three-dimensional numerical analysis of the tunnel face extrusion investigation. The tunnel face extrusion it is going to be converted to the tunnel radial displacement and finally to deconfinement ratio ( $\lambda$ ), using the appropriate tunnel convergence – confinement method.

In the present thesis, the investigation works both on shallow and deep tunnels with different geomaterial properties and different ratios of the lateral earth pressure ratio at rest ( $K_0$ ).The correlation between the tunnel face extrusion and the deconfinement ratio ( $\lambda$ ) is based on convergence – confinement methods and two dimensional numerical analysis.

The basics steps and Chapters of the present thesis are:

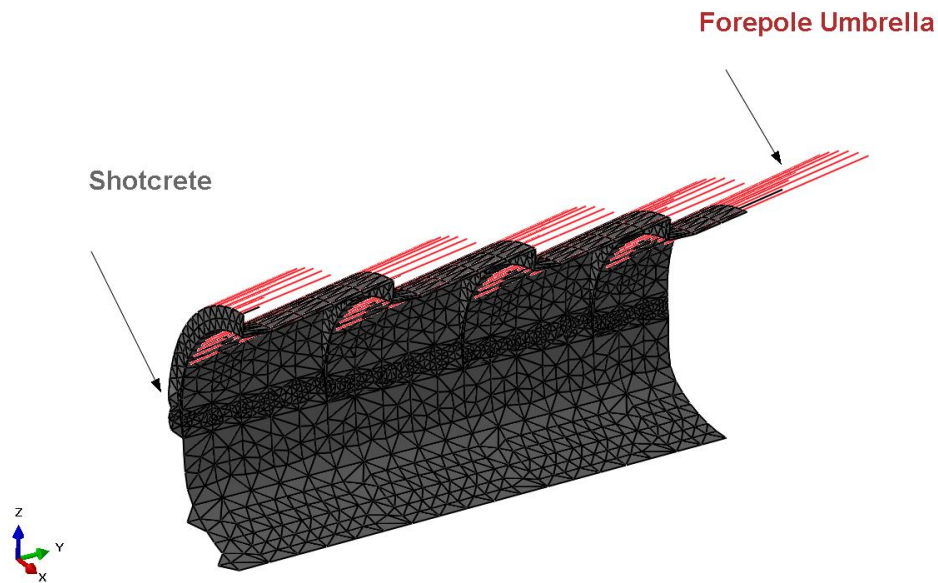
- ✓ Presentation of the tunnel engineering and description of the main tunnel excavation and tunnel design methods.
- ✓ Description of the main convergence – confinement methods that are used in the present thesis. Moreover is presented the importance of the tunnel face stability and the basic tunnel face pre – support techniques.
- ✓ Presentation of the main properties and assumptions that are used in the investigation.
- ✓ Presentation of the analysis results and description of the correlation between the tunnel face stability and the equivalent deconfinement ratio ( $\lambda$ ) in the tunnel face area.
- ✓ Finally, is presented the usage (case study) of the proposed correlation between the tunnel face stability and the equivalent deconfinement ratio ( $\lambda$ ). Moreover are presented the basic conclusions of the present thesis and recommendation for future work.

## 1. Εισαγωγή

Κατά την κατασκευή σηράγγων και υπογείων έργων, ένα από τα πιο κρίσιμα σημεία που θα καθορίσουν την ασφάλεια και την επιτυχία ολόκληρου του έργου, είναι το μέτωπο εκσκαφής. Το μέτωπο εκσκαφής αποτελεί σημείο ενδιαφέροντος στην κατασκευή των σηράγγων, διότι η ευστάθειά του καθορίζεται πολλούς παράγοντες και κυρίως η ζώνη επιρροής του είναι στην τρίτη διάσταση έμπροσθεν αυτού.

Ο μηχανισμός αστοχίας του μετώπου εκσκαφής σηράγγων έχει απασχολήσει πολλούς ερευνητές τα τελευταία χρόνια, οπότε έχουν προσπαθήσει να περιγράψουν την συμπεριφορά και τις συνθήκες κάτω από τις οποίες θα επέλθει αστοχία, μέσω εργαστηριακών δοκίμων ή αναλυτικών μεθόδων ή αριθμητικών προσεγγίσεων.

Σήμερα στην βιβλιογραφία υπάρχει μεγάλη ποικίλα στις διαθέσιμες τεχνικές ώστε να προσδιοριστεί η συμπεριφορά του μετώπου εκσκαφής, με τις αριθμητικές μεθόδους να αποτελούν το πιο αξιόπιστο εργαλείο, καθώς μπορούν να προσομοιώσουν πλήρως την γεωμετρία του υπογείου έργου, μειώνοντας τις παραδοχές που βασίζονται οι υπόλοιπες μέθοδοι. Λόγω της σύνθετης γεωμετρίας του μετώπου εκσκαφής σηράγγων και κυρίως λόγω του μηχανισμού λειτουργίας του στην τρίτη διάσταση, απαιτούνται τριδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις ώστε να προσδιορίσει η συμπεριφορά του. Επιπροσθέτως σε περιπτώσεις χρήσης μέτρων υποστήριξης του μετώπου εκσκαφής σηράγγων, θα απαιτηθούν τριδιάστατες αναλύσεις ώστε να προσδιοριστεί η συμπεριφορά αυτών των μέτρων, καθώς αυτά πάντα αναπτύσσονται και λειτουργούν στην τρίτη διάσταση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η προσομοίωση της προϋποστήριξης του μετώπου εκσκαφής ομπρέλα δοκών προπορείας (forepoling umbrella), όπως αυτή παρουσιάζεται στην **Εικόνα 1.1**.



*Εικόνα 1. 1. Τριδιάστατη αριθμητική προσομοίωση της προϋποστήριξης του μετώπου εκσκαφής σηράγγων.*

Οι τριδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις λόγω της πολυπλοκότητας των προσομοιωμάτων, απαιτούν αρκετό υπολογιστικό χρόνο και όγκο δεδομένων. Κατά το παρελθόν έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες παρομοίωσης των μέτρων προϋποστήριξης του μετώπου εκσκαφής (πχ. προσομοίωση των δοκών προπορείας με την χρήση ενισχυμένης ζώνης), άλλοτε με επιτυχία και άλλοτε χωρίς.

Το κενό αυτό που υπάρχει στην μη δυνατότητα προσομοίωσης της συμπεριφοράς του μετώπου εκσκαφής σε διδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις, θα προσπαθήσει να προσεγγίσει η παρούσα διπλωματική εργασία μέσω εκτίμησης του ισοδύναμου βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στο μέτωπο εκσκαφής, ανάλογα την προκαλούμενη εξώθηση του μετώπου.

## 2. Σήραγγες και Υπόγεια Έργα

### 2.1. Ορισμός της Σήραγγας

Σήραγγα χαρακτηρίζεται γενικά ένας υπόγειος οριζόντιος αγωγός , που δημιουργείται με εκσκαφή ή, μερικές φορές, και με φυσική δράση αποσύνθεσης διαλυτής βραχομάζας , όπως π.χ., ο ασβεστόλιθος.

Οι κατακόρυφοι αγωγοί αποκαλούνται συνήθως φρέατα και αφορούν κυρίως στην μεταλλευτική βιομηχανία. Οι σήραγγες έχουν πολυάριθμες εφαρμογές: στην εξόρυξη μεταλλευμάτων, στις μεταφορές – συμπεριλαμβανομένων οδικών οχημάτων, σιδηροδρόμων, μετρό και πλωτών διωρύγων – και στη διοχέτευση νερών και λυμάτων. Υπόγειοι βραχοθάλαμοι, συνδυασμένοι συχνά με δίκτυο συνδετικών σηράγγων και φρεάτων, χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο για ποικιλία εφαρμογών, όπως υπόγειοι υδροηλεκτρικοί σταθμοί, εργοστάσια εμπλουτισμού μεταλλευμάτων, αντλιοστάσια, σταθμοί οχημάτων, δεξαμενές πετρελαίου και νερού, διωλιστήρια νερού, αποθήκες και ελαφρές βιομηχανίες. Επίσης, χρησιμοποιούνται για προστατευόμενα κέντρα διοίκησης και άλλες ειδικές στρατιωτικές ανάγκες.

### 2.2. Ιστορική Εξέλιξη των Σηράγγων

Περίπου το 700π.Χ. οι αρχαίοι Ιρανοί κατασκευάζουν, ένα από τα παλαιότερα και μεγαλύτερα στον κόσμο, υπόγειο δίκτυο στοών (qanats) για την υδροδότηση της πόλης Gonabad το οποίο έχει μήκος πάνω από 45 km ενώ το κύριο πηγάδι του βρίσκεται σε βάθος 360 μέτρων. Ακόμα και στις μέρες μας παρέχει πόσιμο και γεωργικό νερό για 40000 κατοίκους.

Οι Βαβυλώνιοι, ανάμεσα στο 2180π.Χ. και 2160π.Χ. κατασκευάζουν υπόγειο πέρασμα κάτω από τον Ευφράτη ποταμό με μήκος περίπου 900m επενδεδυμένο με τούβλα. Η κατασκευή του επιτεύχθηκε με την εκτροπή του ποταμού κατά την περίοδο ξηρασίας χρησιμοποιώντας την μέθοδο της εκσκαφής και επανεπίχωσης(cut and cover).

Στην Ελλάδα, το Ευπαλίνιο όρυγμα, όπως παρουσιάζεται στην **Εικόνα 2.1**, το οποίο είναι τμήμα του αρχαϊκού υδραγωγείου της Σάμου, κατασκευάστηκε υπό την καθοδήγηση του μηχανικού Ευπαλίνου τον 6<sup>ο</sup> αιώνα πΧ κοντά στο Πυθαγόρειο της Σάμου για την υδροδότηση της πόλης και έχει μήκος 1036m. Αποτελεί επίτευγμα τόσο από πλευράς μηχανικής αλλά και τοπογραφίας καθώς η εκσκαφή του ξεκίνησε από τα 2 άκρα της σήραγγας και οι δύο κλάδοι συναντήθηκαν στο μέσο. Ο Ευπαλίνος βασίστηκε σε τοπογραφικές οδεύσεις για να καθοδηγήσει την οριζοντιογραφία και την ευθυγράμμιση της σήραγγας.



*Εικόνα 2. 1, Ευπαλίνειο όρυγμα (Πηγή: [naftemporiki.gr](http://naftemporiki.gr))*

Οι Ρωμαίοι επίσης πέτυχαν μεγάλα επιτεύγματα στη σηραγγοποιία. Στο δεύτερο μισό του 1<sup>ου</sup> αιώνα πΧ, στα πλαίσια της βελτίωσης της οδικής διασύνδεσης μεταξύ Ποτσουόλης και Νάπολης, κατασκεύασαν τρεις εντυπωσιακές σήραγγες μήκους 700m, 800m και 1000m, πλάτους που κυμαινόταν από 4m έως 6.5m και ύψους 4.5m έως 8m., ενώ ο αερισμός γινόταν με φρεάτια. Επίσης μεγάλο έργο των Ρωμαίων είναι η σήραγγα που έγινε με σκοπό την αποστράγγιση της λίμνης Fucinus, μήκους 5500m, πλάτους 2.5m και ύψους 5m και για την οποία εργάστηκαν 30000 άτομα. Ορύχθηκε μεταξύ 41-51μΧ από φρεάτια εργασίας ανά 35m, και επενδύθηκε με λαξευτή πέτρα όπου το έδαφος ήταν ασταθές.

Μετά την πτώση της Ρωμαϊκής αυτοκρατορίας, κατά τη διάρκεια του Μεσαίωνα, η κατασκευή σηράγγων περιορίστηκε για μεταλλευτικούς και στρατιωτικούς σκοπούς. Η όρυξη σηράγγων ανθίζει ξανά γύρω στον 17<sup>ο</sup> αιώνα για να καλύψει τις αυξανόμενες, για μεταφορές, ανάγκες στην Ευρώπη. Έκτοτε άρχισαν να γίνονται μεγάλα άλματα στη μηχανική των σηράγγων τόσο από πλευράς εφεύρεσης και χρήσης νέων μέσων για τη διάνοιξη (εκρηκτικά, αερόσφυρες) αλλά και για την κατανόηση της συμπεριφοράς του εδάφους (Coulomb 1776).

Στο τέλος του 17<sup>ου</sup> αιώνα κατασκευάζεται η σήραγγα Malpas όπου γίνεται πρώτη φορά χρήση δυναμίτη για την ανατίναξη του βράχου και αποτελεί και το πρώτο πλευστό τούνελ. Η ανάπτυξη των σιδηροδρόμων οδήγησε στην κατασκευή περισσότερων σηράγγων καθώς έπρεπε να ικανοποιηθούν οι περιορισμοί που έμπαιναν κατά τη χάραξη (ελαχιστοποίηση των κλίσεων, αποστάσεων κλπ). Η πρώτη



σιδηροδρομική σήραγγα κατασκευάστηκε το 1826 στη Γαλλία (Σοφιανός 2017), ενώ στην Αγγλία λίγο αργότερα(1836-1851)κατασκευάστηκε η πρώτη σήραγγα κάτω από ποτάμι με χρήση ασπίδας για πρώτη φορά, για την σταθεροποίηση των χαλαρών εδαφικών σχηματισμών κάτω από τον Τάμεση, από τον Γάλλο μηχανικό Marc Isambard Brunel. Παρ' όλες τις δυσκολίες κατά την κατασκευή από εισροή υδάτων ολοκληρώθηκε μετά από 15 χρόνια και παραμένει ακόμα λειτουργική έχοντας ενταχθεί στο δίκτυο του Μετρό του Λονδίνου.

Σταθμό στη διάνοιξη των σηράγγων αποτέλεσαν και οι σήραγγες βάσης των Άλπεων. Πρώτη σήραγγα που ορύχθηκε ήταν του Frejus, με μήκος 13.7km όπου για πρώτη φορά χρησιμοποιήθηκε αεροσυμπιεστής και αερόσφυρα(1857-1871). Στη συνέχεια διανοίχθηκαν η σήραγγα του Gotthard στην Ελβετία το 1872 με μήκος 15km και υπερκείμενα 1800m, η σήραγγα του Arlberg το 1880, μήκους 10.3km, όπου για πρώτη φορά γίνεται χρήση ηλώσεων για τη στήριξη των πετρωμάτων. Μεγάλη πρόκληση αποτέλεσε η διάνοιξη της σήραγγας του Simplon με μήκος 19.8km και μέγιστο βάθος υπερκειμένων 2150m. Οι εξαιρετικά μεγάλες πιέσεις λόγω του μεγάλου βάθους οδήγησαν σε συμπεριφορά του πετρώματος εκρηκτική και συνθλίβουσα (rock bursts), που αντιμετωπίστηκαν με την τοποθέτηση χαλύβδινων πλαισίων (Σοφιανός 2017).

### **2.3. Είδη Σηράγγων**

Σήμερα κατασκευάζονται σήραγγες για:

#### **1. Οδικά και Σιδηροδρομικά συγκοινωνιακά δίκτυα**

- για διάβαση ορεινών όγκων (σιδηροδρομική σήραγγα Καλλιδρόμου, σήραγγες Κακιάς Σκάλας)
- για παράκαμψη δυσμενών γεωλογικών συνθηκών, όπως κατολισθήσεων ή ρηξιγενών ζωνών (π.χ. οδική σήραγγα Ανηλίου)
- για περιβαλλοντικούς λόγους (π.χ. οδική σήραγγα παράκαμψης του αρχαιολογικού χώρου Δωδώνης)

#### **2. Αστικά συστήματα μαζικής μεταφοράς (Μετρό)**

#### **3. Υδραυλικά έργα**

- υδραγωγεία (σήραγγες Μόρνου, Ευήνου, εκτροπής Αχελώου)
- έργα ταμείωσης (σήραγγες εκτροπής και υπερχείλισης φραγμάτων)

- αποχετεύσεις και αποστραγγίσεις (σήραγγα Κάρλας στη Θεσσαλία, σήραγγα Καρδίτσας στον Βοιωτικό Κηφισό)

4. Έργα αποστράγγισης για τη βελτίωση των συνθηκών ευστάθειας πρανών (π.χ. σήραγγες Μαλακάσας, Παναγοπούλας)

### 3. Μέθοδοι Διάνοιξης Σηράγγων

Η διάνοιξη σηράγγων στις μέρες μας, μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορες μεθόδους (πλήρως αυτοματοποιημένες ή μη), ανάλογα πάντοτε με τις απαιτήσεις του έργου αλλά και τον προϋπολογισμό του έργου. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου διάνοιξης σηράγγων, είναι συνδυασμός πολλών παραμέτρων, με τις βασικότερες να είναι:

- ✓ Η γεωμετρία της εκσκαφής.
- ✓ Το γεωλογικό και γεωτεχνικό προφίλ της περιοχής του έργου.
- ✓ Το ύψος των υπερκείμενων γαιών.
- ✓ Οι περιορισμοί για επιφανειακή όχληση.

Οι πιο συνηθισμένες μέθοδοι διάνοιξης σηράγγων που εφαρμόζονται στις μέρες μας, είναι:

- ✓ **Σήραγγες με εκσκαφή και επανεπίχωση (cut & cover)**
- ✓ **Συμβατική διάνοιξη σηράγγων:**
  - Μέθοδος N.A.T.M.
  - Μέθοδος ADECO – RS
  - Μέθοδος SCL
- ✓ **Μηχανοποιημένη διάνοιξη σηράγγων (TBM)**

Σε περιπτώσεις αστικού ιστού και σε μικρά βάθη προτιμάται η μέθοδος της εκσκαφής και επανεπίχωσης ή για μεγάλο μήκος έργου η μηχανοποιημένη μέθοδος διάνοιξης σηράγγων. Σε αντίθεση η συμβατικές μέθοδοι διάνοιξης σηράγγων, βρίσκουν μεγαλύτερη εφαρμογή σε σήραγγες με μεγάλα υπερκείμενα.

Στην παρούσα εργασία θα γίνει περιγραφή της μεθόδου NATM και της μηχανοποιημένης μεθόδου διάνοιξης σηράγγων, διότι αυτές οι δύο μέθοδοι έχουν ευρεία εφαρμογή σήμερα στην κατασκευή υπογείων έργων.

#### 3.1. Μέθοδος NATM

##### 3.1.1. Το χρονικό ανάπτυξης της τεχνικής

Η Νέα Αυστριακή Μέθοδος Διάνοιξης Σηράγγων - NATM (New Austrian Tunneling Method), αποτελεί ένα συνδυασμό της συμβατικής διάνοιξης σηράγγων και την εφαρμογή των συμβατικών μέτρων άμεσης υποστήριξης. Η μέθοδος περιλαμβάνει ένα σύνολο τεχνικών διάνοιξης και υποστήριξης σηράγγων με εκτεθειμένο μέτωπο και υποστήριξη του τοιχώματος με εκτοξευμένο σκυρόδεμα ή και αγκύρια βράχου,

οι οποίες εφαρμόστηκαν συστηματικά κατά τη διάνοιξη των σηράγγων στις Αυστριακές Άλπεις στις αρχές τις δεκαετίας του 1960.

Ο όρος NATM επινοήθηκε από τον L.v. Rabcewicz το 1962. Την αποκάλεσε "νέα" για να ορίσει την εν λόγω μέθοδο ως μια διαφορετική προσέγγιση κατασκευής σηράγγων από την έως τότε γνωστή μέθοδο και την ονόμασε "Αυστριακή" για να υπογραμμίσει το γεγονός ότι οι Αυστριακοί μηχανικοί διαδραμάτισαν αποφασιστικό ρόλο στην ανάπτυξή της. Ο Rabcewicz συνόψισε την κεντρική ιδέα της NATM ως την ανάγκη κατανόησης ότι το έδαφος είναι το πραγματικά φέρον στοιχείο ενώ η γραμμή υποστήριξης προσδίδει ενίσχυση στην επιφάνεια της βραχομάζας. Η διατήρηση και η ενίσχυση της φέρουσας ικανότητας του εδάφους με τον βέλτιστο δυνατό τρόπο είναι ο κύριος στόχος στη σύγχρονη σηραγοποιία. Η χρήση της NATM ενισχύει την ικανότητα αυτουποστήριξης του βράχου ή του εδάφους κινητοποιώντας την αντοχή της περιβάλλουσας γεωμάζας.

Σε περαιτέρω ανάλυση, η NATM δεν είναι μέθοδος, δεν είναι νέα, και δεν είναι αποκλειστικά Αυστριακή. Ο πρώτος της όρος υιοθετήθηκε μόνο και μόνο για να διαχωρίσει τη νέα φιλοσοφία κατασκευής σηράγγων από την παλαιά μέθοδο που χρησιμοποιούσε σπονδυλωτές πλαισιακές κατασκευές και ξύλινη επένδυση. Συχνά χρησιμοποιούμενα στοιχεία της NATM, όπως αγκύρια, προϋπήρχαν, το δε εκτοξευμένο σκυρόδεμα χρησιμοποιήθηκε στην Αυστρία (Runserau) επιτυχώς το 1955. Έτσι, αν και η "Μέθοδος NATM" όταν προτάθηκε δεν ήταν ούτε "Νέα" ούτε "Αυστριακή" (αφού είχε εφαρμοσθεί και στο παρελθόν σε άλλες χώρες) αλλά ούτε και "Μέθοδος" (αφού ουσιαστικά αποτελείται από ένα σύνολο τεχνικών οι οποίες μάλιστα αλλάζουν με την πρόοδο της τεχνολογίας), διατήρησε διεθνώς μέχρι σήμερα το όνομά της.

Αν και δεν υπάρχει γενικώς αποδεκτός ορισμός της "Μεθόδου NATM", ο όρος συνήθως χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη διάνοιξη σηράγγων με εκτεθειμένο το μέτωπο εκσκαφής (δηλαδή χωρίς την εφαρμογή πίεσης με μηχανικά μέσα) και υποστήριξη του τοιχώματος της σήραγγας με εκτοξευμένο σκυρόδεμα (απλό ή οπλισμένο) ή/και αγκύρια βράχου.

Συχνά η NATM αποκαλείται και μέθοδος εκτοξευμένου σκυροδέματος, λόγω της χρήσης αυτής της τεχνολογίας στην αποτροπή της αποσυμπίεσης και της διάβρωσης και αποσάθρωσης της βραχομάζας, χωρίς να αποκλείεται και η χρήση άλλων μέτρων υποστήριξης. Η τεχνολογία του εκτοξευμένου σκυροδέματος εφευρέθηκε από τον C.A. Akeley στο Σικάγο το 1907 και εισήχθη το 1955 στην σηραγοποιία από τον Αυστριακό μηχανικό A. Brunner, αφού προηγουμένως (1848) είχε αποτολμηθεί στην περιοχή της Πράγας η χρήση ενός πρωτόλειου κονιάματος με ταχεία απόκτηση της αντοχής του.

Το εκτοξευμένο σκυρόδεμα είναι ένα ξηρό, υγρό ή ύφυγρο κονίαμα άμμου/τσιμέντου, με αδρανή

συνήθως 10mm και μέχρι 25mm, σε άμεση επαφή με την γεώμαζα και παραμορφούμενο με αυτήν, είναι δε γνωστό παγκοσμίως ως gunite, καθώς διοχετεύεται με πεπιεσμένο αέρα και εφαρμόζεται συνήθως σε μικρού πάχους στρώσεις έχοντας μεν τις ιδιότητες του σκυροδέματος, αποκτώντας όμως ταχύτατα την αντοχή του (50% μέσα σε 12 το πολύ ώρες). Εν τω μεταξύ η τεχνολογία των ηλώσεων ανεπτύχθη ραγδαία, ώστε να αποτελέσει ένα εύκαμπτο μέσο υποστήριξης που συνεπάγεται πλευρική παρεμπόδιση στην κατακλυσμένη βραχώμαζα.

Η NATM είναι επί της ουσίας μια τεχνική αντιμετώπισης των προβλημάτων που ανακύπτουν κατά την υποστήριξη υπογείων ανοιγμάτων σε σκληρό βράχο έως μαλακό έδαφος, όπου η ανάλυση έχει ρόλο βοηθητικό-επιβεβαιωτικό. Η συνεχής προσαρμογή στις μεταβαλλόμενες γεωλογικές συνθήκες υποβοηθείται από εκτεταμένες οργανομετρήσεις, εξ' ου και η NATM συχνά αναφέρεται ως παρατηρητική μέθοδος (observational method κατά τον Peck). Οι οργανομετρήσεις αναφέρονται στη σύγκλιση των παρειών, την καθίζηση της οροφής και άλλες μετρήσεις παραμορφώσεων, δυνάμεων και τάσεων, η κυριότερη από τις οποίες είναι η αναπτυσσόμενη τάση στο κέλυφος του εκτοξευμένου σκυροδέματος προκειμένου να ανιχνευθεί μια επερχόμενη αστοχία. Ο Sauer (1988) υποδεικνύει ότι η αυξημένη συχνότητα των μετρήσεων έχει περισσότερη αξία από την υψηλότερη ακρίβεια των οργάνων.

### **3.1.2. Η φιλοσοφία της τεχνικής-αρχές**

Η NATM θεωρεί ότι κάθε διατομή αποτελείται από ένα δακτύλιο βραχώμαζας (το τμήμα εκείνο της βραχώμαζας που επηρεάζεται από την κατασκευή) και από τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης. Θεωρεί δηλαδή το δακτύλιο της βραχώμαζας όχι μόνο ως στοιχείο φόρτισης, αλλά και ως φέρον στοιχείο συγχρόνως. Επιχειρεί δηλαδή την ενεργοποίηση ενός ποσοστού της αντοχής της βραχώμαζας, μέσω της ελεγχόμενης σύγκλισης του τοιχώματος της σήραγγας, έτσι ώστε να επιτύχει τον βέλτιστο σχεδιασμό του έργου, όσον αφορά στην ασφάλεια και την οικονομικότητα.

Οι βασικές αρχές που συνιστούν την NATM, είναι οι ακόλουθες:

- Διατήρηση της αντοχής του εδάφους ή του βράχου που περιβάλλει την διατομή της σήραγγας και κινητοποίηση της αντοχής στον μέγιστο δυνατό βαθμό.
- Η κινητοποίηση της αντοχής μπορεί να επιταχθεί με την ελεγχόμενη παραμόρφωση του εδάφους. Θα πρέπει να αποφεύγονται υπερβολικές παραμορφώσεις που μπορεί να οδηγήσουν σε απώλεια αντοχής ή μεγάλες επιφανειακές καθιζήσεις.
- Τα αρχικά (προσωρινά) μέτρα υποστήριξης περιλαμβάνουν συστηματικές ηλώσεις/αγκυρώσεις

βράχου και τόξου υποστήριξης από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα σε στρώσεις λεπτού πάχους. Αυτή η “προσωρινή υποστήριξη” είναι η “επένδυση” που δρα ως κέλυφος και αναλαμβάνει ήδη φορτία. Οι εργασίες μόνιμης υποστήριξης (τελικής επένδυσης) διεξάγονται σε μεταγενέστερο στάδιο και κατασκευάζονται με σπλισμούς και σκυρόδεμα επί τόπου εγχεόμενο που ενισχύει την κατασκευή και αναλαμβάνει τα τελικά φορτία.

- Το κλείσιμο του δακτυλίου θα πρέπει να πραγματοποιείται σε κατάλληλο χρονικό διάστημα που ποικίλει ανάλογα τις συνθήκες εδάφους ή του βράχου.
- Απαραίτητες είναι οι εργαστηριακές δοκιμές και η γεωτεχνική παρακολούθηση (οργανομετρήσεις) της παραμόρφωσης των μέτρων υποστήριξης και του εδάφους.
- Οι εμπλεκόμενοι στον σχεδιασμό, εφαρμογή και επίβλεψη της κατασκευής με NATM πρέπει να έχουν κατανοήσει την μέθοδο αυτή και να συνεργάζονται για την επίλυση των προβλημάτων που ανακύπτουν.
- Το μήκος του ανυποστήρικτου ανοίγματος θα πρέπει να είναι μικρότερο δυνατό.
- Η σήραγγα διανοίγεται κατά τρόπο ώστε να ενεργοποιηθεί στο μέγιστο βαθμό η αντοχή της περιβάλλουσας βραχώμαζας (μέσω της ελεγχόμενης σύγκλισης του τοιχώματος). Έτσι μειώνονται οι πιέσεις της βραχώμαζας στην άμεση υποστήριξη (τόσο περισσότερο όσο αυξάνει η σύγκλιση του τοιχώματος). Εάν η σύγκλιση αυξηθεί όμως υπέρμετρα, μπορεί να προκληθεί αποδιοργάνωση της βραχώμαζας και αύξηση των πιέσεων.

Η εφαρμογή της μεθόδου, έχει άμεση επιρροή στην εξέλιξη των συγκλίσεων περιμετρικά της εκσκαφής. Συγκεκριμένα:

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

### **3.1.3. Η εφαρμογή της τεχνικής**

Η συνήθης εφαρμογή της NATM είναι η διάνοιξη της σήραγγας σε μία ή περισσότερες φάσεις και η άμεση υποστήριξη του τοιχώματος με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (απλό, ινοπλισμένο, σπλισμένο με χαλύβδινο πλέγμα ή ενισχυμένο με χαλύβδινες νευρώσεις από ράβδους ή διατομές I) και αγκύρια (παθητικά ή προεντεταμένα). Η ως άνω άμεση υποστήριξη συνήθως ακολουθείται σε μεταγενέστερο χρόνο από την κατασκευή της “τελικής επένδυσης” της σήραγγας η οποία θεωρείται ως φέρον στοιχείο

(σε ορισμένες περιπτώσεις δεν κατασκευάζεται τελική επένδυση αλλά η άμεση υποστήριξη σχεδιάζεται ώστε να αναλάβει το σύνολο των φορτίων της περιβάλλουσας βραχώμαζας).

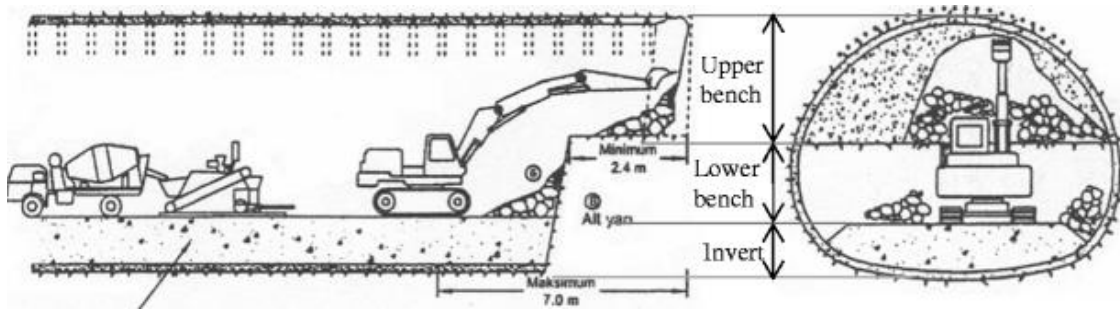
Σημειώνεται ότι η υποστήριξη του τοιχώματος της σήραγγας μόνον με αγκύρια χωρίς εκτοξευμένο σκυρόδεμα υπάγεται επίσης στην κατηγορία της μεθόδου NATM. Μάλιστα, σύμφωνα με τον Muirghy (1994), ένα συγκεκριμένο έργο σήραγγας δεν χρειάζεται να εμπεριέχει κάθε στοιχείο που προτείνει η NATM ούτε και είναι δυνατόν προκειμένου να κατηγοριοποιείται ετυμολογικά ως έργο NATM.

Κατ' επέκταση, οι προδιαγραφές σχεδιασμού που περιλαμβάνονται σε μια σύμβαση NATM δεν θα πρέπει να εκληφθούν παρά ως οδηγός, ή έστω ως ένα σύνολο των πλέον κατάλληλων και πιθανών συνθηκών, από τις οποίες ο μηχανισμός επί τόπου του έργου θα επιλέξει την αρμόζουσα για να αντιμετωπίσει τα εκάστοτε προκύπτοντα προβλήματα.

Στην φάση της εκσκαφής, σκοπός της άμεσης υποστήριξης είναι η ευστάθεια του μετώπου και του δακτυλίου της σήραγγας μέχρι την εφαρμογή των μέτρων της τελικής επένδυσης. Τα φαινόμενα αστάθειας του μετώπου παρουσιάζονται σε βραχώμαζες με πολύ φτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά και σε βραχώμαζες με ασυνεχείς, οι οποίες έχουν δυσμενή προσανατολισμό ως προς το μέτωπο και τα τοιχώματα της σήραγγας και πολύ χαμηλές τιμές των μηχανικών παραμέτρων αντοχής τους. Τέτοια φαινόμενα είναι πιθανόν να προκαλέσουν αύξηση των συγκλίσεων ή αστοχία του μετώπου. Τα φαινόμενα αστάθειας του δακτυλίου είναι η εκδήλωση υπερβολικά μεγάλων συγκλίσεων, η αστοχία με μορφή σφηνών και η ολοκληρωτική αστοχία της περιβάλλουσας βραχώμαζας. Για την αντιμετώπιση των φαινομένων αυτών στην συμβατική μέθοδο χρησιμοποιούνται κατά περίπτωση διάφοροι τρόποι εκσκαφής της διατομής :

- **Εκσκαφή της διατομής σε φάσεις**

Η εκσκαφή της διατομής γίνεται σε δύο ή περισσότερες φάσεις (**Σχήμα 3.1**) ώστε να εξασφαλιστεί η ελάχιστη δυνατή αποδιοργάνωση της βραχώμαζας, ο περιορισμός των συγκλίσεων, η βελτίωση της ευστάθειας του μετώπου και η χρήση των λιγότερων δυνατών μέτρων προσωρινής υποστήριξης. Η τμηματική εκσκαφή αποσκοπεί στην σταδιακή ανακατανομή του τασικού πεδίου μέχρι την τελική ισορροπία, αποφεύγοντας προς τούτο απότομες διαφοροποιήσεις της γεωμετρίας κατά μήκος της περιμέτρου της σήραγγας. Τα βήματα εκσκαφής κατά άξονα της σήραγγας είναι μικρά, ενώ γίνεται χρήση ελεγχόμενων ανατινάξεων, μηχανών PFM's ή κοινών εκσκαπτικών μέσων, αναλόγως των παρουσιαζόμενων συνθηκών εκσκαψιμότητας.



Σχήμα 3. 1, Τμηματική εκσκαφή σήραγγας (Πηγή: Ocak et al., 2015).

- **Κατασκευή της άμεσης υποστήριξης σε μικρή απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής.**

Η άμεση υποστήριξη αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της συνολικής στρατηγικής υποστήριξης (εκπροσωπεί μερικώς έως πλήρως την ολική απαιτούμενη υποστήριξη). Επιτυγχάνεται με την προώθηση της κάθε φάσης εκσκαφής σε μικρά βήματα της τάξης 1-2 m ανάλογα με την ποιότητα της βραχώμαζας. Σκοπός της διαδικασίας αυτής είναι η ελάχιστη δυνατή αποδιοργάνωση της βραχώμαζας και ο περιορισμός των συγκλίσεων σε τέτοιο βαθμό ώστε η βραχώμαζα να αυτουποστηριχθεί για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.

- **Ολοκλήρωση του δακτυλίου του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στο σύνολο της διατομής.**

Σε περιπτώσεις βραχώμαζας με φτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά δημιουργείται κλειστός δακτύλιος (Εικόνα 3.1) με τη διαμόρφωση στο δάπεδο ανάστροφου τόξου και τη σκυροδέτησή του.





*Εικόνα 3 1. Κατασκευή τελικού ανάστροφου τόξου (final invert) (Πηγή: Geodata).*

- **Γεωτεχνική παρακολούθηση της συμπεριφοράς των σηράγγων.**

Η παρακολούθηση της σήραγγας με συστήματα μετρήσεων παρέχει τη δυνατότητα προσδιορισμού της διαδικασίας ανακατανομής των τάσεων. Η σήραγγα είναι ένα έργο ζωντανό, που συνεχώς παρέχει νέα στοιχεία κατά την κατασκευή του, τα οποία είναι πιθανόν να οδηγήσουν σε αναθεώρηση της αρχικής μελέτης, όσον αφορά στα μέτρα προσωρινής υποστήριξης (ανάστροφες αναλύσεις). Η πιο συνήθης μέθοδος γεωτεχνικής παρακολούθησης της σήραγγας, είναι η χρήση τοπογραφικών στόχων όπως παρουσιάζονται στην **Εικόνα 3.2** ή μηκυνισομέτρων.



*Εικόνα 3 2. Τοπογραφική παρακολούθηση των συγκλίσεων της σήραγγας (Πηγή: Geodata).*

#### **3.1.4. Πλεονεκτήματα της μεθόδου NATM**

##### Η μέθοδος N.A.T.M:

- Χαρακτηρίζεται από μεγάλη ευελιξία στην φάση κατασκευής, ευελιξία που αναφέρεται στην προσαρμογή των μέσων υποστήριξης στις εκάστοτε παρουσιαζόμενες γεωτεχνικές συνθήκες στο μέτωπο εκσκαφής.
- Περιλαμβάνει μηχανικό εξοπλισμό σχετικώς μικρού κόστους και συνεπώς πλεονεκτεί οικονομικά σε σήραγγες μικρού μήκους.
- Με κριτήριο τον χρόνο κατασκευής και το κατασκευαστικό κόστος προκύπτει διαφοροποίηση μεταξύ σηράγγων μικρού μήκους και μεγάλου μήκους. Η τεχνική NATM δείχνει να είναι προσφορότερη σε σήραγγες μικρού μήκους, λ.χ. μερικών δεκάδων μέτρων.
- Η μέθοδος NATM ευνοείται σε σήραγγες με διαφοροποιούμενη διατομή , λ.χ. τοπικές διαπλατύνσεις σε ζώνες προσωρινής στάθμευσης , διασταυρώσεις σηράγγων, εσοχές αναστροφής οχημάτων, κ.ά. Η τεχνική της NATM επιτρέπει διαμόρφωση της διατομής της σήραγγας και της μορφολογίας της διατομής κατά το δοκούν.
- Επιτρέπει ευκολότερη στεγάνωση της σήραγγας με συνθετική μεμβράνη (η οποία συνήθως τοποθετείται μεταξύ της άμεσης και της τελικής επένδυσης).
- Δεν απαιτεί μεγάλη οικονομική επένδυση.

### 3.1.5. Μειονεκτήματα της μεθόδου NATM

- Ο σημαντικότερος κίνδυνος κατά την εφαρμογή της NATM παρουσιάζεται στο μέτωπο εκσκαφής ο οποίος κατανέμει τις τάσεις επί το ευμενέστερων. Οι οργανομετρήσεις δεν εξασφαλίζουν την ευστάθεια του μετώπου, ενώ η ασφάλεια της ολοκληρωμένης προσωρινής υποστήριξης συναρτάται σε μεγάλο βαθμό με την ερμηνεία των μετρήσεων.
- Ο κίνδυνος αστοχιών είναι σημαντικά μεγάλος στις τεχνικές NATM.
- Η εφαρμογή της NATM σε σκληρά πετρώματα ( με χρήση εκρηκτικών) συνεπάγεται προχώρηση της τάξεως των 8 έως 15 m/ημέρα (σε δύο βάρδιες), ενώ σε μαλακά πετρώματα η αντίστοιχη προχώρηση είναι 2 έως 3 m με μηχανικό εκσκαφέα, και 4 έως 5 m με RoadHeaders. Άρα η προχώρηση είναι μικρή σε σχέση με άλλες μεθόδους.
- Στην NATM η ασφάλεια των εργαζομένων είναι χαμηλότερη.
- Η NATM έχει υψηλό κόστος προσωπικού.

## 3.2. Μηχανοποιημένη διάνοιξη σηράγγων –TBM

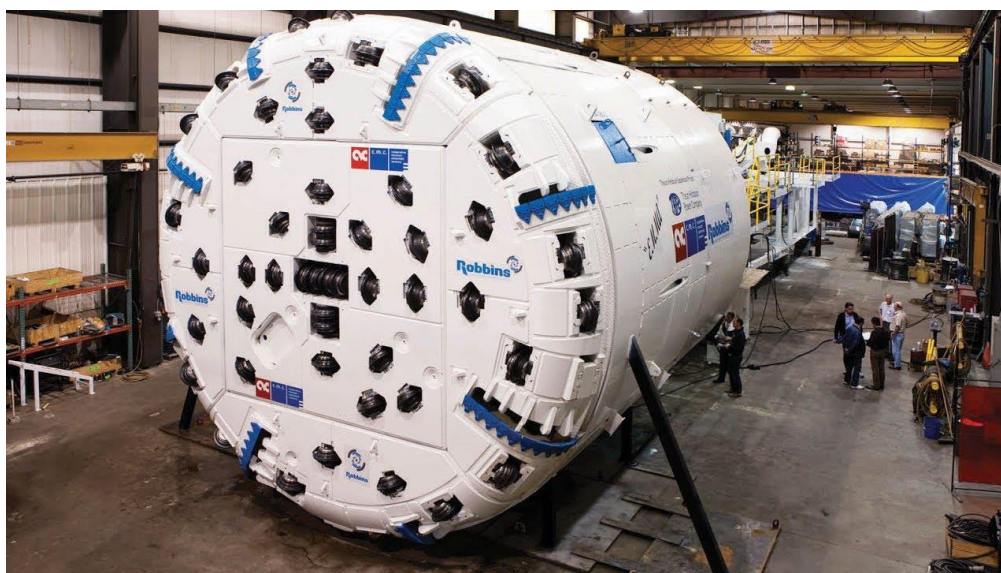
### 3.2.1. Περιγραφή της μεθόδου

Η ανάγκη για εκμηχανισμένη κατασκευή μια μεγάλης μήκους σήραγγας και για αποφυγή δονήσεων και αλληλεπίδρασης με τις κατασκευές στην περίπτωση αστικών σηράγγων, αποτελούν βασικό παράγοντα για διάνοιξη της σήραγγας με μια μηχανή ολομέτωπης διάτρησης (Tunnel Boring Machine - TBM).

Τα TBM είναι επιμήκη μηχανήματα, κυκλικής διατομής κατά κανόνα (κάτι που περιορίζει τη γεωμετρία της διατομής που μπορούν να διανοίξουν) που φέρουν κοπτικά στην κεφαλή τους, έχουν προσαρτημένο σύστημα ταινιοδρόμου με το οποίο μεταφέρουν πίσω το εκσκαπτόμενο υλικό, ενώ ενδέχεται τα τελευταία 10~12m να είναι προστατευμένα από χαλύβδινη ασπίδα. Επίσης έχουν τεράστιο αρχικό κόστος. Ωστόσο, έχουν μεγάλους ρυθμούς προχώρησης, γεγονός που τα καθιστά πιο συμφέροντα από οικονομική άποψη σε μεγάλοι μήκους σήραγγες όπου μπορούν να αποσβέσουν το κόστος τους. Ανάλογα το υλικό που εκσκάβουν, προσαρμόζονται τόσο τα κοπτικά της κεφαλής τους όσο και το αν θα ασκείται πίεση στο μέτωπο ταυτόχρονα με την εκσκαφή ή όχι

Το μπροστινό μέρος του TBM είναι μία περιστρεφόμενη κοπτική κεφαλή (**Εικόνα 3.3**) διαμέτρου από 3 έως 15 m, που ταιριάζει στη διάμετρο της σήραγγας. Στην κοπτική κεφαλή είναι στερεωμένοι κοπτικοί δίσκοι, διαμέτρου από 11'' έως 20'', οι οποίοι επιτυγχάνουν τη βέλτιστη διατήρηση του πετρώματος.

Καθώς περιστρέφεται η κοπτική κεφαλή, υδραυλικά έμβολα ωθούν, μέσω της κεφαλής, τα κοπτικά στο πέτρωμα. Η μεταφορά αυτής της υψηλής ώσης μέσω των κυλιόμενων δίσκων δημιουργεί ρηγματώσεις στο βράχο προκαλώντας αποκόλληση θραυσμάτων από το μέτωπο της σήραγγας. Η στήριξη του μετώπου από καταπτώσεις, εφόσον απαιτείται, επιτυγχάνεται από την ίδια την κοπτική κεφαλή. Οι μηχανές αυτές περιβάλλονται από μικρή ασπίδα στο πρόσθιο τμήμα της μηχανής που προστατεύει το χώρο αυτό από καταπτώσεις του περιβάλλοντος πετρώματος. Η μηχανή πακτώνεται με ένα σύστημα ωστήρων (grippers) στα πλευρικά τοιχώματα, ενώ τα έμβολα ώσης εκτείνονται, επιτρέποντας στην κύρια δοκό την προώθηση του TBM. Στη περιστρεφόμενη κοπτική κεφαλή υπάρχουν κάδοι(buckets) οι οποίοι μαζεύουν και αποθέτουν τα μπάζα σε έναν ιμάντα μεταφοράς στο εσωτερικό της κύριας δοκού. Στη συνέχεια τα μπάζα μεταφέρονται στο πίσω μέρος της μηχανής για αποκόμιση από τη σήραγγα. Στο τέλος της διαδρομής ώσης η μηχανή επανατοποθετείται για τον επόμενο κύκλο διάτρησης. Ιδανική λύση για ανεπένδυτες σήραγγες είναι ο ανοικτός σχεδιασμός των TBM κύριας δοκού που επιτρέπει τη γρήγορη πρόσβαση ακριβώς πίσω από τη κεφαλή κοπής για την εγκατάσταση της υποστήριξης με ήλους, πλέγματα , χαλύβδινα τόξα κ.α. Πρόκειται για τυπικές μηχανές βράχου με κατάλληλο πεδίο εφαρμογής ποιότητες πετρώματος από πολύ καλό-ισχυρό έως μέτριο-ελαφρά διακλασμένο. Η επιλογή του κατάλληλου μηχανήματος βασίζεται στην ποιότητα του πετρώματος, αλλά και σε κριτήρια οικονομικά ή διαθεσιμότητας της μηχανής.



*Εικόνα 3 3. Κοπτική κεφαλή TBM (Πηγή: Robbins).*

Οι μηχανές ολομέτωπης κοπής αναπτύχθηκαν αρχικά για την εκσκαφή μαλακών σχηματισμών. Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας επεκτάθηκε η χρήση των μηχανών αυτών σε σκληρά πετρώματα, έτσι ώστε ο

χαρακτηρισμός του βράχου να απαιτεί αναθεώρηση. Η ανάπτυξη των μηχανών αυτών έχει σα συνέπεια στα μεγαλύτερα τεχνικά έργα διάνοιξης σηράγγων να επιλέγεται σαν πρώτη λύση η εκσκαφή με μία τέτοια μηχανή, εκτός εάν η σκληρότητα του πετρώματος ξεπερνά τις δυνατότητες των κοπτικών της μηχανής.

### **3.2.2. Παράγοντες οι οποίοι ευνοούν την επιλογή του TBM**

- Επαρκή γεωλογικά στοιχεία, διότι ένα TBM δεν έχει τη δυνατότητα να ανταποκρίνεται σε ποικιλία γεωλογικών συνθηκών.
- Γεωλογικά στοιχεία που δείχνουν σχετική ομοιομορφία της ποιότητας και της συμπεριφοράς του πετρώματος σε όλη τη διάνοιξη.
- Πέτρωμα όχι υπερβολικά σκληρό ή λειαντικό.
- Κυκλική διατομή της σήραγγας ή της στέψης. Μια μη κυκλική διατομή, όπως ένα πέταλο με κυκλική στέψη, συνήθως μπορεί να διανοιχτεί κυκλικό και στη συνέχεια να διερευνηθεί με μηχανική σφύρα ή με διάτρηση ανατίναξη.
- Διάνοιξη ενός μετώπου, εκτός αν το μέγεθος της σήραγγας εννοεί τη χρήση δεύτερου.
- Μακριές σήραγγες. Η διάνοιξη πρέπει να είναι μεγάλου μήκους, γενικά πάνω από 1000 m, ώστε να επιτρέπει τις μεγάλες αρχικές δαπάνες για την αγορά του TBM.

### **3.2.3. Παράγοντες που αποτρέπουν την επιλογή του TBM**

- Εκσκαφή μικτού μετώπου ή πιθανότητα αυτής.
- Πολύ σκληρό, λειαντικό ή διογκούμενο πέτρωμα.
- Μικρού μήκους σήραγγας.
- Μεταβλητή γεωμάζα η οποία απαιτεί συχνές αλλαγές στις μεθόδους διάνοιξης.
- Περιοχές με τεκτονικά ρήγματα. Σε αυτή τη περίπτωση ένα TBM μπορεί να παγιδευτεί από μετατόπιση του πετρώματος πίσω από το μέτωπο.
- Μικρός χρόνος ευστάθειας πετρώματος.

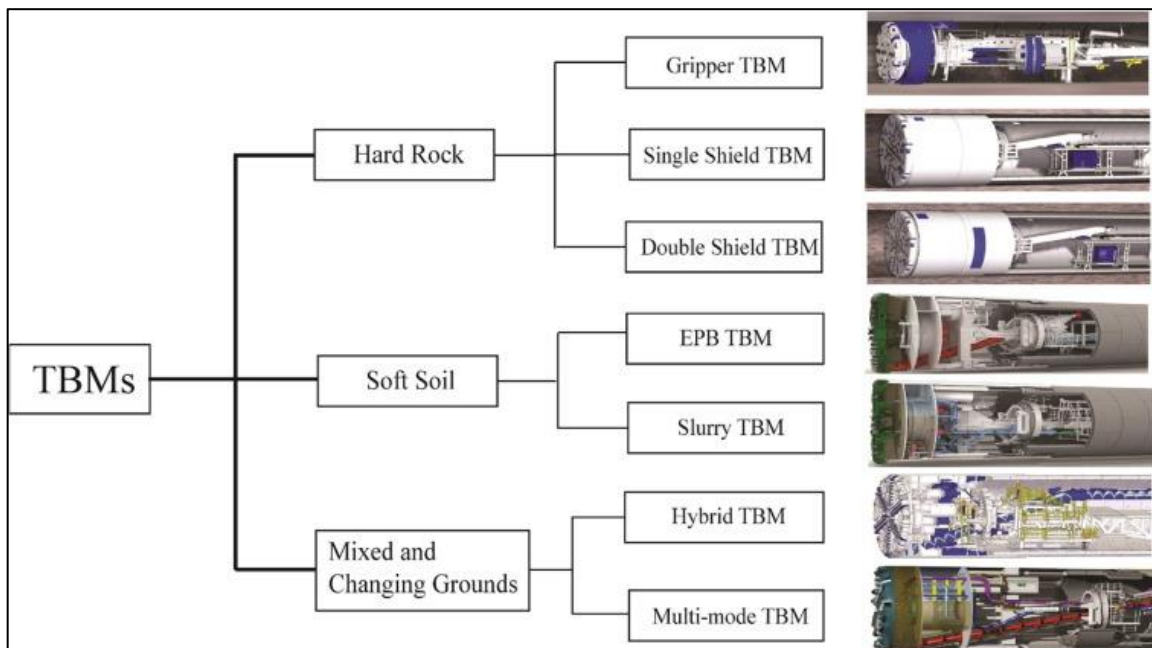
### **3.2.4. Επιλογή μεταξύ συμβατικής διάνοιξης NATM ή με TBM**

Κάθε έργο είναι διαφορετικό, για αυτό το λόγο απαιτείται σωστή κρίση, ζυγίζοντας έτσι όλους τους

παράγοντες όπου θα οδηγήσουν στην τελική απόφαση. Η επιλογή του τύπου της μηχανής γίνεται βάση αξιολόγησης των γεωλογικών, υδρογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών στη ζώνη διέλευσης της σήραγγας, των γεωμετρικών στοιχείων της διατομής της σήραγγας και της χάραξης, των περιορισμών και όρων που επιβάλλονται από περιβαλλοντικές ρυθμίσεις και άδειες, των συνθηκών ευστάθειας στο μέτωπο και στη διατομή της σήραγγας των απαιτήσεων χρονισμού τοποθέτησης των μέτρων άμεσης στήριξης και των χρονικών περιορισμών για την παράδοση της σήραγγας.

### 3.2.5. Γενικά χαρακτηριστικά του TBM

Τα Μηχανήματα Ολομέτωπης Διάνοιξης Σήραγγας (TBM) **Σχήμα 2.4** με ασπίδα ή χωρίς ασπίδα (TBM), απομακρύνουν το σκληρό έδαφος εκσκαφής με τη χρήση κοπτικών και προωθούν το μηχάνημα πιέζοντας τα προκατασκευασμένα στοιχεία ή υποστηρίζοντας τον ειδικό εξοπλισμό πλευρικών στοιχείων συγκράτησης του μηχανήματος.



Εικόνα 3.4. Επιλογή τύπου TBM, βάσει τύπου εδάφους (Πηγή: Y.L. Zheng et al.)

Γενικά, η χρήση μίας ολομέτωπης κοπής TBM απαιτεί το μήκος της σήραγγας όπου θα χρησιμοποιηθεί να είναι μεγάλο. Αυτό οφείλεται τόσο στο κόστος αγοράς ενός τέτοιου μηχανήματος, όσο και στο κόστος συναρμολόγησης και αποσυναρμολόγησης του. Επομένως για να δικαιολογηθεί η αγορά του πρέπει να αποσβέσει τα χρήματα που δαπανήθηκαν, δηλαδή να διανοίξει μεγάλου μήκους σήραγγες.

Τα Μηχανήματα Ολομέτωπης κοπής με Ασπίδα “ TBM-S” είναι εξοπλισμένα με σώμα κλειστής ασπίδας και χρησιμοποιούνται σε εδάφη με συμπαγή βράχο καθώς και σε εδάφη με χαμηλή ευστάθεια μετώπου εκσκαφής (εύθραυστος βράχος).

Για μικρούς χρόνους ευστάθειας μετώπου η μηχανή συνδυάζεται με ασπίδα. Η επιλογή του κατάλληλου τύπου μηχανής με ασπίδα εξαρτάται από τις γεωλογικές συνθήκες. Όταν το έδαφος στο οποίο πρόκειται να διανοιχθεί η σήραγγα είναι χαμηλής αντοχής αντιμετωπίζονται έντονα προβλήματα καθιζήσεων στην επιφάνεια του εδάφους πάνω και γύρω από τη στέψη της σήραγγας. Το πρόβλημα γίνεται εντονότερο όταν το πάχος των υπερκείμενων είναι μικρό. Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι δυνατό να δημιουργηθούν ζημιές στις υπερκείμενες κατασκευές (κτίρια, δρόμους κ.τ.λ.).

Σημαντικές λύσεις στα προβλήματα αυτού του τύπου ήρθαν να δώσουν τα μηχανήματα E.P.B (Earth Pressure Balance). Τα μηχανήματα αυτά πιέζουν το μέτωπο εκσκαφής χωρίς να το αφήνουν να χαλαρώσει, αποτρέποντας τη μετάδοση μιας πιθανής χαλάρωσης πάνω και γύρω από τη σήραγγα, γεγονός που αποτελεί συνήθως την αιτία των επιφανειακών καθιζήσεων.

Γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του εδάφους, όπως μικρή υδροπερατότητα , πλαστικά χαρακτηριστικά, μικρό υπερκείμενο και παρουσία κατασκευών στην επιφάνεια, απαιτούν την επιλογή μια μηχανής ολομέτωπης κοπής με ασπίδα.

### **3.2.6. Κατασκευή επένδυσης σήραγγας με TBM**

Η κατασκευή της τελικής επένδυσης της σήραγγας εξυπηρετεί και εξασφαλίζει την κατασκευαστική αρτιότητα, την ανθεκτικότητα και λειτουργικότητα στο εσωτερικό της σήραγγας. Σχεδιάζεται έτσι ώστε να λαμβάνει φορτία που αναπτύσσονται από το περιβάλλον έδαφος και τα υπόγεια ύδατα, τις τυχηματικές δράσεις (π.χ. εκρήξεις, φωτιά) και σεισμικά φορτία.

Τα προκατασκευασμένα στοιχεία είναι από σκυρόδεμα (segmentets) (**Εικόνα 3.5**), εγκαθίστανται και συνδέονται με κατάλληλο τρόπο για τη δημιουργία ενός κυκλικού δακτυλίου. Βασικό χαρακτηριστικό της τελικής επένδυσης αποτελεί ο μεγάλος αριθμός συνδέσμων μεταξύ των στοιχείων (ring joints). Τα σημεία σύνδεσης είναι κάθετα στα στοιχεία και κατά μήκος της σήραγγας ανάμεσα στα στοιχεία. Υπάρχουν πολλών ειδών σχήματα προκατασκευασμένων στοιχείων, παρόλα αυτά τα ορθογωνικά στοιχεία είναι τα συνήθη χρησιμοποιούμενα, με κάθε δακτύλιο υποστήριξης συνήθως να φτιάχνεται με πέντε έως οκτώ στοιχεία. Η επιλογή εγκατάστασης προκατασκευασμένων στοιχείων στην επένδυση παρουσιάζει τα εξής

πλεονεκτήματα:

- Εξασφαλίζουν υψηλή κατασκευαστική ποιότητα, καθώς υπάρχει η δυνατότητα βιομηχανικού ελέγχου.
- Με την τοποθέτηση τους έχουν ήδη αναπτύξει την τελική φέρουσα ικανότητά τους.
- Τυχόν διαρροές στα σημεία σύνδεσης μπορούν να εντοπιστούν και να επισκευαστούν άμεσα.
- Ο υπολογισμός των φορτίων που δρουν στους δακτυλίους περιλαμβάνει λιγότερο βαθμό αβεβαιότητας.

Γενικά, η φιλοσοφία στο σχεδιασμό των προκατασκευασμένων στοιχείων της τελικής επένδυσης δε διαφέρει σημαντικά από τον σχεδιασμό τελικής επένδυσης συμβατικής σήραγγας. Εξαιτίας της μηχανοποιημένης όρυξης, η τελική επένδυση πρέπει να είναι σε θέση να παραλάβει και το θλιπτικό φορτίο των υδραυλικών εμβόλων. Το ελάχιστο πάχος των προκατασκευασμένων στοιχείων προκειμένου να παραλάβουν τη δύναμη των υδραυλικών εμβόλων για την ώθηση του EPB κυμαίνεται μεταξύ των 20-50 cm.



Εικόνα 3 5. Επένδυση σήραγγας με προκατασκευασμένα στοιχεία - segments (Πηγή: AGJV).



## 4. Σχεδιασμός Σηράγγων

Ο σχεδιασμός των σηράγγων και γενικότερα των υπογείων έργων βασίζεται κατά κύριο λόγο σε εμπειρικές μεθόδους σχεδιασμού οι οποίες ενισχύονται με την αριθμητική προσομοίωση του προβλήματος, ώστε να γίνει λεπτομερέστερος και αναλυτικός σχεδιασμός τόσο της σήραγγας όσο και της διαστασιολόγησης των μέτρων υποστήριξης.

Οι εμπειρικές μέθοδοι σχεδιασμού, βασίζονται κυρίως σε περιγραφή και ταξινόμηση της περιβάλλουσας βραχώμαζας εκσκαφής και στην συνέχεια χρήση της προαναφερθείσας ταξινόμησης για εκτίμηση των μηχανικών παραμέτρων της βραχώμαζας και αξιοποίησής τους σε κάποιο κριτήριο αστοχίας.

Η χρήση των εμπειρικών μεθόδων ταξινόμησης της βραχώμαζας και προσδιορισμού του κατάλληλου τρόπου διάνοιξης και υποστήριξης της σήραγγας, έχει εφαρμοστεί για πολλές δεκαετίες σε διάφορα υπόγεια έργα παγκοσμίως. Παράλληλα σε πολλές περιπτώσεις έγινε αναθεώρηση της προτεινομένης μεθόδου υποστήριξης των υπόγειων ανοιγμάτων, μετά από εφαρμογή της προτεινομένης μεθοδολογίας υποστήριξης και καταγραφή της συμπεριφοράς της σε πραγματικές συνθήκες.

Τις τελευταίες δεκαετίες οι εμπειρικές μέθοδοι σχεδιασμού σηράγγων ενισχύθηκαν με την χρήση των αριθμητικών μεθόδων ανάλυσης υπογείων έργων, όπου επιτρέπουν τον αναλυτικό προσδιορισμό της συμπεριφοράς της περιβάλλουσας βραχώμαζας κατά την εκσκαφή της σήραγγας καθώς και την απόκριση των μέτρων υποστήριξης.

Στην συνέχεια θα παρατεθούν οι βασικότερες εμπειρικές και αναλυτικές μέθοδοι σχεδιασμού σηράγγων που εφαρμόζονται σήμερα, τόσο στην Ελλάδα όσο και παγκοσμίως.

### 4.1. Εμπειρικές Μέθοδοι Σχεδιασμού

#### 4.1.1. Σύστημα Ταξινόμησης RMR

Το σύστημα ταξινόμησης RMR (Rock Mass Rating system) πρωτοεισήχθη από - Bieniawski το 1976 και πήρε την τελική του μορφή που εφαρμόζεται έως και σήμερα το 1989. Το σύστημα ταξινόμησης RMR λαμβάνει υπόψη έξι παραμέτρους της βραχώμαζας:

- ✓ την αντοχή του άρρηκτου πετρώματος (R1)
- ✓ τον δείκτη RQD (R2)
- ✓ την απόσταση των ασυνχειών (R3)
- ✓ την κατάσταση των επιφανειών των ασυνχειών (R4)

- ✓ τις συνθήκες υπόγειου νερού (R5)
- ✓ τον προσανατολισμό των ασυνεχειών (R6)

Με βάσει τις έξι προηγούμενες παραμέτρους η βραχόμαζα ταξινομείται και λαμβάνει μια τιμή μεταξύ του 0 έως 100. Στο **Σχήμα 4.1** παρουσιάζεται η προτεινόμενη μέθοδος ταξινόμησης της βραχόμαζας RMR, ενώ στον **Πίνακα 4.1** η τελική βαθμολογία και κατάταξη της βραχόμαζας καθώς και η προτεινόμενη μεθοδολογία διάνοιξης και υποστήριξης της σήραγγας.

Η τελική βαθμολογία (R) της ταξινόμησης βραχόμαζας κατά το σύστημα RMR, υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6$$

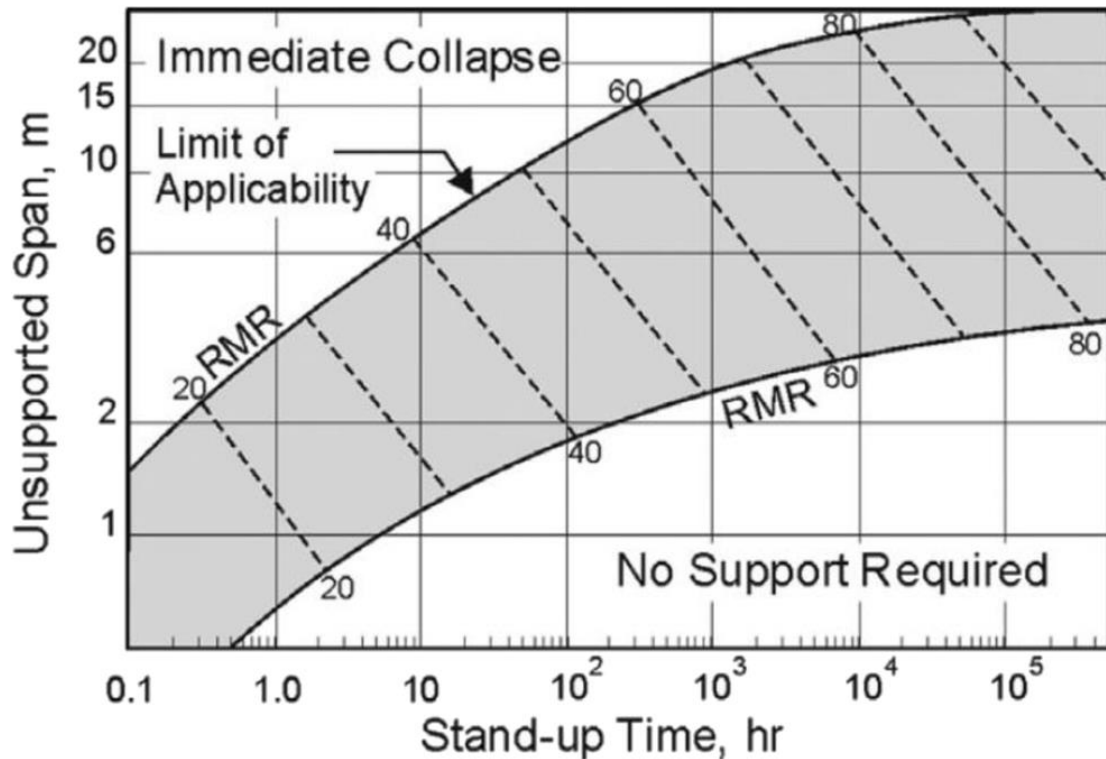
A. CLASSIFICATION PARAMETERS AND THEIR RATINGS									
Parameter		Range of values							
1	Strength of intact rock material	Point-load strength index	>10 MPa	4 - 10 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	For this low range - uniaxial compressive test is preferred		
		Uniaxial comp. strength	>250 MPa	100 - 250 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	5 - 25 MPa	1 - 5 MPa	< 1 MPa
		Rating	15	12	7	4	2	1	0
2	Drill core Quality RQD		90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	< 25%		
	Rating		20	17	13	8	3		
3	Spacing of		> 2 m	0.6 - 2 . m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm		
	Rating		20	15	10	8	5		
4	Condition of discontinuities (See E)		Very rough surfaces Not continuous No separation Unweathered wall rock	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Slightly weathered walls	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Highly weathered walls	Slickensided surfaces or Gouge < 5 mm thick or Separation 1-5 mm Continuous	Soft gouge >5 mm thick or Separation > 5 mm Continuous		
	Rating		30	25	20	10	0		
5	Groundwater	Inflow per 10 m tunnel length (l/m)	None	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125		
		(Joint water press)/ (Major principal σ)	0	< 0.1	0.1, - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
	General conditions		Completely dry	Damp	Wet	Dripping	Flowing		
	Rating		15	10	7	4	0		
B. RATING ADJUSTMENT FOR DISCONTINUITY ORIENTATIONS (See F)									
Strike and dip orientations		Very favourable	Favourable	Fair	Unfavourable	Very Unfavourable			
Ratings	Tunnels & mines	0	-2	-5	-10	-12			
	Foundations	0	-2	-7	-15	-25			
	Slopes	0	-5	-25	-50				

Σχήμα 4. 1. Σύστημα ταξινόμησης βραχόμαζας RMR (Πηγή: Rocscience).

Κατάταξη Βραχώμαζας	Εκσκαφή	Αγκύρια Βράχου (Διαμέτρου 20mm, πληρωμένα με σκυρόδεμα)	Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα	Μεταλλικά Πλαίσια
I - Πολύ καλή βραχώμαζα RMR: 81-100 Π - Καλή βραχώμαζα RMR: 61-80	Όλο το μέτωπο Βήμα προχώρησης: 3m  Όλο το μέτωπο Βήμα προχώρησης: 1-1,5m Ολοκληρωμένη υποστήριξη 20m από το μέτωπο	Γενικά δεν απαιτούνται μέτρα υποστήριξης εκτός από τοπικές αγκυρώσεις βράχου  Τοπικά, αγκύρια βράχου στον θόλο μήκους 3m, απόστασης 2,5m, περιστασιακά με	50mm στο θόλο όταν απαιτείται	Κανένα
III - Μέτρια βραχώμαζα RMR: 41-60	A' φάση και B' φάση Βήμα προχώρησης: 1,5-3m Εκκίνηση τοποθέτησης μέτρων υποστήριξης αμέσως μετά την εκσκαφή Ολοκληρωμένη υποστήριξη 20m από το μέτωπο	Συστηματικές αγκυρώσεις βράχου μήκους 4m, απόστασης 1,5-2m στο θόλο και τα τοιχώματα, με συρματόσχοινα στο θόλο	50-100mm στο θόλο και 30mm στα τοιχώματα	Κανένα
IV - Πτωχή βραχώμαζα RMR: 21-40	A' φάση και B' φάση Βήμα προχώρησης: 1-1,5m Τοποθέτηση μέτρων υποστήριξης ταυτόχρονα με την εκσκαφή Ολοκληρωμένη υποστήριξη 10m από το μέτωπο	Συστηματικές αγκυρώσεις βράχου μήκους 4-5m, απόστασης 1-1,5m στο θόλο και τα τοιχώματα, με συρματόσχοινα	100-150mm στο θόλο και 100mm στα τοιχώματα	Ελαφρές έως μέτριες υποστηρίξεις ανά 1,5 m, όπου απαιτείται
V - Πολύ πτωχή βραχώμαζα RMR: <20	Πολλαπλά στάδια εκσκαφής στην A' φάση Βήμα προχώρησης: 0,5-1,5m Τοποθέτηση μέτρων υποστήριξης ταυτόχρονα με την εκσκαφή Εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος όσο το δυνατόν ταχύτερα	Συστηματικές αγκυρώσεις βράχου μήκους 5-6m, απόστασης 1-1,5m στο θόλο και τα τοιχώματα, με συρματόσχοινα Αγκύρωση αναστροφου τόξου	150-200mm στο θόλο, 150mm στα τοιχώματα και 50mm στο μέτωπο	Μέτριες έως βαριές υποστηρίξεις ανά 0,75 m, με επένδυση από χαλυβδόφυλα αν απαιτείται Κλείσιμο του αναστοροφου τόξου.

Πίνακας 4. 1. Προτεινόμενη μεθοδολογία διάνοιξης και προσωρινής υποστήριξης της σήραγγας, βάσει του συστήματος ταξινόμησης βραχώμαζας RMR (Πηγή: Μαρίνος Β.).

Τέλος βάσει του συστήματος ταξινόμησης βραχώμαζας RMR, προτείνεται ο κατάλληλος χρόνος αυτοϋποστήριξης του υπογείου ανοίγματος, ώστε να προσδιοριστεί ο χρόνος τοποθέτησης της υποστήριξης, όπως παρουσιάζεται στο **Σχήμα 4.2**.



Σχήμα 4. 2. Προσδιορισμός χρόνου αυτοϋποστήριξης υπόγειου ανοίγματος βάσει του συστήματος ταξινόμησης βραχώμαζας RMR (Πηγή: Rocscience)..

#### 4.1.2. Σύστημα Ταξινόμησης Q

Το σύστημα ταξινόμησης Q (Barton et al. 1974, Grimstad & Barton 1993, Barton 2002, Norwegian Geotechnical Institute NGI 2015) αναπτύχθηκε με βάση την εμπειρία από την κατασκευή πολυάριθμων υπόγειων έργων στη Νορβηγία και έχει εφαρμογή κυρίως για την κατάταξη της βραχομάζας γύρω από υπόγεια ανοίγματα. Κατά το σύστημα Q η βραχομάζα κατατάσσεται σε κατηγορίες ποιότητας ανάλογα με την τιμή του δείκτη Q, ο οποίος προσδιορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

, όπου:

- ✓ **RQD (%)**: ο δείκτης ποιότητας του πετρώματος.
- ✓ **J<sub>n</sub>**: ο δείκτης που βαθμονομείται ανάλογα με το σύνολο των διακλάσεων της βραχομάζας.
- ✓ **J<sub>r</sub>**: ο δείκτης που βαθμονομείται ανάλογα με την τραχύτητα των διακλάσεων της βραχομάζας.
- ✓ **J<sub>a</sub>**: ο δείκτης που βαθμονομείται ανάλογα με την εξαλλοίωση των διακλάσεων της βραχομάζας.
- ✓ **J<sub>w</sub>**: ο δείκτης που βαθμονομείται ανάλογα με την κατάσταση των υπογείων υδάτων.

- ✓ **SRF**: ο συντελεστής που εκφράζει την σχέση μεταξύ της αντοχής του πετρώματος και της επικρατούσας εντατικής κατάστασης.

Η βαθμονόμηση των προηγούμενων παραμέτρων, παρουσιάζεται στον **Πίνακα 4.2**.

<b>RQD (Rock Quality Designation)</b>		<b>Jn (joint set number)</b>	
Very poor	RQD = 0 - 25%	Massive, no or few joints	Jn = 0.5 - 1
Poor	25 - 50	One joint set	2
Fair	50 - 75	One joint set plus random joints	3
Good	75 - 90	Two joint sets	4
Excellent	90 - 100	Two joint sets plus random joints	6
<b>Notes:</b>		Three joint sets	9
(i) Where RQD is reported or measured as < 10 (including 0), a nominal value of 10 is used to evaluate Q		Three joint sets plus random joints	12
(ii) RQD intervals of 5, i.e. 100, 95, 90, etc. are sufficiently accurate		Four or more joint sets, heavily jointed, "sugar-cube", etc.	15
		Crushed rock, earthlike	20
		<b>Notes:</b> (i) For tunnel intersections, use (3.0 x Jn); (ii) For portals, use (2.0 x Jn)	

<b>Jr (joint roughness number)</b>			
<b>a) Rock-wall contact, rock-wall contact before 10 cm shear</b>		<b>c) No rock-wall contact when sheared</b>	
Discontinuous joints	Jr = 4	Zone containing clay minerals thick enough to prevent rock-wall contact	Jr = 1.0
Rough or irregular, undulating	3	Sandy, gravelly or crushed zone thick enough to prevent rock-wall contact	1.0
Smooth, undulating	2	<b>Notes:</b>	
Slickensided, undulating	1.5	i) Add 1.0 if the mean spacing of the relevant joint set is greater than 3 m	
Rough or irregular, planar	1.5	ii) Jr = 0.5 can be used for planar, slickensided joints having lineations, provided the lineations are oriented for minimum strength	
Smooth, planar	1.0		
Slickensided, planar	0.5		
<b>Note:</b> i) Descriptions refer to small scale features, and intermediate scale features, in that order			

<b>Ja (joint alteration number)</b>			
Contact between joint walls	<b>JOINT WALL CHARACTER</b>		<b>Condition</b>
	CLEAN JOINTS	Healed or welded joints:	filling of quartz, epidote, etc.
		Fresh joint walls:	no coating or filling, except from staining (rust)
COATING OR THIN FILLING	Slightly altered joint walls:	non-softening mineral coatings, clay-free particles, etc.	<b>Wall contact</b>
	Friction materials:	sand, silt, calcite, etc. (non-softening)	Ja = 0.75
	Cohesive materials:	clay, chlorite, talc, etc. (softening)	1
Some or no wall contact	<b>FILLING OF:</b>		<b>Type</b>
	Friction materials	sand, silt calcite, etc. (non-softening)	Ja = 4
	Hard cohesive materials	compacted filling of clay, chlorite, talc, etc.	6
	Soft cohesive materials	medium to low overconsolidated clay, chlorite, talc	8
	Swelling clay materials	filling material exhibits swelling properties	8 - 12
		<b>Some wall contact</b>	<b>No wall contact</b>
		Thin filling (< 5 mm)	Thick filling
		Ja = 4	Ja = 8
		6	5 - 10
		8	12
		8 - 12	13 - 20

<b>Jw (joint water reduction factor)</b>		
Dry excavations or minor inflow, i.e. < 5 l/min locally	$p_w < 1 \text{ kg/cm}^2$	Jw = 1
Medium inflow or pressure, occasional outwash of joint fillings	1 - 2.5	0.66
Large inflow or high pressure in competent rock with unfilled joints	2.5 - 10	0.5
Large inflow or high pressure, considerable outwash of joint fillings	2.5 - 10	0.3
Exceptionally high inflow or water pressure at blasting, decaying with time	> 10	0.2 - 0.1
Exceptionally high inflow or water pressure continuing without noticeable decay	> 10	0.1 - 0.05
<b>Note:</b> (i) The last four factors are crude estimates. Increase Jw if drainage measures are installed (ii) Special problems caused by ice formation are not considered		

<b>SRF (Stress Reduction Factor)</b>				
Weakness zones intersecting excavation	Multiple weakness zones with clay or chemically disintegrated rock, very loose surrounding rock (any depth)	SRF = 10		
	Single weakness zones containing clay or chemically disintegrated rock (depth of excavation < 50 m)	5		
	Single weakness zones containing clay or chemically disintegrated rock (depth of excavation > 50 m)	2.5		
	Multiple shear zones in competent rock (clay-free), loose surrounding rock (any depth)	7.5		
	Single shear zones in competent rock (clay-free), loose surrounding rock (depth of excavation < 50 m)	5		
	Single shear zones in competent rock (clay-free), loose surrounding rock (depth of excavation > 50 m)	2.5		
	Loose, open joints, heavily jointed or "sugar-cube", etc. (any depth)	5		
<b>Note:</b> (i) Reduce these SRF values by 25 - 50% if the relevant shear zones only influence, but do not intersect the excavation.				
Competent rock, rock stress problems	Low stress, near surface, open joints	$\sigma_c / \sigma_1$	$\sigma_0 / \sigma_c$	SRF
	Medium stress, favourable stress condition	> 200	< 0.01	2.5
	High stress, very tight structure. Usually favourable to stability, may be except for walls	200 - 10	0.01 - 0.3	1
	Moderate slabbing after > 1 hour in massive rock	10 - 5	0.3 - 0.4	0.5 - 2
	Slabbing and rock burst after a few minutes in massive rock	5 - 3	0.5 - 0.65	5 - 50
	Heavy rock burst (strain burst) and immediate dynamic deformation in massive rock	3 - 2	0.65 - 1	50 - 200
<b>Notes:</b> (i) For strongly anisotropic stress field (if measured): when $5 < \sigma_1 / \sigma_3 < 10$ , reduce $\sigma_c$ to 0.75 $\sigma_c$ . When $\sigma_1 / \sigma_3 > 10$ , reduce $\sigma_c$ to 0.5 $\sigma_c$ (ii) Few case records available where depth of crown below surface is less than span width. Suggest SRF increase from 2.5 to 5 for low stress cases				
Squeezing rock	Plastic flow of incompetent rock under the influence of high pressure	$\sigma_0 / \sigma_c$	SRF	
	Mild squeezing rock pressure	1 - 5	5 - 10	
	Heavy squeezing rock pressure	> 5	10 - 20	
Swelling rock	Chemical swelling activity depending on presence of water			
	Mild swelling rock pressure		5 - 10	
	Heavy swelling rock pressure		10 - 15	

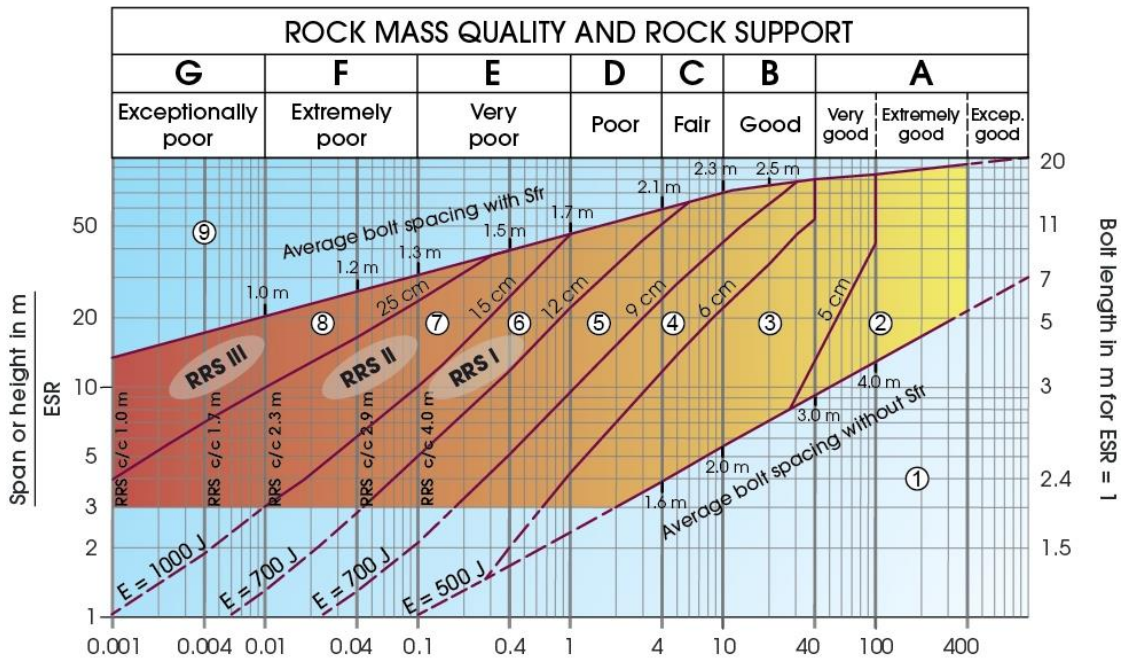
Σχήμα 4. 3. Βαθμονόμηση παραμέτρων συστήματος ταξινόμησης βραχώμαζας Q (Πηγή: Rocscience)..

Δεδομένου του βαθμού Q που προκύπτει από την παραπάνω ταξινόμηση, χαρακτηρίζεται η βραχώμαζα ως ακολούθως (**Πίνακα 4.2**):

Q	Χαρακτηρισμός Βραχόμαζας
< 0.01	Εξαιρετικά πτωχή
0.01 – 0.1	Πάρα πολύ πτωχή
0.1 – 1	Πολύ πτωχή
1 – 4	Πτωχή
4 - 10	Μέτρια
10 - 40	Καλή
40 - 100	Πολύ καλή
100 – 400	Πάρα πολύ καλή
> 400	Εξαιρετικά καλή

Πίνακας 4. 2. Χαρακτηρισμός βραχόμαζας βάσει της βαθμονόμησης Q (Πηγή: Rocscience)..

Επίσης η ταξινόμηση βραχόμαζας Q, προτείνει βάσει της τιμής Q την κατάλληλη μεθοδολογία για την προσωρινή υποστήριξη της σήραγγας, όπως παρουσιάζεται στο **Σχήμα 4.4**.



$$\text{Rock mass quality } Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

Σχήμα 4. 4. Προτεινόμενη μεθοδολογία προσωρινής υποστήριξης σηράγγων, βάσει της ταξινόμησης βραχόμαζας Q (Πηγή: Rocscience)..

Από το προηγούμενο σχήμα, εμφανίζεται η παράμετρος ESR, η οποία καθορίζει την σπουδαιότητα του υπογείου έργου και λειτουργεί υπό μορφή συντελεστή ασφαλείας, με τις προτεινόμενες τιμές που λαμβάνει να παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.3**.

ESR	Τύπος εκσκαφής
3 - 5	Μεταλλείο
2.5	Κατακόρυφα φρέατα κυκλικής διατομής
2	Κατακόρυφα φρέατα ορθογωνικής / τετραγωνικής διατομής
1.6	Μόνιμα μεταλλευτικά ανοίγματα, σήραγγες νερού για υδροηλεκτρικά έργα (εκτός από υψηλές πιέσεις), διερευνητικές σήραγγες (pilot) κλπ.
1.3	Μικρές οδικές-σιδηροδρομικές σήραγγες, στοές προσπελάσεων, αποθηκευτικοί θάλαμοι κλπ
1.0	Μεγάλες οδικές-σιδηροδρομικές σήραγγες, θάλαμοι ενεργειακών σταθμών, καταφύγια πολιτικής άμυνας, διασταυρώσεις, πύλες (αρχικά τμήματα σηράγγων) κλπ
0.8	Σταθμοί σιδηροδρόμων, εργοστάσια, υπόγειοι πυρηνικοί σταθμοί

Πίνακας 4. 3. Τιμή παραμέτρου ESR για την εκτίμηση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης στην ταξινόμηση βραχομάζας Q (Πηγή: Rocscience)..







Τέλος οι Barton et al., πρότειναν την ακόλουθη σχέση για τον υπολογισμό της απαιτούμενης πίεσης οροφής της σήραγγας ( $P_{roof}$ ):

$$P_{roof} = \frac{2\sqrt{J_n} \times Q^{\frac{1}{3}}}{3 \times J_r}$$

#### 4.1.3. Σύστημα Ταξινόμησης GSI

Ο Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής (Geological Strength Index, GSI) αποτελεί έναν ποσοτικό δείκτη χαρακτηρισμού της ποιότητας της βραχομάζας, με βάση τη δομή και την κατάσταση των ασυνεχειών της. Αναπτύχθηκε από τους Hoek et al. (1992) για σκληρά ρωγματωμένα πετρώματα, και επεκτάθηκε ώστε να συμπεριλάβει επιπλέον ασθενείς και ετερογενείς βραχομάζες από τους Marinos & Hoek (2000), όπου έλαβε και την πιο γνωστή σημερινή του μορφή. Για την εξαγωγή του δείκτη η βραχομάζα εξετάζεται οπτικά, ώστε να διαπιστωθούν τα χαρακτηριστικά της (δομή και κατάσταση ασυνεχειών). Στη συνέχεια βαθμονομείται συγκρίνοντας τη δομή της και την κατάσταση των ασυνεχειών της με τις τυπικές

περιγραφές και τα αντίστοιχα σκαριφήματα του διαγράμματος GSI (Marinos & Hoek 2000), όπως αυτό παρουσιάζεται στο **Πίνακα 4.4**.

<b>ΔΕΙΚΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ (GSI)</b> <b>(E. Hoek, Π. Μαρίνος, 2000)</b> Βασίζομενοι στην περιγραφή της λιθολογικής σύστασης, της δομής και της ποιότητας των ασυνεχειών της βραχώμαζας εκτιμήστε τη μέση τιμή του GSI από τις κομπύλες. Το να επιλέξετε ένα εύρος τιμών από 33 έως 37 είναι πιο ρεαλιστικό από το να δηλώσετε ότι το GSI =35. Ο καθορισμός της δομής καθώς και της ποιότητας των ασυνεχειών μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ δύο γεωτονικών πεδίων. Τονίζεται ιδιαίτερα ότι το κριτήριο Hoek - Brown δεν εφαρμόζεται σε αστάθειες που ελέγχονται από συγκεκριμένες ασυνέχειες όταν οι ασθενείς επίπεδες επιφάνειες (όπως διατμημένα επίπεδα στρώσης) έχουν δυσμενή προσανατολισμό σε σχέση με την εκσκαφή. Τότε αυτές καθορίζουν την συμπεριφορά της βραχώμαζας. Η αντοχή ορισμένων βραχομαζών μειώνεται από την παρουσία του υπόγειου νερού και αυτό μπορεί να ληφθεί υπόψη με μικρή μετακίνηση προς τα δεξιά στις στήλες της μέτριας, πτωχής και πολύ πτωχής κατάστασης ασυνεχειών. Η πίεση του νερού δεν μεταβάλλει την τιμή του GSI και λαμβάνεται υπόψη με την ανάλυση ενεργών τάσεων στους υπολογισμούς.		<b>ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ</b> <b>ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ</b> →				
		<b>ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ</b> Πολύ τραχιές, υγείες, μη αποσπασθαιμένες επιφάνειες	<b>ΚΑΛΗ</b> Τραχιές, ελαφρά αποσπασθαιμένες και οξείδιωμένες επιφάνειες	<b>ΜΕΤΡΙΑ</b> Λείες, μετρίου αποσπασθαιμένες και εξαλλοιωμένες επιφάνειες	<b>ΠΤΩΧΗ</b> Πολύ λείες, κατά περίπτωση ολισθηρές επιφάνειες με συμπαγή επιφλοιώματα ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη θραύσματα	<b>ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ</b> Πολύ ολισθηρές επιφάνειες ή πολύ αποσπασθαιμένες με μαλακό αργιλικό υλικό πλήρωσης ή επιφλοιώσης
<b>ΔΟΜΗ</b>  <b>ΑΡΡΗΚΤΗ</b> Άρρηκτα βραχώδη τεμάχια ή άστρωτος βράχος με λίγες ασυνέχειες σε μεγάλη απόσταση	90 80				N/A N/A	
 <b>ΤΕΜΑΧΩΔΗΣ/ ΑΔΙΑΤΑΡΑΚΤΗ-ΣΤΡΩΜΑΤΩΔΗΣ</b> Αδιατάρακτη βραχώμαζα με πολύ καλό αλληλοκλείδωμα που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από τρεις ορθογώνια τεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών	70 60					
 <b>ΠΟΛΥ ΤΕΜΑΧΩΔΗΣ</b> Μερικώς διαταραγμένη βραχώμαζα με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια (blocks) που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών	50					
 <b>ΔΙΑΤΑΡΑΓΜΕΝΗ-ΣΤΡΩΜΑΤΩΔΗΣ/ΠΤΥΧΩΜΕΝΗ</b> Πτυχωμένη με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Εμμονή στρώσης ή σχιστότητας	40 30					
 <b>ΑΠΟΔΙΟΡΓΑΝΩΜΕΝΗ</b> Ισχυρά κερματισμένη βραχώμαζα με πτωχό αλληλοκλείδωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιώδων και αποστραγγυλωμένων τεμαχίων	20					
 <b>ΦΥΛΛΩΔΗΣ/ ΔΙΑΤΜΗΜΕΝΗ</b> Φυλλώδης ή σχιστοποιημένη και τεκτονικώς διατμημένη ασθενής βραχώμαζα. Η φύλλωση επικρατεί έναντι οποιαδήποτε άλλης οικογένειας ασυνεχειών εμποδίζοντας την δημιουργία γωνιώδων τεμαχίων (η κλίμακα σε αυτό το εικονίδιο δεν συγκρίνεται με αυτή των άλλων εικονιδίων)	N/A N/A				10	

Πίνακας 4. 4. Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής – GSI (Πηγή: Marinos & Hoek, 2000).

Η χρησιμότητα του Γεωλογικού Δείκτη Αντοχής – GSI, είναι πολύ μεγάλης στην κατασκευή τόσο υπογείων έργων όσο και επιφανειακών πρανών, διότι υπεισέρχεται στο κριτήριο αστοχίας Generalized Hoek &

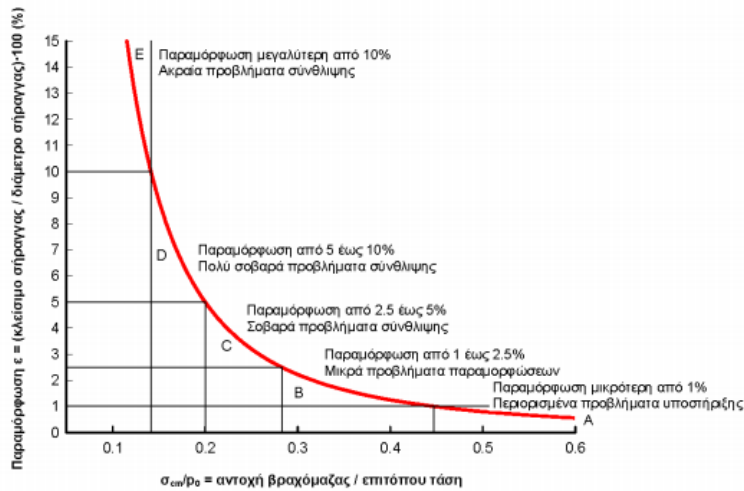


Brown (2002) και βάσει αυτού προσδιορίζονται οι παραμένουσες αντοχές της βραχόμαζας, όπως η ισοδύναμη αντοχή σε θλίψη για βραχόμαζα ( $\sigma_{cm}$ ) και το μέτρο παραμορφωσιμότητας της βραχόμαζας ( $E_m$ ).

Ο δείκτης GSI έχει καθιερωθεί σήμερα διεθνώς για τον ποσοτικό χαρακτηρισμό της βραχομάζας, ειδικότερα κατά την κατασκευή σηράγγων, ενώ έχει επίσης χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα τις δύο τελευταίες δεκαετίες και στην Ελλάδα.

Τα τελευταία χρόνια ο δείκτης GSI, έχει επεκταθεί και για συγκεκριμένους τύπους πετρωμάτων ή γεωλογικών σχηματισμών, όπως ο φλύσχης, η μολάσσα και ο οφιόλυθος.

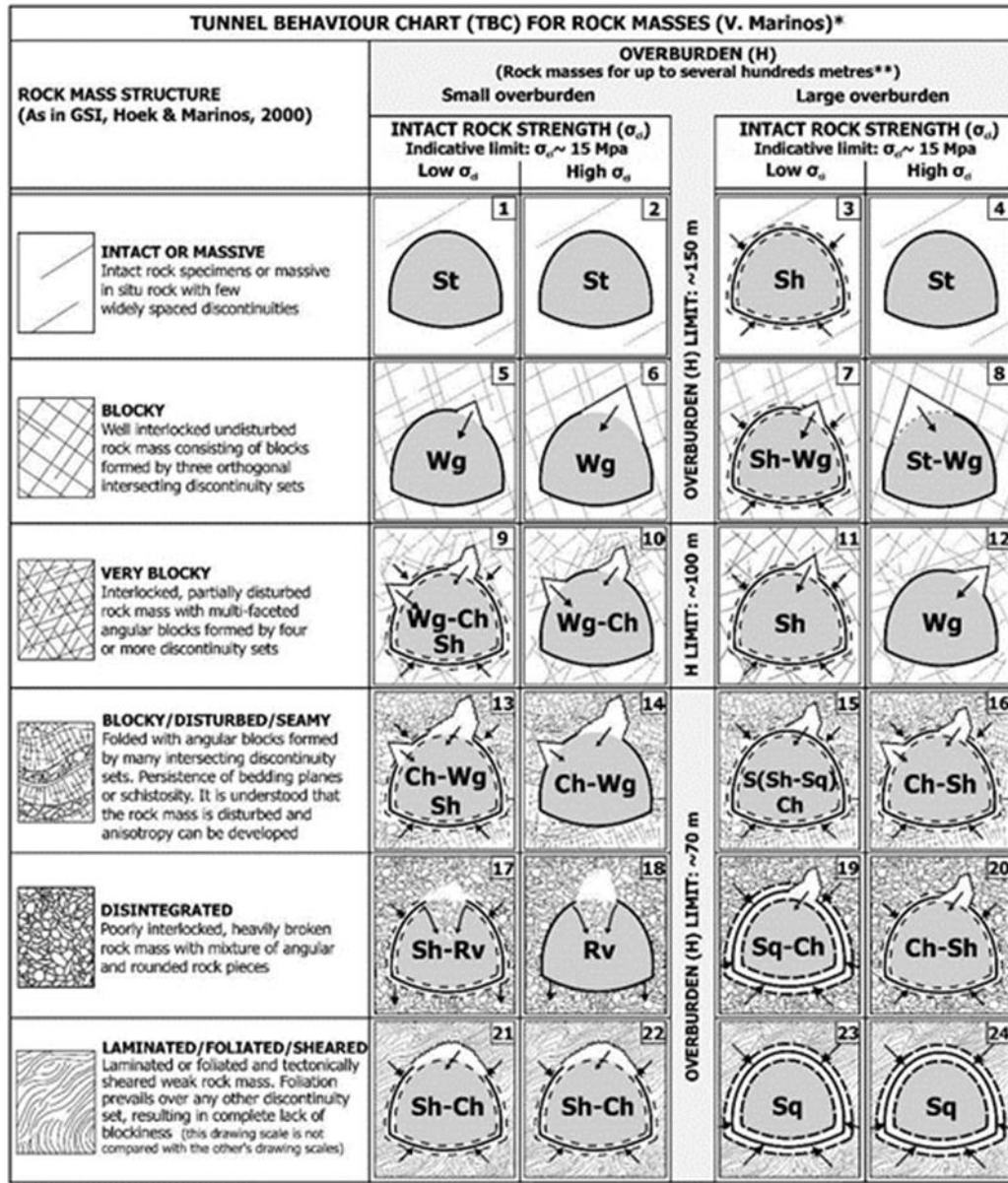
Οι Marinos & Hoek πρότειναν κατάλληλη μεθοδολογία υπολογισμού των μέγιστων συγκλίσεων της εκσκαφής καθώς και της απαραίτητης προσωρινής υποστήριξης που απαιτείται, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.5, βασιζόμενοι στην απομειωμένη αντοχή της βραχόμαζας ( $\sigma_{cm}$ ).



Παραμόρφωση (%)	Γεωτεχνική θεώρηση	Τύπος υποστήριξης
A Λιγότερο από 1	Λίγα προβλήματα αστάθειας. Απλές μέθοδοι σχεδιασμού μπορεί να χρησιμοποιηθούν. Τα συνιστώμενα μέτρα προστασίας μπορεί να εκτιμηθούν ικανοποιητικά από τις ταξινομήσεις βραχώμαζας	Απλές συνθήκες. Η χρήση αγκυρίων ή/και εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι η συνήθης πρακτική.
B 1 έως 2,5	Μέθοδοι σύγκλισης αποτόνωσης χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη του σχηματισμού της «ελαστικής» ζώνης στην βραχώμαζα που περιβάλλει την σήραγγα και για την αλληλεπίδραση μεταξύ της προοδευτικής ανάπτυξης της ζώνης αυτής και των διαφόρων τύπων υποστήριξης.	Μικρά προβλήματα που συνήθως αντιμετωπίζονται με αγκύρια και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Μερικές φορές προστίθενται και ελαφρά πλαίσια ή δικτυωτά πλαίσια (lattice girders) για πρόσθετη ασφάλεια.
C 2,5 έως 5	Συνήθως χρησιμοποιείται διδασκατή ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία ενσωματώνοντας τα στοιχεία της υποστήριξης και την διαδοχή των φάσεων κατασκευής. Η αστάθεια στο μέτωπο συνήθως δεν είναι ένα ιδιαίτερο πρόβλημα.	Σοβαρά προβλήματα συγκλίσεων που απαιτούν γρήγορη τοποθέτηση της υποστήριξης και επιμελημένη εκτέλεση των εργασιών. Γενικώς επιβάλλεται η χρήση βαριών πλαισίων ενσωματωμένων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα
D 5 έως 10	Ο σχεδιασμός της σήραγγας ελέγχεται από την αστάθεια του μετώπου και, αν και γενικώς χρησιμοποιείται διδασκατή ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, απαιτείται κάποια εκτίμηση της δράσης των δοκών προπορείας και της ενίσχυσης του μετώπου.	Πολύ σοβαρές συγκλίσεις και προβλήματα ευστάθειας του μετώπου. Συνήθως απαιτούνται δοκοί προπορείας (forepoling) ενίσχυση του μετώπου και πλαίσια ενσωματωμένα στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα
E Μεγαλύτερη του 10	Σοβαρά προβλήματα στην ευστάθεια του μετώπου και μεγάλες συγκλίσεις στην σήραγγα δημιουργούν ένα ιδιαίτερα δύσκολο πρόβλημα τριών διαστάσεων για το οποίο δεν διατίθεται ακόμη αποτελεσματική μέθοδος σχεδιασμού. Τις περισσότερες φορές οι λύσεις βασίζονται στην εμπειρία.	Εξαιρετικά προβλήματα συγκλίσεων Συνήθως χρησιμοποιούνται δοκοί προπορείας και ενίσχυση του μετώπου. Ολισθαίνουν (yielding) πλαίσια ενδοχόμενος να απαιτούνται σε ακραίες καταστάσεις έναντι των κλασικών πλαισίων.

Σχήμα 4. 5. Προτεινόμενη μεθοδολογία εκτίμησης της μέγιστης σύγκλισης και της προσωρινής υποστήριξης σηράγγων, βάσει της αντοχής της βραχώμαζας ( $\sigma_{cm}$ ) (Πηγή: *Marinos & Hoek, 2000*).

Επίσης ο *Marinos V. (2010)*, παρουσίασε τις πιθανές περιπτώσεις αστοχίας και συμπεριφοράς του υπογείου ανοίγματος, ανάλογα την δομή της βραχώμαζας, το επιτόπου τασικό πεδίο και την αντοχή του αρρήκτου βράχου, όπως παρουσιάζεται στο **Σχήμα 4.6**.



Σχήμα 4. 6. Διάγραμμα συμπεριφοράς εκσκαφής (TBC) ανάλογα την δομή της βραχώμαζας, το επιτόπου τασικό πεδίο και την αντοχή του άρρηκτου πετρώματος (Πηγή: Marinos V. , 2010).

## 4.2. Αριθμητικές Μέθοδοι Σχεδιασμού

Σήμερα λόγω της εξέλιξης των υπολογιστικών συστημάτων, ολοένα και περισσότεροι κώδικες πεπερασμένων στοιχείων ή πεπερασμένων διαφόρων έχουν σχεδιαστεί ώστε να επιλύουν πάσης φύσεως γεωτεχνικά προβλήματα αλλά και ειδικότερα θέματα υπογείων έργων. Το σύνολο αυτών των μεθόδων βασίζεται σε καταστατικά κριτήρια αστοχίας του γεωυλικού καθώς επίσης λαμβάνεται υπόψιν

η αλληλεπίδραση που έχει τοποθέτηση της υποστήριξης γύρω από την εκσκαφή.

Τα περισσότερα έργα σηράγγων σήμερα σχεδιάζονται και επιλύονται με αριθμητικά μοντέλα, διότι δύναται να υπολογιστούν οι ακόλουθες παράμετροι που δεν μπορούν να υπολογιστούν με τις εμπειρικές μεθόδους:

- ✓ Υπολογισμός συγκλίσεων για οποιαδήποτε γεωμετρία υπογείου ανοίγματος.
- ✓ Υπολογισμός συγκλίσεων εκσκαφής μετά την τοποθέτηση της υποστήριξης.
- ✓ Υπολογισμός προκαλουμένων επιφανειακών καθιζήσεων για ρηχές εκσκαφές.
- ✓ Υπολογισμός εντατικού πεδίου πέριξ της εκσκαφής.
- ✓ Υπολογισμός πλαστικής ζώνης και μορφή αυτής πέριξ του υπογείου ανοίγματος.
- ✓ Υπολογισμός εντατικών μεγεθών στην υποστήριξη.

Οι αριθμητικές ανάλυσεις που δύναται να πραγματοποιηθούν για τον σχεδιασμό σηράγγων αφορούν το διδιάστατο (2D) ή τριδιάστατο χώρο (3D), με τις πρώτες να έχουν μεγαλύτερη εφαρμογή. Η επιλογή μεταξύ διδιάστατων (2D) ή τριδιάστατων (3D) αριθμητικών αναλύσεων, καθορίζεται από την φύση του προβλήματος, όπως θα αναλυθεί στην συνέχεια.

#### **4.2.1. Διδιάστατες Αριθμητικές Αναλύσεις (2D)**

Οι διδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις στον σχεδιασμό των υπογείων έργων, αποτελούν την πιο συνήθη επιλογή, λόγω του μικρού υπολογιστικού χρόνου και όγκου δεδομένων καθώς και του μικρού κόστους.

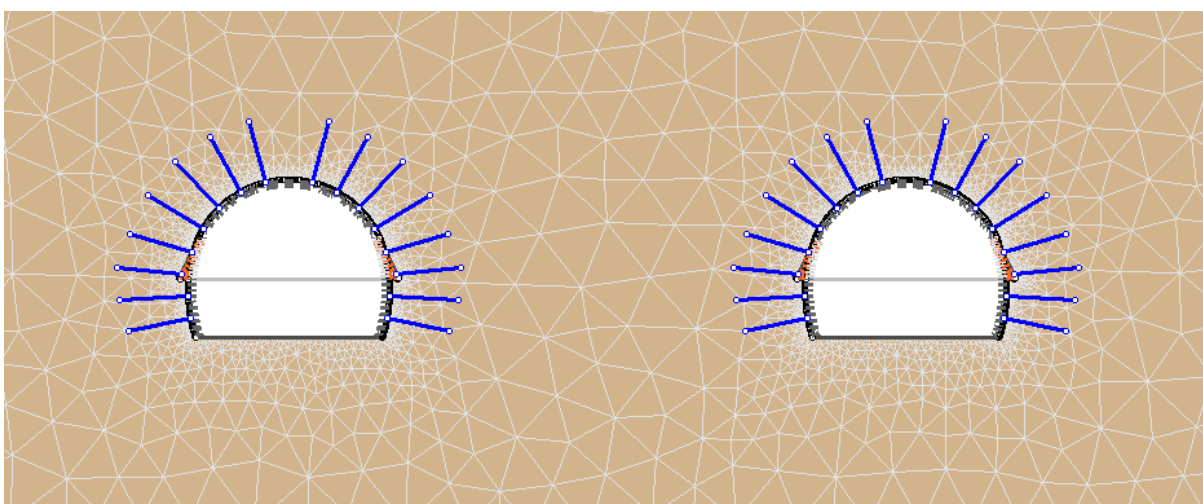
Κατά την διδιάστατη αριθμητική ανάλυση ενός υπογείου έργου, χαρακτηριστική/ες τομή ή τομές εξετάζονται κατά μήκος του υπογείου έργου σε χαρακτηριστικές θέσεις για συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης. Το πλήθος και το είδος των αντίστοιχων χαρακτηριστικών τομών κατά μήκος του υπογείου έργου που θα πραγματοποιηθούν διδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις, εξαρτώνται από τους ακόλουθους παράγοντες:

- ✓ Ύψος υπερκείμενων γαιών.
- ✓ Λιθολογία.
- ✓ Γεωτεχνικές παραμέτρους.
- ✓ Διατομή εκσκαφής.

Σε κάθε μια από αυτές αναλύσεις γίνεται προσομοίωση του αρχικού γεωστατικού πεδίου, των ενδιάμεσων φάσεων εκσκαφής καθώς και της τελικής κατάστασης με ή χωρίς την τοποθέτηση των μέτρων υποστήριξης. Με τον τρόπο αυτό μπορούν να υπολογιστούν οι συγκλίσεις σε κάθε στάδιο

εκσκαφής, ώστε να μπορεί να αξιολογηθεί η επάρκεια και απόκριση της υποστήριξης κατά το στάδιο κατασκευής της σήραγγας. Η ενδιάμεση μεταβολή του εντατικού πεδίου λόγω της προόδου της εκσκαφής, προσομοιώνεται μέσω της επιβολής απομειωμένης εσωτερικής πίεσης στην εκσκαφή, συναρτήσει των γεωστατικών τάσεων με την χρήση την μεθόδου της αποτόνωσης ( $\lambda$ ) η οποία θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

Στην **Εικόνα 4.1** παρουσιάζεται χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής διδιάστατης αριθμητικής ανάλυσης στον σχεδιασμό σήραγγας, με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων RS2 – Rocscience που θα αξιοποιηθεί στην παρούσα εργασία.



*Εικόνα 4. 1. Διδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα (2D) σε έργο σήραγγας με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων RS2 – Rocscience (Πηγή: Γεωργίου Δ.).*

Το βασικό μειονέκτημα της ανάλυσης σηράγγων με διδιάστατα αριθμητικά προσομοιώματα (2D) είναι η μη δυνατότητα προσομοίωσης του μετώπου εκσκαφής και των μέτρων προϋποστήριξης του, το οποίο έχει καθοριστική σημασία στην συμπεριφορά του υπογείου ανοίγματος.

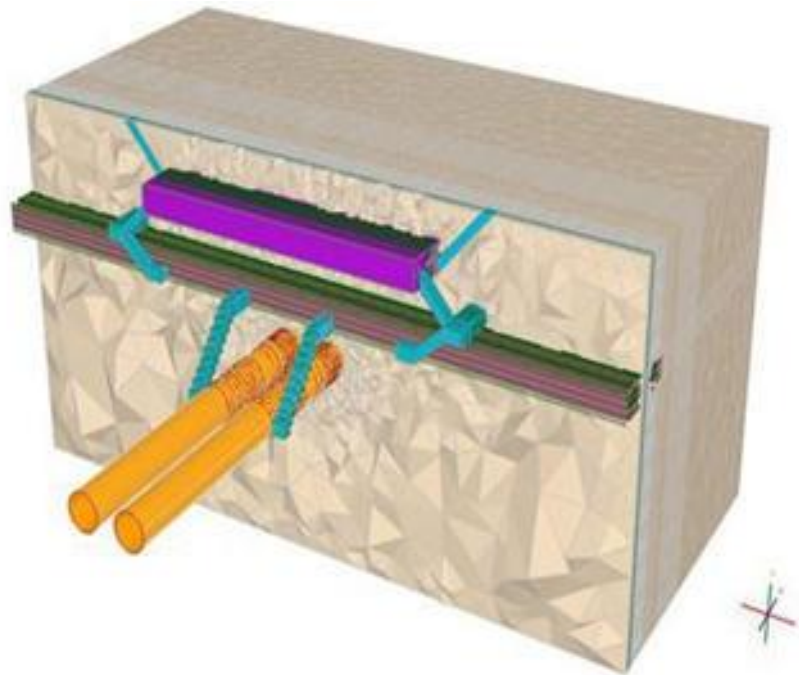
#### **4.2.2. Τριδιάστατες Αριθμητικές Αναλύσεις (3D)**

Η χρήση των τριδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων στον σχεδιασμό σηράγγων, περιορίζεται σε συνέθετα προβλήματα, όπως θέματα αλληλεπίδρασης σήραγγας – κατασκευής, λόγω του πολύ μεγάλου υπολογιστικού χρόνου και όγκου δεδομένων, καθώς και του μεγάλου κόστους.

Κατά την τριδιάστατη αριθμητική ανάλυση των σηράγγων, γίνεται προσομοίωση του συνόλου της εκσκαφής κατά την τρίτη διάσταση, ώστε να μπορέσει να εξεταστεί η αλληλεπίδραση της διάνοιξης της σήραγγας με πιθανές γειτνιαζουσες κατασκευές, όπως παρουσιάζεται στην **Εικόνα 4.2**, ή να εξεταστεί η

σταθερότητα του μετώπου της εκσκαφής με ή χωρίς την χρήση μέτρων προϋποστήριξης του μετώπου εκσκαφής.

Κατά την τριδιάστατη παρομοίωση της διάνοιξης της σήραγγας, δεν απαιτείται η χρήση της μεθόδου της ισοδύναμης αποτόνωσης ( $\lambda$ ) των γεωστατικών τάσεων, καθώς πλέον η επιρροή της τρίτης διάστασης είναι άμεση και διαμορφώνεται το πραγματικό εντατικό πεδίο των τάσεων γύρω από την εκσκαφή καθώς προχωράει η διάνοιξη της σήραγγας.



*Εικόνα 4. 2. Τριδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα διάνοιξης σήραγγας σε άμεση αλληλεπίδραση με άλλες κατασκευές (Πηγή: Rocscience).*

Το βασικό πλεονέκτημα των τριδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων διάνοιξης σηράγγων, είναι η δυνατότητα διερεύνησης της συμπεριφοράς του μετώπου εκσκαφής, καθώς και η συμπεριφορά της βραχώμαζας έμπροσθεν του μετώπου εκσκαφής.

## 5. Χρήση της Μεθόδου Σύγκλισης – Αποτόνωσης στον Σχεδιασμό Σηράγγων

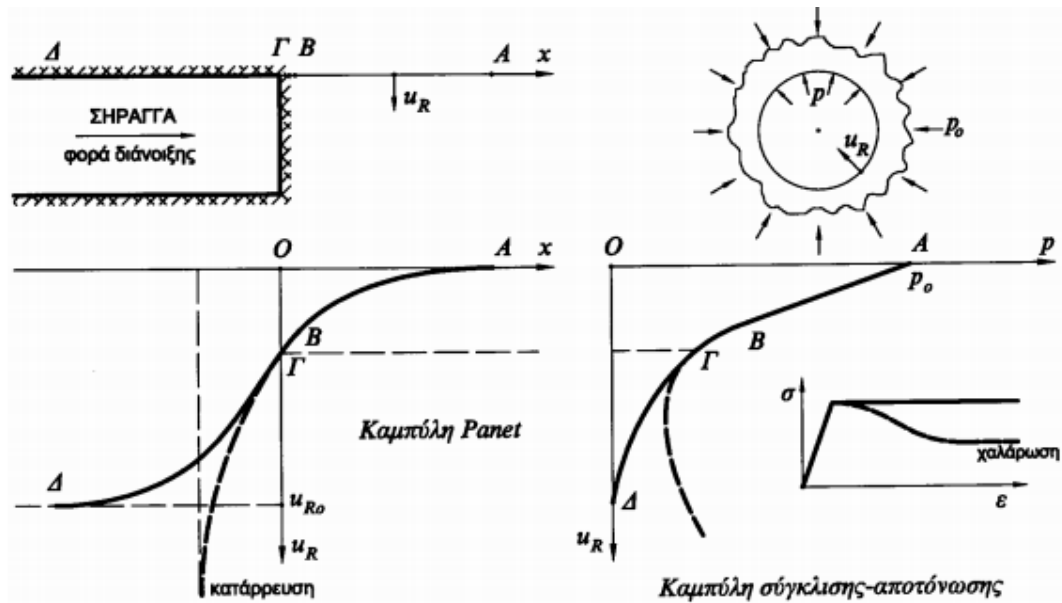
Όπως προαναφέρθηκε στην *Ενότητα 4.2.1*, κατά την διδιάστατη αριθμητική προσομοίωση της διάνοιξης σηράγγων, είναι απαραίτητη η προσομοίωση της τρίτης διάστασης, η οποία προσομοιώνεται μέσω της απομείωσης των γεωστατικών τάσεων, μέσω του συντελεστή αποτόνωσης ( $\lambda$ ). Ο συντελεστής αποτόνωσης ( $\lambda$ ) εκφράζει την απομείωση των γεωστατικών τάσεων καθώς απομακρυνόμαστε από το μέτωπο εκσκαφής ή αλλιώς προσδιορίζει την ισοδύναμη εσωτερική πίεση ( $p_i$ ) στο εσωτερικό της σήραγγας, που θα προκαλέσει την ισοδύναμη μεταβολής του περιβάλλοντος εντατικού πεδίου. Ο βαθμός ή συντελεστής αποτόνωσης υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$\lambda = 1 - \frac{p_i}{p_o}$$

, όπου:

- ✓  $p_i$ : η ισοδύναμη εσωτερική πίεση υποστήριξης της σήραγγας.
- ✓  $p_o$ : οι επιτόπου γεωστατικές τάσεις.

Κατά τη διάνοιξη σηράγγων οι μετακινήσεις του εδάφους αρχίζουν σε θέσεις αρκετά εμπρός από το μέτωπο διάνοιξης, δηλαδή πριν το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας φθάσει σε κάποια συγκεκριμένη θέση, όπως παρουσιάζεται στο **Σχήμα 4.7**. Σύμφωνα με το ακόλουθο σχήμα η καμπύλη (ΑΒΓΔ) παρουσιάζει την εξέλιξη της σύγκλισης για ανυποστήρικτη σήραγγα, όπου ( $u_R$ ) είναι η σύγκλιση της οροφής της σήραγγας και ( $x$ ) είναι η απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής.



Σχήμα 4. 7. Εξέλιξη των συγκλίσεων της σήραγγας ( $u_R$ ) συναρτήσει της απόστασης από το μέτωπο εκσκαφής (Πηγή: Καθβαδά Μ.).

Από το προηγούμενο σχήμα είναι φανερό, ότι ένα σημαντικό ποσοστό της συνολικής σύγκλισης ( $u_{R0}$ ), της τάξεως του 30 - 35% της συνολικής σύγκλισης, συμβαίνει εμπρός από το μέτωπο της σήραγγας. Στο ίδιο σχήμα φαίνεται και η αντίστοιχη καμπύλη σύγκλισης – αποτόνωσης του εδάφους. Συνεπώς, σε κάθε θέση ( $x$ ) κατά μήκος του άξονα της σήραγγας αντιστοιχεί μέσω της καμπύλης ( $x - u_R$ ) μια τιμή της σύγκλισης του τοιχώματος ( $u_R$ ). Για τη συγκεκριμένη τιμή ( $u_R$ ) αντιστοιχεί μέσω της καμπύλης σύγκλισης-αποτόνωσης μια τιμή ισοδύναμης Εσωτερικής πίεσης ( $p_i$ ), η οποία είναι μικρότερη από την αρχική γεωστατική πίεση ( $p_o$ ). Σημειώνεται ότι εάν η συμπεριφορά του εδάφους παρουσιάζει χαρακτηριστικά έντονης χαλάρωσης (δηλαδή μείωση της αντοχής με παρατεταμένη παραμόρφωση) τότε η διατομή της σήραγγας δεν ισορροπεί, η σύγκλιση της οροφής αυξάνει απεριόριστα και η διατομή καταρρέει.

Η μορφή και το μέγεθος των συγκλίσεων ( $u_R$ ) κατά μήκος του άξονα της σήραγγας ( $x$ ) μπορούν να εκτιμηθούν μέσω εμπειρικών σχέσεων ή ακόμα καλύτερα μέσω τριδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων. Λόγω της δυσκολίας πραγματοποίησης αριθμητικών αναλύσεων στα προκαταρκτικά στάδια σχεδιασμού των σηράγγων, εφαρμόζονται κυρίως οι εμπειρικές μέθοδοι εκτίμησης των συγκλίσεων κατά μήκος του άξονα της σήραγγας (LDP methods). Στην συνέχεια γίνεται παράθεση δύο βασικών μεθόδων εξέλιξης των συγκλίσεων κατά μήκος τους άξονα της σήραγγας:



✓ **Panet (1995)**

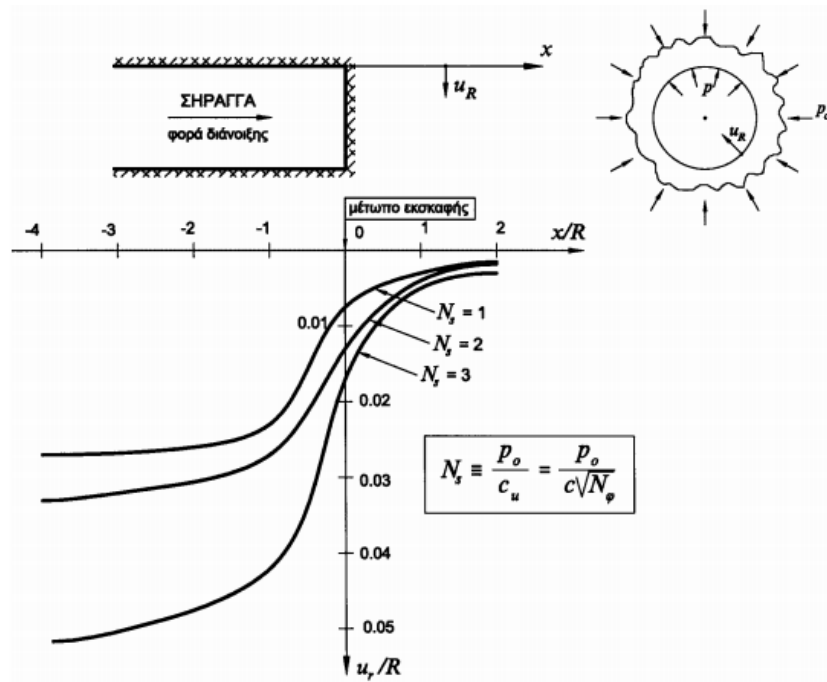
Σύμφωνα με τον Panet (1995) η σύγκλιση  $u_R(x)$  του τοιχώματος ανυποστήρικτης σήραγγας σε απόσταση ( $x < 0$ ) πίσω από το μέτωπο της εκσκαφής (που βρίσκεται στη θέση  $x = 0$ ) δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

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

, όπου:

- ✓  **$u_R(0)$** : η σύγκλιση της σήραγγας στην περιοχή του μετώπου εκσκαφής ( $x = 0$ ).
- ✓  **$u_{R\infty}$** : η μέγιστη σύγκλιση της σήραγγας σε μεγάλη απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής.
- ✓  **$m$** : συντελεστής μεταξύ 0.75 – 0.9.
- ✓  **$\xi$** : ο λόγος της ελαστικής ( $u_{R\infty}^e$ ) προς την ελαστοπλαστική ( $u_{R\infty}$ ) τελική σύγκλιση.
- ✓  **$x$** : η απόσταση πίσω από το μέτωπο εκσκαφής.
- ✓  **$R$** : η ακτίνα της σήραγγας.

Στο **Σχήμα 4.8**, παρουσιάζεται η εξέλιξη των συγκλίσεων ανυποστήρικτης σήραγγας, σύμφωνα με την μεθοδολογία Panet για διάφορες τιμές του συντελεστή υπερφόρτωσης ( $N_s$ ), όπου για  $N_s \leq 1$  το έδαφος συμπεριφέρεται ελαστικά.



Σχήμα 4. 8. Καμπύλες εξέλιξης των συγκλίσεων ανυποστήρικτης σήραγγας, σύμφωνα με την μεθοδολογία Panet για διαφορετικές τιμές του συντελεστή υπερφόρτωσης ( $N_s$ ) (Πηγή: Καθβαδά Μ.).

✓ **Chern et al. (1998)**

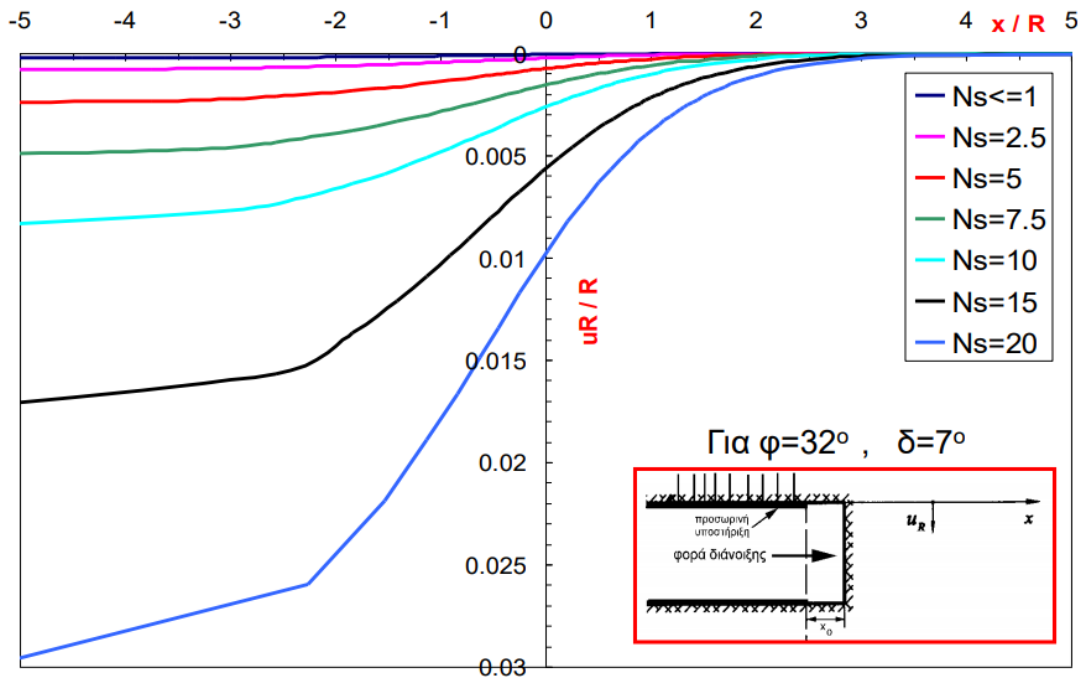
Σύμφωνα με τους Chern et al. (1998) η σύγκλιση  $u_R(x)$  του τοιχώματος ανυποστήρικτης σήραγγας σε απόσταση ( $x/R$ ) με τιμές  $x < 0$  εντός της σήραγγας και τιμές  $x > 0$  εμπρός από το μέτωπο εκσκαφής, δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$u_R(x) = u_{R\infty} \times \left[ 1 + \exp\left(0.91 \times \frac{x}{R}\right) \right]^{-1.7}$$

, όπου:

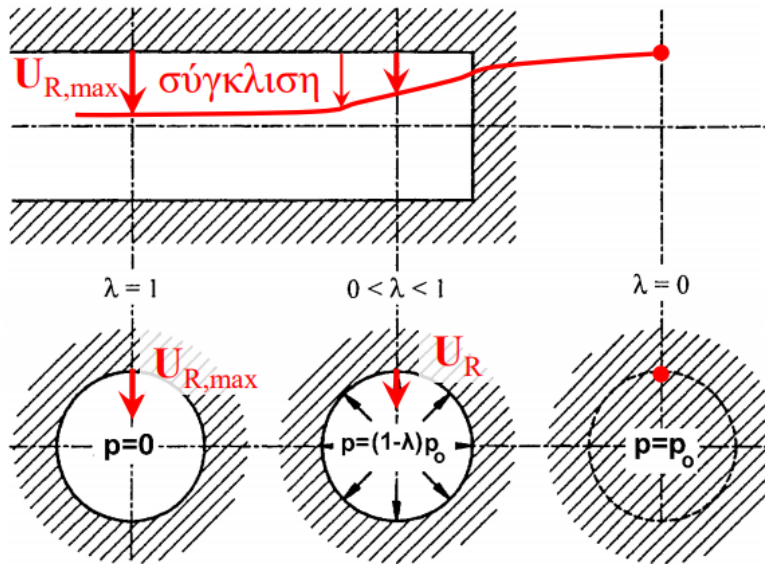
- ✓  $u_{R\infty}$ : η μέγιστη σύγκλιση της σήραγγας σε μεγάλη απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής.
- ✓  $x$ : η απόσταση πίσω από το μέτωπο εκσκαφής.
- ✓  $R$ : η ακτίνα της σήραγγας.

Στο **Σχήμα 4.9**, παρουσιάζεται η εξέλιξη των συγκλίσεων ανυποστήρικτης σήραγγας, σύμφωνα με την μεθοδολογία Chern et al. για διάφορες τιμές του συντελεστή υπερφόρτωσης ( $N_s$ ), όπου για  $N_s \leq 1$  το έδαφος συμπεριφέρεται ελαστικά.



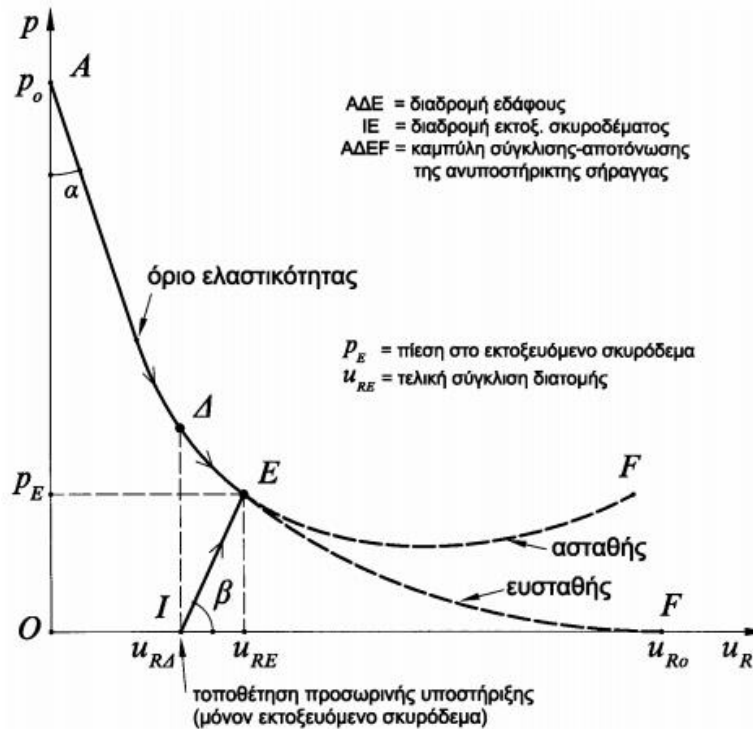
Σχήμα 4. 9. Καμπύλες εξέλιξης των συγκλίσεων ανυποστήρικτης σήραγγας, σύμφωνα με την μεθοδολογία Chern et al. για διαφορετικές τιμές του συντελεστή υπερφόρτωσης ( $N_s$ ) (Πηγή: Καθβαδά Μ.).

Βασιζόμενοι στις προηγούμενες μεθόδους προσδιορισμού της εξέλιξης των συγκλίσεων κατά μήκος του άξονα της σήραγγας, μπορεί να προσδιοριστεί ο ισοδύναμος βαθμός αποτόνωσης ( $\lambda$ ) κατά μήκος της σήραγγας, διότι η αποτόνωση του γεωστατικού πεδίου θα προκαλέσει την αντίστοιχη σύγκλιση των τοιχωμάτων της σήραγγας. Στο **Σχήμα 4.10**, παρουσιάζεται εξέλιξη του βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) σε χαρακτηριστικές θέσεις κατά μήκος της σήραγγας, όπου εμπρός από το μέτωπο εκσκαφής δεν έχει προκληθεί καμία μεταβολή του γεωστατικού πεδίου, λίγο πιο πίσω από το μέτωπο εκσκαφής έχει προκληθεί σημαντική αποτόνωση των τάσεων και τέλος πολύ πίσω από το μέτωπο εκσκαφής έχει γίνει πλήρης αποτόνωση των τάσεων ( $\lambda = 1$ ).



Σχήμα 4. 10. Εξέλιξη βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) κατά μήκος της σήραγγας (Πηγή: Καθβαδά Μ.).

Η συσχέτιση μεταξύ της ισοδύναμης εσωτερικής πίεσης ( $p_i$ ) ή του βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) και της σύγκλισης του τοιχώματος της σήραγγας ( $u_R$ ) περιγράφεται από την **καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης** (convergence-confinement curve). Ο τρόπος υπολογισμού της καμπύλης σύγκλισης-αποτόνωσης, αφορά τις κατανομές των τάσεων και παραμορφώσεων γύρω από κυκλική σήραγγα. Η μορφή της καμπύλης σύγκλισης-αποτόνωσης μιας ανυποστήρικτης σήραγγας φαίνεται στο **Σχήμα 4.11** (καμπύλη ΑΔΕΦ).



Σχήμα 4. 11. Χαρακτηριστική μορφή καμπύλης σύγκλισης – αποτόνωσης (Πηγή: Καθβαδά Μ.).

Με βάσει την παραπάνω καμπύλη, μπορεί να υπολογιστεί για την εκάστοτε επιθυμητή μετακίνηση ( $u_R$ ) ο αντίστοιχος βαθμός αποτόνωσης ( $\lambda$ ) ή η αντίστοιχη εσωτερική πίεση υποστήριξης ( $p_i$ ) που απαιτείται. Ο βαθμός αποτόνωσης ( $\lambda$ ), δηλαδή η μείωση της εσωτερικής πίεσης από την αρχική της τιμή ( $p_0$ ) σε μια μικρότερη τιμή ( $p_i$ ) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση της χρονικής υστέρησης στην τοποθέτηση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης.

Στην παραπάνω καμπύλη διακρίνονται δύο βασικές περιοχές: η περιοχή ελαστική συμπεριφοράς του εδάφους και η περιοχή ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς. Η διάκριση αυτών των δύο περιοχών είναι εύκολη, διότι στην μεν ελαστική υπάρχει γραμμική συσχέτιση μεταξύ του βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) και των προκαλούμενων συγκλίσεων ( $u_R$ ), ενώ αυτό δεν ισχύει στην ελαστοπλαστική περιοχή όπου για την ίδια μεταβολή του βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ), επέρχεται πολύ μεγαλύτερη αύξηση των συγκλίσεων ( $u_R$ ).

Το όριο μεταξύ ελαστικής και ελαστοπλαστικής περιοχής, καθορίζεται από τον κρίσιμο βαθμό αποτόνωσης ( $\lambda_{cr}$ ) που αντιστοιχεί στην ισοδύναμη κρίσιμη πίεση υποστήριξης ( $p_{cr}$ ), ώστε να μην αναπτυχθεί πλαστική ζώνη.

Η καμπύλη ΑΓΕF του Σχήματος 4.11, δείχνει την συμπεριφορά της βραχώμαζας γύρω από ανυποστήρικτη σήραγγα. Συνήθως, σε κάποια (μικρή) απόσταση πίσω από το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας

τοποθετούνται τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, χαλύβδινα πλαίσια, αγκύρια κλπ). Σκοπός της τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης είναι ο περιορισμός της σύγκλισης του τοιχώματος της σήραγγας, η αποφυγή κατάρρευσης της, καθώς και η αποφυγή αποσφηνώσεων βραχωδών τεμαχών. Με την τοποθέτηση της προσωρινής υποστήριξης σε απόσταση  $x_d$  από το μέτωπο της εκσκαφής, η καμπύλη σύγκλισης ακολουθεί τη διαδρομή ΔΕ αντί της διαδρομής ΔΓ που αντιστοιχεί στην ανυποστήρικτη διατομή, με συνέπεια τη μείωση της σύγκλισης του τοιχώματος της σήραγγας.

Κατά την τοποθέτηση της προσωρινής υποστήριξης (σημείο Δ) έχει ήδη συμβεί σύγκλιση του τοιχώματος ίση με ( $u_{RD}$ ). Αμέσως μετά την τοποθέτηση, η υποστήριξη είναι αφόρτιστη (επειδή τοποθετείται σε μια διατομή που ισορροπεί). Με την περαιτέρω προώθηση του μετώπου της σήραγγας, η διατομή τείνει να συγκλίνει περαιτέρω λόγω μείωσης της ισοδύναμης εσωτερικής πίεσης ( $p_i$ ). Στην περαιτέρω σύγκλιση της διατομής ανθίσταται η υποστήριξη, αναλαμβάνοντας φορτία. Η ανάληψη φορτίων από την υποστήριξη προκαλεί συμπίεσή της και κάποια (μικρή) αύξηση της σύγκλισης της διατομής. Στο προηγούμενο σχήμα φαίνεται ότι η υποστήριξη ακολουθεί τη διαδρομή ΙΕ, ενώ το έδαφος ακολουθεί τη διαδρομή ΔΕ. Η κατάσταση ισορροπίας επιτυγχάνεται στο σημείο Ε όπου η πίεση επί της υποστήριξης ισούται με  $p_E$ . Η κλίση της ευθείας ΙΕ εξαρτάται από το είδος της προσωρινής υποστήριξης. Σύμφωνα με τους Hoek & Brown (1980) και Brady & Brown (1985), η κλίση της ευθείας ΙΕ (δυσκαμψία υποστήριξης) υπολογίζεται ως ακολούθως, ανάλογα τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης:

#### **Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (shotcrete)**

$$p_{sc,max} = \frac{\sigma_{cc}}{2} \left[ 1 - \frac{(r_o - t_c)^2}{r_o^2} \right]$$

$$K_{sc} = \frac{E_c(r_o^2 - (r_o - t_c)^2)}{2(1 - \nu^2)(r_o - t_c)r_o^2}$$

, όπου:

- ✓  $p_{sc,max}$ : η μέγιστη προσφερόμενη πίεση υποστήριξης από το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.
- ✓  $K_{sc}$ : η επιτευχθείσα δυσκαμψία του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.
- ✓  $\sigma_{cc}$ : η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του εκτοξευόμενου σκυροδέματος (MPa).
- ✓  $E_c$ : το μέτρο ελαστικότητας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος (MPa).
- ✓  $\nu_c$ : ο λόγος Poisson του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.
- ✓  $t_c$ : το πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος (m).

- ✓  $r_o$ : η ακτίνα της σήραγγας (m).

### Αγκύρια βράχου (rockbolts)

$$p_{sb,max} = \frac{T_{bf}}{s_l s_c}$$

$$K_{sb} = \frac{E_s \pi (d_b)^2}{4l s_l s_c}$$

$$K_{sc} = \frac{E_c (r_o^2 - (r_o - t_c)^2)}{2(1 - \nu^2)(r_o - t_c)r_o^2}$$

, όπου:

- ✓  $p_{sb,max}$ : η μέγιστη προσφερόμενη πίεση υποστήριξης από τα αγκύρια.
- ✓  $K_{sb}$ : η επιτευχθείσα δυσκαμψία της αγκύρωσης.
- ✓  $T_{bf}$ : το μέγιστο φορτίο που μπορεί να παραλάβει το αγκύριο υπολογιζόμενο από δοκιμή εξόλκευσης (MN).
- ✓  $s_l$ : η απόσταση τοποθέτησης των αγκυριών κατά τον διαμήκη άξονα (m).
- ✓  $s_c$ : η απόσταση τοποθέτησης των αγκυριών στην περίμετρο της εκσκαφής (m).
- ✓  $E_s$ : το μέτρο ελαστικότητας των αγκυριών (MPa).
- ✓  $d_b$ : η διάμετρος των αγκυριών (m).
- ✓  $l$ : το ελεύθερο μήκος των αγκυριών (m).

### Μεταλλικά πλαίσια (steel sets)

$$p_{ss,max} = \frac{A_s \sigma_{ys}}{s_l r_o}$$

$$K_{ss} = \frac{E_s A_s}{s_l r_o^2}$$

$$K_{sc} = \frac{E_c (r_o^2 - (r_o - t_c)^2)}{2(1 - \nu^2)(r_o - t_c)r_o^2}$$

, όπου:

- ✓  $p_{ss,max}$ : η μέγιστη προσφερόμενη πίεση υποστήριξης από τα μεταλλικά πλαίσια.
- ✓  $K_{sb}$ : η επιτευχθείσα δυσκαμψία των μεταλλικών πλαισίων.
- ✓  $A_s$ : το εμβαδόν της διατομής των μεταλλικών πλαισίων ( $m^2$ ).
- ✓  $\sigma_{ys}$ : το όριο διαρροής του χάλυβα (MPa).
- ✓  $s_i$ : η απόσταση τοποθέτησης των μεταλλικών πλαισίων κατά μήκος του άξονα της σήραγγας (m).
- ✓  $r_o$ : η ακτίνα της σήραγγας (m).
- ✓  $E_s$ : το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα (MPa).

Με βάσει τις παραπάνω μεθόδους, είναι εύκολος ο σχεδιασμός σηράγγων σε προκαταρτικό επίπεδο, ώστε να μπορέσει να εκτιμηθεί η επίδραση των μέτρων υποστήριξης στην μείωση των συγκλίσεων της εκσκαφής.

Στην συνέχεια γίνεται παράθεση των βασικότερων δημοσιευμένων μέχρι και σήμερα μεθόδων σύγκλισης – αποτόνωσης, στις οποίες βασίζονται οι αναλύσεις και τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας.

### 5.1. Μέθοδος Σύγκλισης – Αποτόνωσης (Ducan – Fama, 1993)

Η συγκεκριμένη μέθοδος βασίζεται στις ακόλουθες παραδοχές:

- ✓ Κυκλική διατομή εκσκαφής.
- ✓ Επιβαλλόμενο υδροστατικό γεωστατικό πεδίο με σταθερή κατανομή των τάσεων περίξ της εκσκαφής.
- ✓ Συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης.

Η μέθοδος βασίζεται σε συμπεριφορά του εδάφους, σύμφωνα με το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb (MC).

Σύμφωνα με την συγκεκριμένη μέθοδο, γίνεται ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών μεγεθών ως ακολούθως:

**Κρίσιμη πίεση υποστήριξης ( $p_{cr}$ )** (όριο μεταξύ ελαστικής και πλαστικής περιοχής)

$$p_{cr} = \frac{2 \times p_o - \sigma_{cm}}{1 + k}$$



$$k = \frac{1 + \sin(\varphi)}{1 - \sin(\varphi)}$$

, όπου:

- ✓  $p_o$ : η γεωστατική τάση στο βάθος της σήραγγας.
- ✓  $\sigma_{cm}$ : η αντοχή του περιβάλλοντος εδάφους ή βραχώμαζας.
- ✓  $\varphi$ : η γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους.

### Ελαστική παραμόρφωση σήραγγας ( $u_{ie}$ )

$$U_{ie} = \frac{r_o \times (1 + \nu) \times (p_o - p_i)}{E_m}$$

, όπου:

- ✓  $r_o$ : η ακτίνα της σήραγγας.
- ✓  $\nu$ : ο λόγος Poisson του περιβάλλοντος εδάφους ή βραχώμαζας.
- ✓  $p_o$ : η γεωστατική τάση στο βάθος της σήραγγας.
- ✓  $p_i$ : η ισοδύναμη πίεση υποστήριξης της σήραγγας.
- ✓  $E_m$ : το μέτρο παραμορφωσιμότητας του περιβάλλοντος εδάφους ή βραχώμαζας.

### Ακτίνα πλαστικής ζώνης ( $r_p$ ) (σε περίπτωση όπου $p_i < p_{cr}$ )

$$r_p = r_o \times \left[ \frac{2 \times (p_o \times (k - 1) + \sigma_{cm})}{(1 + k) \times ((k - 1) \times p_i + \sigma_{cm})} \right]^{1/(k-1)}$$

, όπου:

- ✓  $r_o$ : η ακτίνα της σήραγγας.
- ✓  $p_o$ : η γεωστατική τάση στο βάθος της σήραγγας.
- ✓  $p_i$ : η ισοδύναμη πίεση υποστήριξης της σήραγγας.
- ✓  $\sigma_{cm}$ : η αντοχή του περιβάλλοντος εδάφους ή βραχώμαζας.
- ✓  $k$ : συντελεστής πλευρικών ωθήσεων.

### Πλαστική παραμόρφωση σήραγγας ( $u_{ip}$ )

$$U_{ip} = r_o \times \left( \frac{1 + \nu}{E_m} \right) \times \left[ 2 \times (1 - \nu) \times (p_o - p_{cr}) \times \left( \left( \frac{r_p}{r_o} \right)^2 \right) - (1 - 2 \times \nu) \times (p_o - p_i) \right]$$

, όπου:

- ✓  $r_o$ : η ακτίνα της σήραγγας.
- ✓  $\nu$ : ο λόγος Poisson του περιβάλλοντος εδάφους ή βραχώμαζας.
- ✓  $E_m$ : το μέτρο παραμορφωσιμότητας του περιβάλλοντος εδάφους ή βραχώμαζας.
- ✓  $p_o$ : η γεωστατική τάση στο βάθος της σήραγγας.
- ✓  $p_{cr}$ : η κρίσιμη πίεση υποστήριξης.
- ✓  $p_i$ : η ισοδύναμη πίεση υποστήριξης της σήραγγας.
- ✓  $r_p$ : η ακτίνα της πλαστικής ζώνης.

## **5.2. Μέθοδος Σύγκλισης – Αποτόνωσης (Kavvas M. , 1998)**

Η συγκεκριμένη μέθοδος βασίζεται στις ακόλουθες παραδοχές:

- ✓ Κυκλική διατομή εκσκαφής.
- ✓ Επιβαλλόμενο υδροστατικό γεωστατικό πεδίο με σταθερή κατανομή των τάσεων περίξ της εκσκαφής.
- ✓ Συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης.
- ✓ Συνεχές και ισότροπο γεωυλικού.

Η μέθοδος βασίζεται σε συμπεριφορά του εδάφους, σύμφωνα με το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb (MC) αλλά και του κριτηρίου αστοχίας Generalized Hoek & Brown (2002) .

Σύμφωνα με την συγκεκριμένη μέθοδο, γίνεται ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών μεγεθών ως ακολούθως:

### Αντοχή εδάφους ( $\sigma_{cm}$ )

Για το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb (MC)

$$\sigma_{cm} = 2 \times c \times \sqrt{k}$$

$$k = \frac{1 + \sin(\varphi)}{1 - \sin(\varphi)}$$

, όπου:

- ✓ **c**: η συνοχή του εδάφους.
- ✓ **φ**: η γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους.

Για το κριτήριο αστοχίας *Generalized Hoek & Brown (2002)*

$$\sigma_{cm} = \left(\frac{\sigma_{ci}}{50}\right) \times \exp\left(\frac{GSI}{25.5}\right)$$

, όπου:

- ✓ **σ<sub>ci</sub>**: η αντοχή σε θλίψη του άρρηκτου βράχου.
- ✓ **GSI**: ο δείκτης γεωλογικής αντοχής της βραχώμαζας

#### Συντελεστής διαστολικότητας (K)

$$K = \frac{1 + \tan(\delta)}{1 - \tan(\delta)}$$

, όπου:

- ✓ **δ**: η γωνία διαστολικότητας

#### Συντελεστής υπερφόρτωσης (N<sub>s</sub>)

$$N_s = \frac{2 \times p_o}{\sigma_{cm}}$$

, όπου:

- ✓ **p<sub>o</sub>**: η γεωστατική τάση στο βάθος της σήραγγας.
- ✓ **σ<sub>cm</sub>**: η αντοχή του περιβάλλοντος εδάφους ή βραχώμαζας.

### **Κρίσιμος συντελεστής αποτόνωσης ( $\lambda_{cr}$ )**

$$\lambda_{cr} = 1 - \left( \frac{2}{1+k} \right) \times \left( \frac{N_s - 1}{N_s} \right)$$

, όπου:

- ✓ **k**: συντελεστής πλευρικών ωθήσεων.
- ✓ **N<sub>s</sub>**: συντελεστής υπερφόρτωσης.

### **Ελαστική παραμόρφωση σήραγγας ( $u_e$ ) (για $\lambda \leq \lambda_{cr}$ )**

$$u_e = \lambda \times R \times \left( \frac{p_o}{2 \times G} \right) \times \left( \frac{R}{r} \right)$$

, όπου:

- ✓ **λ**: ο βαθμός αποτόνωσης.
- ✓ **R**: η ακτίνα της σήραγγας.
- ✓ **r**: η απόσταση μέτρησης των συγκλίσεων από το κέντρο της σήραγγας.
- ✓ **p<sub>o</sub>**: η γεωστατική τάση στο βάθος της σήραγγας.
- ✓ **G**: το μέτρο διάτμησης του περιβάλλοντος εδάφους ή βραχώμαζας.

### **Ακτίνα πλαστικής ζώνης ( $r_p$ ) (σε περίπτωση όπου $p_i < p_{cr}$ )**

$$r_p = R \times \left[ \left( \frac{2}{k+1} \right) \times \frac{N_s + \frac{2}{k-1}}{(1-\lambda) \times N_s + \frac{2}{k-1}} \right]^{\frac{1}{k-1}}$$

, όπου:

- ✓ **R**: η ακτίνα της σήραγγας.
- ✓ **k**: συντελεστής πλευρικών ωθήσεων.
- ✓ **N<sub>s</sub>**: συντελεστής υπερφόρτωσης.

- ✓  $\lambda$ : ο βαθμός αποτόνωσης.

### Πλαστική παραμόρφωση σήραγγας ( $u_p$ )

$$u = R \times \lambda_{cr} \times \left( \frac{p_o}{2 \times G} \right) \times \left( \frac{r_p}{r} \right)^{K+1}$$

, όπου:

- ✓  $R$ : η ακτίνα της σήραγγας.
- ✓  $\lambda_{cr}$ : ο κρίσιμος βαθμός αποτόνωσης.
- ✓  $p_o$ : η γεωστατική τάση στο βάθος της σήραγγας.
- ✓  $G$ : το μέτρο διάτμησης του περιβάλλοντος εδάφους ή βραχώμαζας.
- ✓  $r_p$ : η ακτίνα της πλαστικής ζώνης.
- ✓  $K$ : συντελεστής διαστολικότητας.

### **5.3. Μέθοδος Σύγκλισης – Αποτόνωσης (Carranza Torres & Fairhurst, 1999)**

Η συγκεκριμένη μέθοδος βασίζεται στις ακόλουθες παραδοχές:

- ✓ Κυκλική διατομή εκσκαφής.
- ✓ Ομοιόμορφο εντατικό πεδίο.
- ✓ Συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης.

Η μέθοδος βασίζεται σε συμπεριφορά της βραχώμαζας, σύμφωνα με το κριτήριο αστοχίας Generalized Hoek & Brown (2002).

Σύμφωνα με την συγκεκριμένη μέθοδο, γίνεται ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών μεγεθών ως ακολούθως:

### Αδιάστατη πίεση υποστήριξης ( $P_e$ )

$$P_e = \frac{p_e}{m_b \times \sigma_{ci}} + \frac{s}{m_b^2}$$

, όπου:

- ✓  $p_e$ : η ισοδύναμη πίεση υποστήριξης της σήραγγας.
- ✓  $\sigma_{ci}$ : η αντοχή σε θλίψη του άρρηκτου βράχου.
- ✓  $m_b, s$ : παράμετροι του κριτηρίου αστοχίας Generalized Hoek & Brown (2002).

#### Αδιάστατη κρίσιμη πίεση υποστήριξης ( $P_e^{cr}$ )

$$P_e^{cr} = \frac{1}{16} \times \left[ 1 - \sqrt{1 + 16 \times \left( \frac{\sigma_o}{m_b \times \sigma_{ci}} + \frac{s}{m_b^2} \right)} \right]^2$$

, όπου:

- ✓  $\sigma_o$ : το επί τόπου εντατικό πεδίο.
- ✓  $\sigma_{ci}$ : η αντοχή σε θλίψη του άρρηκτου βράχου.
- ✓  $m_b, s$ : παράμετροι του κριτηρίου αστοχίας Generalized Hoek & Brown (2002).

#### Ακτινική τάση στο όριο ελαστικής – πλαστικής περιοχής ( $\sigma_{r,Rpl}$ )

$$\sigma_{r,Rpl} = \left( P_e^{cr} - \frac{s}{m_b^2} \right) \times m_b \times \sigma_{ci}$$

, όπου:

- ✓  $P_e^{cr}$ : η αδιάστατη κρίσιμη πίεση υποστήριξης.
- ✓  $\sigma_{ci}$ : η αντοχή σε θλίψη του άρρηκτου βράχου.
- ✓  $m_b, s$ : παράμετροι του κριτηρίου αστοχίας Generalized Hoek & Brown (2002).

#### Ελαστική παραμόρφωση σήραγγας ( $u_e$ ) (για $P_e \geq P_e^{cr}$ )

$$u_r^{el} = \frac{R^2}{r} \times \frac{(1 + \nu)}{E_m} \times (\sigma_o - \sigma_{r,Rpl})$$

, όπου:

- ✓  $R$ : η ακτίνα της σήραγγας.

- ✓  $r$ : η απόσταση μέτρησης των συγκλίσεων από το κέντρο της σήραγγας.
- ✓  $\nu$ : ο λόγος Poisson της περιβάλλουσας βραχόμαζας.
- ✓  $E_m$ : το μέτρο παραμορφωσιμότητας της περιβάλλουσας βραχόμαζας.
- ✓  $\sigma_o$ : το επί τόπου εντατικό πεδίο.
- ✓  $\sigma_{r, Rpl}$ : η ακτινική τάση στο όριο ελαστικής – πλαστικής περιοχής.

**Ακτίνα πλαστικής ζώνης ( $R_{pl}$ ) (για  $P_e < P_e^{cr}$ )**

$$R_{pl} = R \times e^{[2 \times (\sqrt{P_e^{cr}} - \sqrt{P_e})]}$$

, όπου:

- ✓  $R$ : η ακτίνα της σήραγγας.
- ✓  $P_e^{cr}$ : η αδιάστατη κρίσιμη πίεση υποστήριξης.
- ✓  $P_e$ : η αδιάστατη πίεση υποστήριξης της σήραγγας.

**Πλαστική παραμόρφωση σήραγγας ( $u_r^{pl}$ )**

$$\begin{aligned} \frac{u_r^{pl}}{R} &\times \frac{E_m}{(1 + \nu) \times (\sigma_o - p_e^{cr})} \\ &= \left[ \left( \frac{1 - 2 \times \nu}{2} \times \frac{\sqrt{P_e^{cr}}}{\left( \frac{\sigma_o}{m_b \times \sigma_{ci}} + \frac{s}{m_b^2} - P_e^{cr} \right)} \right) + 1 \right] \times \left( \frac{R_{pl}}{R} \right)^2 \\ &+ \frac{1 - 2 \times \nu}{4 \times \left[ \left( \frac{\sigma_o}{m_b \times \sigma_{ci}} + \frac{s}{m_b^2} - P_e^{cr} \right) \right]} \times \left[ \ln \left( \frac{R_{pl}}{R} \right) \right]^2 - \left( \frac{1 - 2 \times \nu}{2} \right) \\ &\times \frac{\sqrt{P_e^{cr}}}{\left( \frac{\sigma_o}{m_b \times \sigma_{ci}} + \frac{s}{m_b^2} - P_e^{cr} \right)} \times \left[ 2 \times \ln \left( \frac{R_{pl}}{R} \right) + 1 \right] \end{aligned}$$

, όπου:

- ✓  $R$ : η ακτίνα της σήραγγας.
- ✓  $\nu$ : ο λόγος Poisson της περιβάλλουσας βραχόμαζας.
- ✓  $E_m$ : το μέτρο παραμορφωσιμότητας της περιβάλλουσας βραχόμαζας.

- ✓  $\sigma_o$ : το επί τόπου εντατικό πεδίο.
- ✓  $P_e^{cr}$ : η αδιάστατη κρίσιμη πίεση υποστήριξης.
- ✓  $P_e$ : η αδιάστατη πίεση υποστήριξης της σήραγγας.
- ✓  $R_{pl}$ : η ακτίνα της πλαστικής ζώνης.
- ✓  $\sigma_{ci}$ : η αντοχή σε θλίψη του άρρηκτου βράχου.
- ✓  $m_b, s$ : παράμετροι του κριτηρίου αστοχίας Generalized Hoek & Brown (2002).

Σε περιπτώσεις βραχόμαζας με γωνιά διαστολικότητας ( $\psi$ ), η παραπάνω εξίσωση τροποποιείται ως ακολούθως:

$$K_\psi = \frac{1 + \sin(\psi)}{1 - \sin(\psi)}$$

$$\begin{aligned} & \frac{u_r^{pl}}{R} \times \frac{E_m}{(1 + \nu) \times (\sigma_o - P_e^{cr})} \\ &= \frac{K_\psi - 1}{K_\psi + 1} + \left( \frac{2}{K_\psi + 1} \right) \times \left( \frac{R_{pl}}{R} \right)^{K_\psi + 1} + \frac{1 - 2 \times \nu}{4 \times \left[ \left( \frac{\sigma_o}{m_b \times \sigma_{ci}} + \frac{s}{m_b^2} \right) - P_e^{cr} \right]} \\ & \times \left[ \ln \left( \frac{R_{pl}}{R} \right) \right]^2 \\ & - \left[ \left( \frac{1 - 2 \times \nu}{K_\psi + 1} \right) \times \frac{\sqrt{P_e^{cr}}}{\left( \frac{\sigma_o}{m_b \times \sigma_{ci}} + \frac{s}{m_b^2} \right) - P_e^{cr}} \right] \\ & + \left[ \left( \frac{1 - 2 \times \nu}{K_\psi + 1} \right) \times \frac{\sqrt{P_e^{cr}}}{\left( \frac{\sigma_o}{m_b \times \sigma_{ci}} + \frac{s}{m_b^2} \right) - P_e^{cr}} \right] \\ & \times \left[ (K_\psi + 1) \times \ln \left( \frac{R_{pl}}{R} \right) - \left( \frac{R_{pl}}{R} \right)^{K_\psi + 1} + 1 \right] \end{aligned}$$

#### 5.4. Μέθοδος Σύγκλισης – Αποτόνωσης (Carranza Torres, 2002)

Η συγκεκριμένη μέθοδος βασίζεται στις ακόλουθες παραδοχές:

- ✓ Κυκλική διατομή εκσκαφής.



- ✓ Ομοιόμορφο εντατικό πεδίο.
- ✓ Συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης.

Η μέθοδος βασίζεται σε συμπεριφορά της βραχομάζας, σύμφωνα με το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb.

Σύμφωνα με την συγκεκριμένη μέθοδο, γίνεται ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών μεγεθών ως ακολούθως:

### Αδιάστατη πίεση υποστήριξης ( $P_i$ )

$$P_i = p_i + \frac{\sigma_{ci}}{K_\phi - 1}$$

$$K_\phi = \frac{1 + \sin(\phi)}{1 - \sin(\phi)}$$

$$K_\psi = \frac{1 + \sin(\psi)}{1 - \sin(\psi)}$$

$$\sigma_{ci} = 2 \times c \times \sqrt{K_\phi}$$

, όπου:

- ✓  $p_i$ : η ισοδύναμη πίεση υποστήριξης της σήραγγας.
- ✓  $\phi$ : η γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους.
- ✓  $\psi$ : η γωνία διαστολικότητας του εδάφους.
- ✓  $c$ : η συνοχή του εδάφους.

### Αδιάστατη επιβαλλόμενη τάση ( $S_o$ )

$$S_o = \sigma_o + \frac{\sigma_{ci}}{K_\phi - 1}$$

, όπου:

- ✓  $\sigma_0$ : οι επιτόπου γεωστατικές τάσεις

#### Αδιάστατη κρίσιμη πίεση υποστήριξης ( $P_i^{cr}$ )

$$P_i^{cr} = \frac{2 \times S_0}{K_\phi + 1}$$

#### Ελαστική παραμόρφωση σήραγγας ( $u_e$ ) (για $P_i \geq P_i^{cr}$ )

$$\frac{u_r^{el}}{a} \times \frac{2 \times G}{S_0 - P_i^{cr}} = 1 - \frac{P_i}{S_0}$$

, όπου:

- ✓  $a$ : η ακτίνα της σήραγγας.
- ✓  $G$ : το μέτρο διάτμησης του περιβάλλοντος εδάφους ή βραχώμαζας.

#### Ακτίνα πλαστικής ζώνης ( $R_{pl}$ ) (για $P_i < P_i^{cr}$ )

$$R_{pl} = a \times \left[ \frac{P_i^{cr}}{P_i} \right]^{1/(K_\phi - 1)}$$

, όπου:

- ✓  $a$ : η ακτίνα της σήραγγας.
- ✓  $P_i^{cr}$ : η αδιάστατη κρίσιμη πίεση υποστήριξης.
- ✓  $P_i$ : η αδιάστατη πίεση υποστήριξης της σήραγγας.

**Πλαστική παραμόρφωση σήραγγας ( $u_r^{pl}$ )**

$$\begin{aligned} \frac{u_r^{pl}}{a} \times \frac{2 \times G}{S_o - P_i^{cr}} \\ = \frac{(K_\psi - 1) \times (K_\phi - 1) - 2 \times C}{(K_\psi + 1) \times (K_\phi - 1)} + \left[ \frac{2 \times (K_\phi + K_\psi) + 2 \times C}{(K_\psi + 1) \times (K_\phi + K_\psi)} \right] \times \left( \frac{R_{pl}}{a} \right)^{K_\psi + 1} \\ + \left[ \frac{2 \times C}{(K_\phi - 1) \times (K_\phi + K_\psi)} \right] \times \left( \frac{\alpha}{R_{pl}} \right)^{K_\phi - 1} \end{aligned}$$

$$C = [(1 - \nu) \times (K_\phi \times K_\psi - 1)] - \nu \times (K_\phi + K_\psi)$$



## 6. Ευστάθεια Μετώπου Εκσκαφής Σηράγγων

Με τον όρο ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής σηράγγων, αναφερόμαστε στην σταθερότητα του μπροστινού τμήματος της εκσκαφής (γεωυλικό) χωρίς αυτό να καταρρεύσει. Η σημασία της ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής σηράγγων είναι καθοριστικής σημασίας για την ασφάλεια ολόκληρου του υπογείου έργου. Το μέτωπο εκσκαφής αναδιαμορφώνεται μέρα με την μέρα, ανάλογα με την προχώρηση της σήραγγας και το γεωυλικό που το απαρτίζει μεταβάλλεται και αυτό ανάλογα με την γεωλογία της περιοχής.

Η σημασία της ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής είναι σημαντική τόσο για την ασφάλεια της σήραγγας όσο και του προσωπικού, καθώς κοντά σε αυτό εργάζονται άνθρωποι και κινείται μηχανολογικός εξοπλισμός. Πιθανή αστοχία του μετώπου εκσκαφής μπορεί να θέσει σε κίνδυνο την ζωή των εργαζομένων αλλά και να προκαλέσει σοβαρές ζημιές στον μηχανολογικό εξοπλισμό. Σε περίπτωση ρηχών σηράγγων, η απώλεια εδαφικού όγκου στο μέτωπο εκσκαφής μεταφέρεται στην επιφάνεια του εδάφους και προκαλεί μεγάλες επιφανειακές καθιζήσεις ή και υποχώρηση του εδάφους, όπου μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα στην ευστάθεια των γειτονικών κατασκευών. Στην **Εικόνα 6.1**, παρατίθενται χαρακτηριστικά παραδείγματα αστοχίας του μετώπου εκσκαφής.

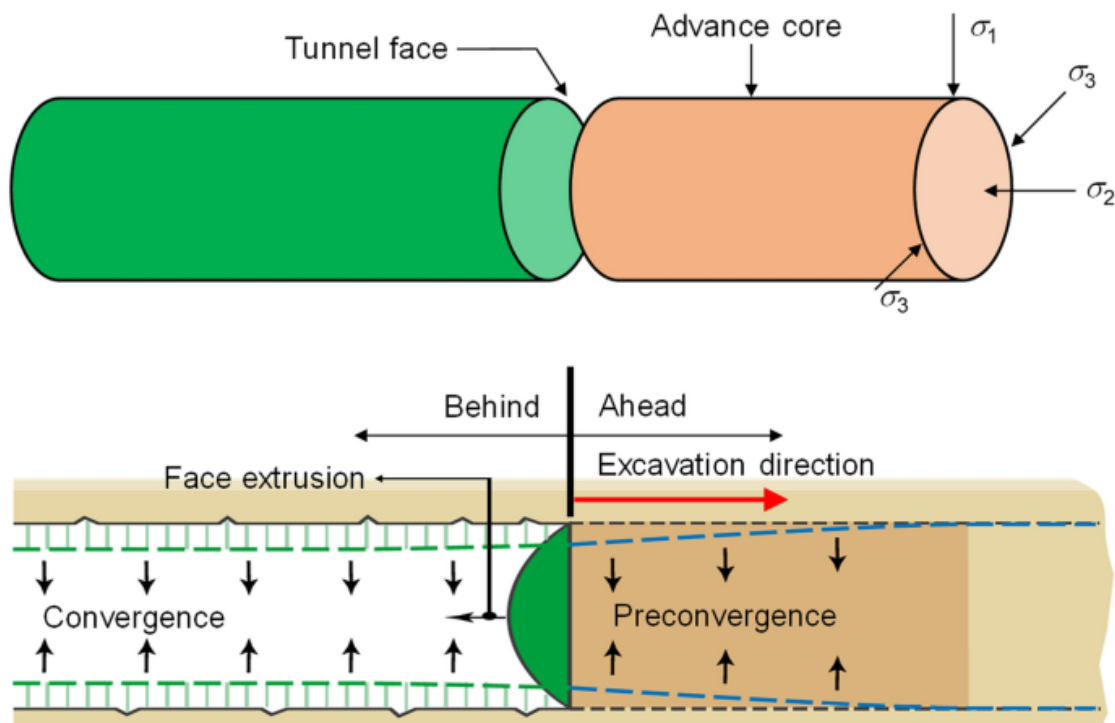


*Εικόνα 6. 1. Αστοχία μετώπου εκσκαφής α) σε βαθιά σήραγγα β) σε ρηχή σήραγγα με πρόκληση επιφανειακών βλαβών (Πηγή: SkyscraperCity).*

Η αστοχία του μετώπου εκσκαφής, κατά κύριο λόγο οφείλεται στην μεγάλη παραμόρφωση του μετώπου ή αλλιώς εξώθηση μετώπου εκσκαφής. Σε περιπτώσεις βραχώμαζας ενδέχεται να προκληθεί αστοχία του μετώπου εκσκαφής λόγω ολίσθησης βραχοσφηνών από το πυκνό σύστημα διακλάσεων που την οριοθετούν.

Στην παρούσα εργασία θα εξεταστεί η ισότροπη συμπεριφορά του γεωλικού που λόγω της μεγάλης παραμόρφωσής του, το μέτωπο αστοχεί. Ο μηχανισμός συμπεριφοράς και αστοχίας του μετώπου εκσκαφής, περιγράφεται από τον Lunardi P. ως ακολούθως.

Έμπροσθεν του μετώπου εκσκαφής η γεώμαζα ορίζεται ως πυρήνας προώθησης μετώπου εκσκαφής (tunnel face core), όπως παρουσιάζεται στο **Σχήμα 6.1**. Αν θεωρήσουμε ότι το μέτωπο απέχει μεγάλη απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής, ο πυρήνας προώθησης βρίσκεται σε ισορροπία με την επιβολή της κατακόρυφης τάσης ( $\sigma_1$ ) και της πλευρικής τάσης ( $\sigma_3$ ). Όταν το μέτωπο πλησιάζει πολύ κοντά στον υπό εξέταση πυρήνα προώθησης του μετώπου εκσκαφής, η πλευρική τάση από το εσωτερικό της σήραγγας τείνει να μηδενιστεί. Συνεπώς υπό την επιβολή τώρα της κατακόρυφης τάσης ( $\sigma_1$ ) και την ελεύθερη πλέον επιφάνεια του μετώπου εκσκαφής που δεν υπάρχει κάποια αντίδραση, ο πυρήνας του μετώπου εκσκαφής θα παραμορφωθεί προς το εσωτερικό της σήραγγας (εξώθηση μετώπου). Ο μηχανισμό που συμπεριφέρεται το μέτωπο εκσκαφής είναι παρόμοιος με την δοκιμή τριαξονικής θλίψης, όπου το δοκίμιο υπό την επιβολή πλευρικής τάσης ( $\sigma_3$ ) θα αστοχήσει σε μεγαλύτερη κατακόρυφη τάση ( $\sigma_1$ ), ενώ όταν δεν υφίσταται πλευρική τάση ( $\sigma_3 = 0$ ), τότε το δοκίμιο θα αστοχήσει όταν η κατακόρυφη τάση γίνει ίση με την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη.



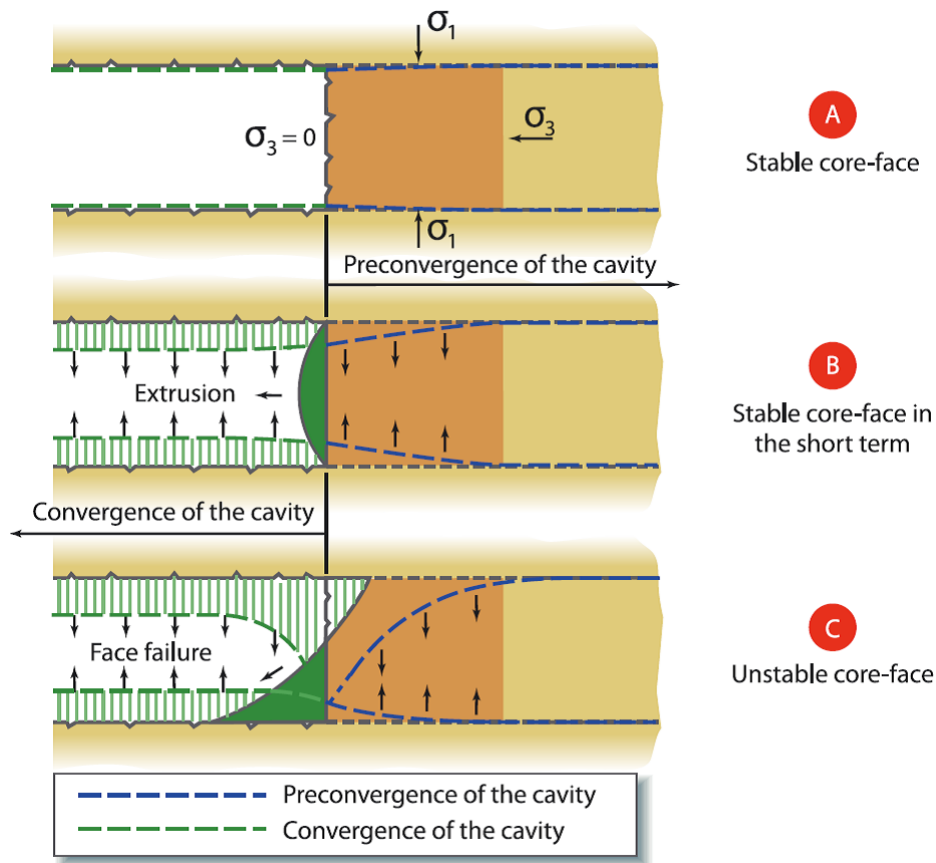
Σχήμα 6. 1.Μηχανισμός συμπεριφοράς μετώπου εκσκαφής σηράγγων και πρόκληση εξώθηση μετώπου εκσκαφής (Πηγή: Lunardi P. , 2008).

Από το προηγούμενο σχήμα παρατηρείται ότι λόγο της παραμόρφωσης του μετώπου εκσκαφής (εξώθηση) προκαλείται σημαντική ανάπτυξη προσυγκλίσεων έμπροσθεν του μετώπου εκσκαφής. Συνεπώς συμπεραίνεται ότι η εξώθηση του μετώπου εκσκαφής σηράγγων είναι αυτή που θα καθορίσει το μέγεθος των συγκλίσεων της σήραγγας. Ουσιαστικά η απώλεια της εδαφικής μάζας λόγω της εξώθησης του μετώπου εκσκαφής, μεταφέρεται στο εσωτερικό της σήραγγας υπό την μορφή συγκλίσεων.

Επίσης το μέγεθος της παραμόρφωσης του μετώπου εκσκαφής (εξώθηση) όπως είναι αναμενόμενο εξαρτάται από την αντοχή της γεώμαζας καθώς και από το μέγεθος της κατακόρυφης τάσης ( $\sigma_1$ ), διότι εάν η κατακόρυφη τάση ( $\sigma_1$ ) υπερβεί την αντοχή του εδάφους τότε αυτό θα αστοχήσει.

Ο Lunardi P., πρότεινε τρεις (3) πιθανούς μηχανισμούς αστοχίας και συμπεριφοράς του μετώπου εκσκαφής, όπως παρουσιάζονται στο **Σχήμα 6.2** και είναι οι ακόλουθοι:

- ✓ Ελαστική συμπεριφορά της γεώμαζας, όπου το μέτωπο εκσκαφής παραμένει ευσταθές και συμβαίνει όταν η αντοχή του γεωυλικού είναι πολύ μεγαλύτερη από την γεωστατική φόρτιση.
- ✓ Ελαστοπλαστική συμπεριφορά της γεώμαζας, όπου το μέτωπο εκσκαφής παραμένει ευσταθές για μικρό χρονικό διάστημα με ταυτόχρονη παραμόρφωσή του. Η κατάσταση αυτή συμβαίνει όταν η αντοχή του γεωυλικού είναι περίπου ίση με την γεωστατική τάση και το υλικό αναπτύσσει πλαστική συμπεριφορά.
- ✓ Αστοχία της γεώμαζας, όπου το μέτωπο εκσκαφής θα καταρρεύσει. Η κατάσταση αυτή συμβαίνει όταν η αντοχή του γεωυλικού είναι μικρότερη από την γεωστατική τάση και η γεώμαζα πλέον θα αστοχήσει.



Σχήμα 6. 2. Μηχανισμοί αστοχίας του μετώπου εκσκαφής, ανάλογα την συμπεριφορά της γεώμαζας του πυρήνα προώθησης του μετώπου εκσκαφής (Πηγή: Lunardi P. , 2008).

Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω, καταλήγουμε ότι η εξώθηση του μετώπου εκσκαφής συνδέεται άμεσα με τις συγκλίσεις της εκσκαφής, όπου για μεγάλες τιμές εξώθησης του μετώπου εκσκαφής αναμένεται να προκληθούν πολύ σημαντικές συγκλίσεις στην σήραγγα.

Με σκοπό να περιοριστεί η εξώθηση του μετώπου εκσκαφής, το μέτωπο εκσκαφής θα πρέπει να προϋποστηριχθεί ή να ενισχυθεί ο πυρήνας προώθησης. Οι μέθοδοι προϋποστήριξης του μετώπου εκσκαφής μεταβάλλονται ανάλογα την μέθοδο διάνοιξης της σήραγγας και ανάλογα τις επικρατούσες συνθήκες. Οι μέθοδοι ενίσχυσης ή προϋποστήριξης του μετώπου εκσκαφής, αποσκοπούν α) στην αύξηση της πλευρικής τάσης ( $\sigma_3$ ) ή b) στην μείωση της κατακόρυφης τάσης ( $\sigma_1$ ) ή c) στην βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών της γεώμαζας.

Οι πιο σύνηθες μέθοδοι αύξηση της σταθερότητας του μετώπου εκσκαφής που εφαρμόζονται σήμερα στην κατασκευή των σηράγγων είναι:



- ✓ Η ενίσχυση του μετώπου με αγκύρια από υαλόνημα (fiberglass) για τη διατήρηση υψηλής τιμής της  $\sigma_3$ .
- ✓ Η πραγματοποίηση εκσκαφής με μηχανήμα TBM, το οποίο ασκεί ταυτόχρονη πίεση στο μέτωπο για τη διατήρηση υψηλής τιμής της  $\sigma_3$ .
- ✓ Η τοποθέτηση άκαμπτων δοκών προπορείας στη στέψη (forepoling) για τη μείωση της τιμής της  $\sigma_1$ .
- ✓ Η τοποθέτηση κατακόρυφων αγκυρίων από την επιφάνεια για τη μείωση της τιμής της  $\sigma_1$ .
- ✓ Η χρήση συνεχών ομπρελών προστασίας (jet grouting, pre-excavation) για τη μείωση της τιμής της  $\sigma_1$ .
- ✓ Η αύξηση της αντοχής του πετρώματος με τη χρήσητσιμεντενέσεων, παγώματος (freezing) και αποστράγγισης στην περίπτωση που υπάρχει νερό υπό πίεση.
- ✓ Η βελτίωση της ευστάθειας στην οροφή (ravelling) με τη χρήση ράβδων προπορείας (spiling).
- ✓ Η πραγματοποίηση της εκσκαφής σε πολλαπλές φάσεις (τμηματική εκσκαφή) για μείωση των διαστάσεων του μετώπου.

Από τις παραπάνω μεθόδους θα γίνει εκτενέστερη αναφορά στην μέθοδο ενίσχυσης του μετώπου με αγκύρια τύπου fiberglass και ενίσχυση με δοκούς προπορείας (forepoling umbrella), διότι θα διερευνηθεί και η επιρροή τους στο πειραματικό τμήμα της παρούσας εργασίας.

## **6.1. Προϋποστήριξη του Μετώπου Εκσκαφής με Αγκύρια Τύπου Fiberglass**

Με σκοπό να επιτευχθεί η ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής, μπορεί να αυξηθεί η πλευρική τάση ( $\sigma_3$ ), εξασφαλίζοντας μία πίεση συγκράτησης σε αυτό.

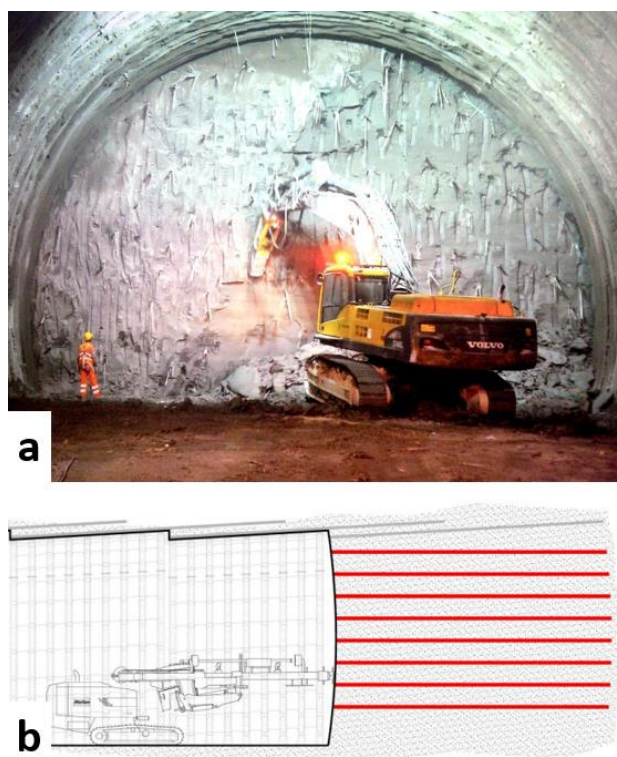
Τα αγκύρια μετώπου fiberglass αποτελούν συνήθως ορθογωνικά στοιχεία από υαλόνημα, τα οποία τοποθετούνται στο μέτωπο εκσκαφής και προσφέρουν παθητική προστασία και συγκράτηση του μετώπου έναντι αστοχίας, λόγω της προκαλούμενης εξώθησης. Τα αγκύρια αυτά λόγω του υλικού τους, έχουν μεγάλη εφελκυστική αντοχή και ελαστικότητα. Καθώς το μέτωπο τείνει να παραμορφωθεί προς

το εσωτερικό της σήραγγας, τα αγκύρια αυτά τα οποία έχουν πακτωθεί σε ισχυρό έδαφος μακριά από το μέτωπο, ανθίστανται στην προκαλούμενη παραμόρφωση του εδαφικού υλικού και λόγω της συνάφειας με το περιβάλλον εδαφικό υλικό, αναπτύσσονται οι κατάλληλες διατμητικές τάσεις και τριβές και το μέτωπο συγκρατείται. Ουσιαστικά με τον τρόπο αυτό ασκείται μια εσωτερική πίεση  $\sigma_3$  στο μέτωπο εκσκαφής που αρχικά η τάση  $\sigma_3 = 0$  και τώρα συγκρατείται.

Η συνήθης πρακτική τοποθέτησης και διασσειολόγησης αυτών των αγκυριών, είναι να μπορούν να προσφέρουν αυτή την τάση  $\sigma_3$  στο μέτωπο εκσκαφής χωρίς να διαρρεύσουν. Στα περισσότερα υπόγεια έργα που έχουν κατασκευαστεί στην Ελλάδα, τα αγκύρια αυτά τοποθετούνται σε τετραγωνικούς καννάβους στο μέτωπο εκσκαφής, με πυκνότητες 1 αγύριο / 4m<sup>2</sup> σε καλά εδάφη, έως 1 αγύριο / 1m<sup>2</sup> σε ασθενή εδάφη. Στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται αγκύρια ορθογωνικής διατομής φέρουσας ικανότητας 150 – 200 kN.

Τα αγκύρια αυτά, έχουν ένα μήκος αλληλοεπικάλυψης μεταξύ τους (overlap area), ώστε να εξασφαλίζεται η συγκράτηση του όγκου – σφήνας στο μέτωπο εκσκαφής που τείνει να ολισθήσει. Το μήκος αυτό στην πλειοψηφία των υπόγειων έργων στον ελλαδικό χώρο κυμαίνεται από 3 – 4m.

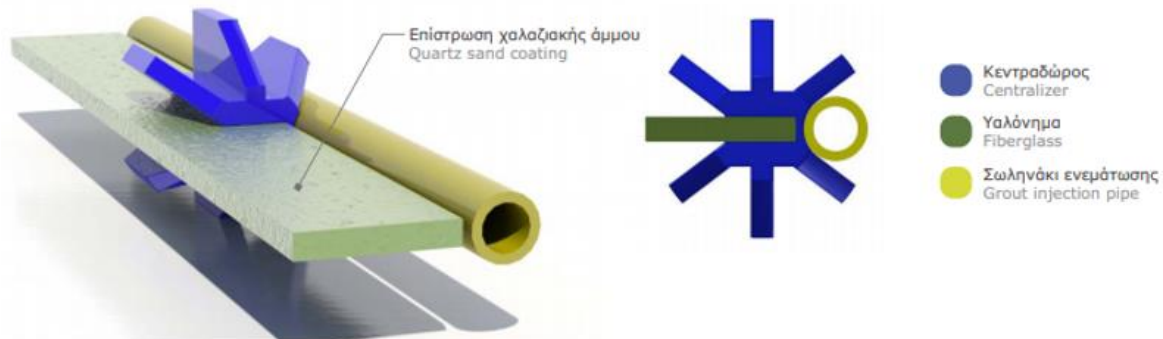
Στην **Εικόνα 6.2** παρουσιάζεται η εφαρμογή της όπλισης του μετώπου εκσκαφής με αγκύρια τύπου fiberglass, για την αύξηση της σταθερότητάς του.



*Εικόνα 6. 2. Εφαρμογή αγκυρίων μετώπου τύπου fiberglass για την ενίσχυση της ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής α) Διάταξη στο μέτωπο εκσκαφής β) Διαμήκης διάταξη (Πηγή: Lunardi P. , 2008).*

Η τοποθέτηση των αγκυρίων στο μέτωπο εκσκαφής, γίνεται με κατασκευή διατρημάτων από διατρητικό φορείο τύπου Jumbo και στην συνέχεια εντός των οπών τοποθετούνται τα αγκύρια με παρουσία τσιμεντενέματος.

Το αγκύριο fiberglass, αποτελείται από μια πλάκα από υαλονήματα, επιστρωμένη με χαλαζιακή άμμο, έναν κεντραδόρο και ένα σωληνάκι ενεμάτωσης. Η πλάκα έχει αρκετή μεγάλη επιφάνεια έτσι ώστε να επιτυγχάνεται αρκετή συνάφεια μεταξύ αυτής και του περιβάλλοντος ενέματος. Η χαλαζιακή άμμος ενισχύει επίσης τις δυνάμεις τριβής που αναπτύσσονται κατά μήκος τους αγκυρίου. Ο κεντραδόρος χρησιμοποιείται για τη σωστή και ευθύγραμμη τοποθέτηση του αγκυρίου εντός του διατρήματος ενώ μέσα από το σωληνάκι εισπνέζεται το ένεμα το οποίο μόλις φτάσει στην άλλη άκρη του σωλήνα, δηλαδή στο τέλος του διατρήματος, ξεχειλίζει και αρχίζει να πληρώνει το διάτρημα από το τέλος του προς την αρχή του. Τυπική διάταξη αγκυρίων fiberglass μετώπου, παρουσιάζεται στην **Εικόνα 6.3**.



Εικόνα 6. 3. Τυπική διάταξη αγκυρίων μετώπου τύπου fiberglass (Πηγή: ELEBOR Α.Ε.Β.Ε.).

## 6.2. Προϋποστήριξη του Μετώπου Εκσκαφής με Ομπρέλα Δοκών Προπορείας

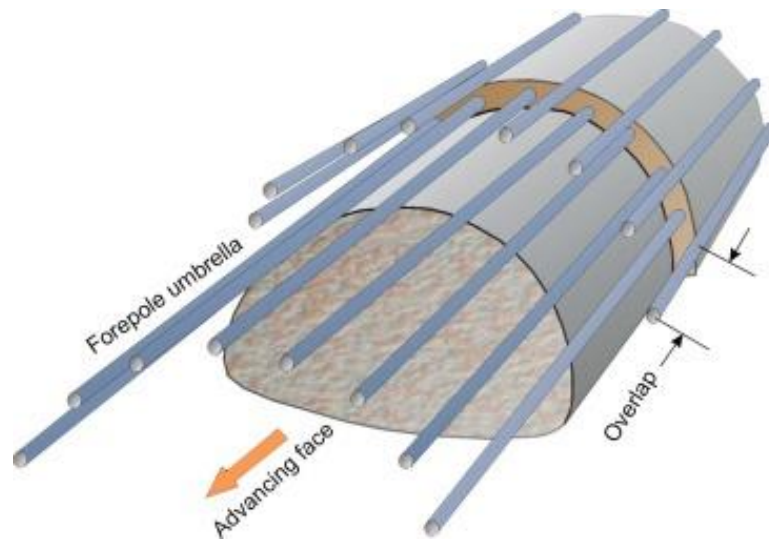
Μία από τις πιο παλαιές μεθόδους για την εξασφάλιση του μετώπου εκσκαφής υπόγειων ανοιγμάτων, είναι η προϋποστήριξη αυτού με στοιχεία- δοκούς μεγάλους μήκους. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται η προστασία του μετώπου εκσκαφής, λόγω της συγκράτησης της υπερκείμενης μάζας έμπροσθεν του μετώπου εκσκαφής, ώστε να αποφευχθεί η αστοχία του, υπό μορφή αποκόλλησης σφήνας εδαφικού υλικού.

Ο μηχανισμός υποστήριξης της ομπρέλας δοκών προπορείας (forepoling umbrella) είναι η υποστήριξη του μετώπου εκσκαφής τόσο κατά τη διαμήκη διεύθυνση της σήραγγας όσο και κατά την εγκάρσια διεύθυνση, δημιουργώντας ένα τοξωτής μορφής κέλυφος υποστήριξης. Οι δοκοί προπορείας λειτουργούν ως αμφιέριστες δοκοί οι οποίες παραλαμβάνουν μέρος της άνωθεν γεωστατικής φόρτισης. Μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής οι δοκοί στηρίζονται στην αδιατάρακτη βραχώμαζα, ενώ πίσω από αυτό, στηρίζονται σε μεταλλικά πλαίσια, όπως παρουσιάζεται στο **Εικόνα 6.4**. Με την ανάληψη φορτίου από τις δοκούς επιτυγχάνεται ο περιορισμός των εδαφικών καθιζήσεων, η αύξηση ευστάθειας μετώπου, η δυνατότητα εκσκαφής μεγαλύτερης διατομής άρα και χρησιμοποίησης μεγαλύτερων μηχανημάτων, άρα η ταχύτερη προχώρηση.



Εικόνα 6. 4. Τρόπος στήριξης ομπρέλας δοκών προπορείας (Πηγή: Ramco Engineering Ltd.).

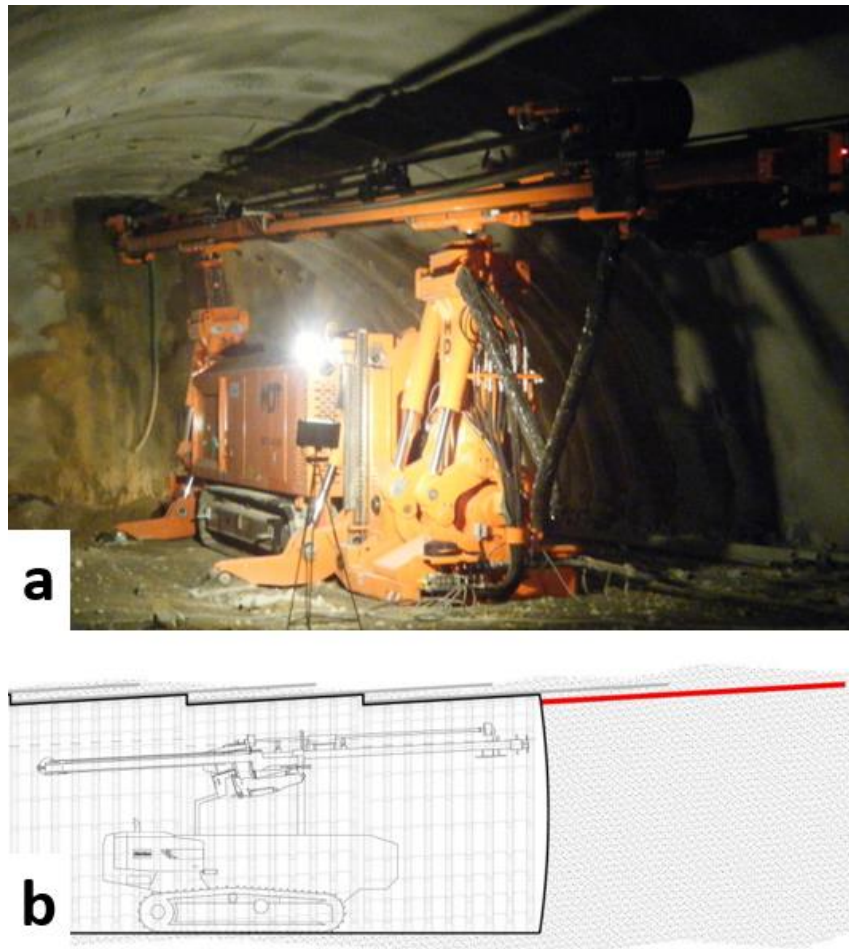
Οι δοκοί προπορείας είναι κοίλες κυκλικές μεταλλικές διατομές διαμέτρου από 70 έως 193.7mm και πάχους μεταξύ 5 έως 10mm. Το μήκος των δοκών αυτών είναι 12m, όσο και το μήκος του container μεταφοράς τους. Η ομπρέλα των δοκών προπορείας τοποθετείται στην στέψη της σήραγγας, σχηματίζοντας ένα τόξο 120°. Οι δοκοί τοποθετούνται σε μια αξονική απόσταση μεταξύ τους που κυμαίνεται μεταξύ 40 -60cm, ενώ μεταξύ δύο διαδοχικών ομπρελών δοκών προπορείας (forepole umbrella), υπάρχει μια περιοχή αλληλοεπικάλυψης (overlap area), της τάξης των 3 – 4m, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 6.3**.



Σχήμα 6. 3. Διάταξη δοκών προπορείας στην τρίτη διάσταση (Πηγή: Hoek E., 2004).

Κατά την διαστασιολόγηση της ομπρέλας των δοκών προπορείας, θα πρέπει να λαμβάνετε υπόψιν ότι δοκός μπορεί να παραλάβει τα υπερκείμενα φορτία χωρίς να διαρρεύσει, δηλαδή θα πρέπει η μέγιστη αναπτυσσόμενη ροπή κάμψης στην δοκό να μην είναι μεγαλύτερη από την ροπή κάμψης που μπορεί να παραλάβει.

Για την τοποθέτηση των δοκών προπορείας στην στέψη της σήραγγας, χρησιμοποιείται ειδικός διατρητικός εξοπλισμός, όπως παρουσιάζεται στην **Εικόνα 6.5**. Η διάτρηση πραγματοποιείται είτε με τα διατρητικά στελέχη του μηχανήματος, είτε με αυτοδιάτρητους δοκούς προπορείας σε ασθενή εδάφη. Η τοποθέτηση των δοκών γίνεται με μια μικρή κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο της τάξης των 4 – 12°, ώστε να μπορεί να διασφαλιστεί η κατασκευή της αμέσως επόμενης ομπρέλας. Στο τέλος της διαδικασίας διάτρησης και τοποθέτησης, εισπιέζεται τσιμεντέμα στο εσωτερικό τους, ώστε να ενισχυθεί το περιβάλλον εδαφικό υλικό.



Σχήμα 6. 4. Τοποθέτηση ομπρέλας δοκών προπορείας α) Διάταξη στο μέτωπο εκσκαφής β) Διαμήκης διάταξη (Πηγή: Lunardi P. , 2008)..

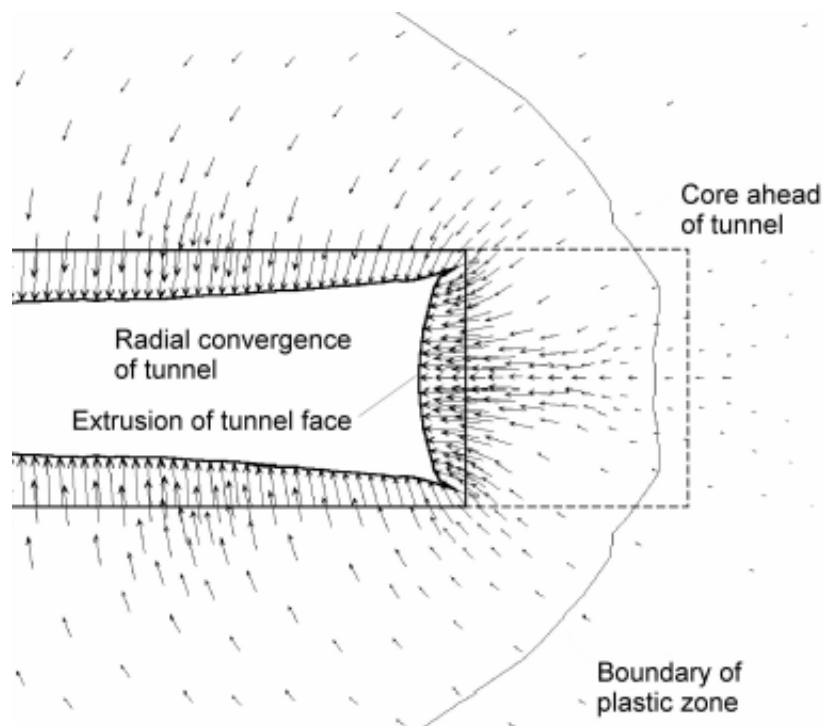
## Πειραματικό Μέρος



## 7. Περιγραφή Αναλύσεων και Βασικών Παραμέτρων

### 7.1. Σκοπός Αναλύσεων

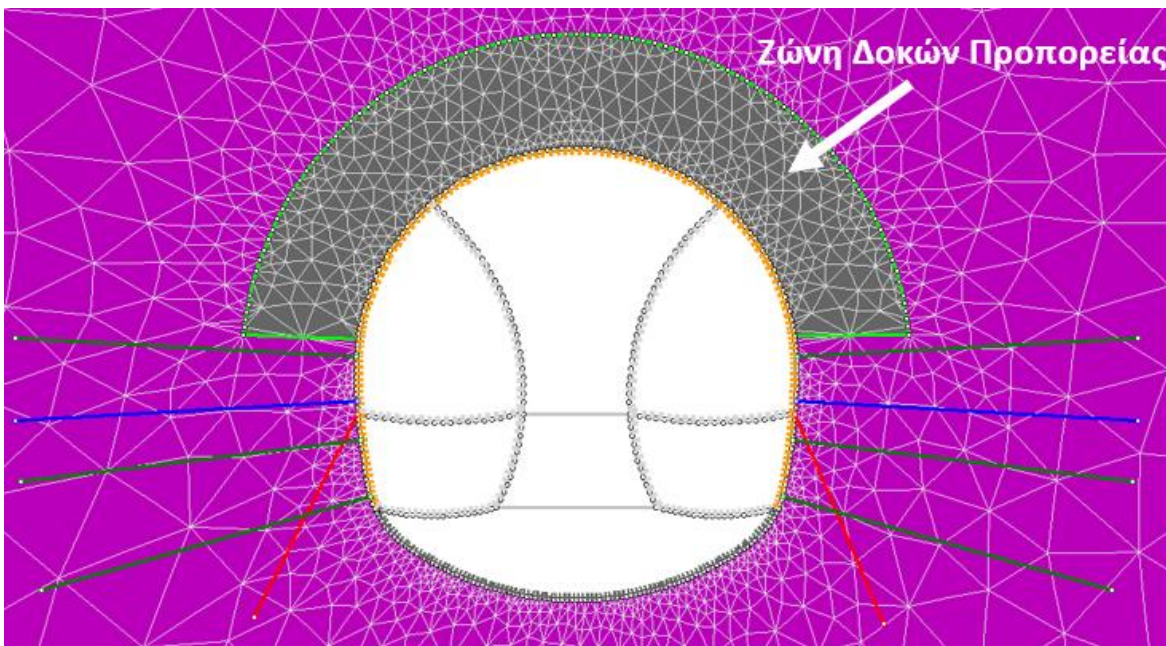
Στην παρούσα εργασία πρόκειται να γίνει συσχέτιση της εξώθησης του μετώπου εκσκαφής με τον συντελεστή αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στην περιοχή του μετώπου εκσκαφής ( $x/D = 0$ ). Όπως προαναφέρθηκε στην *Ενότητα 6*, υπάρχει μεγάλη συσχέτιση μεταξύ της εξώθησης του μετώπου εκσκαφής και του μεγέθους των συγκλίσεων που θα αναπτυχθούν κατά την διάνοιξη της σήραγγας. Συνεπώς εφαρμόζοντας μια μυθολογία προσδιορισμού και σχεδιασμό της καμπύλης σύγκλισης – αποτόνωσης, όπως αυτές που περιγράφονται στην *Ενότητα 5*, θα μπορέσει να προσδιοριστεί ο βαθμός αποτόνωσης που διαμορφώνεται στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας. Όπως παρουσιάζεται και στο **Σχήμα 7.1**, το μέγεθος της εξώθησης του μετώπου εκσκαφής, φαίνεται πως διαμορφώνει την κατανομή και το μέγεθος των συγκλίσεων στο εσωτερικό της σήραγγας. Συνεπώς η απώλεια του εδαφικού όγκου στο μέτωπο εκσκαφής ανακατανέμονται στην περίμετρο της σήραγγας και για τον λόγο αυτό αναπτύσσονται οι συγκλίσεις της εκσκαφής.



*Σχήμα 7. 1. Διαμόρφωση συγκλίσεων στην περίμετρο της σήραγγας, βάσει της αναπτυσσόμενης εξώθησης του μετώπου εκσκαφής (Πηγή: Hoek E. , 2007).*

Με την συσχέτιση της εξώθησης του μετώπου εκσκαφής με την αντίστοιχη σύγκλιση στην περιοχή του μετώπου εκσκαφής, θα μπορέσει να προσδιοριστεί ο ισοδύναμος συντελεστής αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στην περιοχή του μετώπου εκσκαφής και συνεπώς θα μπορέσει να εισαχθεί η τρίτη διάσταση σε μία διδιάστατη αριθμητική ανάλυση. Συνεπώς η συμπεριφορά του μετώπου εκσκαφής θα μπορέσει πλέον λαμβάνεται υπόψιν σε διδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις και να μην απαιτείται η ανάπτυξη τριδιάστατων αριθμητικών μοντέλων.

Σήμερα, έχουν γίνει διάφορες προσπάθειες – τεχνάσματα, ώστε να μπορέσει να προσομοιωθεί σε διδιάστατη αριθμητική ανάλυση η συμπεριφορά και η προϋποστήριξη του μετώπου εκσκαφής. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η προσπάθεια προσομοίωσης της προϋποστήριξης του μετώπου εκσκαφής με ομπρέλα δοκών προπορείας, όπως παρουσιάζεται στην **Εικόνα 7.1**. Κατά την μέθοδο αυτή προσομοιώνεται άνωθεν της εκσκαφής μια ενισχυμένη ζώνη με αυξημένο μέτρο ελαστικότητας, βασιζόμενο στην δυσκαμψία των δοκών και τις σύμμεικτες ιδιότητες μεταξύ χάλυβα και εδάφους. Η μέθοδος αυτή δεν αντιπροσωπεύει την πραγματική λειτουργία της ομπρέλας των δοκών προπορείας, καθώς μεταβιβάζει τα άνωθεν φορτία εκατέρωθεν της εκσκαφής και όχι έμπροσθεν αυτής όπως είναι η πραγματική λειτουργία των δοκών προπορείας.



Εικόνα 7. 1. Προσομοίωση της ομπρέλας των δοκών προπορείας σε διδιάστατη αριθμητική ανάλυση μέσω της μεθόδου της ενισχυμένης ζώνης (Πηγή: Γεωργίου Δ.).

Με την δημιουργία ισοδύναμης σχέσης προσδιορισμού του βαθμού αποτόνωσης στο μέτωπο εκσκαφής και χρήσης εμπειρικών μεθόδων προσδιορισμού της μείωσης της εξώθησης του μετώπου εκσκαφής λόγω της προϋποστήριξης αυτού, τότε θα μπορέσει να γίνει προσομοίωση της προϋποστήριξης του μετώπου εκσκαφής με την χρήση του συντελεστή αποτόνωσης.

Ο προσδιορισμός του ισοδύναμου βαθμού αποτόνωσης στο μετώπου εκσκαφής σηράγγων, βασίστηκε σε συσχέτιση της σύγκλισης με την εξώθησης του μετώπου εκσκαφής, από αποτελέσματα τριδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων από την διαδικαστική διατριβή του κ. Δ. Γεωργίου με τίτλο «Υπολογιστική Διερεύνηση της Ευστάθειας του Μετώπου Σηράγγων» με την χρήση του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Simulia Abaqus.

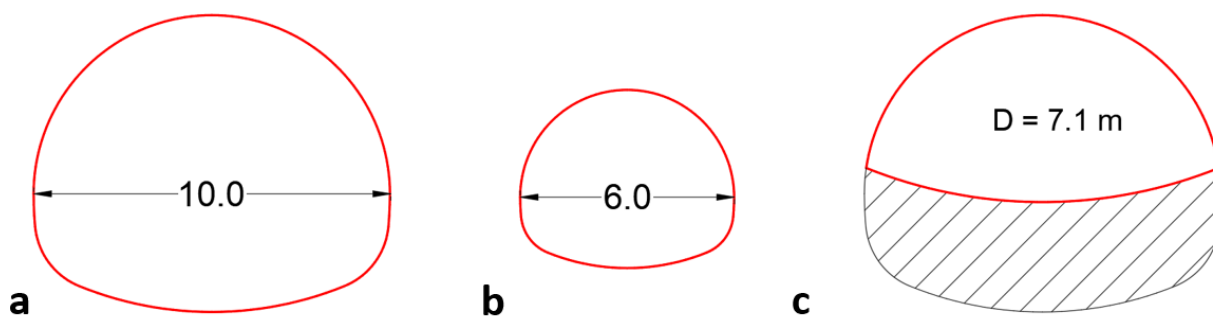
Για την μετατροπή της σύγκλισης σε ισοδύναμη αποτόνωση αξιοποιήθηκαν όλες οι μέθοδοι σύγκλισης – αποτόνωσης που περιεγραφήκαν στην *Ενότητα 5*. Συγκεκριμένα οι μέθοδοι *Kanvadas M (1998)* και *Carranza Torres (2002)* πραγματοποιήθηκαν μεσώ ανάλυσης σε υπολογιστικό φύλλο Excel, ενώ οι μέθοδοι *Ducan – Fama (1993)* και *Carranza Torres & Fairhurst (1999)* βασίστηκαν σε αναλύσεις με το λογισμικό *RocSupport v.5* της εταιρείας *RocScience*. Παράλληλα πραγματοποιήθηκαν διδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων *RS2 v.11* της εταιρείας *RocScience*.

Στην συνέχεια γίνεται αναλυτική περιγραφή στις προσομοιώσεις που έγιναν με το λογισμικό *Rocsupport* και τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων *RS2*.

## 7.2. Παράμετροι Προσομοίωσης

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι το σύνολο των αναλύσεων αφορούσε περιπτώσεις ανυποστήρικτου μετώπου εκσκαφής, εκτός ελαχίστων περιπτώσεων που εξετάστηκαν περιπτώσεις με την χρήση ακυρίων μετώπου τύπου fiberglass ή χρήση ομπρέλας δοκών προπορείας για την προϋποστήριξη του μετώπου εκσκαφής.

Όσον αφορά την εξεταζόμενη γεωμετρία της σήραγγας, αυτή αφορούσε περιπτώσεις πεταλοειδούς διατομής με ισοδύναμη διάμετρο **D = 6, 10 m** και ολομέτωπη εκσκαφή, καθώς και την περίπτωση τμηματικής εκσκαφής της σήραγγας με διάμετρο **D = 10 m**, όπου λόγω της τμηματικής εκσκαφής προκύπτει ισοδύναμη διάμετρος **D = 7.1 m**. Στο **Σχήμα 7.2**, παρατίθενται οι γεωμετρίες εκσκαφής που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία.



Σχήμα 7. 2. Εξεταζόμενες γεωμετρίες εκσκαφής α) Ολομέτωπη εκσκαφή διαμέτρου 10 m β) Ολομέτωπη εκσκαφή διαμέτρου 6 m γ) Τμηματική εκσκαφή ισοδύναμης διαμέτρου 6 m.

Όσον αφορά το ύψος υπερκείμενων γαιών της σήραγγας, αυτό ήταν μεταβλητό και καθόρισε το καταστατικό κριτήριο αστοχίας του γεωυλικού. Συγκεκριμένα εξετάστηκαν περιπτώσεις ρηχών σηράγγων με ύψος υπερκείμενων γαιών από τον άξονα εκσκαφής  $H = 10, 15, 20, 40 \text{ m}$  και στις περιπτώσεις αυτές εφαρμόστηκε το κριτήρια αστοχίας Mohr – Coulomb.

Όσον αφορά τις περιπτώσεις βαθιών σηράγγων, σε αυτές χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο αστοχίας Generalized Hoek & Brown (2002) και το ύψος των υπερκείμενων γαιών από τον άξονα της σήραγγας ορίστηκε σε  $H = 100, 150, 200 \text{ m}$ .

Οι παράμετροι εδάφους που ελήφθησαν υπόψιν στις αναλύσεις των ρηχών σηράγγων, παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.1, ενώ οι παράμετροι της βραχώμαζας που ελήφθησαν υπόψιν στις περιπτώσεις βαθιών σηράγγων παρατίθενται στον Πίνακα 7.2. Να σημειωθεί ότι οι παράμετροι της βραχώμαζας του κριτηρίου αστοχίας Generalized Hoek & Brown (2002), υπολογίστηκαν με το λογισμικό *RSDData* της εταιρείας *Rocscience* και ελήφθη βαθμός διαταραχής βραχώμαζας  $D = 0$ . Επίσης για τον άρρηκτο βράχο ελήφθη αντοχή σε θλίψη  $\sigma_{ci} = 10 \text{ MPa}$ , δείκτης  $m_i = 10$  και μέτρο παραμορφωσιμότητας  $E_i = 2 \text{ GPa}$ .

Έδαφος	Ειδικό βάρος ( $\gamma$ )	Συνοχή (c)	Γωνία τριβής ( $\phi$ )	Μέτρο ελαστικότητας (E)
<b>A</b>	20 kN/m <sup>3</sup>	20 KPa	22.5 °	80 MPa
<b>B</b>	20 kN/m <sup>3</sup>	20 KPa	25 °	100 MPa
<b>C</b>	20 kN/m <sup>3</sup>	30 KPa	25 °	150 MPa
<b>D</b>	20 kN/m <sup>3</sup>	30 KPa	30 °	170 MPa
<b>E</b>	20 kN/m <sup>3</sup>	50 KPa	35 °	170 MPa
<b>F</b>	20 kN/m <sup>3</sup>	50 KPa	35 °	400 MPa

Πίνακας 7. 1. Παράμετροι εδάφους.

Βραχώμαζα	Ειδικό βάρος ( $\gamma$ )	GSI	Αντοχή βραχώμαζας ( $\sigma_m$ )	Μέτρο παραμορφωσιμότητας βραχώμαζας ( $E_m$ )
<b>A</b>	25 kN/m <sup>3</sup>	15	0.67 MPa	72.9 MPa
<b>B</b>	25 kN/m <sup>3</sup>	25	0.95 MPa	119.7 MPa
<b>C</b>	25 kN/m <sup>3</sup>	35	1.24 MPa	226.8 MPa
<b>D</b>	25 kN/m <sup>3</sup>	45	1.56 MPa	447.3 MPa

Πίνακας 7. 2. Παράμετροι βραχώμαζας.

Να σημειωθεί πως σε όλες τις αναλύσεις ελήφθη γωνία διαστολικότητας  $\delta = \varphi/4$ . Επίσης οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν εξέτασαν περιπτώσεις με διαφορετικό συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων ( $K_0$ ) με τιμές **0.5** και **1**.

Επίσης σε όλες τις αναλύσεις ο δείκτης Poisson, ορίστηκε σε  **$\nu = 0.333$** .

### 7.3. Αναλύσεις με το Λογισμικό Rocsupport

Όπως προαναφέρθηκε στην Ενότητα 7.1, με το λογισμικό Rocsupport της εταιρίας Rocscience, μορφώθηκαν καμπύλες σύγκλισης – αποτόνωσης με τις μεθόδους *Ducan – Fama (1993)* και *Carranza Torres & Fairhurst (1999)*, λόγω ότι οι προηγούμενες μέθοδοι περιλαμβάνονται στο λογισμικό και δεύτερον η μέθοδος *Carranza Torres & Fairhurst (1999)* απαιτεί επαναληπτική διαδικασία, όπου διευκολύνεται να πραγματοποιηθεί μέσω του λογισμικού παρά σε υπολογιστικό φύλλο Excel.

Οι παράμετροι που υπεισέρχονται στο λογισμικό για την ανάλυση, είναι οι ακόλουθες:

- ✓ Ακτίνα σήραγγας (R)
- ✓ Γεωστατικές τάσεις στο βάθος της εκσκαφής ( $p_0$ )
- ✓ Μέτρο ελαστικότητας εδάφους ή βραχώμαζας ( $E_m$ )
- ✓ Μηχανικές παράμετροι εδάφους ( $c, \phi$ )
- ✓ Μηχανικές βραχώμαζας ( $m_b, a, s$ )

Με την εισαγωγή των παραπάνω παραμέτρων μορφώνεται η αντίστοιχη καμπύλη σύγκλισης – αποτόνωσης, όπου στην συνέχεια εξάγεται σε υπολογιστικό φύλλο Excel και μέσω της αναζήτησης της

επιθυμητής σύγκλισης ( $u_R$ ), προσδιορίζεται η ισοδύναμη πίεση υποστήριξης ( $p_i$ ) και στην συνέχεια ο αντίστοιχος βαθμός αποτόνωσης ( $\lambda$ ).

Να σημειωθεί ότι το λογισμικό δεν μπορεί να λάβει υπόψιν απευθείας την επιρροή του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων ( $K_o$ ) με αποτέλεσμα να εισάγεται έμμεσα με την σταθμισμένη γεωστατική τάση ( $p_o$ ) ως ακολούθως:

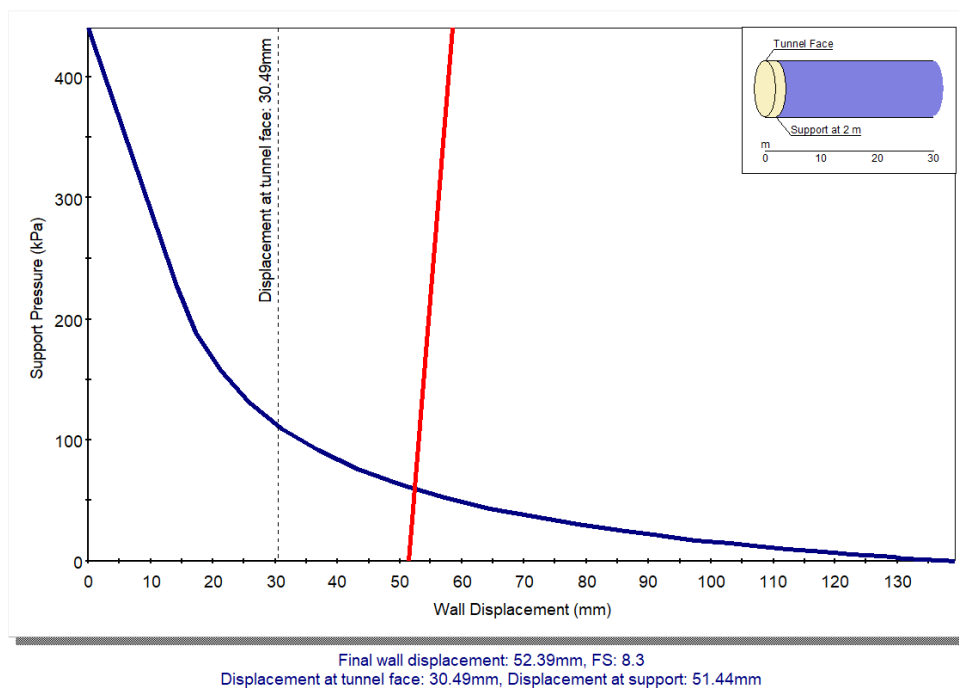
$$p_o = 0.5 \times (1 + K_o) \times \gamma \times H$$

, όπου:

- ✓  $K_o$ : ο συντελεστής ουδετέρων ωθήσεων.
- ✓  $\gamma$ : το ειδικό βάρος της γεώμαζας.
- ✓  $H$ : το ύψος των υπερκειμένων γαιών.

Επίσης το λογισμικό Rocsupport, επιτρέπει την προσομοίωση της προσωρινής υποστήριξης της σήραγγας με σκοπό να υπολογιστούν οι τελικές συγκλίσεις με την επίδραση των μέτρων υποστήριξης καθώς υπολογίζεται και ο αντίστοιχος συντελεστής ασφαλείας (**SF**).

Στο **Σχήμα 7.3**, παρατίθεται μια χαρακτηριστική ανάλυση στο λογισμικό Rocsupport για ρηχή σήραγγα με την μέθοδο *Duncan – Fama (1993)* για λόγο  $H/D = 2$ , συντελεστή υπερφόρτωσης  $N_s = 9.3$  και προσωρινή υποστήριξη από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους  $t = 10$  cm σε απόσταση 2 m πίσω από το μέτωπο εκσκαφής. Από την ανάλυση προκύπτει τελική σύγκλιση τοιχώματος  $u_R = 5.1$  cm και συντελεστής ασφαλείας της υποστήριξης **SF = 8.3**.



Σχήμα 7. 3. Ανάλυση ρηχής σήραγγας με το λογισμικό Rocsupport και την παρουσία μέτρων υποστήριξης.

#### 7.4. Αναλύσεις με τον Κώδικα Πεπερασμένα Στοιχείων RS2

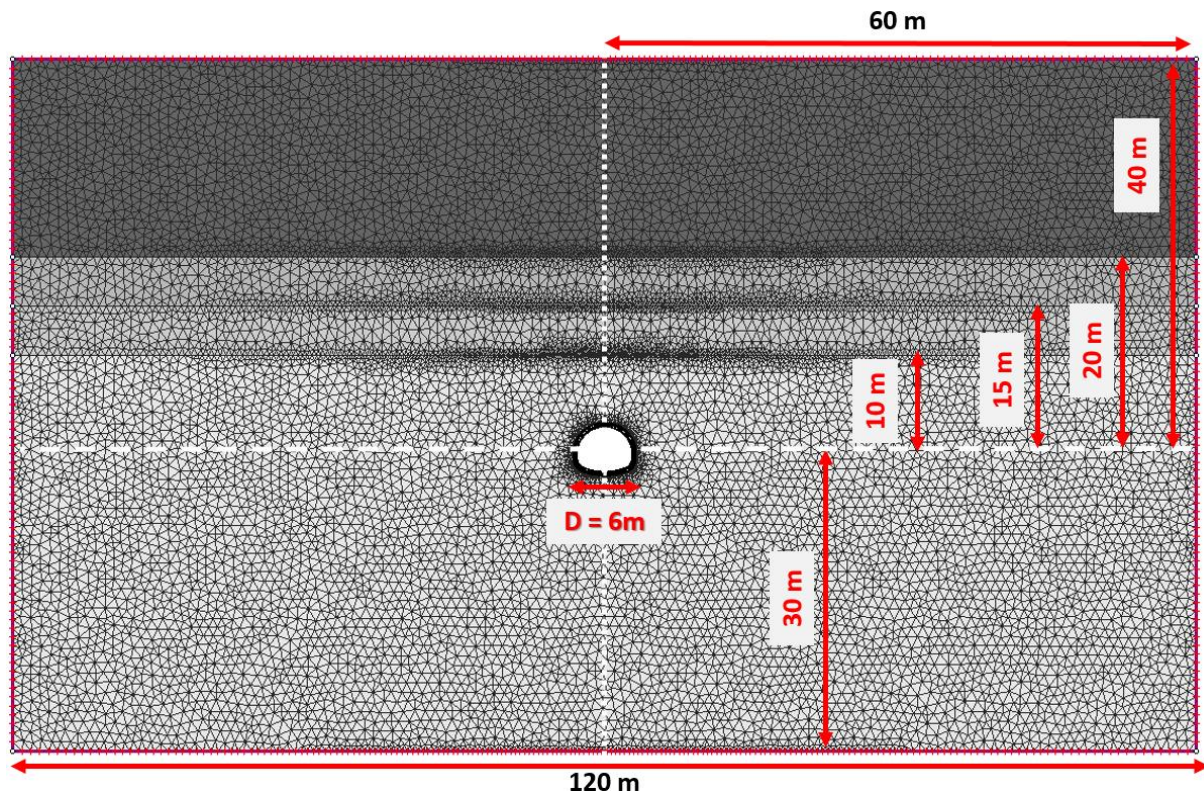
Όπως προαναφέρθηκε στην Ενότητα 7.1, το σύνολο των αναλύσεων διερευνήθηκε και με τον διδιάστατο κώδικα πεπερασμένων στοιχείων RS2 της εταιρείας Rocscience, ώστε να σχηματιστεί και η αντίστοιχη καμπύλη σύγκλισης – αποτόνωσης μέσω αριθμητικών αναλύσεων.

Τα αριθμητικά προσομοιώματα που μορφώθηκαν είχαν τις ακόλουθες διαστάσεις, όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.4 – 7.5 και είναι οι ακόλουθες:

- ✓ Κάτω όριο: **30 m** από άξονα σήραγγας.
- ✓ Πλευρικά όρια: **60 m** από άξονα σήραγγας.
- ✓ Άνω όρια: **10, 15, 20, 40 m** από άξονα σήραγγας, ανάλογα το ύψος υπερκειμένων γαιών.

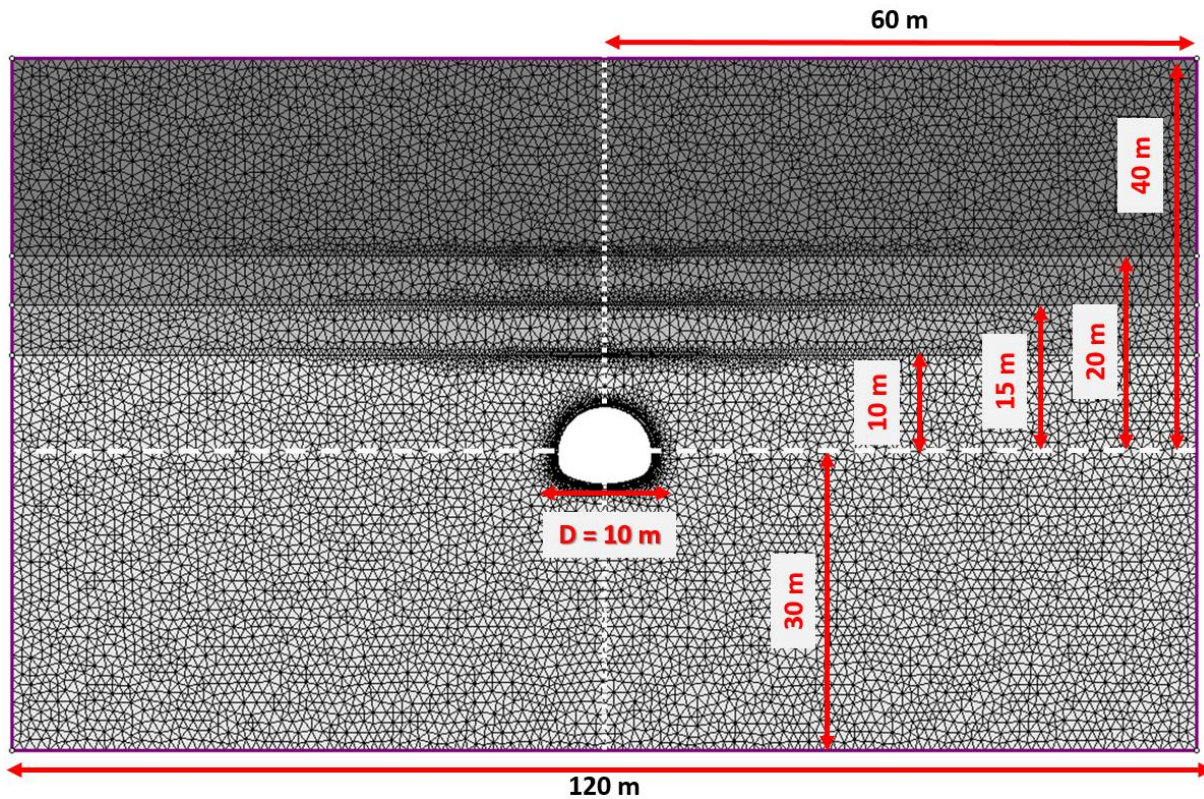
Τα παραπάνω όρια (πλευρικά και κάτω) ορίστηκαν σε τέτοιες αποστάσεις, ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα επιρροής συνόρων (boundary effect).

Να σημειωθεί ότι στην περίπτωση της τμηματικής εκσκαφής με ισοδύναμη διάμετρο  $D = 7.1 \text{ m}$ , έγινε παρομοίωση της εκσκαφής για διάμετρο  $D = 10 \text{ m}$ , με εκσκαφή μόνο της Α φάσης ανασκαφής (top heading).



Σχήμα 7. 4. Διδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα για διάμετρο εκσκαφής  $D = 6$  m.





Σχήμα 7. 5. Διδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα για διάμετρο εκσκαφής  $D = 10 \text{ m}$ .

Στα αριθμητικά προσομοιώματα, χρησιμοποιήθηκαν τριγωνικά – τρικομβικά στοιχεία συνεχούς μέσου, με επιλογή αύξησης της πυκνότητας του κανναβιού πεπερασμένων στοιχείων (mesh) γύρω από την εκσκαφή για μεγαλύτερη και καλύτερη ποιότητα λήψης δεδομένων. Συγκεκριμένα το πλήθος των πεπερασμένων στοιχείων (elements) και κόμβων (nodes) που χρησιμοποιήθηκαν στις αριθμητικές αναλύσεις, παρουσιάζονται στον **Πίνακα 7.3**.

Διάμετρος (D)	Πεπερασμένα Στοιχεία (Elements)	Κόμβοι (Nodes)
6 m	28227	14699
10 m	25700	13366

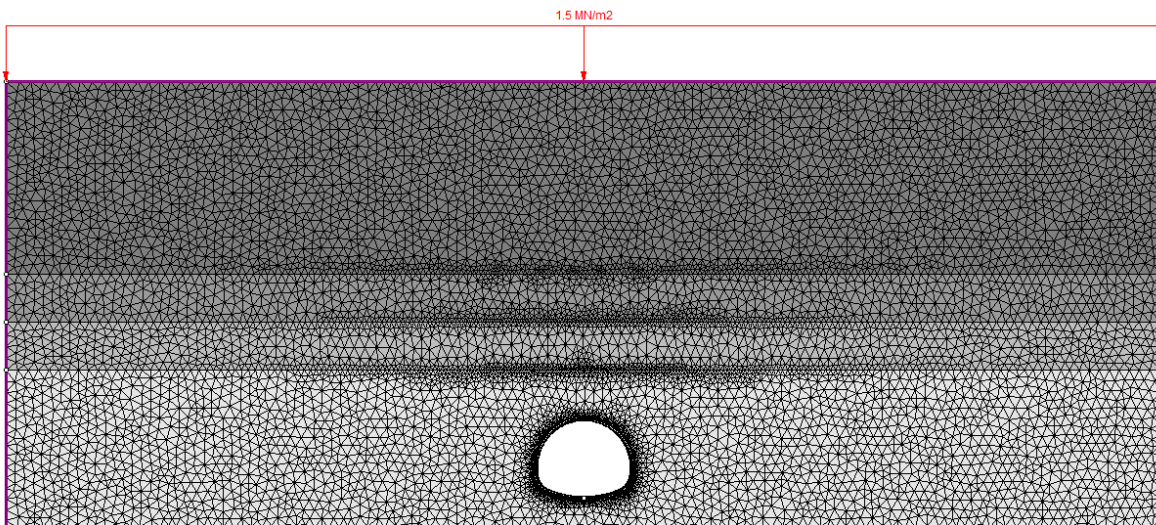
Πίνακας 7. 3. Χαρακτηριστικά αριθμητικών προσομοιωμάτων.

Στις περιπτώσεις προσομοίωσης των βαθιών εκσκαφών, η προσομοίωση της γεώμαζας άνωθεν του ανώτατου ορίου του αριθμητικού προσομοιώματος, έγινε με την προσθήκη ομοιόμορφα κατανεμημένου φορτιού ( $Q$ ), όπως παρουσιάζεται στο **Σχήμα 7.6**, εφαρμόζοντας την ακόλουθη σχέση για τον υπολογισμό του:

$$Q = (H - 40\text{m}) \times \gamma$$

, όπου:

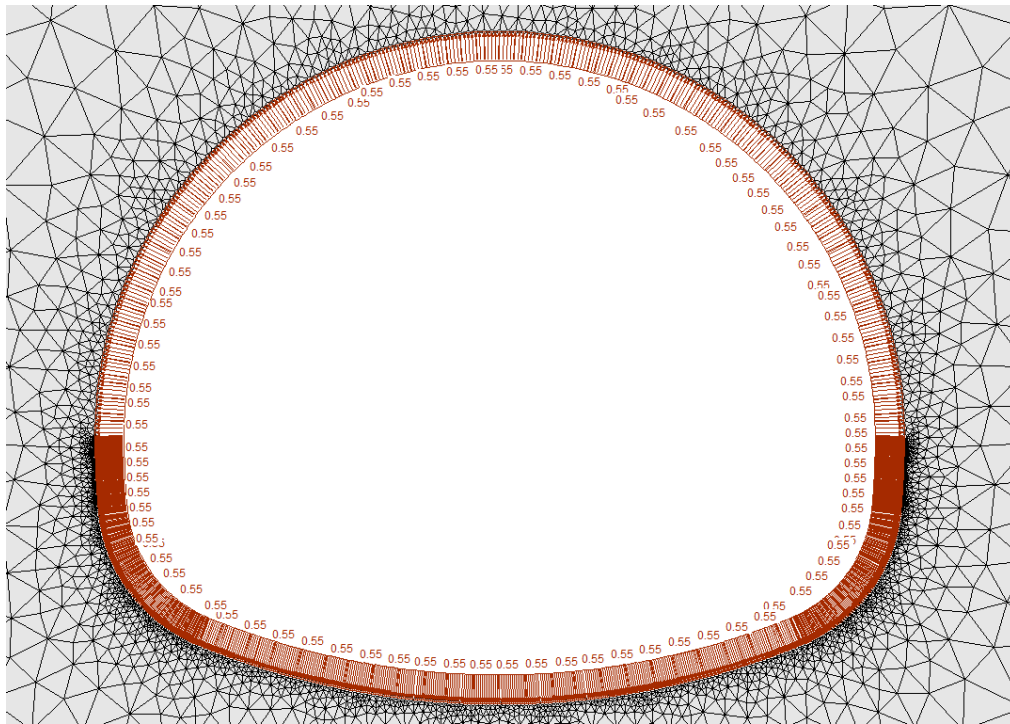
- ✓ **H**: το ύψος των υπερκείμενων γαιών από τον άξονα της σήραγγας.
- ✓  **$\gamma$** : το ειδικό βάρος της γεώμαζας.
- ✓ **H**: το ύψος των υπερκειμένων γαιών.



**Σχήμα 7. 6.** Προσομοίωση βαθιάς εκσκαφής με την προσθήκη κατανεμημένου φορτίου ( $Q$ ) στο άνω όριο του μοντέλου (+40 m).

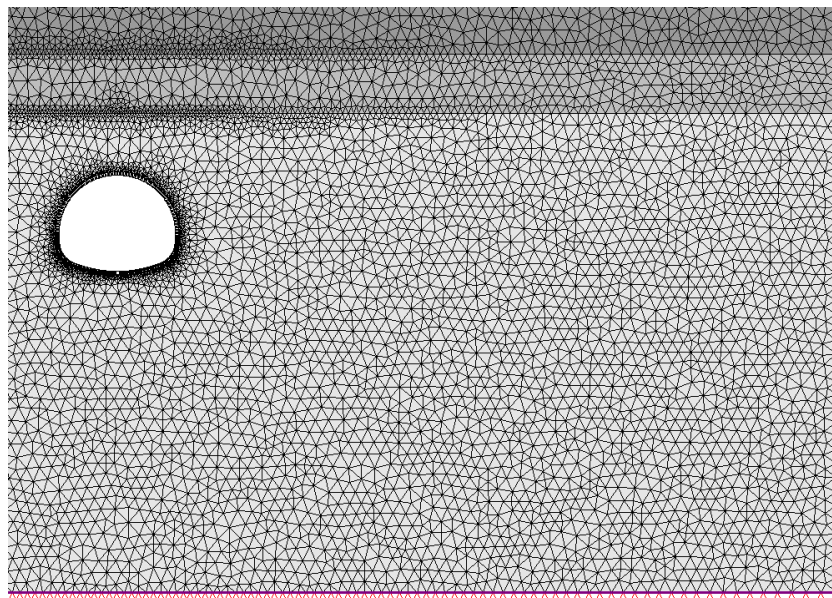
Με την χρήση του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων δύναται η δυνατότητα να προσομοιωθεί η επιρροή του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων ( $K_0$ ), κάτι το οποίο δεν δύναται να προμισθωθεί στο λογισμικό *Rocsupport*.

Όσον αφορά την προσομοίωση του συντελεστή αποτόνωσης ( $\lambda$ ), αυτός προσομοιώθηκε με την επιβολή ίση και αντίθετης εσωτερικής πίεσης συναρτήσεως των γεωστατικών τάσεων καθοριζόμενη από τον βαθμό αποτόνωσης ( $\lambda$ ), όπως παρουσιάζεται στο **Σχήμα 7.7**. Συγκεκριμένα γινόταν απομείωση των τάσεων (induced stress) με ρυθμό  $\Delta\lambda = 1\%$ , ανά βήμα προσομοίωσης. Συνεπώς διαμορφώθηκαν σε κάθε αριθμητική ανάλυση **101 βήματα ανάλυσης**, συμπεριλαμβανομένου και του σταδίου προσομοίωσης του γεωστατικού πεδίου.



Σχήμα 7. 7. Προσομοίωση της μεθόδου αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στο αριθμητικό προσομοίωμα με την επιβολή απομειωμένης εσωτερικής πίεσης.

Οι συνοριακές συνθήκες που επιβλήθηκαν στο αριθμητικό προσομοίωμα, όπως παρουσιάζεται το **Σχήμα 7.8**, ήταν κυλήσεις στα πλευρικά όρια του μοντέλου, αρθρώσεις στον πυθμένα, ενώ το άνω όριο παρέμεινε ελεύθερο.

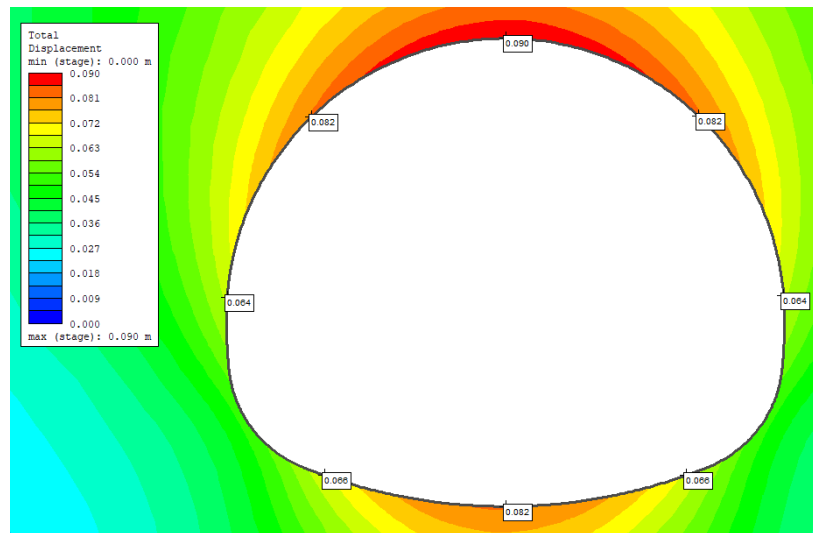


Σχήμα 7. 8. Επιβληθείς συνοριακές συνθήκες αριθμητικού προσομοιώματος.

Για την μόρφωση της καμπύλης σύγκλισης – αποτόνωσης, έγινε καταγραφή και εξαγωγή των ολικών μετακινήσεων σε οκτώ (8) χαρακτηριστικές θέσεις περίξ της εκσκαφής, με την μεταξύ τους γωνιά περί τις 45°, σε κάθε στάδιο της αριθμητικής ανάλυσης, όπως παρουσιάζεται στο **Σχήμα 7.9**. Στην συνέχεια η σύγκλιση που αξιοποιήθηκε για την χάραξη της καμπύλης σύγκλισης – αποτόνωσης, πρόκυψε από τον μέσο όρο των δέκα μετρήσεων στις αντίστοιχες θέσεις, ως ακολούθως:

$$\bar{u} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i$$

, όπου  $n = 8$ .



Σχήμα 7. 9. Θέσεις καταγραφής των συγκλίσεων της σήραγγας, ανά βήμα αποτόνωσης.

## 7.5. Συντελεστής Ευστάθειας Μετώπου Εκσκαφής (Georgiou D. et al., 2021)

Οι Γεωργίου Δ., Καλός Α, Καββαδάς Μ, στα πλαίσια διερεύνησης της ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής σήραγγας τόσο σε μικρά υπερκείμενα (ρηχές σήραγγες – max H: 30m), όσο και σε μεγαλύτερα υπερκείμενα (βαθείς σήραγγες – max H: 200m), πραγματοποίησαν τριδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Simulia AQAQUS. Στις αναλύσεις προσομοιώθηκε η ολομέτωπη διάνοιξη σήραγγας πεταλοειδούς διατομής με προσωρινή υποστήριξη από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Η συμπεριφορά του γεωυλικού στις ρηχές σήραγγες ακολούθησε το καταστατικό κριτήριο αστοχίας Mohr Coulomb, όπου προσομοιωθήκαν εδαφικές συνθήκες, ενώ στις βαθιές σήραγγες εφαρμόστηκε το

καταστατικό κριτήριο αστοχίας Generalized Hoek and Brown, όπου προσομοιώθηκε το γεωυλικού ως βραχώμαζα.

Από τις αναλύσεις προέκυψε ένας κοινός συντελεστής ασφαλείας μετώπου εκσκαφής  $\Lambda_{Fo}$ , που βρίσκει εφαρμογή σε ρηχές και βαθιές σήραγγες. Για τιμή  $\Lambda_{Fo} < 1$ , το μέτωπο της εκσκαφής χαρακτηρίζεται ως δυνητικά ασταθές, ενώ για τιμή  $\Lambda_{Fo} \geq 1$ , το μέτωπο της εκσκαφής χαρακτηρίζεται ως δυνητικά ευσταθές. Ο συντελεστής ασφαλείας  $\Lambda_{Fo}$ , υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\Lambda_{Fo} = \frac{3.8 \times \frac{\sigma_{cm}}{\gamma \times H} \times \left(\frac{H}{D}\right)^{0.35}}{\sqrt{1 + \frac{2}{3}K_o}}$$

, όπου:

- ✓  $\sigma_{cm}$ : η αντοχή σε θλίψη της βραχώμαζας ( $\sigma_{cm} = 2 \times c \times \tan\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right)$  με εφαρμογή του κριτηρίου αστοχίας Mohr Coulomb,  $\sigma_{cm} = \frac{\sigma_{ci}}{50} \exp\left(\frac{GSI}{25.5}\right)$  με εφαρμογή του κριτηρίου αστοχίας Generalized Hoek and Brown)
- ✓  $\gamma$ : ειδικό βάρος εδάφους ή βραχώμαζας
- ✓  $H$ : ύψος υπερκείμενων γαιών από τον άξονα της σήραγγας
- ✓  $D$ : διάμετρος σήραγγας
- ✓  $K_o$ : συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων

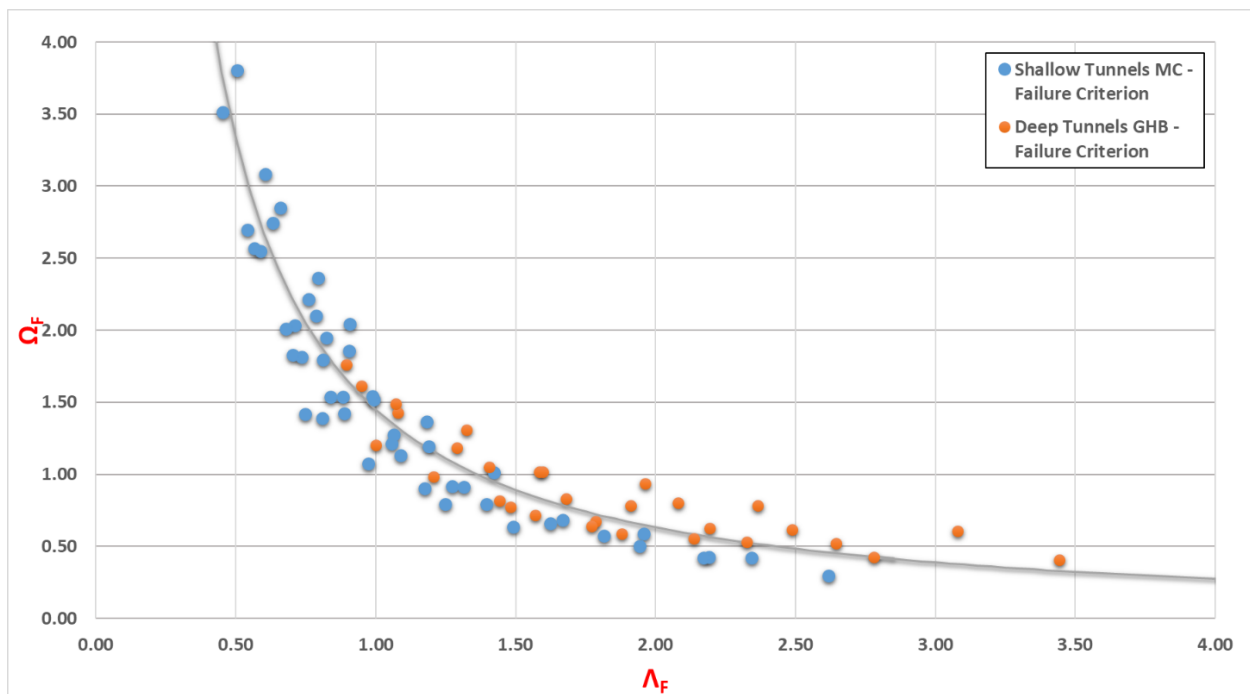
Ο παραπάνω συντελεστής ασφαλείας ανυποστήρικτου μετώπου εκσκαφής  $\Lambda_{Fo}$ , συνδέεται με την αδιάστατη εξώθηση μετώπου εκσκαφής  $\Omega_F$  με την ακόλουθη σχέση:

$$\Omega_F = 1.4 \times (\Lambda_{Fo})^{-1.2}$$

, όπου  $\Omega_F = \left(\frac{U_h}{D}\right) \left(\frac{E}{p_o}\right)$ ,

- ✓  $U_h$ : μετρούμενη εξώθηση μετώπου εκσκαφής
- ✓  $D$ : διάμετρος σήραγγας
- ✓  $E$ : μέτρο ελαστικότητας εδάφους ή βραχώμαζας
- ✓  $p_o$ : γεωστατική τάση  $p_o = 0.5 \times (1 + K_o) \times \gamma \times H$

Η αποτύπωση της παραπάνω σχέσης, παρουσιάζεται στο **Διάγραμμα 7.1**.



**Διάγραμμα 7. 1.** Συσχέτιση συντελεστή ασφαλείας  $\Lambda_{Fo}$  με εξώθηση μετώπου εκσκαφής  $\Omega_F$  (Πηγή: Γεωργίου Δ.).

Ο παραπάνω συντελεστής ασφαλείας μετώπου εκσκαφής ( $\Lambda_{Fo}$ ) πρόκειται να αξιοποιηθεί στην παρούσα εργασία, ώστε να μπορέσει να συσχετιστεί με τον εκτιμώμενο βαθμό αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στην θέση του μετώπου εκσκαφής, καθώς ο παραπάνω συντελεστής περιγράφει πλήρως τις συνθήκες ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής.

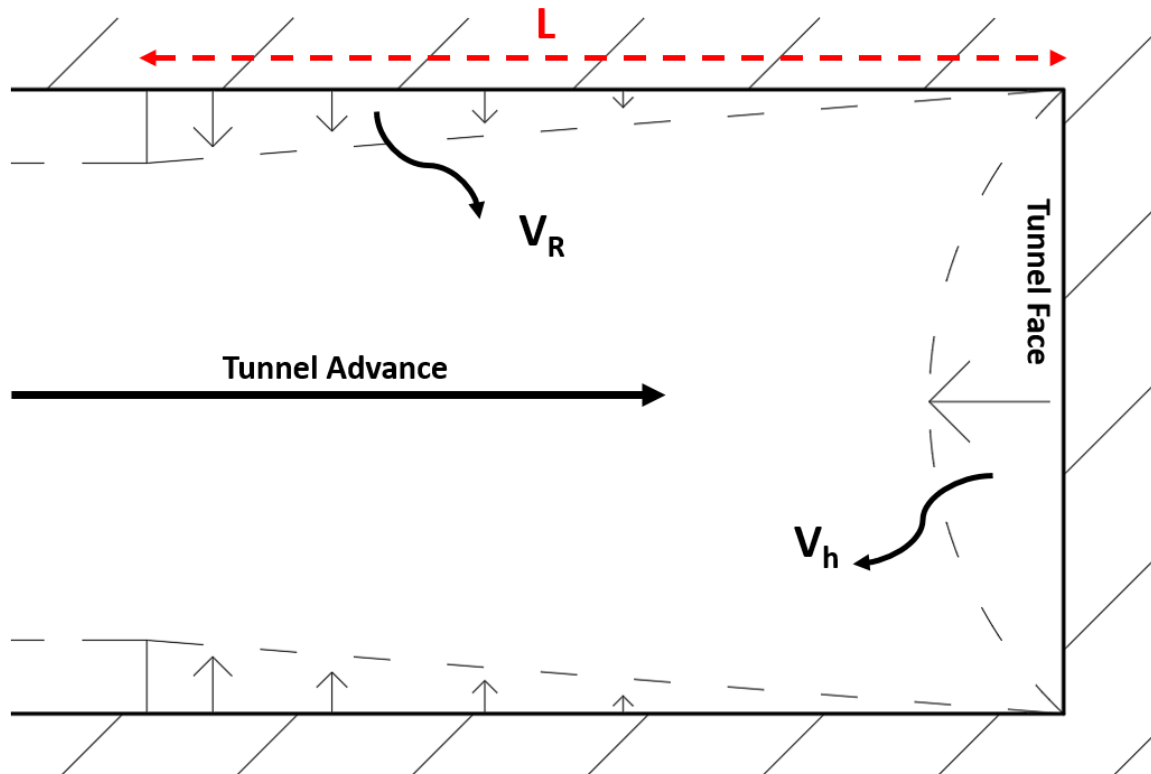
## 8. Αποτελέσματα Παραμετρικών Αναλύσεων

### 8.1. Μεθοδολογία

Με σκοπό να συσχετιστεί η μετρούμενη οριζόντια παραμόρφωση του μετώπου εκσκαφής ( $U_h$ ) από τις τριδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις τις διδακτορικής διατριβής του κ. Δ. Γεωργίου, με τον αντίστοιχο βαθμό αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στην περιοχή του μετώπου της σήραγγας ( $x = 0$ ), θα πρέπει να προσδιορίσει η αντίστοιχη σύγκλιση ( $U_R$ ) στην περιοχή του μετώπου εκσκαφής.

Για τον λόγο αυτό θεωρούμε πως η εξώθηση του μετώπου εκσκαφής **προκαλεί σύγκλιση της σήραγγας με τριγωνική μορφή πίσω από το μέτωπο εκσκαφής**, όπου ισορροπεί σε απόσταση ( $L$ ) πίσω από το μέτωπο εκσκαφής. Όπως παρουσιάζεται η παραπάνω μεθοδολογία στο **Σχήμα 8.1**, διαμορφώνεται δύο όγκοι ως ακολούθως:

- ✓ Απώλεια εδαφικού όγκου λόγω εξώθησης μετώπου εκσκαφής ( $V_h$ )
- ✓ Απώλεια εδαφικού όγκου λόγω σύγκλισης της σήραγγας ( $V_R$ )



Σχήμα 8. 1. Συσχέτιση απώλειας εδαφικού όγκου λόγω εξώθησης μετώπου εκσκαφής ( $V_h$ ) με την απώλεια εδαφικού όγκου λόγω σύγκλισης της σήραγγας ( $V_R$ ).

Για κυκλική διατομή σήραγγας, διαμέτρου (D) θα ισχύει:

$$V_h = A_{face} \times U_h = \frac{\pi \times D^2}{4} \times U_h = 0.785 \times D^2 \times U_h \quad (1)$$

Για κυκλική διατομή σήραγγας, διαμέτρου (D) θα ισχύει:

$$V_R = A_R \times \pi \times D = \frac{1}{2} \times L \times U_R \times \pi \times D = 1.571 \times L \times D \times U_R \quad (2)$$

Επειδή οι όγκοι  $V_h$  και  $V_R$  είναι ίσοι θα ισχύει (1) (2):

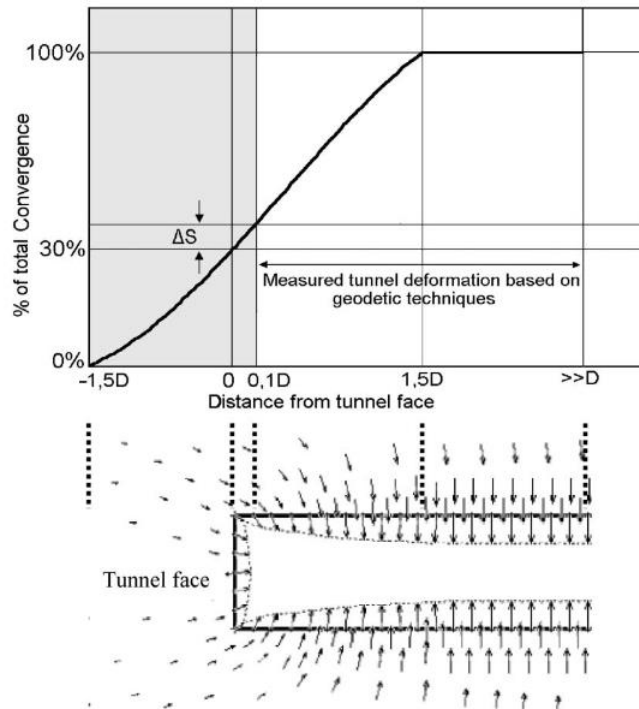
$$V_h = V_R \rightarrow 0.785 \times D^2 \times U_h = 1.571 \times L \times D \times U_R \rightarrow$$

$$U_R = 0.5 \times \frac{U_h \times D}{L} \quad (3)$$

Συνεπώς σύμφωνα με την εξίσωση (3), η σύγκλιση της σήραγγας εξαρτάται πέραν της παραμόρφωσης του μετώπου εκσκαφής (εξώθηση) και από την απόσταση όπου ισορροπούν οι συγκλίσεις της σήραγγας πίσω από το μέτωπο εκσκαφής.

Σύμφωνα με τον *Hoek E. (2007)* η παραπάνω απόσταση (L) όπου γίνεται ισορροπία των συγκλίσεων της εκσκαφής έχει περίπου μέγιστο μήκος **1.5 D** (όπου D η διάμετρος της σήραγγας), όπως παρουσιάζεται στο **Σχήμα 8.2.**





Σχήμα 8. 2. Εξέλιξη των συγκλίσεων κατά μήκος της σήραγγας (Πηγή: Hoek E. , 2003).

Στην παρούσα εργασία και μετά από δεδομένα από την διδακτορική διατριβή του κ. Δ. Γεωργίου, θα εξεταστούν περιπτώσεις  $L = 0,8, 1, 1,5 D$ , με την αντίστοιχη σύγκλιση ( $U_R$ ) να υπολογίζεται κατά περίπτωση, όπως παρουσιάζεται στον **Πίνακα 8.1**.

Απόσταση (L)	Ισοδύναμη σύγκλιση ( $U_R$ )
<b>0.8 D</b>	$0.625 \times U_h$
<b>1.0 D</b>	$0.50 \times U_h$
<b>1.5 D</b>	$0.333 \times U_h$

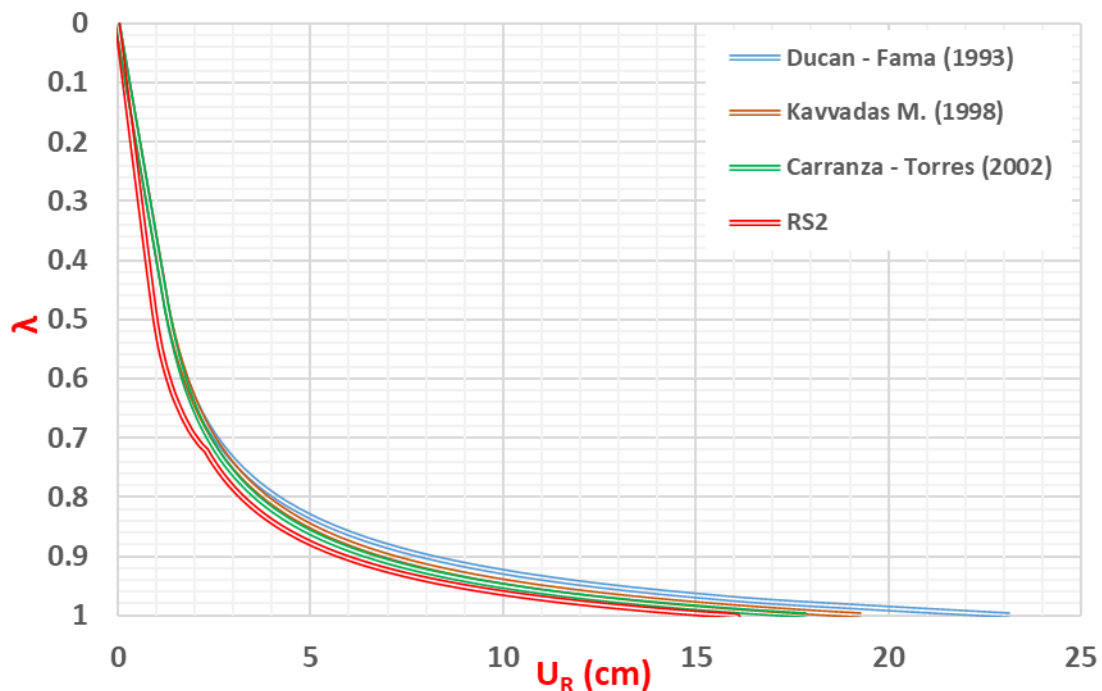
Πίνακας 8. 1. Συσχέτιση σύγκλισης μετώπου εκσκαφής ( $U_R$ ) με την εξώθηση του μετώπου εκσκαφής ( $U_h$ ), ανάλογα την απόσταση ισορροπίας (L) πίσω από το μέτωπο εκσκαφής.

Συνεπώς στην παρούσα εργασία θα εξετασθούν και οι τρεις (3) παραπάνω συνδυασμοί.

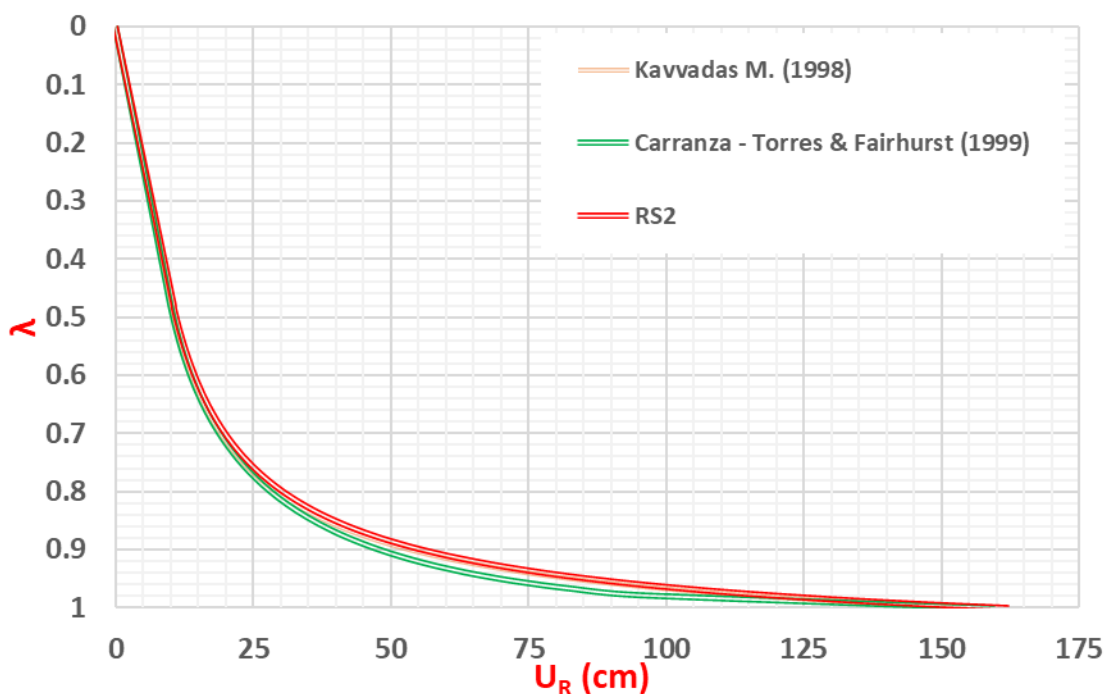
Αρχικά από το σύνολο των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν παρατηρήθηκε πολύ καλή ταύτιση μεταξύ όλων των εμπειρικών μεθόδων και των αριθμητικών αναλύσεων, ως προς την μορφή με τα μεγέθη των καμπυλών σύγκλισης – αποτόνωσης.

Στο **Διάγραμμα 8.1**, παρουσιάζεται η καμπύλη σύγκλισης – αποτόνωσης για μια ρηχή σήραγγα με λόγο  $H/D = 2$  και συντελεστή υπερφόρτωσης  $N_s = 12.7$ , στην οποία παρατίθενται όλες οι μέθοδοι ανάλυσης της καμπύλης – σύγκλισης αποτόνωσης. Αντίστοιχα στο **Διάγραμμα 8.2**, παρουσιάζεται η καμπύλη σύγκλισης – αποτόνωσης για μια ρηχή σήραγγα με λόγο  $H/D = 15$  και συντελεστή υπερφόρτωσης  $N_s = 18.3$ .

Επίσης στον **Πίνακα 8.2** παρουσιάζεται η σύγκριση παράγωγων μεγεθών από τις αναλύσεις της σύγκλισης – αποτόνωσης για ρηχές σήραγγες, ενώ στον **Πίνακα 8.3** παρουσιάζεται η ίδια σύγκριση για βαθιές σήραγγες.



**Διάγραμμα 8. 1.** Καμπύλη σύγκλισης – αποτόνωσης για ρηχή σήραγγα ( $H/D = 2$ ) και συντελεστή υπερφόρτωσης ( $N_s = 12.7$ ).



Διάγραμμα 8. 2. Καμπύλη σύγκλισης – αποτόνωσης για βαθιά σήραγγα ( $H/D=15$ ) και συντελεστή υπερφόρτωσης ( $N_s = 18.3$ ).

H/D	$N_s$	Ducan – Fama (1993)		Kavvadas M. (1998)		Carranza Torres (2002)		RS2	
		$\lambda_{cr}$	$R_{pl}$	$\lambda_{cr}$	$R_{pl}$	$\lambda_{cr}$	$R_{pl}$	$\lambda_{cr}$	$R_{pl}$
2	12.7	0.468	16.9 m	0.468	16.9 m	0.47	16.9 m	0.41	-
2	8.5	0.49	13.3 m	0.491	13.3 m	0.495	13.3 m	0.42	-
2	7.7	0.565	10.4 m	0.565	10.4 m	0.565	10.4 m	0.58	-
4	19.1	0.445	26.3 m	0.445	26.3 m	0.448	26.3 m	0.41	-
4	12.7	0.457	20.3 m	0.455	20.3 m	0.457	20.3 m	0.43	-
4	8.5	0.532	14.3 m	0.53	14.3m	0.53	14.3m	0.52	-

Πίνακας 8. 2. Σύγκριση παράγωγων μεγεθών της καμπύλης σύγκλισης – αποτόνωσης για ρηχές σήραγγες με βάση όλες τις εξεταζόμενες μεθοδολογίες.

H/D	$N_s$	Kavvadas M. (1998)		Carranza Torres & Fairhurst (1999)		RS2	
		$\lambda_{cr}$	$R_{pl}$	$\lambda_{cr}$	$R_{pl}$	$\lambda_{cr}$	$R_{pl}$

<b>10</b>	9.4	0.539	11.8 m	0.528	12.3 m	0.512	-
<b>10</b>	6.3	0.609	9.0 m	0.604	9.3 m	0.587	-
<b>20</b>	18.7	0.441	22.9 m	0.424	20.1 m	0.423	-
<b>20</b>	12.7	0.499	15.0 m	0.49	13.8 m	0.478	-

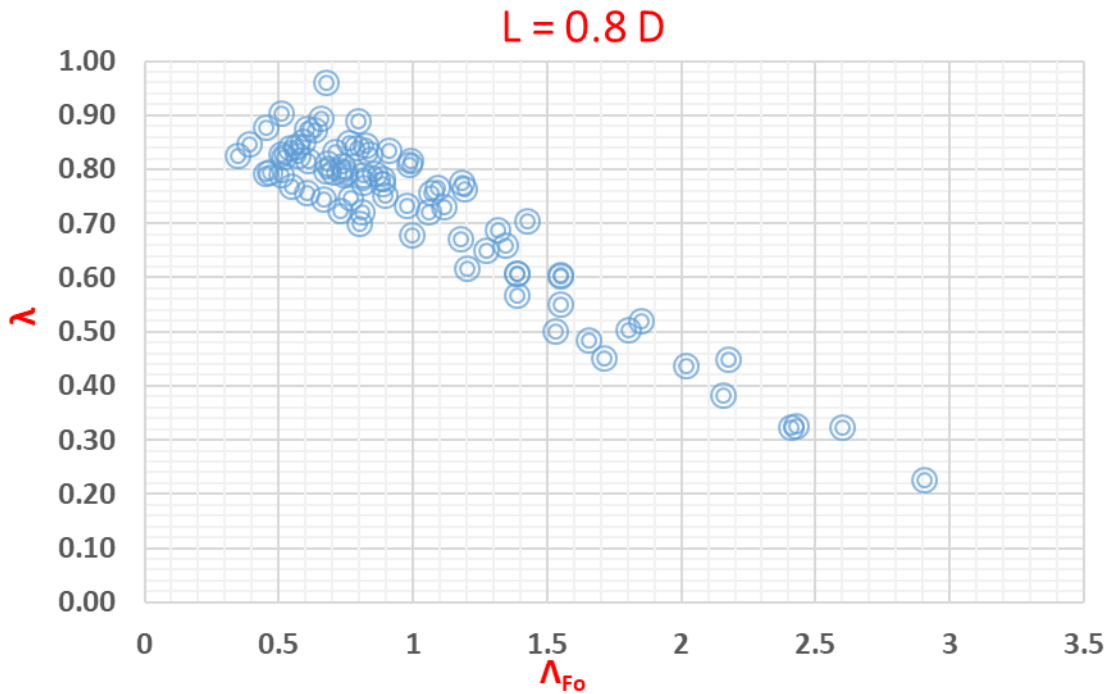
**Πίνακας 8. 3. Σύγκριση παράγων μεγεθών της καμπύλης σύγκλισης – αποτόνωσης για βαθιές σήραγγες με βάσει όλες τις εξεταζόμενες μεθοδολογίες.**

Από τους παραπάνω πίνακες, παρατηρούμε ότι όλες οι εξεταζόμενες μέθοδοι σύγκλισης – αποτόνωσης, πέραν από την πολύ καλή ταύτιση στις συγκλίσεις ( $U_R$ ), έχουν και πολύ καλή ταύτιση στην εκτίμηση του κρίσιμου συντελεστή αποτόνωσης ( $\lambda_{cr}$ ), καθώς και στην ακτίνα της πλαστικής ζώνης ( $R_{pl}$ ).

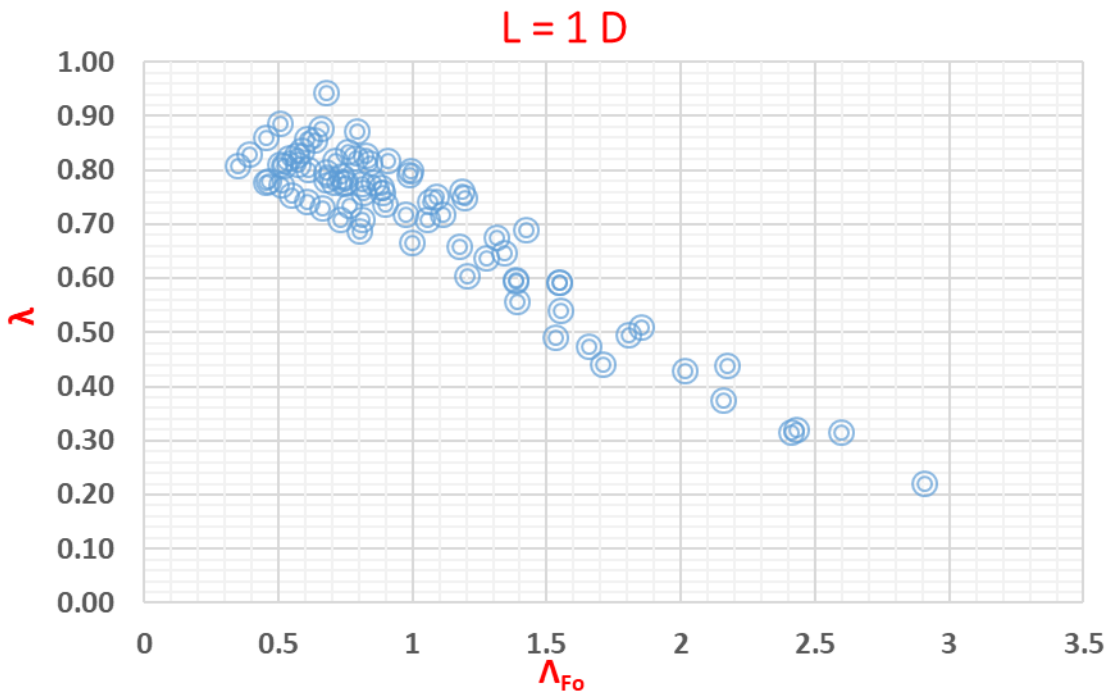
Στην συνέχεια γίνεται παράθεση των αποτελεσμάτων της προαναφερόμενης μεθοδολογίας εκτίμησης της αποτόνωσης στο μέτωπο εκσκαφής, ανά εξεταζόμενη μέθοδο προσδιορισμού της καμπύλης σύγκλισης – αποτόνωσης.

## **8.2. Αποτελέσματα μεθόδου Duncan – Fama (1993)**

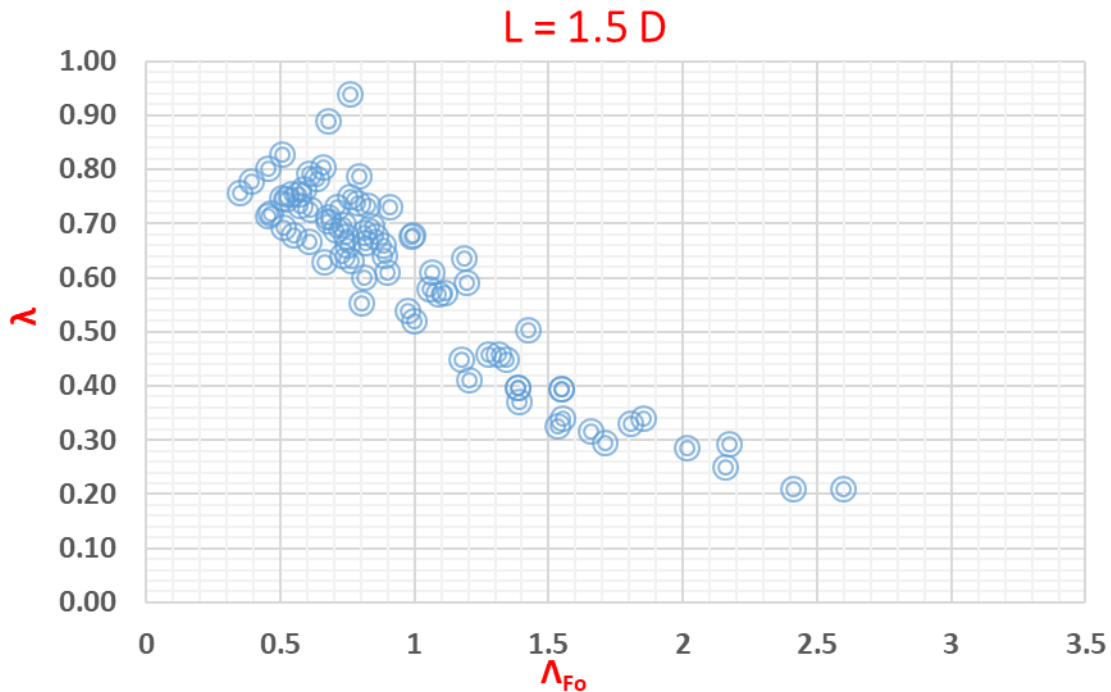
Στην συνέχεια γίνεται παράθεση των αποτελεσμάτων προσδιορισμού του βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στο μέτωπο εκσκαφής, συναρτήσει του συντελεστή ασφάλειας μετώπου ( $\Lambda_{F0}$ ), βάσει τις μεθόδου *Duncan – Fama (1993)*. Στα *Διαγράμματα 8.3 – 8.5*, παρατίθενται τα αποτελέσματα της παραπάνω ανάλυσης για ανυποστήρικτο μέτωπο εκσκαφής. Να σημειωθεί ότι εδώ παρατίθενται αποτελέσματα μόνο από ρηχές σήραγγες, διότι σε αυτές εφαρμόστηκε το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb στο οποίο βασίζεται η μέθοδος *Duncan – Fama (1993)*.



Διάγραμμα 8. 3. Συσχέτιση του βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στο μέτωπο εκσκαφής με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου ( $\Lambda_{Fo}$ ) για απόσταση ισορροπίας ( $L = 0.8 D$ ) βάσει της μεθόδου Dusan – Fata (1993).



Διάγραμμα 8. 4. Συσχέτιση του βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στο μέτωπο εκσκαφής με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου ( $\Lambda_{Fo}$ ) για απόσταση ισορροπίας ( $L = 1 D$ ) βάσει της μεθόδου Dusan – Fata (1993).



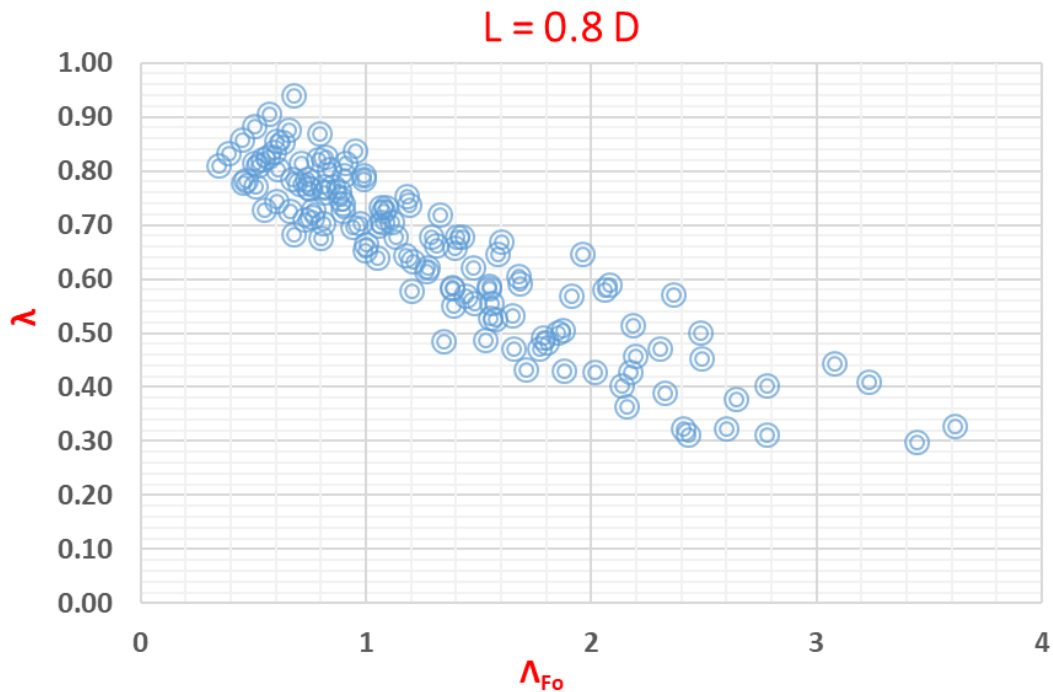
Διάγραμμα 8. 5. Συσχέτιση του βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στο μέτωπο εκσκαφής με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου ( $\Lambda_{Fo}$ ) για απόσταση ισορροπίας ( $L = 1.5 D$ ) βάσει της μεθόδου *Duncan – Fata* (1993).

Από τα παραπάνω Διαγράμματα, παρατηρείται μια πολύ καλή συσχέτιση του βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στο μέτωπο εκσκαφής με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου εκσκαφής, που όσο μειώνεται ο συντελεστής, αυξάνεται η αποτόνωση στο μέτωπο λόγω μεγάλων συγκλίσεων. Επίσης σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις διαπιστώνεται ότι το μέτωπο εκσκαφής θεωρείται σταθερό ( $\Lambda_{Fo} \geq 1$ ), όταν ο συντελεστής αποτόνωσης ( $\lambda$ ) κυμαίνεται μεταξύ **0.6 - 0.7**. Επίσης όσο αυξάνει η απόσταση ( $L$ ) σταθεροποίησης των συγκλίσεων πίσω από το μέτωπο εκσκαφής, μειώνεται ο συντελεστής αποτόνωσης ( $\lambda$ ) του μετώπου εκσκαφής, ώστε να χαρακτηριστεί το μέτωπο εκσκαφής ως ευσταθές ( $\Lambda_{Fo} \geq 1$ ).

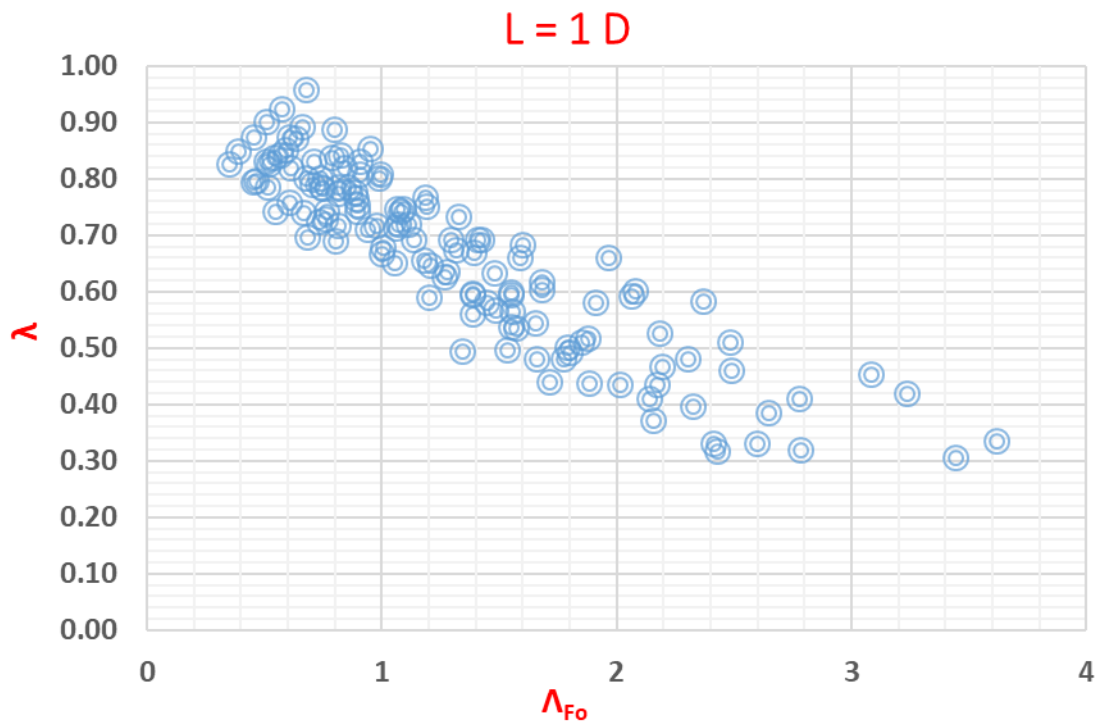
### 8.3. Αποτελέσματα μεθόδου *Kanvadas M. (1998)*

Στην συνέχεια γίνεται παράθεση των αποτελεσμάτων προσδιορισμού του βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στο μέτωπο εκσκαφής, συναρτήσε του συντελεστή ασφαλείας μετώπου ( $\Lambda_{Fo}$ ), βάσει τις μεθόδου *Kanvadas M. (1998)*. Στα Διαγράμματα 8.6 – 8.8, παρατίθενται τα αποτελέσματα της παραπάνω ανάλυσης για ανυποστήρικτο μέτωπο εκσκαφής. Να σημειωθεί ότι εδώ παρατίθενται αποτελέσματα τόσο για ρηχές

όσο και για βαθιές σήραγγες, διότι η παραπάνω μέθοδος βασίζεται τόσο στο κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb όσο και στο κριτήριο αστοχίας Generalized Hoek & Brown (2002).

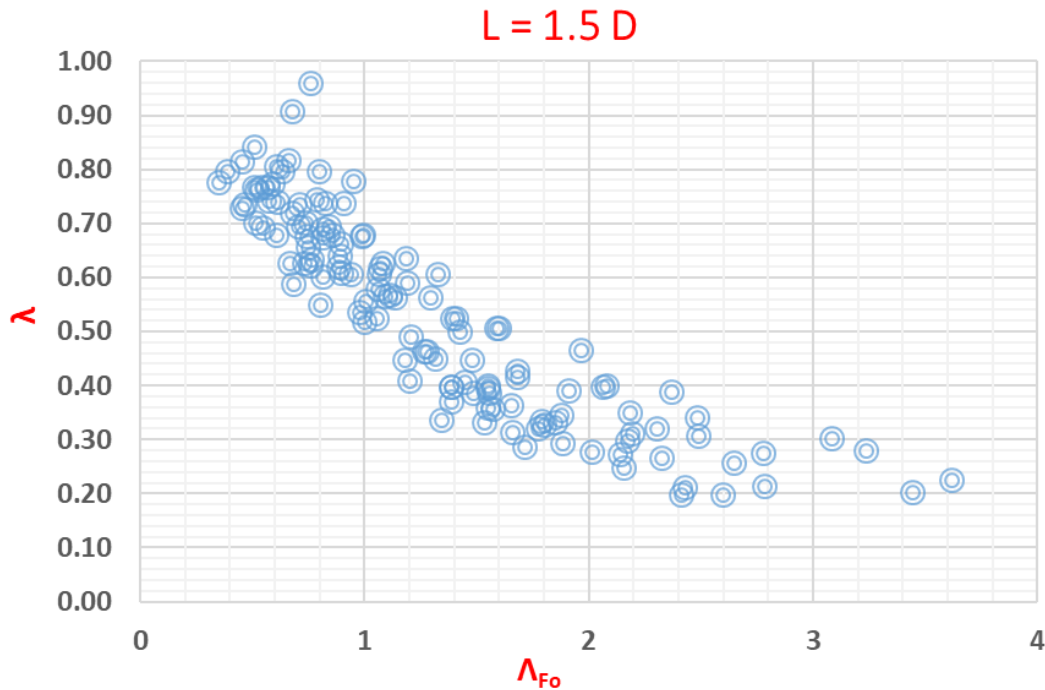


Διάγραμμα 8. 6. Συσχέτιση του βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στο μέτωπο εκσκαφής με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου ( $\Lambda_{Fo}$ ) για απόσταση ισορροπίας ( $L = 0.8 D$ ) βάσει της μεθόδου Kanadas M. (1998).



Διάγραμμα 8. 7. Συσχέτιση του βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στο μέτωπο εκσκαφής με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου ( $\Lambda_{Fo}$ ) για απόσταση ισορροπίας ( $L = 1 D$ ) βάσει της μεθόδου Kanvadas M. (1998).





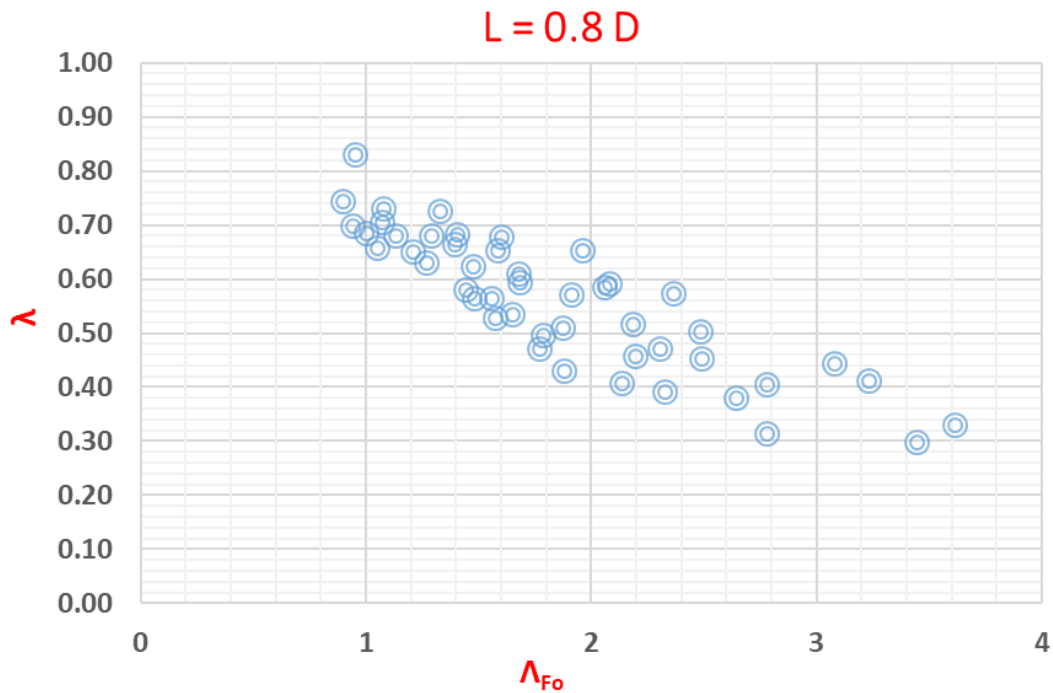
Διάγραμμα 8. 8. Συσχέτιση του βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στο μέτωπο εκσκαφής με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου ( $\Lambda_{Fo}$ ) για απόσταση ισορροπίας ( $L = 1.5 D$ ) βάσει της μεθόδου Kanvadas M. (1998).

Από τα παραπάνω Διαγράμματα, παρατηρείται μια πολύ καλή συσχέτιση του βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στο μέτωπο εκσκαφής με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου εκσκαφής, που όσο μειώνεται ο συντελεστής, αυξάνεται η αποτόνωση στο μέτωπο λόγω μεγάλων συγκλίσεων. Επίσης σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις διαπιστώνεται ότι το μέτωπο εκσκαφής θεωρείται σταθερό ( $\Lambda_{Fo} \geq 1$ ), όταν ο συντελεστής αποτόνωσης ( $\lambda$ ) κυμαίνεται μεταξύ **0.55 - 0.7**. Επίσης όσο αυξάνει η απόσταση ( $L$ ) σταθεροποίησης των συγκλίσεων πίσω από το μέτωπο εκσκαφής, μειώνεται ο συντελεστής αποτόνωσης ( $\lambda$ ) του μετώπου εκσκαφής, ώστε να χαρακτηριστεί το μέτωπο εκσκαφής ως ευσταθές ( $\Lambda_{Fo} \geq 1$ ). Επίσης διαπιστώνεται ότι για πολύ καλά εδάφη ( $\Lambda_{Fo} \geq 2.5$ ), ο βαθμός αποτόνωσης ( $\lambda$ ) ισορροπεί σε τιμές μεγαλύτερες από **0.2**.

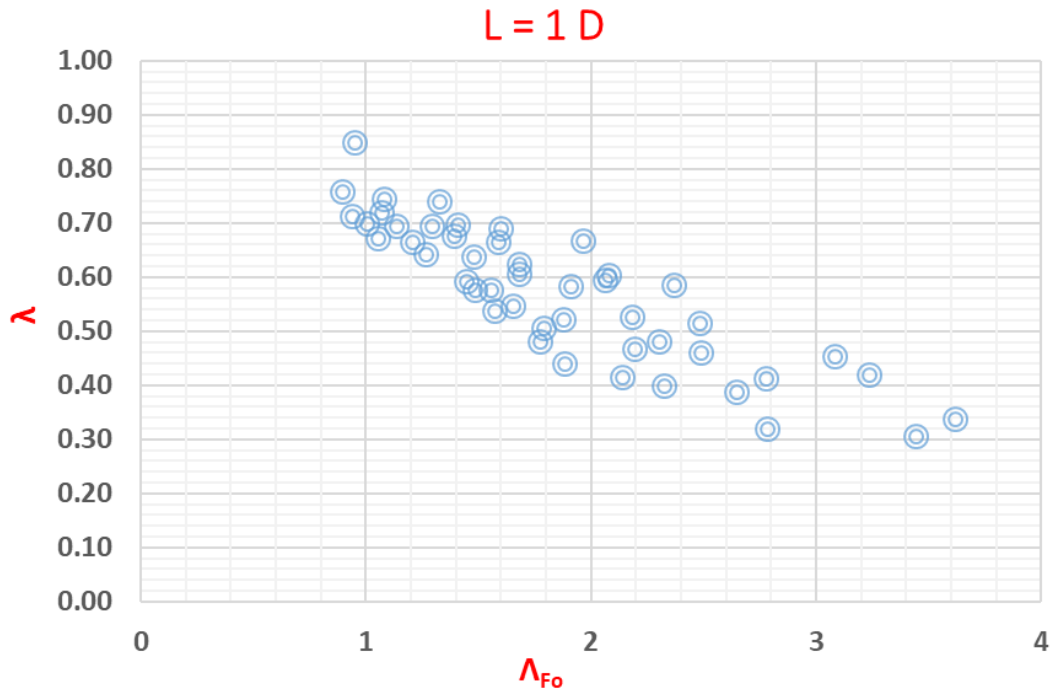
#### 8.4. Αποτελέσματα μεθόδου Carranza Torres & Fairhurst (1999)

Στην συνέχεια γίνεται παράθεση των αποτελεσμάτων προσδιορισμού του βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στο μέτωπο εκσκαφής, συναρτήσεως του συντελεστή ασφαλείας μετώπου ( $\Lambda_{Fo}$ ), βάσει της μεθόδου Carranza Torres & Fairhurst (1999). Στα Διαγράμματα 8.9 – 8.11, παρατίθενται τα αποτελέσματα της παραπάνω

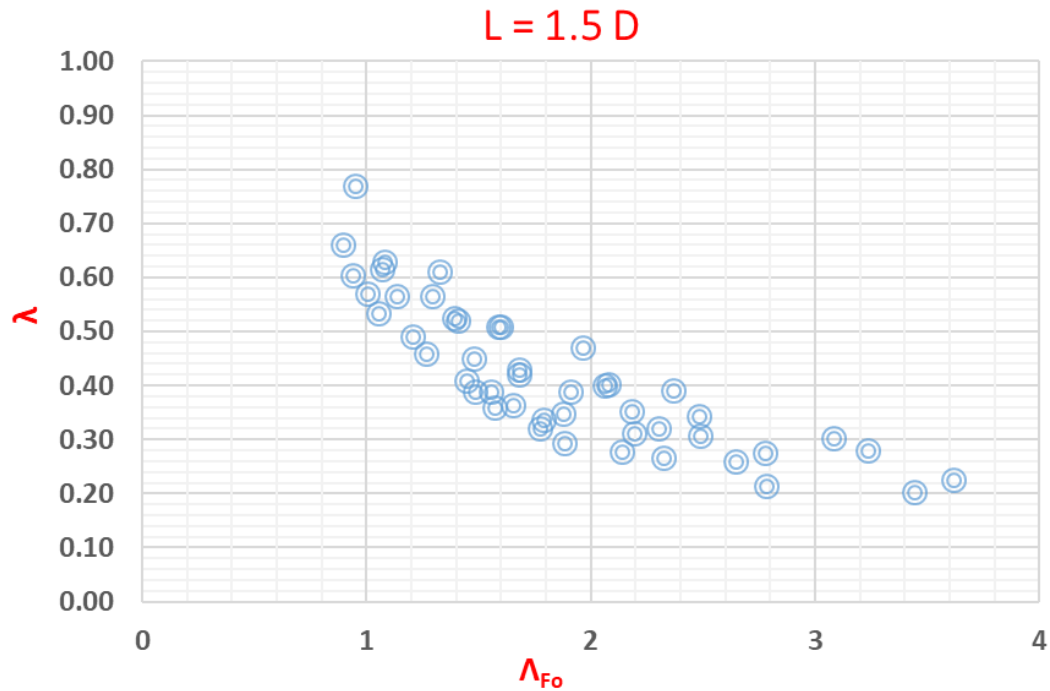
ανάλυσης για ανυποστήρικτο μέτωπο εκσκαφής. Να σημειωθεί ότι εδώ παρατίθενται αποτελέσματα μόνο για βαθιές σήραγγες, διότι η παραπάνω μέθοδος βασίζεται στο κριτήριο αστοχίας Generalized Hoek & Brown (2002).



Διάγραμμα 8. 9. Συσχέτιση του βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στο μέτωπο εκσκαφής με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου ( $\Lambda_{Fo}$ ) για απόσταση ισορροπίας ( $L = 0.8 D$ ) βάσει της μεθόδου Carranza Torres & Fairhurst (1999).



Διάγραμμα 8. 10. Συσχέτιση του βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στο μέτωπο εκσκαφής με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου ( $\Lambda_{Fo}$ ) για απόσταση ισορροπίας ( $L = 1 D$ ) βάσει της μεθόδου Carranza Torres & Fairhurst (1999).

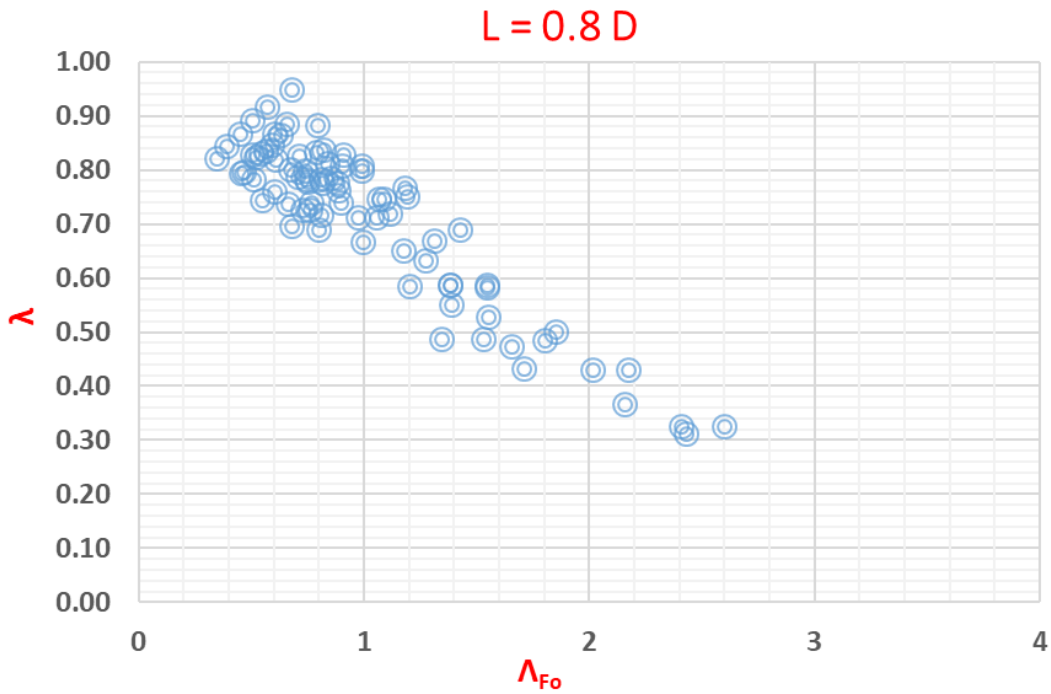


Διάγραμμα 8. 11. Συσχέτιση του βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στο μέτωπο εκσκαφής με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου ( $\Lambda_{Fo}$ ) για απόσταση ισορροπίας ( $L = 1.5 D$ ) βάσει της μεθόδου Carranza Torres & Fairhurst (1999).

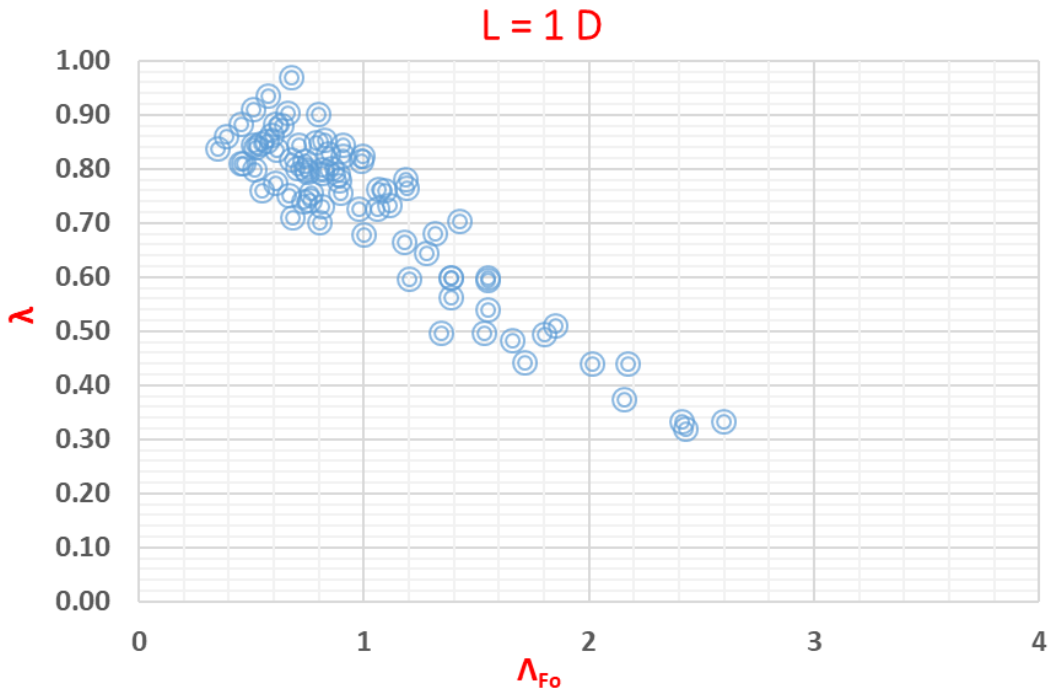
Από τα παραπάνω Διαγράμματα, παρατηρείται μια πολύ καλή συσχέτιση του βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στο μέτωπο εκσκαφής με τον συντελεστή ασφάλειας μετώπου εκσκαφής, που όσο μειώνεται ο συντελεστής, αυξάνεται η αποτόνωση στο μέτωπο λόγω μεγάλων συγκλίσεων. Επίσης σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις διαπιστώνεται ότι το μέτωπο εκσκαφής θεωρείται σταθερό ( $\Lambda_{F_0} \geq 1$ ), όταν ο συντελεστής αποτόνωσης ( $\lambda$ ) κυμαίνεται μεταξύ **0.55 - 0.7**. Επίσης όσο αυξάνει η απόσταση ( $L$ ) σταθεροποίησης των συγκλίσεων πίσω από το μέτωπο εκσκαφής, μειώνεται ο συντελεστής αποτόνωσης ( $\lambda$ ) του μετώπου εκσκαφής, ώστε να χαρακτηριστεί το μέτωπο εκσκαφής ως ευσταθές ( $\Lambda_{F_0} \geq 1$ ). Επίσης διαπιστώνεται ότι για πολύ καλά εδάφη ( $\Lambda_{F_0} \geq 2.5$ ), ο βαθμός αποτόνωσης ( $\lambda$ ) ισορροπεί σε τιμές μεγαλύτερες από **0.2**.

### **8.5. Αποτελέσματα μεθόδου Carranza Torres (2002)**

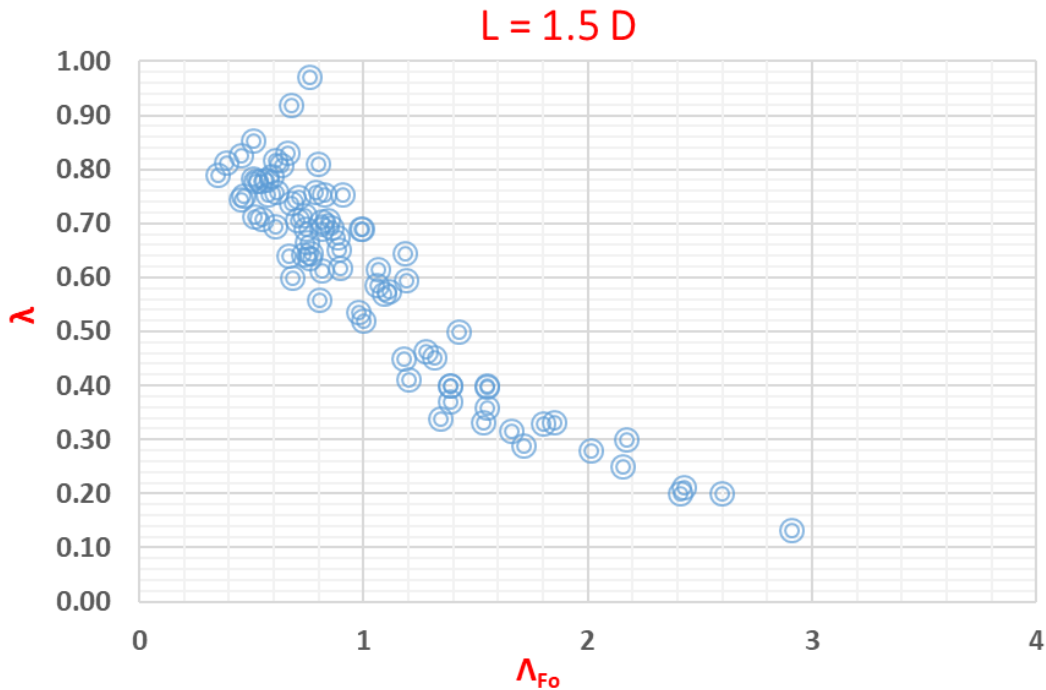
Στην συνέχεια γίνεται παράθεση των αποτελεσμάτων προσδιορισμού του βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στο μέτωπο εκσκαφής, συναρτήσεως του συντελεστή ασφάλειας μετώπου ( $\Lambda_{F_0}$ ), βάσει τις μεθόδου Carranza Torres (2002). Στα Διαγράμματα 8.12 – 8.14, παρατίθενται τα αποτελέσματα της παραπάνω ανάλυσης για ανυποστήρικτο μέτωπο εκσκαφής. Να σημειωθεί ότι εδώ παρατίθενται αποτελέσματα μόνο για ρηχές σήραγγες, διότι η παραπάνω μέθοδος βασίζεται στο κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb.



Διάγραμμα 8. 12. Συσχέτιση του βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στο μέτωπο εκσκαφής με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου ( $\Lambda_{Fo}$ ) για απόσταση ισορροπίας ( $L = 0.8 D$ ) βάσει της μεθόδου Carranza Torres (2002).



Διάγραμμα 8. 13. Συσχέτιση του βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στο μέτωπο εκσκαφής με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου ( $\Lambda_{Fo}$ ) για απόσταση ισορροπίας ( $L = 1 D$ ) βάσει της μεθόδου Carranza Torres (2002).

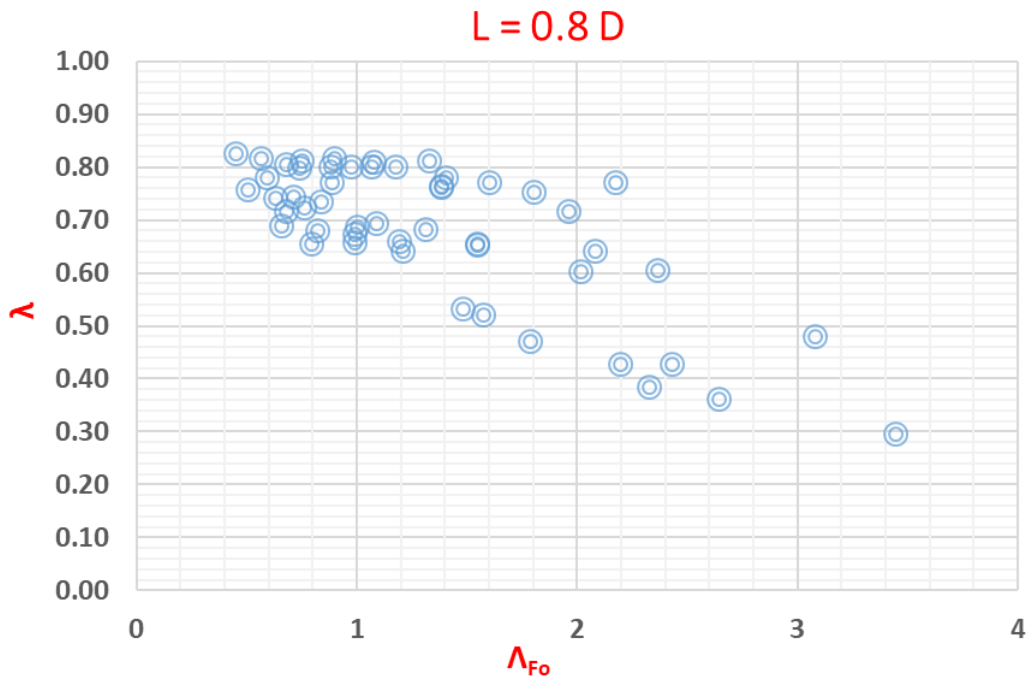


Διάγραμμα 8. 14. Συσχέτιση του βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στο μέτωπο εκσκαφής με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου ( $\Lambda_{Fo}$ ) για απόσταση ισορροπίας ( $L = 1.5 D$ ) βάσει της μεθόδου Carranza Torres (2002).

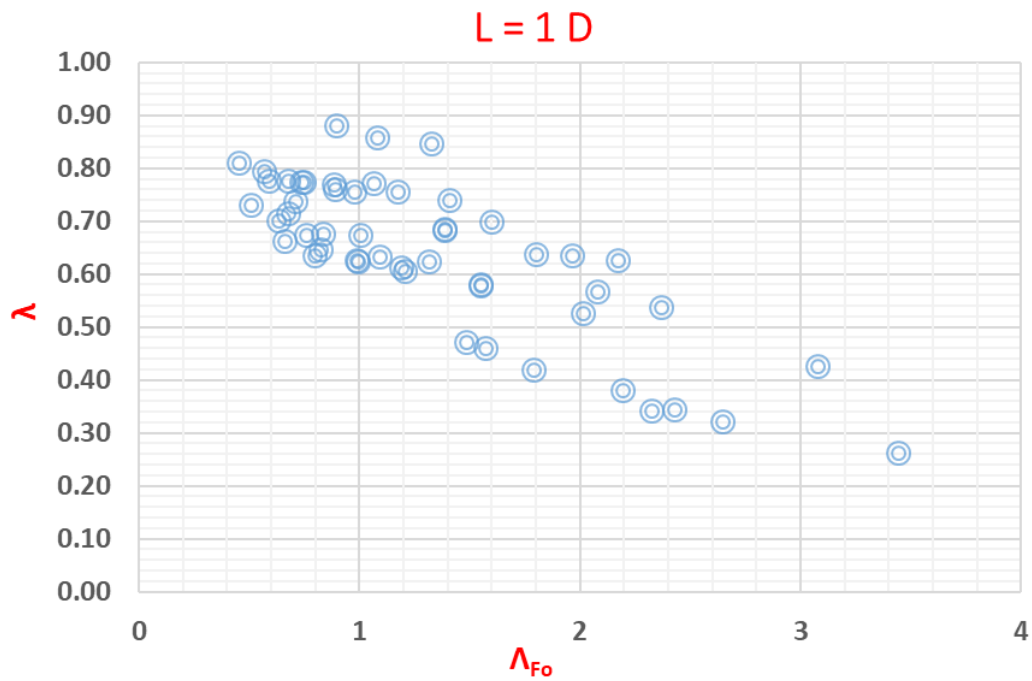
Από τα παραπάνω Διαγράμματα, παρατηρείται μια πολύ καλή συσχέτιση του βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στο μέτωπο εκσκαφής με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου εκσκαφής, που όσο μειώνεται ο συντελεστής, αυξάνεται η αποτόνωση στο μέτωπο λόγω μεγάλων συγκλίσεων. Επίσης σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις διαπιστώνεται ότι το μέτωπο εκσκαφής θεωρείται σταθερό ( $\Lambda_{Fo} \geq 1$ ), όταν ο συντελεστής αποτόνωσης ( $\lambda$ ) κυμαίνεται μεταξύ **0.55 - 0.7**. Επίσης όσο αυξάνει η απόσταση ( $L$ ) σταθεροποίησης των συγκλίσεων πίσω από το μέτωπο εκσκαφής, μειώνεται ο συντελεστής αποτόνωσης ( $\lambda$ ) του μετώπου εκσκαφής, ώστε να χαρακτηριστεί το μέτωπο εκσκαφής ως ευσταθές ( $\Lambda_{Fo} \geq 1$ ). Επίσης διαπιστώνεται ότι για πολύ καλά εδάφη ( $\Lambda_{Fo} \geq 2.5$ ), ο βαθμός αποτόνωσης ( $\lambda$ ) ισορροπεί σε τιμές μεγαλύτερες από **0.2**.

## 8.6. Αποτελέσματα αναλύσεων με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων RS2

Στην συνέχεια γίνεται παράθεση των αποτελεσμάτων προσδιορισμού του βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στο μέτωπο εκσκαφής, συναρτήσεως του συντελεστή ασφάλειας μετώπου ( $\Lambda_{Fo}$ ), βάσει των αριθμητικών αναλύσεων. Στα Διαγράμματα 8.15 – 8.17, παρατίθενται τα αποτελέσματα της παραπάνω ανάλυσης για ανυποστήρικτο μέτωπο εκσκαφής. Να σημειωθεί ότι εδώ παρατίθενται αποτελέσματα τόσο για ρηχές όσο και για βαθιές σήραγγες, διότι δύναται να γίνει χρήση τόσο του κριτηρίου αστοχίας Mohr – Coulomb όσο και του κριτηρίου αστοχίας Generalized Hoek & Brown (2002).

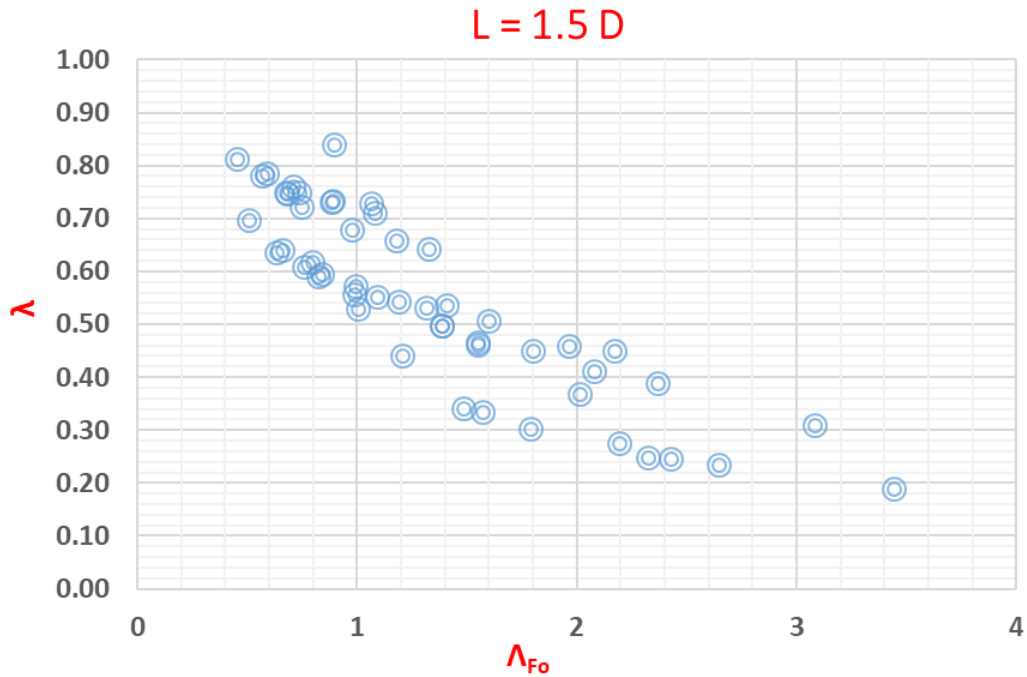


Διάγραμμα 8. 15. Συσχέτιση του βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στο μέτωπο εκσκαφής με τον συντελεστή ασφάλειας μετώπου ( $\Lambda_{Fo}$ ) για απόσταση ισορροπίας ( $L = 0.8 D$ ) βάσει διδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων RS2.



Διάγραμμα 8. 16. Συσχέτιση του βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στο μέτωπο εκσκαφής με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου ( $\Lambda_{Fo}$ ) για απόσταση ισορροπίας ( $L = 1 D$ ) βάσει διδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων RS2.





Διάγραμμα 8. 17. Συσχέτιση του βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στο μέτωπο εκσκαφής με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου ( $\Lambda_{Fo}$ ) για απόσταση ισορροπίας ( $L = 1.5 D$ ) βάσει διδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων RS2.

Από τα παραπάνω Διαγράμματα, παρατηρείται μια πολύ καλή συσχέτιση του βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στο μέτωπο εκσκαφής με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου εκσκαφής, που όσο μειώνεται ο συντελεστής, αυξάνεται η αποτόνωση στο μέτωπο λόγω μεγάλων συγκλίσεων. Επίσης σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις διαπιστώνεται ότι το μέτωπο εκσκαφής θεωρείται σταθερό ( $\Lambda_{Fo} \geq 1$ ), όταν ο συντελεστής αποτόνωσης ( $\lambda$ ) κυμαίνεται μεταξύ **0.55 - 0.7**. Επίσης όσο αυξάνει η απόσταση ( $L$ ) σταθεροποίησης των συγκλίσεων πίσω από το μέτωπο εκσκαφής, μειώνεται ο συντελεστής αποτόνωσης ( $\lambda$ ) του μετώπου εκσκαφής, ώστε να χαρακτηριστεί το μέτωπο εκσκαφής ως ευσταθές ( $\Lambda_{Fo} \geq 1$ ). Επίσης διαπιστώνεται ότι για πολύ καλά εδάφη ( $\Lambda_{Fo} \geq 2.5$ ), ο βαθμός αποτόνωσης ( $\lambda$ ) ισορροπεί σε τιμές μεγαλύτερες από **0.2**.

Τέλος, παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα των διδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων είναι σε πολύ καλή συμφωνία με τα αντίστοιχα αποτελέσματα εκτίμησης του βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) από εμπειρικές μεθόδους.

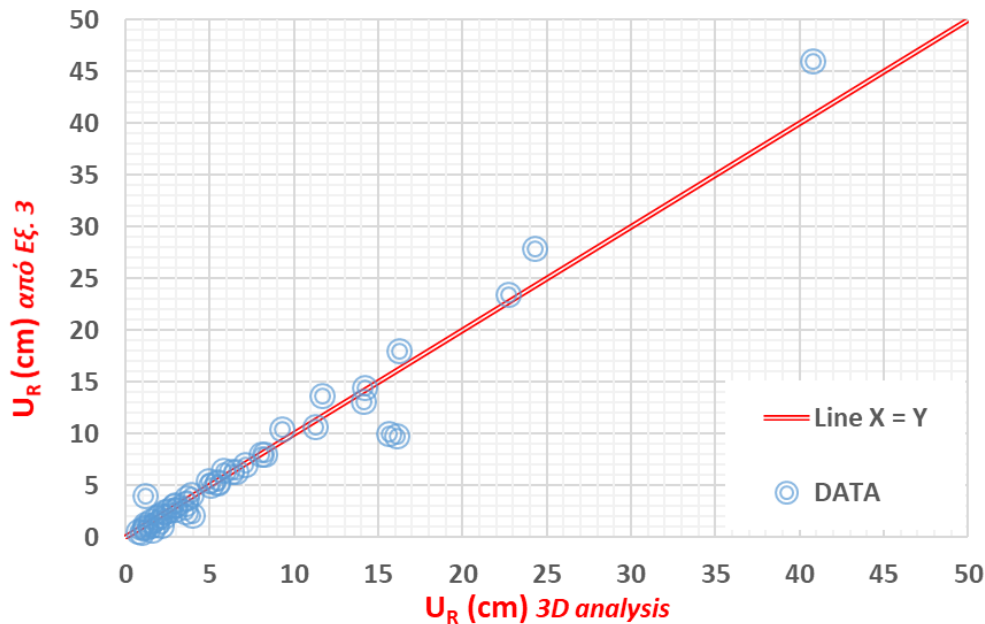
## 8.7. Μόρφωση σχέσης για τον υπολογισμού του βαθμού αποτόνωσης (λ) στο μέτωπο εκσκαφής

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα των αναλύσεων (εμπειρικών και αριθμητικών) για τον προσδιορισμό του βαθμού αποτόνωσης (λ) στο μέτωπο εκσκαφής, θα γίνει προσπάθεια μόνρφωσης σχέσης για την αντιστοίχιση του βαθμού αποτόνωσης (λ) στο μέτωπο εκσκαφής με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου ( $\Lambda_{F0}$ ).

Αρχικά προσδιορίζεται το μήκος ισορροπίας (L) των μετακινήσεων πίσω από το μέτωπο εκσκαφής, ώστε να εφαρμοστεί στην **Εξ. 3** (βλ. *Ενότητα 8.1*).

Συγκεκριμένα καταγράφηκαν οι συγκλήσεις από τα τριδιάστατα αριθμητικά μοντέλα της διδακτορικής διατριβής του κ. Δ. Γεωργίου, σε θέσεις περίξ της εκσκαφής στην περιοχή του μετώπου εκσκαφής ( $x/D=0$ ), σε αντίστοιχες θέσεις με αυτές του **Σχήματος 7.9** (βλ. *Ενότητα 7.4*) και προέκυψε η μέση σύγκλιση.

Στην συνέχεια η μέση σύγκλιση στην θέση αυτή για περιπτώσεις ανυποστήρικτου μετώπου εκσκαφής, συσχετίστηκε με την εξώθηση του μετώπου εκσκαφής ( $U_h$ ) μέσω της **Εξ. 3**, με μόνο άγνωστο το μήκος (L). Όπως παρουσιάζεται και στο **Διάγραμμα 8.18**, η ισορροπία αυτή (σχέση 1:1), επετεύχθη για μήκος  $L = 0.8 \times D$ .



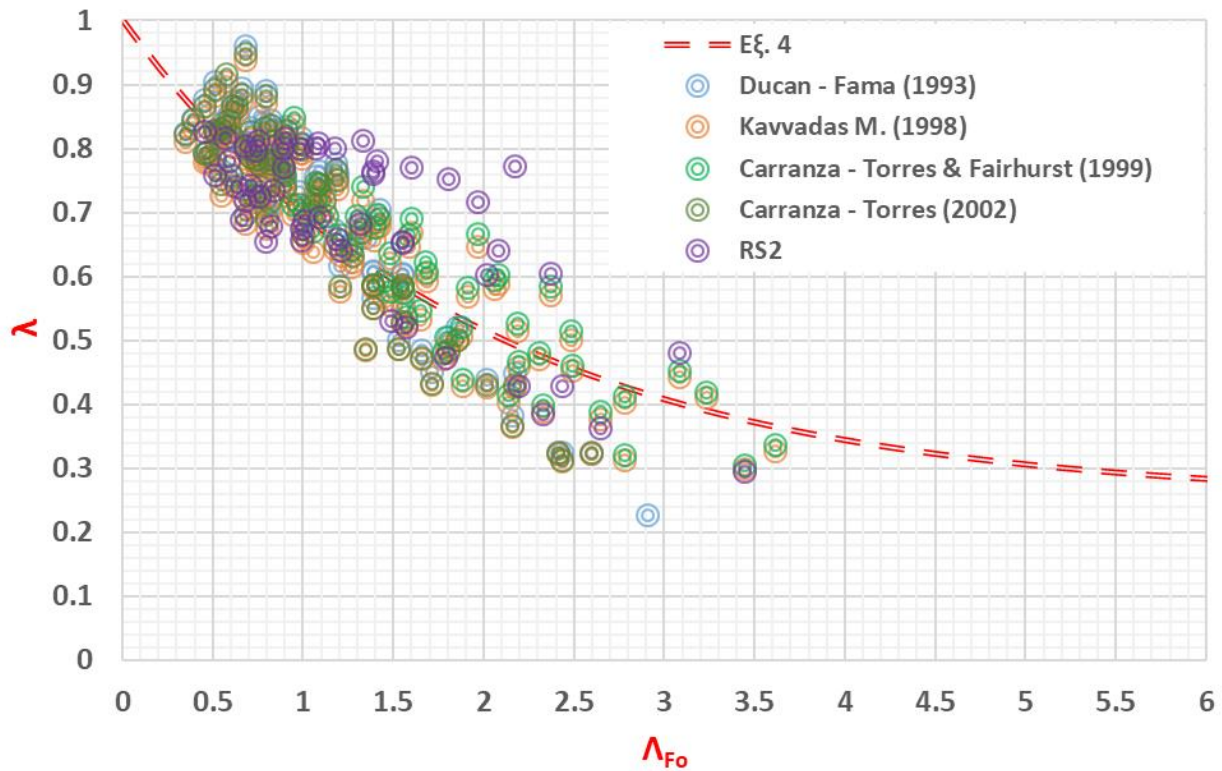
Διάγραμμα 8. 18. Σχέση μεταξύ της ακτινικής σύγκλισης ( $U_R$ ) στο μέτωπο εκσκαφής μεταξύ αποτελεσμάτων από τριδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις και από την Εξ. 3 για μήκος  $L=0.8 \cdot D$ .

Με βάση την παραδοχή που προκύπτει από το Διάγραμμα 8.18, ότι η ισοδύναμη απόσταση ισορροπίας ( $L$ ) των μετακινήσεων πίσω από το μέτωπο εκσκαφής είναι  $L = 0.8 \times D$ , τότε για ανυποστήρικτο μέτωπο εκσκαφής ο ισοδύναμος βαθμός αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στην περιοχή του μετώπου εκσκαφής, είναι:

$$\lambda = 0.25 + \exp(-0.5 \times \Lambda_{Fo}) \quad (4)$$

Στην παραπάνω εξίσωση, προστίθεται ο συντελεστής 0.25, διότι σύμφωνα με την θεωρία ελαστικότητας καθώς και με την έρευνα του *Panet (1995)*, η ελάχιστη δυνατή αποτόνωση ( $\lambda$ ) στο μέτωπο εκσκαφής είναι 25%.

Η αποτύπωση της Εξ. 4 επί των αποτελεσμάτων της έρευνας του *Κεφαλαίου 8*, παρουσιάζεται στο **Διάγραμμα 8.19**.



Διάγραμμα 8. 19. Συσχέτιση του βαθμού αποτόνωσης στο μέτωπο εκσκαφής με τον συντελεστή ασφάλειας του μετώπου εκσκαφής ( $\Lambda_{F0}$ ).

Τόσο από την Εξ. 4, όσο και από το Διάγραμμα 8.19, προκύπτει ότι για να υπάρχει ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής ( $\Lambda_{F0} \geq 1$ ), θα πρέπει ο βαθμός αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στο μέτωπο εκσκαφής ( $x/D = 0$ ) να είναι  $\lambda \leq 0.7$  (70 %).

## 9. Εφαρμογή προτεινόμενης μεθοδολογίας

### 9.1. Περίπτωση εφαρμογής ρηχής σήραγγας

Στην συνέχεια πρόκειται να παρουσιαστεί η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας για τον υπολογισμό του βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) για ανυποστήρικτο μέτωπο εκσκαφής, σε περίπτωση ρηχών σηράγγων.

Συγκεκριμένα εξετάζεται η περίπτωση ολομέτωπης διάνοιξης ρηχής σήραγγας, ισοδύναμης διαμέτρου  $D = 10\text{m}$  και με ύψος υπερκείμενων γαιών  $H = 20\text{m}$ . Εξετάζεται η περίπτωση διάνοιξης σε ένα ασθενές και σε να καλό έδαφος, με τις ιδιότητες του εδάφους να παρουσιάζονται στον **Πίνακα 9.1**.

Έδαφος	Ειδικό βάρος ( $\gamma$ )	Συνοχή ( $c$ )	Γωνία τριβής ( $\phi$ )	Μέτρο ελαστικότητας ( $E$ )
<b>A</b>	20 kN/m <sup>3</sup>	20 kPa	25°	100 MPa
<b>B</b>	20 kN/m <sup>3</sup>	30 kPa	30°	170 MPa

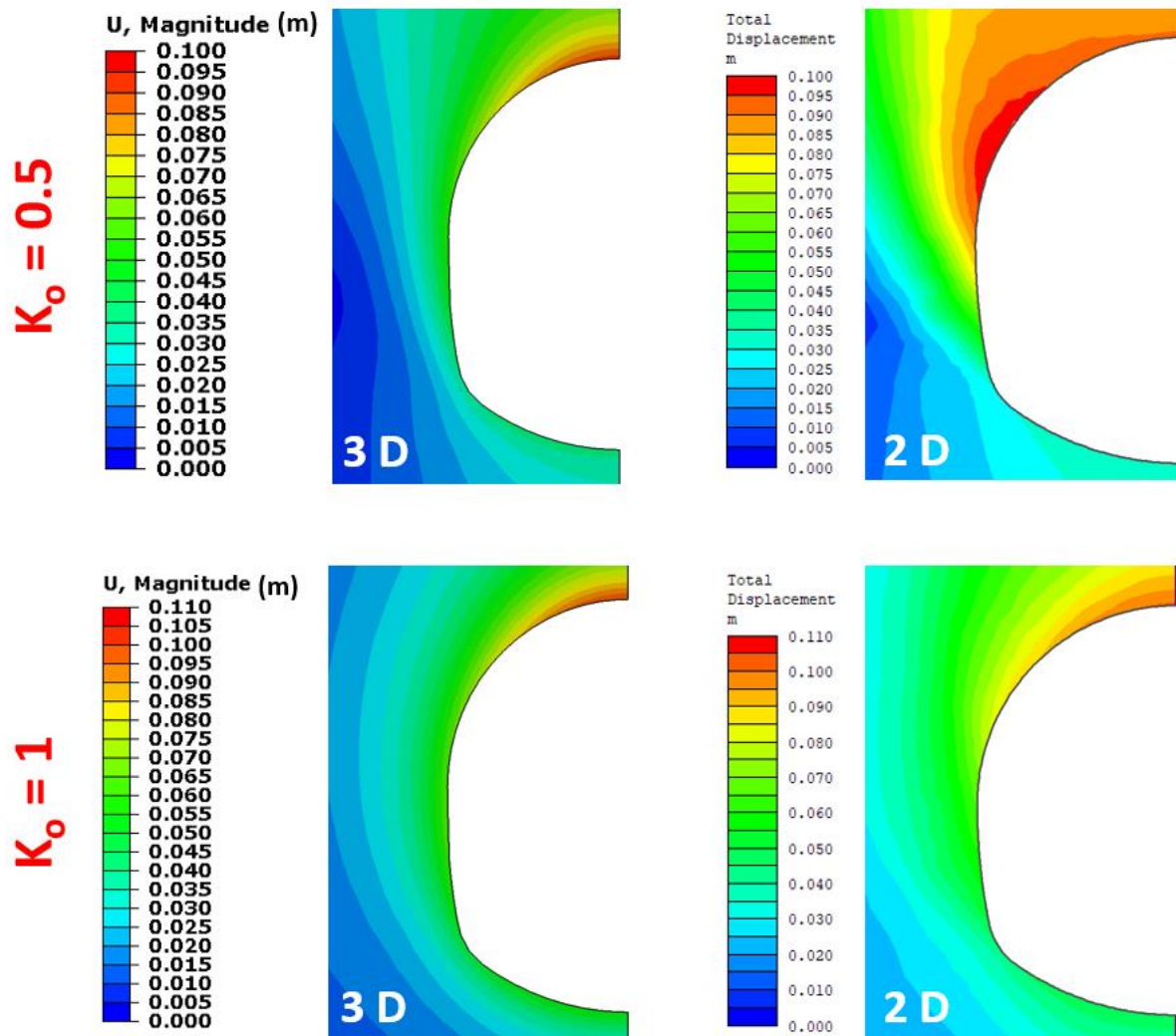
*Πίνακας 9. 1. Μηχανικές ιδιότητες εδάφους για ρηχές σήραγγες.*

Συγκεκριμένα εξετάστηκε η περίπτωση συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων  $K_0 = 0.5$  και **1**. Εφαρμόζοντας την **Εξ. 4**, υπολογίζεται ο αντίστοιχος βαθμός αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στην περιοχή του μετώπου εκσκαφής, όπως παρουσιάζεται στον **Πίνακα 9.2**.

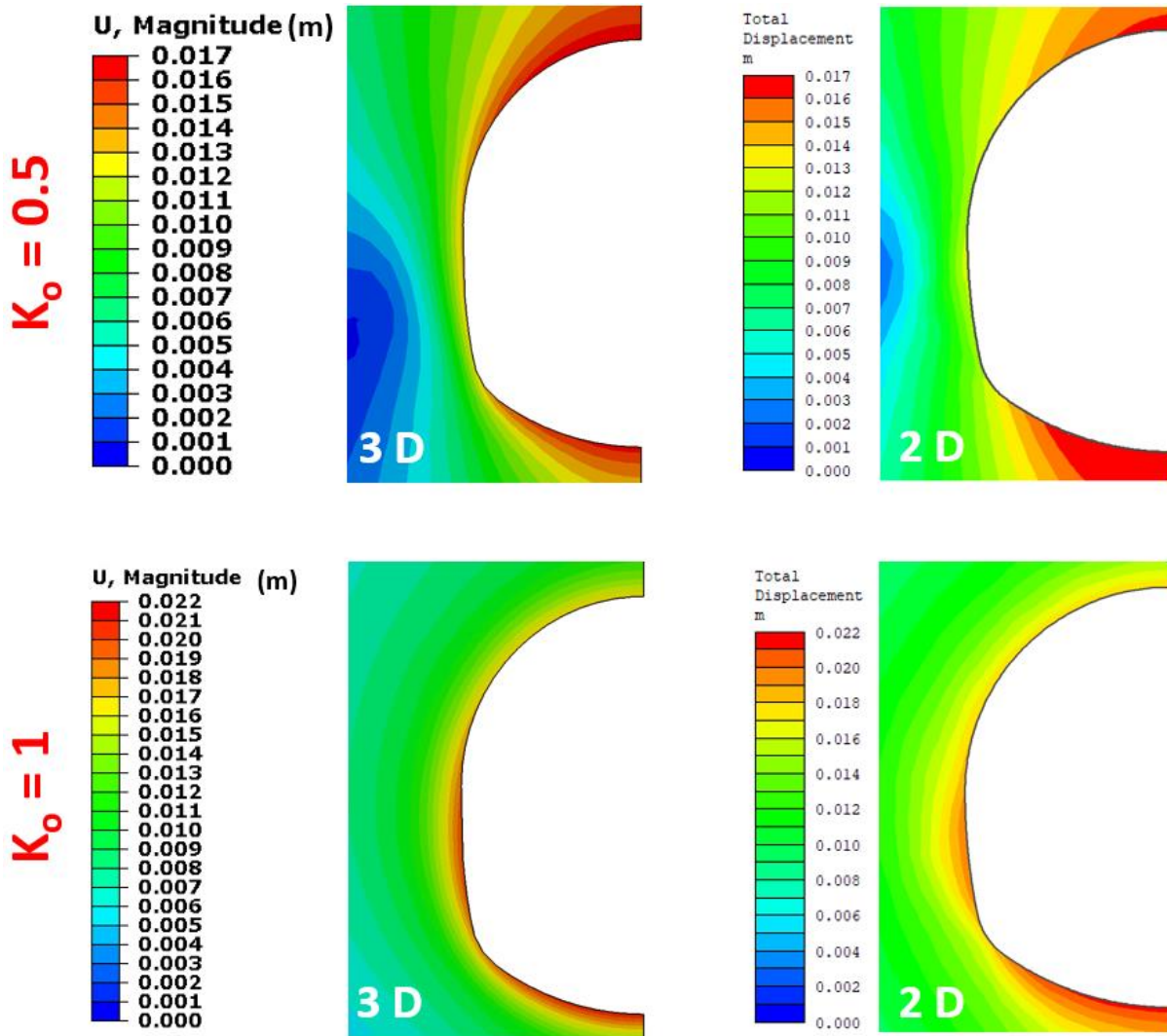
Έδαφος	Συντελεστής ουδετέρων ωθήσεων ( $K_0$ )	Ισοδύναμος βαθμός αποτόνωσης ( $\lambda$ )
<b>A</b>	0.5	<b>0.79</b>
<b>A</b>	1	<b>0.81</b>
<b>B</b>	0.5	<b>0.68</b>
<b>B</b>	1	<b>0.71</b>

*Πίνακας 9. 2. Προσδιορισμός ισοδύναμου βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στην περιοχή του μετώπου εκσκαφής για τις εξεταζόμενες περιπτώσεις ρηχών σηράγγων.*

Εφαρμόζοντας τον ισοδύναμο βαθμό αποτόνωσης ( $\lambda$ ) βάσει του **Πίνακα 9.2**, μορφώθηκαν διδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων RS2 και εφαρμόζοντας το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb. Η σύγκριση των προκαλούμενων ολικών μετακινήσεων ( $U$ ) μεταξύ των τριδιάστατων και των αντίστοιχων διδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων, παρουσιάζεται στις **Εικόνες 9.1** και **9.2**. Οι τριδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις, έχουν πραγματοποιηθεί στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Simulia Abaqus.



Εικόνα 9. 1. Σύγκριση ολικών μετακινήσεων στην περιοχή του μετώπου εκσκαφής για το έδαφος Α, μεταξύ τριδιάστατης (3D) και διδιάστατης (2D) αριθμητικής ανάλυσης.



Εικόνα 9. 2. Σύγκριση ολικών μετακινήσεων στην περιοχή του μετώπου εκσκαφής για το έδαφος Β, μεταξύ τριδιάστατης (3D) και διδιάστατης (2D) αριθμητικής ανάλυσης.

Από τις παραπάνω εικόνες, παρατηρείται μια πολύ καλή συμφωνία στο μέγεθος και την ανάπτυξη των ολικών μετακινήσεων περίξ της εκσκαφής, τόσο για το ασθενές όσο και για το καλό έδαφος, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των τριδιάστατων και των αντίστοιχων διδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων.

## 9.2. Περίπτωση εφαρμογής βαθιάς σήραγγας

Στην συνέχεια πρόκειται να παρουσιαστεί η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας για τον υπολογισμό του βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) για ανυποστήρικτο μέτωπο εκσκαφής, σε περίπτωση βαθιών σηράγγων.

Συγκεκριμένα εξετάζεται η περίπτωση ολομέτωπης διάνοιξης ρηχής σήραγγας, ισοδύναμης διαμέτρου  $D = 10\text{m}$  και με ύψος υπερκείμενων γαιών  $H = 150\text{m}$ . Εξετάζεται η περίπτωση διάνοιξης σε δύο βραχόμαζες ταξινομημένες βάσει GSI, με τις ιδιότητες της βραχόμαζας να παρουσιάζονται στον **Πίνακα 9.3**.

GSI	Ειδικό βάρος ( $\gamma$ )	Αντοχή βραχόμαζας ( $\sigma_{cm}$ )	Μέτρο ελαστικότητας βραχόμαζας ( $E_m$ )
25	25 kN/m <sup>3</sup>	0.95 MPa	119.7 MPa
45	25 kN/m <sup>3</sup>	1.56 MPa	447.3 MPa

*Πίνακας 9. 3. Μηχανικές ιδιότητες βραχόμαζας για βαθιές σήραγγες.*

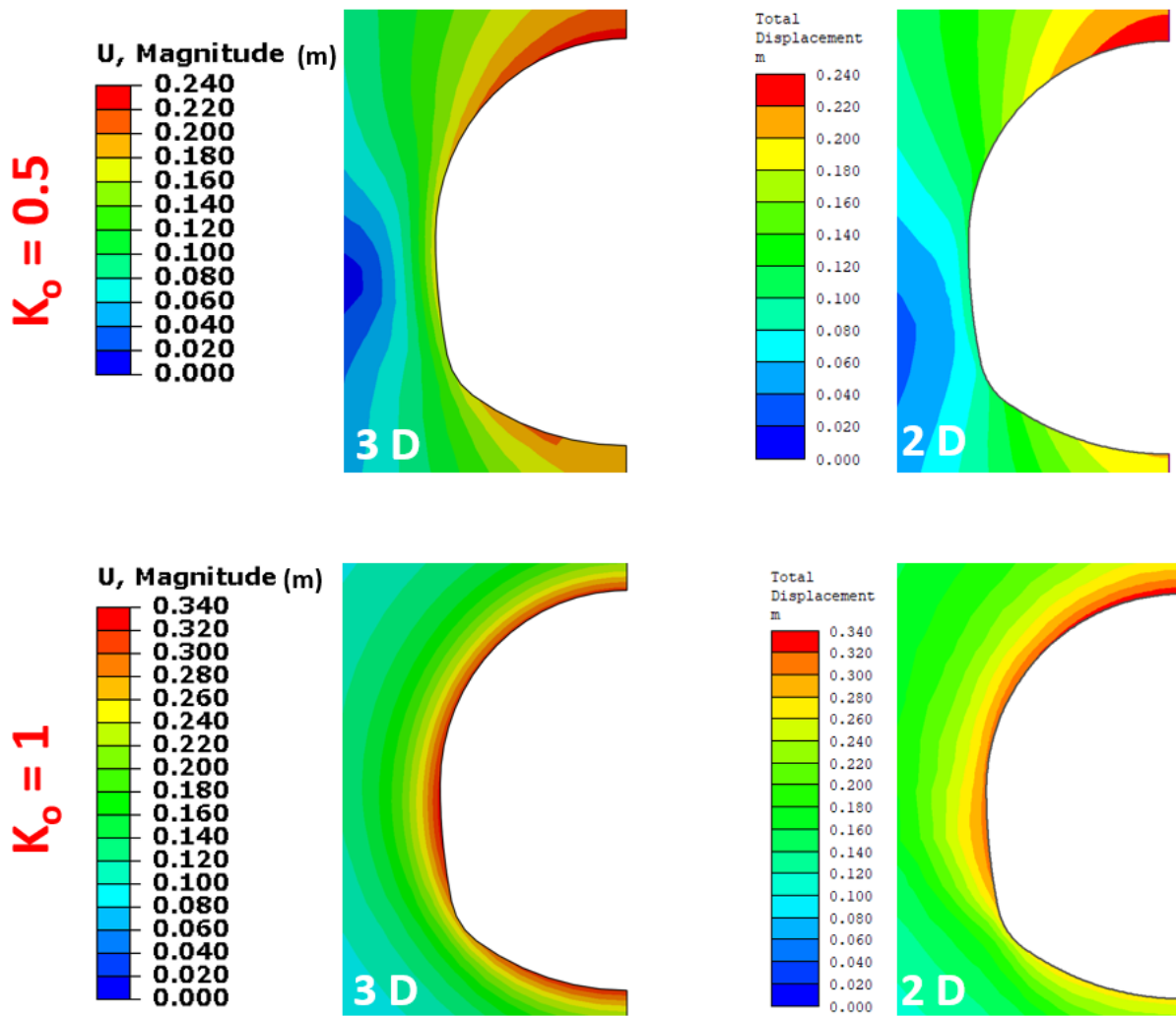
Συγκεκριμένα εξετάστηκε η περίπτωση συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων  $K_o = 0.5$  και **1**. Εφαρμόζοντας την **Εξ. 4**, υπολογίζεται ο αντίστοιχος βαθμός αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στην περιοχή του μετώπου εκσκαφής, όπως παρουσιάζεται στον **Πίνακα 9.4**.

GSI	Συντελεστής ουδετέρων ωθήσεων ( $K_o$ )	Ισοδύναμος βαθμός αποτόνωσης ( $\lambda$ )
25	0.5	<b>0.66</b>
25	1	<b>0.69</b>
45	0.5	<b>0.45</b>
45	1	<b>0.48</b>

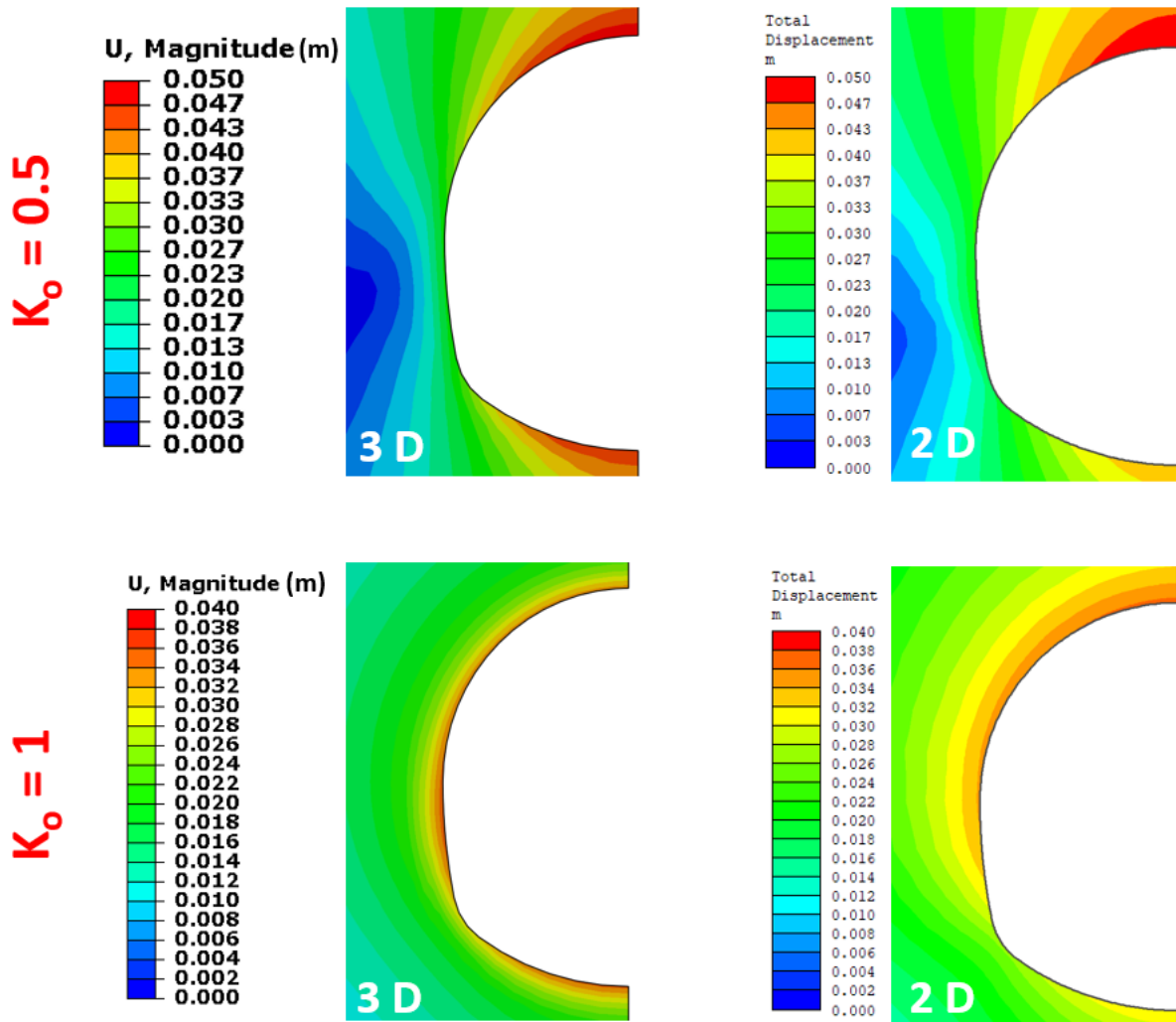
*Πίνακας 9. 4. Προσδιορισμός ισοδύναμου βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στην περιοχή του μετώπου εκσκαφής για τις εξεταζόμενες περιπτώσεις βαθιών σηράγγων.*

Εφαρμόζοντας τον ισοδύναμο βαθμό αποτόνωσης ( $\lambda$ ) βάσει του **Πίνακα 9.4**, μορφώθηκαν διδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων RS2 και εφαρμόζοντας το κριτήριο αστοχίας Generalized Hoek & Brown (2002). Η σύγκριση των προκαλούμενων ολικών μετακινήσεων ( $U$ ) μεταξύ των τριδιάστατων και των αντίστοιχων διδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων, παρουσιάζεται στις **Εικόνες 9.3** και **9.4**. Οι τριδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις, έχουν πραγματοποιηθεί στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Simulia Abaqus.





Εικόνα 9. 3. Σύγκριση ολικών μετακινήσεων στην περιοχή του μετώπου εκσκαφής για την βραχώμαζα με τιμή  $GSI = 25$ , μεταξύ τριδιάστατης (3D) και διδιάστατης (2D) αριθμητικής ανάλυσης.



Εικόνα 9. 4. Σύγκριση ολικών μετακινήσεων στην περιοχή του μετώπου εκσκαφής για την βραχώμαζα με τιμή  $GSI = 45$ , μεταξύ τριδιάστατης (3D) και διδιάστατης (2D) αριθμητικής ανάλυσης.

Από τις παραπάνω εικόνες, παρατηρείται μια πολύ καλή συμφωνία στο μέγεθος και την ανάπτυξη των ολικών μετακινήσεων περίξ της εκσκαφής και για τις δύο εξεταζόμενες βραχώμαζες, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των τριδιάστατων και των αντίστοιχων διδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων.

## 10. Συμπεράσματα – Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στην παρούσα εργασία, έγινε προσπάθεια μετατροπής του τριδιάστατου προβλήματος της ευστάθειας του ανυποστήρικτου μετώπου εκσκαφής σηράγγων, σε ένα απλό διδιάστατο πρόβλημα, κάνοντας χρήση του ισοδύναμου βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ). Με την μέθοδο αυτή θα μπορεί να γίνει εκτίμηση της συμπεριφοράς του μετώπου εκσκαφής καθώς και τον προκαλουμένων μετακινήσεων περίξ αυτού, μέσω διδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων, μειώνοντας έτσι σημαντικά τον υπολογιστικό χρόνο και όγκο δεδομένων που θα απαιτούσε μια τριδιάστατη αριθμητική ανάλυση.

Τα βασικότερα συμπεράσματα που απορρέουν από την παρούσα εργασία είναι:

- ✓ Η πολύ καλή ταύτιση των αποτελεσμάτων μεταξύ των διαθέσιμων εμπειρικών μεθόδων σύγκλισης – αποτόνωσης του εδάφους, καθώς τα αποτελέσματα έχουν πολύ καλή ταύτιση τόσο στην ελαστική όσο και στην ελαστοπλαστική περιοχή.
- ✓ Η πολύ καλή ταύτιση των αποτελεσμάτων μεταξύ των εμπειρικών μεθόδων σύγκλισης – αποτόνωσης και της αντίστοιχης καμπύλης σύγκλισης – αποτόνωσης που προκύπτει από τις διδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις.
- ✓ Παρατηρήθηκε η άμεση επιρροή της εξώθησης του μετώπου εκσκαφής σηράγγων, στο μέγεθος και το ποσοστό των συγκλίσεων που έχουν αναπτυχθεί στο μέτωπο εκσκαφής (προ – συγκλίσεις), όπου σε περιπτώσεις ασθενούς εδάφους θα προκληθούν σοβαρές εξωθήσεις και θα οδηγήσουν σε πολύ μεγάλες συγκλίσεις και το αντίστροφο.
- ✓ Σε συνέχεια του προηγούμενου συμπεράσματος, διαπιστώνεται ότι σε πολύ ασθενή εδάφη όπου θα έχουν αναπτυχθεί μεγάλες προ – συγκλίσεις στο μέτωπο εκσκαφής, ο αντίστοιχος βαθμός αποτόνωσης ( $\lambda$ ) θα είναι μεγάλος.
- ✓ Παρατηρήθηκε ότι όσο αυξάνεται η απόσταση ισορροπίας των συγκλίσεων της εκσκαφής πίσω από το μέτωπο εκσκαφής, τόσο περισσότερο θα μειωθεί ο βαθμός αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στο μέτωπο εκσκαφής.
- ✓ Με βάσει την προτεινόμενη σχέση για τον προσδιορισμό του ισοδύναμου βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στο μέτωπο εκσκαφής, για να χαρακτηρίζεται ως ευσταθές το μέτωπο θα πρέπει ο βαθμός αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στην περιοχή του μετώπου της σήραγγας ( $x/D = 0$ ) να είναι μικρότερος από 0.7 (70 %).
- ✓ Τα αποτελέσματα των ισοδυνάμων διδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων, εφαρμόζοντας την προτεινόμενη σχέση για τον προσδιορισμό του ισοδύναμου βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στο μέτωπο

εκσκαφής, παρουσιάζουν πολύ μεγάλη ταύτιση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των τριδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων τόσο για περιπτώσεις ρηχών όσο και βαθιών σηράγγων.

Τέλος η παρούσα εργασία, παρουσιάζει τις ακόλουθες **προτάσεις για μελλοντική έρευνα**:

- ✓ Προσπάθεια επέκτασης της προτεινομένης μεθοδολογίας προσδιορισμού του ισοδύναμου βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στο μέτωπο εκσκαφής και για περιπτώσεις με προϋποστήριξης του μετώπου εκσκαφής (forepoling umbrella και fiberglass nails). Με τον τρόπο αυτό θα λαμβάνεται υπόψιν η επιρροή των μέτρων προϋποστήριξης του μετώπου εκσκαφής στις διδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις.
- ✓ Έλεγχος της προτεινομένης μεθοδολογίας προσδιορισμού του ισοδύναμου βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) στο μέτωπο εκσκαφής και με άλλα κριτήρια αστοχίας τόσο για εδάφη όσο και για βραχώμαζες.
- ✓ Επαλήθευση της προτεινομένης μεθοδολογίας προσδιορισμού του ισοδύναμου βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) με πραγματικές μετρήσεις, μέσω ανάστροφων αριθμητικών αναλύσεων.
- ✓ Επέκταση της προτεινόμενης μεθοδολογίας όχι μόνο για την περιοχή του μετώπου εκσκαφής, αλλά και για το υπόλοιπο τμήμα του άξονα της σήραγγας.

## 11. Βιβλιογραφία

### Ελληνική βιβλιογραφία:

- ✓ Γεωργίου, Δημήτριος. "Κατασκευή σιδηροδρομικής σήραγγας Παναγοπούλας." (2015).
- ✓ Καββαδάς, Μ. "Σημειώσεις σχεδιασμού υπογείων έργων." Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα (2005).
- ✓ Σοφιανός, Αλέξανδρος. "Υποστήριξη υπόγειων έργων." (2015).
- ✓ Σοφιανός, Αλέξανδρος. "Διάνοιξη Σηράγγων." (2018).

### Διεθνής βιβλιογραφία:

- ✓ Carranza-Torres, C., and C. Fairhurst. "Elasto-plastic analysis of elliptical cavities in rock subject to non-hydrostatic loading." Proceedings of the 1999 FLAC and numerical modeling in geomechanics symposium.. 1999.
- ✓ Carranza-Torres, C., et al. "Elasto-plastic analysis of deep tunnels in brittle rock using a scaled form of the Mohr-Coulomb failure criterion." Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium and the 17th Tunnelling Association of Canada Conference, NARMS-TAC, Toronto, Canada, ed. Hammah et al. 2002.
- ✓ FAMA, MARY E. DUNCAN. "Numerical modeling of yield zones in weak rock." Analysis and design methods. Pergamon, 1993. 49-75.
- ✓ Hoek, E. Numerical modeling for shallow tunneling in weak rock. Discussion paper 3, 2004.
- ✓ Hoek, E., et al. "Rock-Support Interaction analysis for tunnels in weak rock masses." H. Evert, Practical Rock Engineering. Rocscience (2007).
- ✓ Lunardi, Pietro. Design and construction of tunnels: Analysis of Controlled Deformations in Rock and Soils (ADECO-RS). Springer Science & Business Media, 2008.
- ✓ Marinos, Paul, and Evert Hoek. "GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation." ISRM international symposium. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering, 2000.
- ✓ Marinos, P. V. "Geological behaviour of rock masses in underground excavations." Bulletin of the geological society of Greece 43.3 (2010): 1238-1247.

- ✓ Ocak, Ibrahim, et al. "Cost comparison of NATM and umbrella arch method." ITA WTC 2015 Congress and 41st General Assembly, May. 2015.
- ✓ Zheng, Y. L., Q. B. Zhang, and J. Zhao. "Challenges and opportunities of using tunnel boring machines in mining." Tunnelling and Underground Space Technology 57 (2016): 287-299.
- ✓ GEODATA Group
- ✓ ELEBOR A.E.B.E
- ✓ Rocscience
- ✓ Robbins TBM
- ✓ Acciona Ghella Joint Venture