



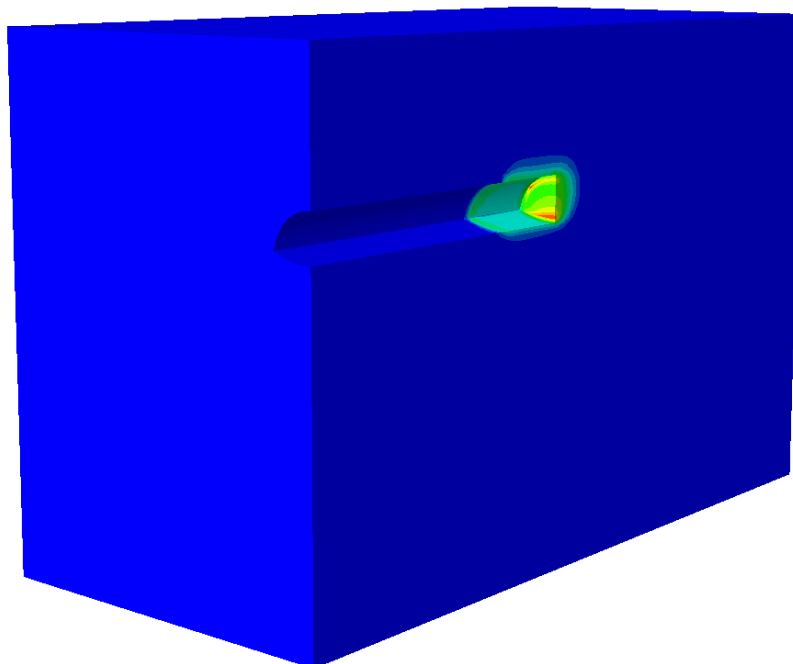
**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**Δ.Π.Μ.Σ. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ**

---

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΤΡΟΠΟΥ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ  
ΜΕΤΡΩΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΜΕΤΩΠΟΥ ΣΕ ΡΗΧΕΣ ΣΗΡΑΓΓΕΣ**



**ΔΙΑΚΟΥΜΗ ΕΥΣΤΑΘΙΑ**

*ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : ΚΑΒΒΑΔΑΣ ΜΙΧΑΗΛ*

Τριμελής Επιτροπή :

Καββαδάς Μιχαήλ, Καθηγητής

Παπαδημητρίου Αχιλλέας, Αναπληρωτής Καθηγητής

Νομικός Παύλος, Αναπληρωτής Καθηγητής

**ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2020**

Copyright © Διακουμή Ευσταθία

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 Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

### **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία αποτελεί τον επίλογο της διετούς φοίτησής μου στο Δ.Π.Μ.Σ. Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Ολοκληρώνοντας την προσπάθεια αυτή θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες προς :

- Τον καθηγητή της σχολής Πολιτικών Μηχανικών, κύριο Καββαδά Μιχαήλ για την εμπιστοσύνη του και την ανάθεση του θέματος της εργασίας.
- Τον κύριο Γεωργίου Δημήτριο, Υποψήφιο Διδάκτορα της σχολής Πολιτικών Μηχανικών, ο οποίος στάθηκε αρωγός στην προσπάθεια αυτή, με τη συνεχή ενθάρρυνση και την ενεργή παρουσία του.
- Τους Λέκτορες της σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, κύριο Γεωργόπουλο Γεώργιο και κυρία Τελειώνη Ελισάβετ, για την συνεχή ενθάρρυνση και στήριξη σε όλη τη διάρκεια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος.
- Την οικογένειά μου για τη στήριξη τους σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διάνοιξη σηράγγων αποτελεί ένα από τα σπουδαιότερα επιτεύγματα της σύγχρονης μηχανικής. Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα, το οποίο έχει απασχολήσει τους μελετητές, είναι η ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής, καθώς η μετακίνηση της περιβάλλουσας βραχώμαζας είναι δυνατόν να οδηγήσει σε αστοχία των υπερκείμενων κατασκευών και των δικτύων κοινής ωφέλειας.

Στο πλαίσιο αυτό, σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να εκτιμήσει τα βέλτιστα χαρακτηριστικά της προϋποστήριξης μετώπου με αγκύρια μετώπου fiberglass, με ταυτόχρονη ή μη χρήση δοκών προπορείας και ειδικότερα, να εντοπίσει ποιο θα πρέπει να είναι το βέλτιστο μήκος αλληλοεπικάλυψης (overlap area) κατά την εφαρμογή τους, ώστε να συνεισφέρουν στο μέγιστο δυνατό.

Για την εκπόνηση της εργασίας, πραγματοποιήθηκαν τρισδιάστατες αναλύσεις στο λογισμικό Simulia ABAQUS v.2018. Στο λογισμικό δημιουργήθηκε ένα τρισδιάστατο προσομοίωμα, για το οποίο ορίστηκαν τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά, ενώ προσομοιώθηκε η μισή σήραγγα για οικονομία υπολογιστικού όγκου και χρόνου. Επιπλέον, λήφθηκαν αποτελέσματα για διαφορετικούς τύπους εδαφών, διαφορετικά ύψη υπερκείμενων και διαφορετικές τιμές τού συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων.

Μεταξύ των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν, εξετάστηκαν η εξώθηση του μετώπου, οι επιφανειακές καθιζήσεις, η απώλεια εδαφικού όγκου, το εύρος της πλαστικής ζώνης, και το ποσοστό λειτουργίας των αγκυρίων. Τα μεγέθη αυτά μελετήθηκαν βάσει του συντελεστή ασφαλείας Georgiou et al. (2020), συναρτήσει της πυκνότητας του κανάβου των αγκυρίων, του ύψους υπερκείμενων και του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων  $K_0$ .

Η εργασία ολοκληρώνεται με τη συνολική συσχέτιση των αποτελεσμάτων με τον συντελεστή ασφαλείας, την εύρεση του βέλτιστου μήκους αλληλοεπικάλυψης των αγκυρίων μετώπου fiberglass και την μόρφωση σχέσεων υπολογισμού του εύρους της πλαστικής ζώνης για το ανυποστήρικτο άνοιγμα και της απώλειας εδαφικού όγκου σε κάθε περίπτωση.



## **ABSTRACT**

Tunnel excavation is one of the most important achievements of modern engineering. One of the most important problems, which has preoccupied researchers, is face stability as the movement of the surrounding rock mass can lead to failure of the overlying structures and utility networks.

The purpose of this thesis is to evaluate the optimal characteristics of the front support with fiberglass with simultaneous or non-use of forepoling and in particular to identify what should be the optimal overlap area during their application to contribute as much as possible.

For the elaboration of this thesis, three-dimensional analyzes were performed in the software Simulia ABAQUS v.2018. A 3D simulation was created in the software for which its geometric characteristics were defined, while the half tunnel was simulated for economy of volume and time. In addition, results were obtained for different soil types, heights and horizontal soil stresses factor.

Among the results extracted were extrusion, surface vertical displacements, ground volume loss, plastic zone's width, and working rate. These quantities were studied based on the safety factor Georgiou et al. (2020), as a function of the fiberglass grid's density, the surface height and the horizontal soil stresses factor  $K_0$ .

Thesis is completed with the overall correlation of the results with the safety factor. Finding the optimal overlap area of fiberglass and the formation of types for calculating the width of the plastic zone for the unsupported opening and the loss of ground volume in each case, is also presented.





## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	19
1.1 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	21
1.2 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΣΗΡΑΓΓΩΝ .....	25
2.1. ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΣΗΡΑΓΓΑ.....	27
2.2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ.....	28
2.2.1. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ NATM.....	29
2.2.2. ΑΛΛΗΛΟΥΧΙΑ ΕΡΓΑΣΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΜΕ NATM.....	30
2.2.3. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΧΡΗΣΗΣ NATM .....	31
2.2.4. ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΧΡΗΣΗΣ NATM .....	31
2.3. ΤΡΟΠΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ .....	32
2.4. ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΚΑΘΙΖΗΣΕΙΣ.....	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΜΕΤΩΠΟΥ ΣΗΡΑΓΓΩΝ.....	41
3.1. ΤΡΟΠΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ .....	43
3.2. ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ.....	45
3.3. ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΤΟΥ ΜΕΤΩΠΟΥ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ .....	46
3.3.1 ΠΡΟΫΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΜΕΤΩΠΟΥ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΜΕ ΔΟΚΟΥΣ ΠΡΟΠΟΡΕΙΑΣ 46	
3.3.2 ΠΡΟΫΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΜΕΤΩΠΟΥ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΜΕ ΑΓΚΥΡΙΑ ΜΕΤΩΠΟΥ FIBERGLASS .....	52
3.4 ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΕΣ ΕΡΕΥΝΕΣ.....	57
3.4.1. Vermeer .....	57
3.4.2. Peila .....	59
3.4.3. Kovari & Anagnostou.....	62
3.5. ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΚΑΤΑ Γ. Κ. ΠΡΟΥΝΤΖΟΠΟΥΛΟ (2012) .....	64
3.6. ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΚΑΤΑ Δ. ΓΕΩΡΓΙΟΥ (2020) (υπό δημοσίευση).....	66
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΥΡΥΝΣΗ ΤΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΟΥ ΜΕΤΩΠΟΥ ....	71

4.1.	ΣΚΟΠΟΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ.....	73	
4.2	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ .....	73	
4.3	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΓΕΩΥΛΙΚΟΥ .....	75	
4.4	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕΤΡΩΝ ΠΡΟΣΩΡΙΝΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ .....	77	
4.5.	ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ (MESH).....	82	
4.6.	ΣΤΑΔΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ .....	82	
4.7.	ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ .....	83	
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΟΥ			
ΑΝΥΠΟΣΤΗΡΙΚΤΟΥ ΜΕΤΩΠΟΥ ΕΚΣΚΑΦΗΣ.....			89
5.1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	91	
5.2	ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΗ ΕΞΩΘΗΣΗ ΜΕΤΩΠΟΥ ΕΚΣΚΑΦΗΣ .....	91	
5.3	ΕΚΔΗΛΩΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΑΘΙΖΗΣΕΩΝ.....	96	
5.4	ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΖΩΝΗΣ ΕΜΠΡΟΣΘΕΝ ΤΟΥ ΜΕΤΩΠΟΥ		
	ΕΚΣΚΑΦΗΣ .....	100	
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΜΕΤΩΠΟΥ			
ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΜΕ ΠΡΟΫΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΑΠΟ ΑΓΚΥΡΙΑ FIBERGLASS .....			105
6.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	107	
6.2	ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΗ ΕΞΩΘΗΣΗ ΜΕΤΩΠΟΥ ΕΚΣΚΑΦΗΣ .....	107	
6.3	ΕΚΔΗΛΩΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΑΘΙΖΗΣΕΩΝ.....	111	
6.4	ΕΥΡΕΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΑΓΚΥΡΙΩΝ ΜΕΤΩΠΟΥ ΕΚΣΚΑΦΗΣ		
	FIBERGLASS .....	115	
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΜΕΤΩΠΟΥ			
ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΜΕ ΠΡΟΫΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΑΠΟ ΑΓΚΥΡΙΑ FIBERGLASS ΚΑΙ ΔΟΚΟΥΣ			
ΠΡΟΠΟΡΕΙΑΣ FOREPOLE.....			121
7.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	123	
7.2.	ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΗ ΕΞΩΘΗΣΗ ΜΕΤΩΠΟΥ ΕΚΣΚΑΦΗΣ .....	123	
7.3.	ΕΚΔΗΛΩΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΑΘΙΖΗΣΕΩΝ.....	127	
7.4.	ΕΥΡΕΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΑΓΚΥΡΙΩΝ ΜΕΤΩΠΟΥ ΕΚΣΚΑΦΗΣ		
	FIBERGLASS .....	131	

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ.....	137
8.1. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	139
8.2. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....	149
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	151

### ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 : Ευπαλίνειο όρυγμα - Σάμος .....	28
Εικόνα 2 : Φάσεις εκσκαφής NATM.....	31
Εικόνα 3 : TBC – Tunnel Behaviour Chart (Μαρίνος, 2012).....	33
Εικόνα 4 : Πρωτεύων τύπος επέκτασης μετακινήσεων προς την επιφάνεια του εδάφους (Πηγή: ΙΤΑ- CET). .....	35
Εικόνα 5 : Δευτερεύων τύπος επέκτασης μετακινήσεων προς την επιφάνεια του εδάφους (Πηγή: ΙΤΑ- CET).....	35
Εικόνα 6 : Καμπύλη καθιζήσεων (Πηγή: A. Marto) .....	36
Εικόνα 7 : Παράμετρος K ανάλογα τον τύπο του εδάφους ( O’ Reilly and New - 1982) .....	37
Εικόνα 8 : Συσχέτιση εδαφικής απώλειας όγκου με συντελεστή υπερφόρτισης (Πηγή. Β. Παπαδόπουλος).....	38
Εικόνα 9 : Σχηματική απεικόνιση της απώλειας όγκου εκσκαφής (Πηγή: Jinyang Fu) .....	39
Εικόνα 10 : Κύκλος του Mohr - κύριες τάσεις .....	43
Εικόνα 11 : Συμπεριφορά εδάφους κατά τη διάνοιξη .....	44
Εικόνα 12 : Μηχανισμός λειτουργίας ομπρέλας δοκών προπορείας.....	47
Εικόνα 13 : Πρώτη εφαρμογή δοκών προπορείας με κορμούς δένδρων (Πηγή: Britannica).....	47
Εικόνα 14 : Διάταξη ομπρέλας δοκών προπορείας (Πηγή: Hoek 2004). .....	48
Εικόνα 15 : Εφαρμογή ομπρέλας δοκών προπορείας στην σιδηροδρομική σήραγγα Παναγοπούλας. ....	49
Εικόνα 16 : Εφαρμογή ομπρέλας δοκών προπορείας σε υπόγειο έργο της Αττικό Μετρό.....	49
Εικόνα 17 : Κρίσιμη γωνία αστοχίας μετώπου εκσκαφής (Πηγή: Καββαδάς Μ.).....	50

Εικόνα 18 : Εφαρμογή της μεθόδου Rankine για την εύρεση του μήκους αλληλοεπικάλυψης δοκών προπορείας (Πηγή: Marinos V.).....	51
Εικόνα 19 : Εφαρμογή της μεθόδου Kovari – Anagnostou για την εύρεση του μήκους αλληλοεπικάλυψης δοκών προπορείας (Πηγή: Καββαδάς Μ.).....	51
Εικόνα 20 : Διαδικασία κατασκευής ομπρέλας δοκών προπορείας (Πηγή: Γεωργίου Δ.).....	52
Εικόνα 21 : Μηχανισμός λειτουργίας αγκυρίων μετώπου fiberglass.....	53
Εικόνα 22 : Υποστήριξη μετώπου εκσκαφής με αγκύρια fiberglass στην οδική σήραγγα Οθρυς (Πηγή: Γραφείο Μάλλιου Α.Ε.).....	54
Εικόνα 23 : Μέτωπο εκσκαφής υποστηριγμένο με αγκύρια fiberglass (Πηγή: Γεωργίου Δ.).....	55
Εικόνα 24 : Αγκύρια fiberglass ορθογωνικής διατομής με κεντραδώρο (Πηγή: Γεωργίου Δ.).....	56
Εικόνα 25 : Μέτωπο εκσκαφής με συνδυασμό υποστήριξης από αγκύρια μετώπου fiberglass και δοκούς προπορείας (Πηγή: Γεωργίου Δ.).....	56
Εικόνα 26 : Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης - εξώθησης μετώπου.....	57
Εικόνα 27 : Σύγκριση αποτελεσμάτων διαφορετικών μελετών.....	58
Εικόνα 28 : Επιρροή πίεσης υποστήριξης λόγω εξωτερικής φόρτισης.....	58
Εικόνα 29 : Συγκριτικά αποτελέσματα της προσέγγισης του Vermeer σε σχέση με άλλες μεθόδους.....	59
Εικόνα 30 : Τυπική διατομή άμεσης υποστήριξης.....	60
Εικόνα 31 : Γεωμετρία μοντέλου.....	60
Εικόνα 32 : Προσομοίωμα της σφήνας κατά τη μέθοδο Kovari & Anagnostou.....	62
Εικόνα 33 : Δυνάμεις που ασκούνται στη σφήνα.....	63
Εικόνα 34 : Συντελεστής ασφαλείας συνταρτήσει της εξώθησης του μετώπου εκσκαφής για διαφορετικά ύψη υπερκειμένων.....	65
Εικόνα 35 : Σύγκριση αποτελεσμάτων μέσης κανονικοποιημένης έκθλιψης μετώπου $\Omega_f, area$ για διάφορες τιμές του μέτρου παραμορφωσιμότητας του εδάφους, σε σήραγγα βάθους $H=2.0D$ .....	66
Εικόνα 36 : Διαστάσεις διατομής εκσκαφής.....	74
Εικόνα 37 : Προσομοίωμα αριθμητικών αναλύσεων.....	75
Εικόνα 38 : Σχηματική αποτύπωση κριτηρίου αστοχίας Mohr-Coulomb.....	76
Εικόνα 39 : Προσομοίωση κελύφους προσωρινής υποστήριξης από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αγκύρια ολόσωμης πάκτωσης.....	78

Εικόνα 40 : Τεχνικές προδιαγραφές εμπορεύσιμων αγκυρίων μετώπου fiberglass (Πηγή: ΕΛΕΒΟΡ Α.Ε.Β.Ε.).....	80
Εικόνα 41 : Προσομοίωση μέτρων προϋποστήριξης μετώπου εκσκαφής.....	81
Εικόνα 42 : Διακριτοποίηση προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων.....	82
Εικόνα 43 : Συνοριακές συνθήκες προσομοιώματος.....	84
Εικόνα 44 : Μέθοδος υπολογισμού εξώθησης μετώπου εκσκαφής κατά τον κατακόρυφο άξονα.....	85
Εικόνα 45 : Μέθοδος υπολογισμού μέσης εξώθησης μετώπου εκσκαφής.....	86
Εικόνα 46 : Περιοχή μη – λειτουργίας αγκυρίων μετώπου fiberglass. ....	87
Εικόνα 47 : Μεταβολή αναπτυσσόμενης τάσης αγκυρίων μετώπου fiberglass, συναρτήσει του διαθέσιμου μήκους πάκτωσης. ....	88
Εικόνα 48 : Μεταβολή της πλαστικής ζώνης εμπρός από το μέτωπο εκσκαφής, συναρτήσει του διαθέσιμου μήκους αγκυρίων fiberglass.....	88
Εικόνα 49 : Εκδήλωση φαινομένου καμινάδας σε ρηχή σήραγγα σε ασθενές γεωλικό. ....	95
Εικόνα 50 : Μορφή πλαστικής ζώνης για συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων $K_0=1$ ..	102
Εικόνα 51 : Μορφή πλαστικής ζώνης για συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων $K_0=0.5$ . ....	103

### ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1 :Συσχέτιση συντελεστή ασφαλείας $\Lambda_{F_0}$ με εξώθηση μετώπου εκσκαφής $\Omega_F$ .....	68
Διάγραμμα 2 : Συσχέτιση συντελεστή ασφαλείας $\Lambda_F$ με εξώθηση μετώπου εκσκαφής $\Omega_F$ .....	69
Διάγραμμα 3 : Αποτύπωση εξωθήσεων μετώπου εκσκαφής βάσει συντελεστή ευστάθειας $\Lambda_{F_0}$ για διαφορετικά υπερκείμενα.....	92
Διάγραμμα 4 : Αποτύπωση εξωθήσεων μετώπου εκσκαφής βάσει συντελεστή ευστάθειας $\Lambda_{F_0}$ για διαφορετική τιμή του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων $K_0$ .....	92
Διάγραμμα 5 : Αποτύπωση εξωθήσεων μετώπου εκσκαφής βάσει συντελεστή υπερφόρτισης $N_s$ για διαφορετικά υπερκείμενα.....	93
Διάγραμμα 6 : Αποτύπωση εξωθήσεων μετώπου εκσκαφής βάσει συντελεστή υπερφόρτισης $N_s$ για διαφορετική τιμή του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων $K_0$ .....	94

Διάγραμμα 7 : Συσχέτιση της εξώθησης μετώπου εκσκαφής σε ασθενές και συνεκτικό έδαφος.....	95
Διάγραμμα 8 : Αποτύπωση λόγου ( $S_{max}/D$ ) βάσει συντελεστή ευστάθειας $\Lambda_{F_0}$ για διαφορετικά υπερκείμενα.....	96
Διάγραμμα 9 : Αποτύπωση λόγου ( $S_{max}/D$ ) βάσει συντελεστή ευστάθειας $\Lambda_{F_0}$ για διαφορετική τιμή του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων $K_0$ .....	97
Διάγραμμα 10 : Διαμήκες προφίλ εδαφικών καθιζήσεων για ένα ασθενές έδαφος συναρτήσει των υπερκείμενων γαιών.....	98
Διάγραμμα 11 : Αποτύπωση απώλειας εδαφικού όγκου ( $V_L$ ) βάσει συντελεστή ευστάθειας $\Lambda_{F_0}$ για διαφορετικά υπερκείμενα.....	99
Διάγραμμα 12 : Αποτύπωση απώλειας εδαφικού όγκου ( $V_L$ ) βάσει συντελεστή ευστάθειας $\Lambda_{F_0}$ για διαφορετική τιμή του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων $K_0$ .....	100
Διάγραμμα 13 : Αποτύπωση λόγου (Plastic Zone/D) βάσει συντελεστή ευστάθειας $\Lambda_{F_0}$ για διαφορετικά υπερκείμενα.....	101
Διάγραμμα 14 : Αποτύπωση λόγου (Plastic Zone/D) βάσει συντελεστή ευστάθειας $\Lambda_{F_0}$ για διαφορετική τιμή του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων $K_0$ .....	101
Διάγραμμα 15 : Αποτύπωση εξωθήσεων μετώπου εκσκαφής βάσει συντελεστή ευστάθειας $\Lambda_F$ για διαφορετικά υπερκείμενα.....	108
Διάγραμμα 16 : Αποτύπωση εξωθήσεων μετώπου εκσκαφής βάσει συντελεστή ευστάθειας $\Lambda_F$ για διαφορετική τιμή του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων $K_0$ .....	108
Διάγραμμα 17 : Αποτύπωση εξωθήσεων μετώπου εκσκαφής βάσει συντελεστή ευστάθειας $\Lambda_F$ για διαφορετική πυκνότητα αγκυρίων μετώπου (fiberglass).....	109
Διάγραμμα 18 : Μεταβολή της εξώθησης του μετώπου εκσκαφής για το έδαφος S1 και υπερκείμενα $H=20m$ , για συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων $K_0=1$ , συναρτήσει της πυκνότητας αγκύρωσης.....	110
Διάγραμμα 19 : Μεταβολή της εξώθησης του μετώπου εκσκαφής για το έδαφος S1 και υπερκείμενα $H=20m$ για συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων $K_0=0.5$ , συναρτήσει της πυκνότητας αγκύρωσης.....	110
Διάγραμμα 20 : Αποτύπωση λόγου ( $S_{max}/D$ ) βάσει συντελεστή ευστάθειας $\Lambda_F$ για διαφορετικά υπερκείμενα.....	111
Διάγραμμα 21 : Αποτύπωση λόγου ( $S_{max}/D$ ) βάσει συντελεστή ευστάθειας $\Lambda_F$ για διαφορετική τιμή του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων $K_0$ .....	112
Διάγραμμα 22 : Αποτύπωση λόγου ( $S_{max}/D$ ) βάσει συντελεστή ευστάθειας $\Lambda_F$ για διαφορετική τιμή της πυκνότητας των αγκυρίων fiberglass στο μέτωπο εκσκαφής.....	112

Διάγραμμα 23 : Διαμήκες προφίλ εδαφικών καθιζήσεων για ένα ασθενές έδαφος σε σχέση με την προσφερόμενη πίεση μετώπου, λόγω των αγκυρίων fiberglass. ....	113
Διάγραμμα 24 : Αποτύπωση απώλειας εδαφικού όγκου ( $V_L$ ) βάσει συντελεστή ευστάθειας $\Lambda_F$ για διαφορετικά υπερκείμενα. ....	114
Διάγραμμα 25 : Αποτύπωση απώλειας εδαφικού όγκου ( $V_L$ ) βάσει συντελεστή ευστάθειας $\Lambda_F$ για διαφορετική τιμή του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων $K_o$ . ....	115
Διάγραμμα 26 : Εύρεση βέλτιστου μήκους αγκυρίων βάσει μετρούμενων εξωθήσεων .....	116
Διάγραμμα 27 : Εύρεση βέλτιστου μήκους αγκυρίων βάσει φορτίου λειτουργίας αγκυρίων. ....	117
Διάγραμμα 28 : Συσχέτιση βέλτιστου μήκους αγκυρίων μετώπου εκσκαφής fiberglass με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου $\Lambda_F$ . ....	118
Διάγραμμα 29 : Συσχέτιση φορτίου λειτουργίας αγκυρίων μετώπου fiberglass με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου $\Lambda_F$ . ....	119
Διάγραμμα 30 : Αποτύπωση εξωθήσεων μετώπου εκσκαφής βάσει συντελεστή ευστάθειας $\Lambda_F$ για διαφορετικά υπερκείμενα. ....	124
Διάγραμμα 31 : Αποτύπωση εξωθήσεων μετώπου εκσκαφής βάσει συντελεστή ευστάθειας $\Lambda_F$ για διαφορετική τιμή του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων $K_o$ . ....	124
Διάγραμμα 32 : Αποτύπωση εξωθήσεων μετώπου εκσκαφής βάσει συντελεστή ευστάθειας $\Lambda_F$ για διαφορετική πυκνότητα αγκυρίων μετώπου (fiberglass) με ταυτόχρονη προϋποστήριξη με χρήση δοκών προπορείας. ....	125
Διάγραμμα 33 : Μεταβολή της εξώθησης του μετώπου εκσκαφής για το έδαφος S1 και υπερκείμενα $H=20m$ για συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων $K_o=1$ και πυκνότητα αγκυρίων fiberglass $2m^2$ και $4m^2$ , συναρτήσει της χρήσης ή μη δοκών προπορείας (forepole). ....	126
Διάγραμμα 34 : Μεταβολή της εξώθησης του μετώπου εκσκαφής για το έδαφος S1 και υπερκείμενα $H=20m$ για συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων $K_o=0.5$ και πυκνότητα αγκυρίων fiberglass $2m^2$ και $4m^2$ , συναρτήσει της χρήσης ή μη δοκών προπορείας (forepole). ....	126
Διάγραμμα 35 : Αποτύπωση λόγου ( $S_{max}/D$ ) βάσει συντελεστή ευστάθειας $\Lambda_F$ για διαφορετικά υπερκείμενα. ....	127
Διάγραμμα 36 : Αποτύπωση λόγου ( $S_{max} /D$ ) βάσει συντελεστή ευστάθειας $\Lambda_F$ για διαφορετική τιμή του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων $K_o$ . ....	128

Διάγραμμα 37 : Αποτύπωση λόγου ( $S_{max} / D$ ) βάσει συντελεστή ευστάθειας $\Lambda_F$ για διαφορετική τιμή της πυκνότητας των αγκυρίων fiberglass στο μέτωπο εκσκαφής.	128
Διάγραμμα 38 : Διαμήκες προφίλ εδαφικών καθιζήσεων για ένα ασθενές έδαφος σε σχέση με την προσφερόμενη πίεση μετώπου και τη χρήση ή μη δοκών προπορείας (forepole).....	129
Διάγραμμα 39 : Αποτύπωση απώλειας εδαφικού όγκου ( $V_L$ ) βάσει συντελεστή ευστάθειας $\Lambda_F$ για διαφορετικά υπερκείμενα. ....	130
Διάγραμμα 40 : Αποτύπωση απώλειας εδαφικού όγκου ( $V_L$ ) βάσει συντελεστή ευστάθειας $\Lambda_F$ για διαφορετική τιμή του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων $K_o$ .....	131
Διάγραμμα 41 : Εύρεση βέλτιστου μήκους αγκυρίων βάσει μετρούμενων εξωθήσεων .....	132
Διάγραμμα 42 : Εύρεση βέλτιστου μήκους αγκυρίων βάσει φορτίου λειτουργίας αγκυρίων. ....	133
Διάγραμμα 43 : Συσχέτιση βέλτιστου μήκους αγκυρίων μετώπου εκσκαφής fiberglass με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου $\Lambda_F$ , όταν το μέτωπο ενισχύεται ταυτόχρονα με τη χρήση δοκών προπορείας.....	134
Διάγραμμα 44 : Συσχέτιση φορτίου λειτουργίας αγκυρίων μετώπου fiberglass με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου $\Lambda_F$ , όταν το μέτωπο ενισχύεται με τη χρήση δοκών προπορείας.....	135
Διάγραμμα 45 : Μόρφωση σχέσης για συσχέτιση εύρους πλαστικής ζώνης εμπροσθεν του μετώπου εκσκαφής με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου $\Lambda_{F0}$ . ....	140
Διάγραμμα 46 : Αποτύπωση της απώλειας εδαφικού όγκου εκσκαφής $V_L$ (%) σε σχέση με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου $\Lambda_F$ για διάφορες περιπτώσεις προϋποστήριξης ή μη του μετώπου εκσκαφής.....	141
Διάγραμμα 47 : Μόρφωση σχέσης για συσχέτιση της απώλειας εδαφικού όγκου εκσκαφής $V_L$ με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου $\Lambda_F$ .....	142
Διάγραμμα 48 : Αποτύπωση του βέλτιστου μήκους αγκυρίων fiberglass σε σχέση με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου $\Lambda_F$ για διάφορες περιπτώσεις προϋποστήριξης του μετώπου εκσκαφής.....	144
Διάγραμμα 49 : Μόρφωση σχέσης για συσχέτιση του βέλτιστου μήκους αγκυρίων fiberglass με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου $\Lambda_F$ .....	145
Διάγραμμα 50 : Συσχέτιση προτεινομένης σχέσης εύρεσης βέλτιστου μήκος αγκυρίων fiberglass με άλλες βιβλιογραφικές μεθόδους. ....	146



Διάγραμμα 51 : Αποτύπωση φορτίου λειτουργίας αγκυρίων fiberglass σε σχέση με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου $\Lambda_F$ για διάφορες περιπτώσεις προϋποστήριξης του μετώπου εκσκαφής.....	147
Διάγραμμα 52 : Μόρφωση σχέσης για συσχέτιση του φορτίου λειτουργίας των αγκυρίων fiberglass με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου $\Lambda_F$ .....	148



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ**



## **1.1 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Η διάνοιξη σηράγγων και η κατασκευή υπογείων έργων έχει λάβει μεγάλη έκταση τις τελευταίες δεκαετίες. Τα υπόγεια έργα αποτελούν ιδιαίτερα πολύπλοκες, χρονοβόρες και δαπανηρές κατασκευές, οι οποίες ωστόσο διευκολύνουν την σύγχρονη πραγματικότητα.

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα, που έχει απασχολήσει τους μελετητές, είναι η ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής της σήραγγας, η οποία προσομοιώνεται με τη μορφή του ολισθαίνοντος πρίσματος, το οποίο φορτίζεται από το ίδιο το βάρος του και το βάρος των υπερκείμενων γαιών. Η ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς κατά την διάνοιξη οποιασδήποτε υπόγειας κατασκευής, η ανακατανομή των τάσεων οδηγεί σε μετακίνηση της περιβάλλουσας βραχώμαζας. Η μετακίνηση αυτή είναι πιθανό να οδηγήσει σε αστοχίες των υπερκείμενων κατασκευών, ειδικά στην περίπτωση ρηχών (αστικών) σηράγγων, οι οποίες αποτελούν και το κύριο πεδίο έρευνας της παρούσας μελέτης.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η διερεύνηση της ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής τόσο όταν υποστηρίζεται με αγκύρια μετώπου fiberglass, όσο και όταν πέρα από τα αγκύρια μετώπου, πραγματοποιείται ενίσχυση με τη χρήση δοκών προπορείας (forepole). Στο πλαίσιο της μελέτης, εξετάστηκαν η εξώθηση του μετώπου εκσκαφής, οι καθιζήσεις της επιφάνειας του εδάφους και η συνεισφορά της υποστήριξης για διαφορετικά γεωτεχνικά χαρακτηριστικά και ύψη υπερκείμενων γαιών, ώστε να υπολογιστεί το βέλτιστο μήκος αγκυρίων μετώπου εκσκαφής fiberglass, τα οποία χρησιμοποιούνται για την προϋποστήριξη του μετώπου εκσκαφής. Το μήκος αυτό είναι το σημαντικότερο στοιχείο που ενδιαφέρει τους μελετητές, ώστε το αγκύριο να παραμείνει πακτωμένο στο υγιές πέτρωμα και να μην επιτραπεί στην σφήνα να ολισθήσει.

## **1.2 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Η παρούσα εργασία δομείται σε οχτώ συνολικά κεφάλαια, τα οποία καλύπτουν τόσο το θεωρητικό όσο και το εφαρμοσμένο τμήμα της μελέτης.

Στο πρώτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται το αντικείμενο, ο σκοπός και η δομή της διπλωματικής εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, γίνεται μια σύντομη αναδρομή στην ιστορία της σήραγγοποιίας και τον ορισμό της σήραγγας, ενώ περιγράφονται οι τρόποι διάνοιξης με έμφαση στη Νέα Αυστριακή Μέθοδο Διάνοιξης Σηράγγων (NATM). Ταυτόχρονα, γίνεται αναφορά στους τρόπους αστοχίας της βραχώμαζας, και εξετάζεται το φαινόμενο των επιφανειακών καθιζήσεων λόγω της διάνοιξης ρηχών (αστικών) σηράγγων.

Το τρίτο κεφάλαιο, αφορά την ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής της σήραγγας. Στο κεφάλαιο αυτό, παρατίθενται οι τρόποι αστοχίας του μετώπου εκσκαφής και οι τρόποι αντιμετώπισης της. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στη βελτίωση της ευστάθειας του μετώπου με τη χρήση αγκυρίων μετώπου fiberglass και δοκών προπορείας forepole. Τέλος, δίνονται πληροφορίες για προηγούμενες έρευνες, καθώς και για τους συντελεστές ασφαλείας που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται αναλυτικά ο τρόπος δημιουργίας του μοντέλου με βάση το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, στο οποίο πραγματοποιήθηκαν οι τρισδιάστατες αναλύσεις. Στο κεφάλαιο αυτό, δίνονται οι διαστάσεις του μοντέλου, τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των εδαφών που χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη, τα διαφορετικά ύψη υπερκείμενων που εξετάστηκαν και αναλυτικές πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά των μέτρων υποστήριξης.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, σχολιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων που προέκυψαν για ανυποστήρικτο μέτωπο και πραγματοποιείται διαγραμματική παρουσίασή τους συναρτήσει των υπερκείμενων γαιών, του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων, του συντελεστή ασφαλείας και του εύρους της πλαστικής ζώνης. Μεταξύ των μεγεθών που εξετάζονται είναι η εξώθηση του μετώπου εκσκαφής και οι επιφανειακές καθιζήσεις.

Στο έκτο κεφάλαιο, παρατίθενται τα αποτελέσματα των αναλύσεων, όταν το μέτωπο υποστηρίζεται με αγκύρια fiberglass και πραγματοποιείται διαγραμματική παρουσίασή τους συναρτήσει των υπερκείμενων γαιών, του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων, του συντελεστή ασφαλείας και της πυκνότητας του καννάβου των αγκυρίων. Μεταξύ των μεγεθών που εξετάζονται είναι η εξώθηση του μετώπου εκσκαφής και οι επιφανειακές καθιζήσεις. Με βάση αυτά, προεκτιμάται το βέλτιστο μήκος αγκυρίων fiberglass.

Στο έβδομο κεφάλαιο, πραγματοποιείται διαγραμματική παρουσίαση των αποτελεσμάτων συναρτήσει των υπερκείμενων γαιών, του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων, του συντελεστή ασφαλείας και της πυκνότητας του καννάβου των αγκυρίων,

όταν πέρα από τα αγκύρια μετώπου fiberglass, χρησιμοποιούνται και δοκοί προπορείας (forepole). Μεταξύ των μεγεθών που εξετάζονται είναι η εξώθηση του μετώπου εκσκαφής και οι επιφανειακές καθιζήσεις. Με βάση αυτά, προεκτιμάται το βέλτιστο μήκος αγκυρίων fiberglass.

Στο όγδοο κεφάλαιο, παρατίθενται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εκπόνηση της εργασίας, καθώς και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Η εργασία ολοκληρώνεται με τη βιβλιογραφία, η οποία συνίσταται σε σημειώσεις, άρθρα, διπλωματικές εργασίες και διαδακτορικές διατριβές, βιβλία και ηλεκτρονικές πηγές.





## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΣΗΡΑΓΓΩΝ**



## 2.1. ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΣΗΡΑΓΓΑ

Με τον όρο σήραγξ στην αρχαιότητα, νοείται οποιαδήποτε κοιλότητα ή σπήλαιο σχηματίζεται σε βράχο εξαιτίας του νερού της βροχής ή των κυμάτων της θαλάσσης (*Σταματάκος, Λεξικόν Αρχαίας Ελληνικής*). Η προέλευση της λέξης έχει αποτελέσει πεδίο διαφωνιών από την αρχαιότητα έως σήμερα, με πολλούς να θεωρούν ότι η σήραग्ga προέρχεται από το αρχαίο ρήμα σαίρω (= δεικνύω τούς οδόντας μου) και άλλους να υποστηρίζουν ότι προέρχεται από το ρήμα ρήσσω (= διακόπτω, ιωνικός τύπος του ρήγνυμι) (*Ζεβαντωνάκης, 2001*). Στη σύγχρονη εποχή, με τον όρο σήραग्ga ονομάζεται οποιοδήποτε τεχνητό όρυγμα ή φυσική διάδοος, η οποία έχει τη μορφή μεγάλης στοάς κάτω από την επιφάνεια της γης, της θάλασσας, της λίμνης ή του ποταμού και έχει ανοιχθεί με τη διάτρηση ορεινού όγκου, για τη διοχέτευση των υδάτων, τη διέλευση οχημάτων ή σιδηροδρομικής γραμμής, την εξόρυξη μεταλλεύματος κ.ά. (*Μπαμπινιώτης, Λεξικό της Νέας Ελληνικής Γλώσσας*).

Η ιστορία της σηραγγοποιίας έχει σημείο εκκίνησης πολλές χιλιάδες χρόνια πριν, με τις πρώτες σήραग्ges, σύμφωνα με ιστορικά καταγεγραμμένα στοιχεία, να εξυπηρετούν θρησκευτικούς σκοπούς, όπως η μετάβαση σε χώρους λατρείας και ταφικούς τύμβους. Σε μεταγενέστερες ιστορικές καταγραφές, οι στοές που κατασκευάζονται χρησιμοποιούνται για την υδροδότηση πόλεων, την αποχέτευση, την εξόρυξη μεταλλευμάτων, καθώς και την προστασία της πόλης εν καιρώ πολέμου.

Στον ελλαδικό χώρο, ένα από τα σημαντικότερα έργα σηραγγοποιίας είναι το Ευπαλίνειο όρυγμα, το οποίο κατασκευάστηκε τον 6<sup>ο</sup> αιώνα π.Χ. από τον Ευπαλίνο, ύστερα από εντολή του τυράννου Πολυκράτη. Σκοπός του ορύγματος ήταν να μεταφερθεί νερό προς στην πρωτεύουσα της Σάμου μέσω αγωγού που δεν ήταν εντοπίσιμος από επιδρομείς, οι οποίοι θα μπορούσαν να καταστρέψουν έναν επιφανειακό αγωγό, αφήνοντας την πόλη χωρίς νερό. Το συνολικό μήκος της σήραग्gas είναι 1036 μέτρα σε σκληρό ασβεστολιθικό πέτρωμα και η λάξευση του πραγματοποιήθηκε ταυτόχρονα από τις δύο πλευρές του βουνού, με τα συνεργεία να συναντιούνται με μικρή απόκλιση μεταξύ τους. Το έργο αποτελεί μεγάλο επίτευγμα της εποχής, ιδιαίτερα για την Τοπογραφία, με τον Ευπαλίνο να έρχεται αντιμέτωπος με πλήθος τοπογραφικών δυσκολιών και την επίλυση τους, καθώς και με αποφάσεις όπως η αλλαγή πορείας του ενός κλάδου λόγω καρστικών και η ανύψωση της οροφής κατά

τα τελευταία 27 μέτρα της βόρειας σήραγγας και η αύξηση της κατωφέρειας του δαπέδου της νότιας σήραγγας, ώστε να συναντηθούν.



*Εικόνα 1 : Ευπαλίνιο όρυγμα - Σάμος*

## **2.2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ**

Η διάνοιξη υπογείων σηράγγων σήμερα πραγματοποιείται με πλήθος διαφορετικών μεθόδων, με την επιλογή της κατάλληλης ανά περίπτωση μεθόδου να γίνεται με βάση τα χαρακτηριστικά της περιοχής. Μερικά στοιχεία, που συμβάλλουν στην επιλογή αυτή, αφορούν τις ιδιότητες του πετρώματος, την εναλλαγή σχηματισμών και το ύψος του υπερκείμενου εδάφους για την εκτίμηση επίγειων καθιζήσεων, ενώ ιδιαίτερα σημαντική κρίνεται και η χρήση του υπερκείμενου χώρου, ώστε να αποφευχθούν δυσμενείς επιπτώσεις από τη μετακίνηση του εδαφικού υλικού (Γεωργόπουλος, 2003).

Οι πλέον χρησιμοποιούμενες μέθοδοι διάνοιξης είναι :

- Η Νέα Αυστριακή Μέθοδος (NATM), στην οποία βασική ιδέα ήταν να χρησιμοποιηθεί το περιβάλλον πέτρωμα ως φορέας υποδοχής φορτίων, για να αυτοϋποστηριχθεί η σήραγγα. Η μέθοδος είναι κατάλληλη σε περιοχές με συχνές εναλλαγές του γεωλογικού υπόβαθρου και πολύ πιο οικονομική σε σχέση με άλλες μεθόδους.

- Η Διάτρηση – Ανατίναξη, η οποία έχει αυτοματοποιηθεί πλήρως τα τελευταία χρόνια και ελέγχεται μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή, ενώ οι τεχνικές και ο εξοπλισμός της μεθόδου εξελίσσονται συνεχώς.
- Η διάνοιξη με χρήση μηχανημάτων ολομέτωπης κοπής (TBM), όπου το μέτωπο υποστηρίζεται ταυτόχρονα κατά την εκσκαφή.
- Η διάνοιξη με χρήση μηχανημάτων σημειακής κοπής (Road Headers), όπου το μέτωπο δεν υποστηρίζεται κατά την εκσκαφή και συχνά κρίνεται απαραίτητη η υποστήριξη των τοιχωμάτων με τη χρήση ασπίδας.

### **2.2.1. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ NATM**

Η NATM σαν μέθοδος δομείται από επτά (7) βασικές αρχές, μέσα στις οποίες ενσωματώνεται η συμπεριφορά της βραχώμαζας ή του εδαφικού υλικού, υπό συνεχή φόρτιση και μετακινήσεις κατά τη διάρκεια κατασκευής της σήραγγας. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι η μέθοδος χαρακτηρίζεται από συνεχή διαμόρφωση, καθώς βασίζεται στις παρατηρούμενες συνθήκες και τη συμπεριφορά της υποστήριξης όσο προχωράει η εκσκαφή. Συγκεκριμένα οι βασικές αρχές της NATM ορίζονται ως εξής:

- Εκσκαφή σε περισσότερες από μία φάσεις, ώστε να μειώνεται το μέτωπο εκσκαφής και συνεπώς οι συγκλίσεις.
- Κινητοποίηση της αντοχής της βραχώμαζας: Η μέθοδος βασίζεται στην εγγενή αντοχή της περιβάλλουσας βραχώμαζας, που θεωρείται το κύριο συστατικό της στήριξης της σήραγγας. Η πρωταρχική στήριξη έχει σκοπό να επιτρέψει στον βράχο να υποστηρίξει τον εαυτό του.
- Υποστήριξη με σκυρόδεμα: Πρέπει να ελαχιστοποιείται η χαλάρωση και η υπερβολική παραμόρφωση του βράχου και αυτό επιτυγχάνεται με την εφαρμογή λεπτού στρώματος εκτοξευόμενου σκυροδέματος αμέσως μετά την πρόοδο του προσώπου, δηλαδή σε μικρή απόσταση από το μέτωπο.
- Μετρήσεις: Πρέπει να μετράται κάθε παραμόρφωση κατά τη διάρκεια της εκσκαφής. Η NATM απαιτεί την εγκατάσταση εξελιγμένων οργάνων μέτρησης τα οποία είναι ενσωματωμένα σε επένδυση, στο έδαφος ή σε γεωτρήσεις.

- Ευέλικτη υποστήριξη: Η κύρια επένδυση είναι λεπτή και αντικατοπτρίζει τις πρόσφατες συνθήκες στρωμάτων. Η ταξινόμηση των μαζών καθορίζει τα μέτρα υποστήριξης. Χρησιμοποιείται ενεργή αντί για παθητική υποστήριξη και η σήραγγα ενισχύεται όχι από παχιά επένδυση από σκυρόδεμα αλλά από εύκαμπτο συνδυασμό βιδών, συρμάτων πλεγμάτων και χαλύβδινων ραβδώσεων.
- Κλείσιμο του δακτυλίου του εκτοξευόμενου σκυροδέματος: Το κλείσιμο του ανάστροφου τόξου γρήγορα και η δημιουργία δακτυλίου είναι ζωτικής σημασίας για τις μαλακές σήραγγες εδάφους, όπου κανένα τμήμα της σήραγγας δεν πρέπει να παραμένει ανοικτό έστω και προσωρινά.
- Συμβατικές ρυθμίσεις: Δεδομένου ότι η NATM βασίζεται σε μετρήσεις παρακολούθησης, είναι δυνατή η αλλαγή στη μέθοδο στήριξης και κατασκευής. Αυτό είναι δυνατό μόνο αν το συμβατικό σύστημα επιτρέπει αυτές τις αλλαγές.

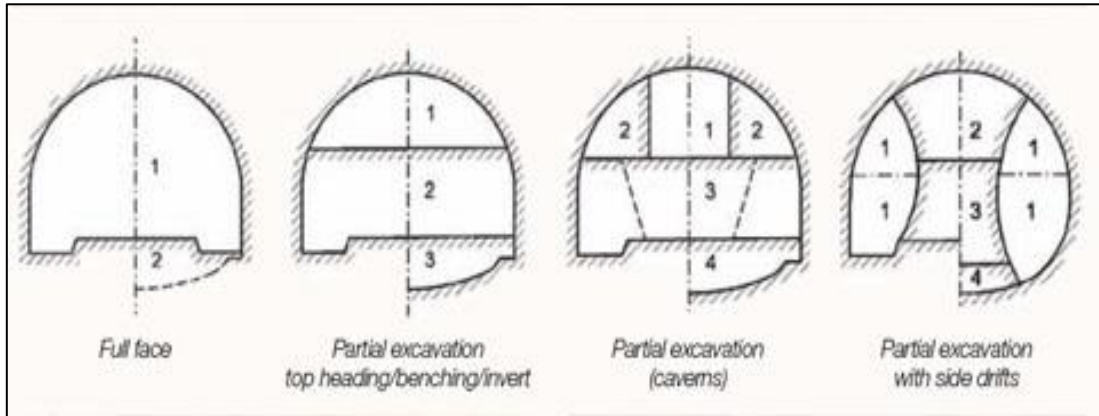
### **2.2.2. ΑΛΛΗΛΟΥΧΙΑ ΕΡΓΑΣΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΜΕ NATM**

Η διάνοιξη μιας σήραγγας με τη χρήση NATM ακολουθεί την εξής πάγια σειρά εργασιών:

1. Επιλέγεται η θέση των διατηρημάτων στο μέτωπο.
2. Πραγματοποιείται η διάτρηση με τη χρήση κατάλληλου διατηρητικού φορείου.
3. Γίνεται γόμωση των διατηρημάτων με τα εκρηκτικά.
4. Σύνδεση των εκρηκτικών και ανατίναξη.
5. Συλλογή και μεταφορά των προϊόντων ανατίναξης και αερισμός του μετώπου.
6. Εγκατάσταση προσωρινής υποστήριξης.
7. Τοποθέτηση μεμβράνης υδατοστεγάνωσης.
8. Τοποθέτηση αγκυρίων ή εκτοξευόμενου σκυροδέματος επιπλέον σε μεμονωμένα σημεία, όπου χρειάζεται.
9. Εγκατάσταση μόνιμης επένδυσης.

Σε μερικές περιπτώσεις, κρίνεται απαραίτητο πριν την έναρξη της διαδικασίας εκσκαφής να πραγματοποιούνται εργασίες για τη σταθεροποίηση του εδάφους. Αυτό

συμβαίνει, ώστε η NATM να είναι πιο ασφαλής και αποτελεσματική στην εφαρμογή της. Τέτοιες εργασίες αφορούν τη βελτιστοποίηση του εδάφους για τη σταθεροποίηση ρηγμάτων και ασυνέχειων, την ενίσχυση του εδάφους με τη χρήση αγκυρίων, ήλων κ.ά., καθώς και διαδικασίες στεγάνωσης (π.χ. ταπείνωση υδροφόρου ορίζοντα).



Εικόνα 2 : Φάσεις εκσκαφής NATM

### 2.2.3. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΧΡΗΣΗΣ NATM

Η NATM στην εφαρμογή της παρουσιάζει ένα σύνολο πλεονεκτημάτων, τα οποία την καθιστούν ιδιαίτερα χρήσιμη στη διάνοιξη σηράγγων. Συγκεκριμένα:

- Είναι κατάλληλη σε περιοχές με συχνές εναλλαγές του γεωλογικού υπόβαθρου.
- Πρόκειται για μια αρκετά ευέλικτη μεθοδολογία, η οποία μπορεί να χρησιμοποιείται για διαφορετικές διατομές εκσκαφής, αλλάζοντας τον τρόπο τοποθέτησης των διατρημάτων.
- Σε περιπτώσεις που υπάρχει έντονος κίνδυνος εισροής υδάτων, μπορούν να ληφθούν εύκολα μέτρα στεγάνωσης.
- Για την εφαρμογή της απαιτείται μικρότερος χώρος στο εργοτάξιο σε σχέση με άλλες μεθόδους, π.χ. TBM.
- Είναι πιο οικονομική σε σχέση με άλλες μεθόδους για τις σήραγγες μικρού μήκους, κυρίως σε ό,τι αφορά τα εκρηκτικά.

### 2.2.4. ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΧΡΗΣΗΣ NATM

Η εφαρμογή ωστόσο της μεθόδου εμπεριέχει κ ένα σύνολο μειονεκτημάτων τα οποία είναι δυνατόν να οδηγήσουν σε καθυστερήσεις. Συγκεκριμένα:























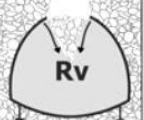







- Απαιτείται υψηλός συντονισμός, συνεργασία και επικοινωνία μεταξύ των μελών του εργοταξίου.
- Μικρό βήμα προχώρησης (1-3 m), το οποίο οδηγεί σε καθυστερήσεις.
- Πρέπει να αποφεύγονται τα μεγάλα χρονικά κενά μεταξύ εκσκαφής και άμεσης υποστήριξης.

### **2.3. ΤΡΟΠΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ**

Οι μηχανικές ιδιότητες των γεωυλικών σε συνδυασμό με το εκάστοτε εντατικό πεδίο οδηγούν σε διαφορετικούς τύπους συμπεριφοράς του υλικού και μεταφοράς φορτίων στην άμεση υποστήριξη. Οι διαφορετικές συμπεριφορές που εκδηλώνονται χαρακτηρίζονται ως μηχανισμοί αστοχίας και διακρίνονται σε βαρυντικούς, που οφείλονται στο ίδιο το βάρος του τεμάχους και τασικούς, που οφείλονται στο δευτερογενές εντατικό πεδίο. Σε μια σήραγγα, οι δύο μηχανισμοί συνυπάρχουν, ο επικρατέστερος όμως, είναι αυτός που δίνει τον τελικό τύπο αστοχίας.

Με βάση το χαρακτηρισμό της δομής της βραχώμαζας, την αντοχή του άρρηκτου βράχου ( $\sigma_{ci}$ ) και το ύψος των υπερκειμένων (H) ορίζεται ένα σύστημα εκτίμησης της τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς (TBC – Tunnel Behaviour Chart) (Μαρίνος, 2012):



TUNNEL BEHAVIOUR CHART (TBC) FOR ROCK MASSES (V. Marinos)*					
ROCK MASS STRUCTURE (As in GSI, Hoek & Marinos, 2000)	OVERBURDEN (H) (Rock masses for up to several hundreds metres**)				
	Small overburden		Large overburden		
	INTACT ROCK STRENGTH ( $\sigma_c$ ) Indicative limit: $\sigma_c \sim 15$ Mpa		INTACT ROCK STRENGTH ( $\sigma_c$ ) Indicative limit: $\sigma_c \sim 15$ Mpa		
	Low $\sigma_c$	High $\sigma_c$	Low $\sigma_c$	High $\sigma_c$	
 <b>INTACT OR MASSIVE</b> Intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	 1	 2	 3	 4	OVERBURDEN (H) LIMIT: $\sim 150$ m
 <b>BLOCKY</b> Well interlocked undisturbed rock mass consisting of blocks formed by three orthogonal intersecting discontinuity sets	 5	 6	 7	 8	
 <b>VERY BLOCKY</b> Interlocked, partially disturbed rock mass with multi-faceted angular blocks formed by four or more discontinuity sets	 9	 10	 11	 12	H LIMIT: $\sim 100$ m
 <b>BLOCKY/DISTURBED/SEAMY</b> Folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity. It is understood that the rock mass is disturbed and anisotropy can be developed	 13	 14	 15	 16	
 <b>DISINTEGRATED</b> Poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces	 17	 18	 19	 20	OVERBURDEN (H) LIMIT: $\sim 70$ m
 <b>LAMINATED/FOLIATED/SHEARED</b> Laminated or foliated and tectonically sheared weak rock mass. Foliation prevails over any other discontinuity set, resulting in complete lack of blockiness (this drawing scale is not compared with the other's drawing scales)	 21	 22	 23	 24	

Tunnel rock mass behaviour types (St, Wg, Sh, Sq, Rv, Ch) as defined in figure 3  
The engineering geological behaviour may be also controlled by two or three different mechanisms (e.g. Sh-Ch)

**Notes:**

- \* The data used in the TBC were obtained from tunnels excavated by the conventional method with top heading and bench in a non-urban environment with the overburden cover up to several hundred metres (generally not exceeding 500m) with a tunnel diameter=12m
- \*\* The chart does not refer to very high overburden (e.g. many hundreds of m or >1000m), where the scale and the mechanism of failure may differ
- ⦿ The limit-ranges of the uniaxial compressive strength ( $\sigma_c$ ) of the intact rock and the overburden thickness (H) are indicative. This is done to avoid standardisation by an inexperienced user. The purpose of this diagram is to predict the failure mechanism of several common rock mass types.
- ⦿ The surface condition of discontinuities, the second component to the GSI system, mainly affect the intensity of the failure phenomenon
- ⦿ High clay presence along the discontinuities or zones in the rock mass may shift the gravity driven behaviour types towards the vertical axis of the chart (e.g. from Wg[9] to Ch [13])
- ⦿ Groundwater presence mainly affects the factor of safety and not the behaviour type. Though, in some cases, such as "Blocky-Disturbed" & "Disintegrated" rock mass, the groundwater presence may "shift" a Chimney (Ch) or Ravelling (Rv) behaviour type to Flowing ground (FI)
- ⦿ Cases number 4, 8 and 12 may develop brittle failures (Br) when overburden increases considerably (e.g. >800 m) depending on the intact rock strength
- ⦿ The illustrations of the tunnel are sketches; this shape corresponds to the usual top heading

Εικόνα 3 : TBC – Tunnel Behaviour Chart (Μαρίνος, 2012)

#### **2.4. ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΚΑΘΙΖΗΣΕΙΣ**

Σε περιοχές όπου πραγματοποιείται διάνοιξη αβαθών σήραγγων, ένα από τα συνηθέστερα προβλήματα που λαμβάνει χώρα είναι η μετακίνηση του εδαφικού υλικού στην ελεύθερη επιφάνεια. Η μετακίνηση αυτή έχει ως αποτέλεσμα την εκδήλωση καθιζήσεων, αλλά και οριζόντιων μετακινήσεων, οι οποίες είναι πιθανόν να οδηγήσουν σε σημαντικές αστοχίες τόσο των υπερκείμενων κατασκευών όσο και των δικτύων κοινής ωφέλειας. Κάτι τέτοιο καθίσταται ιδιαίτερα επιζήμιο, ειδικά όταν η σήραγγα διανοίγεται κάτω από τον αστικό ιστό.

Η εκδήλωση επιφανειακών καθιζήσεων είναι αναπόφευκτη όταν διανοίγεται μια αβαθής σήραγγα και εξαρτάται από την ποιότητα του εδάφους, το βάθος και το μέγεθος του υπογείου έργου, τον τρόπο εκσκαφής, την άμεση υποστήριξη, τον τρόπο υποστήριξης του μετώπου και τη λήψη μέτρων βελτίωσης του εδάφους. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι η εφαρμογή κατάλληλων μεθόδων διάνοιξης και υποστήριξης του υπογείου ανοίγματος δεν μπορεί να εξαλείψει τις καθιζήσεις, παρά μόνο να περιορίσει το μέγεθός τους, ώστε να βρίσκονται εντός αποδεκτών ορίων.

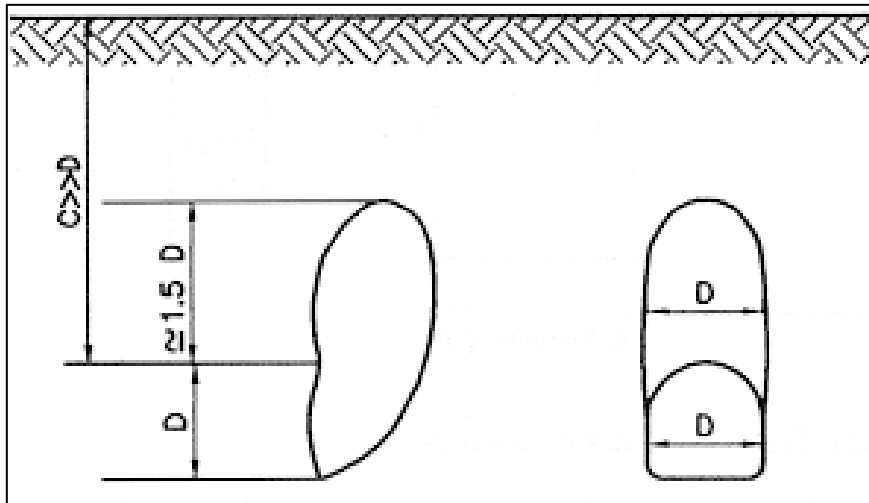
Οι καθιζήσεις οφείλονται σε απώλεια εδαφικού όγκου κατά τη διάρκεια της διάνοιξης και προκαλούνται από:

- Την παραμόρφωση του εδαφικού υλικού στην περιοχή του μετώπου εκσκαφής, η οποία εξαρτάται από την αντοχή της βραχώμαζας τόσο κατά τη φάση αυτοϋποστήριξης όσο και κατά την τοποθέτηση της άμεσης υποστήριξης.
- Τις ακτινικές μετατοπίσεις κατά τη διάνοιξη με μηχανήματα ολομέτωπης κοπής.
- Τις μετατοπίσεις λόγω εργασιών πλήρωσης του κενού χώρου μεταξύ μέτρων υποστήριξης και περιβάλλοντος γεωυλικού.
- Τις μετατοπίσεις που προκαλούνται από αστοχίες του εδάφους.

Με βάση την επέκταση των εδαφικών μετακινήσεων από την υπό διάνοιξη σήραγγα στην επιφάνεια του εδάφους, διακρίνονται δύο τύποι μετακινήσεων :

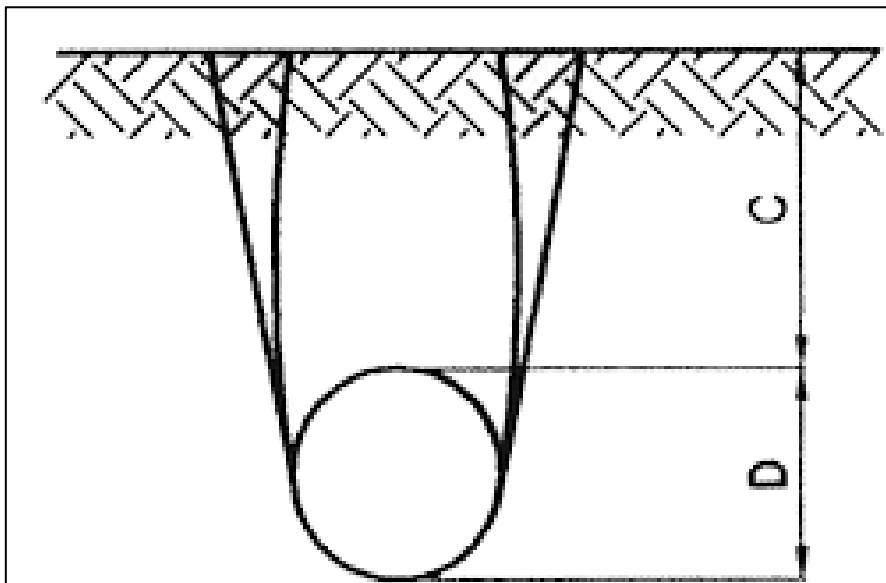
- Πρωτεύων τύπος: Στην περίπτωση αυτή δημιουργείται μια ζώνη χαλάρωσης άνωθεν της εκσκαφής, λόγω της αποτόνωσης των επιτόπου εδαφικών τάσεων στο μέτωπο. Η ζώνη αυτή έχει ύψος 100 – 150% της διαμέτρου του ανοίγματος

και πλάτος όσο η διάμετρος. Ταυτόχρονα, κατά μήκος της κάθετης διεύθυνσης, σχηματίζονται εκατέρωθεν δύο ζώνες σύνθλιψης.



*Εικόνα 4 : Πρωτεύων τύπος επέκτασης μετακινήσεων προς την επιφάνεια του εδάφους (Πηγή: ITA- CET).*

- Δευτερεύων τύπος : Η περίπτωση αυτή αναφέρεται σε εδαφικό κάλυμμα μικρού πάχους και για ανεπαρκή υποστήριξη στο άνοιγμα. Ως αποτέλεσμα, στην επιφάνεια δημιουργείται ένα ενιαίο τέμαχος, με δύο ή περισσότερες ζώνες διάτμησης, που επεκτείνονται από τη σήραγγα προς την επιφάνεια. Οι μετακινήσεις στην επιφάνεια άνωθεν της σήραγγας είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάζονται στο άνοιγμα.



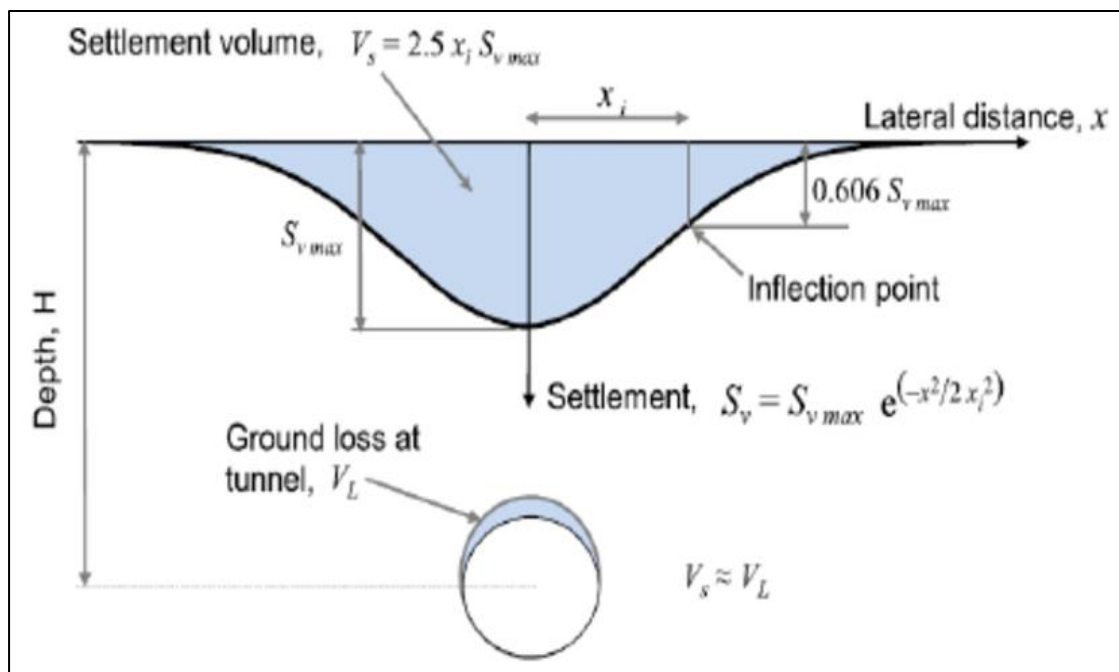
*Εικόνα 5 : Δευτερεύων τύπος επέκτασης μετακινήσεων προς την επιφάνεια του εδάφους (Πηγή: ITA- CET).*

Οι καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους, σύμφωνα με τον Peck (1969), υπολογίζονται με βάση τον εκθετικό νόμο του Gauss, από τη σχέση :

$$s_x = s_{max} \times e^{-x^2/2i^2}$$

όπου:

- $s_x$  είναι η καθίζηση σε οποιαδήποτε απόσταση  $y$  από τον άξονα της σήραγγας
- $s_{max}$  είναι η μέγιστη καθίζηση ακριβώς πάνω από τον άξονα της σήραγγας
- $i$  είναι η απόσταση όπου βρίσκεται το σημείο καμπής της καμπύλης του Gauss



Εικόνα 6 : Καμπύλη καθιζήσεων (Πηγή: A. Marto)

Η εκτίμηση της θέσης του σημείου καμπής είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς στο σημείο εκείνο παρουσιάζεται ο μεγαλύτερος κίνδυνος για τις επιφανειακές κατασκευές, λόγω διαφορικής καθίζησης. Σύμφωνα με τους O' Reilly and New (1982), για διάφορους τύπους εδάφους, το σημείο καμπής δίνεται από τη σχέση:

$$i = K \times H$$

όπου οι τιμές της παραμέτρου  $K$ , λαμβάνονται από τον παρακάτω πίνακα.

Ground conditions	Ground support method in tunnels	Trough width parameter, constant, K
Stiff fissured clay	Shield or none	0.4 - 0.5
Glacial deposits	Shield in free air	0.5 - 0.6
Glacial deposits	Shield in compressed air	0.5 - 0.6
Recent silty clay deposits ( $C_u = 10 - 40 \text{ KN/m}^2$ )	Shield in free air	0.6 - 0.7
Recent silty clay deposits ( $C_u = 10 - 40 \text{ KN/m}^2$ )	Shield in compressed air	0.6 - 0.7

Εικόνα 7 : Παράμετρος K ανάλογα τον τύπο του εδάφους ( O' Reilly and New - 1982)

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι καθιζήσεις οφείλονται σε απώλεια εδαφικού όγκου. Η απώλεια εδαφικού όγκου στην επιφάνεια του εδάφους υπολογίζεται από τον εμπειρικό τύπο κατά Clough and Schmidt (1981) :

$$\frac{V_s}{V} = a \times e^{N-1}$$

όπου:

- $V_s$  : απώλεια εδαφικού όγκου που δίνεται από τη σχέση :

$$V_s = \sqrt{2\pi} \times i \times S_{max}$$

- $V$ : όγκος σήραγγας, ανά τρέχον μέτρο της διατομής της
- $a$  : συντελεστής που αντιστοιχεί στον τρόπο διάνοιξης της σήραγγας, όπου:
  - $a = 0.002$  για συνήθη επιμέλεια διάνοιξης
  - $a = 0.004$  για μεγάλη επιμέλεια διάνοιξης
- $N$ : συντελεστής υπερφόρτισης που δίνεται από τη σχέση :

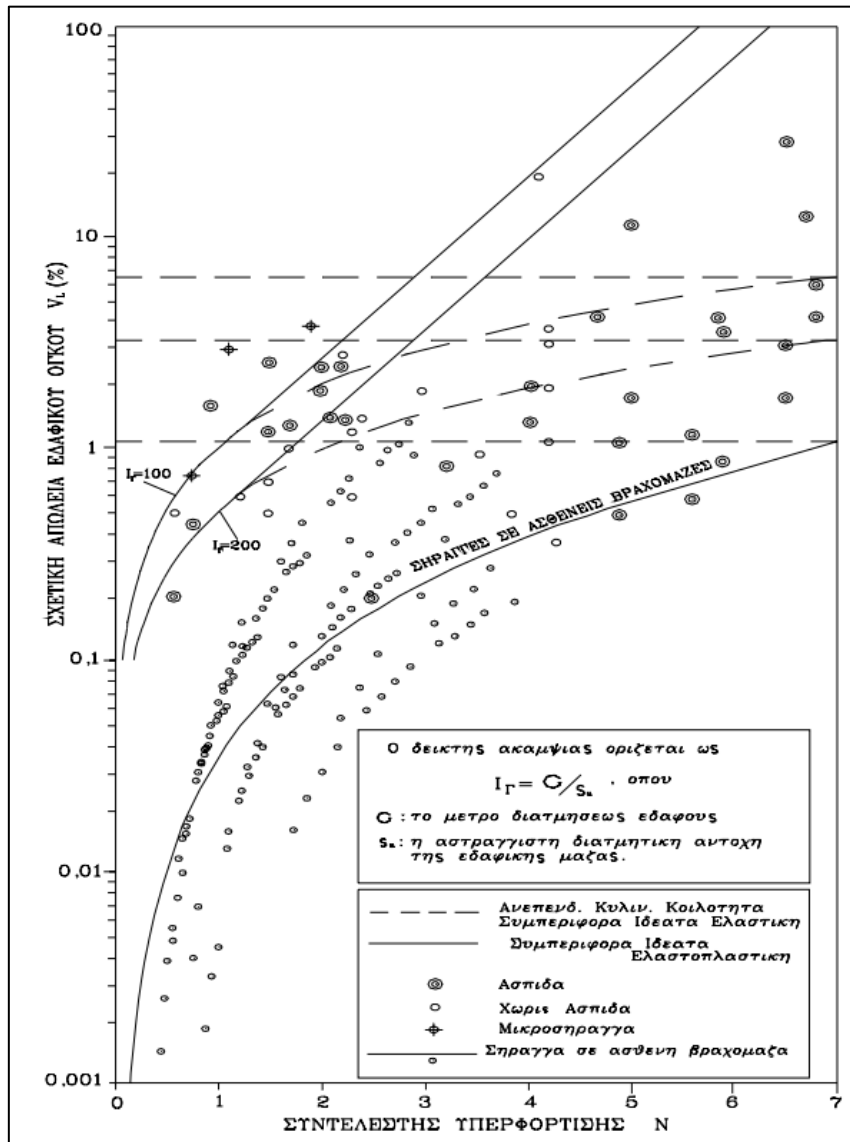
$$N = \frac{2 \times (p_o - p_i)}{\sigma_{cm}}$$

όπου:

- $p_o$ : γεωστατικές τάσεις
- $p_i$ : ισοδύναμη πίεση υποστήριξης

- $\sigma_{cm}$ : αντοχή εδάφους, όπου για εδάφη :  $\sigma_{cm} = 2 \times c \times \tan\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right)$

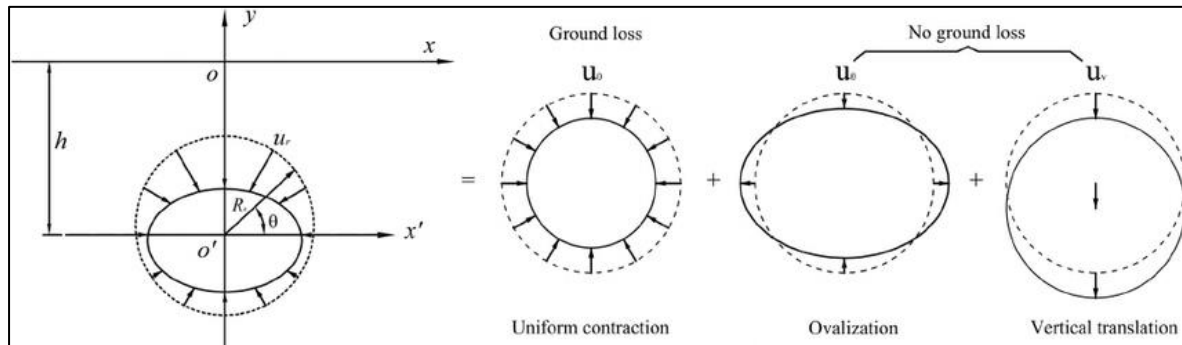
Οι μέχρι τώρα μελέτες έχουν αποδείξει ότι κατά τη διάνοιξη ρηχών σήραγγων, η απώλεια εδαφικού όγκου κυμαίνεται από 0.5 έως 1 % για διάνοιξη με TBM, ενώ για διάνοιξη με συμβατικές μεθόδους από 0.8 έως 1.5 %.



Εικόνα 8 : Συσχέτιση εδαφικής απώλειας όγκου με συντελεστή υπερφόρτισης (Πηγή: Β. Παπαδόπουλος)

Σε ό,τι αφορά την απώλεια εδαφικού όγκου περιμετρικά της εκσκαφής, αυτή διαφοροποιείται ανάλογα με τον τύπο του εδάφους και ορίζεται ως ο όγκος που χάνεται ανά τρέχον μέτρο σήραγγας, προς τον αρχικό όγκο της εκσκαφής ανά τρέχον μέτρο σήραγγας, μέχρι την ισορροπία των μετακινήσεων στην υποστήριξή της. Οι περισσότεροι ερευνητές, θεωρούν ότι εδαφική απώλεια εδαφικού όγκου γύρω από την

εκσκαφή ( $V_L$ ), είναι περίπου ίδια με την επιφανειακή εδαφική απώλεια όγκου ( $V_s$ ), δηλαδή:  $V_L \sim V_s$ .



Εικόνα 9 : Σχηματική απεικόνιση της απώλειας όγκου εκσκαφής (Πηγή: Jinyang Fu)



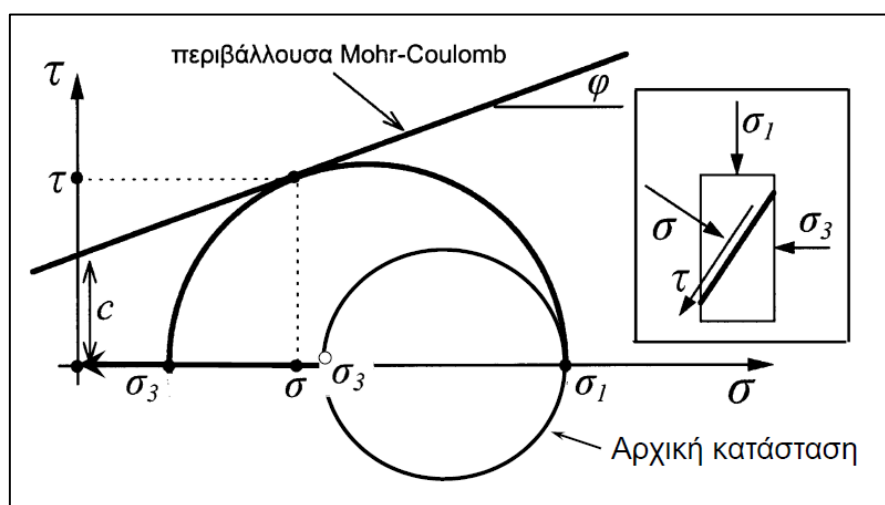


## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΜΕΤΩΠΟΥ ΣΗΡΑΓΓΩΝ**



### 3.1. ΤΡΟΠΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

Κατά τη διάνοιξη της σήραγγας, όσο προχωράει η εκσκαφή, η οριζόντια τάση  $\sigma_3$  μπροστά από το μέτωπο της εκσκαφής μειώνεται και τείνει να μηδενιστεί. Ως αποτέλεσμα, η αντοχή της βραχώμαζας  $\sigma_{cm}$  μειώνεται και η κατακόρυφη τάση  $\sigma_1$  αυξάνεται ανάλογα με το βάθος. Ο κύκλος του Mohr πλησιάζει την περιβάλλουσα αστοχίας, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 10. Η διατάραξη της ισορροπίας των δυνάμεων έχει ως συνέπεια την εκκίνηση της παραμόρφωσης του εδάφους μπροστά από το μέτωπο της εκσκαφής, στον πυρήνα προώθησης της σήραγγας, προκαλώντας αστοχία του μετώπου εκσκαφής με τη μορφή σφήνας.



Εικόνα 10 : Κύκλος του Mohr - κύριες τάσεις

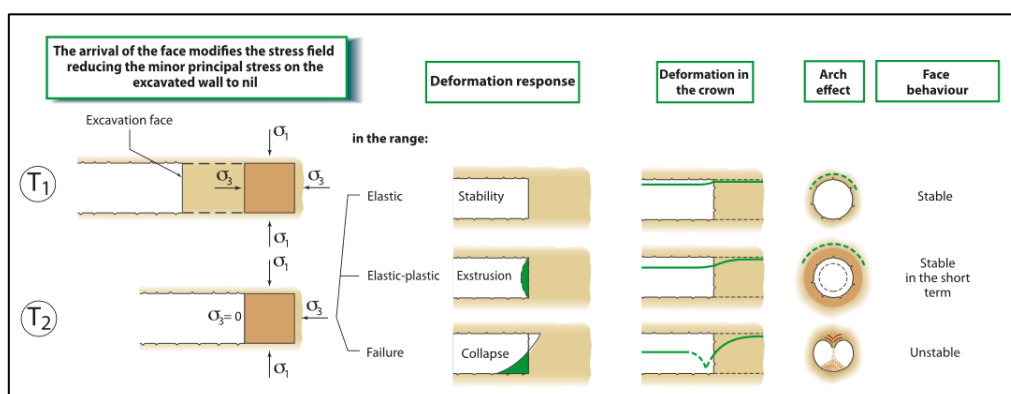
Ο πυρήνας προώθησης παραμορφώνεται τόσο ακτινικά (προσύγκλιση) όσο και παράλληλα με τον διαμήκη άξονα της σήραγγας (εξώθηση). Η ανταπόκριση στη παραμόρφωση του πυρήνα προώθησης εξαρτάται από τα μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους και την αρχική εντατική κατάσταση. Οι μηχανισμοί αστοχίας του μετώπου είναι παρόμοιοι με αυτούς της διατομής της σήραγγας, δηλαδή είτε τασικού είτε βαρυτικού τύπου [ολίσθηση σφηνών και από το μέτωπο, συνεχής ροή υλικού, που οδηγεί σε απότομη αστοχία μετά το πέρας του χρόνου αυτοϋποστήριξης (καταρροή), ανάπτυξη ασταθούς χοάνης πίσω από το μέτωπο και προς την επιφάνεια του εδάφους («καμινάδα»), αποκολλήσεις πλακών και από το μέτωπο (εκτίναξη πετρωμάτων) κ.ά.] (Παπαδόπουλος, Καζίλης 2010).

Ο Lunardi (2000) υποστήριξε ότι η NATM δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε αβαθείς σήραγγες που διανοίγονται κάτω από αστικό περιβάλλον. Αυτό συμβαίνει διότι η

NATM έχει σαν βασικό στόχο την ανάπτυξη παραμορφώσεων, έτσι ώστε να μειωθεί η απαιτούμενη πίεση υποστήριξης τόσο όσο χρειάζεται, ώστε να μπορούν να την προσφέρουν τα μέτρα υποστήριξης, ενώ σε αστικό περιβάλλον το βασικό κριτήριο σχεδιασμού είναι ο περιορισμός των παραμορφώσεων του εδάφους λόγω της διάνοιξης. Η διάνοιξη πραγματοποιείται επιτυχώς σε δυσμενείς συνθήκες, όταν πραγματοποιείται διατήρηση της ευστάθειας μετώπου μέσω του περιορισμού των μετατοπίσεων του πυρήνα προώθησης, δηλαδή του όγκου εδάφους μπροστά από το μέτωπο σε απόσταση έως και μία περίπου διάμετρο.

Από έρευνες που διεξήγαγε, σε μια σειρά από υπό κατασκευή σήραγγες παρατήρησε την ύπαρξη σύνδεσης μεταξύ της παραμορφωσιακής συμπεριφοράς του μετώπου εκσκαφής και των τοιχωμάτων της σήραγγας και κατέληξε σε τρεις βασικές καταστάσεις που μπορεί να προκύψουν:

- i. Αν η προοδευτική απομείωση της  $\sigma_3$  δημιουργεί παραμορφώσεις στο ελαστικό φάσμα, τότε το μέτωπο της εκσκαφής θα παραμείνει σταθερό με περιορισμένη και απολύτως αμελητέα παραμόρφωση και δεν χρήζει καμίας υποστήριξης.
- ii. Αν οι παραμορφώσεις στον πυρήνα προώθησης είναι ελαστοπλαστικές, τότε το μέτωπο έχει μικρό χρόνο αυτοϋποστήριξης, με συνέπεια να χρειάζεται η εφαρμογή μέτρων υποστήριξης κατά την εκσκαφή.
- iii. Ενώ, αν ο πυρήνας προώθησης παραμορφώνεται πλαστικά, τότε χρειάζεται βελτίωση των εδαφικών μηχανικών χαρακτηριστικών προτού ξεκινήσει η εκσκαφή.



Εικόνα 11 : Συμπεριφορά εδάφους κατά τη διάνοιξη

Η βελτίωση της ευστάθειας του μετώπου επιτυγχάνεται με κατάλληλα μέτρα υποστήριξης, τα οποία είτε οδηγούν στην απομάκρυνση του κύκλου Mohr από την αστοχία (αύξηση της πλευρικής τάσης  $\sigma_3$  ή μείωση της κατακόρυφης τάσης  $\sigma_1$ ), είτε στην μετατόπιση της περιβάλλουσας αστοχίας Mohr-Coulomb προς τα επάνω, με βελτίωση των εδαφικών χαρακτηριστικών, δηλαδή αύξηση της συνοχής  $c$ .

### **3.2. ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ**

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, η υποστήριξη του μετώπου, ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα αστοχίας, έχει ως σκοπό είτε την απομάκρυνση του κύκλου Mohr από την αστοχία (αύξηση της πλευρικής τάσης  $\sigma_3$  ή μείωση της κατακόρυφης τάσης  $\sigma_1$ ), είτε την μετατόπιση της περιβάλλουσας αστοχίας Mohr-Coulomb προς τα επάνω. Μερικοί από τους πιο συνήθεις τρόπους ενίσχυσης για την βελτίωση της ευστάθειας του μετώπου 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 αγκυριών 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 χρήση τσιμεντενέσεων, 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.

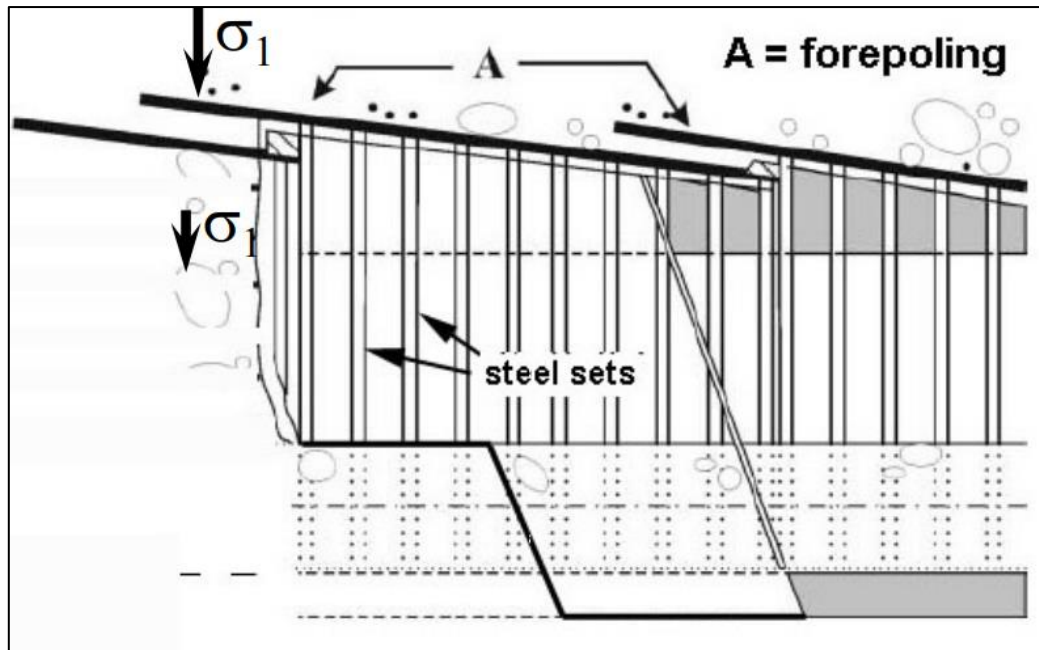
Η υποστήριξη του μετώπου στην παρούσα μελέτη πραγματοποιήθηκε με τη χρήση αγκυρίων από υαλόνημα (fiberglass) και δοκών προπορείας (forepoling), ενώ εξετάστηκε τόσο η μεμονωμένη χρήση fiberglass, όσο και ο συνδυασμός και των δύο μεθόδων υποστήριξης.

### **3.3. ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΤΟΥ ΜΕΤΩΠΟΥ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ**

#### **3.3.1 ΠΡΟΫΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΜΕΤΩΠΟΥ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΜΕ ΔΟΚΟΥΣ ΠΡΟΠΟΡΕΙΑΣ**

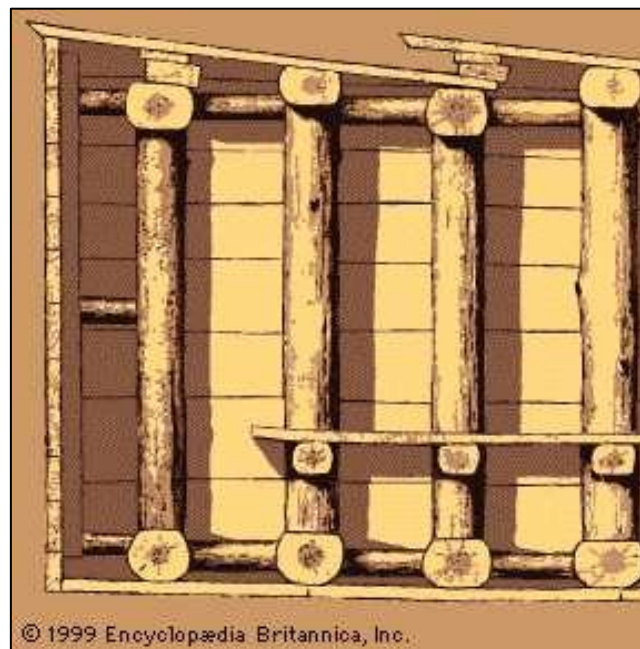
Μία από τις πιο παλαιές μεθόδους για την εξασφάλιση του μετώπου εκσκαφής υπόγειων ανοιγμάτων είναι η προϋποστήριξη αυτού με στοιχεία – δοκούς μεγάλου μήκους. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται η προστασία του μετώπου εκσκαφής, λόγω της συγκράτησης της υπερκείμενης μάζας έμπροσθεν του μετώπου εκσκαφής, ώστε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

Ο μηχανισμός υποστήριξης της ομπρέλας δοκών προπορείας 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 (Εικόνα 12). 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, με αποτέλεσμα την ταχύτερη προχώρηση.



Εικόνα 12 : Μηχανισμός λειτουργίας ομπρέλας δοκών προπορείας.

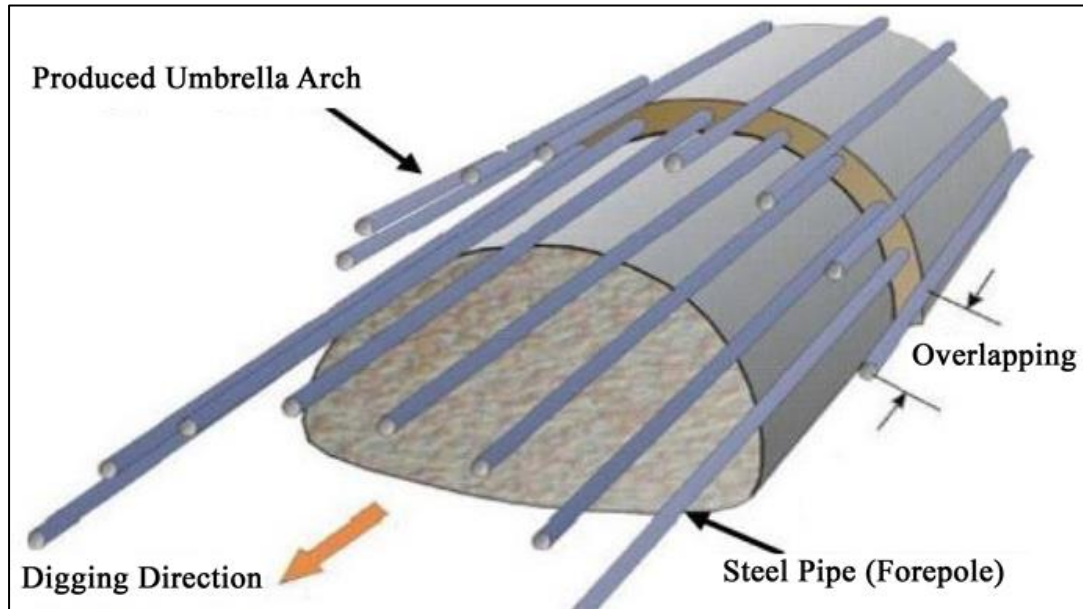
Οι δοκοί προπορείας στα πρώτα στάδια εφαρμογής τους σε υπόγεια ορυχεία και μεταλλεία αποτελούνταν από κορμούς δέντρων ή σιδηροτροχιές, οι οποίες στηρίζονταν πάνω στην ξύλινη υποστήριξη της στοάς, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 13.



Εικόνα 13 : Πρώτη εφαρμογή δοκών προπορείας με κορμούς δέντρων (Πηγή: Britannica).

Σήμερα, 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 από 40 έως 60cm, ενώ μεταξύ δύο διαδοχικών ομπρελών δοκών προπορείας (forepole umbrella), υπάρχει μια περιοχή αλληλοεπικάλυψης (overlap area), της τάξης των 3 – 4m, όπως φαίνεται στην Εικόνα 14.

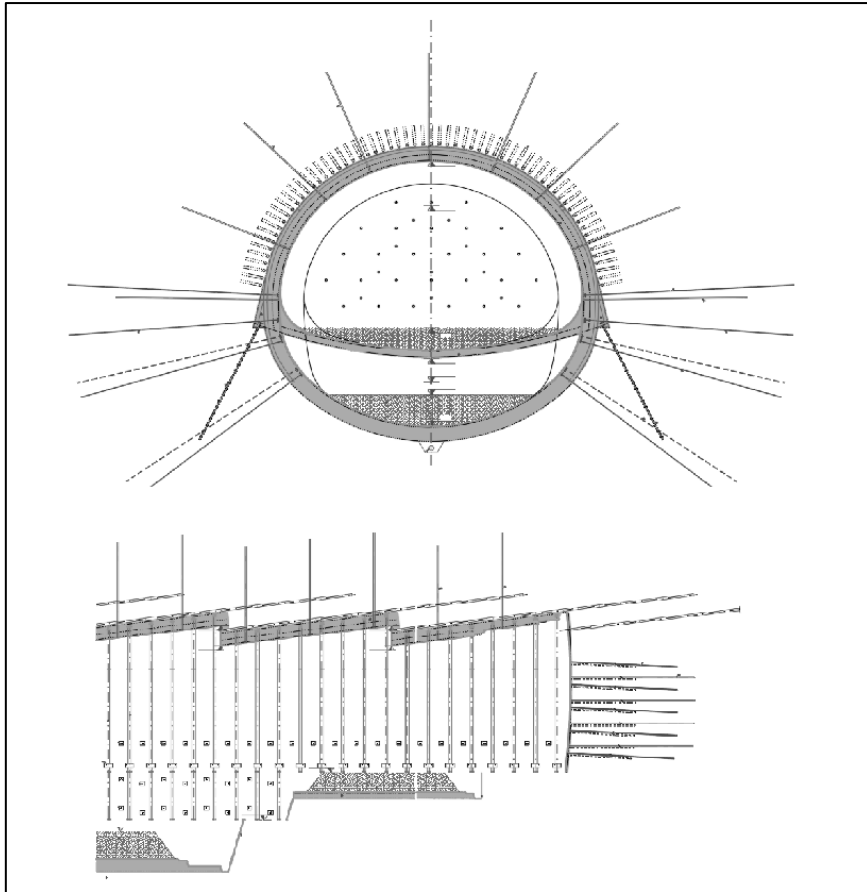


Εικόνα 14 : Διάταξη ομπρέλας δοκών προπορείας (Πηγή: Hoek 2004).

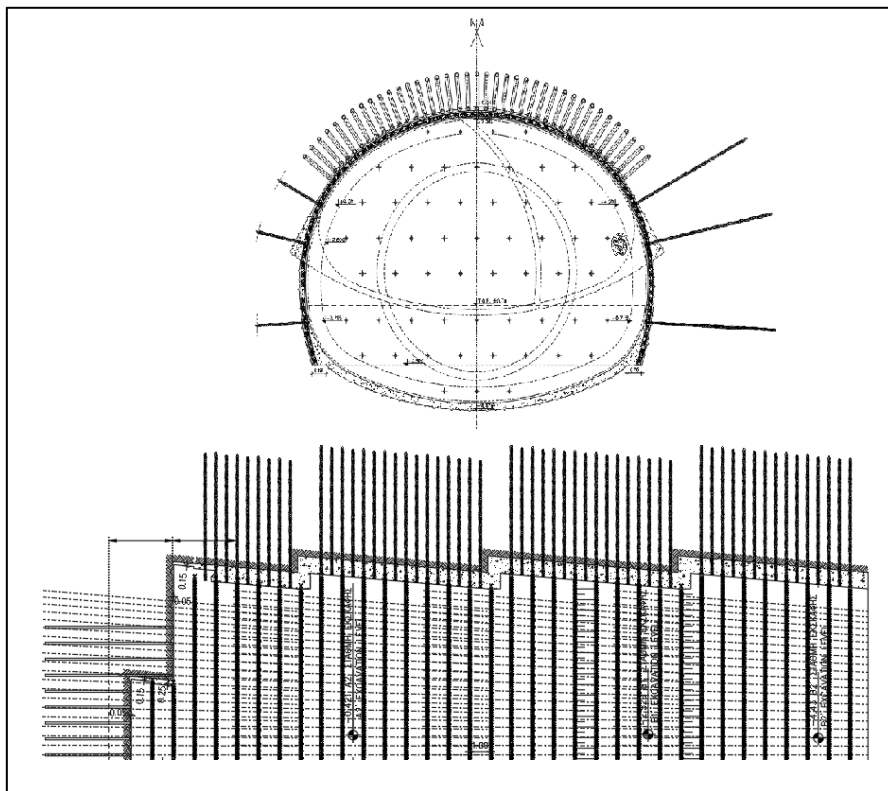
Στην Ελλάδα, η συνήθης πρακτική στην μέχρι σήμερα εφαρμογή δοκών προπορείας σε υπόγεια έργα (Αττικό Μετρό, Εγνατία Οδός, Ολυμπία Οδός κ.λπ.) είναι η τοποθέτηση δοκών Φ114/101 ή Φ139.7/125.7 σε αξονική απόσταση 30-40cm και σε ένα μήκος αλληλοεπικάλυψης της τάξης των 3-4m.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής αποτελεί η σιδηροδρομική σήραγγα Παναγοπούλας με εφαρμογή δοκών προπορείας Φ114/101 σε αξονική απόσταση 30cm με αλληλοεπικάλυψη δοκών 4m, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 15, και κατά την εκσκαφή σήραγγας σταθμού της επέκτασης της Γραμμής 3 προς Πειραιά του Αττικό Μετρό, με εφαρμογή ομπρέλας δοκών προπορείας Φ168.3/158.3 σε αξονική απόσταση 40cm με αλληλοεπικάλυψη δοκών 3m, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 16.





*Εικόνα 15 : Εφαρμογή ομπρέλας δοκών προπορείας στην σιδηροδρομική σήραγγα Παναγοπούλας.*

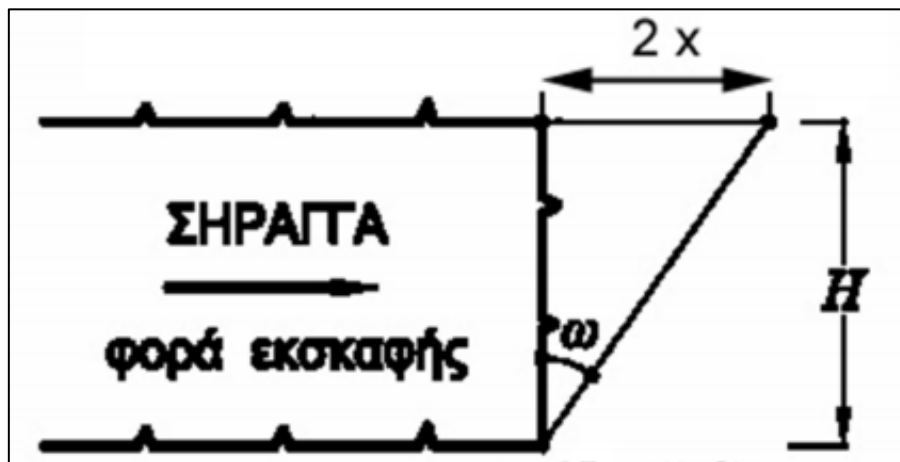


*Εικόνα 16 : Εφαρμογή ομπρέλας δοκών προπορείας σε υπόγειο έργο της Αττικό Μετρό.*

Για την εφαρμογή τους, δεν υπάρχει κάποια σαφής τεχνική, ως προς τα βέλτιστα χαρακτηριστικά τοποθέτησής τους. Η συνήθης πρακτική για την εύρεση του βέλτιστου μήκους δοκού (αλληλοεπικάλυψης) είναι η κάλυψη από το δοκάρι της περιοχής της σφήνας ολίσθησης στο μέτωπο εκσκαφής. Το μήκος αυτό ( $x$ ) μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη σχέση:

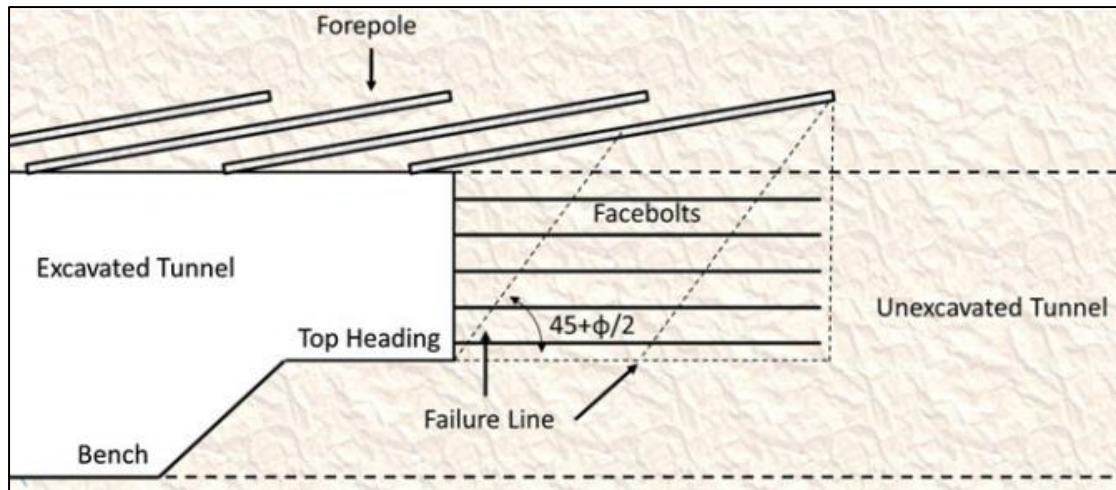
$$x = H \times \tan(\omega)$$

Η γωνία  $\omega$ , όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 17, είναι η γωνία που σχηματίζει το μέτωπο με το πιθανό επίπεδο ολίσθησης. Σε κάθε περίπτωση, θα πρέπει να λαμβάνεται μήκος αλληλοεπικάλυψης μεταξύ των δοκών προπορείας μεγαλύτερο από την απόσταση  $x$ .

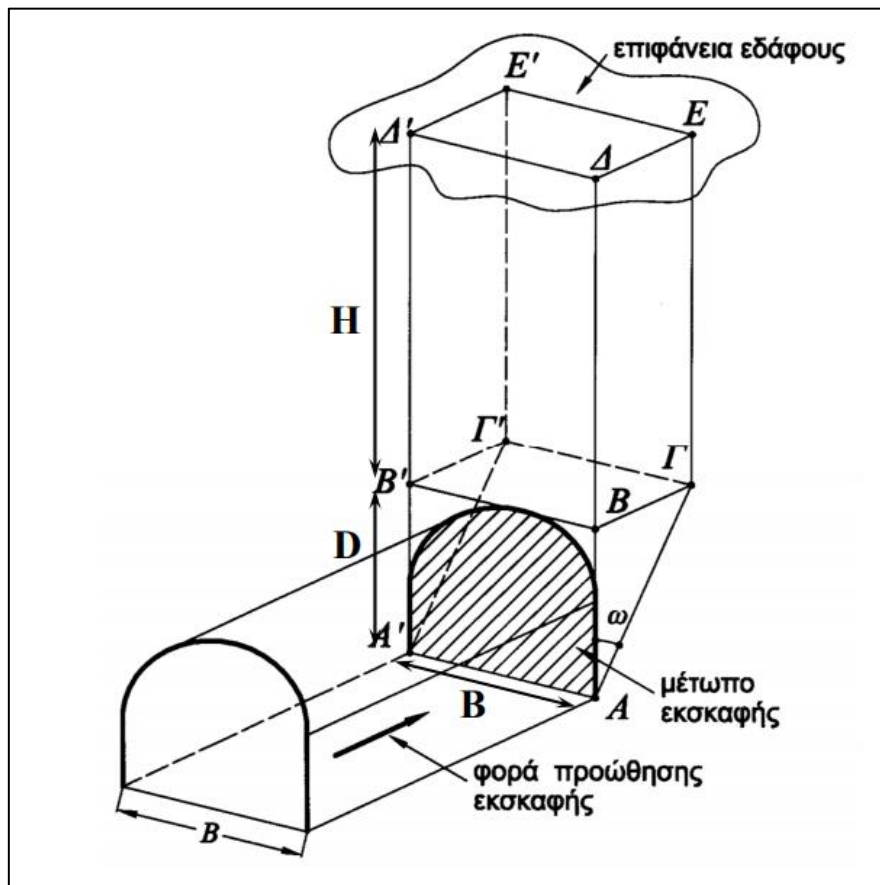


Εικόνα 17 : Κρίσιμη γωνία αστοχίας μετώπου εκσκαφής (Πηγή: Καββαδάς Μ.).

Η κρίσιμη γωνία ολίσθησης  $\omega$  μπορεί να υπολογιστεί με εφαρμογή της μεθόδου Rankine, όπου η γωνία  $\omega$  συσχετίζεται με την γωνία τριβής του εδάφους, σύμφωνα με την σχέση  $\omega = 45^\circ - \frac{\varphi}{2}$ , όπως παρουσιάζεται στη Εικόνα 17, ή με την εφαρμογή της μεθόδου Konari – Anagnostou για την εύρεση της δυσμενέστερης γωνίας ολίσθησης, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 18.



Εικόνα 18 : Εφαρμογή της μεθόδου Rankine για την εύρεση του μήκους αλληλοεπικάλυψης δοκών προπορείας (Πηγή: Marinos V.).



Εικόνα 19 : Εφαρμογή της μεθόδου Kovari - Anagnostou για την εύρεση του μήκους αλληλοεπικάλυψης δοκών προπορείας (Πηγή: Καββαδάς Μ.).

Επίσης, κατά την διαστασιολόγηση των δοκών προπορείας, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν ότι η 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 20. Η διάτρηση πραγματοποιείται είτε με τα διατρητικά στελέχη του μηχανήματος είτε με αυτοδιάτρητες 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 τσιμεντένεμα στο εσωτερικό τους, ώστε να ενισχύσουν το περιβάλλον εδαφικό υλικό.



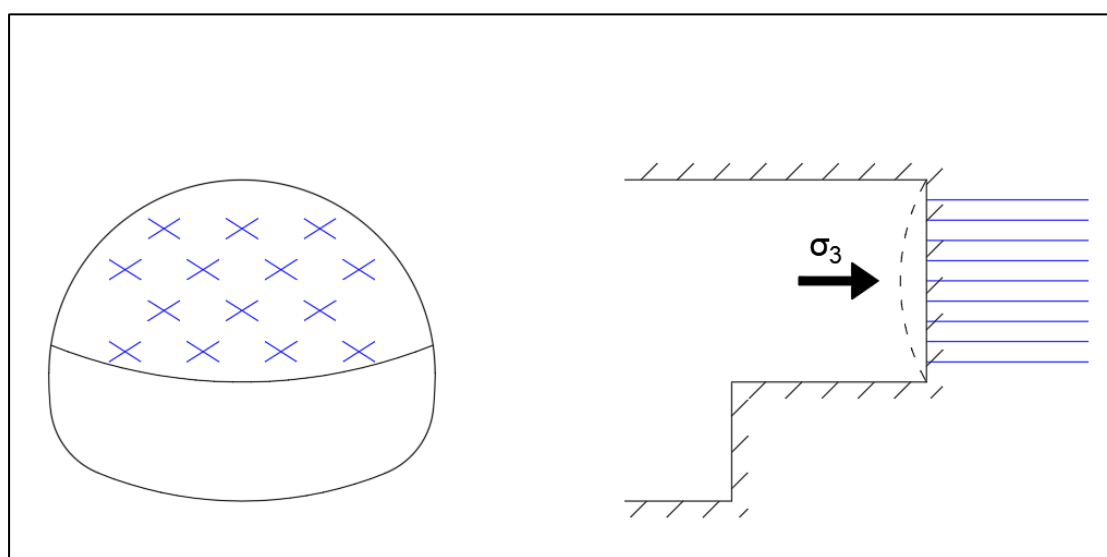
Εικόνα 20 : Διαδικασία κατασκευής ομπρέλας δοκών προπορείας (Πηγή: Γεωργίου Δ.).

### **3.3.2 ΠΡΟΫΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΜΕΤΩΠΟΥ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΜΕ ΑΓΚΥΡΙΑ ΜΕΤΩΠΟΥ FIBERGLASS**

Για να επιτευχθεί ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής, μπορεί να αυξηθεί η 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, όπου αρχικά η τάση  $\sigma_3=0$ , και έτσι συγκρατείται, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 21.



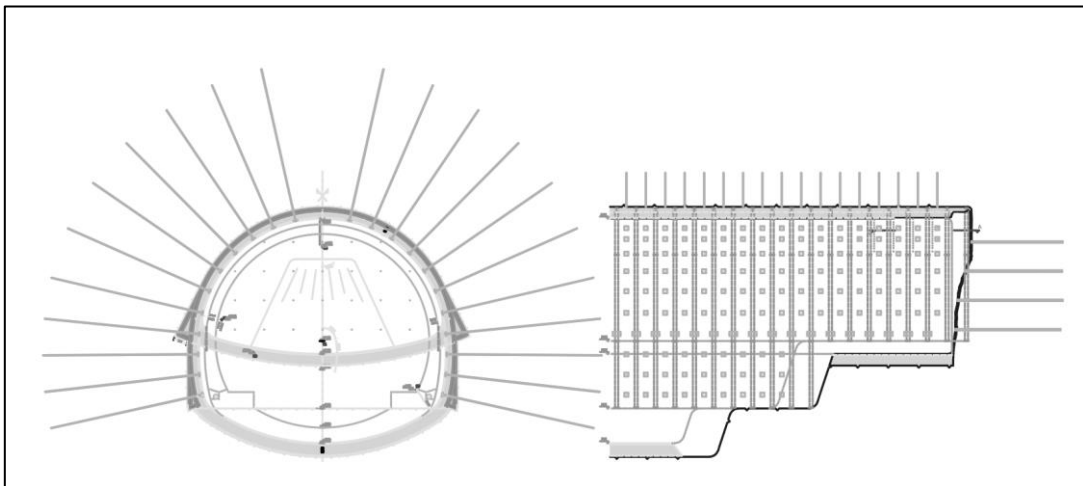
*Εικόνα 21 : Μηχανισμός λειτουργίας αγκυρίων μετώπου fiberglass.*

Η συνήθης πρακτική τοποθέτησης και διαστασιολόγησης αυτών των αγκυρίων 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 αγκύριο / 4m<sup>2</sup> σε καλά εδάφη έως 1 αγκύριο / 1m<sup>2</sup> σε ασθενή εδάφη. Στις περισσότερες περιπτώσεις, χρησιμοποιούνται αγκύρια ορθογωνικής διατομής φέρουσας ικανότητας 150 – 200kN.

Τα αγκύρια αυτά, όπως και οι δοκοί προπορείας, 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 αυτής της αλληλοεπικάλυψης υπολογίζεται με τον ίδιο τρόπο που υπολογίζεται και το μήκος αλληλοεπικάλυψης στους δοκούς προπορείας, όπως έχει περιγραφεί στην προηγούμενη ενότητα, με τις

μεθόδους Rankine και Kovari – Anagnostou. Το μήκος αυτό στην πλειοψηφία των υπόγειων έργων στον ελλαδικό χώρο κυμαίνεται από 3 – 4m. Η μόνη αναφορά που γίνεται στο μήκος αυτό, κάνει λόγο για μήκος αλληλοεπικάλυψης 6m με πυκνότητα αγκυρίων 1 αγκύριο / m<sup>2</sup>, κατά την εφαρμογή της μεθόδου διάνοιξης ADECO – RS.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η προσωρινή υποστήριξη της οδικής σήραγγας Όθρυος του αυτοκινητόδρομου Ε65, με εφαρμογή αγκυρίων μετώπου fiberglass, φέρουσας ικανότητας 160 kN, πυκνότητας 1 αγκυρίου / 1.5 m<sup>2</sup>, με αλληλοεπικάλυψη 4m, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 22.



*Εικόνα 22 : Υποστήριξη μετώπου εκσκαφής με αγκύρια fiberglass στην οδική σήραγγα Όθρυος  
(Πηγή: Γραφείο Μάλλιου Α.Ε.).*

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, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 23.



*Εικόνα 23 : Μέτωπο εκσκαφής υποστηριγμένο με αγκύρια fiberglass (Πηγή: Γεωργίου Δ.).*

Το αγκύριο fiberglass αποτελείται από μια πλάκα από υαλονήματα, επιστρωμένη με χαλαζιακή άμμο, έναν κεντραδόρο και ένα σωληνάκι ενεμάτωσης. Η πλάκα έχει αρκετά 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. Η παραπάνω διάταξη παρουσιάζεται στην Εικόνα 24.



*Εικόνα 24 : Αγκύρια fiberglass ορθογωνικής διατομής με κεντραδύρο (Πηγή: Γεωργίου Δ.).*

Συχνά, για να εξασφαλιστεί μεγαλύτερος συντελεστής ευστάθειας μετώπου εκσκαφής και, ειδικά σε περιπτώσεις ασθενών εδαφικών υλικών, χρησιμοποιείται συνδυασμός αγκυρίων μετώπου fiberglass και ομπρέλας δοκών προπορείας forepoling, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 25.



*Εικόνα 25 : Μέτωπο εκσκαφής με συνδυασμό υποστήριξης από αγκύρια μετώπου fiberglass και δοκούς προπορείας (Πηγή: Γεωργίου Δ.).*



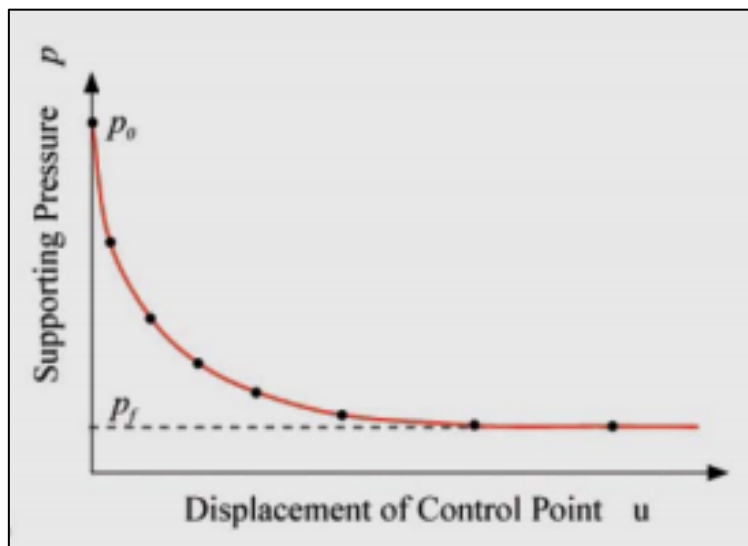
### 3.4 ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΕΣ ΕΡΕΥΝΕΣ

#### 3.4.1. Vermeer

Οι Vermeer et al. (2002), χρησιμοποιώντας το λογισμικό Plaxis, πραγματοποίησαν τρισδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων, με σκοπό να διερευνήσουν την ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής σήραγγων. Συγκεκριμένα, διερευνήθηκε η συσχέτιση της ελάχιστης απαιτούμενης πίεσης μετώπου  $p_f$ , με τη συνοχή  $c$ , τη γωνία τριβής  $\varphi$ , τη διάμετρο της σήραγγας και το βάθος εκσκαφής  $H$ . Η πίεση αυτή για στραγγιζόμενες συνθήκες δίνεται από τη σχέση :

$$p_f = -c \times N_c + q \times N_q + \gamma \times D \times N_\gamma$$

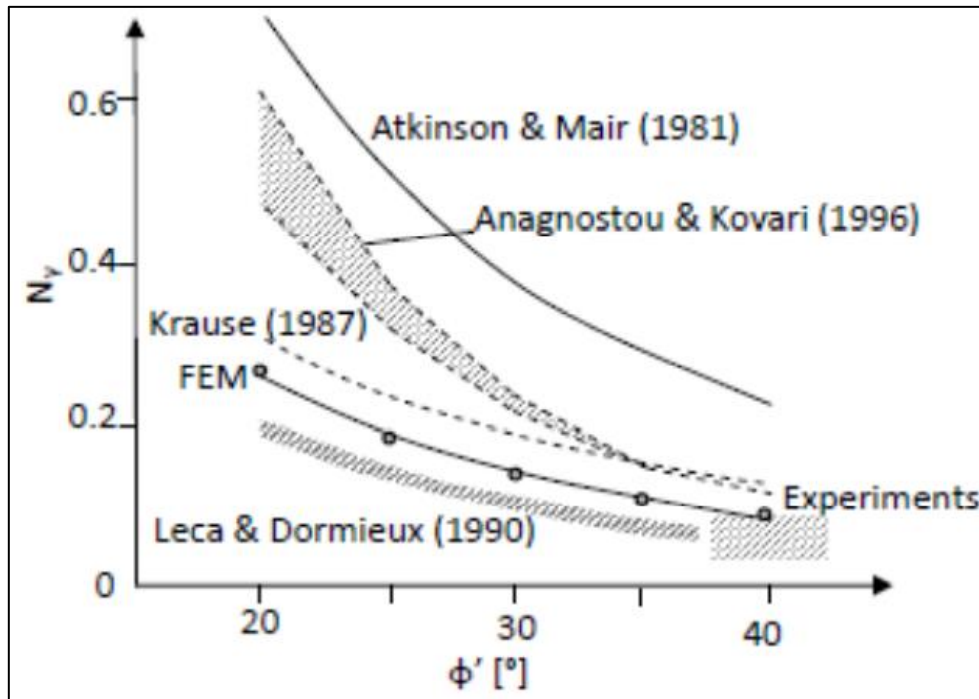
όπου  $N_c$ ,  $N_q$ ,  $N_\gamma$  συντελεστές ευστάθειας για τη συνοχή και  $q$  η τυχούσα επιφόρτιση στην επιφάνεια του εδάφους και το βάρος του εδάφους.



Εικόνα 26 : Διάγραμμα πίεσης υποστήριξης - εξώθησης μετώπου

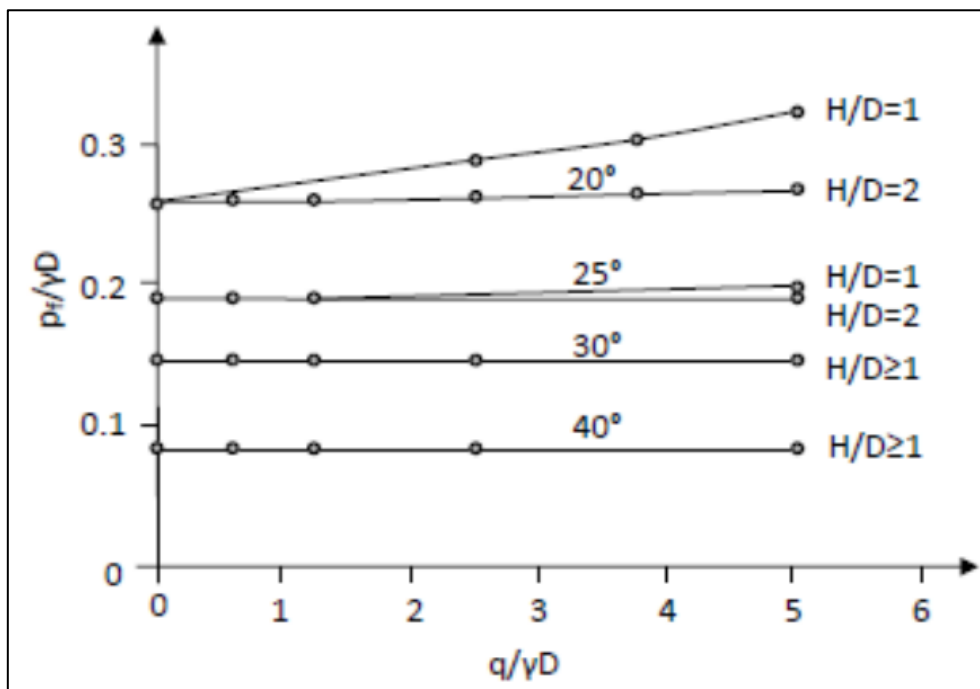
Από τις αναλύσεις προέκυψε ότι το μέτωπο παρουσιάζει αστοχία τύπου καμινάδας, όπου όσο μικρότερη είναι η γωνία τριβής, τόσο περισσότερο πλησιάζει την ελεύθερη επιφάνεια, ενώ όσο αυξάνει η γωνία τριβής, η περιοχή συγκέντρωσης των τάσεων περιορίζεται κοντά στο μέτωπο. Ο Vermeer ολοκλήρωσε την προσέγγιση του συγκρίνοντας τους συντελεστές ευστάθειας για τη συνοχή με προηγούμενες θεωρητικές προσεγγίσεις. Ως αποτέλεσμα, προκύπτει ότι οι προτεινόμενες τιμές του συντελεστή  $N_\gamma$  από τις αναλύσεις Plaxis του Vermeer, βρίσκονται ανάμεσα στα

αποτελέσματα της θεωρητικής οριακής λύσης των Leca & Dormieux και στα αποτελέσματα της μελέτης του Krause.



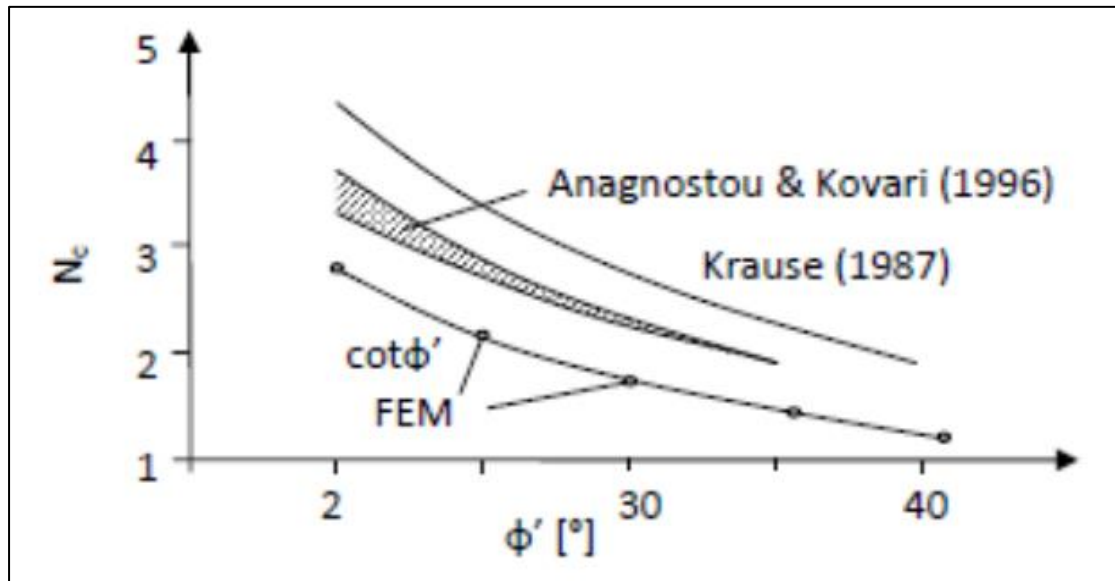
Εικόνα 27 : Σύγκριση αποτελεσμάτων διαφορετικών μελετών

Επιπλέον, αποδείχτηκε ότι η εξωτερική φόρτιση  $q$  επηρεάζει πρακτικά την πίεση υποστήριξης, μόνο για  $\phi < 20^\circ$ , γι' αυτό και λαμβάνεται  $N_q=0$ .



Εικόνα 28 : Επιρροή πίεσης υποστήριξης λόγω εξωτερικής φόρτισης

Ομοίως, για τη σταθερά  $N_c$ , η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων του Vermeer προτείνει λιγότερο συντηρητικά αποτελέσματα από αυτά των Krause και Anagnostou & Kovari.



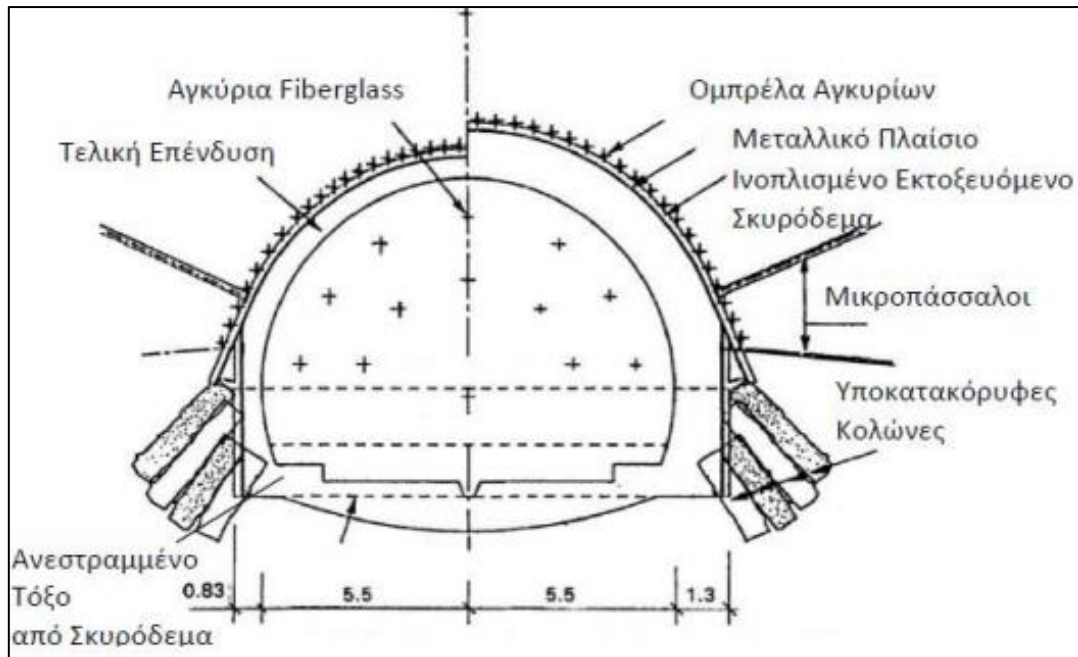
Εικόνα 29 : Συγκριτικά αποτελέσματα της προσέγγισης του Vermeer σε σχέση με άλλες μεθόδους

Τέλος, ο Vermeer εξέτασε την επιρροή του ανυποστήρικτου μήκους  $d$  από το μέτωπο εκσκαφής, στην απαιτούμενη πίεση υποστήριξης  $p_f$ .

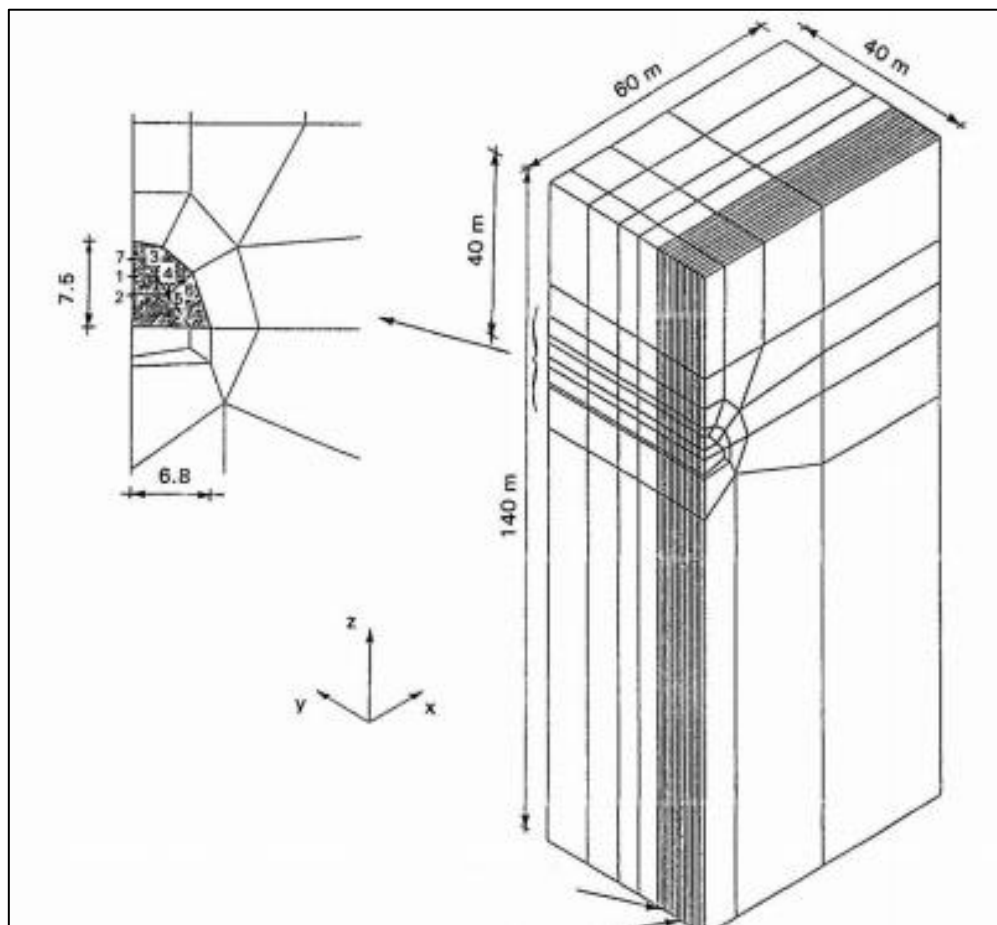
$$p_f = \gamma \times D \times \left( \frac{\left(2 + 3 \times \frac{d}{D}\right)^{6 \times \tan \varphi}}{18 \times \tan \varphi} - 0,05 \right) - \frac{c}{\tan \varphi}$$

### 3.4.2. Peila

Ο Peila παρουσίασε τα αποτελέσματα που προκύπτουν κατά τη χρήση ή μη υποστήριξης και ενίσχυσης στο μέτωπο της σήραγγας. Τα αποτελέσματα προέκυψαν από τρισδιάστατες ελαστοπλαστικές αναλύσεις, ενώ το μοντέλο δημιουργήθηκε με βάση δεδομένα πραγματικού έργου.



Εικόνα 30 : Τοπική διατομή άμεσης υποστήριξης



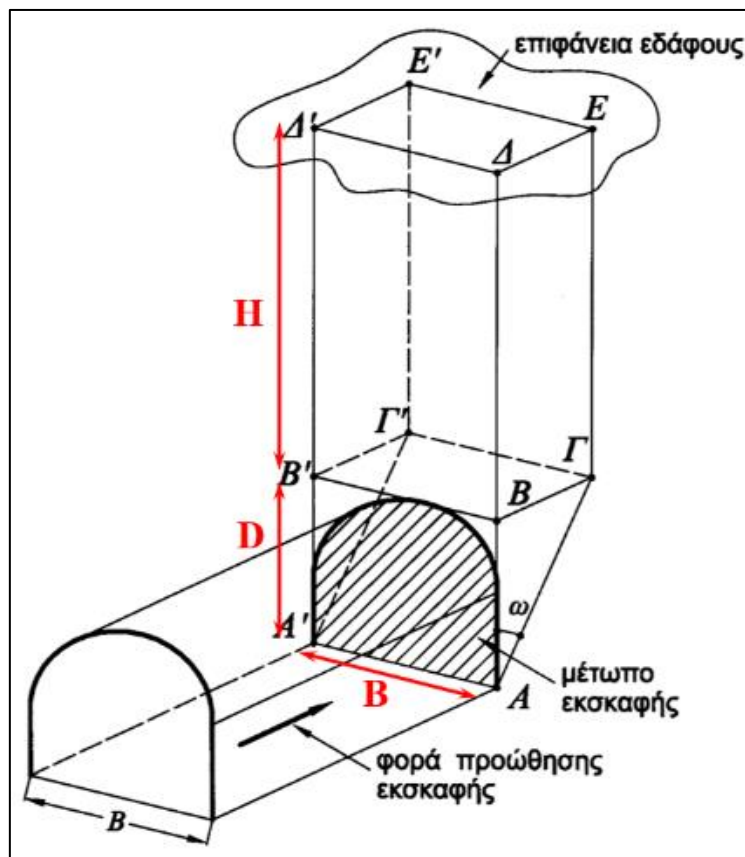
Εικόνα 31 : Γεωμετρία μοντέλου

Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις του Peila, 1994			
Χαρακτηριστικά		Μονάδες	Τιμή
Γεωμετρία	Υπερκείμενα Σήραγγας	m	140
	Εμβαδόν Διατομής Εκσκαφής	m <sup>2</sup>	70
	Βήμα Εκσκαφής	m	1
Μέσα Άμεσης Υποστήριξης	Πάχος	m	0.3
	Μέτρο Ελαστικότητας Young	MPa	15000
	Συντελεστής Poisson	-	0.18
Χαρακτηριστικά Έδάφους	Μέτρο Ελαστικότητας Young	MPa	100
	Συντελεστής Poisson	-	0.3
	Ειδικό Βάρος Εδάφους	kN/m <sup>3</sup>	25
	Γωνία Τριβής	ο	28
	Συνοχή	MPa	0.001
Χαρακτηριστικά Αγκυρίων Μετώπου	Αριθμός Αγκυρίων Μετώπου	-	11
	Μήκος Αγκυρίων	m	12
	Εσωτερική Διάμετρος Αγκυρίων	mm	40
	Εξωτερική Διάμετρος Αγκυρίων	mm	60
	Εφελκυστική Αντοχή	MPa	450
	Διατμητική Αντοχή	MPa	90
	Μέτρο Ελαστικότητας Young	MPa	15000

Για την πληρότητα της μελέτης, ο Peila εξέτασε δύο διατομές, μια μετά από 6m εκσκαφής και μια μετά από 10m εκσκαφής. Από τις αναλύσεις, προέκυψε ότι η παραμόρφωση του κελύφους επηρεάζεται περισσότερο από την επένδυση από ό,τι από την ενίσχυση. Επιπλέον, η ύπαρξη κελύφους δεν επηρεάζει την τιμή της έκθλιψης, η οποία μειώνεται σημαντικά με τη χρήση fiberglass. Η χρήση fiberglass μετατρέπει τις εφελκυστικές οριζόντιες τάσεις σε θλιπτικές, συμβάλλοντας στην ευστάθεια του μετώπου. Η κατανεμημένη πίεση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση των αγκυρίων μετώπου και η τιμή της φαίνεται να εξαρτάται μόνο από τα χαρακτηριστικά και τον αριθμό των αγκυρίων. Εκτιμάται ακόμη ότι η πίεση αυτή εξαρτάται από τη διάταξη των αγκυρίων, υπονοώντας μάλλον ότι όσο ομαλότερη η κατανομή των αγκυρίων στο μέτωπο, τόσο πιο αντιπροσωπευτική η ισοδύναμη πίεση στο μέτωπο. Εντούτοις, η τιμή αυτή της ισοδύναμης πίεσης δεν είναι ίση με την ελάχιστη εκ των κατανεμημένων στην επιφάνεια εκσκαφής δυνάμεων τριβής και εφελκυστικής αντοχής των αγκυρίων αλλά περίπου η διπλάσια.

### 3.4.3. Kovari & Anagnostou

Η μέθοδος Kovari & Anagnostou (1996) βασίζεται στη θεωρία του σιλό του Horn (1961) και χρησιμοποιεί το προσομοίωμα της σφήνας που ολισθαίνει. Με τη βοήθεια της μεθόδου, γίνεται εκτίμηση της πίεσης που πρέπει να επιβληθεί στο μέτωπο, ώστε να προκύψει ο επιθυμητός συντελεστής ασφαλείας, ο οποίος ορίζεται ως το πηλίκο των δυνάμεων ευστάθειας προς τις δυνάμεις ολίσθησης κατά το μήκος της επιφάνειας ολίσθησης της σφήνας.

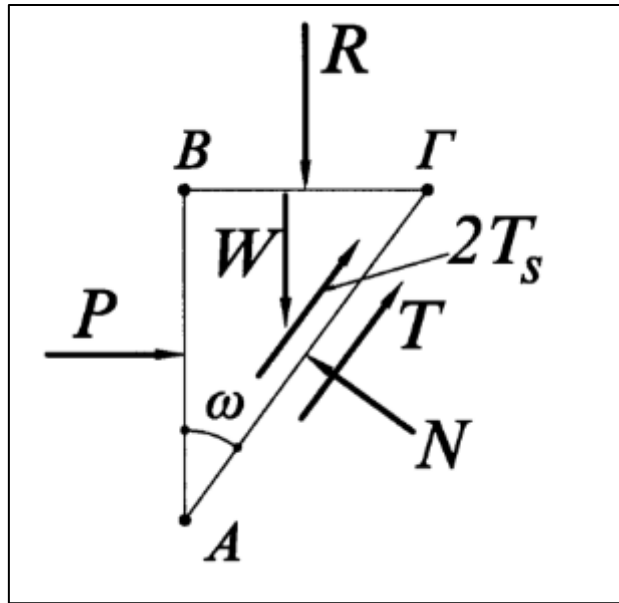


Εικόνα 32 : Προσομοίωμα της σφήνας κατά τη μέθοδο Kovari & Anagnostou

Οι δυνάμεις που ασκούνται στο πρίσμα είναι :

1. Το βάρος του  $W = \gamma \times B \times (AB\Gamma) = \frac{1}{2} \times \gamma \times D^2 \times B \times \tan\omega$ .
2. Η πίεση υπερκειμένων  $R = \sigma_v \times (B'B\Gamma\Gamma') = \sigma_v \times B \times D \times \tan\omega$ , όπου  $\sigma_v$  η ισοδύναμη πίεση αποτόνωσης.
3. Η τριβή στην παρειά  $T_s = (AB\Gamma) \times \frac{\tau_f}{F} = \frac{1}{2} \times (D^2 \times \tan\omega) \times \frac{\tau_f}{F}$ , όπου  $\tau_f = c + K \times \sigma_{v0} \times \tan\phi$ .

4. Η τριβή στη βάση  $T = \frac{1}{F} \times [c \times (A'AG\Gamma') + N \times \tan\varphi]$ .



Εικόνα 33 : Δυνάμεις που ασκούνται στη σφήνα

Προκειμένου να επιτευχθεί ισορροπία του πρίσματος, ισχύει ότι :

$$N = (R + W) \times \sin\omega + P \times \cos\omega$$

$$T + 2 \times T_s = (R + W) \times \cos\omega - P \times \sin\omega$$

Ως αποτέλεσμα, προκύπτει ο συντελεστής ασφαλείας έναντι αστοχίας του μετώπου εκσκαφής ίσος με :

$$F = \frac{N \times \tan\varphi + c \times (A'AG\Gamma') + 2 \times \tau_f \times (AB\Gamma)}{(R + W) \times \cos\omega - P \times \sin\omega}$$

όπου :

- $W = \frac{1}{2} \times \gamma \times D^2 \times B \times \tan\omega$
- $P = \sigma_3 \times (ABB'A')$
- $\tau_f = c + K \times \sigma_{v0} \times \tan\varphi$
- $N = (R + W) \times \sin\omega + P \times \cos\omega$
- $R = \sigma_v \times B \times D \times \tan\omega$
- $(A'AG\Gamma') = \frac{B \times D}{\cos\omega}$

Η μεθοδολογία εφαρμόστηκε για διαφορετικά βάθη σήραγγων και παραμέτρους διατμητικής αντοχής του εδάφους, ενώ εξετάστηκε και η περίπτωση ύπαρξης υδροφόρου ορίζοντα. Από τις αναλύσεις, προέκυψε ότι όσο μειώνεται ο λόγος H/D, τόσο δυσμενέστερη είναι η ευστάθεια του μετώπου. Επιπλέον, αποδείχτηκε ότι σε ασθενή εδάφη, τα αγκύρια δεν μπορούν να προσφέρουν την απαιτούμενη πίεση υποστήριξης, ώστε να ευσταθήσει το μέτωπο. Τα fiberglass προσφέρουν επαρκή στήριξη σε όλα τα πιο συνεκτικά εδάφη, ενώ οι Κοναρί και Αναγνωστού υποστηρίζουν ότι τα εδάφη αυτά μπορούν να μείνουν ακόμα και ανυποστήρικτα.

### **3.5. ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΚΑΤΑ Γ. Κ. ΠΡΟΥΝΤΖΟΠΟΥΛΟ (2012)**

Οι περισσότερες αστοχίες σε αβαθείς – αστικές σήραγγες πραγματοποιούνται στο μέτωπο ή κοντά σε αυτό. Προκειμένου να αποφευχθεί αυτό, επιδιώκονται όσο το δυνατόν χαμηλότερες τιμές παραμορφώσεων μπροστά από την εκσκαφή και μέχρι να τοποθετηθεί η υποστήριξη. Η ευστάθεια στην περιοχή προώθησης της εκσκαφής εξαρτάται από την αντοχή του εδάφους και πόσο μπορεί να αυτοϋποστηριχθεί έστω και για μικρό χρονικό διάστημα.

Για την αξιολόγηση της ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής, το 2012, στη διδακτορική διατριβή του Γεωργίου Κ. Προυντζόπουλου, προτάθηκε ο συντελεστής  $A_F$ , ο οποίος για τιμές μεγαλύτερες της μονάδας υποδεικνύει ένα ασταθές μέτωπο εκσκαφής. Ο συντελεστής υπολογίζεται με βάση τη σχέση που ακολουθεί :

$$A_F = \frac{5.25 \times c \times \left[ \left( \tan 45 + \frac{\varphi}{2} \right)^{2\alpha} \right]}{\gamma \times H^{1-b} \times D^b}$$

όπου :

- $\alpha = 0.16 \times \left( \frac{H}{D} \right) + 0.59$
- $b = \left( \frac{H}{D} \right)^{-0.37}$

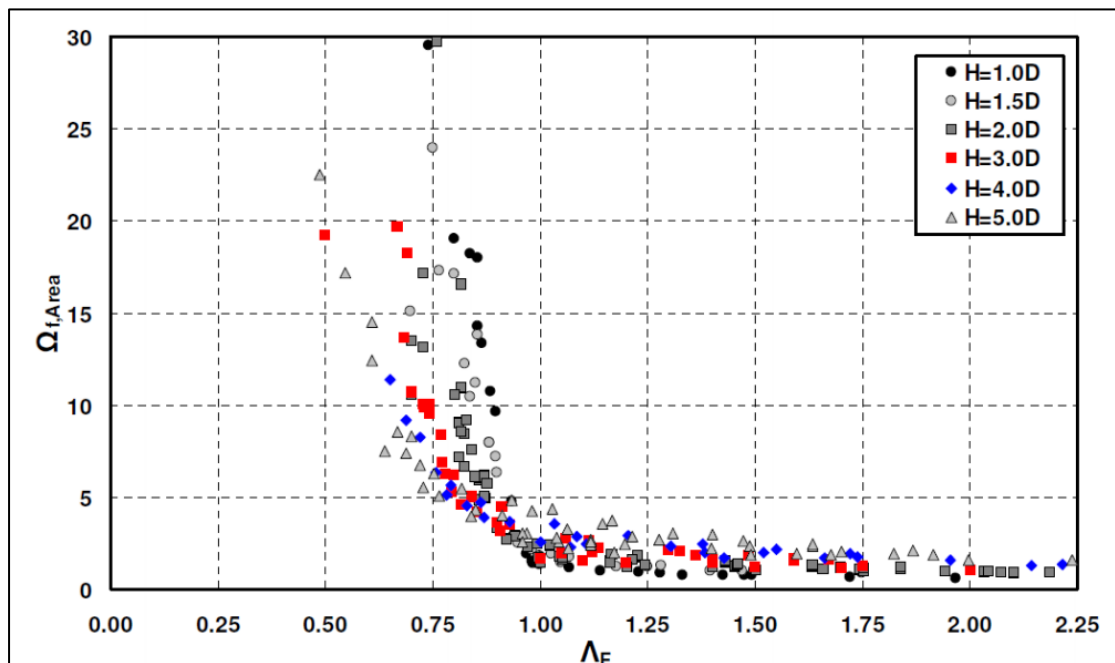
Ταυτόχρονα, εξέφρασε την εξώθηση του μετώπου εκσκαφής μέσω της μέσης εξώθησης και της μέσης γεωστατικής τάσης, με βάση τη σχέση :



$$\Omega_{f,area} = \frac{U_{h,area} \times E_{soil}}{D \times P_0} = \frac{40 \times D}{H \times (\Lambda_F + B)^C} + 0.6 \times \left(\frac{H}{D}\right)^{0.4}$$

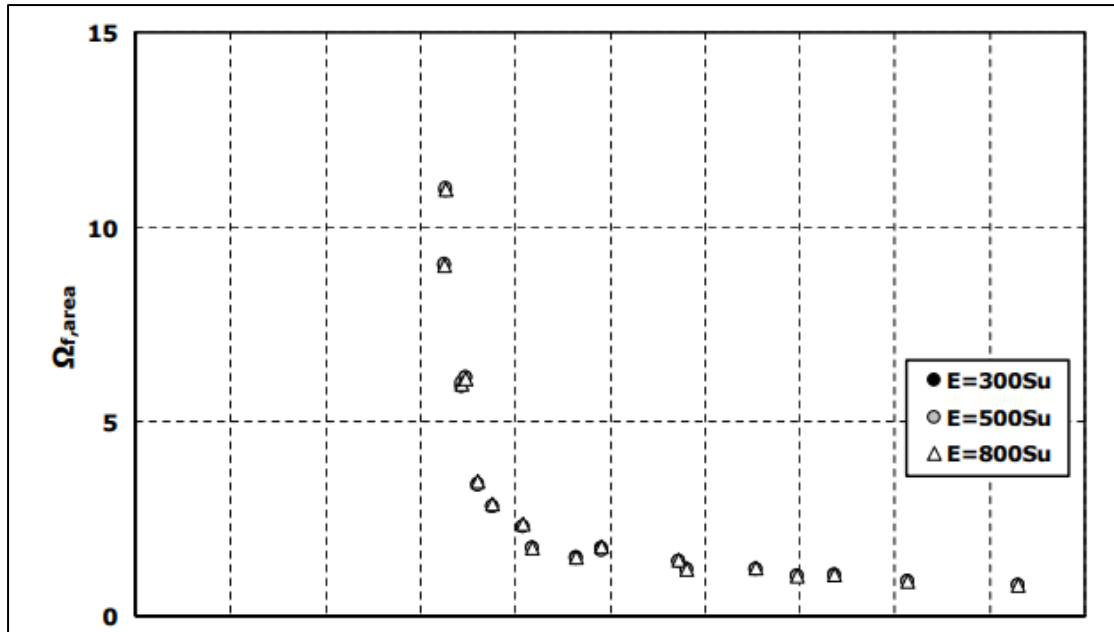
Όπου :

- $U_{h,area}$  η μέση εξώθηση, η οποία εξάγεται ως το πηλίκο του όγκου λόγω εξώθησης προς το εμβαδόν του μετώπου
- $E_{soil}$  το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους
- $P_0$  η μέση γεωστατική τάση, η οποία είναι ίση με :  $P_0 = \frac{1+K_0}{2} \times \gamma \times H$
- $B = 0.23 \times \left(\frac{H}{D}\right)^{0.425}$
- $C = 16 \times \frac{D}{H}$



Εικόνα 34 : Συντελεστής ασφαλείας συνταρτήσει της εξώθησης του μετώπου εκσκαφής για διαφορετικά ύψη υπερκειμένων

Ο Προυντζόπουλος εξέτασε την επίδραση του μέτρου παραμορφωσιμότητας για κάθε ζεύγος παραμέτρων διατμητικής αντοχής, θεωρώντας ότι η παραμορφωσιμότητα του εδάφους δεν επηρεάζει την ευστάθεια της σήραγγας, παρά μόνο το μέγεθος των προκαλούμενων παραμορφώσεων. Ως αποτέλεσμα, προέκυψε ότι η τιμή του μέτρου ελαστικότητας  $E$ , δεν επηρεάζει την εξώθηση του μετώπου  $\Omega_{f,area}$  και τον συντελεστή ευστάθειας του μετώπου  $\Lambda_F$ .



Εικόνα 35 : Σύγκριση αποτελεσμάτων μέσης κανονικοποιημένης έκθλιψης μετώπου  $\Omega_{f,area}$  για διάφορες τιμές του μέτρου παραμορφωσιμότητας του εδάφους, σε σήραγγα βάθους  $H=2.0D$

Επιπλέον, απέδειξε ότι η γωνία διαστολικότητας δεν επηρεάζει τη μορφή της αστοχίας, διαφοροποιεί ωστόσο την έκτασή της, με μικρότερες τιμές της γωνίας  $\delta$ , να έχουν μεγαλύτερη επίδραση στην επιφάνεια του εδάφους. Ως συμπέρασμα, κατέληξε ότι η επίδραση της γωνίας  $\delta$  στην ευστάθεια του μετώπου είναι αμελητέα.

### 3.6. ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΚΑΤΑ Δ. ΓΕΩΡΓΙΟΥ (2020) (υπό δημοσίευση)

Οι Γεωργίου Δ., Καλός Α., Καββαδάς Μ., στο πλαίσιο διερεύνησης της ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής σήραγγας τόσο σε μικρά υπερκείμενα (ρηχές σήραγγες – max  $H$ : 30m), όσο και σε μεγαλύτερα υπερκείμενα (βαθιές σήραγγες – max  $H$ : 200m), πραγματοποίησαν τρισδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Simulia ABAQUS. Στις αναλύσεις προσομοιώθηκε η ολομέτωπη διάνοιξη σήραγγας πεταλοειδούς διατομής με προσωρινή υποστήριξη από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Η συμπεριφορά του γεωλικού στις ρηχές σήραγγες ακολούθησε το καταστατικό κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb, όπου προσομοιώθηκαν εδαφικές συνθήκες, ενώ στις βαθιές σήραγγες εφαρμόστηκε το καταστατικό κριτήριο αστοχίας Generalized Hoek and Brown, όπου προσομοιώθηκε το γεωλικό ως βραχώμαζα.

Από τις αναλύσεις προέκυψε ένας κοινός συντελεστής ασφαλείας μετώπου εκσκαφής  $\Lambda_{F_0}$ , που βρίσκεται εφαρμογή σε ρηχές και βαθιές σήραγγες. Για τιμή  $\Lambda_{F_0} < 1$ , το μέτωπο

της εκσκαφής χαρακτηρίζεται ως δυνητικά ασταθές, ενώ για τιμή  $\Lambda_{F0} \geq 1$ , το μέτωπο της εκσκαφής χαρακτηρίζεται ως δυνητικά ευσταθές. Ο συντελεστής ασφαλείας  $\Lambda_{F0}$ , υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\Lambda_{F0} = \frac{3.8 \times \frac{\sigma_{cm}}{\gamma \times H} \times \left(\frac{H}{D}\right)^{0.35}}{\sqrt{1 + \frac{2}{3} K_o}}$$

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

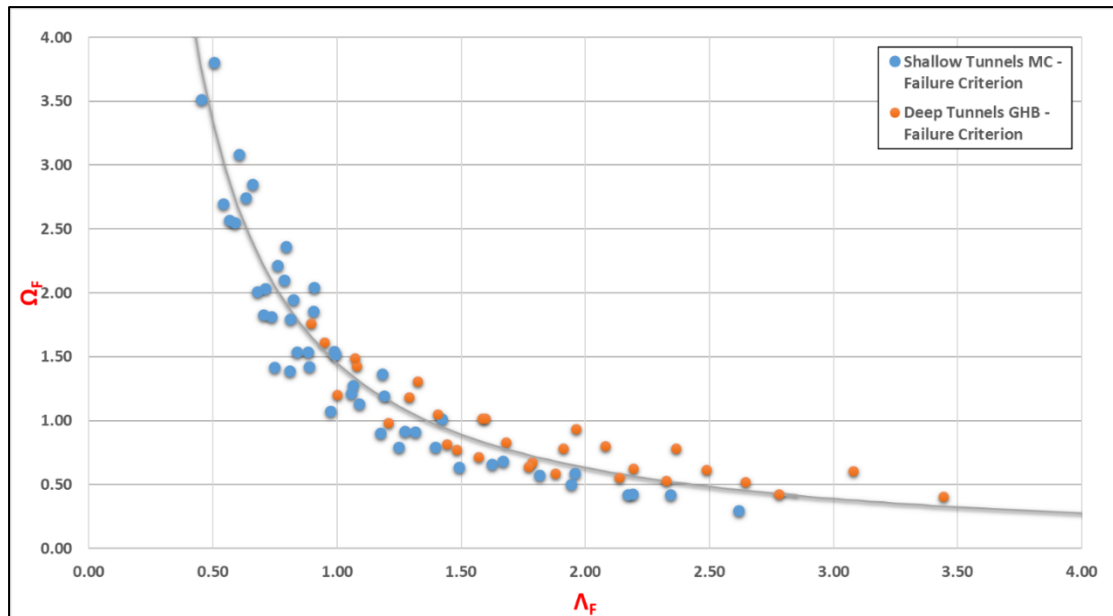
Ο παραπάνω συντελεστής ασφαλείας ανυποστήρικτου μετώπου εκσκαφής  $\Lambda_{F0}$ , συνδέεται με την αδιάστατη εξώθηση μετώπου εκσκαφής  $\Omega_F$  με την ακόλουθη σχέση:

$$\Omega_F = 1.4 \times (\Lambda_{F0})^{-1.2}$$

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

- $U_h$ : 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 1.



Διάγραμμα 1 :Συσχέτιση συντελεστή ασφαλείας  $\Lambda_{F0}$  με εξώθηση μετώπου εκσκαφής  $\Omega_F$ .

Ο παραπάνω συντελεστής ασφαλείας μετώπου εκσκαφής επεκτάθηκε και για περιπτώσεις, όπου το μέτωπο ενισχύεται με αγκύρια μετώπου από υαλόνημα (fiberglass).

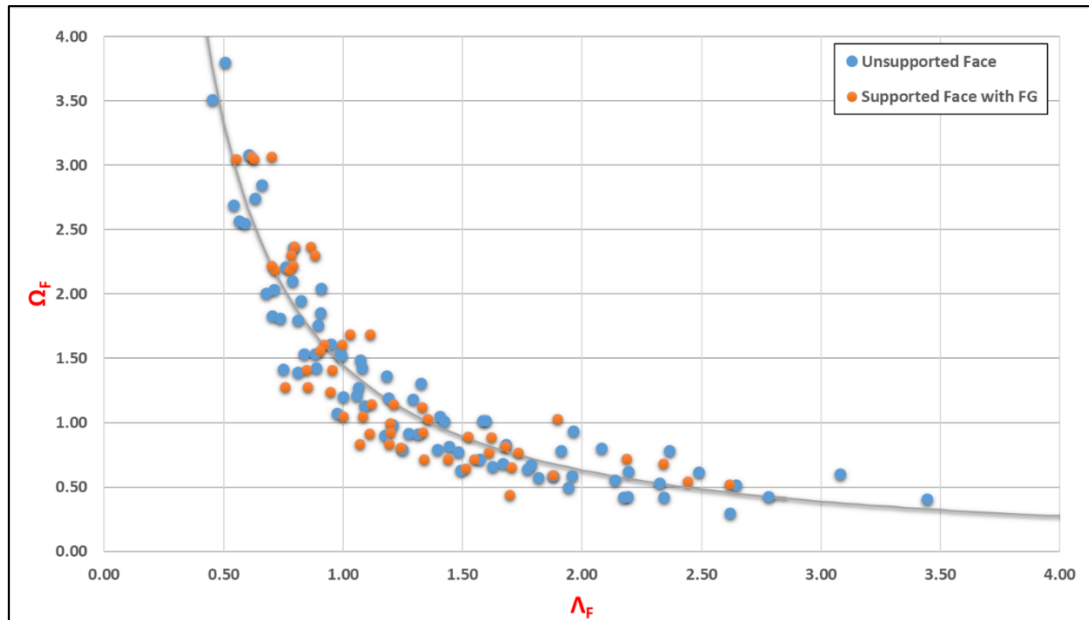
Ο συντελεστής ασφαλείας μετώπου με υποστήριξη από αγκύρια fiberglass  $\Lambda_F$ , προκύπτει από την ακόλουθη σχέση, όμοια για ρηγές και βαθιές σήραγγες:

$$\Lambda_F = \Lambda_{F0} \times \left[ 1 + 0.75 \times \left( \frac{P_{u,FG}}{\sigma_{cm}} \right)^a \right]$$

όπου:

- $P_{u,FG} = \frac{n \times F_u}{A}$ 
  - n: αριθμός αγκυριών μετώπου fiberglass
  - $F_u$ : φέρουσα ικανότητα αγκυριών μετώπου fiberglass
  - A: εμβαδό διατομής υποστηριγμένο με αγκύρια μετώπου fiberglass
- $a = 0.13 \times \left( \frac{H}{D} \right)$ 
  - H: ύψος υπερκείμενων γαιών
  - D: διάμετρος σήραγγας

Η σχέση  $\Omega_F = 1.4 \times (\Lambda_{Fo})^{-1.2}$  βρίσκει εφαρμογή και στην περίπτωση του υποστηριγμένου μετώπου εκσκαφής με αγκύρια μετώπου fiberglass, όπου η αποτύπωσή της παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 2.



Διάγραμμα 2 : Συσχέτιση συντελεστή ασφαλείας  $\Lambda_F$  με εξόθιση μετώπου εκσκαφής  $\Omega_F$ .



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΥΡΥΝΣΗ ΤΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΟΥ ΜΕΤΩΠΟΥ**





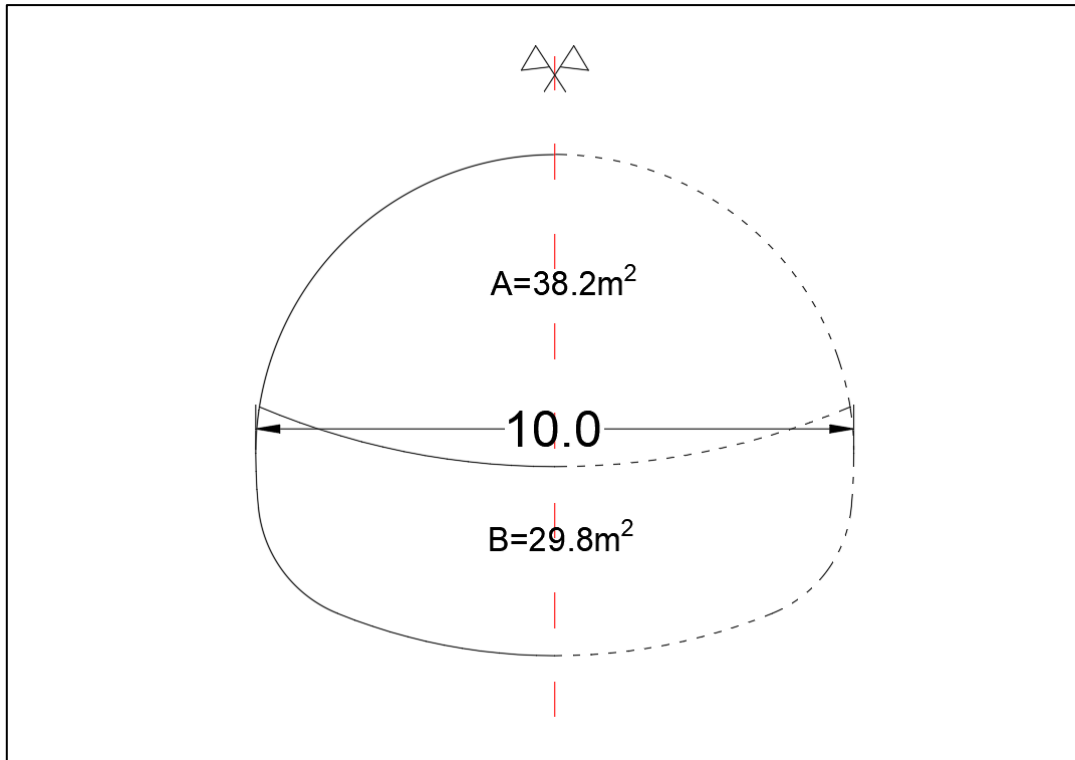
#### **4.1. ΣΚΟΠΟΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ**

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, πραγματοποιήθηκε ένα σύνολο τρισδιάστατων (3D) αριθμητικών αναλύσεων, με σκοπό την διερεύνηση της ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής σήραγγας. Λόγω της πολυπλοκότητας της γεωμετρίας του προβλήματος ( τρίτη διάσταση), όσο και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των μέτρων υποστήριξης μετώπου εκσκαφής (αγκύρια fiberglass και δοκοί προπορείας), όπου αναπτύσσονται κατά την τρίτη διάσταση, αποφασίστηκε το σύνολο των αναλύσεων να περιλαμβάνει την τρίτη διάσταση του χώρου (3D).

Για τις αριθμητικές αναλύσεις, χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων Simulia ABAQUS v.2018. Πρόκειται για ένα γενικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, με δυνατότητα σχεδίασης προσομοιωμάτων τόσο στον δισδιάστατο χώρο (2D) όσο και στον τρισδιάστατο χώρο (3D), το οποίο βρίσκει εφαρμογή σε μεγάλο εύρος της επιστήμης του μηχανικού, όπως αεροναυπηγική, δυναμική, γεωτεχνική μηχανική κ.τ.λ.. Επίσης, δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να καθορίσει το είδος και την μορφή των πεπερασμένων στοιχείων (elements).

#### **4.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ**

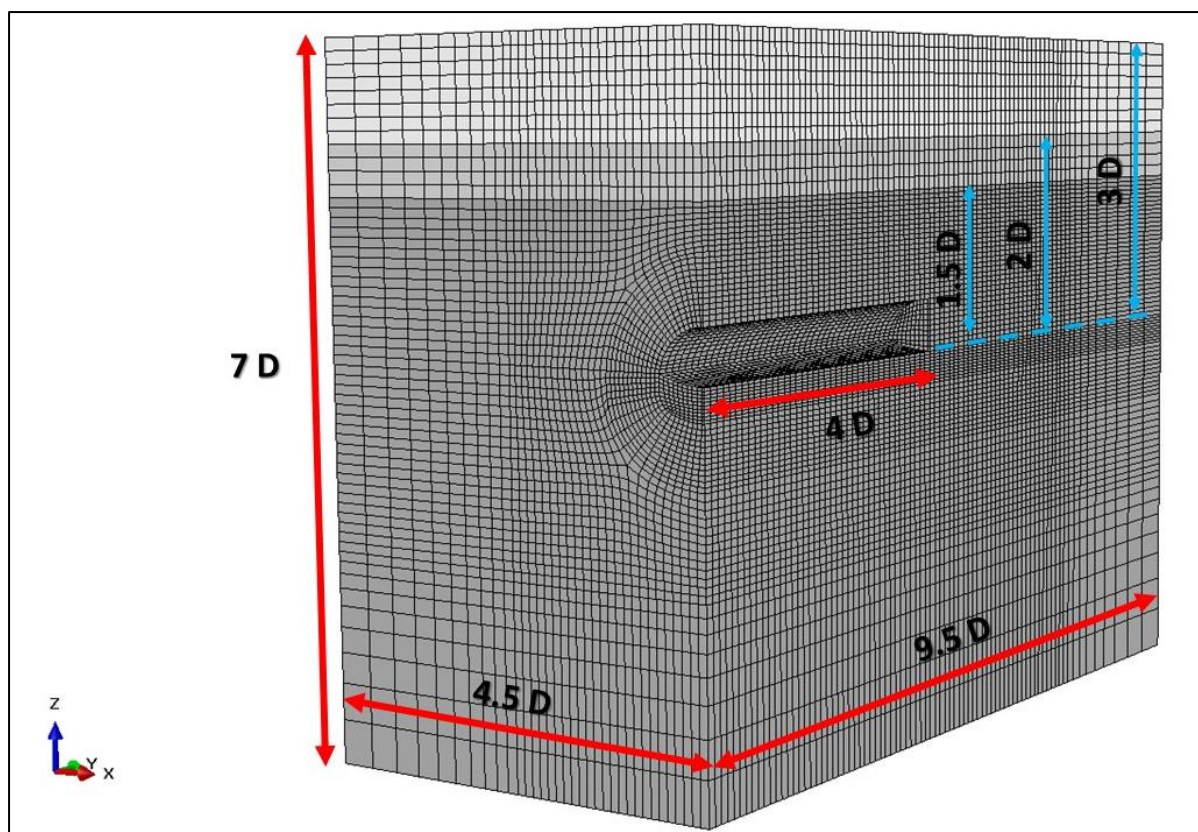
Για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας, κατασκευάστηκε ένα τρισδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα, το οποίο εκτείνεται γραμμικά κατά την τρίτη διάσταση του χώρου (extrude). Συγκεκριμένα, κατασκευάστηκε συμμετρικό προσομοίωμα με άξονα συμμετρίας τον άξονα της σήραγγας, οπότε πραγματοποιήθηκε προσομοίωση της μισής διατομής της εκσκαφής. Η συμμετρία της σήραγγας ως προς το κατακόρυφο άξονά της, μας επιτρέπει να προσομοιώσουμε την μισή εκσκαφή, διασφαλίζοντας έτσι μείωση του υπολογιστικού όγκου και χρόνου. Η διατομή εκσκαφής που προσομοιώθηκε, είναι πεταλοειδής (Εικόνα 36), ισοδύναμης διαμέτρου  $D=10m$ , με διαμερισματοποίηση για εκσκαφή σε δύο φάσεις (άνω ημιδιατομή (top heading) και αναβαθμός (bench)), με μεσολάβηση προσωρινού ανάστροφου τόξου (invert) μεταξύ αυτών των δύο φάσεων εκσκαφής.



Εικόνα 36 : Διαστάσεις διατομής εκσκαφής.

Τα όρια του μοντέλου καθορίστηκαν ως ακολούθως (Εικόνα 37):

- **Πλευρικά όρια**: Απόσταση ίση με 4.5 διαμέτρους εκσκαφής ( $4.5D = 45\text{m}$ ) από τον άξονα της σήραγγας.
- **Κάτω όριο**: Απόσταση ίση με 4 διαμέτρους εκσκαφής ( $4 D = 40\text{m}$ ) από τον άξονα της σήραγγας.
- **Άνω όρια**: Απόσταση ίση με 1.5, 2 και 3 διαμέτρους εκσκαφής ( $1.5, 2, 3D = 15, 20, 30\text{m}$ ) από τον άξονα της σήραγγας. Το όριο αυτό μεταβάλλεται ανάλογα με το ύψος των υπερκείμενων γαιών (H), πάντοτε μετρούμενο από τον άξονα της σήραγγας.
- **Τρίτη διάσταση**: Απόσταση ίση με 9.5 διαμέτρους εκσκαφής ( $9.5D = 95\text{m}$ ). Από την παραπάνω απόσταση εκσκάπτονται τα πρώτα 40m (4D).



Εικόνα 37 : Προσομοίωμα αριθμητικών αναλύσεων.

### 4.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΓΕΩΥΛΙΚΟΥ

Το εδαφικό γεωυλικό προσομοιώθηκε με το καταστατικό κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb, όπου η συμπεριφορά του εδάφους ήταν γραμμικώς ελαστική, πλήρως πλαστική. Το έδαφος ακολουθεί γραμμικώς ισότροπη ελαστική συμπεριφορά.

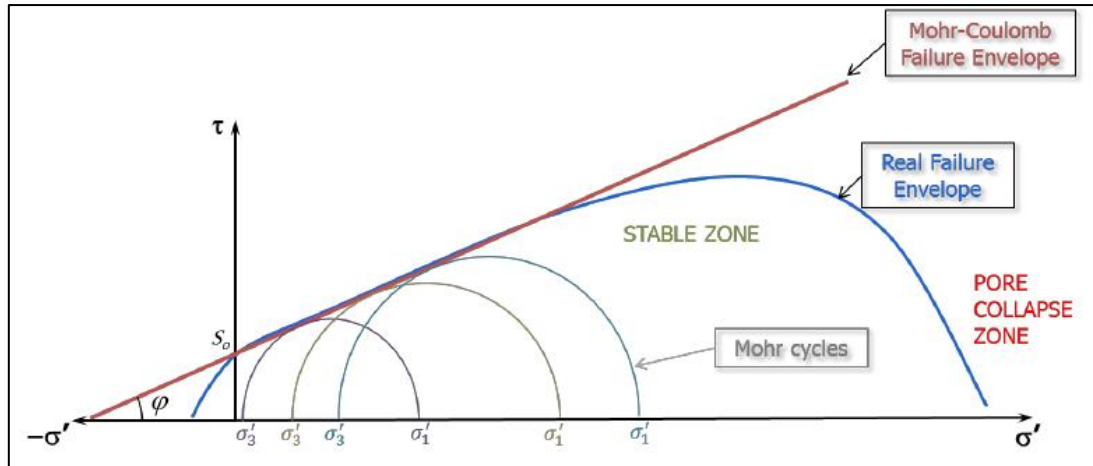
Το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb, αποτελεί ένα σύνολο γραμμικών εξισώσεων στο χώρο των κύριων τάσεων, που περιγράφουν τις συνθήκες κατά την αστοχία ενός ισότροπου πετρώματος, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της ενδιάμεσης κύριας τάσης. Στο επίπεδο ορθής και διαμητικής τάσης, το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb, διατυπώνεται ως ακολούθως:

$$\tau = c + \sigma_n \times \tan\varphi$$

όπου  $\tau$ : η διαμητική τάση,  $\sigma_n$ : η ορθή τάση,  $c$ : η συνοχή του εδάφους και  $\varphi$ : η γωνία τριβής του εδάφους.

Αντίστοιχα στο επίπεδο των κυρίων τάσεων στον χώρο  $\sigma_1, \sigma_3$ , το κριτήριο Mohr-Coulomb, διατυπώνεται ως ακολούθως:  $\sigma_1 = \frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi} \sigma_3 + \frac{2 \times c \times \cos\varphi}{1-\sin\varphi}$ .

Στο κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb, ορίζεται η περιβάλλουσα αστοχίας στο επίπεδο  $\sigma$ - $\tau$  (Εικόνα 38), η οποία καθορίζει τις περιοχές με εντατικές καταστάσεις, όπου το γεωυλικό αστοχεί ή όχι.



Εικόνα 38 : Σχηματική αποτύπωση κριτηρίου αστοχίας Mohr-Coulomb.

Συνολικά προσομοιώθηκαν πέντε (5) εδάφη, με κωδική αρίθμηση S0 – S4, όπου ξεκινώντας από το έδαφος S0 και προχωρώντας προς το έδαφος S4, βελτιώνονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά. Αναλυτικά, οι μηχανικές παράμετροι των εδαφών, που προσομοιώθηκαν, παρατίθενται στον Πίνακα 4.1.

Έδαφος	Ειδικό βάρος $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Συνοχή $c$ (KPa)	Γωνία τριβής $\phi$ (°)	Μέτρο ελαστικότητας $E$ (MPa)
S0	20	10	20	40
S1	20	15	20	50
S2	20	20	20	70
S3	20	20	25	100
S4	20	30	25	150

Πίνακας 4.1 : Μηχανικές παράμετροι εδαφικών υλικών.

Να σημειωθεί ότι σε όλα τα εδάφη, λήφθηκε διαστολικότητα  $\delta = \phi/4$  και λόγος Poisson  $\nu=0.333$ . Επίσης, ο λόγος ουδέτερων ωθήσεων  $K_o = \frac{\sigma_h}{\sigma_v}$  έλαβε τις τιμές 0.5 και 1.

#### 4.4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕΤΡΩΝ ΠΡΟΣΩΡΙΝΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ

Η υποστήριξη του διανοιχθέντος τμήματος της σήραγγας αποτελείται από ένα κέλυφος εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε συνδυασμό με αγκύρια ολόσωμης πάκτωσης. Παράλληλα, πραγματοποιήθηκε προϋποστήριξη του μετώπου εκσκαφής με αγκύρια μετώπου (fiberglass) ή με συνδυασμό αγκυρίων μετώπου fiberglass και δοκών προπορείας (forepoling). Η αναλυτική περιγραφή της προσομοίωσης των μέτρων υποστήριξης, παρατίθεται στη συνέχεια.

- Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

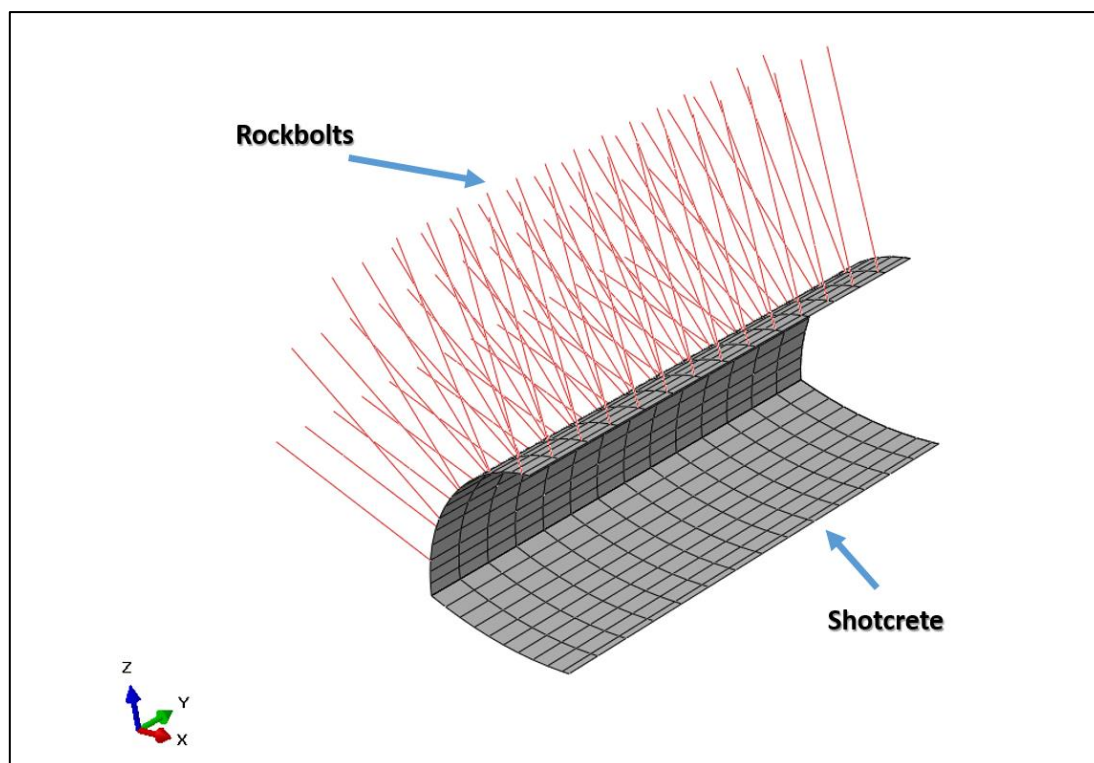
Το κέλυφος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, που τοποθετήθηκε σαν κύριο μέτρο υποστήριξης στο ήδη διανοιχθέν τμήμα της σήραγγας, προσομοιώθηκε υπό μορφή στοιχείων κελύφους (shell element), το οποίο εφάπτεται μεταξύ των στοιχείων του εδάφους (soil elements) και της ελεύθερης επιφάνειας που δημιουργείται από την εκσκαφή. Τα χαρακτηριστικά της προσωρινής υποστήριξης από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, που ελήφθησαν υπόψιν στις αριθμητικές αναλύσεις, παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2.

Πάχος (t)	30 cm
Μέτρο ελαστικότητας ( $E_{\text{shotcrete}}$ )	15 GPa
Λόγος Poisson ( $\nu$ )	0.25
Συμπεριφορά	Ελαστική

*Πίνακας 4.2 : Ιδιότητες εκτοξευόμενου σκυροδέματος.*

- Αγκύρια ολόσωμης πάκτωσης

Το κέλυφος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ενισχύθηκε με αγκύρια ολόσωμης πάκτωσης, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 39.



*Εικόνα 39 : Προσομοίωση κελύφους προσωρινής υποστήριξης από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αγκύρια ολόσωμης πάκτωσης.*

Τα αγκύρια προσομοιώθηκαν ως στοιχεία δικτύωματος (truss elements), τα οποία αναπτύσσονται μεταξύ των ενδιάμεσων κόμβων (nodes) του γεωλικού. Τα χαρακτηριστικά των αγκυρίων ολόσωμης πάκτωσης που ελήφθησαν υπόψιν στις προσομοιώσεις, παρατίθενται στον Πίνακα 4.3.

Διάμετρος (d)	30 cm
Μήκος (L)	6 m
Κάνναβος	1.5 x 1 m
Μέτρο ελαστικότητας ( $E_{\text{steel}}$ )	200 GPa
Λόγος Poisson ( $\nu$ )	0.25
Όριο διαρροής ( $\sigma_y$ )	500 MPa
Συμπεριφορά	Ελαστοπλαστική

*Πίνακας 4.3 : Ιδιότητες αγκυρίων ολόσωμης πάκτωσης.*

- **Αγκύρια μετώπου (fiberglass nails)**

Ως κύριο μέτρο προϋποστήριξης του μετώπου εκσκαφής, χρησιμοποιήθηκαν αγκύρια μετώπου από υαλόνημα – fiberglass nails. Τα αγκύρια προσομοιώθηκαν ως στοιχεία δικτύωματος (truss elements), τα οποία αναπτύσσονται μεταξύ των ενδιάμεσων κόμβων (nodes) του γεωυλικού. Το μήκος των αγκυρίων καθορίστηκε εξ αρχής  $L=40m$ , το οποίο συνεχώς μικραίνει καθώς εξελισσόταν η εκσκαφή της σήραγγας, έως ότου μηδενίστηκε. Στις αναλύσεις χρησιμοποιήθηκαν δύο (2) κάρναβοι αγκύρωσης του μετώπου εκσκαφής:

✓  $1 \text{ αγκύριο} / 2m^2$

✓  $1 \text{ αγκύριο} / 4m^2$

Τα χαρακτηριστικά των αγκυρίων μετώπου fiberglass που ελήφθησαν υπόψιν στις προσομοιώσεις, παρατίθενται στον Πίνακα 4.4.

Διατομή	Ορθογωνική
Επιφάνεια (A)	200 mm <sup>2</sup>
Φορτίο θραύσης (P)	200 kN
Μέτρο ελαστικότητας ( $E_{\text{fiber}}$ )	40 GPa
Λόγος Poisson ( $\nu$ )	0.3
Συμπεριφορά	Ελαστοπλαστική

*Πίνακας 4.4 : Ιδιότητες αγκυρίων μετώπου fiberglass.*

Να σημειωθεί ότι οι παραπάνω ιδιότητες, ελήφθησαν από τα εμπορεύσιμα αγκύρια μετώπου fiberglass της εταιρείας ΕΛΕΒΟΡ Α.Ε.Β.Ε., όπως παρουσιάζονται στην Εικόνα 40.

Τύπος Type	Πλάτος Width mm	Πάχος Thickness mm	Φορτίο θραύσης Breaking load kN
FL 30x4	30	4,0	120
FL 30x5	30	5,0	150
FL 30x7	30	7,0	210
FL 35x5	35	5,0	175
FL 35x7	35	7,0	245
FL 40x4	40	4,0	160
FL 40x5	40	5,0	200
FL 40x6	40	6,0	240
FL 40x6,5	40	6,5	260
FL 40x7	40	7,0	280
FL 40x7,5	40	7,5	300
FL 40x8	40	8,0	320
FL 40x9	40	9,0	360
FL 40x10	40	10,0	400
FL 40x12	40	12,0	480
FL 40x15	40	15,0	600

DURGLASS FL® - GLASSPREE®		
Ειδικό βάρος Specific weight	ASTM D 792	1,9 gr/cm <sup>3</sup>
Περιεκτικότητα σε ίνες υάλου Glass fiber content		> 70 %
Εφελκυστική αντοχή Tensile strength	ASTM D 3916	750 - 1.000 MPa
Μέτρο ελαστικότητας Elastic modulus	ASTM D 3916	40 GPa
Επιμήκυνση Elongation	ASTM D 3916	> 3 %
Διατμητική αντοχή Shear strength		> 100 Mpa

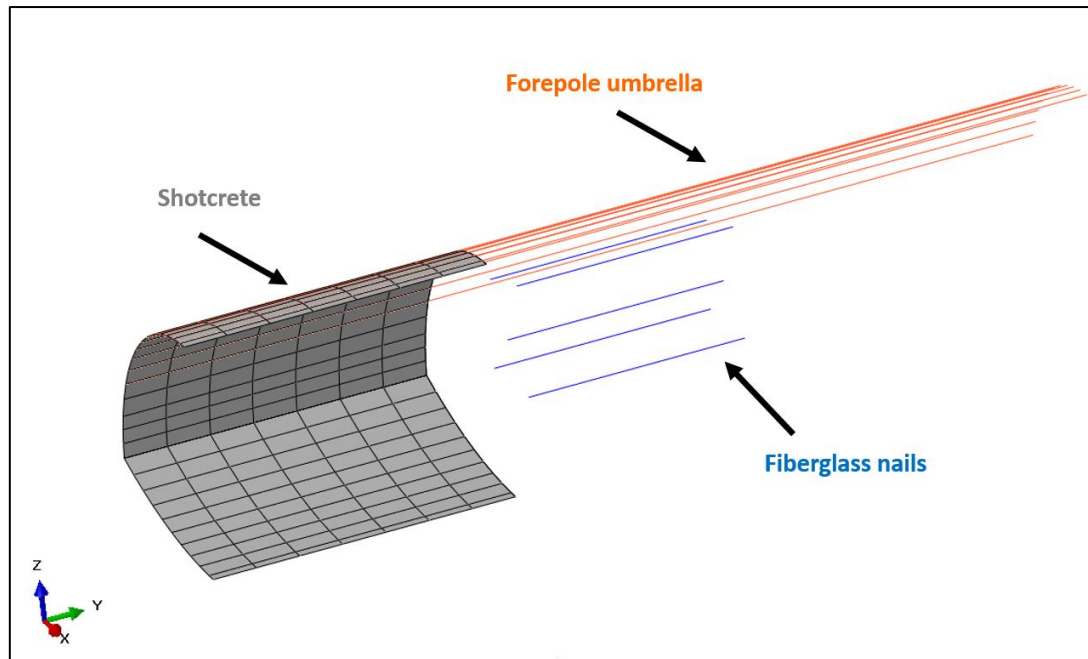
  

Εικόνα 40 : Τεχνικές προδιαγραφές εμπορεύσιμων αγκυρίων μετώπου fiberglass (Πηγή: ΕΛΕΒΟΡ Α.Ε.Β.Ε.).

- **Ομπρέλα δοκών προπορείας (forepole umbrella)**

Για την ενίσχυση της ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής, εφαρμόστηκε ομπρέλα δοκών προπορείας (forepole umbrella) στην στέψη της σήραγγας, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 41.





Εικόνα 41 : Προσομοίωση μέτρων προϋποστήριξης μετώπου εκσκαφής.

Επειδή η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει το βέλτιστο μήκος αλληλοεπικάλυψης (overlap area) των αγκυρίων μετώπου fiberglass, αποφασίστηκε οι δοκοί προπορείας να έχουν μεγάλο μήκος, ώστε να μην επηρεάζουν τα αποτελέσματα της εξώθησης του μετώπου εκσκαφής, λόγω πιθανής αστοχίας τους. Οι δοκοί προπορείας στις αναλύσεις προσομοιώθηκαν οριζόντια και παράλληλα με τον άξονα της σήραγγας, υπό μορφή στοιχείων δοκού (beam elements).

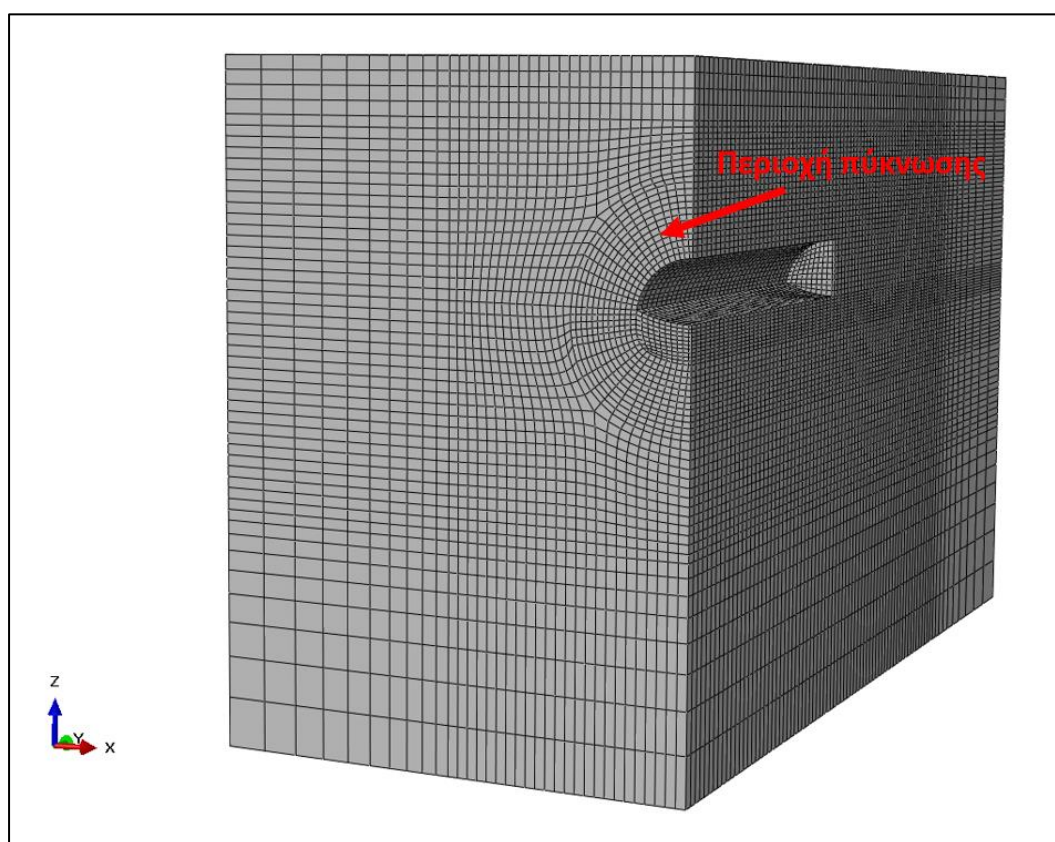
Τα χαρακτηριστικά της ομπρέλας των δοκών προπορείας (forepole umbrella) που ελήφθησαν υπόψιν στις προσομοιώσεις, παρατίθενται στον Πίνακα 4.5.

Διατομή	Φ 114.3/100.3
Αξονική απόσταση (s)	50 cm
Επιφάνεια κάλυψης	60° από τον άξονα της σήραγγας
Δοκοί	11 (ημιδιατομή) / 22 πλήρης διατομή
Μέτρο ελαστικότητας ( $E_{steel}$ )	200 GPa
Λόγος Poisson ( $\nu$ )	0.25
Όριο διαρροής ( $\sigma_y$ )	275 MPa
Συμπεριφορά	Ελαστοπλαστική

Πίνακας 4.5 : Ιδιότητες ομπρέλας δοκών προπορείας (forepole umbrella).

#### 4.5. ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ (MESH)

Σε πρώτο στάδιο, σχεδιάστηκε κάναβος πεπερασμένων στοιχείων, αποτελούμενος από τετραγωνικά οκτακομβικά στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης (plain strain), τα οποία προσομοίωναν το γεωυλικό. Αντίστοιχα, τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης προσομοιώθηκαν όπως περιγράφονται στην προηγούμενη ενότητα. Περιμετρικά της σήραγγας, δημιουργήθηκε πυκνός κάναβος πεπερασμένων στοιχείων σε απόσταση 1.5D, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 42. Στην περιοχή αυτή, η μέση πλευρά των στοιχείων ήταν περί το 0.5m, ενώ σταδιακά αυξανόταν όσο αυξανόταν και η απόσταση από την περίμετρο της εκσκαφής.



Εικόνα 42 : Διακριτοποίηση προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων.

#### 4.6. ΣΤΑΔΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Η αλληλουχία των σταδίων της προσομοίωσης παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.6. Να σημειωθεί ότι το βήμα εκσκαφής ( $n$ ) ορίστηκε ίσο με 1m, ενώ το κέλυφος της προσωρινής υποστήριξης τοποθετούνταν ένα βήμα πίσω ( $n-1$ ). Η προσομοίωση αφορούσε μόνο την Α' φάση εκσκαφής (top heading), διότι στην πράξη κατά την

συμβατική διάνοιξη σήραγγας πραγματοποιείται προϋποστήριξη του μετώπου εκσκαφής μόνο κατά το στάδιο εκσκαφής της άνω ημιδιατομής.

Να σημειωθεί ότι γίνεται αρχικά εκσκαφή των πρώτων 30m της σήραγγας, ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα επιρροής συνόρων (boundary effects).

Στάδιο	Περιγραφή	Μήκος αγκυρίων fiberglass
1	Γεωστατικό στάδιο	40 m
2	Εκσκαφή και υποστήριξη από 0 έως +30 m	10 m
3	Εκσκαφή +31m	9 m
4	Εκσκαφή +32 m / Υποστήριξη +31 m	8 m
5	Εκσκαφή +33 m / Υποστήριξη +32 m	7 m
6	Εκσκαφή +34 m / Υποστήριξη +33 m	6 m
7	Εκσκαφή +35 m / Υποστήριξη +34 m	5 m
8	Εκσκαφή +36 m / Υποστήριξη +35 m	4 m
9	Εκσκαφή +37 m / Υποστήριξη +36 m	3 m
10	Εκσκαφή +38 m / Υποστήριξη +37 m	2 m
11	Εκσκαφή +39 m / Υποστήριξη +38 m	1 m
12	Εκσκαφή +40 m / Υποστήριξη +39 m	0 m

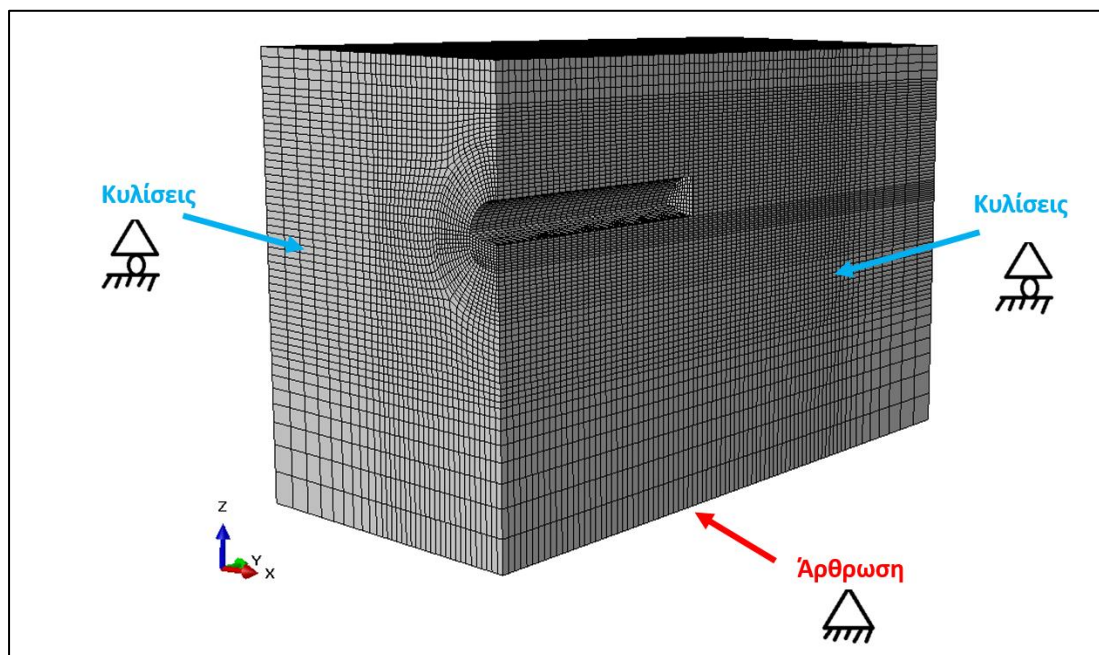
*Πίνακας 4.6 : Στάδια προσομοίωσης.*

#### **4.7. ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ**

Οι συνοριακές συνθήκες, που εφαρμόστηκαν στο αριθμητικό προσομοίωμα, είναι οι ακόλουθες:

- Πλευρικές κυλίσεις κατά τους αντίστοιχους άξονες στις παρίες του προσομοιώματος.
- Άρθρωση στη βάση του προσομοιώματος.

Η σχηματική αναπαράσταση των συνοριακών συνθηκών στο προσομοίωμα παρουσιάζεται στην Εικόνα 43.



Εικόνα 43 : Συνοριακές συνθήκες προσομοιώματος.

#### 4.8. ΔΗΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Σκοπός των αριθμητικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν είναι η εύρεση του βέλτιστου μήκους αγκυρίων μετώπου εκσκαφής (fiberglass nails). Για να διερευνηθεί ποιο είναι αυτό το μήκος, πραγματοποιήθηκαν οι ακόλουθοι έλεγχοι:

- Εξώθησης μετώπου εκσκαφής

Κατά την διάρκεια μείωσης του μήκους αγκυρίων μετώπου fiberglass, καταγράφεται συνεχώς η εξώθηση του μετώπου εκσκαφής  $\Omega_F = \left(\frac{U_h}{D}\right) \times \left(\frac{E}{p_o}\right)$ , όπου:

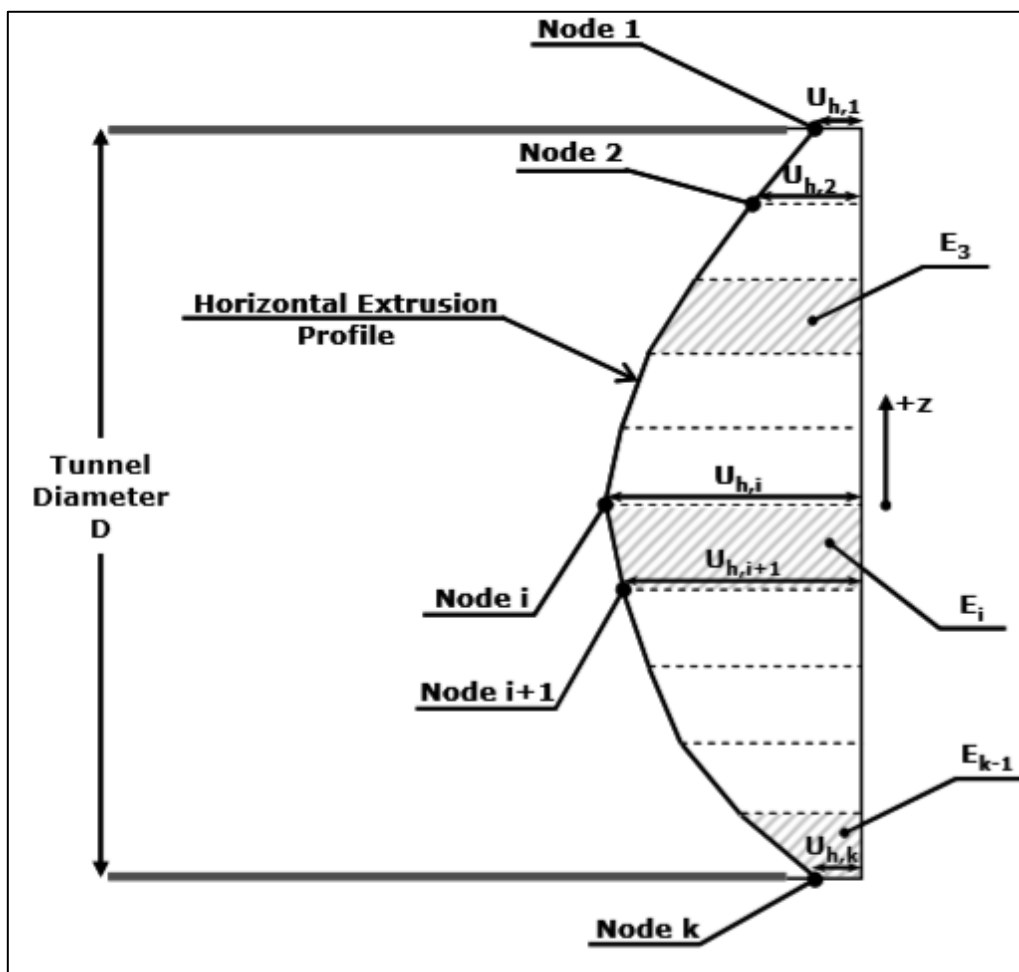
- ✓  $U_h$ : μετρούμενη εξώθηση μετώπου από αριθμητική ανάλυση
- ✓  $D$ : ισοδύναμη διάμετρος σήραγγας
- ✓  $E$ : μέτρο ελαστικότητας γεωυλικού

- ✓  $p_0$ : γεωστατικό πεδίο στον άξονα της σήραγγας

Οι μετρούμενες εξωθήσεις του μετώπου εκσκαφής από τις αριθμητικές αναλύσεις υπολογίστηκαν με δύο (2) μεθόδους:

**α. Κατακόρυφη ανάπτυξη μέγιστων εξωθήσεων**

Πραγματοποιείται καταγραφή της εξώθησης κατά τον κατακόρυφο άξονα του μετώπου εκσκαφής, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 44.



Εικόνα 44 : Μέθοδος υπολογισμού εξώθησης μετώπου εκσκαφής κατά τον κατακόρυφο άξονα.

Η μετρούμενη εξώθηση προκύπτει από την ακόλουθη σχέση:

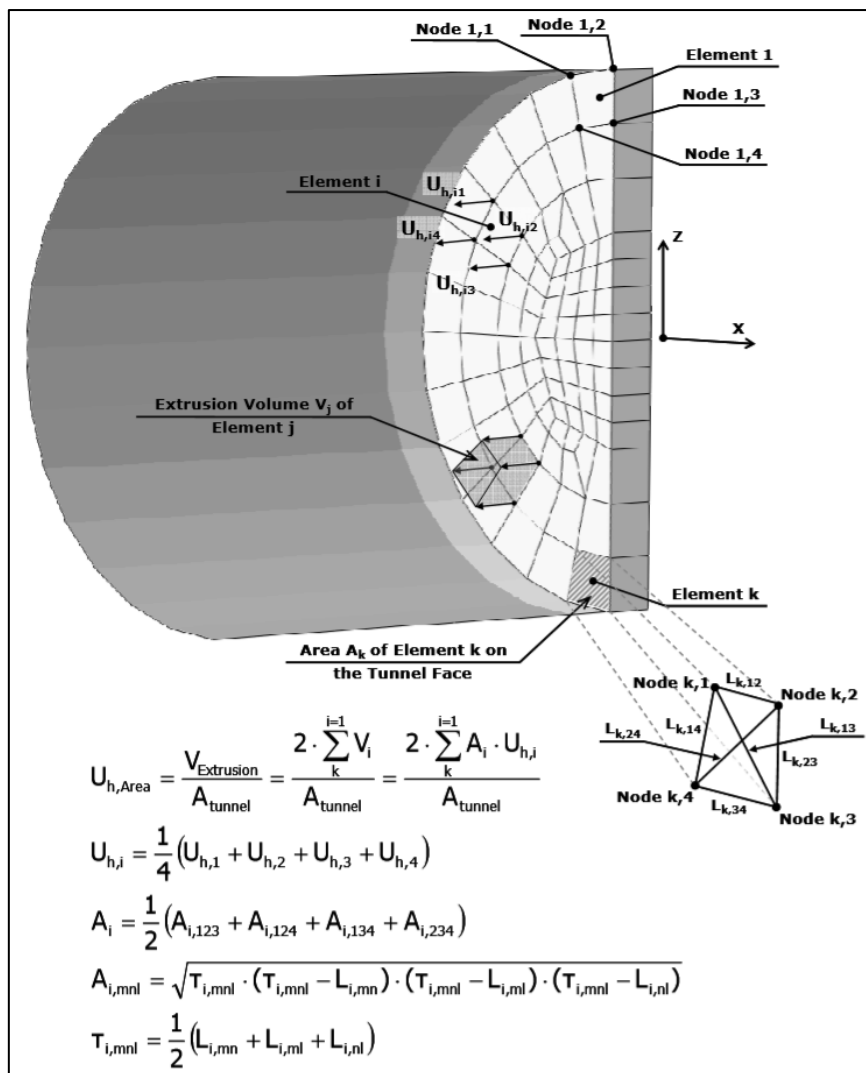
$$U_{h,Diameter} = \frac{E_{extrusion}}{D}$$

$$\text{όπου: } E_{extrusion} = \sum_{k-1}^{i=1} E_i = \sum_{k-1}^{i=1} \frac{(U_{h,i} + U_{h,i+1}) \times (z_i - z_{i+1})}{2}$$

### β. Μέση εξώθηση μετώπου εκσκαφής

Πραγματοποιείται καταγραφή της μέσης εξώθησης του μετώπου εκσκαφής, μετρώντας την εξώθηση σε κάθε κόμβο (node) των πεπερασμένων στοιχείων του μετώπου εκσκαφής (elements) και διαιρείται προς την αντίστοιχη επιφάνεια που αυτά καταλαμβάνουν. Ο αναλυτικός τρόπος του υπολογισμού της μέσης εξώθησης μετώπου εκσκαφής, παρουσιάζεται στην Εικόνα 45.

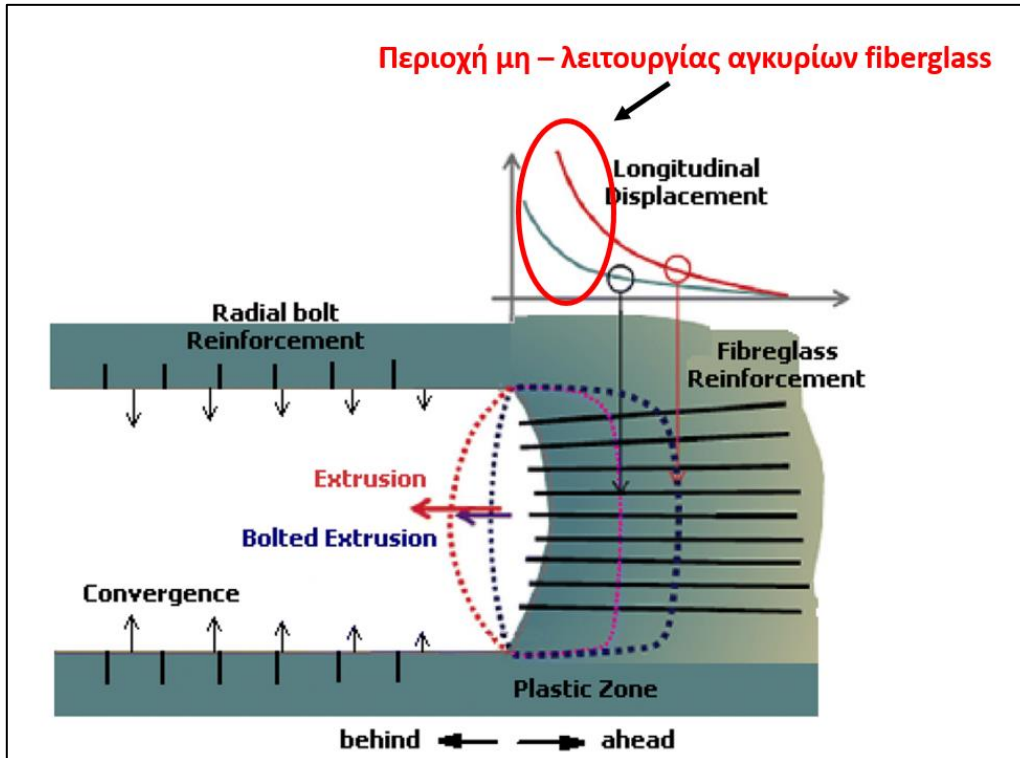
*Προτιμάται αυτή η μέθοδος για τον υπολογισμό της εξώθησης μετώπου εκσκαφής, όταν αυτό προϋποστηρίζεται με αγκύρια μετώπου fiberglass, διότι καταγράφεται η συνεισφορά στο σύνολο του μετώπου και όχι τοπικά.*



Εικόνα 45 : Μέθοδος υπολογισμού μέσης εξώθησης μετώπου εκσκαφής.

Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται η εύρεση του βέλτιστου μήκους αγκυρίων μετώπου (fiberglass), όταν καταγράφεται ταχεία αύξηση της εξώθησης του μετώπου. Πρακτικά,

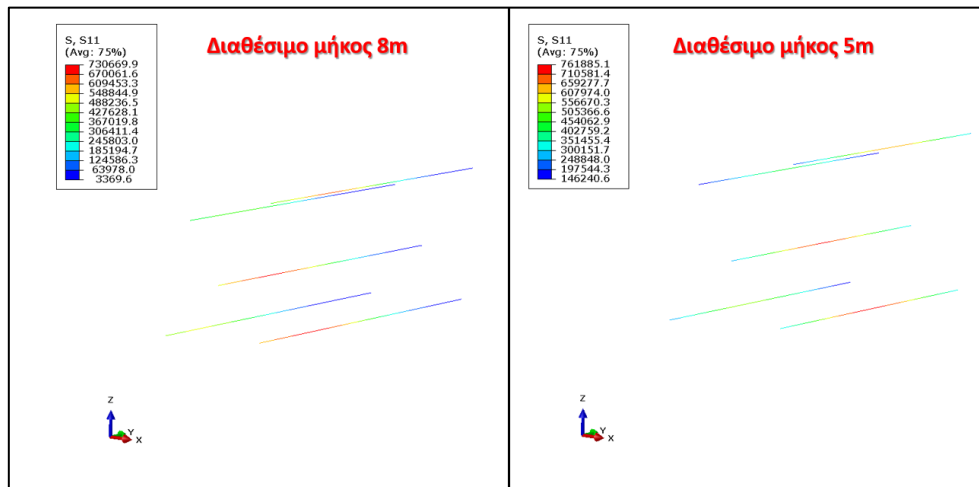
στο σημείο αυτό παύει η συνεισφορά των αγκυρίων στην βελτίωση της ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής.



Εικόνα 46 : Περιοχή μη - λειτουργίας αγκυρίων μετώπου fiberglass.

- **Κύρια τάση αγκυρίων μετώπου (fiberglass)**

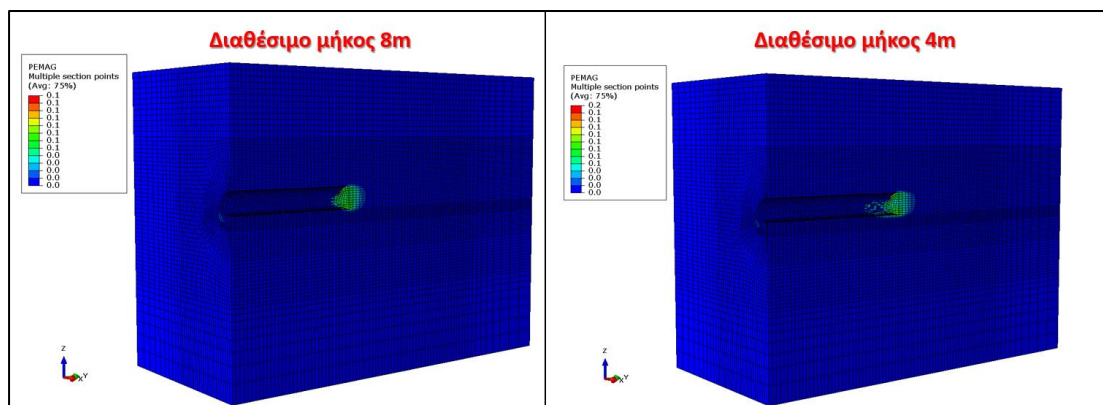
Σε κάθε στάδιο της αριθμητικής ανάλυσης, καταγράφεται η κύρια τάση (εφελκυστική) που αναπτύσσεται στα αγκύρια μετώπου fiberglass. Πρώτον, ελέγχεται εάν η τάση αυτή είναι μικρότερη από το όριο διαρροής τους, ώστε να μην συμβεί αστοχία του υλικού. Στη συνέχεια, για να ευρεθεί το βέλτιστο μήκος λειτουργίας, εντοπίζεται το σημείο όπου τα αγκύρια θα αναπτύξουν την μέγιστη τάση, η οποία στη συνέχεια θα μειωθεί. Πρακτικά, το σημείο αυτό είναι το βέλτιστο μήκος, διότι μετά γίνεται μείωση της τάσης λόγω της αστοχίας του μετώπου εκσκαφής και της πάυσης λειτουργίας τους. Στην Εικόνα 47, παρουσιάζεται η αύξηση της τάσης των αγκυρίων μετώπου (fiberglass), με την μείωση του διαθέσιμου μήκους πάκτωσής τους.



Εικόνα 47 : Μεταβολή αναπτυσσόμενης τάσης αγκυρίων μετώπου fiberglass, συναρτήσει του διαθέσιμου μήκους πάκτωσης.

- **Εύρος πλαστικής ζώνης εμπροσθεν του μετώπου (plastic zone)**

Σε κάθε στάδιο της αριθμητικής ανάλυσης, καταγράφεται το ποσοστό της πλαστικής ζώνης μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής. Στο σημείο στο οποίο θα έχει αναπτυχθεί πλαστική ζώνη σε μήκος ίσο και μεγαλύτερο από το διαθέσιμο μήκος πάκτωσης των αγκυρίων μετώπου fiberglass, παύει η λειτουργικότητα των αγκυρίων, καθώς πακτώνονται εντός πλαστικής περιοχής και δεν μπορεί να αναπτυχθεί η απαιτούμενη συνάφεια μεταξύ αγκυρίων και περιβάλλοντος εδάφους, ώστε να περιορίσουν τις εξωθήσεις. Στην Εικόνα 48, παρουσιάζεται η αύξηση του εύρους της πλαστικής ζώνης εμπροσθεν του μετώπου εκσκαφής, με την μείωση του διαθέσιμου μήκους αγκυρίων μετώπου fiberglass.



Εικόνα 48 : Μεταβολή της πλαστικής ζώνης εμπρός από το μέτωπο εκσκαφής, συναρτήσει του διαθέσιμου μήκους αγκυρίων fiberglass.



**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ  
ΤΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΟΥ ΑΝΥΠΟΣΤΗΡΙΚΤΟΥ  
ΜΕΤΩΠΟΥ ΕΚΣΚΑΦΗΣ**



### **5.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

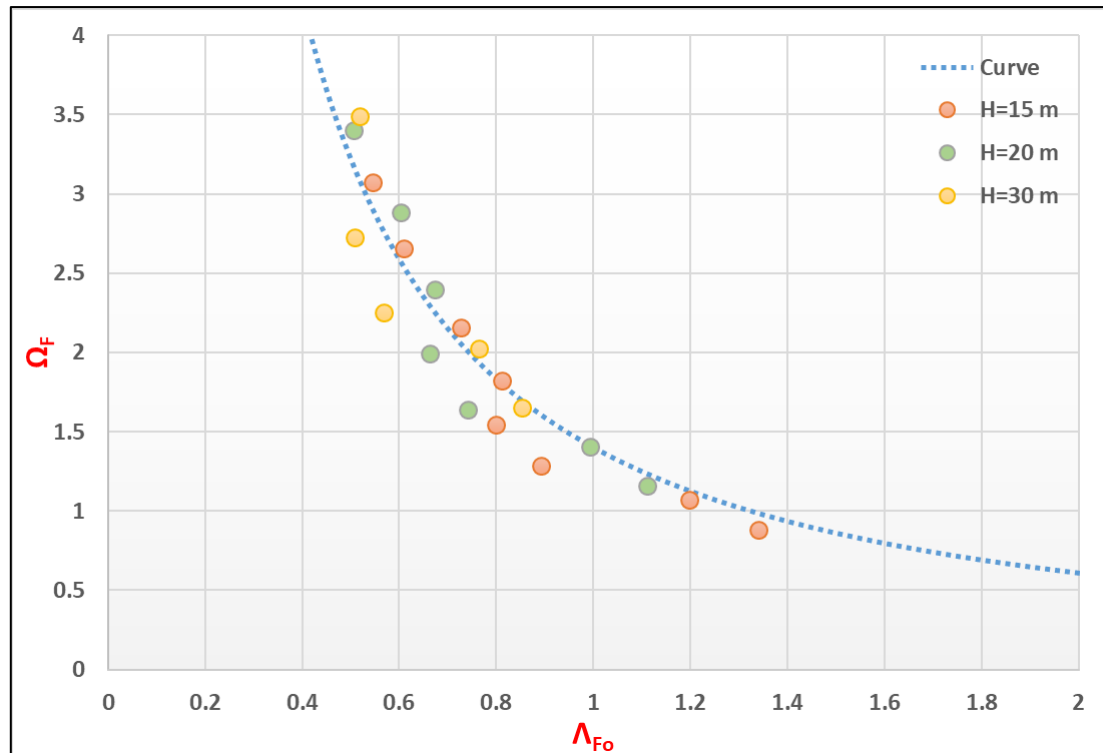
Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, γίνεται διερεύνηση της ευστάθειας του ανυποστήρικτου μετώπου εκσκαφής σε ρηχές σήραγγες (μέγιστα υπερκείμενα από άξονα σήραγγας 30m). Συγκεκριμένα, εκσκάπτεται μόνο η άνω ημιδιατομή (top heading & invert) της σήραγγας, όπως και στην πραγματικότητα, όπου σε ασθενή εδάφη, όπως αυτά που προσομοιώθηκαν στην συγκεκριμένη εργασία, γίνεται προσπάθεια περιορισμού του ενεργού μετώπου εκσκαφής, ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα κατάρρευσης μετώπου και εκδήλωσης μεγάλων επιφανειακών καθιζήσεων (τύπου καμινάδας).

Στις ενότητες που ακολουθούν, θα γίνει παρουσίαση των αποτελεσμάτων της εξώθησης του μετώπου εκσκαφής, των επιφανειακών καθιζήσεων λόγω της διάνοιξης της σήραγγας, της αναπτυσσόμενης πλαστικής ζώνης μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής, καθώς και της απώλειας εδαφικού όγκου ( $V_L$ ).

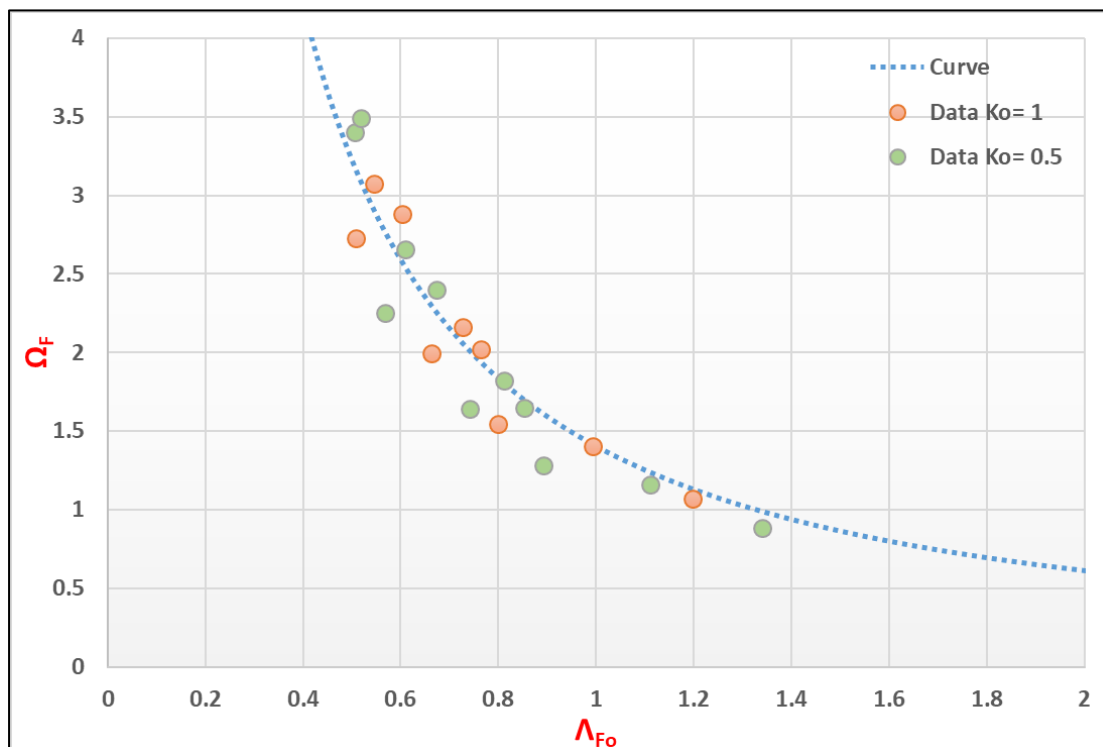
Η συσχέτιση των αποτελεσμάτων με τις εδαφικές παραμέτρους και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της εκσκαφής πραγματοποιείται μέσω του συντελεστή ασφαλείας μετώπου  $\Lambda_{F0}$  κατά Georgiou et al. (2020) (βλ. Ενότητα 3.6) και του συντελεστή υπερφόρτισης  $N_s$ .

### **5.2 ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΗ ΕΞΩΘΗΣΗ ΜΕΤΩΠΟΥ ΕΚΣΚΑΦΗΣ**

Στη συνέχεια, γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων για την εξώθηση του μετώπου εκσκαφής ( $\Omega_F$ ) με τον συντελεστή ασφαλείας  $\Lambda_{F0}$ , συναρτήσει των υπερκείμενων γαιών ( $H$ ) και του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων ( $K_0$ ), όπως παρουσιάζεται στα Διαγράμματα 3 και 4.



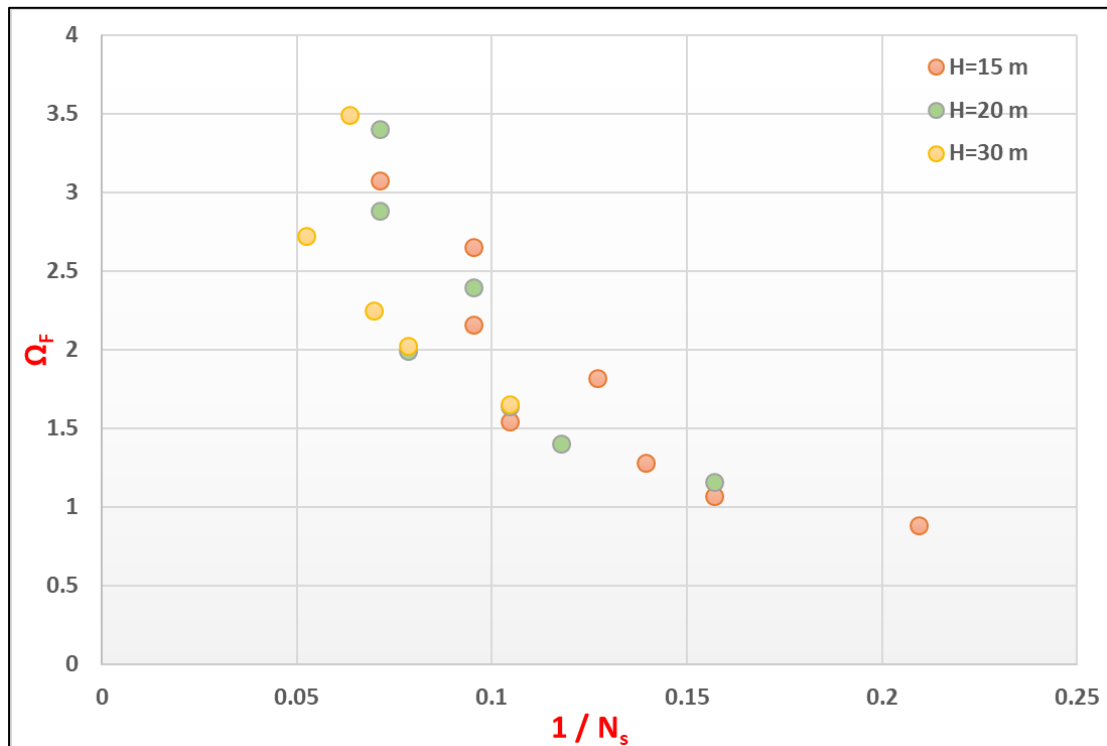
Διάγραμμα 3 : Αποτόπωση εξωθήσεων μετώπου εκσκαφής βάσει συντελεστή ευστάθειας  $\Lambda_{Fo}$  για διαφορετικά υπερκείμενα.



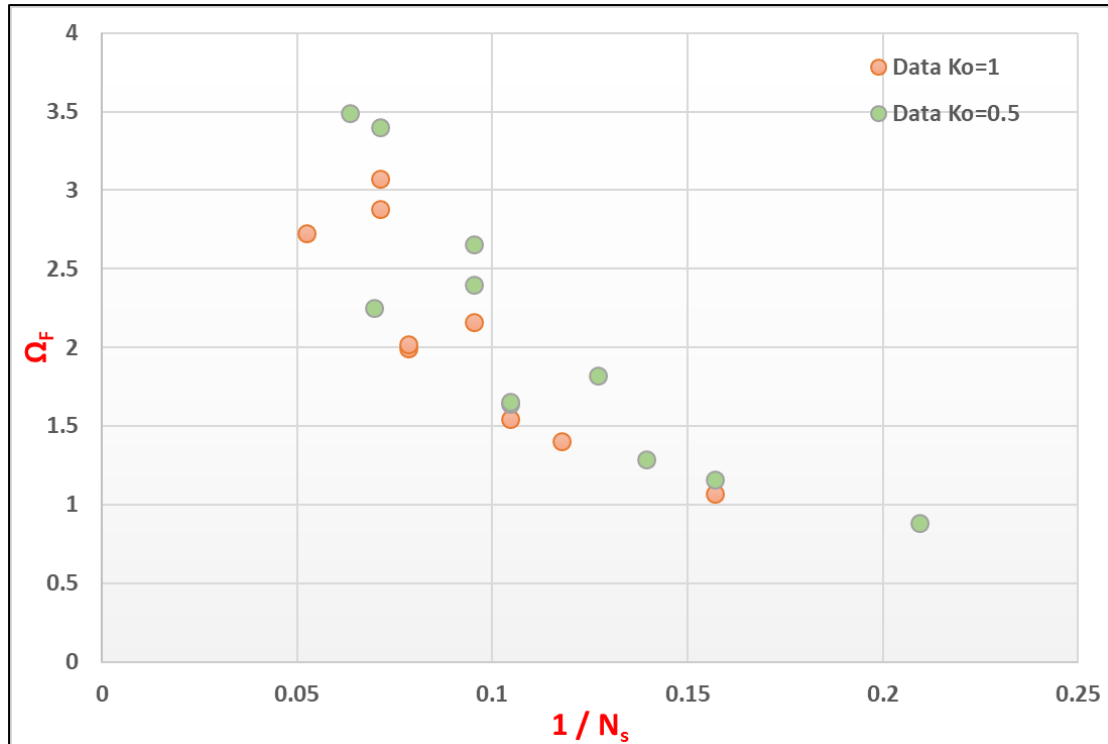
Διάγραμμα 4 : Αποτόπωση εξωθήσεων μετώπου εκσκαφής βάσει συντελεστή ευστάθειας  $\Lambda_{Fo}$  για διαφορετική τιμή του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων  $K_o$ .

Από τα παραπάνω δεδομένα, παρατηρούμε ότι υπάρχει πολύ μεγάλη ταύτιση των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων με τον συντελεστή ασφαλείας ευστάθειας μετώπου (Georgiou et al. (2020)), καθώς τα αποτελέσματα συμπίπτουν με την θεωρητική καμπύλη που προτείνεται.

Στη συνέχεια, γίνεται αποτύπωση των αριθμητικών αποτελεσμάτων της εξώθησης του μετώπου εκσκαφής  $\Omega_F$  με τον λόγο  $(1/N_s)$ , όπου  $N_s$  ο συντελεστής υπερφόρτισης. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στα Διαγράμματα 5 και 6, όπου εξετάζονται οι παράμετροι των υπερκείμενων γαιών ( $H$ ) και του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων ( $K_o$ ).



Διάγραμμα 5 : Αποτύπωση εξωθήσεων μετώπου εκσκαφής βάσει συντελεστή υπερφόρτισης  $N_s$  για διαφορετικά υπερκείμενα.

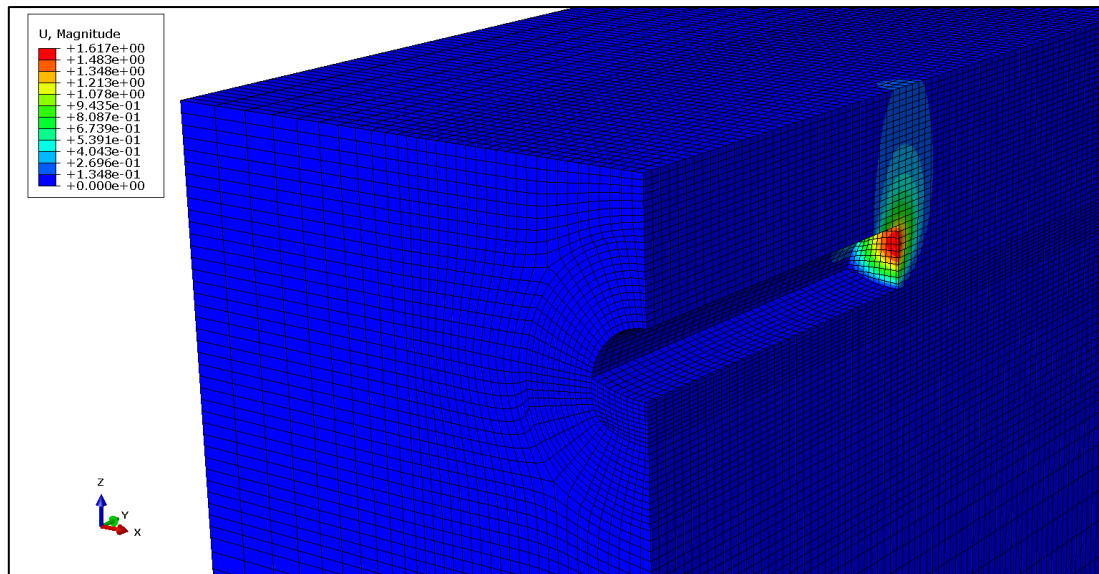


*Διάγραμμα 6 : Αποτύπωση εξωθήσεων μετώπου εκσκαφής βάσει συντελεστή υπερφόρτισης  $N_s$  για διαφορετική τιμή του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων  $K_o$ .*

Από τα διαγράμματα με τον λόγο ( $1/N_s$ ), παρατηρείται ότι δεν υπάρχει τόσο καλή ταύτιση των αποτελεσμάτων σε σχέση με την εξώθηση, όπως γίνεται με τον συντελεστή  $\Lambda_{F_0}$ , διότι ο δεύτερος λαμβάνει υπόψιν και τα γεωμετρικά δεδομένα της εκσκαφής (λόγο  $H/D$ ). Επίσης, παρατηρείται ότι για συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων  $K_o = 0.5$ , η εξώθηση του μετώπου είναι ελάχιστα μεγαλύτερη για τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά, από ό,τι όταν ο συντελεστής παίρνει την τιμή  $K_o=1$ .

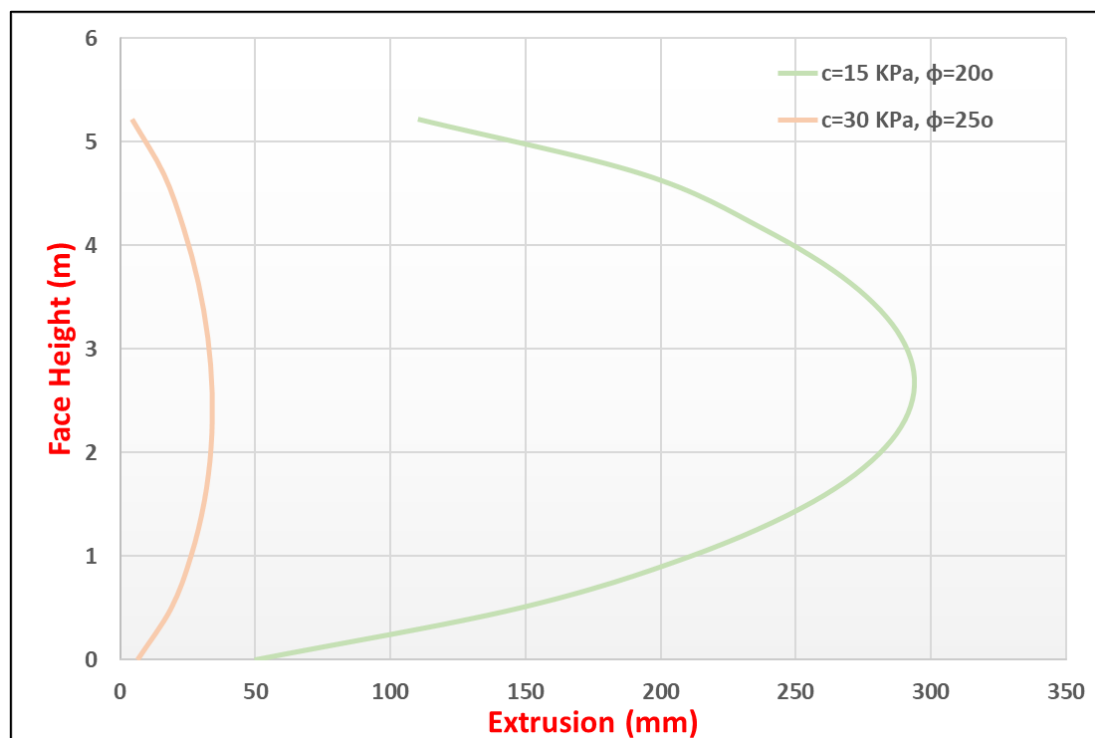
Επίσης, είναι αναμενόμενο ότι, καθώς αυξάνεται το ύψος των υπερκείμενων γαιών ( $H$ ) και διατηρώντας σταθερά τα μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους ( $c, \phi$ ), αυξάνει η τιμή του εντατικού πεδίου και συνεπώς, προκαλείται μεγαλύτερη εξώθηση του μετώπου εκσκαφής.

Από το σύνολο των αριθμητικών αναλύσεων, παρατηρήθηκε ότι σε πολύ ρηχές σήραγγες ( $H=15m$ ) σε ασθενές γεωυλικό για ανυποστήρικτο μέτωπο εκσκαφής, εμφανίζεται φαινόμενο καμινάδας (Εικόνα 49) σε αντίθεση με συνεκτικό έδαφος που δεν παρατηρείται τέτοιο φαινόμενο.



*Εικόνα 49 : Εκδήλωση φαινομένου καμινάδας σε ρηχή σήραγγα σε ασθενές γεωλικό.*

Επίσης, γίνεται αντιληπτό ότι, καθώς βελτιώνονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά του γεωλικού, η εξώθηση του μετώπου εκσκαφής μειώνεται σημαντικά. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το ασθενές έδαφος S1 σε σχέση με το συνεκτικό έδαφος S4, για υπερκείμενα  $H=20\text{m}$  και συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων  $K_0=1$ , όπου οι εξωθήσεις είναι αισθητά μεγαλύτερες, όπως παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 7.

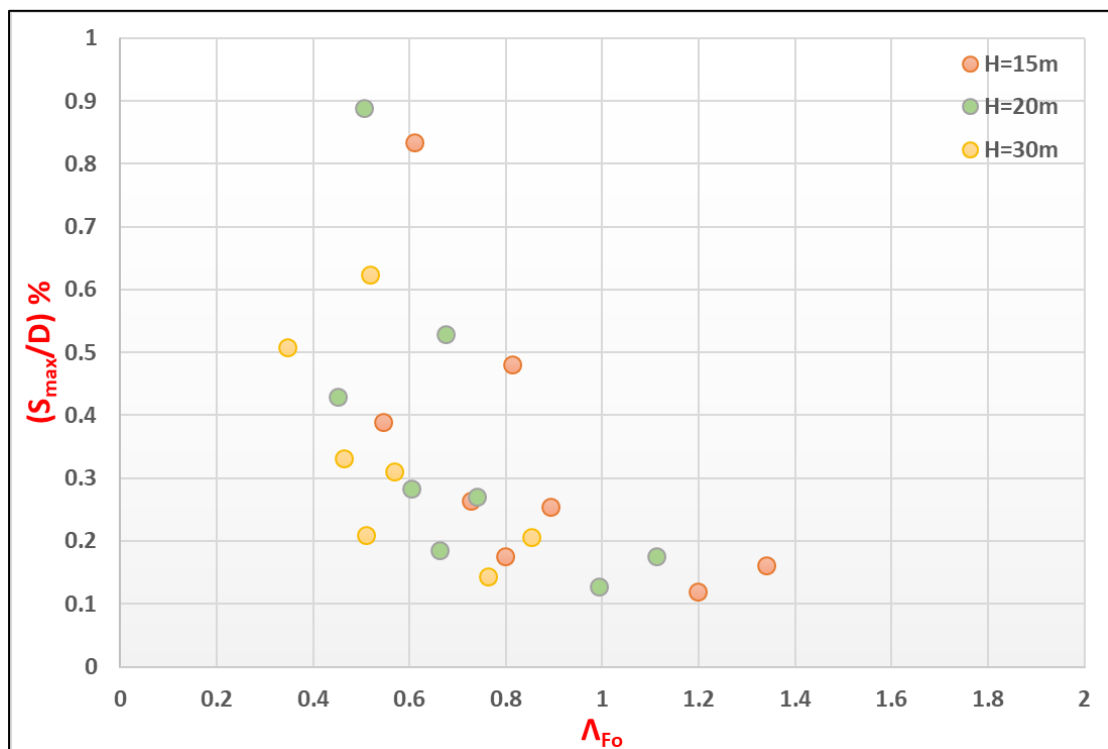


*Διάγραμμα 7 : Συσχέτιση της εξώθησης μετώπου εκσκαφής σε ασθενές και συνεκτικό έδαφος.*

### 5.3 ΕΚΔΗΛΩΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΑΘΙΖΗΣΕΩΝ

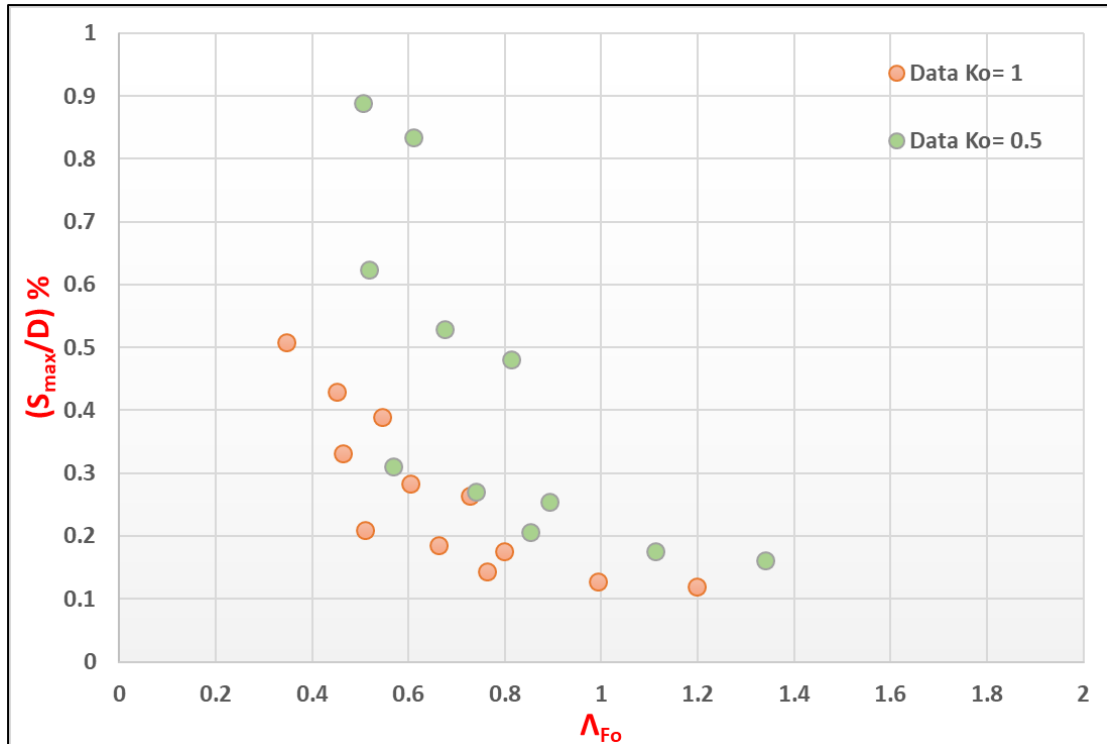
Σε ρηχές αστικές σήραγγες, η προκαλούμενη εξώθηση του μετώπου εκσκαφής, αναμένεται να οδηγήσει σε εκδήλωση επιφανειακών καθιζήσεων. Όταν αυτές αυξηθούν σημαντικά, τότε προκαλούν σοβαρές βλάβες στις υπερκείμενες κατασκευές.

Στη συνέχεια, αποτυπώνονται οι μέγιστες επιφανειακές καθιζήσεις  $S_{max}$  προς την διάμετρο της σήραγγας, σε σχέση με τον συντελεστή ασφαλείας  $\Lambda_{Fo}$ , συναρτήσει των υπερκείμενων γαιών (H) και του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων ( $K_o$ ), όπως παρουσιάζονται στα Διαγράμματα 8 και 9.



Διάγραμμα 8 : Αποτύπωση λόγου ( $S_{max}/D$ ) βάσει συντελεστή ευστάθειας  $\Lambda_{Fo}$  για διαφορετικά υπερκείμενα.

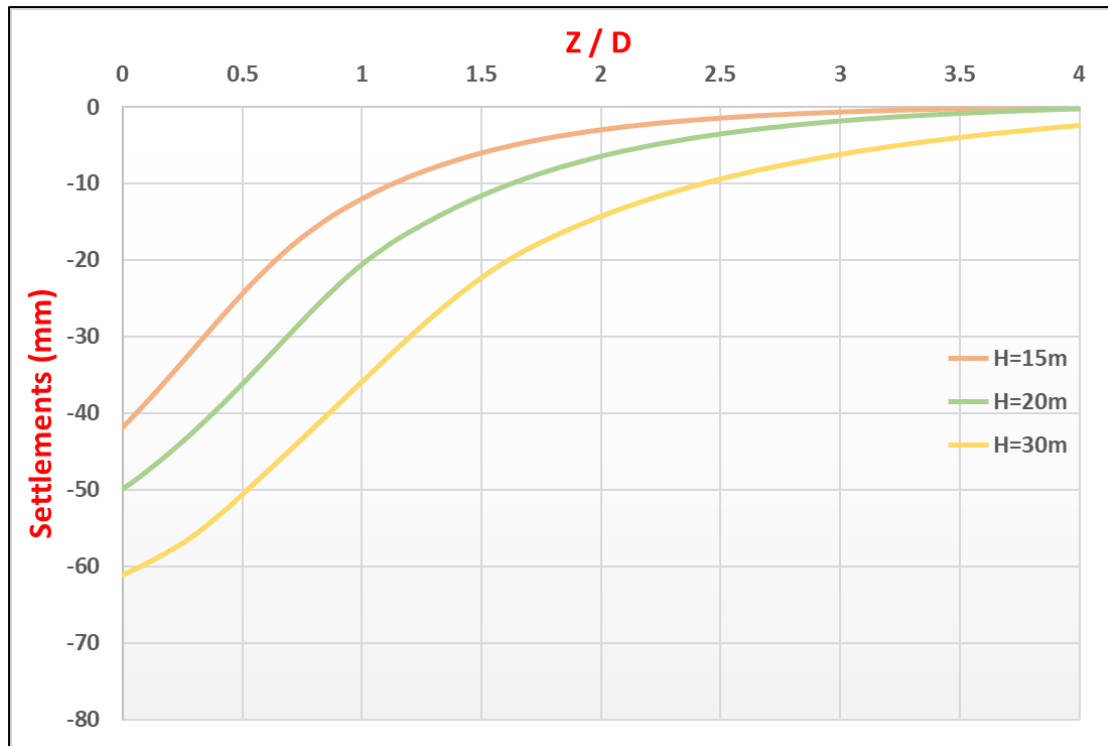




*Διάγραμμα 9 : Αποτύπωση λόγου ( $S_{max}/D$ ) βάσει συντελεστή ευστάθειας  $\Lambda_{Fo}$  για διαφορετική τιμή του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων  $K_o$ .*

Από τα παραπάνω Διαγράμματα, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι για τιμές του  $\Lambda_{Fo} < 1$ , δηλαδή συνθήκες για αστοχία μετώπου εκσκαφής, οι επιφανειακές καθιζήσεις αυξάνονται εκθετικά λόγω των μεγάλων εξωθήσεων που θα προκληθούν εντός τη σήραγγας. Επίσης για τις ίδιες γεωμετρικές και μηχανικές παραμέτρους του εδάφους ( $c, \phi$ ) οι προκαλούμενες καθιζήσεις είναι σαφώς μεγαλύτερες, όταν ο συντελεστής ουδετέρων ωθήσεων  $K_o$  γίνει μικρότερος από 1.

Στη συνέχεια, παρατίθεται η καμπύλη εδαφικών καθιζήσεων (Διάγραμμα 10) κατά μήκος του άξονα της σήραγγας για ένα σχετικά ασθενές έδαφος (S1) συναρτήσει του ύψους των υπερκείμενων γαιών για συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων  $K_o=0.5$ .



Διάγραμμα 10 : Διαμήκες προφίλ εδαφικών καθιζήσεων για ένα ασθενές έδαφος συναρτήσει των υπερκείμενων γαιών.

Όπως είναι αναμενόμενο, όσο αυξάνεται το γεωστατικό πεδίο (λόγω αύξησης υπερκείμενων γαιών), η εξώθηση του μετώπου εκσκαφής θα μεγαλώσει, άρα θα προκληθούν μεγαλύτερες επιφανειακές καθιζήσεις.

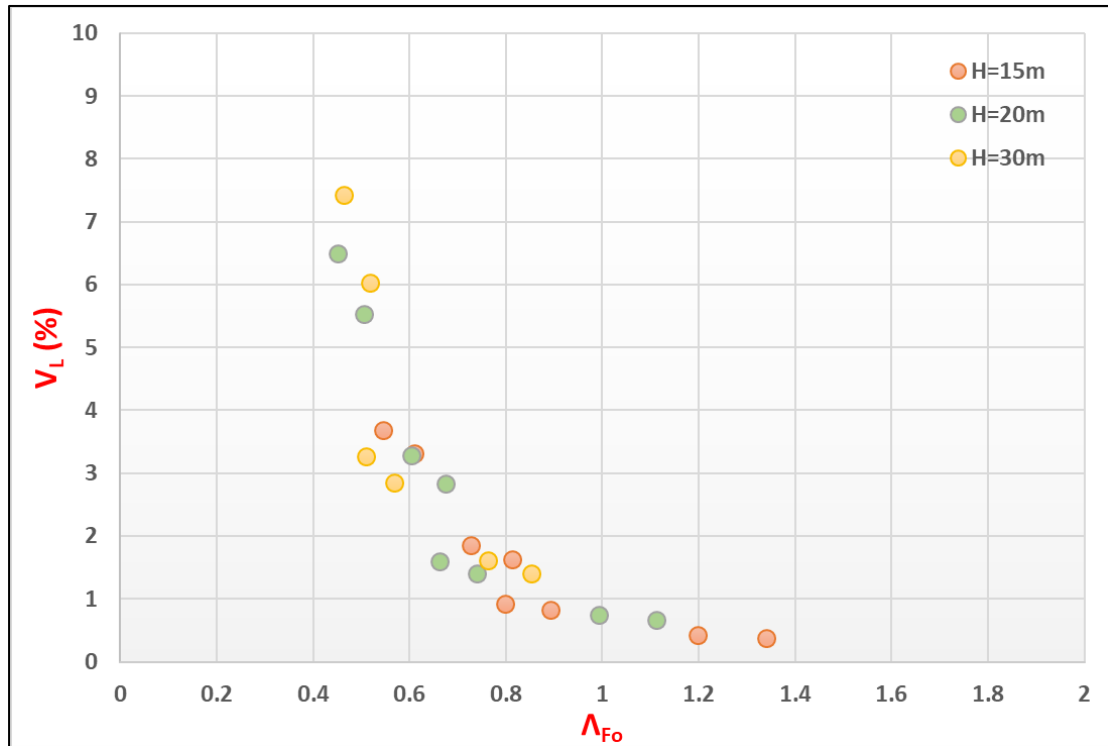
Από το σύνολο των αριθμητικών αναλύσεων, προκύπτει ότι οι συγκλίσεις ισορροπούν σε απόσταση μιας διαμέτρου (1D) πίσω από το μέτωπο εκσκαφής.

Στο μέτωπο, κατά την εκσκαφή του χάνεται όγκος  $V_1 = A \times U_h = \frac{1}{4} \times \pi \times D^2 \times U_h$ , όπου D η διάμετρος της σήραγγας και  $U_h$  η εξώθηση του μετώπου εκσκαφής. Επειδή οι συγκλίσεις ισορροπούν μια διάμετρο (1D) πίσω από το μέτωπο, ο όγκος που χάνεται είναι  $V_2 = \left(\frac{1}{2} \times \Delta R \times 1D\right) \times \pi \times D = \frac{1}{2} \times \pi \times D^2 \Delta R$ . Εξισώνοντας τον όγκο  $V_1$  με  $V_2$ , προκύπτει  $\Delta R = \frac{U_h}{2}$

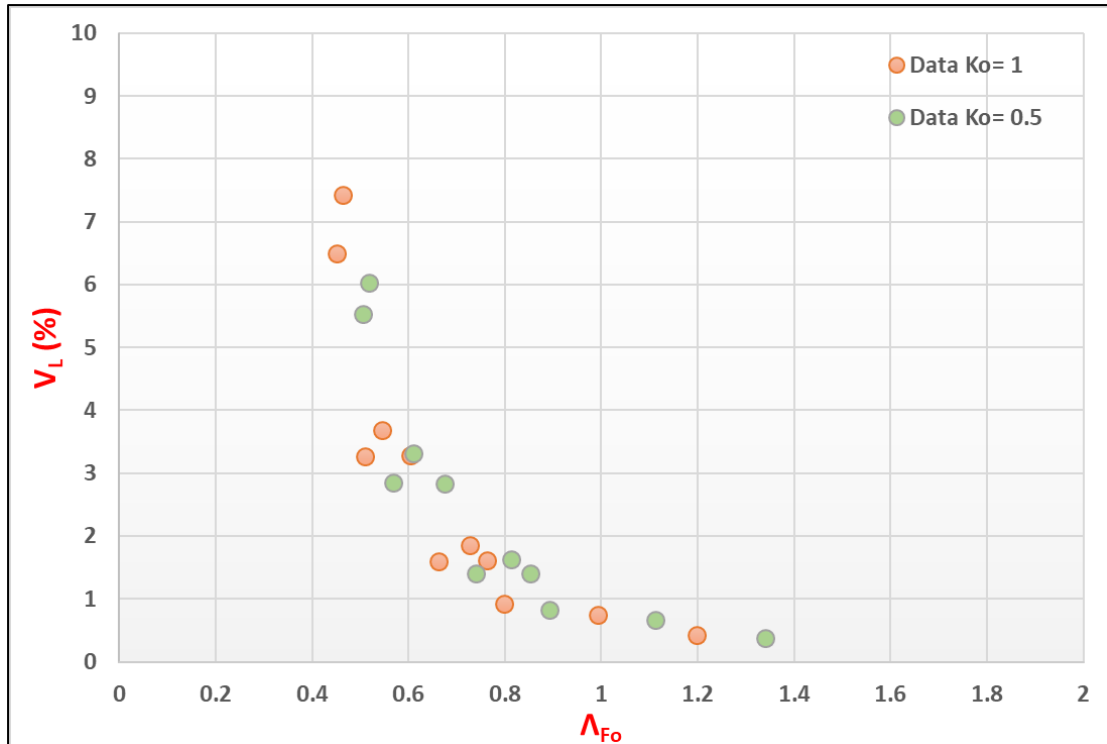
Η απώλεια όγκου  $V_L$ , ορίζεται ως:  $V_L = \frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta R \times \pi \times D}{\pi \times D^2 / 4} = 4 \times \frac{\Delta R}{D}$

Για  $\Delta R = \frac{U_h}{2}$ , προκύπτει  $V_L = \frac{2 \times U_h}{D}$ .

Στη συνέχεια, αποτυπώνονται η απώλεια εδαφικού όγκου ( $V_L$ ), σε σχέση με τον συντελεστή ασφαλείας  $\Lambda_{F_0}$ , συναρτήσει των υπερκείμενων γαιών ( $H$ ) και του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων ( $K_0$ ), όπως παρουσιάζεται στα Διαγράμματα 11 και 12.



*Διάγραμμα 11 : Αποτύπωση απώλειας εδαφικού όγκου ( $V_L$ ) βάσει συντελεστή ευστάθειας  $\Lambda_{F_0}$  για διαφορετικά υπερκείμενα.*



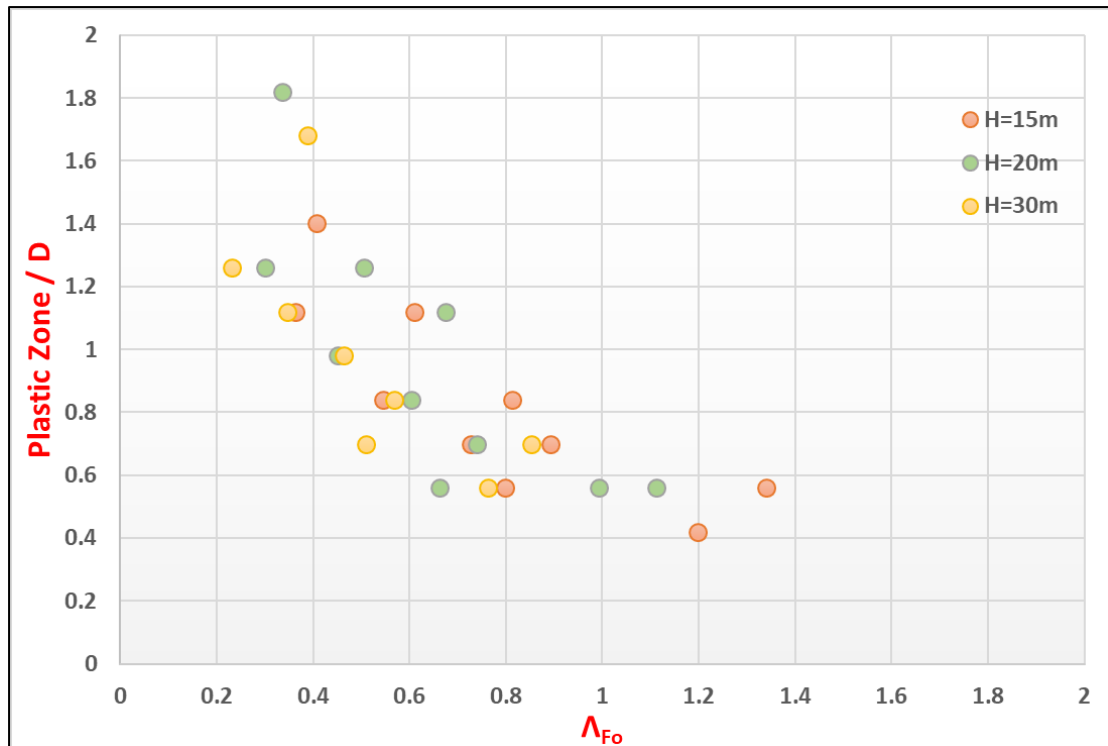
*Διάγραμμα 12 : Αποτύπωση απώλειας εδαφικού όγκου ( $V_L$ ) βάσει συντελεστή ευστάθειας  $\Lambda_{Fo}$  για διαφορετική τιμή του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων  $K_o$ .*

Από τα παραπάνω Διαγράμματα, προκύπτει ότι για τιμές  $\Lambda_{Fo} < 1$ , δηλαδή συνθήκες αστοχίας μετώπου εκσκαφής, η απώλεια εδαφικού όγκου  $V_L$  αυξάνεται διότι είναι παράγωγο μέγεθος της εξώθησης του μετώπου εκσκαφής  $\Omega_F$ , η οποία όπως είναι αναμενόμενο αυξάνει.

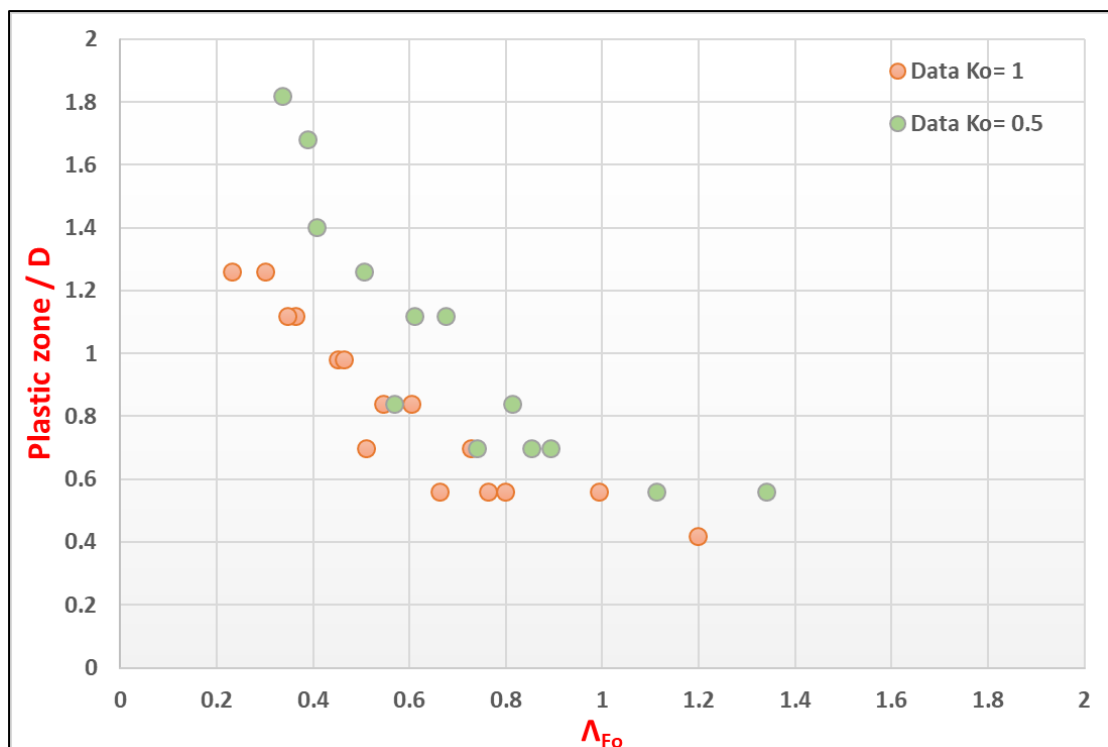
#### **5.4 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΖΩΝΗΣ ΕΜΠΡΟΣΘΕΝ ΤΟΥ ΜΕΤΩΠΟΥ ΕΚΣΚΑΦΗΣ**

Βασικό μέγεθος, το οποίο εξετάζει η παρούσα εργασία, προκειμένου να μπορέσει να προεκτιμηθεί το βέλτιστο μήκος αγκύρωσης του μετώπου εκσκαφής με αγκύρια fiberglass, είναι το εύρος της πλαστικής ζώνης μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής, ώστε τα αγκύρια να πακτώνονται μέσα στο υγιές πέτρωμα.

Στην παρούσα ενότητα, αποτυπώνονται το εύρος της πλαστικής ζώνης προς την διάμετρο της σήραγγας, σε σχέση με τον συντελεστή ασφαλείας  $\Lambda_{Fo}$ , συναρτήσεων των υπερκείμενων γαιών ( $H$ ) και του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων ( $K_o$ ), όπως παρουσιάζεται στα Διαγράμματα 13 και 14.

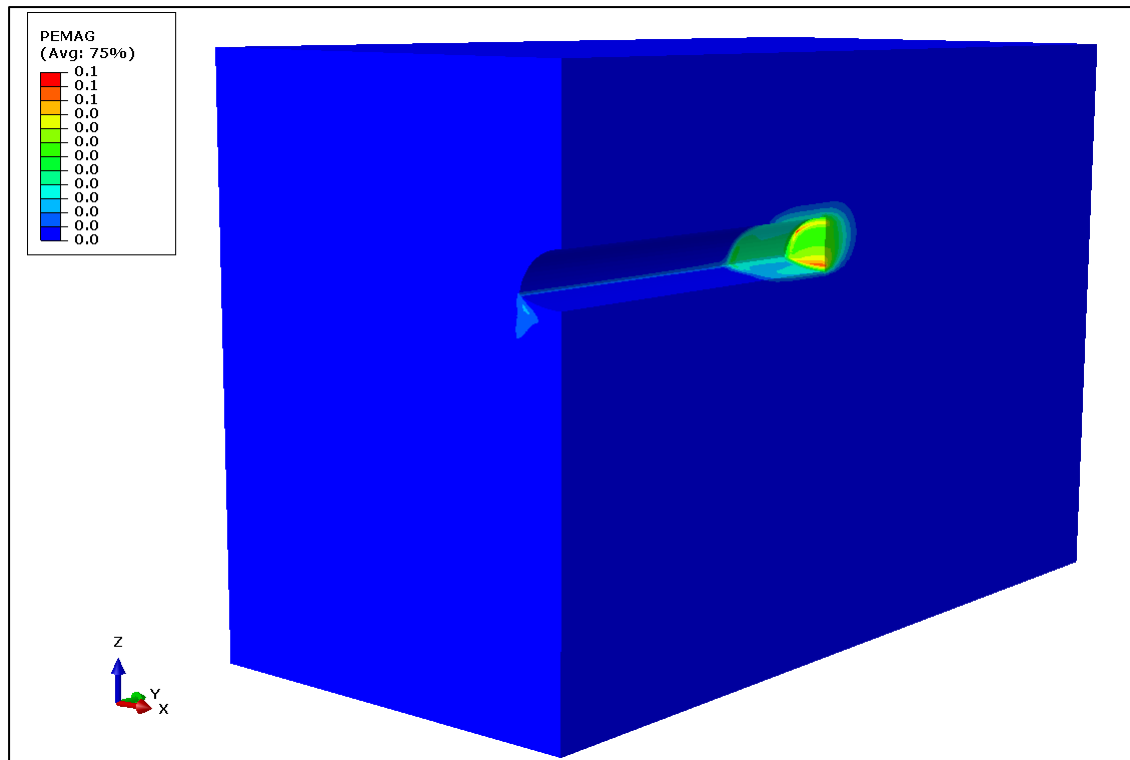


Διάγραμμα 13 : Αποτύπωση λόγου (Plastic Zone/D) βάσει συντελεστή ευστάθειας  $\Lambda_{Fo}$  για διαφορετικά υπερκείμενα.



Διάγραμμα 14 : Αποτύπωση λόγου (Plastic Zone/D) βάσει συντελεστή ευστάθειας  $\Lambda_{Fo}$  για διαφορετική τιμή του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων  $K_o$ .





Εικόνα 51 : Μορφή πλαστικής ζώνης για συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων  $K_0=0.5$ .

Από τις παραπάνω Εικόνες, παρατηρούμε ότι η μορφή της πλαστικής ζώνης μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής δεν έχει μεγάλη διαφοροποίηση, καθώς μεταβάλλεται ο συντελεστής ουδετέρων ωθήσεων  $K_0$ .





**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ  
ΤΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΜΕΤΩΠΟΥ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΜΕ  
ΠΡΟΫΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΑΠΟ ΑΓΚΥΡΙΑ FIBERGLASS**



## **6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

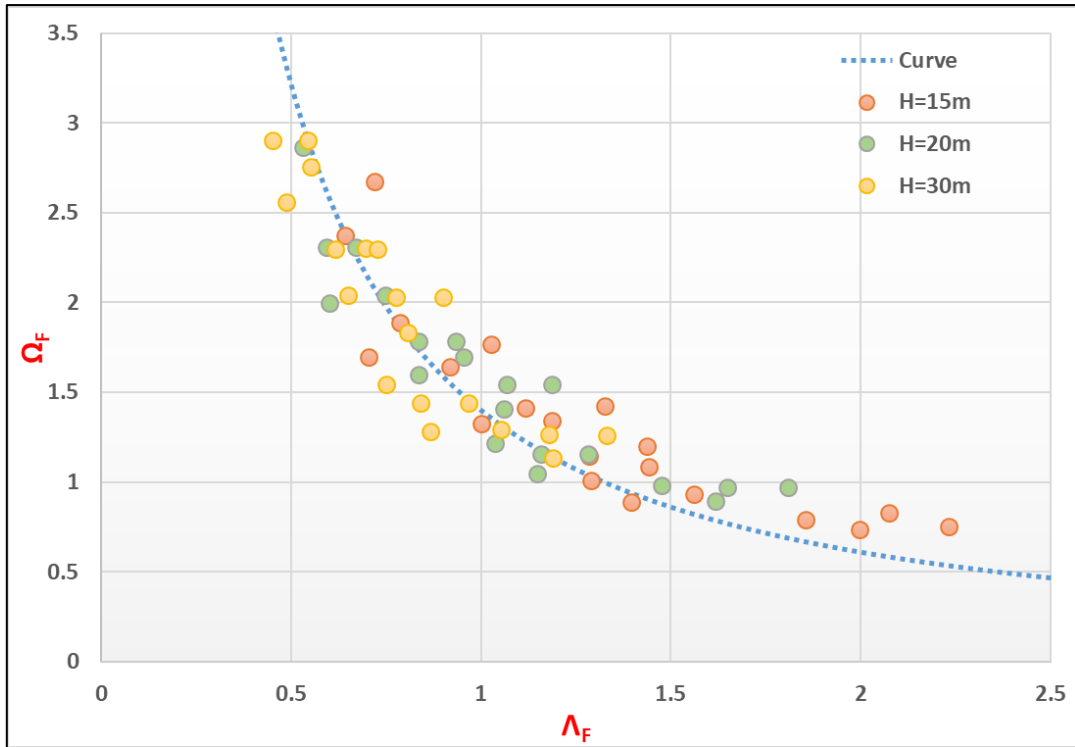
Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, γίνεται διερεύνηση της ευστάθειας μετώπου εκσκαφής σε ρηχές σήραγγες (μέγιστα υπερκείμενα από τον άξονα της σήραγγας 30m), όπου πραγματοποιείται προϋποστήριξη αυτού με αγκύρια από υαλόνημα (fiberglass), σε πυκνότητα 1 αγκύριο ανά 2 ή 4m<sup>2</sup>. Συγκεκριμένα, εκσκάπτεται μόνο η άνω ημιδιατομή (top heading & invert) της σήραγγας, όπως και στην πραγματικότητα, όπου σε ασθενή εδάφη, όπως αυτά που προσομοιώθηκαν στην συγκεκριμένη εργασία, γίνεται προσπάθεια περιορισμού του ενεργού μετώπου εκσκαφής, ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα κατάρρευσης μετώπου και εκδήλωσης μεγάλων επιφανειακών καθιζήσεων (τύπου καμινάδας). Με την πρόοδο της εκσκαφής, μειώνεται το διαθέσιμο ενεργό μήκος πάκτωσης των αγκυρίων, ώστε να ευρεθεί το βέλτιστο μήκος πάκτωσης αυτών, δηλαδή το σημείο όπου μικρότερο μήκος θα προκαλέσει εκθετική αύξηση των εξωθήσεων του μετώπου.

Θα γίνει παρουσίαση των αποτελεσμάτων της εξώθησης του μετώπου εκσκαφής, των επιφανειακών καθιζήσεων λόγω της διάνοιξης της σήραγγας, της απώλειας εδαφικού όγκου ( $V_L$ ), καθώς και το βέλτιστο μήκος πάκτωσης των αγκυρίων, ώστε να είναι λειτουργικά.

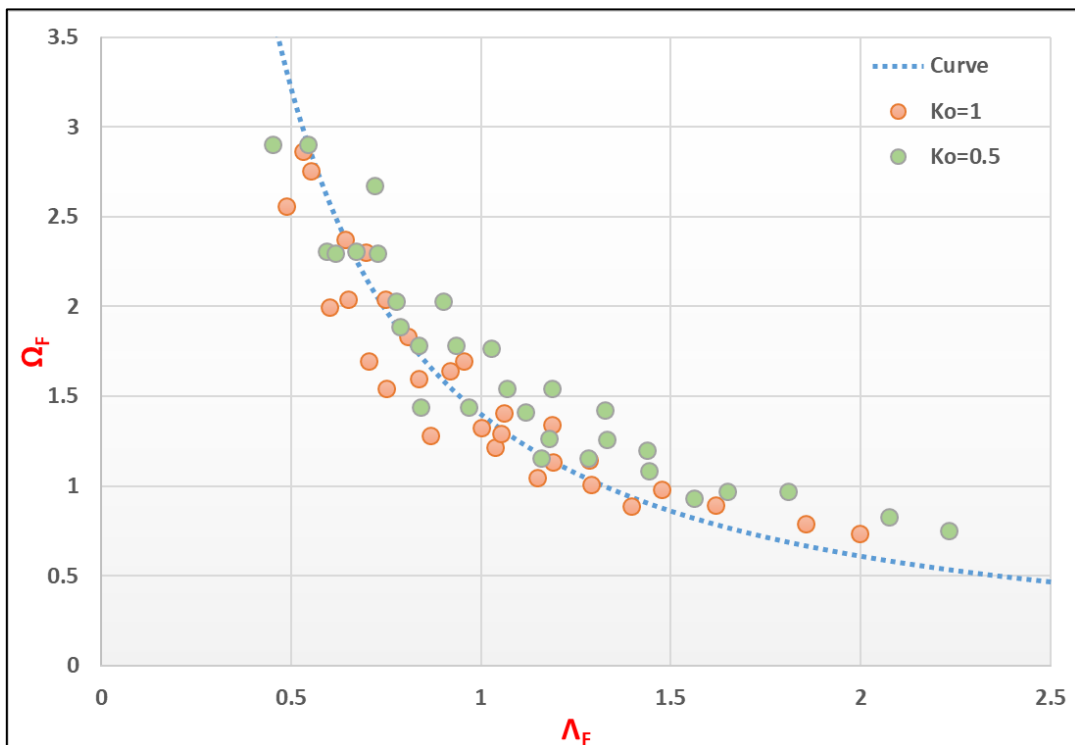
Η συσχέτιση των αποτελεσμάτων με τις εδαφικές παραμέτρους, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και την αναπτυσσόμενη πίεση μετώπου λόγω των αγκυρίων fiberglass, πραγματοποιείται μέσω του συντελεστή ασφαλείας μετώπου  $\Lambda_F$  κατά Georgiou et al. (2020) (βλ. Ενότητα 3.6).

## **6.2 ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΗ ΕΞΩΘΗΣΗ ΜΕΤΩΠΟΥ ΕΚΣΚΑΦΗΣ**

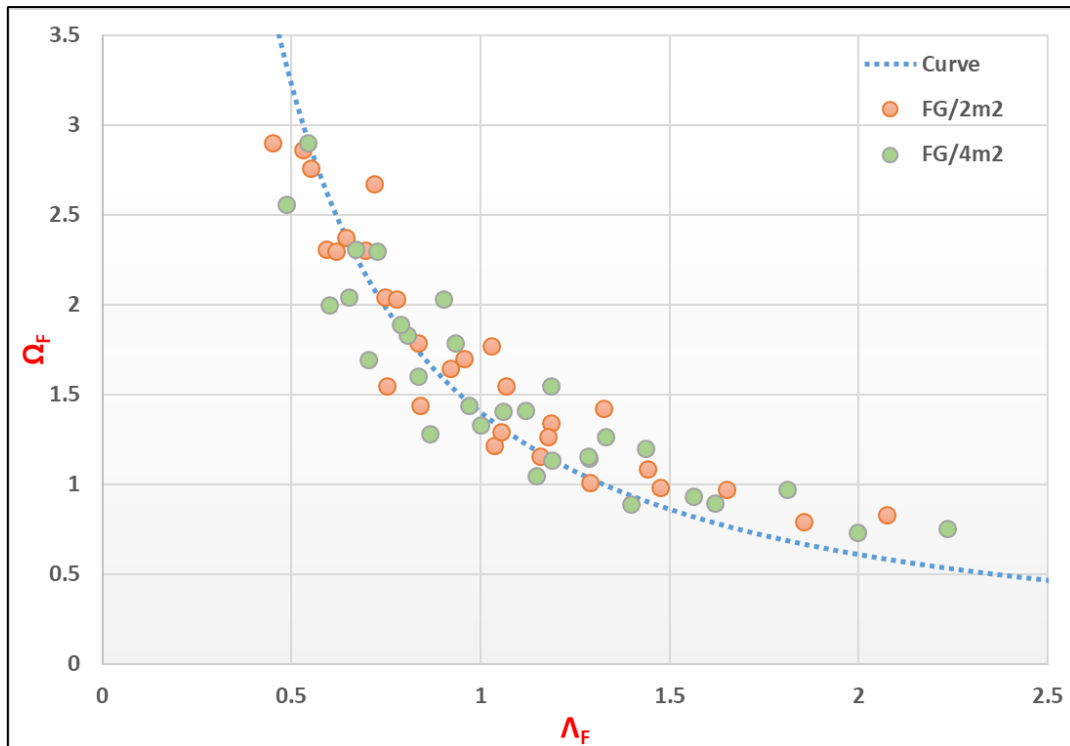
Στην ενότητα αυτή, γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων για την εξώθηση του μετώπου εκσκαφής ( $\Omega_F$ ) με τον συντελεστή ασφαλείας  $\Lambda_F$ , συναρτήσεως των υπερκείμενων γαιών ( $H$ ), του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων ( $K_o$ ), καθώς και της πυκνότητας των αγκυρίων μετώπου (fiberglass), όπως παρουσιάζεται στα Διαγράμματα 15, 16 και 17.



Διάγραμμα 15 : Αποτύπωση εξωθήσεων μετώπου εκσκαφής βάσει συντελεστή ευστάθειας  $\Lambda_F$  για διαφορετικά υπερκείμενα.



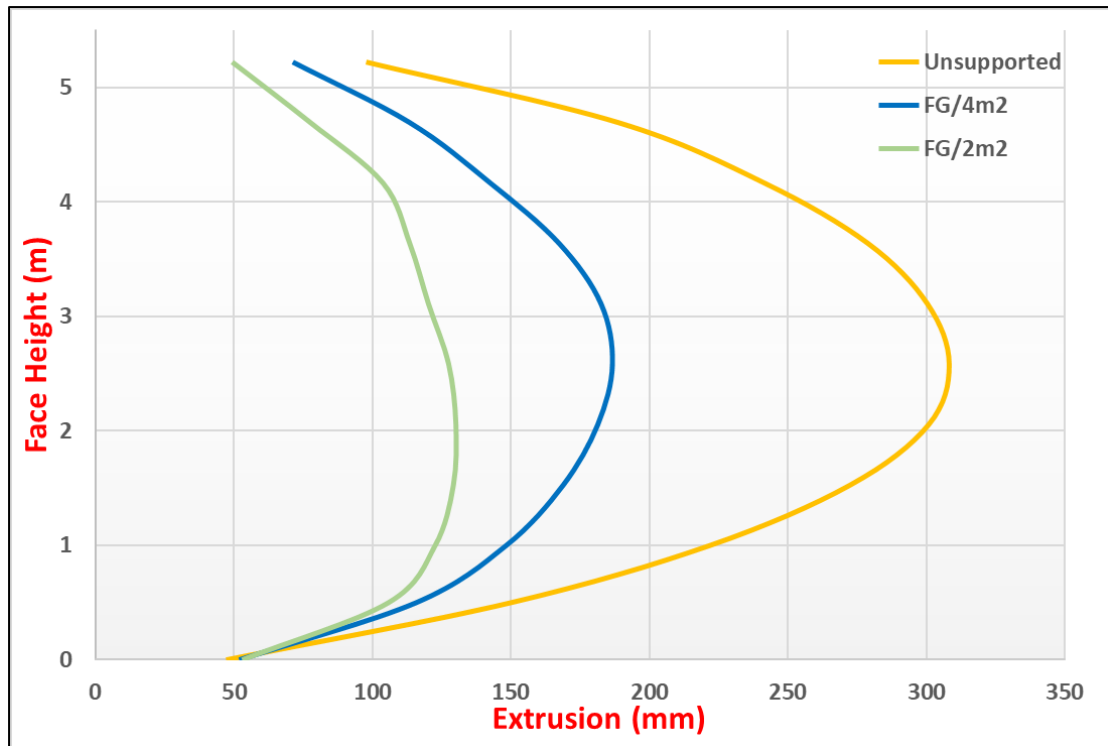
Διάγραμμα 16 : Αποτύπωση εξωθήσεων μετώπου εκσκαφής βάσει συντελεστή ευστάθειας  $\Lambda_F$  για διαφορετική τιμή του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων  $K_0$ .



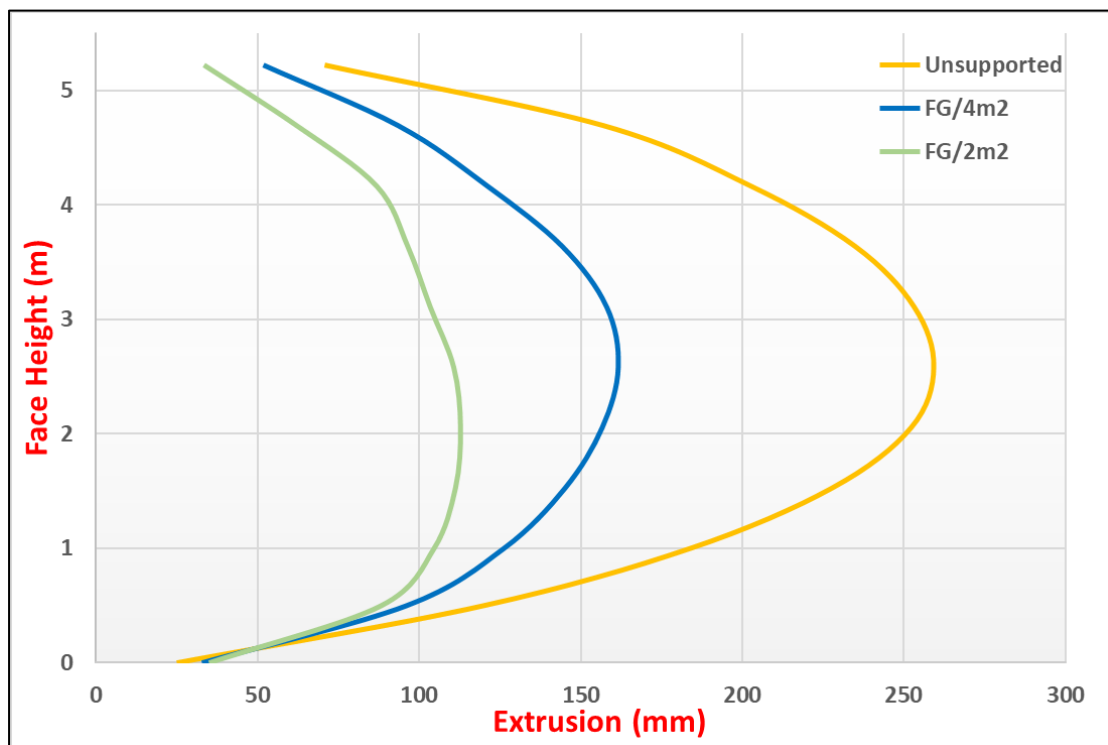
*Διάγραμμα 17 : Αποτύπωση εξωθήσεων μετώπου εκσκαφής βάσει συντελεστή ευστάθειας  $\Lambda_F$  για διαφορετική πυκνότητα αγκυρίων μετώπου (fiberglass).*

Από τα παραπάνω Διαγράμματα, παρατηρείται ότι υπάρχει πολύ μεγάλη ταύτιση των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων με τον συντελεστή ασφαλείας ευστάθειας μετώπου (Georgiou et al. (2020)), καθώς τα αποτελέσματα συμπίπτουν με την θεωρητική καμπύλη που προτείνεται.

Από το σύνολο των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκε με προϋποστήριξη μετώπου με χρήση αγκυρίων fiberglass, είναι αισθητή η συνεισφορά τους στην μείωση των εξωθήσεων του μετώπου εκσκαφής. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το ασθενές έδαφος S1, όπου για ύψος υπερκείμενων γαιών  $H=20m$ , τόσο για συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων  $K_o=1$  και  $K_o=0.5$ , με την χρήση των αγκυρίων η εξώθηση μειώθηκε σημαντικά, όπως παρουσιάζεται στα Διαγράμματα 18 και 19.



Διάγραμμα 18 : Μεταβολή της εξώθησης του μετώπου εκσκαφής για το έδαφος S1 και υπερκείμενα  $H=20m$ , για συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων  $K_0=1$ , συναρτήσει της πυκνότητας αγκύρωσης.



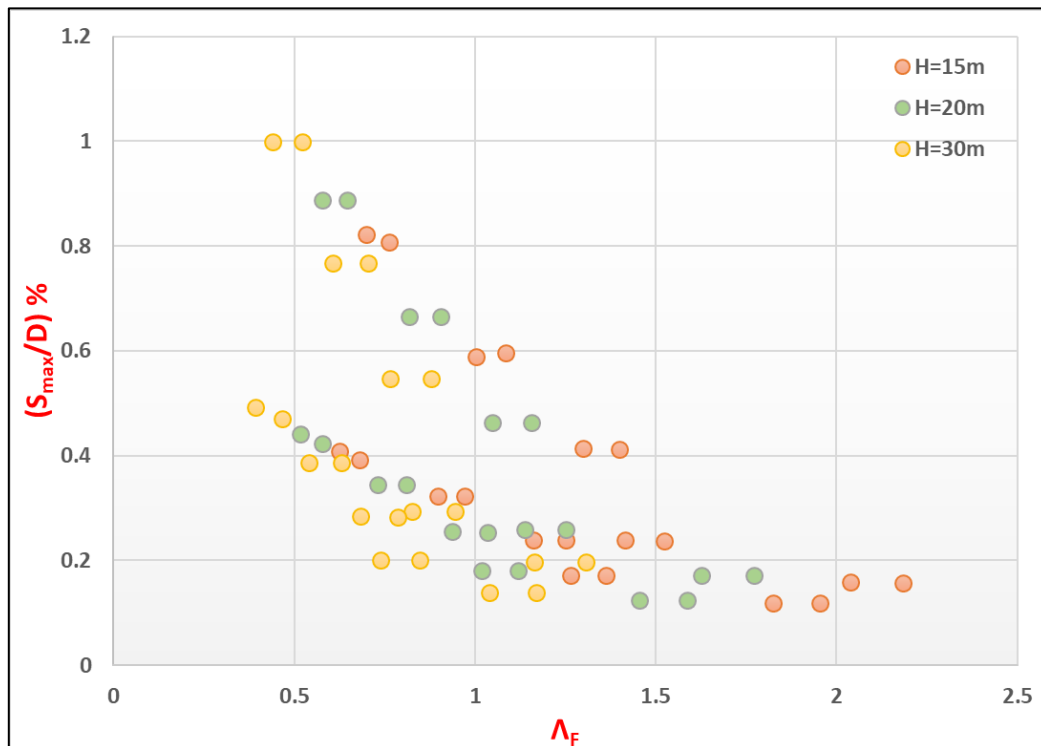
Διάγραμμα 19 : Μεταβολή της εξώθησης του μετώπου εκσκαφής για το έδαφος S1 και υπερκείμενα  $H=20m$  για συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων  $K_0=0.5$ , συναρτήσει της πυκνότητας αγκύρωσης.

Από τα παραπάνω Διαγράμματα, προκύπτει ότι, ανεξαρτήτως της τιμής του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων ( $K_0$ ), για πυκνότητα αγκυρίων μετώπου fiberglass 1 αγκύριο ανά  $2m^2$  εξασφαλίζεται μείωση των εξωθήσεων μετώπου σε ποσοστό 57%, ενώ για πυκνότητα αγκυρίων μετώπου fiberglass 1 αγκύριο ανά  $4m^2$  εξασφαλίζεται μείωση των εξωθήσεων μετώπου σε ποσοστό 39%.

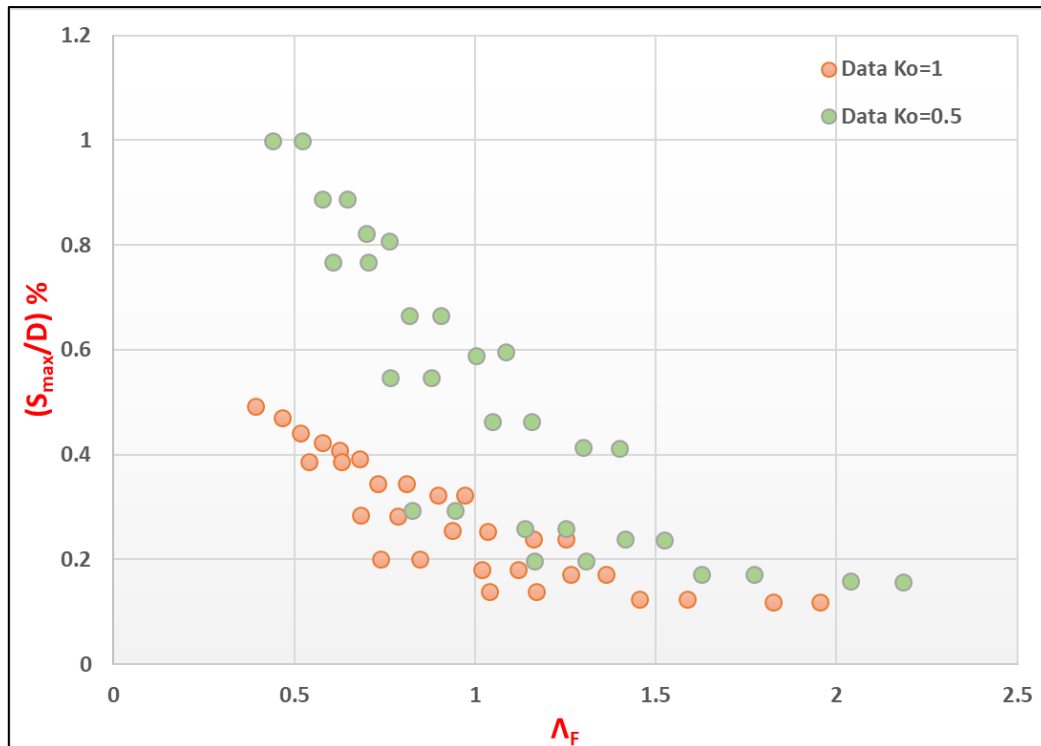
### 6.3 ΕΚΔΗΛΩΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΑΘΙΖΗΣΕΩΝ

Μια από τις βασικές μεθόδους για την αντιμετώπιση των μεγάλων επιφανειακών καθιζήσεων κατά την διάνοιξη ρηχών σηράγγων (αστικές), είναι η προϋποστήριξη του μετώπου εκσκαφής με αγκύρια τύπου fiberglass, ώστε να αυξηθεί η πλευρική τάση  $\sigma_3$  στο μέτωπο εκσκαφής και να περιοριστούν οι εξωθήσεις του.

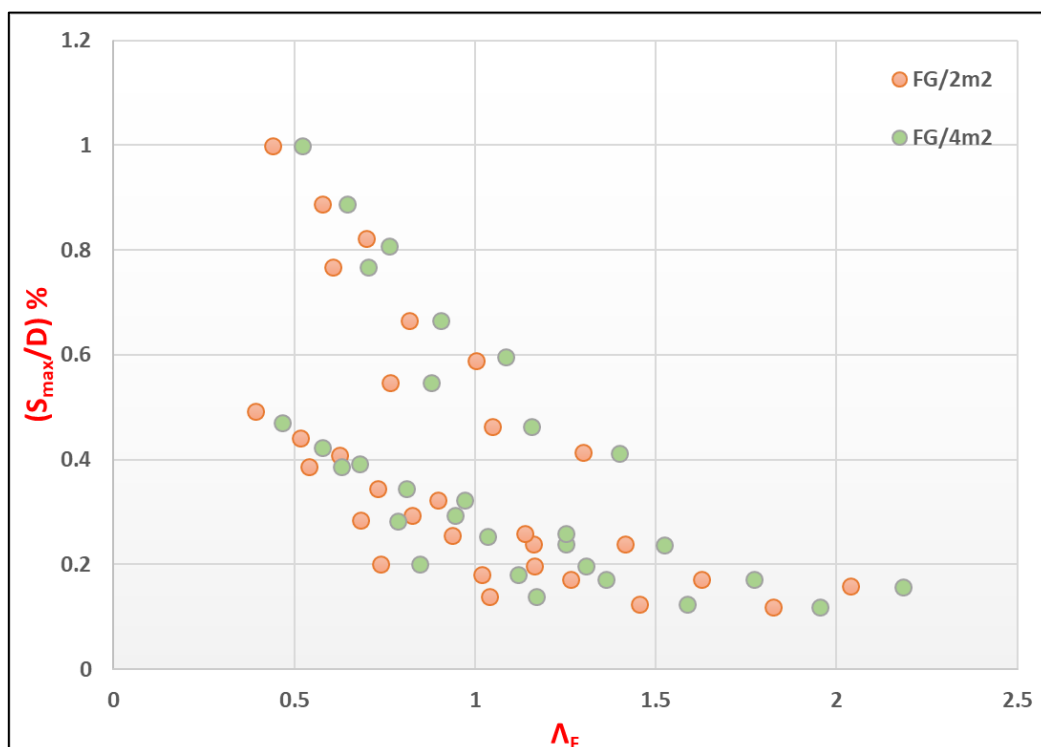
Παρακάτω, αποτυπώνονται οι μέγιστες επιφανειακές καθιζήσεις  $s_{max}$  προς την διάμετρο της σήραγγας, σε σχέση με τον συντελεστή ασφαλείας  $\Lambda_F$ , συναρτήσεως των υπερκείμενων γαιών (H), του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων ( $K_0$ ) και της πυκνότητας των αγκυρίων μετώπου στο μέτωπο εκσκαφής, όπως παρουσιάζεται στα Διαγράμματα 20, 21 και 22.



Διάγραμμα 20 : Αποτύπωση λόγου  $(S_{max}/D)$  βάσει συντελεστή ευστάθειας  $\Lambda_F$  για διαφορετικά υπερκείμενα.



Διάγραμμα 21 : Αποτύπωση λόγου  $(S_{max}/D)$  βάσει συντελεστή ευστάθειας  $\Lambda_F$  για διαφορετική τιμή του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων  $K_o$ .



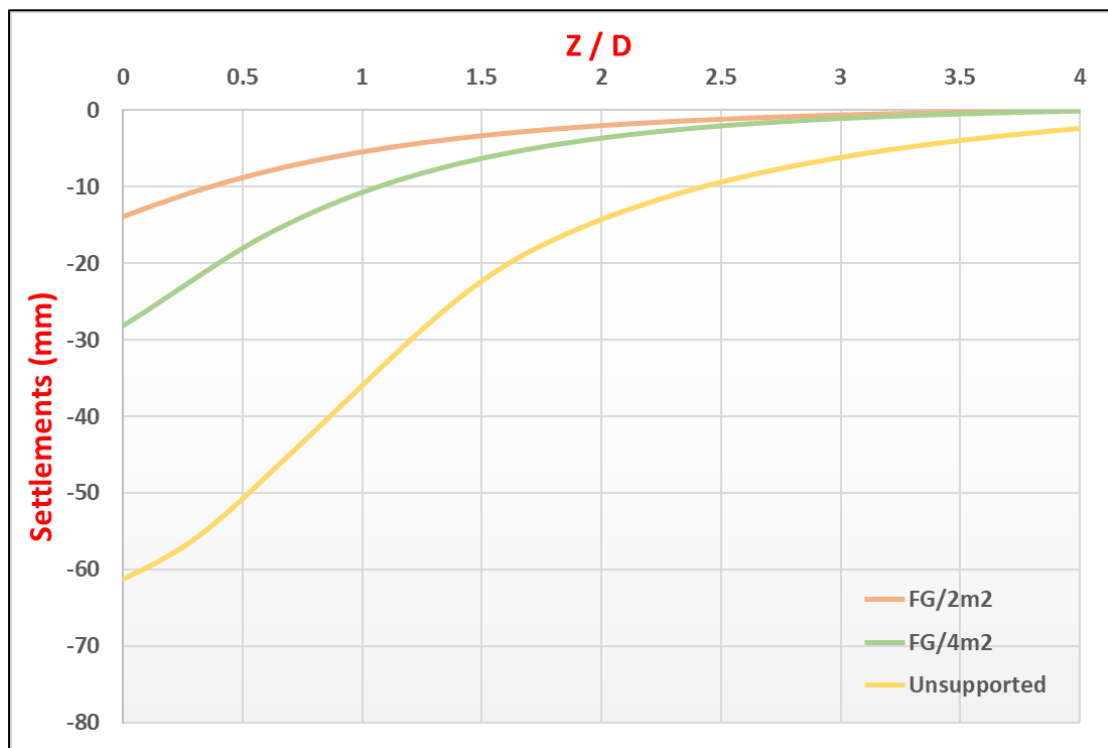
Διάγραμμα 22 : Αποτύπωση λόγου  $(S_{max}/D)$  βάσει συντελεστή ευστάθειας  $\Lambda_F$  για διαφορετική τιμή της πυκνότητας των ακυρίων fiberglass στο μέτωπο εκσκαφής



Από τα παραπάνω Διαγράμματα, προκύπτει ότι βασική επιρροή στην ανάπτυξη των επιφανειακών καθιζήσεων έχει ο συντελεστής ουδετέρων ωθήσεων  $K_0$ , όπου όσο μικρότερος είναι του 1, τόσο μεγαλύτερες καθιζήσεις θα αναπτυχθούν.

Επίσης, δεν διακρίνεται έντονη επιρροή της μεγαλύτερης πυκνότητας αγκυρίων μετώπου fiberglass στην μείωση των επιφανειακών καθιζήσεων, διότι ο συντελεστής  $\Delta F$ , έχει συμπεριλάβει την προσφερόμενη πίεση των αγκυρίων μετώπου fiberglass.

Στη συνέχεια, παρατίθεται η καμπύλη εδαφικών καθιζήσεων (Διάγραμμα 23) κατά μήκος του άξονα της σήραγγας για ένα σχετικά ασθενές έδαφος (S1), συναρτήσει της προσφερόμενης ή μη πίεσης μετώπου για συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων  $K_0=0.5$  και ύψος υπερκείμενων γαιών  $H=20m$ .



*Διάγραμμα 23 : Διαμήκες προφίλ εδαφικών καθιζήσεων για ένα ασθενές έδαφος σε σχέση με την προσφερόμενη πίεση μετώπου, λόγω των αγκυρίων fiberglass.*

Από το παραπάνω Διάγραμμα, προκύπτει ότι, όσο πιο μεγάλη είναι η πυκνότητα του καννάβου των αγκυρίων μετώπου, τόσο μικρότερες είναι οι επιφανειακές καθιζήσεις, διότι έχει επιτευχθεί σημαντική μείωση των εξωθήσεων του μετώπου εκσκαφής.

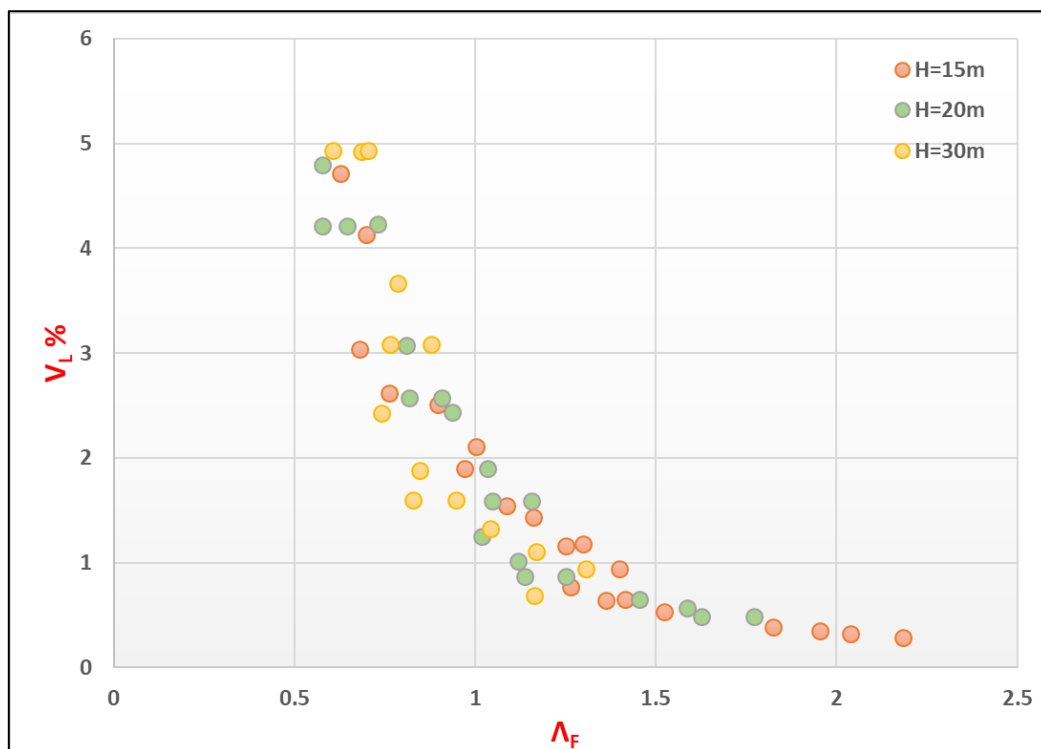
Από το σύνολο των αριθμητικών αναλύσεων, προκύπτει ότι οι συγκλίσεις ισορροπούν σε απόσταση μιας διαμέτρου (1D) πίσω από το μέτωπο εκσκαφής.

Στο μέτωπο, κατά την εκσκαφή του χάνεται όγκος  $V_1 = A \times U_h = \frac{1}{4} \times \pi \times D^2 \times U_h$ , όπου  $D$  η διάμετρος της σήραγγας και  $U_h$  η εξώθηση του μετώπου εκσκαφής. Επειδή οι συγκλίσεις ισορροπούν μια διάμετρο (1D) πίσω από το μέτωπο εκσκαφής, ο όγκος που χάνεται είναι  $V_2 = \left(\frac{1}{2} \times \Delta R \times 1D\right) \times \pi \times D = \frac{1}{2} \times \pi \times D^2 \Delta R$ . Εξισώνοντας τον όγκο  $V_1$  με  $V_2$ , προκύπτει  $\Delta R = \frac{U_h}{2}$ .

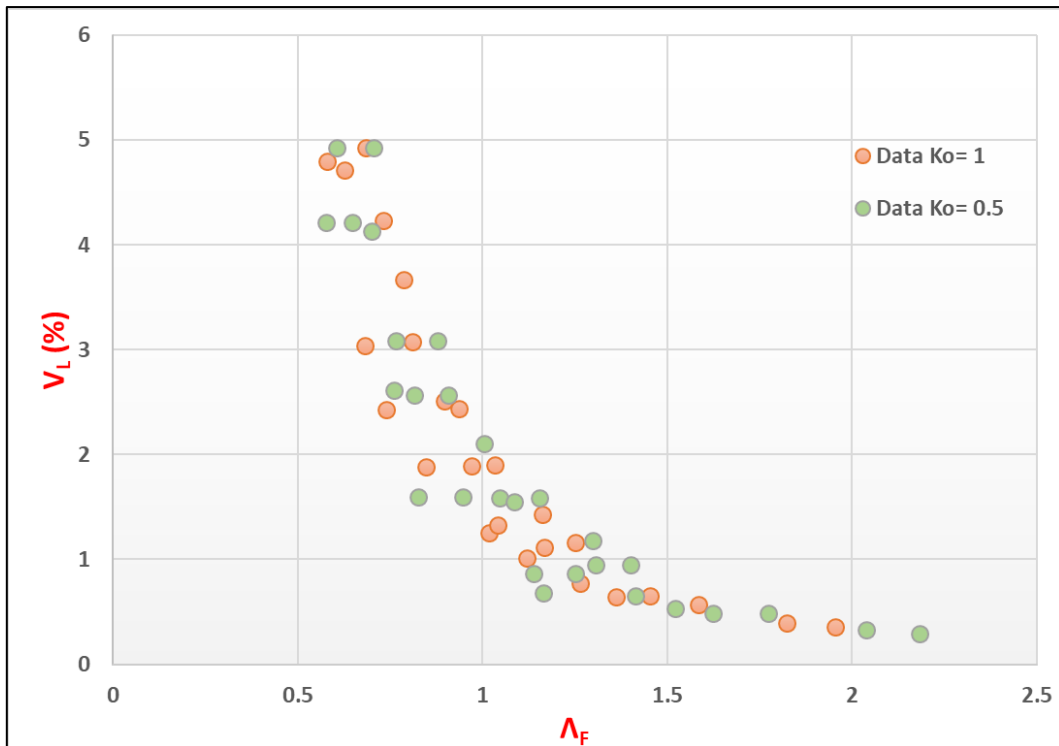
Η απώλεια όγκου  $V_L$ , ορίζεται ως:  $V_L = \frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta R \times \pi \times D}{\pi \times D^2 / 4} = 4 \times \frac{\Delta R}{D}$ .

Για  $\Delta R = \frac{U_h}{2}$ , προκύπτει  $V_L = \frac{2 \times U_h}{D}$ .

Στη συνέχεια, αποτυπώνεται η απώλεια εδαφικού όγκου ( $V_L$ ) σε σχέση με τον συντελεστή ασφαλείας  $\Lambda_F$  συναρτήσεως των υπερκείμενων γαιών ( $H$ ) και του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων ( $K_0$ ), όπως παρουσιάζεται στα Διαγράμματα 24 και 25.



Διάγραμμα 24 : Αποτύπωση απώλειας εδαφικού όγκου ( $V_L$ ) βάσει συντελεστή ευστάθειας  $\Lambda_F$  για διαφορετικά υπερκείμενα.



*Διάγραμμα 25 : Αποτύπωση απώλειας εδαφικού όγκου ( $V_L$ ) βάσει συντελεστή ευστάθειας  $\Lambda_F$  για διαφορετική τιμή του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων  $K_o$ .*

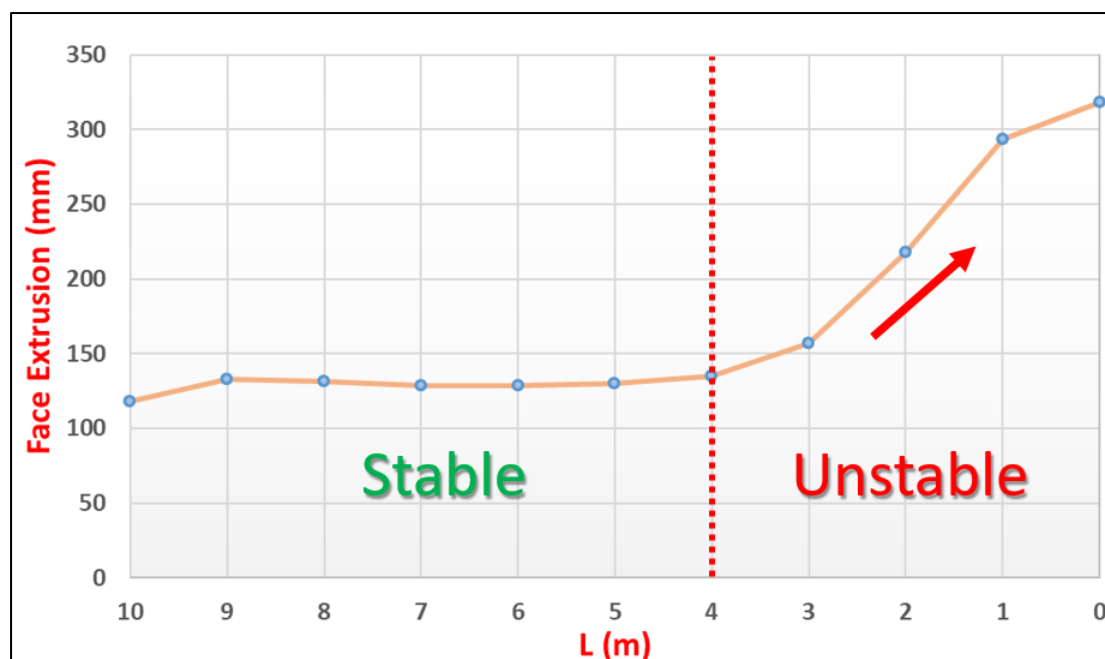
Από τα παραπάνω Διαγράμματα, γίνεται αντιληπτό ότι, για τιμές  $\Lambda_F < 1$ , δηλαδή συνθήκες για αστοχία μετώπου εκσκαφής, η απώλεια εδαφικού όγκου  $V_L$  αυξάνεται, διότι είναι παράγωγο μέγεθος της εξώθησης του μετώπου εκσκαφής  $\Omega_F$ , η οποία επίσης αυξάνεται, όπως και στο ανυποστήρικτο μέτωπο.

#### **6.4 ΕΥΡΕΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΑΓΚΥΡΙΩΝ ΜΕΤΩΠΟΥ ΕΚΣΚΑΦΗΣ FIBERGLASS**

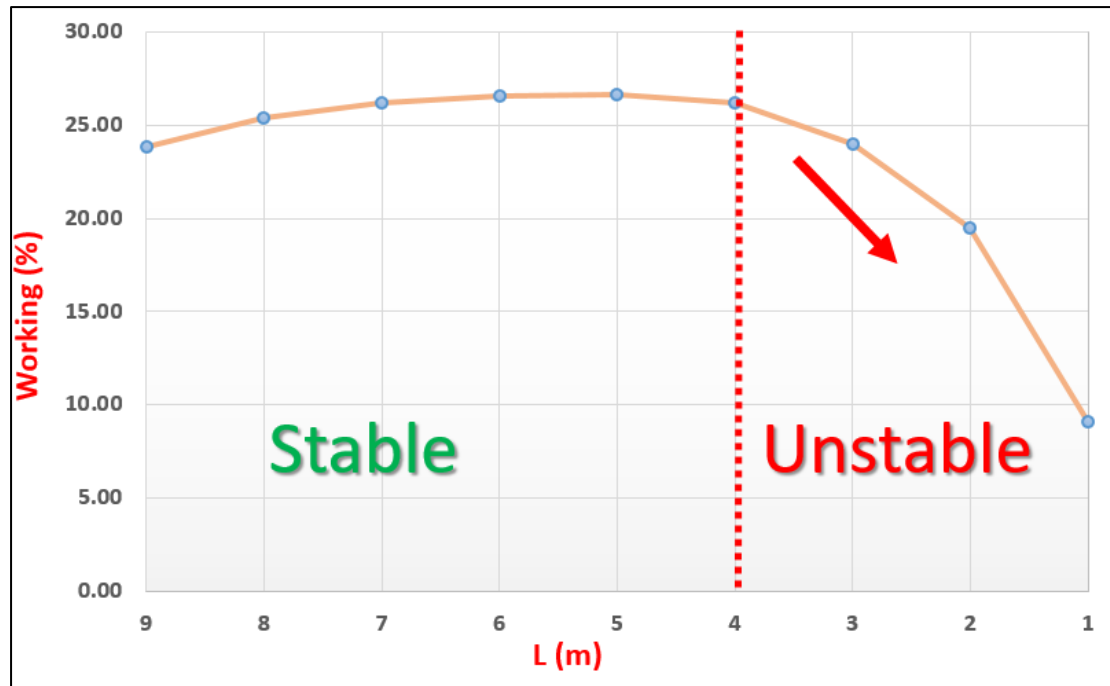
Ένα από τα σημαντικότερα πεδία έρευνας της παρούσας εργασίας είναι η εύρεση του βέλτιστου μήκους των αγκυρίων μετώπου fiberglass, όταν αυτά χρησιμοποιούνται για την προϋποστήριξη του μετώπου εκσκαφής. Ουσιαστικά πρέπει να βρεθεί το μήκος αυτό, όπου θα εξασφαλίζει μείωση των εξωθήσεων και ταυτόχρονα τη μη διαρροή των αγκυρίων.

Με τον τρόπο αυτό θα εξασφαλίζεται το κατάλληλο μήκος αλληλοεπικάλυψης αγκυρίων μετώπου fiberglass κατά την συμβατική διάνοιξη σηράγγων. Θεωρητική προεκτίμηση αυτού του μήκους έχει περιγραφεί στο Κεφάλαιο 5.

Για το σύνολο των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν, καταγράφονταν σε κάθε βήμα εκσκαφής οι μετρούμενες εξωθήσεις του μετώπου και η αναπτυσσόμενη τάση των αγκυρίων μετώπου fiberglass. Καθώς εξελισσόταν η εκσκαφή, μειωνόταν το μήκος των αγκυρίων και πέραν κάποιου εναπομείναντος διαθέσιμου μήκους, παρατηρούνταν εκθετική αύξηση στις εξωθήσεις και ταυτόχρονα είχε ήδη καταγραφεί η μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση στα αγκύρια. Στο σημείο αυτό, θεωρήθηκε ότι προκαλείται η αστοχία του μετώπου εκσκαφής, διότι οι εξωθήσεις αυξάνουν εκθετικά (Διάγραμμα 26) και τα αγκύρια φορτίζονται στο μέγιστο δυνατό και μετά αποφορτίζονται, διότι παύουν να λειτουργούν (Διάγραμμα 27).



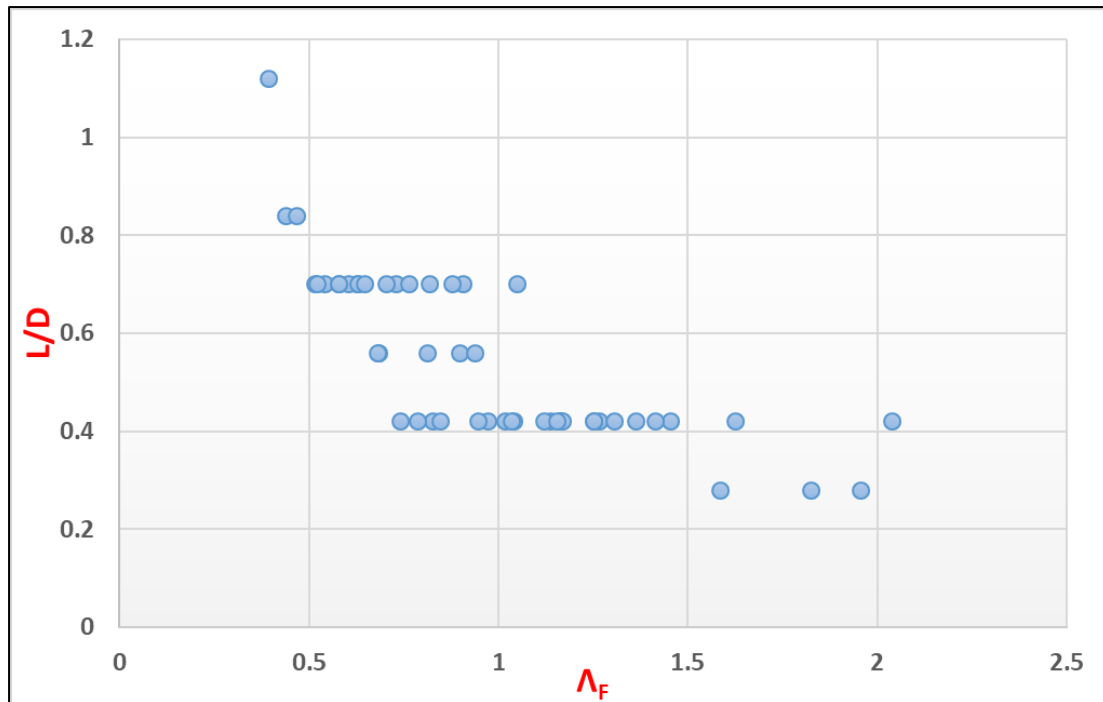
Διάγραμμα 26 : Εύρεση βέλτιστου μήκους αγκυρίων βάσει μετρούμενων εξωθήσεων



Διάγραμμα 27 : Εύρεση βέλτιστου μήκους αγκυρίων βάσει φορτίου λειτουργίας αγκυρίων.

Με βάση την παραπάνω μέθοδο, παρατηρείται ότι το ελάχιστο δυνατό μήκος αλληλοεπικάλυψης των αγκυρίων στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι στα 4m.

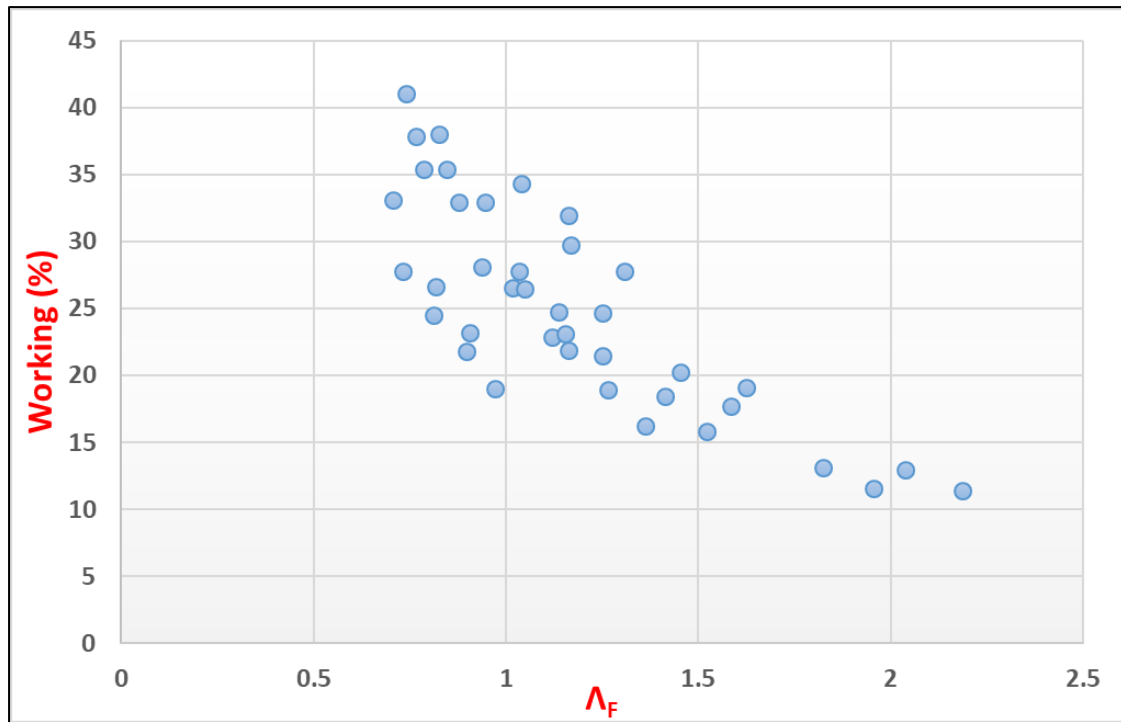
Για το σύνολο των αριθμητικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν, στο Διάγραμμα 28 αποτυπώνεται ο λόγος βέλτιστου μήκους αγκυρίων προς την διάμετρο της σήραγγας (L/D) σε σχέση με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου εκσκαφής  $\Lambda_F$ .



*Διάγραμμα 28 : Συσχέτιση βέλτιστου μήκους αγκυρίων μετώπου εκσκαφής fiberglass με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου  $\Lambda_F$ .*

Από το παραπάνω Διάγραμμα, παρατηρείται μεγάλη ταύτιση μεταξύ του λόγου (L/D) με τον συντελεστή ευστάθειας μετώπου εκσκαφής  $\Lambda_{F0}$ . Η αναλυτική συσχέτιση αυτών των δυο παραμέτρων θα πραγματοποιηθεί στο Κεφάλαιο 8.

Τέλος, στο Διάγραμμα 29, παρατίθεται η συσχέτιση μεταξύ του φορτίου λειτουργίας (working) των αγκυρίων μετώπου fiberglass με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου εκσκαφής  $\Lambda_F$ . Από το διάγραμμα, γίνεται αντιληπτό ότι για περιπτώσεις ασταθούς μετώπου  $\Lambda_F < 1$ , υπάρχει εκθετική αύξηση στο φορτίο λειτουργίας των αγκυρίων, διότι πλέον συνεισφέρουν στην ευστάθεια του μετώπου. Η αναλυτική συσχέτιση αυτών των δυο παραμέτρων θα πραγματοποιηθεί στο Κεφάλαιο 8.



Διάγραμμα 29 : Συσχέτιση φορτίου λειτουργίας αγκυρίων μετόπου fiberglass με τον συντελεστή ασφαλείας μετόπου  $\Lambda_F$ .





**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ  
ΤΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΜΕΤΩΠΟΥ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΜΕ  
ΠΡΟΫΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΑΠΟ ΑΓΚΥΡΙΑ FIBERGLASS  
ΚΑΙ ΔΟΚΟΥΣ ΠΡΟΠΟΡΕΙΑΣ FOREPOLE**



## 7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

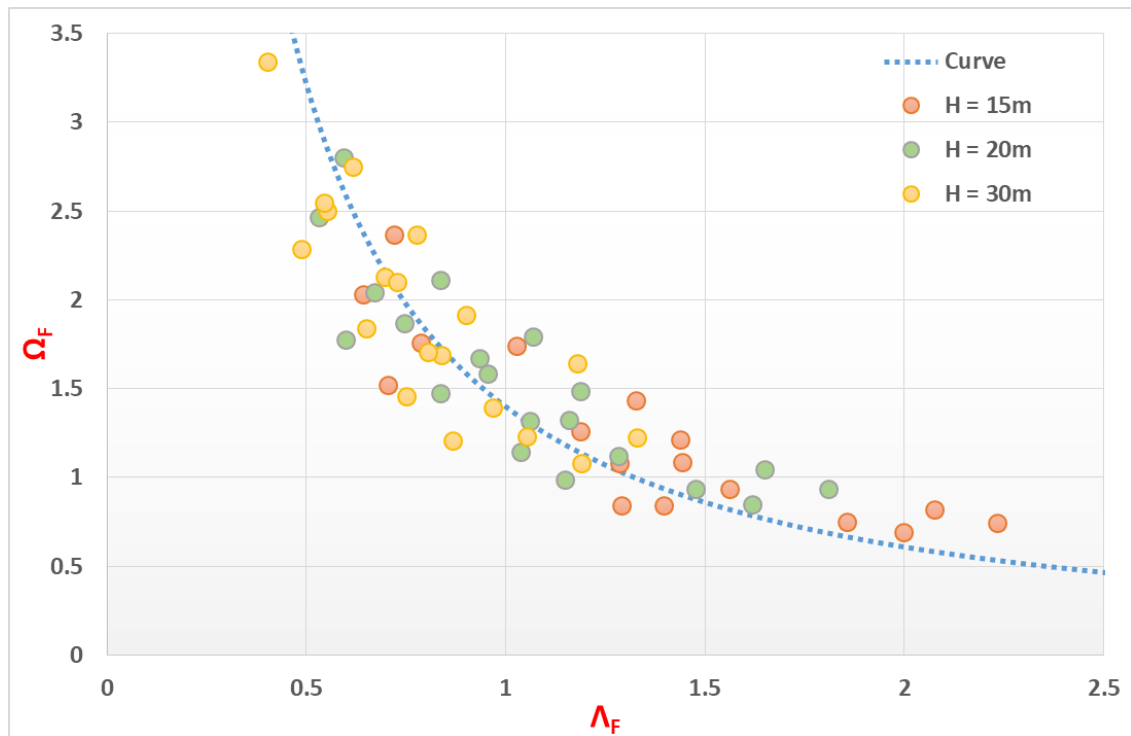
Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, γίνεται διερεύνηση της ευστάθειας μετώπου εκσκαφής σε ρηχές σήραγγες (μέγιστα υπερκείμενα από άξονα σήραγγας 30m), όπου πραγματοποιείται προϋποστήριξη αυτού με αγκύρια από υαλόνημα (fiberglass) και δοκούς προπορείας (forepole). Συγκεκριμένα, εκσκάπτεται μόνο η άνω ημιδιατομή (top heading & invert) της σήραγγας, όπως και προηγουμένως, ενώ παράλληλα το μέτωπο εκσκαφής έχει προϋποστηριχθεί με αγκύρια τύπου fiberglass σε πυκνότητα 1 αγκύριο ανά 2 ή 4m<sup>2</sup> και συμπληρωματικά με δοκούς προπορείας (forepole). Η χρήση δοκών προπορείας στη στέψη στοχεύει στη βελτίωση της ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής μέσω της μείωσης της κατακόρυφης τάσης σι.

Στη συνέχεια, θα γίνει παρουσίαση των αποτελεσμάτων της εξώθησης του μετώπου εκσκαφής, των επιφανειακών καθιζήσεων λόγω της διάνοιξης της σήραγγας, καθώς και της απώλειας εδαφικού όγκου ( $V_L$ ), ενώ θα παρατεθούν συγκριτικά διαγράμματα που αφορούν τη χρήση ή μη δοκών προπορείας (forepole).

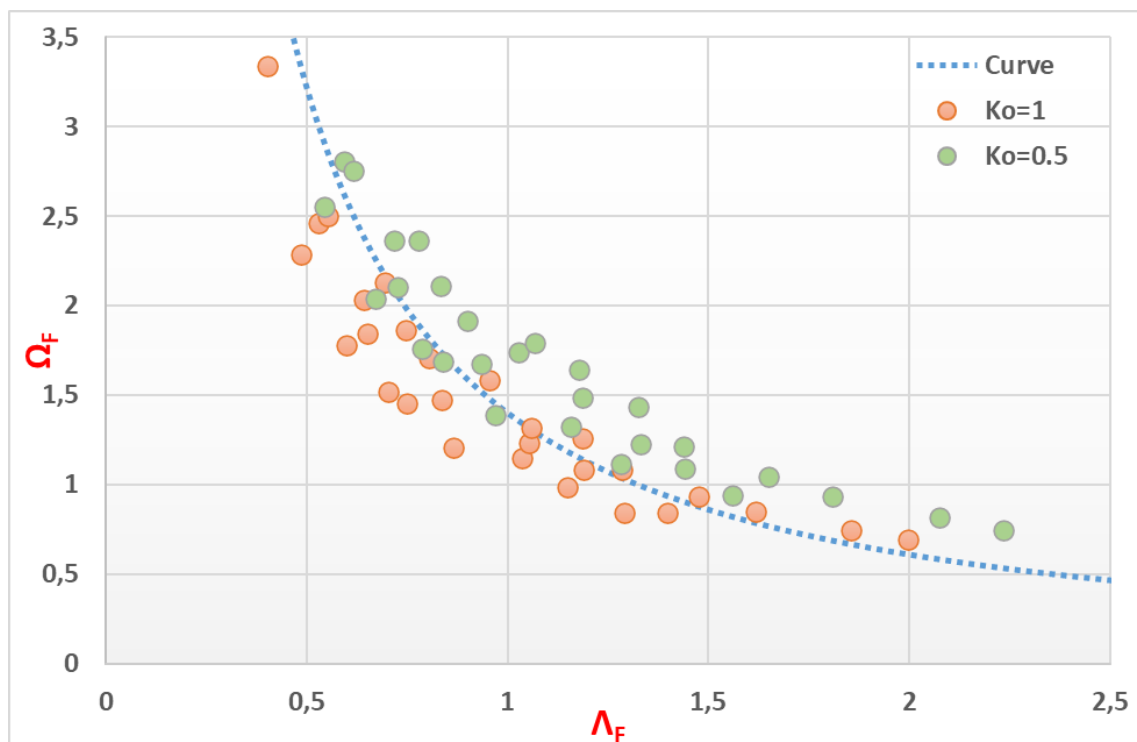
Η συσχέτιση των αποτελεσμάτων με τις εδαφικές παραμέτρους, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και την αναπτυσσόμενη πίεση μετώπου λόγω των αγκυρίων fiberglass και δοκών προπορείας forepole πραγματοποιείται μέσω του συντελεστή ασφαλείας μετώπου  $\Lambda_F$  κατά Georgiou et al. (2020) (βλ. Ενότητα 3.6).

## 7.2. ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΗ ΕΞΩΘΗΣΗ ΜΕΤΩΠΟΥ ΕΚΣΚΑΦΗΣ

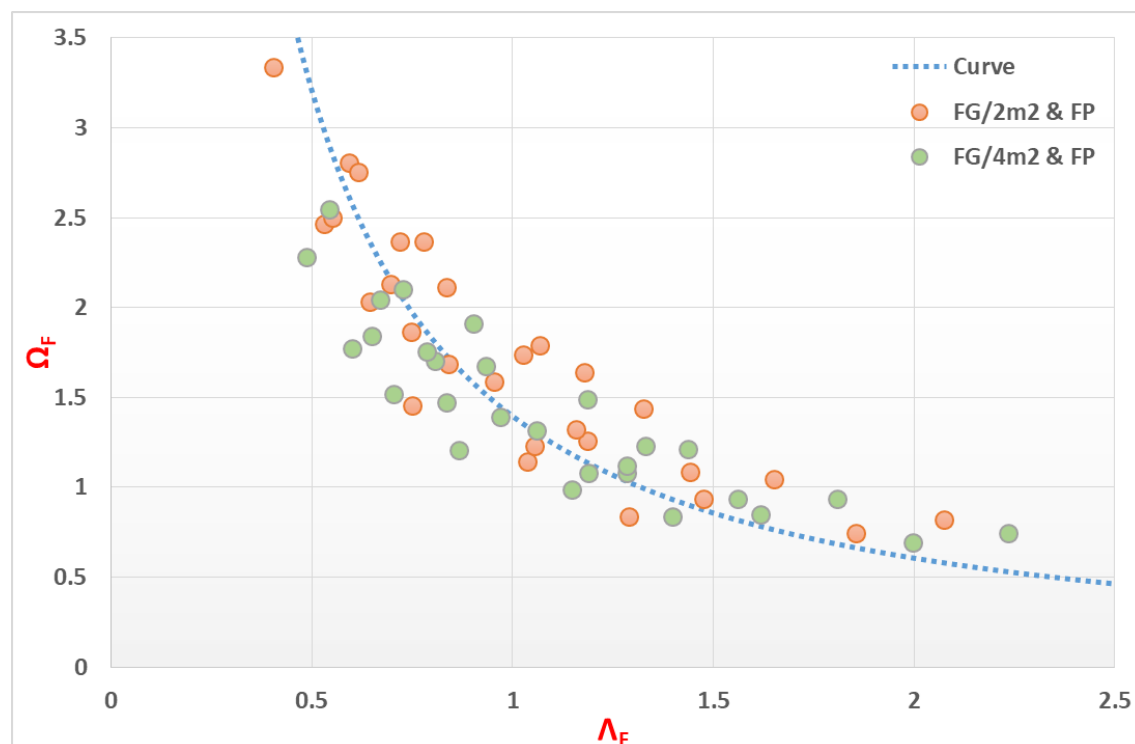
Στη συνέχεια, γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων για την εξώθηση του μετώπου εκσκαφής ( $\Omega_F$ ) με τον συντελεστή ασφαλείας  $\Lambda_F$ , συναρτήσει των υπερκείμενων γαιών ( $H$ ), του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων ( $K_o$ ) καθώς και της πυκνότητας των αγκυρίων μετώπου (fiberglass), όπως παρουσιάζεται στα Διαγράμματα 30,31 και 32.



Διάγραμμα 30 : Αποτύπωση εξωθήσεων μετώπου εκσκαφής βάσει συντελεστή ευστάθειας  $\Lambda_F$  για διαφορετικά υπερκείμενα.



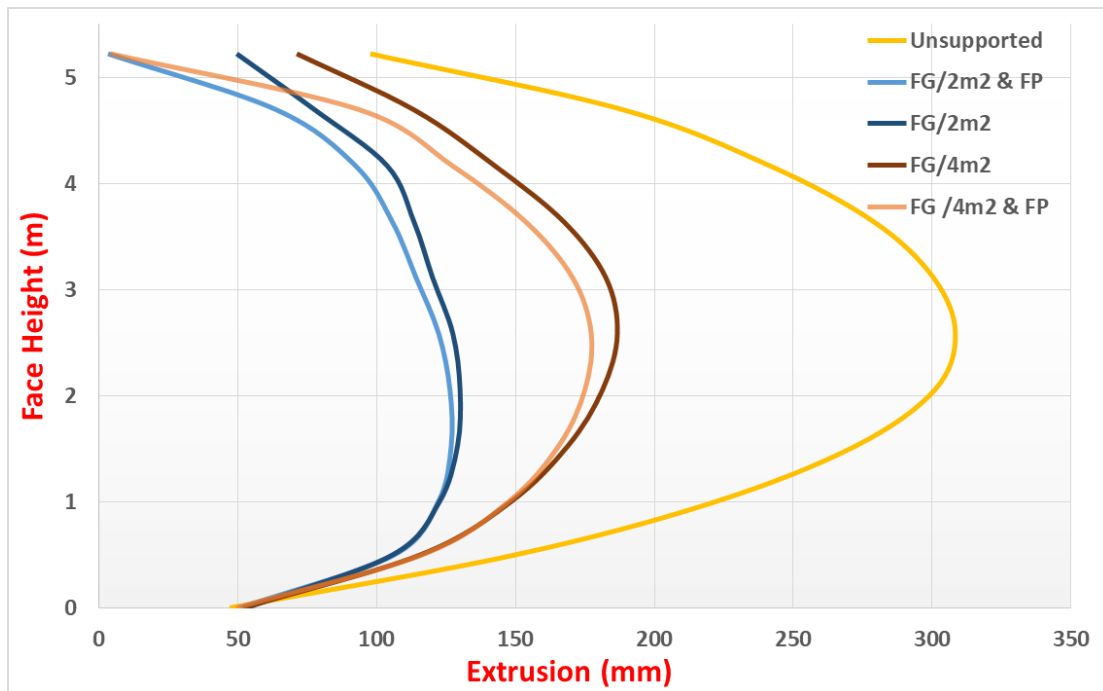
Διάγραμμα 31 : Αποτύπωση εξωθήσεων μετώπου εκσκαφής βάσει συντελεστή ευστάθειας  $\Lambda_F$  για διαφορετική τιμή του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων  $K_o$ .



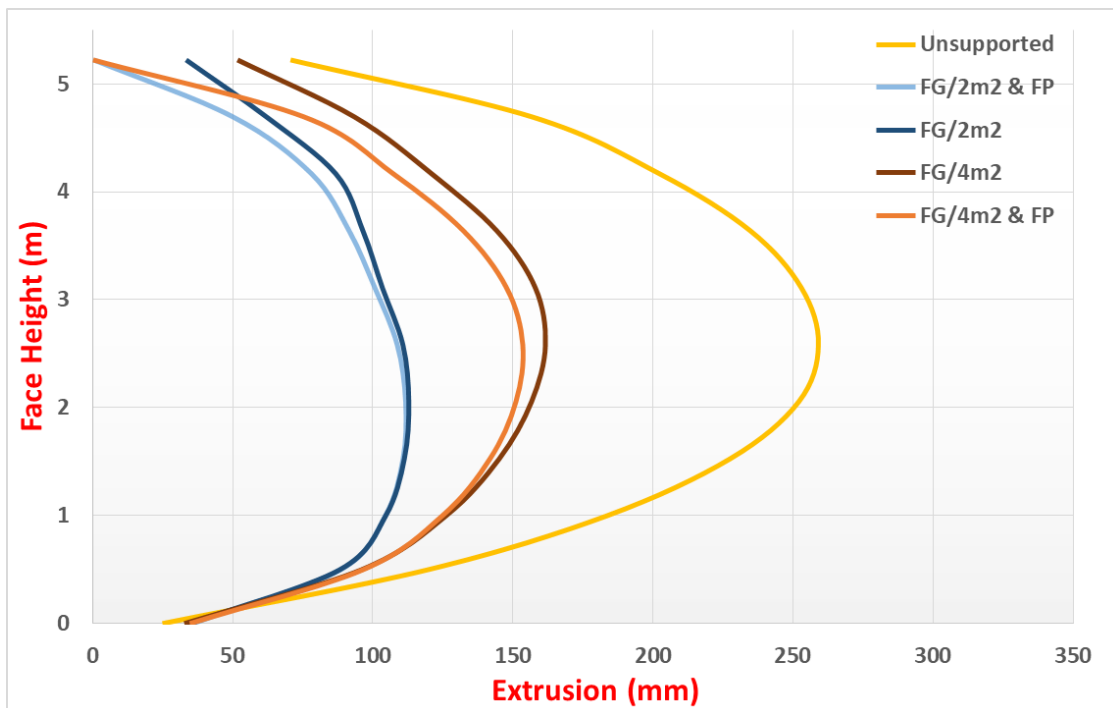
*Διάγραμμα 32 : Αποτύπωση εξωθήσεων μετώπου εκσκαφής βάσει συντελεστή ευστάθειας  $\Lambda_F$  για διαφορετική πυκνότητα αγκυρίων μετώπου (fiberglass) με ταυτόχρονη προϋποστήριξη με χρήση δοκών προπορείας.*

Από τα παραπάνω δεδομένα, προκύπτει μεγάλη ταύτιση των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων με τον συντελεστή ασφαλείας ευστάθειας μετώπου (Georgiou et al. (2020)), καθώς τα αποτελέσματα συμπίπτουν με την θεωρητική καμπύλη που προτείνεται.

Από το σύνολο των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκε με προϋποστήριξη μετώπου με χρήση δοκών προπορείας forepole, συμπληρωματικά των αγκυρίων fiberglass, προέκυψε ότι η συνεισφορά τους στην μείωση των εξωθήσεων του μετώπου εκσκαφής, αν και μείζονος σημασίας, είναι μικρή σε ποσοστό. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το ασθενές έδαφος S1, όπου για ύψος υπερκείμενων γαιών  $H=20m$  και συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων  $K_o=1$  και  $K_o=0.5$ , η χρήση δοκών προπορείας (forepole) συμπληρωματικά των αγκυρίων fiberglass οδηγεί σε μικρή μείωση της εξώθησης του μετώπου εκσκαφής Διαγράμματα 33 και 34.



Διάγραμμα 33 : Μεταβολή της εξώθησης του μετώπου εκσκαφής για το έδαφος S1 και υπερκείμενα  $H=20m$  για συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων  $K_0=1$  και πυκνότητα αγκυρίων fiberglass  $2m^2$  και  $4m^2$ , συναρτήσει της χρήσης ή μη δοκών προπορείας (forepole).

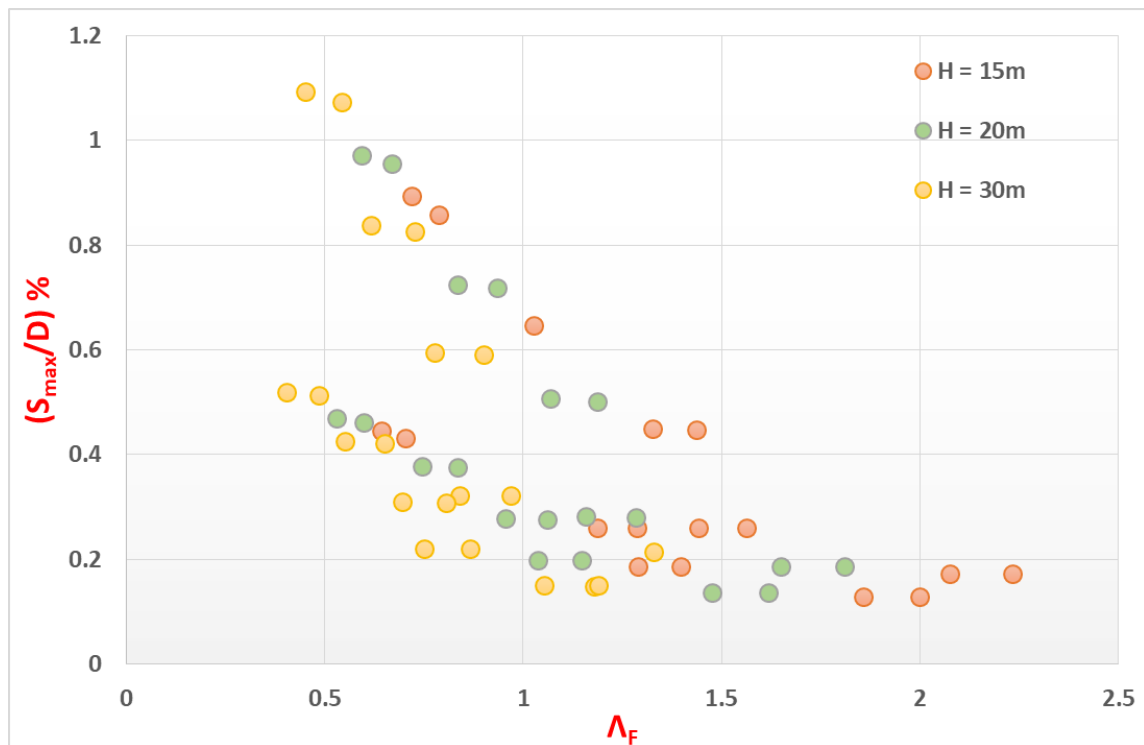


Διάγραμμα 34 : Μεταβολή της εξώθησης του μετώπου εκσκαφής για το έδαφος S1 και υπερκείμενα  $H=20m$  για συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων  $K_0=0.5$  και πυκνότητα αγκυρίων fiberglass  $2m^2$  και  $4m^2$ , συναρτήσει της χρήσης ή μη δοκών προπορείας (forepole).

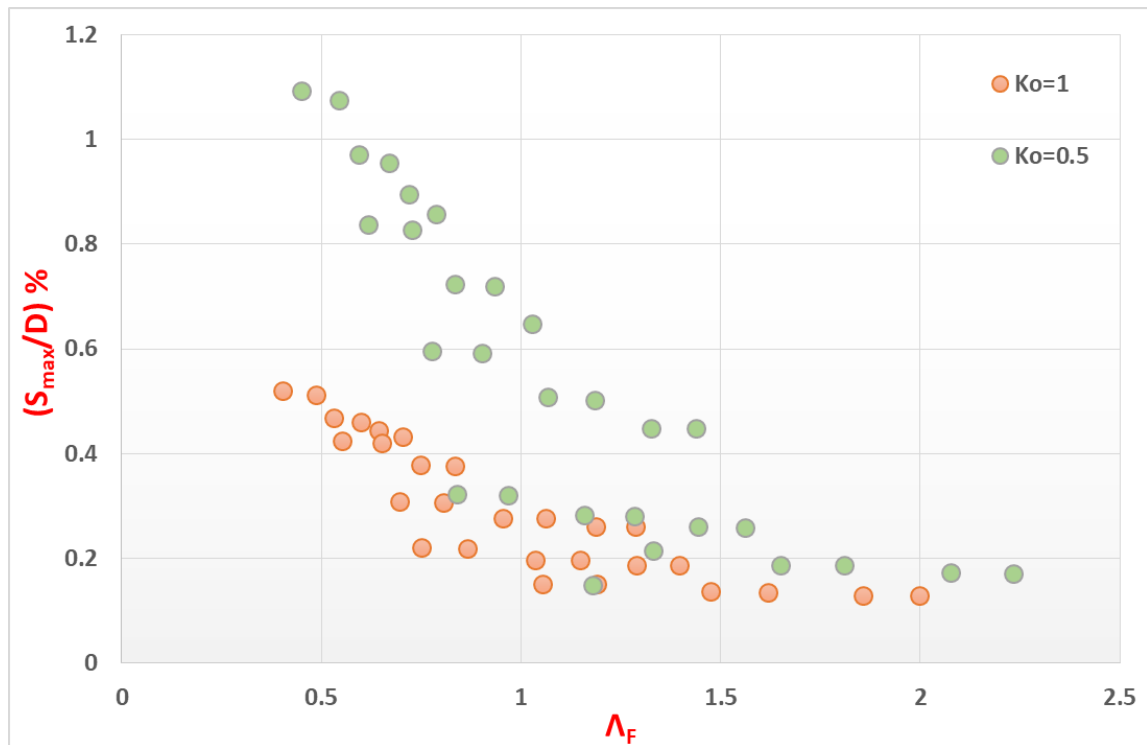
Από τα παραπάνω Διαγράμματα, προκύπτει ότι σε κάθε περίπτωση που μελετήθηκε, η χρήση δοκών προπορείας (forepole) προκαλεί σχεδόν αμελητέα μείωση της εξώθησης του μετώπου, ανεξαρτήτως της πυκνότητας αγκυρίων fiberglass και του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων που έχει επιλεγθεί.

### 7.3. ΕΚΔΗΛΩΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΑΘΙΖΗΣΕΩΝ

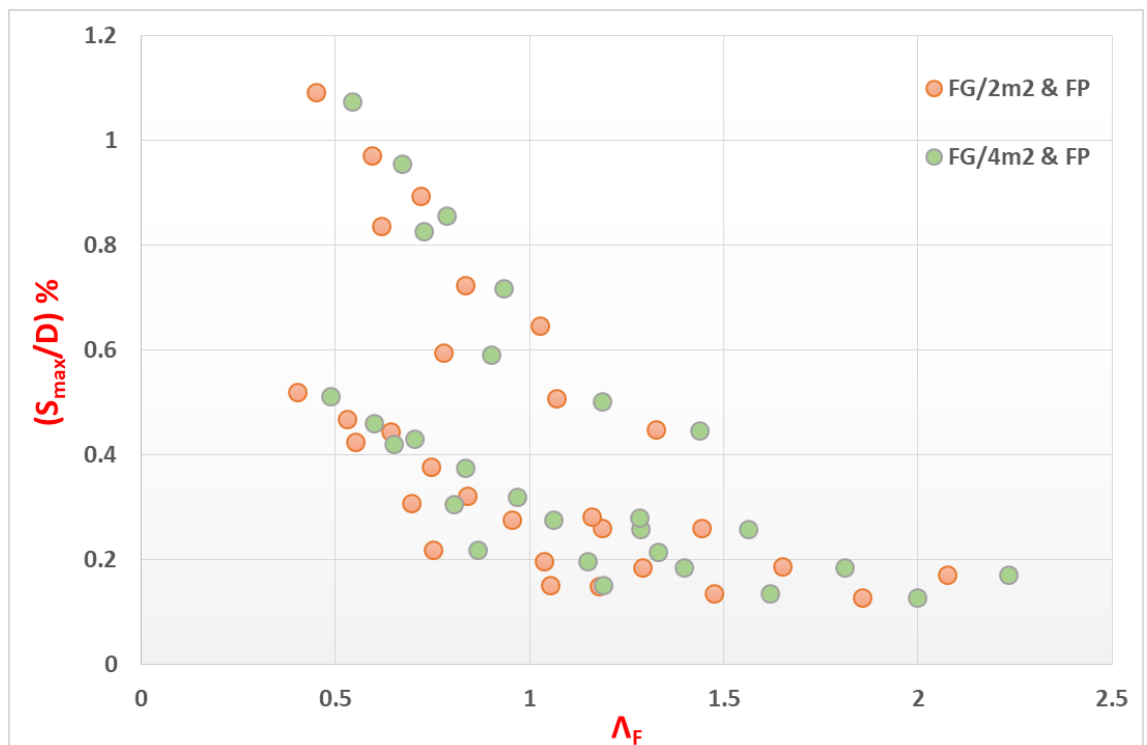
Στην ενότητα που ακολουθεί, πραγματοποιήθηκε προσπάθεια αποτύπωσης των μέγιστων επιφανειακών καθιζήσεων  $s_{max}$  προς την διάμετρο της σήραγγας, όταν για την βελτίωση της ευστάθειας του μετώπου χρησιμοποιούνται δοκοί προπορείας. Η διαγραμματική παρουσίαση πραγματοποιείται σε σχέση με τον συντελεστή ασφαλείας  $\Lambda_F$ , συναρτήσει των υπερκείμενων γαιών (H) του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων ( $K_o$ ) και της πυκνότητας των αγκυρίων μετώπου στο μέτωπο εκσκαφής, όπως παρουσιάζεται στα Διαγράμματα 35, 36 και 37.



Διάγραμμα 35 :Αποτύπωση λόγου  $(S_{max}/D)$  βάσει συντελεστή ευστάθειας  $\Lambda_F$  για διαφορετικά υπερκείμενα.



Διάγραμμα 36 : Αποτύπωση λόγου ( $S_{max}/D$ ) βάσει συντελεστή ευστάθειας  $\Lambda_F$  για διαφορετική τιμή του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων  $K_o$ .

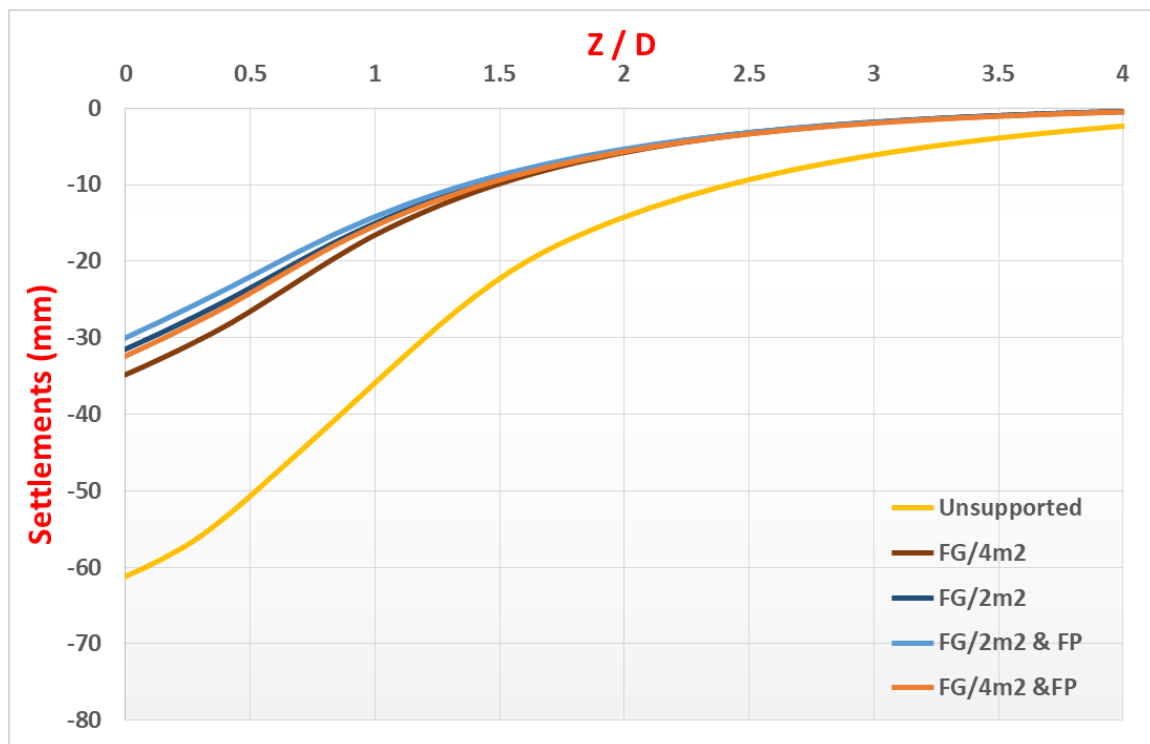


Διάγραμμα 37 : Αποτύπωση λόγου ( $S_{max}/D$ ) βάσει συντελεστή ευστάθειας  $\Lambda_F$  για διαφορετική τιμή της πυκνότητας των αγκυρών fiberglass στο μέτωπο εκσκαφής.



Από τα παραπάνω Διαγράμματα, προκύπτει, όπως αντίστοιχα και πριν χρησιμοποιηθούν δοκοί προπορείας (forepole), ότι βασική επιρροή στην ανάπτυξη των επιφανειακών καθιζήσεων έχει ο συντελεστής ουδετέρων ωθήσεων  $K_0$ , όπου όσο μικρότερος είναι του 1, τόσο μεγαλύτερες καθιζήσεις θα αναπτυχθούν, ενώ δεν υφίσταται έντονη επιρροή της μεγαλύτερης πυκνότητας αγκυρίων μετώπου fiberglass στην μείωση των επιφανειακών καθιζήσεων, διότι ο συντελεστής  $\Delta_F$  έχει συμπεριλάβει την προσφερόμενη πίεση των αγκυρίων μετώπου fiberglass.

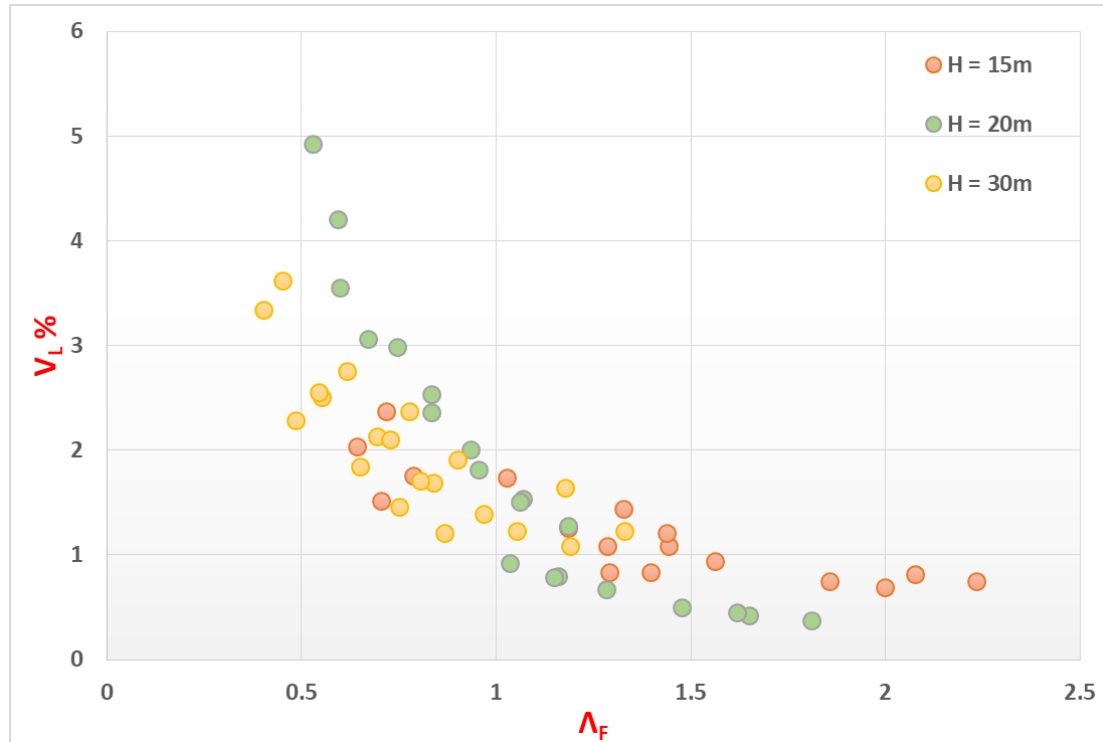
Στη συνέχεια, παρατίθεται η καμπύλη εδαφικών καθιζήσεων (Διάγραμμα 38) κατά μήκος του άξονα της σήραγγας για ένα σχετικά ασθενές έδαφος (S1), συναρτήσει της προσφερόμενης ή μη πίεσης μετώπου και της αντίστοιχης χρήσης ή μη δοκών προπορείας (forepole) για συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων  $K_0=0.5$  και ύψος υπερκείμενων γαιών  $H=20m$ .



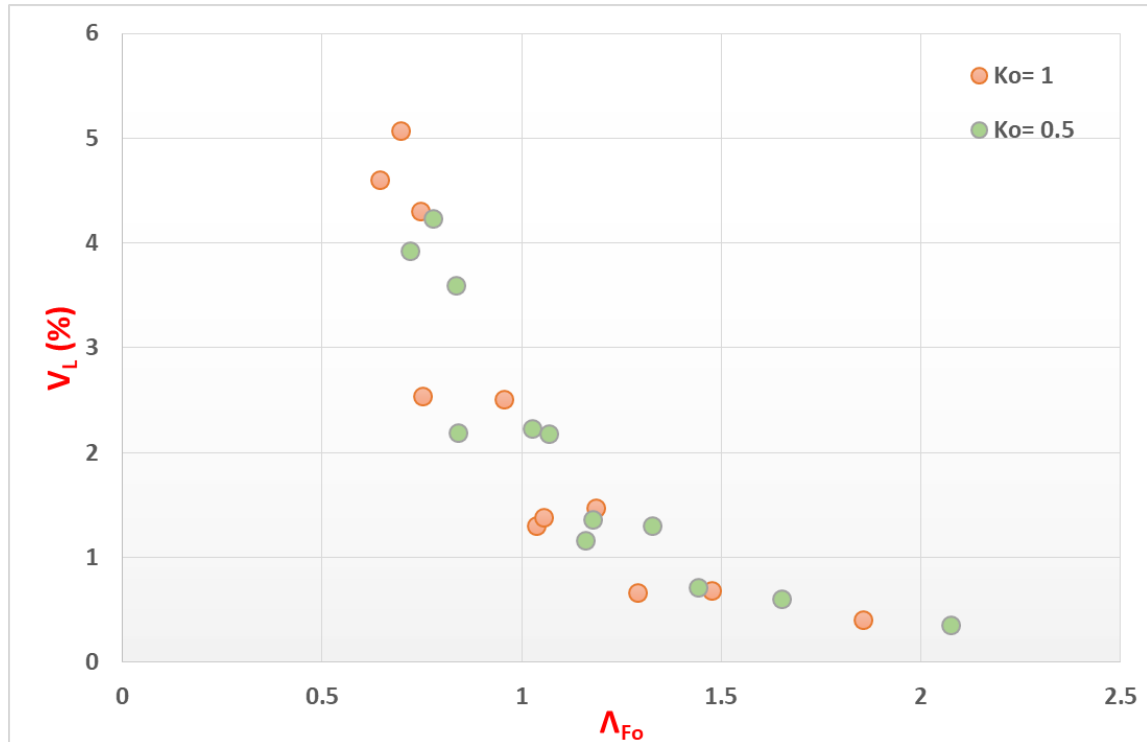
*Διάγραμμα 38 : Διαμήκες προφίλ εδαφικών καθιζήσεων για ένα ασθενές έδαφος σε σχέση με την προσφερόμενη πίεση μετώπου και τη χρήση ή μη δοκών προπορείας (forepole).*

Από το παραπάνω Διάγραμμα, παρατηρείται ότι η συνεισφορά των δοκών προπορείας στη μείωση των επιφανειακών καθιζήσεων, ανεξαρτήτως της πυκνότητας του καννάβου των αγκυρίων μετώπου, είναι σχεδόν αμελητέα.

Από το σύνολο των αριθμητικών αναλύσεων, προκύπτει ότι οι συγκλίσεις ισορροπούν σε απόσταση μιας διαμέτρου (1D) πίσω από το μέτωπο εκσκαφής. Στη συνέχεια, αποτυπώνεται η απώλεια εδαφικού όγκου ( $V_L$ ), σε σχέση με τον συντελεστή ασφαλείας  $\Lambda_F$  συναρτήσει των υπερκείμενων γαιών (H) και του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων ( $K_0$ ), όπως παρουσιάζεται στα Διαγράμματα 39 και 40.



Διάγραμμα 39 : Αποτύπωση απώλειας εδαφικού όγκου ( $V_L$ ) βάσει συντελεστή ευστάθειας  $\Lambda_F$  για διαφορετικά υπερκείμενα.



*Διάγραμμα 40 : Αποτύπωση απώλειας εδαφικού όγκου ( $V_L$ ) βάσει συντελεστή ευστάθειας  $\Lambda_F$  για διαφορετική τιμή του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων  $K_o$ .*

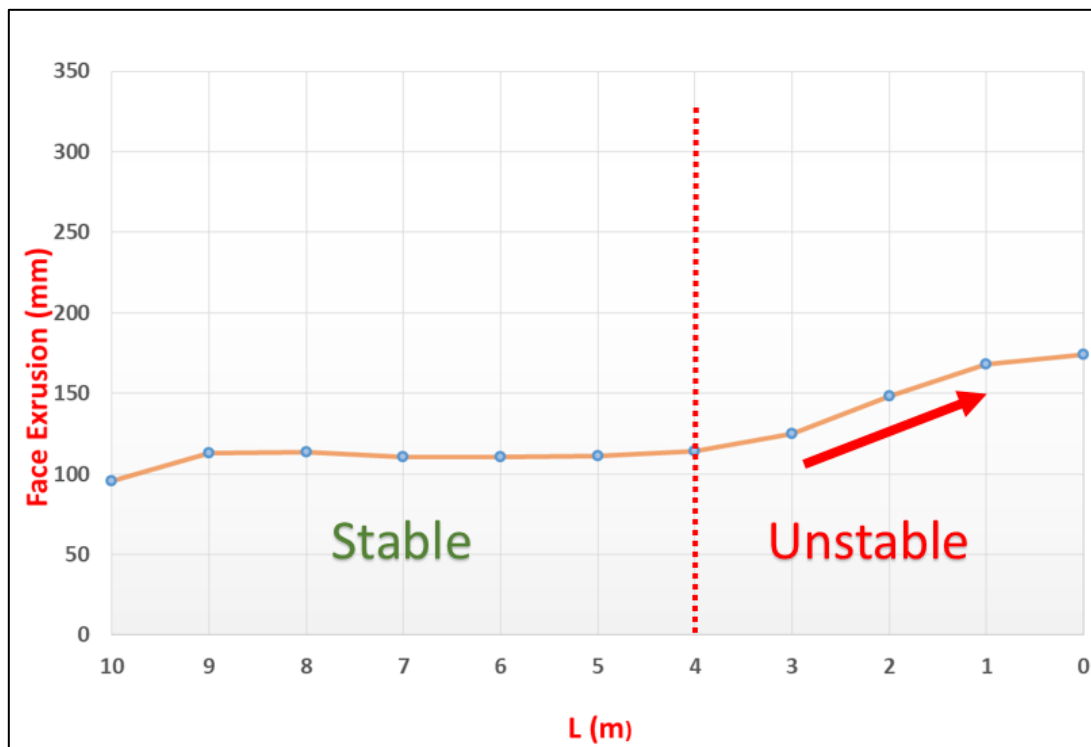
Από τα παραπάνω Διαγράμματα, είναι εμφανές ότι για τιμές  $\Lambda_F < 1$ , δηλαδή συνθήκες για αστοχία μετώπου εκσκαφής, η απώλεια εδαφικού όγκου  $V_L$  αυξάνεται, διότι είναι παράγωγο μέγεθος της εξώθησης του μετώπου εκσκαφής  $\Omega_F$ , η οποία αυξάνεται, όπως και στο ανυποστήρικτο μέτωπο και στην προϋποστήριξη μετώπου μόνο με αγκύρια fiberglass.

#### **7.4. ΕΥΡΕΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΑΓΚΥΡΙΩΝ ΜΕΤΩΠΟΥ ΕΚΣΚΑΦΗΣ FIBERGLASS**

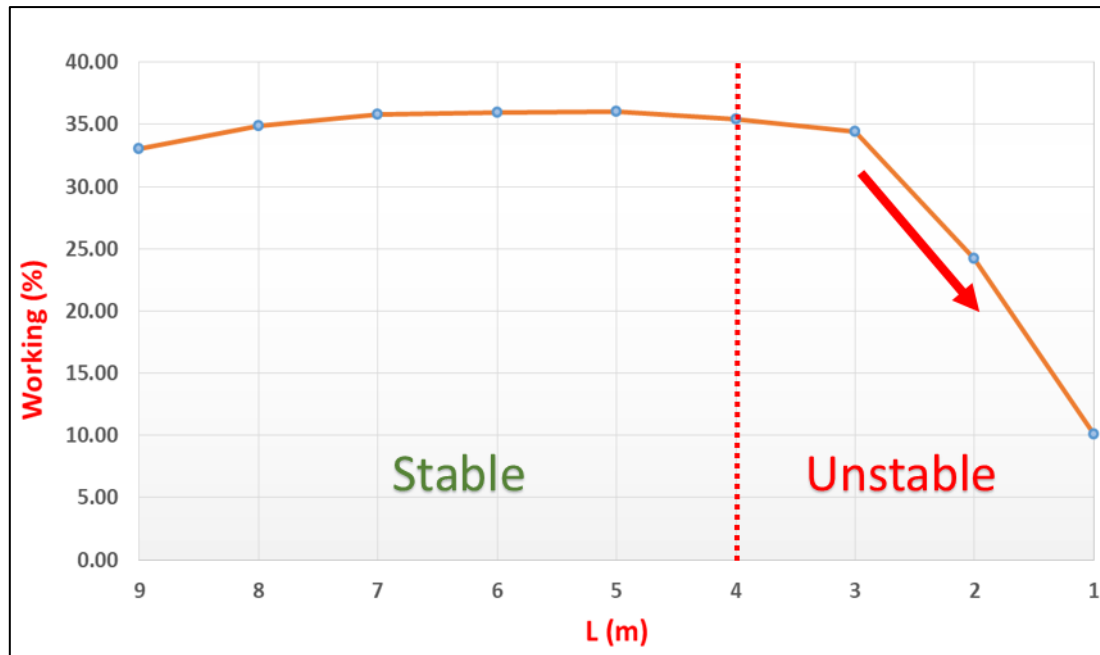
Ένα από τα σημαντικότερα πεδία έρευνας της παρούσας εργασίας είναι η εύρεση του βέλτιστου μήκους των αγκυρίων μετώπου fiberglass, όταν αυτά χρησιμοποιούνται για την προϋποστήριξη του μετώπου εκσκαφής. Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζεται το βέλτιστο μήκος, ώστε να εξασφαλίζεται μείωση των εξωθήσεων και ταυτόχρονα μη διαρροή των αγκυρίων, όταν το μέτωπο ενισχύεται ταυτόχρονα με τη χρήση δοκών προπορείας forepole.

Για το σύνολο των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν, καταγράφονταν σε κάθε βήμα εκσκαφής οι μετρούμενες εξωθήσεις του μετώπου και η αναπτυσσόμενη τάση των

αγκυρίων μετώπου fiberglass, όταν στην υποστήριξη συνεισφέρει και η χρήση δοκών προπορείας. Καθώς εξελισσόταν η εκσκαφή, μειωνόταν το μήκος των αγκυρίων και πέραν κάποιου εναπομείναντος διαθέσιμου μήκους, παρατηρούνταν εκθετική αύξηση στις εξωθήσεις και ταυτόχρονα είχε ήδη καταγραφεί η μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση στα αγκύρια. Στο σημείο αυτό, θεωρείται ότι προκαλείται η αστοχία του μετώπου εκσκαφής, διότι οι εξωθήσεις αυξάνουν εκθετικά (Διάγραμμα 41) και τα αγκύρια φορτίζονται στο μέγιστο δυνατό και μετά αποφορτίζονται, διότι παύουν να λειτουργούν (Διάγραμμα 42).



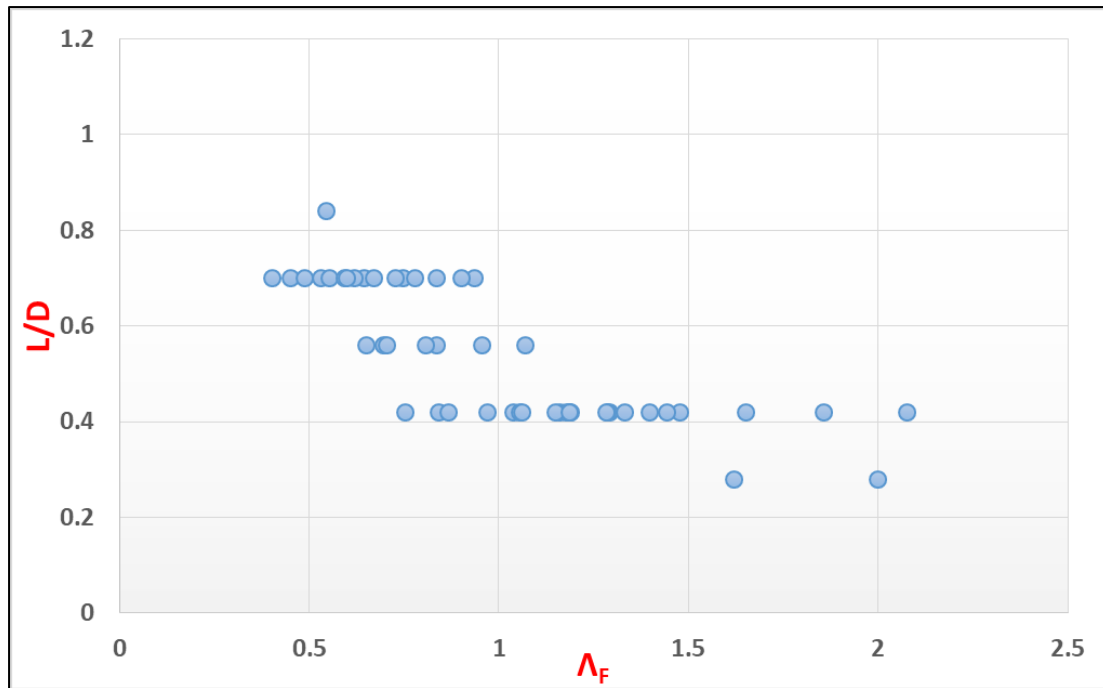
Διάγραμμα 41 : Εύρεση βέλτιστου μήκους αγκυρίων βάσει μετρούμενων εξωθήσεων



Διάγραμμα 42 : Εύρεση βέλτιστου μήκους αγκυρίων βάσει φορτίου λειτουργίας αγκυρίων.

Με βάση την παραπάνω μέθοδο, προκύπτει ότι το ελάχιστο δυνατό μήκος αλληλοεπικάλυψης των αγκυρίων στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι στα 4m.

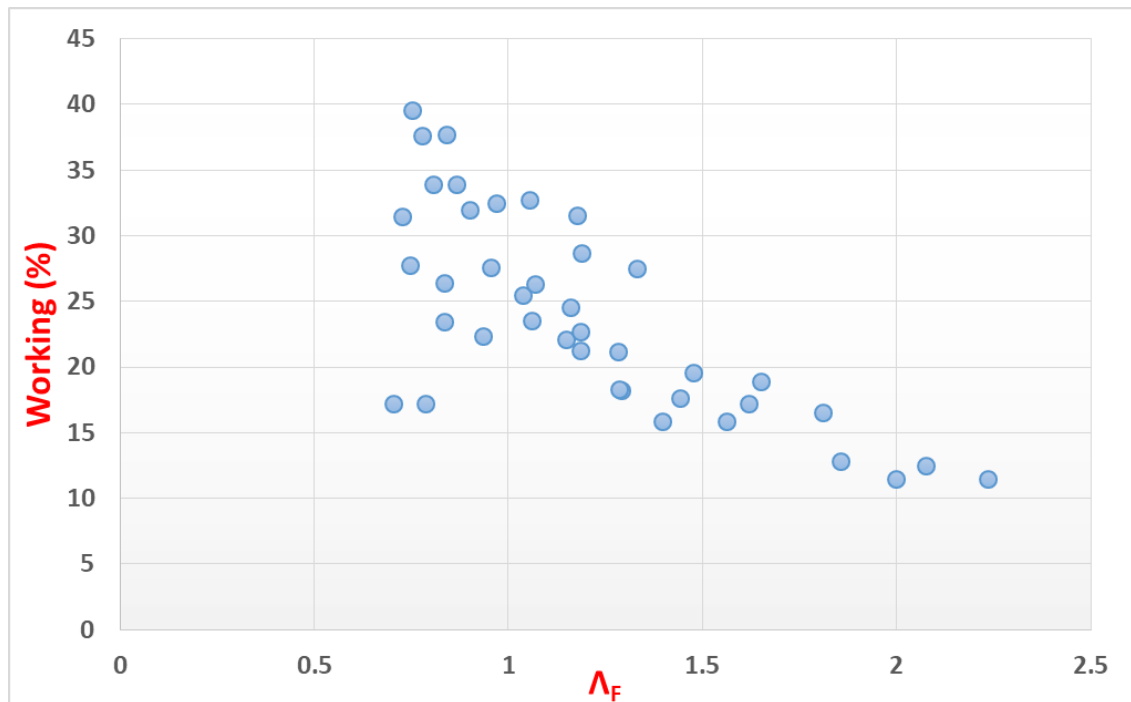
Για το σύνολο των αριθμητικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν, στο Διάγραμμα 43, αποτυπώνεται ο λόγος βέλτιστου μήκους αγκυρίων προς την διάμετρο της σήραγγας ( $L/D$ ), σε σχέση με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου εκσκαφής  $\Lambda_F$ .



*Διάγραμμα 43 : Συσχέτιση βέλτιστου μήκους αγκυρίων μετώπου εκσκαφής fiberglass με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου  $\Lambda_F$ , όταν το μέτωπο ενισχύεται ταυτόχρονα με τη χρήση δοκών προπορείας.*

Από το παραπάνω Διάγραμμα, παρατηρείται πολύ καλή ταύτιση μεταξύ του λόγου (L/D) με τον συντελεστή ευστάθειας μετώπου εκσκαφής  $\Lambda_F$ . Η αναλυτική συσχέτιση αυτών των δυο παραμέτρων θα πραγματοποιηθεί στο Κεφάλαιο 8.

Τέλος στο Διάγραμμα 44, παρατίθεται η συσχέτιση μεταξύ του φορτίου λειτουργίας (working) των αγκυρίων μετώπου fiberglass με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου εκσκαφής  $\Lambda_F$ . Από το Διάγραμμα, γίνεται αντιληπτό ότι για περιπτώσεις ασταθούς μετώπου  $\Lambda_F < 1$ , υπάρχει εκθετική αύξηση στο φορτίο λειτουργίας των αγκυρίων, διότι πλέον συνεισφέρουν στην ευστάθεια του μετώπου. Η αναλυτική συσχέτιση αυτών των δυο παραμέτρων θα πραγματοποιηθεί στο Κεφάλαιο 8.



Διάγραμμα 44 : Συσχέτιση φορτίου λειτουργίας αγκυρίων μετώπου fiberglass με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου  $\Lambda_F$ , όταν το μέτωπο ενισχύεται με τη χρήση δοκών προπορείας.





**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ  
ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ**



### 8.1. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί, παρατίθενται τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Τα συμπεράσματα επικεντρώνονται κυρίως στα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων, με σκοπό την μόρφωση κατάλληλων σχέσεων για σύνδεση βασικών μεγεθών, όπως το βέλτιστο μήκος αγκυρίων ή η πλαστική ζώνη με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου  $\Lambda_{F_0}$ .

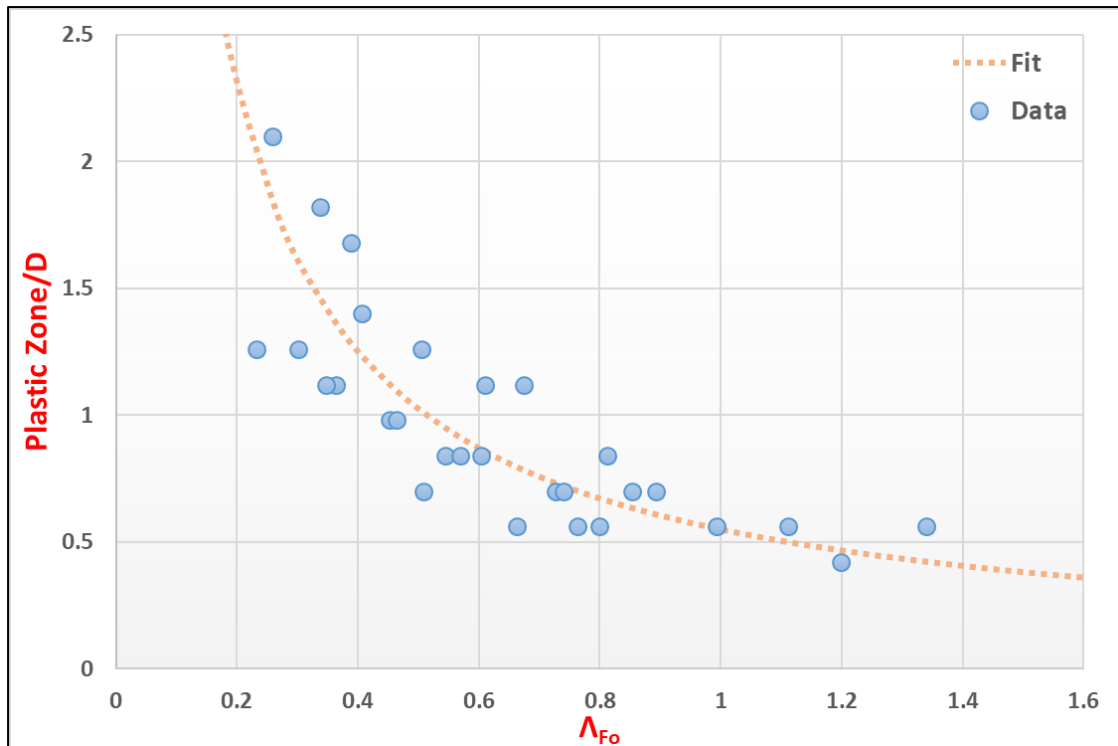
Εντός των επιμέρους κεφαλαίων, έχουν ήδη προκύψει κάποια βασικά συμπεράσματα τα οποία και έχουν καταγραφεί, όπως η επιρροή των υπερκειμένων γαιών (H) ή του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων ( $K_0$ ) στο μέγεθος των εξωθήσεων του μετώπου εκσκαφής.

✓ **Συσχέτιση εύρους πλαστικής ζώνης εμπροσθεν του μετώπου εκσκαφής με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου  $\Lambda_{F_0}$**

Στο κεφάλαιο στο οποίο παρατίθενται τα αποτελέσματα από τις αριθμητικές αναλύσεις για ανυποστήρικτο μέτωπο εκσκαφής (Κεφάλαιο 5), πραγματοποιήθηκε καταγραφή της αναπτυσσόμενης πλαστικής ζώνης (plastic zone), κατά την διάνοιξη της σήραγγας εμπροσθεν του μετώπου εκσκαφής. Τα αποτελέσματα αυτά συσχετίστηκαν με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου εκσκαφής  $\Lambda_{F_0}$  και προέκυψε μια εκθετική συσχέτιση αυτών των δυο μεγεθών, όπως παρουσιάζεται στα Διαγράμματα 13 και 14.

Η συσχέτιση αυτή είναι χρήσιμη, ώστε να μπορέσει να προεκτιμηθεί η ζώνη επιρροής μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής, προκειμένου να αποφευχθούν φαινόμενα αλληλεπίδρασης με άλλα έργα ή να προεκτιμηθεί το κατάλληλο μήκος αγκύρωσης με αγκύρια μετώπου fiberglass, εφόσον αποφασιστεί η προϋποστήριξη του μετώπου εκσκαφής.

Στη συνέχεια, παρατίθεται η συσχέτιση αυτών των δυο μεγεθών (plastic zone vs  $\Lambda_{F_0}$ ), όπως παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 45, η οποία προκύπτει μέσω εκθετικής συσχέτισης.



Διάγραμμα 45 : Μόρφωση σχέσης για συσχέτιση εύρους πλαστικής ζώνης εμπροσθεν του μετώπου εκσκαφής με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου  $\Lambda_{Fo}$ .

Από το παραπάνω Διάγραμμα, μορφώνεται η ακόλουθη σχέση για συσχέτιση των δυο βασικών μεγεθών (Plastic Zone/D &  $\Lambda_{Fo}$ ):

$$\frac{\text{Plastic zone}}{D} = 0.55 \times \Lambda_{Fo}^{-0.9}$$

Για παράδειγμα, εάν μία ρηχή σήραγγα ισοδύναμης διαμέτρου  $D=10\text{m}$ , διανοίγεται σε στιφρή άργιλο, με συνοχή  $c=50\text{ kPa}$ , γωνία τριβής  $\varphi=20^\circ$ , ειδικό βάρος εδάφους  $\gamma=22\text{ kN/m}^3$ , συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων  $K_0=0.7$  και το ύψος των υπερκείμενων γαιών από τον άξονα της σήραγγας είναι  $H=40\text{m}$ , τότε προκύπτει:

- ✓ Συντελεστής ευστάθειας μετώπου:  $\Lambda_{Fo}=0.83$
- ✓ Πλαστική ζώνη εμπρός από το μέτωπο εκσκαφής:  $L=6.5\text{m}$

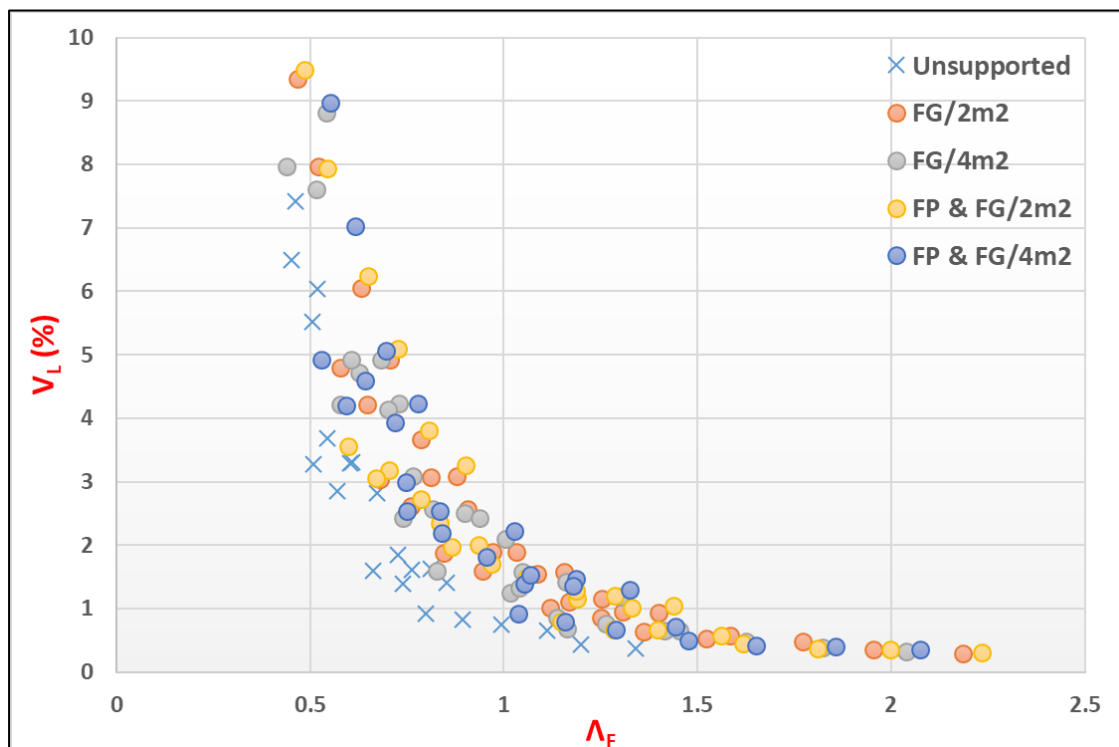
Επίσης, από το παραπάνω Διάγραμμα προκύπτει ότι για συνθήκες ευστάθειας μετώπου εκσκαφής  $\Lambda_{Fo} \geq 1$ , η πλαστική ζώνη που θα αναπτυχθεί μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής παραμένει σταθερή και είναι  $0.4 - 0.5 D$ .

✓ Συσχέτιση απώλειας εδαφικού όγκου εκσκαφής  $V_L(\%)$  με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου  $\Lambda_{F0}$

Στο κεφάλαιο, στο οποίο παρατίθενται τα αποτελέσματα από τις αριθμητικές αναλύσεις τόσο για ανυποστήρικτο μέτωπο εκσκαφής (Κεφάλαιο 5), όσο και για εφαρμογή προϋποστήριξης με αγκύρια fiberglass ή και δοκούς προπορείας (Κεφάλαια 6 & 7), εκτιμήθηκε η απώλεια εδαφικού όγκου εκσκαφής  $V_L(\%)$  βάσει της καταγραφόμενης εξώθησης μετώπου εκσκαφής, με την παραδοχή ότι προκύπτει ισορροπία στις μετακινήσεις σε απόσταση μιας (1) διαμέτρου ( $D$ ) πίσω από το μέτωπο εκσκαφής.

Η απώλεια εδαφικού όγκου υπολογίστηκε με την ακόλουθη σχέση:  $V_L = \frac{2 \times U_h}{D}$ , όπου  $U_h$  είναι η μετρούμενη εξώθηση του μετώπου εκσκαφής.

Στο Διάγραμμα, παρατίθεται η αποτύπωση της απώλειας εδαφικού όγκου ( $V_L$ ) με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου εκσκαφής  $\Lambda_F$  για διαφορετικές συνθήκες προϋποστήριξης ή μη του μετώπου.

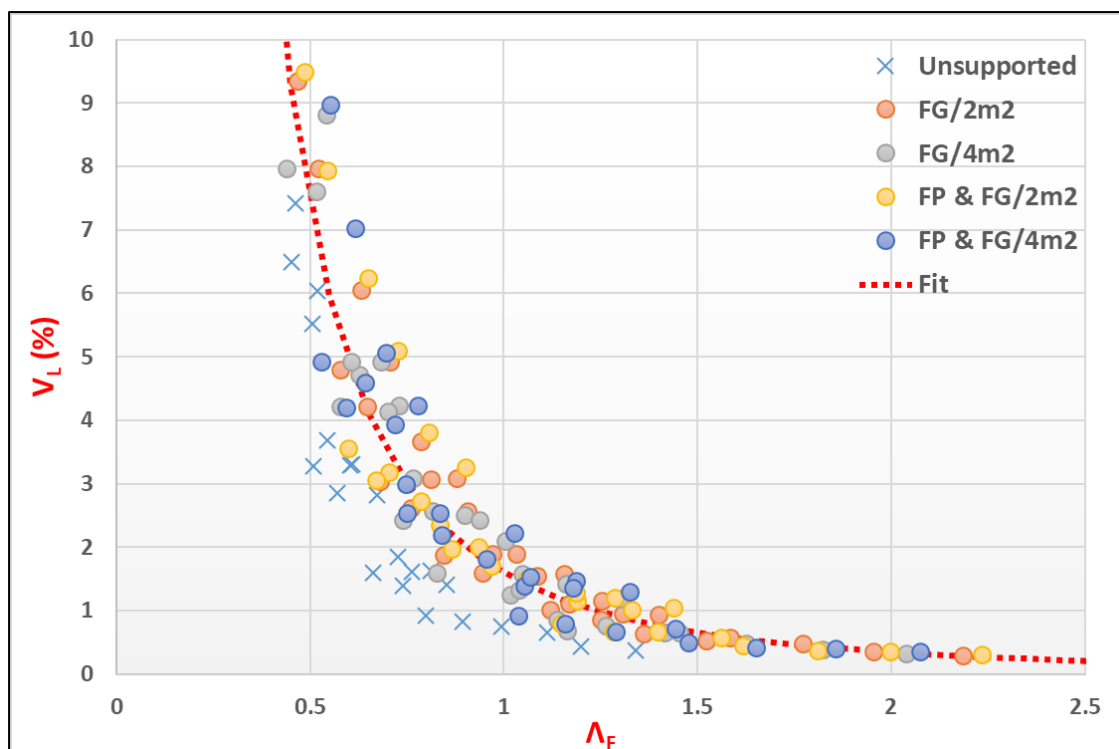


Διάγραμμα 46 : Αποτύπωση της απώλειας εδαφικού όγκου εκσκαφής  $V_L (\%)$  σε σχέση με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου  $\Lambda_F$  για διάφορες περιπτώσεις προϋποστήριξης ή μη του μετώπου εκσκαφής.

Από το παραπάνω Διάγραμμα, παρατηρείται ότι με την εφαρμογή των μέτρων προϋποστήριξης μετώπου εκσκαφής θα περιοριστεί η απώλεια εδαφικού όγκου ( $V_L$ ), διότι σχετίζεται άμεσα με την εξώθηση του μετώπου εκσκαφής και με την εφαρμογή των μέτρων προϋποστήριξης μετώπου. Στόχος είναι να επιτευχθεί σημαντική μείωση των εξωθήσεων.

Επίσης, προκύπτει ότι η συνεισφορά των δοκών προπορείας (forepoling) είναι πολύ μικρή και δεν έχει άμεση επιρροή στα αποτελέσματα.

Στη συνέχεια, στο Διάγραμμα 47 γίνεται εκθετική συσχέτιση μεταξύ των δυο βασικών μεγεθών ( $V_L$  &  $\Lambda_F$ ).



*Διάγραμμα 47 : Μόρφωση σχέσης για συσχέτιση της απώλειας εδαφικού όγκου εκσκαφής  $V_L$  με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου  $\Lambda_F$ .*

Από το παραπάνω Διάγραμμα, μορφώνεται η ακόλουθη σχέση για συσχέτιση των δυο βασικών μεγεθών ( $V_L$  (%) &  $\Lambda_F$ ):

$$V_L(\%) = 1.6 \times \Lambda_F^{-2.2}$$

Για παράδειγμα, εάν μία ρηχή σήραγγα ισοδύναμης διαμέτρου  $D=10\text{m}$  διανοίγεται σε στιφρή άργιλο, με συνοχή  $c=50\text{ kPa}$ , γωνία τριβής  $\varphi=20^\circ$ , ειδικό βάρος εδάφους  $\gamma=22\text{ kN/m}^3$ , συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων  $K_0=0.7$  και το ύψος των υπερκείμενων γαιών από τον άξονα της σήραγγας είναι  $H=40\text{m}$ , τότε προκύπτει:

- ✓ Συντελεστής ευστάθειας μετώπου:  $\Lambda_{F0}=0.83$
- ✓ Απώλεια εδαφικού όγκου εκσκαφής:  $V_L=2.4\%$

Ακολούθως, εάν εφαρμοστεί προϋποστήριξη του μετώπου εκσκαφής με αγκύρια μετώπου fiberglass φέρουσας ικανότητας  $160\text{ kN}$  με πυκνότητα  $1\text{ αγκύριο} / 2\text{ m}^2$ , τότε προκύπτει:

- ✓ Συντελεστής ευστάθειας μετώπου:  $\Lambda_F=1.29$
- ✓ Απώλεια εδαφικού όγκου εκσκαφής:  $V_L=0.9\%$

Ως αποτέλεσμα, είναι εμφανής από το παραπάνω Διάγραμμα η σημαντική συνεισφορά των μέτρων προϋποστήριξης μετώπου εκσκαφής τόσο στην αύξηση του συντελεστή ευστάθειας μετώπου  $\Lambda_F$ , όσο και στον περιορισμό της απώλειας εδαφικού όγκου  $V_L$  και κατ' επέκταση στις επιφανειακές καθιζήσεις που προκαλούνται από την διάνοιξη των σηράγγων.

*Επίσης, από το παραπάνω Διάγραμμα προκύπτει ότι για συνθήκες ευστάθειας μετώπου εκσκαφής  $\Lambda_F \geq 1$ , η απώλεια εδαφικού όγκου εκσκαφής  $V_L$  παραμένει μικρότερη από 1%.*

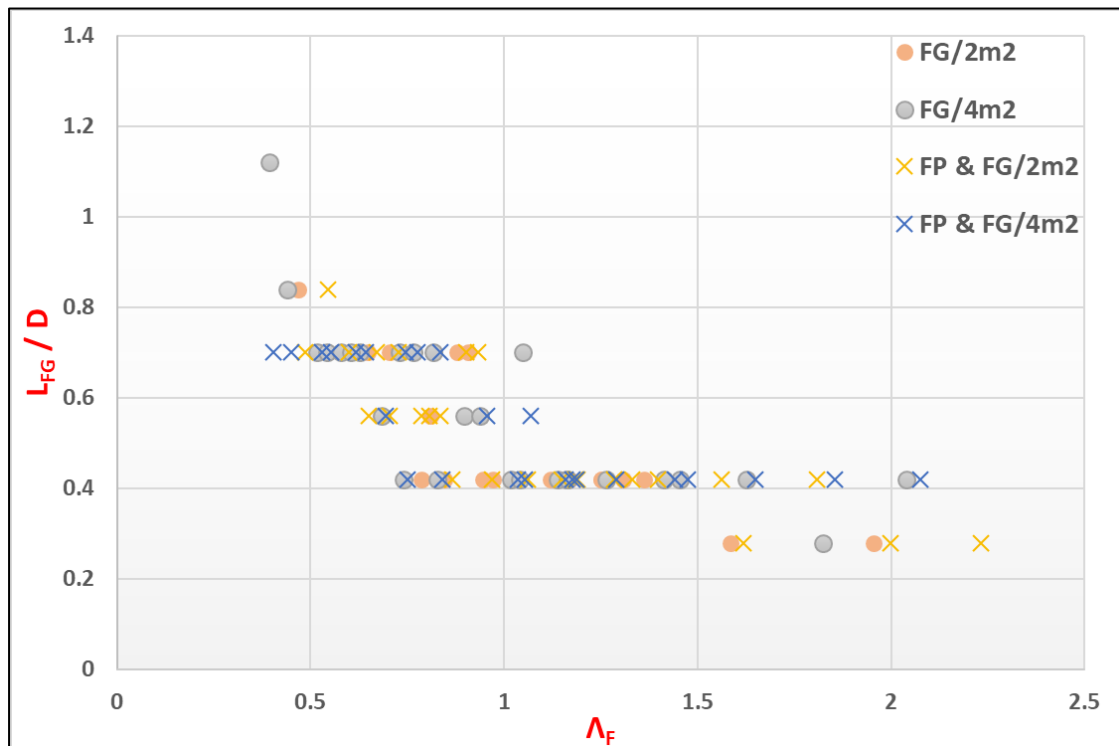
✓ **Εκτίμηση βέλτιστου μήκους αλληλοεπικάλυψης (overlap area) αγκυρίων μετώπου fiberglass**

Ο βασικότερος σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν να εκτιμήσει τα βέλτιστα χαρακτηριστικά της προϋποστήριξης μετώπου με αγκύρια μετώπου fiberglass και ειδικότερα να εντοπίσει ποιο θα πρέπει να είναι το βέλτιστο μήκος αλληλοεπικάλυψης (overlap area) κατά την εφαρμογή τους, ώστε να συνεισφέρουν στο μέγιστο δυνατό.

Όπως έχει ήδη περιγραφεί στην εργασία, το μήκος της αλληλοεπικάλυψης (overlap area) σε περιπτώσεις που εφαρμόζεται προϋποστήριξη με αγκύρια fiberglass, ορίζεται στα 3-4m. Από τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων της παρούσας εργασίας,

προέκυψε ότι το μήκος αυτό μεταβάλλεται και εξαρτάται άμεσα από τα γεωμετρικά και γεωτεχνικά χαρακτηριστικά της εκσκαφής.

Στο Διάγραμμα, παρατίθεται το βέλτιστο μήκος αγκυρίων μετώπου fiberglass σε σχέση με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου εκσκαφής  $\Lambda_F$ , για διαφορετικές συνθήκες προϋποστήριξης του μετώπου.

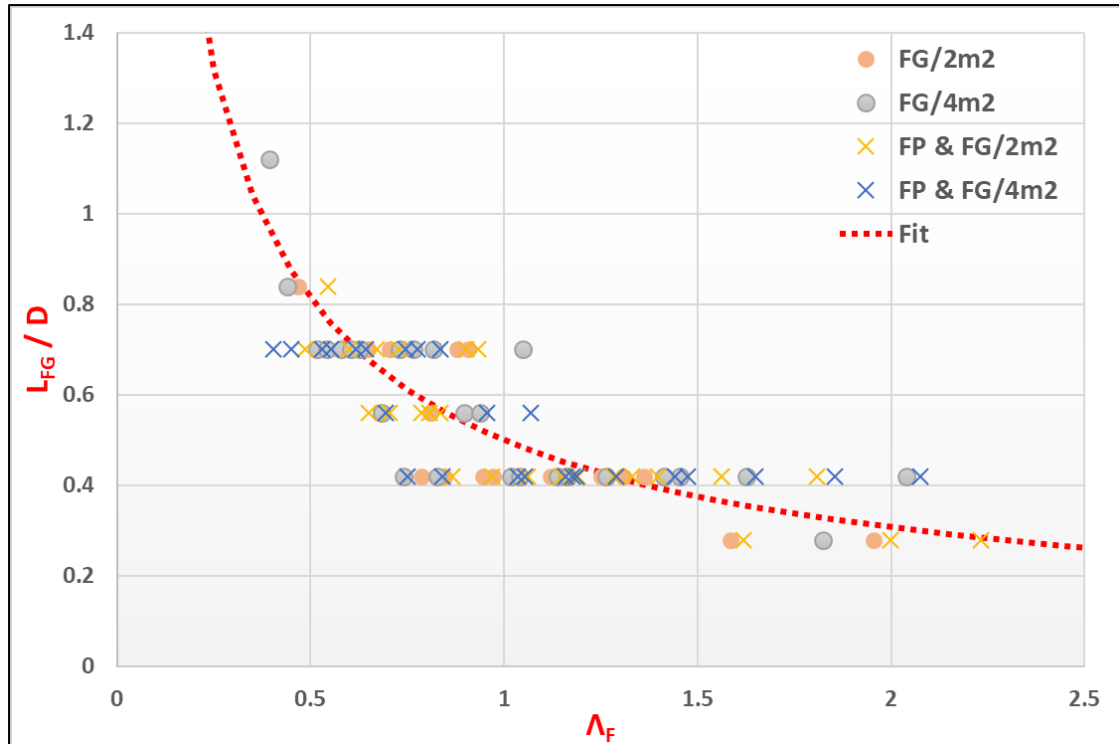


*Διάγραμμα 48 : Αποτύπωση του βέλτιστου μήκους αγκυρίων fiberglass σε σχέση με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου  $\Lambda_F$  για διάφορες περιπτώσεις προϋποστήριξης του μετώπου εκσκαφής.*

Από το παραπάνω Διάγραμμα, γίνεται αντιληπτό ότι η επιρροή των δοκών προπορείας (forepoling) στο βέλτιστο μήκος των αγκυρίων είναι πολύ μικρή.

Στη συνέχεια στο Διάγραμμα 49, γίνεται εκθετική συσχέτιση του βέλτιστου μήκους αγκυρίων fiberglass με τον συντελεστή ευστάθειας μετώπου  $\Lambda_F$ . Η συσχέτιση είναι κοινή για εφαρμογή ή μη δοκών προπορείας (forepoling), λόγω της μικρής συνεισφοράς των τελευταίων.





Διάγραμμα 49 : Μόρφωση σχέσης για συσχέτιση του βέλτιστου μήκους αγκυρίων fiberglass με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου  $\Lambda_F$ .

Από το παραπάνω Διάγραμμα, μορφώνεται η ακόλουθη σχέση για συσχέτιση των δυο βασικών μεγεθών ( $L_{FG}$  &  $\Lambda_F$ ):

$$\frac{L_{FG}}{D} = 0.5 \times \Lambda_F^{-0.7}$$

Για παράδειγμα εάν μία ρηχή σήραγγα ισοδύναμης διαμέτρου  $D=10\text{m}$ , διανοίγεται σε στιφρή άργιλο, με συνοχή  $c=50\text{kPa}$ , γωνία τριβής  $\varphi=20^\circ$ , ειδικό βάρος εδάφους  $\gamma=22\text{kN/m}^3$ , συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων  $K_0=0.7$  και το ύψος των υπερκείμενων γαιών από τον άξονα της σήραγγας είναι  $H=40\text{m}$ , τότε προκύπτει:

- ✓ Συντελεστής ευστάθειας μετώπου:  $\Lambda_{F0} = 0.83$

Στη συνέχεια, εάν εφαρμοστεί προϋποστήριξη του μετώπου εκσκαφής με αγκύρια μετώπου fiberglass φέρουσας ικανότητας  $160\text{ kN}$  με πυκνότητα  $1$  αγκύριο /  $2\text{ m}^2$ , τότε προκύπτει:

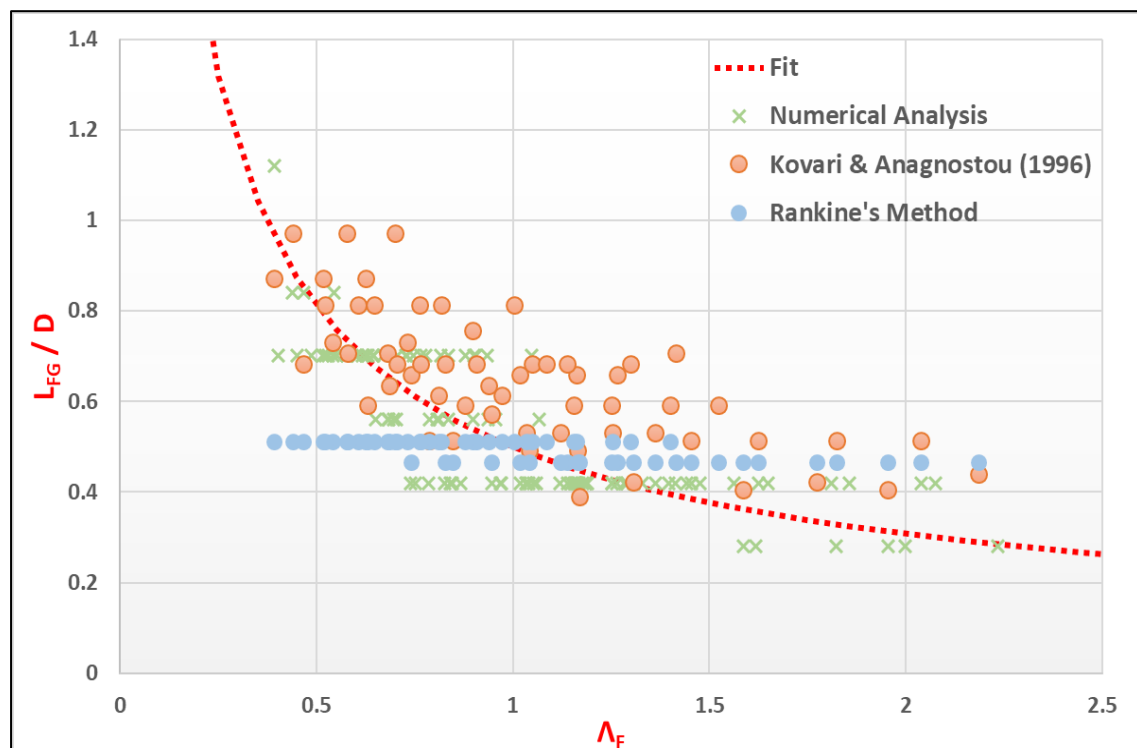
- ✓ Συντελεστής ευστάθειας μετώπου:  $\Lambda_F = 1.29$
- ✓ Βέλτιστο μήκος αλληλοεπικάλυψης (overlap area):  $L = 4.2\text{m}$

Από το παραπάνω Διάγραμμα, προκύπτει ότι, για συνθήκες ευστάθειας μετώπου εκσκαφής  $\Lambda_F \geq 1$ , το βέλτιστο μήκος αλληλοεπικάλυψης αγκυρίων μετώπου fiberglass, είναι μικρότερο από  $0.4 D$ , ενώ καθώς ο συντελεστής  $\Lambda_F < 1$ , τότε το μήκος αυξάνει εκθετικά.

✓ Σύγκριση προτεινομένης συσχέτισης βέλτιστου μήκους αλληλοεπικάλυψης (overlap area) αγκυρίων μετώπου fiberglass με άλλες βιβλιογραφικές μεθόδους

Στο επόμενο στάδιο, γίνεται συσχέτιση της προηγούμενης σχέσης για την εύρεση του βέλτιστου μήκους αλληλοεπικάλυψης αγκυρίων fiberglass, με προτεινόμενες βιβλιογραφικές μεθόδους. Συγκριμένα, χρησιμοποιείται η σχέση Kovari & Anagnostou (1996) και η μέθοδος Rankine.

Στο Διάγραμμα, παρατίθεται η παραπάνω συσχέτιση.



Διάγραμμα 50 : Συσχέτιση προτεινομένης σχέσης εύρεσης βέλτιστου μήκους αγκυρίων fiberglass με άλλες βιβλιογραφικές μεθόδους.

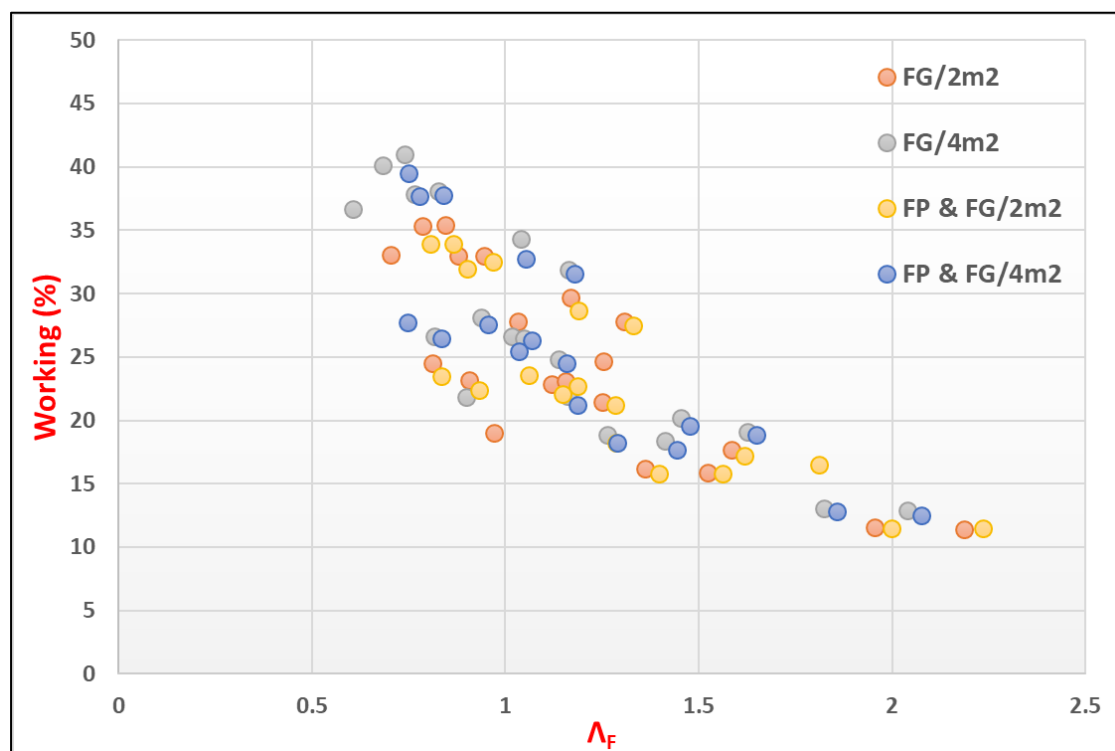
Από το παραπάνω Διάγραμμα, γίνεται αντιληπτό ότι η μέθοδος Kovari & Anagnostou, δίνει αποτελέσματα πολύ κοντά στην προτεινομένη από την παρούσα εργασία μέθοδο εύρεσης του βέλτιστου μήκους αγκυρίων fiberglass, διότι η μέθοδος Kovari & Anagnostou λαμβάνει υπόψιν την πίεση υποστήριξης μετώπου.

Αντίθετα, η μέθοδος Rankine δεν έχει μεγάλη ταύτιση με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, διότι αφενός δεν λαμβάνει υπόψιν την προϋποστήριξη του μετώπου και αφετέρου βασίζεται μόνο στην γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους.

✓ **Φορτίο λειτουργίας (working) αγκυρίων μετώπου fiberglass**

Από το σύνολο των αριθμητικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν, γινόταν συστηματική καταγραφή της αναπτυσσόμενης τάσης στα αγκύρια μετώπου fiberglass.

Στο Διάγραμμα 51, παρουσιάζεται το φορτίο λειτουργίας (working) στα αγκύρια μετώπου fiberglass σε σχέση με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου  $\Lambda_F$ , ανάλογα την μέθοδο προϋποστήριξης του μετώπου εκσκαφής.

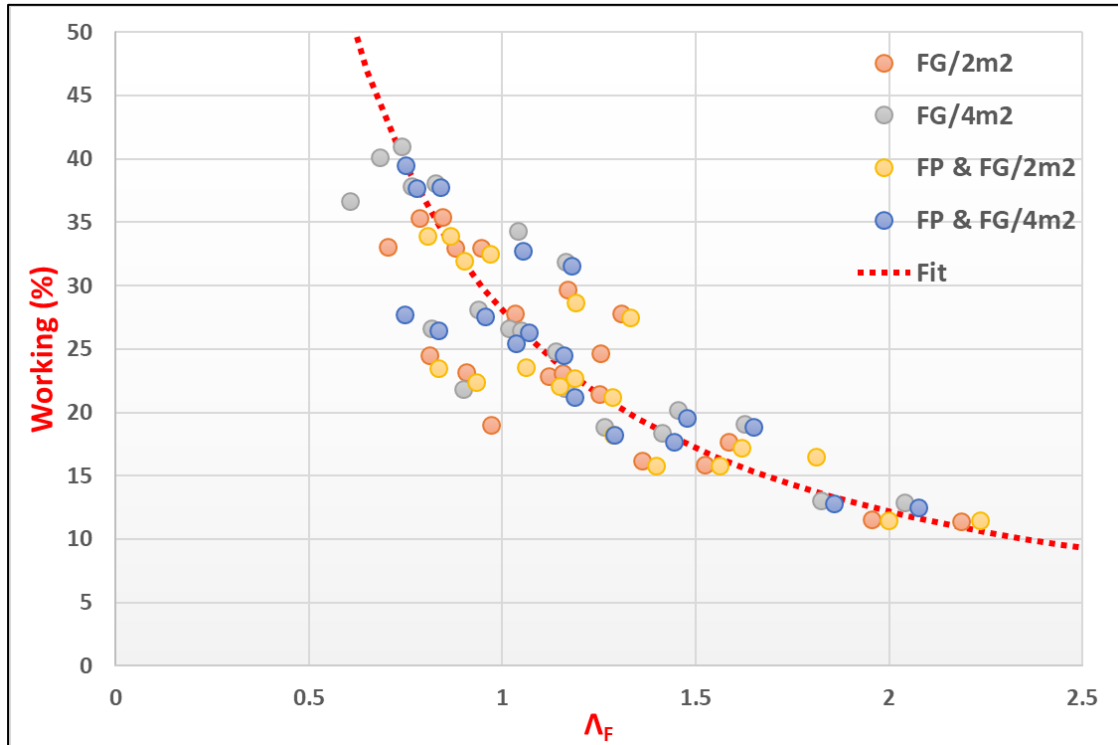


*Διάγραμμα 51 : Αποτύπωση φορτίου λειτουργίας αγκυρίων fiberglass σε σχέση με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου  $\Lambda_F$  για διάφορες περιπτώσεις προϋποστήριξης του μετώπου εκσκαφής.*

Από το παραπάνω Διάγραμμα, προκύπτει ότι η επιρροή των δοκών προπορείας (forepoling) στο φορτίο λειτουργίας των αγκυρίων μετώπου fiberglass είναι πολύ μικρή.

Στο Διάγραμμα 52, γίνεται εκθετική συσχέτιση του φορτίου λειτουργίας των αγκυρίων fiberglass με τον συντελεστή ευστάθειας μετώπου  $\Lambda_F$ . Η συσχέτιση είναι κοινή για

εφαρμογή ή μη δοκών προπορείας (forepoling), λόγω της μικρής συνεισφοράς των τελευταίων.



Διάγραμμα 52 : Μόρφωση σχέσης για συσχέτιση του φορτίου λειτουργίας των αγκυρίων fiberglass με τον συντελεστή ασφαλείας μετώπου  $\Lambda_F$ .

Από το παραπάνω Διάγραμμα, μορφώνεται η ακόλουθη σχέση για συσχέτιση των δυο βασικών μεγεθών (Working (%) &  $\Lambda_F$ ):

$$Working\ of\ FG\ (\%) = 28 \times \Lambda_F^{-1.2}$$

Για παράδειγμα, εάν μία ρηχή σήραγγα ισοδύναμης διαμέτρου  $D=10m$ , διανοίγεται σε στιφρή άργιλο με συνοχή  $c=50kPa$ , γωνία τριβής  $\varphi=20^\circ$ , ειδικό βάρος εδάφους  $\gamma=22kN/m^3$ , συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων  $K_0=0.7$  και το ύψος των υπερκείμενων γαιών από τον άξονα της σήραγγας είναι  $H=40m$ , τότε προκύπτει:

✓ Συντελεστής ευστάθειας μετώπου:  $\Lambda_{F0}=0.83$

Εάν εφαρμοστεί προϋποστήριξη του μετώπου εκσκαφής με αγκύρια μετώπου fiberglass, φέρουσας ικανότητας  $160\ kN$  με πυκνότητα  $1$  αγκύριο /  $2\ m^2$ , τότε προκύπτει:

✓ Συντελεστής ευστάθειας μετώπου:  $\Lambda_F=1.29$

- ✓ Φορτίο λειτουργίας αγκυρίων fiberglass: **Working of FG=20.6%**

*Από το παραπάνω Διάγραμμα, προκύπτει ότι, για συνθήκες ευστάθειας μετώπου εκσκαφής  $AF \geq 1$ , το φορτίο λειτουργίας των αγκυρίων μετώπου fiberglass είναι μικρότερο από 30%.*

Συνοψίζοντας, η παρούσα διπλωματική εργασία εξέτασε στο μέγιστο δυνατό την επιρροή της προϋποστήριξης του μετώπου εκσκαφής σήραγγων με αγκύρια μετώπου τύπου fiberglass.

Προέκυψε ως βασικό συμπέρασμα ότι η συμβολή τους είναι πολύ μεγάλη στον περιορισμό των εξωθήσεων του μετώπου εκσκαφής και κατ' επέκταση σε ρηχές σήραγγες συμβάλλει σημαντικά στην μείωση των επιφανειακών καθιζήσεων, που προκαλούνται από την διάνοιξη της σήραγγας.

Επίσης, διαπιστώθηκε ότι οι δοκοί προπορείας (forepoling) δεν συνεισφέρουν σημαντικά στην μείωση των εξωθήσεων του μετώπου εκσκαφής.

Η εργασία κατέληξε σε ένα πολύ βασικό συμπέρασμα, την συσχέτιση του βέλτιστου μήκους αγκυρίων fiberglass σε σχέση με τα γεωμετρικά και γεωτεχνικά δεδομένα της εκσκαφής. Με τον τρόπο αυτό, δίνεται η δυνατότητα στον μελετητή να μπορέσει να διαστασιολογήσει ορθά την προϋποστήριξη του μετώπου με αγκυρώσεις fiberglass.

## **8.2. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ**

Τέλος, η παρούσα εργασία προτείνει για περαιτέρω διερεύνηση:

- ✓ Την εξέταση του βέλτιστου μήκους αγκυρίων fiberglass σε σήραγγες με μεγαλύτερο ύψος υπερκείμενων γαιών.
- ✓ Την επιρροή άλλων καταστατικών μοντέλων προσομοίωσης του εδάφους, στα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας.
- ✓ Την εξέταση του βέλτιστου μήκους των δοκών προπορείας (forepoling).
- ✓ Την επιρροή του νερού στα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας.



**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. Αργυροπούλου Μ. (2020), *Αριθμητική προσομοίωση της επιρροής αβαθών σηράγγων στην εκδήλωση επιφανειακών καθιζήσεων*, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π.
2. Γεωργίου Δ., Τσαπέκης Ι. & Καββαδάς Μ., *Διερεύνηση της Επιρροής των Μέτρων Υποστήριξης στην Ευστάθεια του Μετώπου Αβαθών Σηράγγων*
3. Γεωργόπουλος Γ. (2003), *Σημειώσεις Υπογείων Έργων, Σημειώσεις Μαθήματος*, Ε.Μ.Π., Σ.Α.Τ.Μ.
4. Καββαδάς Μ. (2012), *Σημειώσεις Σχεδιασμού Υπογείων Έργων*, Σημειώσεις Μαθήματος, Ε.Μ.Π., Δ.Π.Μ.Σ Σ.Κ.Υ.Ε
5. Νομικός Π. Παύλος (2015), *Εισαγωγή στη Μηχανική Πετρωμάτων*, ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΩΝ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΩΝ
6. Προυντζόπουλος Γ. (2012), *Διερεύνηση της Ευστάθειας Μετώπου Εκσκαφής Αβαθών Σηράγγων*, Διδακτορική Διατριβή, Ε.Μ.Π.
7. Σοφιανός Ι. Αλέξανδρος (2015), *Υποστήριξη Υπογείων Έργων*, ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΩΝ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΩΝ
8. Σοφιανός Ι. Αλέξανδρος (2018), *Διάνοιξη Σηράγγων*, ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
9. Τσαπέκης Γ. Ιωάννης (2019), *Ανάλυση Ευστάθειας Μετώπου Αβαθούς Σήραγγας με Χρήση Δοκών Προπορείας (Forepoles) & Αγκυρίων Μετώπου (Fiberglass)*, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π.
10. ΕΛΕΒΟΡ Α.Ε.Β.Ε. Ελληνικός Γεωτεχνικός Εξοπλισμός, *“Στοιχεία Αγκύρωσης και Ενισχύσεων Υαλονημάτων. Fiberglass Anchoring and Reinforcing Systems”*