

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/359508582>

# Βέλτιστος σχεδιασμός μέτρων προϋποστήριξης του μετώπου εκσκαφής σηράγγων – Optimal design of the tunnel face pre-support measures

Article · March 2022

CITATIONS

0

READS

207

4 authors, including:



**Dimitrios Georgiou**  
National Technical University of Athens

8 PUBLICATIONS 3 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



**Efstathia Diakoumi**  
National Technical University of Athens

1 PUBLICATION 0 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



**Georgios Georgakopoulos**  
National Technical University of Athens

1 PUBLICATION 0 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Investigation of the Influence of Face Support Measures on the Stability of Shallow Tunnels [View project](#)



Tunnelling [View project](#)

# Επιστημονικό Άρθρο

## Βέλτιστος σχεδιασμός μέτρων προϋποστήριξης του μετώπου εκσκαφής σηράγγων

### Optimal design of the tunnel face pre - support measures

ΓΕΩΡΓΙΟΥ Δ.  
ΓΕΩΡΓΑΚΟΠΟΥΛΟΣ Γ.  
ΔΙΑΚΟΥΜΗ Ε.  
ΜΑΛΑΝΔΡΑΚΗ Α.

Μεταλλειολόγος Μηχανικός PhD, MSc, Ε.Μ.Π.  
Μεταλλειολόγος Μηχανικός MSc, Ε.Μ.Π.  
Αγρονόμος Τοπογράφος MSc, Ε.Μ.Π.  
Πολιτικός Μηχανικός MSc, Ε.Μ.Π.

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Η παρούσα εργασία εξετάζει τον βέλτιστο γεωμετρικό σχεδιασμό των μέτρων προϋποστήριξης του μετώπου εκσκαφής σε περιπτώσεις συμβατικής διάνοιξης σηράγγων με χρήση ομπρέλας δοκών προπορείας (forepoling umbrella) ή αγκυρώσεων μετώπου από υαλόνημα (fiberglass nails). Σκοπός του βέλτιστου σχεδιασμού αυτών των μέτρων, είναι η εξασφάλιση της σταθερότητας του μετώπου εκσκαφής, με την πάκτωση αυτών στον υγιές τμήμα της βραχόμαζας έμπροσθεν του μετώπου εκσκαφής και της εδαφικής σφήνας (μάζας) που τείνει να ολισθήσει προς το εσωτερικό της σήραγγας.

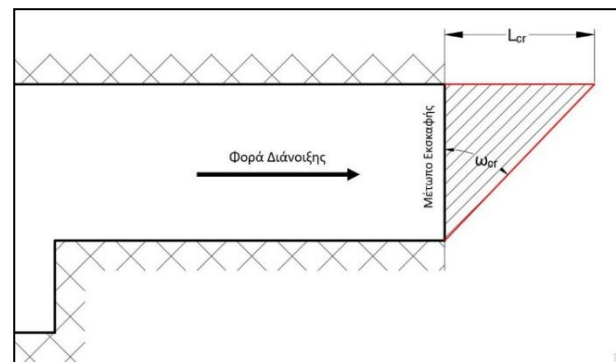
**ABSTRACT:** The present study, investigates the optimum design of the tunnel face pre - support by using forepoling umbrella or fiberglass nails, in cases of conventional tunnel excavation. The optimum design of the tunnel face pre - support, aims to stabilize the tunnel face by anchoring the tunnel face pre - support measures in the fresh part of rock mass in front of the tunnel face and out of the wedge that forms in the tunnel face and tends to slide inside the tunnel.

#### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Σε περιπτώσεις προϋποστήριξης του μετώπου εκσκαφής με ομπρέλα δοκών προπορείας (forepoling umbrella) ή αγκυρώσεις μετώπου από υαλόνημα (fiberglass nails), θα πρέπει να εξασφαλίζεται η απαραίτητη κατά μήκος πάκτωση αυτών στο υγιές τμήμα της βραχόμαζας έμπροσθεν του μετώπου εκσκαφής και εκτός του εδαφικού πρίσματος που σχηματίζεται εμπρός αυτού. Η πάκτωση σε

αυτή την υγιή περιοχή, θα εξασφαλίσει την ορθή λειτουργία των προαναφερθέντων μέτρων, μεταβιβάζοντας τα φορτία σε αυτή την περιοχή και σίγουρα μειώνοντας την πιθανότητα αστοχίας και κατάρρευσης του μετώπου εκσκαφής.

Η εκτίμηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών αυτής της εδαφικής σφήνας που σχηματίζεται έμπροσθεν του μετώπου εκσκαφής, έχει περιγράψει από την εφαρμογή της θεωρίας σιλό με την μέθοδο οριακής ισορροπίας (Anagnostou and Kovari, 1994), όπου το μέτωπο θα έχει την δυσμενέστερη γωνία ολίσθησης ( $\omega_{crit}$ ) για το μικρότερο συντελεστή ευστάθειας (SF). Επιπροσθέτως, η μέγιστη απόσταση επιρροής ( $L_{cr}$ ) (Σχήμα 1) που αναπτύσσεται έμπροσθεν του μετώπου εκσκαφής και καθορίζει το ελάχιστο μήκος των μέτρων προϋποστήριξης του μετώπου εκσκαφής, μπορεί να καθοριστεί από το πρίσμα ολίσθησης που περιγράφει η θεωρία Rankine συναρτήσει της γωνίας εσωτερικής τριβής του εδάφους ( $\varphi$ ), όπου θα συμβεί ολίσθηση του πρίσματος με εσωτερική γωνία  $\omega = 45^\circ - \varphi/2$ .



Σχήμα 1. Πρίσμα ολίσθησης μετώπου εκσκαφής και ελάχιστο απαιτούμενο μήκος ( $L_{cr}$ ) στοιχείων προϋποστήριξης.

Σήμερα μια συνήθης πρακτική που εφαρμόζεται στον σχεδιασμό σηράγγων, είναι η εξασφάλιση μιας περιοχής αλληλοεπικάλυψης μεταξύ των συνεχόμενων μέτρων προϋποστήριξης του μετώπου εκσκαφής, της τάξης των 3 ~ 4m, ώστε να καλύπτεται το βάθος του πρίσματος που τείνει να ολισθήσει. Σε αρκετές περιπτώσεις ασθενούς βραχόμαζας, έχει αποδειχτεί ότι αυτό το μήκος αλληλοεπικάλυψης μεταξύ των στοιχείων προϋποστήριξης είναι μη αποδοτικό, με αποτέλεσμα να προκαλείται η κατάρρευση του μετώπου εκσκαφής και η ταυτόχρονη αστοχία και εξόγκωση των ίδιων των στοιχείων προϋποστήριξης.

Η παρούσα έρευνα εξετάζει την ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής και τον βέλτιστο γεωμετρικό σχεδιασμό των μέτρων προϋποστήριξης αυτού, μέσω τριδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Simulia ABAQUS. Μέσω των αναλύσεων αυτών, είναι εύκολο να γίνει προσομοίωση των μέτρων προϋποστήριξης του μετώπου εκσκαφής κάτω από διαφορετικές συνθήκες εντατικής φόρτισης και μηχανικών παραμέτρων του εκσκαπόμενου γεωυλικού, ώστε να διαπιστωθεί ποια είναι η επιρροή αυτών των παραμέτρων στο απαιτούμενο μήκος της προϋποστήριξης του μετώπου εκσκαφής. Συγκεκριμένα εξετάζονται περιπτώσεις προϋποστήριξης του μετώπου εκσκαφής είτε με ομπρέλα δοκών προπορείας (forepoling umbrella), είτε με αγκυρώσεις μετώπου από υαλόνημα (fiberglass nails), τόσο για ρηχές όσο και για βαθιές εκσκαφές σε ασθενείς βραχόμαζες, όπου κρίνεται αναγκαία η προϋποστήριξη του μετώπου εκσκαφής.

Για την εύρεση του βέλτιστου μήκους των στοιχείων προϋποστήριξης γίνεται συστηματική καταγραφή ανά εναπομείναν μήκος στοιχείου προϋποστήριξης, α) της εξώθησης ( $U_h$ ) του μετώπου εκσκαφής b) της αναπτυσσόμενης καμπτικής ροπής ( $M$ ) των δοκών προπορείας και c) της αναπτυσσόμενης εφελκυστικής τάσης ( $P_t$ ) στις αγκυρώσεις μετώπου τύπου fiberglass nails. Στο σημείο όπου καταγράφεται ραγδαία άνοδος των προαναφερθέντων μεγεθών σε συνάρτηση με το εναπόμειναν τμήμα των στοιχείων προϋποστήριξης του μετώπου εκσκαφής, έχει προκληθεί αστοχία του μετώπου εκσκαφής και συνεπώς τα μέτρα προϋποστήριξης παύουν να

είναι λειτουργικά και το μήκος αυτό ανά εξεταζόμενη περίπτωση, ορίζεται ως το ελάχιστο μήκος αλληλοεπικάλυψης μεταξύ των στοιχείων προϋποστήριξης ( $L_{overlap}$ ).

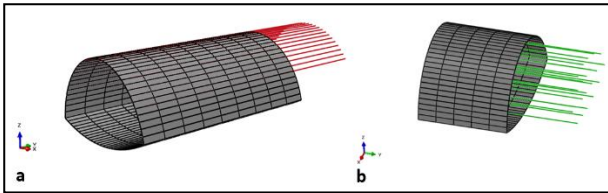
Στα πλαίσια της παρούσας έρευνας μορφώθηκαν αριθμητικές σχέσεις που προσδιορίζουν το ελάχιστο μήκος αλληλοεπικάλυψης της προϋποστήριξης του μετώπου εκσκαφής, είτε με ομπρέλα δοκών προπορείας – forepoling umbrella ( $L_{FP}$ ), είτε με αγκυρώσεις μετώπου από υαλόνημα – fiberglass nails ( $L_{FG}$ ), σε συνάρτηση με τον συντελεστή ευστάθειας μετώπου  $\Lambda_f$  (Georgiou et al., 2021).

## 2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ – ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

Η εξέταση του βέλτιστου σχεδιασμού των στοιχείων προϋποστήριξης του μετώπου εκσκαφής, πραγματοποιήθηκε μέσω τριδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων (3D) με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Simulia ABAQUS, καθώς η συμπεριφορά των μέτρων αυτών εξαρτάται από την τριδιάσταση παραμόρφωση και συμπεριφορά του μετώπου εκσκαφής της σήραγγας.

Οι παραμετρικές αναλύσεις, αποσκοπούν στην εξέταση της επιρροής α) του ύψους των υπερκείμενων γαιών της εκσκαφής ( $H$ ), b) της αντοχής της βραχόμαζας ( $\sigma_{cm}$ ), c) του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων του εδάφους ( $K_0$ ), d) της δυσκαμψίας της ομπρέλας των δοκών προπορείας – forepoling umbrella ( $I_{FP}$ ) και e) της πυκνότητας των αγκυρών μετώπου – fiberglass nails ( $\rho$ ), στην μεταβολή του ελάχιστου απαιτούμενου μήκους αλληλοεπικάλυψης ( $L_{FP}$ ,  $L_{FG}$ ) των στοιχείων προϋποστήριξης του μετώπου εκσκαφής.

Στις αναλύσεις (Σχήμα 2) έγινε προσομοίωση τμηματικής εκσκαφής σήραγγας πεταλοειδούς διατομής με ισοδύναμη διάμετρο  $D=10m$  και αφορά μόνο το άνω τμήμα της διατομής (top heading) με την κατασκευή προσωρινού ανάστροφου τόξου. Σε κάθε ανάλυση αρχικά τοποθετούνται στοιχεία προϋποστήριξης (δοκοί προπορείας ή αγκυρώσεις από υαλόνημα) στο μέτωπο της εκσκαφής με μήκος 20m και γίνεται σταδιακή προχώρηση κατά 1m, όπου καταγράφεται τόσο η εξώθηση του μετώπου, όσο και τα εντατικά μεγέθη επί των στοιχείων προϋποστήριξης.



Σχήμα 2. a) Τριδιάστατη προσομοίωση ομπρέλας δοκών προπορείας (forepoling umbrella), b) Τριδιάστατη προσομοίωση αγκυρώσεων μετώπου από υαλόνημα (fiberglass nails).

Στις περιπτώσεις χρήσης ομπρέλας δοκών προπορείας (forepoling umbrella) και αγκυρώσεων από υαλόνημα (fiberglass nails), το ύψος των υπερκείμενων γαιών (H) από τον άξονα της εκσκαφής ορίστηκε από 15 - 50m, ενώ για τις αγκυρώσεις μετώπου από υαλόνημα (fiberglass nails) εξετάστηκαν και περιπτώσεις βαθιών εκσκαφών με ύψος υπερκείμενων γαιών μεταξύ 100 - 200m. Ο συντελεστής ουδετέρων ωθήσεων ( $K_o$ ), ελήφθη ίσος με 0.5 ή 1.

Στις περιπτώσεις ρηχών σηράγγων ( $H \leq 50m$ ), εφαρμόστηκε το κριτήριο αστοχίας Mohr Coulomb (Πίνακας 1), ενώ στις περιπτώσεις βαθιών σηράγγων ( $H \geq 50m$ ) εφαρμόστηκε το κριτήριο αστοχίας Generalized Hoek & Brown - 2002 (Πίνακας 2).

Πίνακας 1. Παράμετροι αντοχής για ρηχές σήραγγες ( $H \leq 50m$ ).

Ειδικό βάρος ( $\gamma$ ), kN/m <sup>3</sup>	20
Συνοχή (c), kPa	10 - 30
Γωνία εσωτερικής τριβής ( $\phi$ )	20 - 25°
Μέτρο ελαστικότητας ( $E_m$ ), MPa	40 - 150

Πίνακας 2. Παράμετροι αντοχής για βαθιές σήραγγες ( $H \geq 50m$ ).

Ειδικό βάρος ( $\gamma$ ), kN/m <sup>3</sup>	25
GSI	25 - 45
$m_i$	10
Αντοχή βραχόμαζας ( $\sigma_{cm}$ ), MPa	0.5 - 2.0
Μέτρο ελαστικότητας βραχόμαζας ( $E_m$ ), MPa	120 - 450

Όσον αφορά την ομπρέλα δοκών προπορείας (forepoling umbrella), έγινε παρομοίωση διατομής  $\Phi 114.3/100.3$  και  $\Phi 168.3/154.3$  σε αξονική απόσταση  $s = 50cm$  και χάλυβα S235, ενώ τα αγκύρια μετώπου έχουν φέρουσα ικανότητα  $f_u = 200kN$  έκαστο και τοποθετήθηκαν σε πυκνότητες  $\rho = 0.5 - 1.25$  αγκύρια/m<sup>2</sup>.

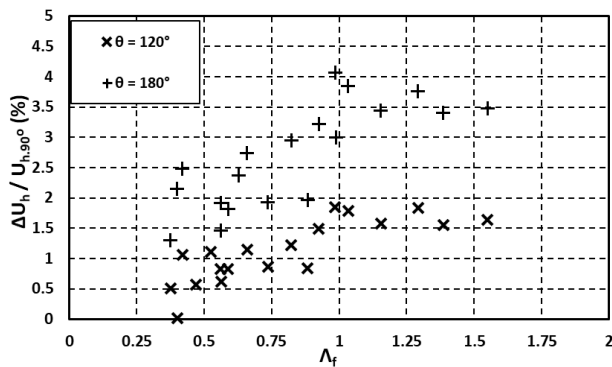
Για την αδιαστατικοποίηση των συμπερασμάτων της παρούσας εργασίας, εφαρμόζεται ο συντελεστής ευστάθειας μετώπου  $\Lambda_f$  (Georgiou et al., 2021), όπως περιγράφεται στην Εξ.1. Για τιμές του  $\Lambda_f < 1$  το μέτωπο χαρακτηρίζεται δυνητικά ασταθές, ενώ για τιμές του  $\Lambda_f \geq 1$  το μέτωπο χαρακτηρίζεται ευσταθές.

$$\Lambda_f = \frac{3.8 \times \left( \frac{\sigma_{cm}}{\gamma \times H} \right) \times \left( \frac{H}{D} \right)^{0.35}}{\sqrt{1 + \left( \frac{2}{3} \right) \times K_o}} \quad [Εξ. 1]$$

### 3. ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΟΜΠΡΕΛΑΣ ΔΟΚΩΝ ΠΡΟΠΟΡΕΙΑΣ (FOREPOLING UMBRELLA)

Η προϋποστήριξη του μετώπου εκσκαφής σηράγγων με ομπρέλα δοκών προπορείας (forepoling umbrella), επιδρά ευεργετικά στην επίτευξη της ευστάθειάς του. Η παρούσα έρευνα, εξέτασε την επιρροή της γωνίας ( $\theta$ ) του τόξου εφαρμογής των δοκών στην περίμετρο εκσκαφής, στην μείωση των εξωθήσεων του μετώπου εκσκαφής ( $U_h$ ). Παράλληλα, προσδιορίστηκε το βέλτιστο μήκος αλληλοεπικάλυψης ( $L_{FP}$ ) των παραπάνω δοκών. Από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για ρηχές σήραγγες ( $H \leq 50m$ ), προέκυψε πως η γωνία ( $\theta$ ) του τόξου εφαρμογής των δοκών προπορείας δεν επιδρά σημαντικά στην μείωση των εξωθήσεων του μετώπου εκσκαφής ( $U_h$ ), αλλά και στην μείωση των επιφανειακών καθιζήσεων (S).

Στα πλαίσια εξέτασης του βέλτιστου τόξου εφαρμογής της ομπρέλας των δοκών προπορείας - forepoling umbrella, εξετάσαν περιπτώσεις για γωνίες από 90° έως 180°. Από τις αναλύσεις, διαπιστώθηκε ότι η αύξηση του τόξου από 90° σε 180°, επέφερε μια περαιτέρω μείωση των εξωθήσεων του μετώπου εκσκαφής ( $U_h$ ), έως και 4%, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3. Επίδραση της γωνίας του τόξου εφαρμογής ( $\theta$ ) των δοκών προπορείας στην μείωση των εξωθήσεων ( $U_h$ ) του μετώπου εκσκαφής, σε σχέση με την ισοδύναμη εξώθηση για γωνιά τόξου  $\theta = 90^\circ$ .

Επομένως, αν συνυπολογιστεί και η αύξηση του κόστους που επιφέρει η εφαρμογή των δοκών προπορείας σε γωνία τόξου ( $\theta$ )  $180^\circ$ , προκύπτει πως η βέλτιστη γωνία εφαρμογής των δοκών προπορείας είναι αυτή των  $120^\circ$ , η οποία αφενός λειτουργεί υπέρ της ασφαλείας και αφετέρου καλύπτει ικανοποιητικό ποσοστό των παρειών της σήραγγας.

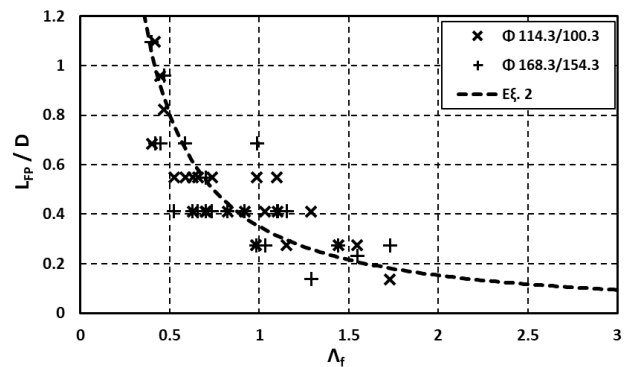
Όσον αφορά το βέλτιστο μήκος αλληλοεπικάλυψης ( $L_{FP}$ ) που θα πρέπει να έχει η ομπρέλα των δοκών προπορείας - forepoling umbrella, διαπιστώθηκε ότι είναι άμεση συνάρτηση των γεωτεχνικών συνθηκών του εκσκαπόμενου γεωυλικού και του επιτόπου εντατικού πεδίου και σίγουρα δεν είναι σταθερό. Επίσης διαπιστώθηκε ότι η μεταβολή της δυσκαμψίας των δοκών προπορείας, δεν έχει επιρροή στο απαιτούμενο μήκος αλληλοεπικάλυψης. Τα παραπάνω συμπεράσματα, παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.

Με βάση το διάγραμμα, μορφώθηκε η ακόλουθη μαθηματική σχέση που συσχετίζει το βέλτιστο μήκος αλληλοεπικάλυψης ( $L_{FP}$ ) που θα πρέπει να έχει η ομπρέλα των δοκών προπορείας - forepoling umbrella, με τον συντελεστή ευστάθειας μετώπου  $\Lambda_f$ .

$$\frac{L_{FP}}{D} = 0.35 \times \Lambda_f^{1.2} \quad [\text{Εξ. 2}]$$

, όπου  $D$  είναι η ισοδύναμη διάμετρος της εκσκαφής

Η παραπάνω σχέση, βρίσκει εφαρμογή τόσο σε ρηχές εκσκαφές με βάθος έως  $H \leq 50\text{m}$ .



Σχήμα 4. Συσχέτιση των αποτελεσμάτων για το ελάχιστο απαιτούμενο μήκος αλληλοεπικάλυψης ομπρέλας δοκών προπορείας - forepoling umbrella ( $L_{FP}$ ), σε συνάρτηση με τον συντελεστή ευστάθειας μετώπου  $\Lambda_f$ , για διάφορα βάθη εκσκαφής ( $H$ ).

Από την Εξ. 2, προκύπτει ότι για να έχουμε ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής ( $\Lambda_f \geq 1$ ), θα πρέπει να εξασφαλίζεται μήκος αγκυρώσεων ( $L_{FP}$ ) περί το 35% της διαμέτρου της εκσκαφής.

#### 4. ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΓΚΥΡΩΣΕΩΝ ΜΕΤΩΠΟΥ ΑΠΟ ΥΑΛΟΝΗΜΑ (FIBERGLASS NAILS)

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, διαπιστώθηκε ότι η προϋποστήριξη του μετώπου εκσκαφής, μέσω αγκυρώσεων μετώπου από υαλόνημα - fiberglass, συνεισφέρει σημαντικά στην μείωση των εξωθήσεων ( $U_h$ ) του μετώπου εκσκαφής, τόσο σε ρηχές όσο και σε βαθιές εκσκαφές.

Κατά την πραγματοποίηση εκσκαφών σε μικρά βάθη ( $H \leq 50\text{m}$ ), η προϋποστήριξη του μετώπου εκσκαφής με αγκύρια τύπου fiberglass, αυξάνει σημαντικά την πλευρική τάση  $\sigma_3$  στο μέτωπο εκσκαφής, με αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση των εξωθήσεων και κατά συνέπεια την αντιμετώπιση των επιφανειακών καθιζήσεων. Μεγάλες επιφανειακές καθιζήσεις είναι δυνατόν να προκαλέσουν βλάβες σε υπερκείμενες κατασκευές.

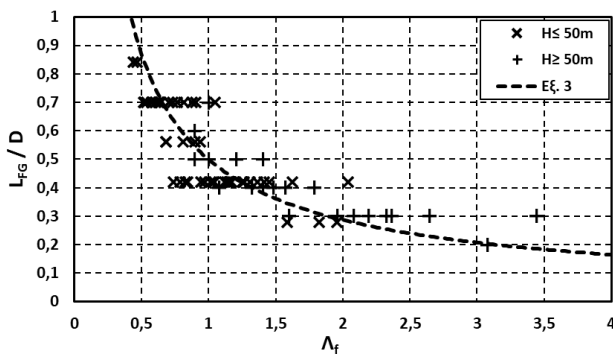
Από το σύνολο των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν για ρηχές εκσκαφές, προέκυψε ότι το ελάχιστο μήκος αλληλοεπικάλυψης των αγκυρώσεων μετώπου από υαλόνημα - fiberglass ( $L_{FG}$ ), εξαρτάται από τα μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους, καθώς και τις συνθήκες εντατικής φόρτισης. Επιπλέον, ακόμα και για αραιή πυκνότητα αγκυρώσεων, παρατηρήθηκε σημαντική μείωση των επιφανειακών καθιζήσεων ( $S$ ).



Σε ότι αφορά την πυκνότητα των αγκυρίων ( $\rho$ ), προέκυψε ότι, ανεξαρτήτως της τιμής του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων ( $K_0$ ), για πυκνότητα αγκυρίων μετώπου από υαλόνημα - fiberglass  $\rho = 0,5$  αγκύρια/ $m^2$ , εξασφαλίζεται σημαντικά μεγαλύτερη μείωση των εξωθήσεων μετώπου από ότι για πυκνότητα αγκυρίων μετώπου  $\rho = 0,25$  αγκύρια/ $m^2$ .

Στην περίπτωση εκσκαφών σε μεγάλα βάθη ( $H \geq 50m$ ), από τις παραμετρικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, διαπιστώθηκε η σημαντική αύξηση του εφελκυστικού τους φορτίου, καθώς με την αύξηση του βάθους υπάρχει και αντίστοιχη αύξηση της πλευρικής τάσης ( $\sigma_3$ ) στο μέτωπο εκσκαφής που προκαλεί αυτή την σημαντική αύξηση στο εφελκυστικό φορτίο των αγκυρώσεων μετώπου. Για τον λόγο αυτό και σε αντίθεση με την περίπτωση ρηχών εκσκαφών, επιλέχθηκε πιο πυκνός κάρναβος αγκυρίων έως και  $1.25$  αγκύρια/ $m^2$ , με σκοπό να παραμένουν λειτουργικές οι αγκυρώσεις και να μην αστοχούν λόγω μεγάλης φόρτισης.

Όπως και στις περιπτώσεις ρηχών εκσκαφών, έτσι και στις υπό εξέταση περιπτώσεις βαθιών εκσκαφών, διαπιστώθηκε ότι το απαιτούμενο ελάχιστο μήκος αλληλοεπικάλυψης των αγκυρώσεων μετώπου από υαλόνημα - fiberglass ( $L_{FG}$ ), εξαρτάται από τις εκάστοτε γεωτεχνικές συνθήκες και το βάθος εκσκαφής και σίγουρα δεν είναι σταθερό, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.



Σχήμα 5. Συσχέτιση των αποτελεσμάτων για το ελάχιστο απαιτούμενο μήκος αλληλοεπικάλυψης αγκυρώσεων μετώπου από υαλόνημα - fiberglass ( $L_{FG}$ ), σε συνάρτηση με τον συντελεστή ευστάθειας μετώπου  $\Lambda_f$ , για διάφορα βάθη εκσκαφής ( $H$ ).

Με βάση το προηγούμενο διάγραμμα, μορφώθηκε η ακόλουθη μαθηματική σχέση που συσχετίζει το βέλτιστο μήκος αλληλοεπικάλυψης ( $L_{FG}$ ) που θα πρέπει να

έχουν οι αγκυρώσεις μετώπου από υαλόνημα - fiberglass, με τον συντελεστή ευστάθειας μετώπου  $\Lambda_f$ . Η παρακάτω σχέση (Εξ. 3), βρίσκει εφαρμογή τόσο σε ρηχές όσο και σε βαθιές εκσκαφές.

$$\frac{L_{FG}}{D} = 0.5 \times \Lambda_f^{0.8} \quad [Εξ. 3]$$

, όπου  $D$  είναι η ισοδύναμη διάμετρος της εκσκαφής

Από την Εξ. 3, προκύπτει ότι για να έχουμε ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής ( $\Lambda_f \geq 1$ ), θα πρέπει να εξασφαλίζεται μήκος αγκυρώσεων ( $L_{FG}$ ) περί το 50% της διαμέτρου της εκσκαφής.

### 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια της παρούσας έρευνας, διαπιστώθηκε ότι το απαιτούμενο μήκος των στοιχείων προϋποστήριξης του μετώπου εκσκαφής σηράγγων ώστε να παραμένουν λειτουργικά, δεν είναι σταθερό αλλά εξαρτάται τόσο από τις επιτόπου γεωτεχνικές συνθήκες του υπεδάφους, όσο και από την εντακτική φόρτιση στο επίπεδο της εκσκαφής.

Η έρευνα καταλήγει στο συμπέρασμα, ότι υπάρχει σημαντικότερη μείωση στην εξώθηση του μετώπου εκσκαφής ( $U_h$ ), όταν το μέτωπο υποστηρίζεται με αγκυρώσεις από υαλόνημα - fiberglass, παρά με ομπρέλα δοκών προπορείας - forepoling umbrella. Ειδικότερα για τις αγκυρώσεις από υαλόνημα - fiberglass, διαπιστώθηκε ότι σε περίπτωση εφαρμογής τους σε βαθιές εκσκαφές, αυτές θα πρέπει να τοποθετηθούν σε πυκνούς κάρναβους ή τα ίδια τα αγκύρια να έχουν μεγάλη φέρουσα ικανότητα, διότι λαμβάνουν μεγάλο μέρος της πλευρικής τάσης  $\sigma_3$  και θα πρέπει να την αντισταθμίσουν.

Όσον αφορά την περίπτωση εφαρμογής της ομπρέλας των δοκών προπορείας - forepoling umbrella, η παρούσα εργασία καταλήγει στο συμπέρασμα ότι το βέλτιστο τόξο εφαρμογής στην περίμετρο της εκσκαφής, θα πρέπει να έχει γωνία  $\theta = 120^\circ$ . Μεγαλύτερες τιμές αυτής της γωνίας δεν επιφέρουν περαιτέρω μείωση της εξώθησης ( $U_h$ ) του μετώπου εκσκαφής, ενώ μικρότερη γωνία έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη μεγάλης πλαστικής ζώνης γύρω από την διατομή.

Επίσης από το σύνολο των παραμετρικών αναλύσεων, παρατηρήθηκε ότι η ασταθής ζώνη έμπροσθεν του μετώπου εκσκαφής που τείνει να αστοχήσει δεν έχει μορφή πρίσματος, αλλά αναπτύσσεται ένας βολβός αστοχίας, με το μεγαλύτερο βάθος περί το μέσον του μετώπου εκσκαφής, όπου και εκεί απαιτείται το μεγαλύτερο μήκος των αγκυρώσεων μετώπου από υαλόνημα – fiberglass. Σε περιπτώσεις χρήσης ομπρέλας δοκών προπορείας – forepoling umbrella, αυτές θα πρέπει να έχουν το απαιτούμενο μήκος αλληλοεπικάλυψης, όπως προκύπτει από την μεθοδολογία της παρούσας εργασίας. Τέλος, στις περιπτώσεις όπου εφαρμόστηκαν αγκυρώσεις μετώπου από υαλόνημα – fiberglass nails, εξετάστηκε και η περίπτωση συνδυασμένης προϋποστηρίξης του μετώπου εκσκαφής με ομπρέλα δοκών προπορείας – forepoling umbrella και διαπιστώθηκε ότι το απαιτούμενο μήκος αλληλοεπικάλυψης ( $L_{FG}$ ) που θα πρέπει να έχουν τα αγκύρια μετώπου από υαλόνημα – fiberglass nails, μειώνεται περί το 5 ~ 10% από ότι αν υπήρχαν μόνο οι αγκυρώσεις και για τον λόγο αυτό, προτείνεται να εφαρμόζεται η ΕΞ.3, ακόμα και στην περίπτωση της προαναφερθείσας συνδυασμένης προϋποστηρίξης του μετώπου εκσκαφής.

## 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Anagnostou, G., & Kovári, K. (1996). Face stability conditions with earth-pressure-balanced shields. *Tunnelling and underground space technology*, 11(2), 165-173.
- Georgiou, D., Kalos, A., & Kavvadas, M. (2022). 3D Numerical Investigation of Face Stability in Tunnels With Unsupported Face. *Geotechnical and Geological Engineering*, 40(1), 355-366.
- Kavvadas, M.; Georgiou, D.; Kalos, A. Numerical Investigation of Tunnel Face Stability Using Forepoling or Fiberglass Nails. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2021, 1-13.
- Oke, J., Vlachopoulos, N., & Diederichs, M. S. (2014). Numerical analyses in the design of umbrella arch systems. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6(6), 546-564.
- Perazzelli, P., & Anagnostou, G. (2019). Optimization of the tunnel face bolt reinforcement. In *Tunnels and underground cities: engineering and innovation meet archaeology, architecture and art* (pp. 1438-1447). CRC Press.
- Rankine, W.J.M. (1857) On the stability of loose earth. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Vol. 147, p. 9 – 27.
- Vlachopoulos, N., Oke, J., & Forbes, B. (2014). Determination of Mechanical Behaviour and Performance of Forepole Support Elements used in Tunnelling. *Canadian Geotechnical Society, GeoRegina, Regina, SK*.
- Γεωργακόπουλος, Γεώργιος. "Αριθμητική διερεύνηση του βέλτιστου τρόπου εφαρμογής μέτρων ευστάθειας μετώπου σε βαθιές σήραγγες." (2021).
- Διακουμή, Ευσταθία. "Αριθμητική διερεύνηση του βέλτιστου τρόπου εφαρμογής μέτρων ευστάθειας μετώπου σε ρηχές σήραγγες." (2020).
- Μαλανδράκη, Α. Μ. (2021). Σχεδιασμός της προϋποστηρίξης του μετώπου εκσκαφής με ομπρέλα δοκών προπορείας (forepoling umbrella).