

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/337217845>

Διερεύνηση της Επιρροής των Μέτρων Υποστήριξης στην Ευστάθεια του Μετώπου Αβαθών Σηράγγων Investigation of the Influence of Face Support Measures on the Stability of Shallow Tunnel...

Conference Paper · November 2019

CITATIONS

0

READS

208

3 authors:



Dimitrios Georgiou
National Technical University of Athens

8 PUBLICATIONS 3 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



John Tsapekis
National Technical University of Athens

3 PUBLICATIONS 0 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Michael Kavvadas
National Technical University of Athens

91 PUBLICATIONS 1,376 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

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



Tunnelling [View project](#)



Research in unsaturated soils [View project](#)

Διερεύνηση της Επιρροής των Μέτρων Υποστήριξης στην Ευστάθεια του Μετώπου Αβαθών Σηράγγων

Investigation of the Influence of Face Support Measures on the Stability of Shallow Tunnels

ΓΕΩΡΓΙΟΥ, Δ. Μεταλλειολόγος Μηχανικός MSc, Ε.Μ.Π.
ΤΣΑΠΕΚΗΣ, Ι. Πολιτικός Μηχανικός MSc, Ε.Μ.Π.
ΚΑΒΒΑΔΑΣ, Μ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Εξετάζεται η ευστάθεια του μετώπου αβαθούς σήραγγας, μέσω αριθμητικών παραμετρικών αναλύσεων ως προς την αντοχή του εδάφους και το είδος και ποσότητα των μέτρων υποστήριξης του μετώπου. Οι αναλύσεις δίνουν την επιρροή των ανωτέρω στην εξώθηση του μετώπου και στο μέγεθος των επιφανειακών καθιζήσεων.

ABSTRACT: The paper examines the face stability of shallow tunnels using numerical parametric analyses of the ground strength and the types and density of the face support measures. The analyses give the influence of the above on face extrusion and surface settlements.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η ευστάθεια του μετώπου είναι από τα σημαντικότερα θέματα κατά την κατασκευή σηράγγων, καθώς στην επιφάνεια του μετώπου οι πλευρικές τάσεις σ_3 μηδενίζονται ενώ οι κατακόρυφες τάσεις μένουν πρακτικώς σταθερές, με αποτέλεσμα ο κύκλος Mohr να μεγαλώνει τείνοντας να τμήσει την επιφάνεια αστοχίας Mohr-Coulomb προκαλώντας αστοχία του μετώπου. Βελτίωση της ευστάθειας του μετώπου επιτυγχάνεται είτε μέσω μετατόπισης της περιβάλλουσας αστοχίας Mohr-Coulomb προς τα πάνω (π.χ. με βελτίωση του εδάφους μέσω jet-grouting - μέθοδος η οποία δεν εξετάζεται στην εργασία) είτε με απομάκρυνση του κύκλου Mohr από την αστοχία μέσω της αύξησης της πλευρικής τάσης σ_3 ή της μείωσης της κατακόρυφης τάσης σ_1 .

Η αύξηση της σ_3 επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση αγκυρίων μετώπου από υαλόνημα (fiberglass), τα οποία έχουν αρκετό μήκος έμπηξης έτσι ώστε να πακτώνονται στο αδιατάρακτο έδαφος αρκετά μπροστά από το μέτωπο. Καθώς η επιφάνεια αστοχίας τείνει να κινητοποιηθεί με εξώθηση του μετώπου, τα αγκύρια εφελκύνονται ασκώντας σημειακές θλιπτικές δυνάμεις στο μέτωπο, οι οποίες (ανηγμένες στο εμβαδό του μετώπου) προκαλούν αύξηση της σ_3 .

Η μείωση της σ_1 επιτυγχάνεται με την κατασκευή δοκών προπορείας (σωληνωτές χαλύβδινες διατομές, forepoles) στη στέψη του μετώπου. Οι δοκοί στηρίζονται στο αδιατάρακτο έδαφος μπροστά από το μέτωπο και σε μεταλλικά πλαίσια, ενσωματωμένα στην επένδυση της σήραγγας, πίσω από το μέτωπο. Οι δοκοί προπορείας, αναλόγως της δυσκαμψίας τους, αναλαμβάνουν ένα ποσοστό της κατακόρυφης γεωστατικής τάσης, μειώνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο τα κατακόρυφα φορτία του εδάφους μπροστά από το μέτωπο.

Ένας ακόμα τρόπος όπου διασφαλίζει την ευστάθεια του μετώπου είναι η εκσκαφή του μετώπου σε περισσότερες από μία φάσεις, ώστε να μειωθούν οι διαστάσεις του, εξασφαλίζοντας μεγαλύτερο συντελεστή ασφαλείας.

Οι παραμετρικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Simulia-Abaqus, περιλάμβαναν την προσομοίωση σήραγγας πεταλοειδούς διατομής με ισοδύναμη διάμετρο $D=10\text{m}$ και χρησιμοποιήθηκαν 8-κομβικά, κυβικά πεπερασμένα στοιχεία.

Στις αναλύσεις όπου η εκσκαφή της σήραγγας πραγματοποιούνταν σε μία ή δύο φάσεις (top heading & bench), έγινε προσομοίωση μόνο της ημιδιατομής λόγω συμμετρίας, διαφορετικά προσομοιώθηκε η πλήρης διατομή της σήραγγας. Τα προσομοιώματα είχαν συνολικό μήκος 120m ($12D$), όπου από αυτό γίνεται εκσκαφή των πρώτων 80m ($8D$), ενώ το πλάτος καθορίστηκε σε 60m ($6D$). Η επιλογή αυτών των ορίων αποσκοπεί στην διασφάλιση μη επιρροής των συνοριακών συνθηκών (boundary effects). Το βάθος του άξονα της σήραγγας από την επιφάνεια ισούται με $H = 1.5D$ ή $2D = 15\text{m}$ ή 20m . Το βήμα εκσκαφής ορίστηκε σε 1m , ενώ η προσωρινή επένδυση της σήραγγας τοποθετούνταν σε απόσταση 1m πίσω από το μέτωπο εκσκαφής, και αποτελούνταν από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα συνολικού πάχους $t=30\text{cm}$, κατηγορίας C30/37 με μέτρο ελαστικότητας $E=15\text{GPa}$.

Τα αγκύρια μετώπου (fiberglass) που χρησιμοποιήθηκαν, έχουν ως διατομή μονή πλάκα από υαλόνημα (τάση διαρροής $f_y=1000\text{MPa}$), διαστάσεων $30 \times 4\text{ mm}$ και μήκος 12m , με επικάλυψη 4m . Οι δοκοί προπορείας είναι σωληνωτές διατομές από χάλυβα S275 (τάση διαρροής $f_y=275\text{MPa}$), τοποθετημένες σε ένα τόξο 126° ανά 0.5m , με μήκος 12m και επικάλυψη 4m .

Η παραμετροποίηση των μηχανικών χαρακτηριστικών του εδάφους, πραγματοποιήθηκε ως προς τη γωνία τριβής ϕ και τη συνοχή c , όπως φαίνεται στον «Πίνακα 1». Βασικό μέγεθος της αδιάστατης αντοχής του εδάφους αποτελεί ο δείκτης Λ_F (Προυντζόπουλος και Καββαδάς, 2012), ο οποίος αυξάνεται όσο μεγαλύτερα είναι τα μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους. Ως προς τον δείκτη Λ_F παρατίθενται όλα τα αποτελέσματα που εξάγονται κατόπιν.

Κριτήρια για την αποτελεσματικότητα των μέτρων υποστήριξης αποτέλεσαν η μέγιστη καθίζηση στην επιφάνεια του εδάφους ($u_{\text{surface,vertical,maximum}} = u_{z=0,v,\text{max}} = u$) και η αδιάστατη εξώθηση μετώπου $\Omega_{f,\text{area}}$ (Προυντζόπουλος και Καββαδάς, 2012) η οποία είναι ανάλογη της εξώθησης του μετώπου και αδιαστατοποιημένη ως προς το τασικό καθεστώς και τη γεωμετρία της σήραγγας.

Το E_{soil} είναι το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους που λήφθηκε ίσο με $500c_u$ (Bowles, 1997), όπου c_u είναι η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους. Τέλος, ο δείκτης παθητικών ωθήσεων k_o λήφθηκε ίσος με 0.5 σε όλες τις αναλύσεις, η γωνία διαστολικότητας του εδάφους ψ τέθηκε ίση με $\phi/6$, ο λόγος Poisson ν ίσος με 0.3 , ο λόγος του Skempton A ίσος με $1/3$, το ειδικό βάρος του εδάφους γ ίσο με 20kN/m^3 , ενώ η συντελεστής παθητικών ωθήσεων ισούται με $N_\phi = \tan^2(45 + \phi/2)$.

Πίνακας 1. Μηχανικά χαρακτηριστικά εδαφών

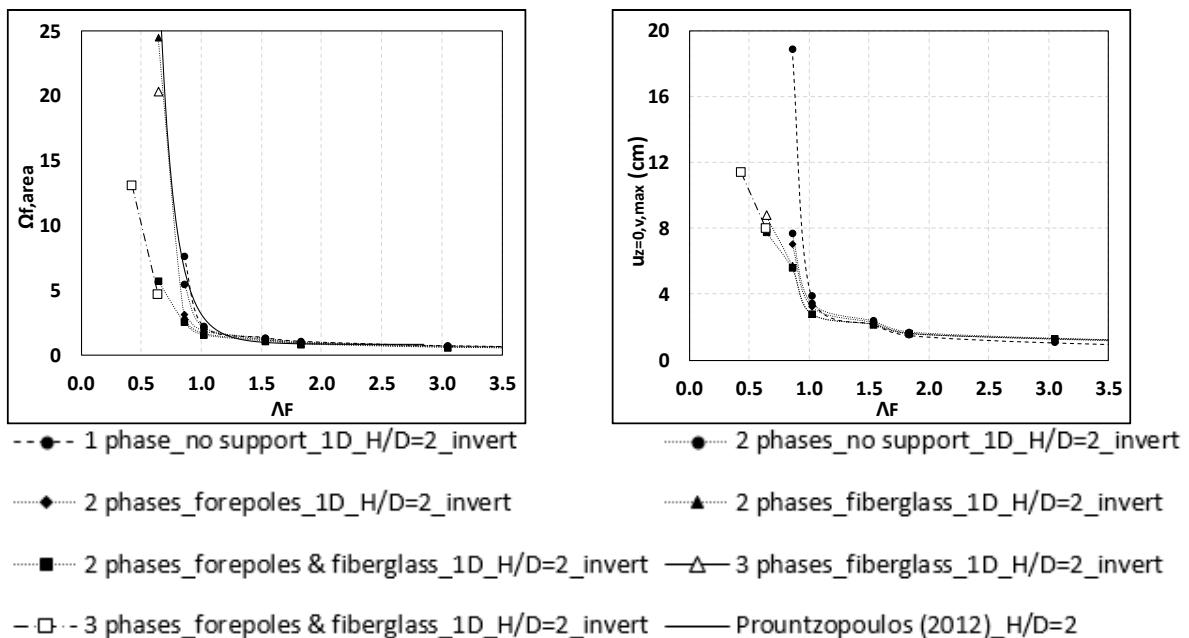
Table 1. Soil mechanical characteristics

Κωδικός εδάφους	ϕ ($^\circ$)	c (kPa)	ψ ($^\circ$)	c_u (kPa)	E_{soil} (MPa)	ν	Λ_F (z=20m)	Λ_F (z=15m)
1	20	10	3.3	113.6	56.8	0.3	0.43	0.45
2	20	15	3.3	118.8	59.4	0.3	0.64	0.67
3	20	20	3.3	124.2	62.1	0.3	0.86	0.90
4	25	20	4.2	152.2	76.1	0.3	1.02	1.05
5	25	30	4.2	162.8	81.4	0.3	1.53	1.57
6	30	30	5.0	191.2	95.6	0.3	1.83	1.85
7	30	50	5.0	212	106.0	0.3	3.05	3.09
8	35	70	5.8	260	130.0	0.3	5.15	5.13

2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

2.1 Σύγκριση των μέτρων υποστήριξης του μετώπου

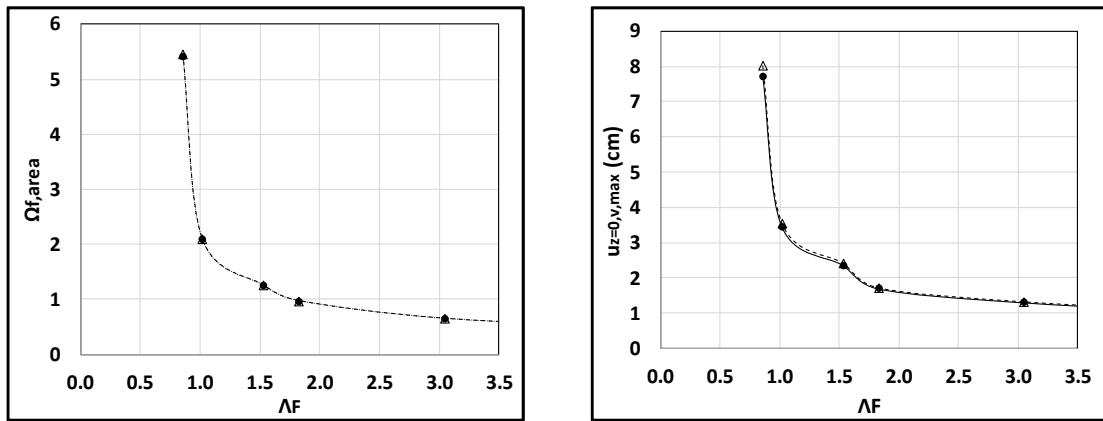
Όσο πιο ασθενές είναι το έδαφος, τόσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά ανάμεσα στην επίδραση που έχει το κάθε μέτρο στα μετακινησιακά κριτήρια. Για $\Lambda_F > 1.5$ παύει να υπάρχει ουδεμία επίδραση. Για το έδαφος 3, το οποίο είναι ένα ασθενές έδαφος με $\varphi=20^\circ$ και $c=20$ kPa, ο καταμερισμός της εκσκαφής σε δύο φάσεις μειώνει τις καθιζήσεις κατά ~60% και την εξώθηση κατά ~30%, η χρήση fiberglass κατά ~70% και 60% αντίστοιχα ενώ η χρήση forepoles δεν επιτυγχάνει περαιτέρω μείωση μετακινήσεων. Για το έδαφος 2 απαιτήθηκε η χρήση fiberglass αλλά με μεγάλες μετακινήσεις, οι οποίες μετριάστηκαν με ταυτόχρονη χρήση forepoles. Για το έδαφος 1 απαιτήθηκε ο περαιτέρω καταμερισμός του μετώπου σε τρεις φάσεις μαζί με ταυτόχρονη χρήση forepoles & fiberglass. Η συνεισφορά των forepoles στα fiberglass εξηγείται διότι βοηθούν στην καλύτερη ανακατανομή των τάσεων γύρω από το μέτωπο προστατεύοντας το πρίσμα εδάφους που τείνει να ολισθήσει, άρα μειώνοντας τις παραμορφώσεις των αγκυρίων. Όλα τα αποτελέσματα αποτυπώνονται στα διαγράμματα της «Εικόνας 1».



Εικόνα 1. Επίρροή των μέτρων υποστήριξης σε $\Omega_{f,area}$ και u
Figure 1. Stability measures impact on $\Omega_{f,area}$ and u

2.2 Επίδραση απόστασης φάσεων εκσκαφής

Δοκιμάστηκαν δύο διαφορετικές αποστάσεις φάσεων εκσκαφής και συγκεκριμένα 10m (1D) και 15m (1.5D). Η απόσταση αυτή δεν επηρεάζει την εξώθηση, καθώς σε κάθε περίπτωση βρίσκεται αρκετά μακριά από το μέτωπο ώστε να επηρεάζει την τασική του κατάσταση. Η αύξηση της απόστασης οδηγεί σε μικρή αύξηση της καθιζήσης, διότι όσο μεγαλύτερο είναι το τμήμα της πρώτης φάσης εκσκαφής τόσο μεγαλύτερη ευκαμψία έχει η αντίστοιχη προσωρινή υποστήριξη, η οποία με τη σειρά της οδηγεί σε μεγαλύτερες καθιζήσεις, παρόλ' αυτά η αύξηση αυτή είναι αμελητέα και άνευ σημασίας «Εικόνας 2».

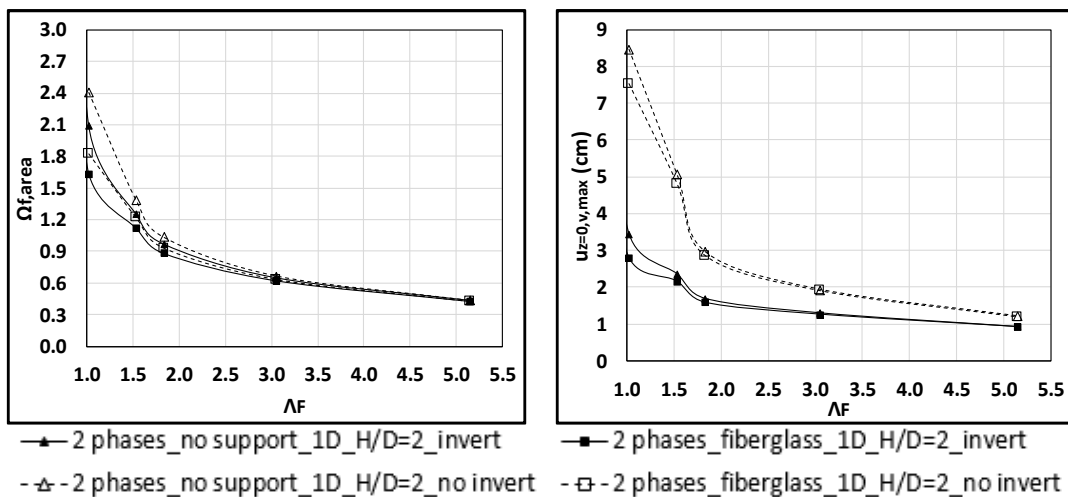


.....●..... 2 phases_no support_1D_H/D=2_invert - ▲- 2 phases_no support_1.5D_H/D=2_invert

Εικόνα 2. Επιρροή απόστασης των φάσεων εκσκαφής σε $\Omega_{f,area}$ και u
 Figure 2. Excavation faces distance impact on $\Omega_{f,area}$ and u

2.3 Επίδραση σκυροδέτησης πατώματος ενδιάμεσης φάσης

Στα εδάφη μεγαλύτερης αντοχής (έδαφος 4~8) διερευνήθηκε εάν απαιτείται ή όχι η σκυροδέτηση του πατώματος της ενδιάμεσης φάσης εκσκαφής (invert). Η επιρροή στην εξώθηση είναι σχεδόν αμελητέα, δηλαδή για $\Lambda_F=1$ η εξώθηση αυξάνεται κατά 10~15% (ανάλογα αν χρησιμοποιούνται αγκύρια ή όχι αντίστοιχα) όταν το invert δε σκυροδετείται, ενώ αυτό το ποσοστό μειώνεται περαιτέρω στα ισχυρότερα εδάφη «Εικόνα 3». Αυτό συμβαίνει διότι η σκυροδέτηση του invert γίνεται αρκετά μακριά από το μέτωπο επομένως δεν επηρεάζει σημαντικά την απόκρισή του. Αντιθέτως, η επιρροή στις καθιζήσεις είναι πολύ σημαντική, καθώς η μη σκυροδέτηση του πατώματος οδηγεί σε αύξηση των καθιζήσεων έως και 2.5 φορές για $\Lambda_F=1$ ή 2 φορές για $\Lambda_F=1.8$. Αυτό εξηγείται επειδή η σκυροδέτηση του invert δημιουργεί έναν κλειστό φορέα προσωρινής υποστήριξης με μεγαλύτερη δυσκαμψία οι καθιζήσεις σχετίζονται άμεσα με την ενδοσιμότητα του φορέα της επένδυσης της σήραγγας, επομένως ένας κλειστός φορέας σκυροδέματος με πολύ μεγαλύτερη δυσκαμψία από έναν πλαισιωτό φορέα είναι λογικό να επιτρέπει πολύ μικρότερες βυθίσεις.

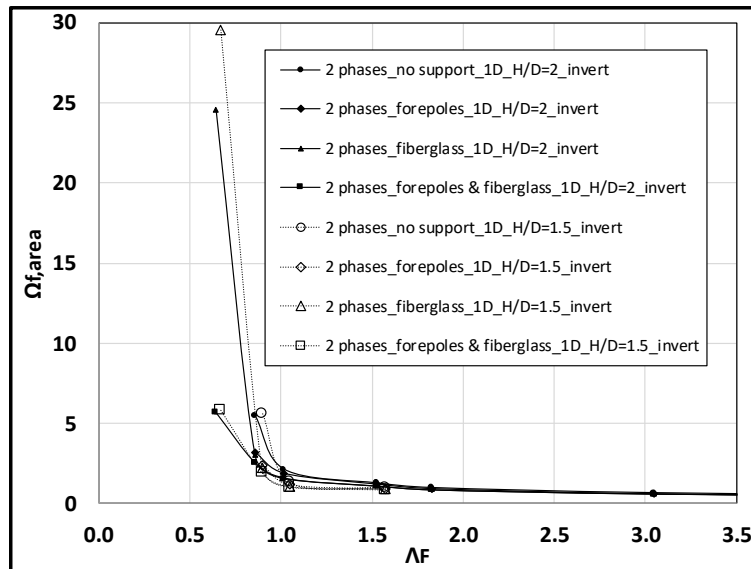


▲- 2 phases_no support_1D_H/D=2_invert ■- 2 phases_fiberglass_1D_H/D=2_invert
 - ▣- 2 phases_no support_1D_H/D=2_no invert - ▣- 2 phases_fiberglass_1D_H/D=2_no invert

Εικόνα 3. Επιρροή της σκυροδέτησης του invert σε $\Omega_{f,area}$ και u
 Figure 3. Invert impact on $\Omega_{f,area}$ and u

2.4 Επίδραση του βάθους

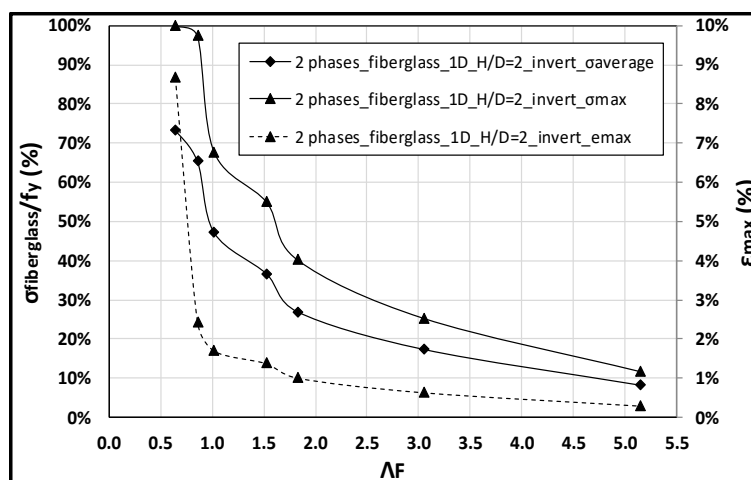
Αναλύθηκε και σήραγγα σε μικρότερο βάθος, ίσο με $H=1.5D=15m$. Για τα ασθενή εδάφη με $\Lambda_F < 1$ η εξώθηση είναι μεγαλύτερη στην πιο αβαθή σήραγγα (πχ στο έδαφος 2 παρατηρείται ~25% αύξηση) «Εικόνα 4». Σε ρηχό βάθος, το τόξο ανακατανομής τάσεων δημιουργείται με εντονότερη κλίση άρα αναπτύσσονται μεγαλύτερες διατμητικές τάσεις. Επομένως, τα εδάφη με τη μικρή διατμητική αντοχή παραμορφώνονται περισσότερο, ενώ για τα ισχυρότερα εδάφη αυτό το φαινόμενο δεν έχει τόσο μεγάλη επιρροή όσο έχει η μείωση του γεωστατικού βάρους η οποία έχει θετική επίδραση στην εξώθηση.



Εικόνα 4. Επιρροή του βάθους της σήραγγας σε $\Omega_{f,area}$ και u
Figure 4. Tunnel depth impact on $\Omega_{f,area}$ and u

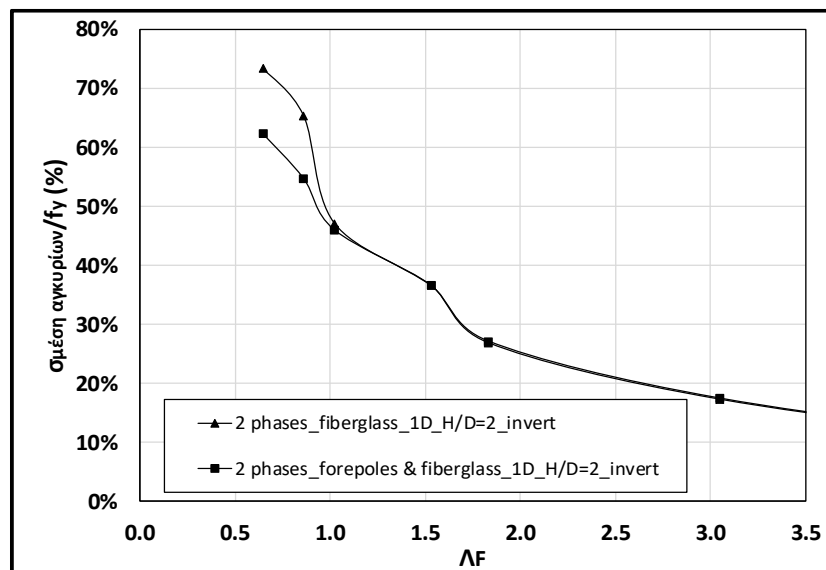
3.5 Τασική καταπόνηση αγκυρίων

Από τις αναλύσεις προέκυψε ότι για $\Lambda_F < 1$ τα αγκύρια τείνουν να πλαστικοποιηθούν, μάλιστα στο πολύ ασθενές έδαφος 2 (όπου ήδη έχει γίνει πλαστικοποίηση) η παραμόρφωσή τους αγγίζει το 9% η οποία είναι αρκετά επικίνδυνη ακόμα και για αστοχία τους «Εικόνα 5». Η χρήση forepoles οδηγεί στη μείωση της μέσης τάσης των αγκυρίων κατά 10~15% για $\Lambda_F < 1$ «Εικόνα 6», ποσοστό ικανό για να απομακρύνει τα αγκύρια από την πλαστική περιοχή, μειώνοντας αρκετά την παραμόρφωσή τους, ενώ για $\Lambda_F > 1$ παύει να υπάρχει πρακτική συνεισφορά.



Εικόνα 5. Αγκύρια: μέση και μέγιστη τάση, μέγιστη παραμόρφωση
Figure 5. Fiberglass: average and max stress, max elongation

Επίσης παρατηρήθηκε πως η τάση λειτουργίας μεγιστοποιείται κοντά στο κέντρο της σήραγγας καθώς εκεί προκύπτει η μέγιστη εξώθηση άρα και η μέγιστη παραμόρφωση των αγκυριών.



Εικόνα 6. Επιρροή της χρήσης forepoles στη μέση τάση των fiberglass
Figure 6. Forepoles impact on fiberglass nails' average stress

3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Το πιο αποτελεσματικό μέτρο υποστήριξης για τον περιορισμό της εξώθησης και των καθιζήσεων είναι ο καταμερισμός του μετώπου σε πολλαπλές φάσεις εκσκαφής.
- Δεύτερο πιο αποτελεσματικό μέτρο αποτελεί η χρήση fiberglass.
- Στα ασθενή εδάφη ($\Lambda_F < 0.8$) απαιτείται η επαλληλία forepoles & fiberglass για τον περιορισμό καθίζησης και εξώθησης σε φυσιολογικές τιμές.
- Η απόσταση των φάσεων εκσκαφής δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα.
- Η σκυροδέτηση των ενδιάμεσων invert είναι απαραίτητη για τον περιορισμό των καθιζήσεων.
- Για $\Lambda_F < 1$ η εξώθηση αυξάνεται στα ρηχότερα εδάφη.
- Τα αγκύρια μετώπου τείνουν να πλαστικοποιηθούν για $\Lambda_F < 1$
- Η τάση των αγκυριών μεγιστοποιείται στο κέντρο της σήραγγας άρα εκεί απαιτείται πάντα πύκνωση του κανάβου.
- Η χρήση forepoles μειώνει τη μέση τάση των αγκυριών κατά 10~15% για $\Lambda_F < 1$.

4. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Bowles, J. E. (1997). "Foundation Analysis and Design". Singapore: McGraw-Hill.
Προυντζόπουλος Γ. (2012), "Διερεύνηση της Ευστάθειας Μετώπου Εκσκαφής Αβαθών Σηράγγων", Ph.D. Ε.Μ.Π., Ελλάδα.

5. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Τμήμα της παρούσας έρευνας χρηματοδοτήθηκε από το Ίδρυμα Ευγενίδου και το Κοινωνικό Ίδρυμα Ωνάση, στα πλαίσια της υποτροφίας διδακτορικών σπουδών του κ. Γεωργίου