

Εκτίμηση των Συνθηκών Ευστάθειας Μετώπου Αβαθών Σηράγγων σε Συνθήκες πολύ Ασθενούς Βραχώμαζας μέσω του Δείκτη Ευστάθειας Υπογείου Ανοίγματος (Tunnel Stability Factor)

Estimation of Stability Conditions of the Face of Shallow Tunnels in Weak Rock Conditions based on Tunnel Stability Factor

ΜΙΧΑΛΗΣ, Η. Κ. Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π., Εδαφομηχανικός MSc, DIC
ΚΩΝΣΤΑΝΤΗΣ Σ. Κ. Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π., M.Sc.
ΑΝΑΓΝΩΣΤΟΠΟΥΛΟΣ Α. Γ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η παρούσα εργασία τεκμηριώνει την εφαρμογή του Δείκτη Ευστάθειας Υπογείου Ανοίγματος (Tunnel Stability Factor) στην εκτίμηση των συνθηκών ευσταθείας των μετώπων αβαθών σηράγγων σε συνθήκες ασθενούς βραχώμαζας. Εκπονήθηκαν παραμετρικές αναλύσεις με την χρήση προσομοιώματος οριακής ισορροπίας τρισδιάστατης σφήνας για σήραγγες κυκλικής διατομής που διανοίγονται σε διάφορα βάθη, υπό συνθήκες πολύ ασθενούς βραχώμαζας με ταυτόχρονη παρουσία υπογείου υδροφόρου ορίζοντα. Εν συνεχεία, παρήχθησαν αδιάστατα νομογραφήματα εκτίμησης της απαιτούμενης πίεσης υποστήριξης επί του μετώπου P για την εξασφάλιση συνθηκών ευσταθείας (με δεδομένο συντελεστή ασφαλείας) συναρτήσει του TSF.

ABSTRACT: This paper validates the application of the Tunnel Stability Factor (TSF) for the estimation of shallow tunnels face stability conditions in weak rock conditions. A series of parametric analyses was carried out, with the use of the limit equilibrium 3-D Wedge model, regarding tunnels of circular cross-section, that are drilled at various depths through weak rock conditions and under the presence of underground aquifer. Based on the results of the aforementioned analyses, dimensionless design charts were generated. With the use of these charts, the required support pressure on the tunnel face P can be estimated, so that the stability conditions of the face could be ensured (for a given safety factor), based on the tunnel stability factor (TSF).

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κατά την διαδικασία διάνοιξης και κατασκευής αβαθών κυρίως σηράγγων, παρατηρείται συχνά το φαινόμενο της αστάθειας του μετώπου εκσκαφής παρ'όλο που στην περιοχή αυτή η ευστάθεια είναι δυνατόν να υποβοηθηθεί από γεωμετρικούς περιορισμούς που είναι δυνατόν να παρέξουν συνθήκες πρόσθετης ασφάλειας. Στις περιπτώσεις αυτές το φαινόμενο του αυτοϋποστηριζόμενου θόλου (dome effect) είτε δεν λαμβάνει χώρα καθόλου, είτε η προσωρινή διάρκειά του είναι τόσο μικρή έτσι ώστε να μην εγγυάται την τελική ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής.

Σε εκείνες τις περιπτώσεις που είναι πιθανή η εκδήλωση αστάθειας του υπόγειου μετώπου εκσκαφής σε αβαθείς σήραγγες, οι οποίες διανοίγονται σε ασθενείς βραχώμαζες, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν διάφορες τεχνικές υποστήριξής του, όπως π.χ. η τοποθέτηση αγκυρίων μετώπου.

Εκτός της εκσκαφής με συμβατικά μέσα, υπάρχει και η μηχανοποιημένη μέθοδος με την χρήση μηχανημάτων ολομέτωπου κοπής (T.B.M.). Η χρήση τους ενδείκνυται στην κατασκευή σηράγγων (στην συγκεκριμένη περίπτωση αβαθών), που διανοίγονται μέσα σε ασθενείς σχηματισμούς με μειωμένα γεωμηχανικά χαρακτηριστικά, καθώς είναι δυνατόν να εφαρμοσθεί μέσω αυτών των μηχανημάτων κατάλληλη πίεση υποστήριξης στο μέτωπο. Ωστόσο σε αυτήν την περίπτωση απαιτείται και ο πρόσθετος έλεγχος για την αποφυγή του φαινομένου κατά το οποίο, λόγω της άσκησης υπερβολικής πίεσης στο μέτωπο έχουμε ανασήκωμα των υπερκειμένων γαιών ("blow-out" mechanism). Έτσι, τίθεται ένα άνω όριο στην πίεση υποστήριξης που θα εφαρμοσθεί στο μέτωπο.

Έλλειψη της απαιτούμενης πίεσεως υποστήριξης είναι δυνατόν να οδηγήσει σε μερική ή και ολική αστοχία του μετώπου εκσκαφής. Στις περιπτώσεις αυτές ο όγκος του

γεωυλικού που εκσκάπτεται είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο θεωρητικό όγκο εκσκαφής. Ο μηχανισμός κατάρρευσης διαδίδεται προς τα επάνω δημιουργώντας μια "καμινάδα" και μερικές φορές έναν κρατήρα που φτάνει στην επιφάνεια του εδάφους, με δυσάρεστες συνέπειες για τις κατασκευές που βρίσκονται στην περιοχή εκδήλωσης της δυνητικής αστοχίας.

Οι αιτίες που οδηγούν σε μια ενδεχόμενη αστοχία του μετώπου εκσκαφής σχετίζονται με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής της σήραγγας, τα χαρακτηριστικά αντοχής και παραμορφωσιμότητας της περιβάλλοντος γεωυλικού, την εντατική κατάσταση στην περιοχή διάνοιξης καθώς και την παρουσία υπογείου νερού.

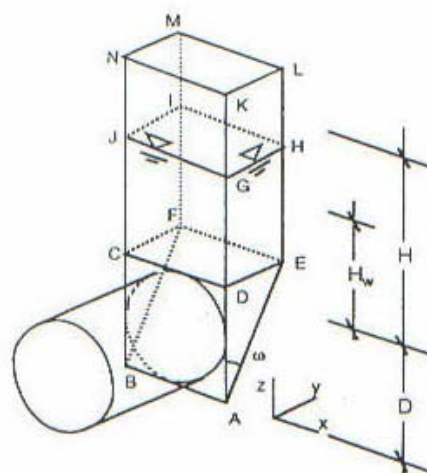
Κατά καιρούς, διάφοροι ερευνητές (Ellstein, 1986, L. Cornejo, 1989, G. Anagnostou και K. Kovari, 1994-6, Jancsecz, 1993) προσπάθησαν με διάφορες θεωρητικές και πειραματικές εκτιμήσεις και προσεγγίσεις, να εκτιμήσουν την πίεση υποστήριξης που πρέπει να εφαρμοσθεί στο μέτωπο εκσκαφής καθώς και τον προκύπτοντα συντελεστή ασφαλείας έναντι εκδήλωσης μηχανισμού αστοχίας τύπου «καμινάδας».

2. ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΜΕΤΩΠΟΥ

2.1 Προσομοίωμα Εδαφικής «Σφήνας» με Πλευρική Τριβή

Η ευστάθεια του μετώπου σε ομογενές έδαφος, δύναται να εκτιμηθεί θεωρώντας τον απλό μηχανισμό κατάρρευσης που παρουσιάζεται στο σχήμα 1. Το τρισδιάστατο αυτό προσομοίωμα, που προτάθηκε αρχικά από τον Horn (1961), βασίζεται στην θεωρία silo του Janssen (1895).

Η κυκλική διατομή της σήραγγας προσεγγίζεται από ένα τετράγωνο που η κάθε πλευρά του έχει μήκος όσο η διάμετρος D της κυκλικής σήραγγας. Ο μηχανισμός κατάρρευσης συνίσταται από μια «σφήνα» και ένα πρίσμα το οποίο εκτείνεται από την οροφή της σήραγγας μέχρι την επιφάνεια του εδάφους. Το έδαφος θεωρείται ως τέλεια πλαστικό υλικό (perfectly-plastic material) που υπακούει στο κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb με χαρακτηριστικά διατμητικής αντοχής τη συνοχή c και τη γωνία εσωτερικής τριβής φ. Επομένως, σε κάθε σημείο των επιφανειών ολίσθησης, η διατμητική αντοχή τ δίνεται από την παρακάτω εξίσωση 1:



Σχήμα 1. Μηχανισμός κατάρρευσης-ολίσθησης (after Horn, 1961)

Figure 1. Slide Mechanism (after Horn, 1961)

$$\tau = \frac{c}{F} + \sigma \frac{\tan \varphi}{F} \quad (1)$$

όπου σ και F υποδηλώνουν την ορθή τάση και τον συντελεστή ασφαλείας, αντίστοιχα.

Η «σφήνα» του προσομοιώματος αστοχίας υπόκειται στις εξής δυνάμεις: (α) ίδιο βάρος της, (β) τις προκύπτουσες ορθές και διατμητικές δυνάμεις κατά μήκος των επιφανειών αστοχίας ADE, BCF και ABFE, (γ) τη δύναμη υποστήριξης που εφαρμόζεται στο μέτωπο εκσκαφής καθώς και (δ) την προκύπτουσα κατακόρυφη δύναμη του πρίσματος στην διεπιφάνεια DEFC.

Μέσω της επίλυσης των εξισώσεων οριακής ισορροπίας για την «σφήνα» προκύπτει η δύναμη υποστήριξης για έναν δεδομένο μηχανισμό αστοχίας με συγκεκριμένη τιμή της γωνίας κλίσης ω της επιφάνειας ολίσθησης ABFE. Η κρίσιμη κλίση ω_{cr} προσδιορίζεται μέσω επαναληπτικής διαδικασίας μέχρι την μεγιστοποίηση της απαιτούμενης δύναμης υποστήριξης, ή -για δεδομένη δύναμη υποστήριξης- μέσω επαναληπτικής διαδικασίας μέχρι την ελαχιστοποίηση του συντελεστή ασφαλείας. Στην περίπτωση που υπάρχει υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας, όλοι οι απαιτούμενοι υπολογισμοί γίνονται μέσω ενεργών τάσεων ενώ θεωρείται ότι υπάρχει υδροστατική κατανομή των πιέσεων του νερού κατά μήκος των επιφανειών ολίσθησης.

Οι διατμητικές τάσεις εξαρτώνται ουσιαστικά από τις οριζόντιες τάσεις που ενεργούν κάθετα στις κατακόρυφες επιφάνειες ολίσθησης.

Ωστόσο, οι οριζόντιες τάσεις δεν μπορούν να υπολογιστούν χωρίς θεώρηση των

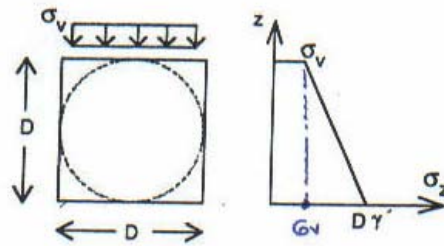
χαρακτηριστικών παραμόρφωσης του εδάφους. Ακολουθώντας την θεωρία silo του Janssen, υιοθετείται ένας σταθερός συντελεστής λ των οριζοντίων ως προς τις κατακόρυφες τάσεις. Οι Terzaghi και Jelinek (1954) πρότειναν την τιμή $\lambda = 1$. Στην παρούσα εργασία, οι διάφοροι υπολογισμοί με βάση το μοντέλο αστοχίας της σφήνας εκπονήθηκαν για $\lambda = 0.80$. Η θεώρηση αυτή βασίζεται στα πειράματα του Melix (1987) και των Gudexus and Melix (1986).

Η κατακόρυφη δύναμη στην διεπιφάνεια CDEF υπολογίζεται με την εφαρμογή της θεωρίας silo του Janssen, πρώτα στο πρίσμα επάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα και μετά στο τμήμα του πρίσματος ανάμεσα στον υδροφόρο ορίζοντα και την οροφή της σήραγγας. Με τον τρόπο αυτό, λαμβάνονται υπόψη τα διαφορετικά ειδικά βάρη του εδάφους πάνω και κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα. Η μέση ενεργός κατακόρυφη τάση σ_v επί της επιφάνειας DEFC δίνεται από την παρακάτω εξίσωση 2 :

$$\sigma_v = \frac{\gamma' r - c}{\lambda \tan \phi} \left(1 - e^{-\lambda \tan \phi Hw/r} \right) + \frac{\gamma^d r - c}{\lambda \tan \phi} \left(e^{-\lambda \tan \phi Hw/r} - e^{-\lambda \tan \phi Hr} \right) \quad (2)$$

όπου H , Hw , γ^d , και γ' υποδηλώνουν αντίστοιχα το ύψος των υπερκειμένων γαιών, το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα πάνω από την οροφή της σήραγγας (βλέπε σχήμα 1), το ξηρό φαινόμενο βάρος και το υπο άνωση φαινόμενο βάρος του εδάφους. Η παράμετρος r υποδηλώνει τον λόγο του όγκου προς την περιφέρεια του πρίσματος [$r = 0.5D \tan \omega / (1 + \tan \omega)$]. Η εξίσωση (2) ισχύει για συντελεστή ασφαλείας F ίσο με την μονάδα. Άλλες τιμές του συντελεστή ασφαλείας δύναται να ληφθούν υπόψη αντικαθιστώντας τα c και $\tan \phi$ με c/F και $\tan \phi/F$ αντίστοιχα, όπως φαίνεται στην εξίσωση (1).

Όσον αφορά στην κατανομή των τάσεων σ_z επί των επιφανειών ολίσθησης ADE και BCF της σφήνας, υιοθετείται η γραμμική προσέγγιση που προτείνεται στον γερμανικό κανονισμό DIN 4126 (1986), όπως φαίνεται και στο σχήμα 2. Κατά συνέπεια, η κατακόρυφη τάση σ_z αυξάνει γραμμικά με το βάθος λόγω του βάρους του εδάφους, ενώ η συνεισφορά της τάσης διεπιφανείας σ_v στην κατακόρυφη τάση μειώνεται.



Σχήμα 2. Κατανομή κατακόρυφων τάσεων (after DIN 4126)

Figure 2. Distribution of Vertical stresses (after DIN 4126)

Έτσι, η μέση αντίσταση λόγω τριβής τ_ϕ υπολογίζεται με την ολοκλήρωση του όρου $\lambda \sigma_z \tan \phi$ πάνω στις επιφάνειες ολίσθησης ADE και BCF :

$$\tau_\phi = \lambda \left(\frac{1}{3} \gamma' D + \frac{2}{3} \sigma_v \right) \frac{\tan \phi}{F} \quad (3)$$

Η ακρίβεια προσέγγισης της πραγματικότητας του σχήματος 2, έχει διερευνηθεί από τους Walz and Pulsfort, 1983. Οι Anagnostou and Kovari, 1994 πραγματοποίησαν αριθμητικές αναλύσεις στις οποίες η ισορροπία της σφήνας αναλύονταν με βάση την θεωρία silo και η σφήνα χωριζόταν σε οριζόντιες λωρίδες (Walz and Prager, 1978). Οι αναλύσεις έδειξαν ότι η προσέγγιση που προτείνει το DIN 4126 (1986) υπερεκτιμά την κατακόρυφη τάση σ_z και συνεπώς την διατμητική αντίσταση. Ωστόσο, οι αβεβαιότητες που σχετίζονται με την γραμμική προσέγγιση του σχήματος 2 δύναται να εξαλειφθούν επιλέγοντας μια μικρότερη τιμή λ_w του συντελεστή λ στην εξίσωση 3. Στην παρούσα εργασία, επιλέχθηκε η τιμή $\lambda_w = 0.4$ (δηλ. το μισό της τιμής που υιοθετήθηκε για το τμήμα πάνω από την σήραγγα).

Η μέθοδος της εδαφικής «σφήνας» με πλευρική τριβή δύναται να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής και του συντελεστού ασφαλείας, τόσο για την περίπτωση που η διάνοιξη της σήραγγας γίνεται με συμβατικά μέσα, όσο και για την περίπτωση που γίνεται με χρήση μηχανήματος ολομετώπου κοπής (T.B.M.). Οι παραμέτρικες αναλύσεις της παρούσας εργασίας βασίστηκαν στο υπολογιστικό προσομοίωμα της εδαφικής σφήνας με πλευρική τριβή. Παράλληλα, γίνανε και υπολογισμοί βάσει της θεωρίας του Άνω και Κάτω ορίου (Upper and Lower Bound) που συμπληρώθηκε και επεκτάθηκε από τους Leca, E. και Dormieux L., (1990).

2.2 Δείκτης Ευστάθειας Υπόγειου Ανοιγματος

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται γενικώς η ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής είναι η επιτόπου αντοχή της βραχώμαζας, τα γεωμετρικά στοιχεία και το βάθος διάνοιξης της σήραγγας.

Επισημαίνεται ότι οι Μιχάλης, Η, Καββαδάς, Μ και Αναγνωστόπουλος, Α. (2001) έχουν ήδη προτείνει για την εκτίμηση της συμπεριφοράς των υπογείων ανοιγμάτων σε συνθήκες ασθενούς βραχομάζας τη χρήση του Δείκτη Ευστάθειας Υπόγειου Ανοιγματος (Tunnel Stability Factor, (TSF)), ο οποίος συνδυάζει όλους τους παραπάνω παράγοντες και είναι δυνατό να αποτελέσει σημαντική παράμετρο για τον αρχικό καθορισμό της συνολικής συμπεριφοράς των διατομών σηράγγων.

Ο Δείκτης Ευστάθειας Υπόγειου Ανοιγματος (TSF) ορίζεται μέσω της επόμενης μαθηματικής σχέσης :

$$TSF = \frac{\sigma_{cm}}{\gamma \cdot H^a \cdot D^{1-a}} \quad (4)$$

όπου σ_{cm} & γ η επιτόπου αντοχή (σε KPa) και το φαινόμενο βάρος της βραχώμαζας (σε KN/m³), με

$$\sigma_{cm} = 2 \frac{c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (5)$$

Η το καθαρό ύψος των υπερκειμένων γαιών (σε m)

D η ισοδύναμη διάμετρος της σήραγγας (σε m).

Μετά από την διενέργεια σημαντικού αριθμού παραμετρικών αναλύσεων με το προσομοίωμα αστοχίας της εδαφικής «σφήνας» με πλευρική τριβή, καθορίστηκε η αναλυτική σχέση του TSF που αφορά στην ευστάθεια του μετώπου (μέσω του προσδιορισμού της τιμής του εκθέτη α). Παράλληλα, προέκυψαν αδιάστατα νομογραφήματα και μαθηματικές σχέσεις, χρήσιμες για την εκτίμηση της πίεσης υποστήριξης που πρέπει να εφαρμοσθεί στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας για την επίτευξη δεδομένου συντελεστή ασφαλείας έναντι κατάρρευσης, σε ποικιλία συνθηκών ασθενούς βραχομάζας.

3. ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

3.1 Ορισμός του Δείκτη Ευστάθειας Υπόγειου Ανοιγματος (TSF)

Στο πλαίσιο των παραμετρικών αναλύσεων με το μοντέλο αστοχίας της εδαφικής σφήνας εξετάστηκαν οι παρακάτω συνδυασμοί κυκλικών σηράγγων με διαμέτρους D : 4m, 6m, 8m, 10m και ύψος υπερκειμένων γαιών H : 10m, 12,5m, 15m, 17,5m και 20m, οι οποίες διανοίγονται μέσα σε συνθήκες ασθενούς βραχομάζας με τιμές συνοχής $c= 5\text{KPa}$, 10KPa , 15KPa , 20KPa και τιμές γωνίας εσωτερικής τριβής $\varphi= 25^\circ$ και 30° . Παράλληλα, λήφθηκαν υπόψη στους υπολογισμούς 3 διαφορετικές καταστάσεις που αφορούν στον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα. Θεωρήθηκε ύψος στήλης ύδατος πάνω από την στέψη της σήραγγας $H_w = H/2$, $H/4$ και 0m .

Με βάση τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων καθορίστηκε η αναλυτική σχέση του TSF ως ακολούθως :

$$TSF = \frac{\sigma_{cm}}{\gamma \cdot H^{0,35} \cdot D^{0,65}} \quad (6)$$

3.2 Θεωρήσεις του συντελεστή ασφαλείας (Safety Factor)

Στις παραμετρικές αναλύσεις υπολογίστηκε η πίεση υποστήριξης P που πρέπει να ασκηθεί στο μέτωπο εκσκαφής της αβαθούς σήραγγας για την επίτευξη ενός δεδομένου συντελεστή ασφαλείας (Safety Factor). Πιέσεις υποστήριξης υπολογίστηκαν για τους παρακάτω συντελεστές ασφαλείας $\Sigma.A.=1$, 1.1 , 1.2 , 1.3 και 1.4

Θεωρήθηκε ότι όταν η πίεση υποστήριξης είναι τέτοια που να επιτυγχάνεται συντελεστής ασφαλείας 1 και 1.1 , το μέτωπο έχει μεγάλη πιθανότητα αστοχίας- λόγω και των διαφόρων αβεβαιοτήτων που αφορούν στην εκτίμηση των γεωμηχανικών χαρακτηριστικών της περιβάλλουσας βραχομάζας, αλλά και στις απλοποιητικές παραδοχές του προσομοιώματος αστοχίας. Όταν ασκείται πίεση υποστήριξης στο μέτωπο που αντιστοιχεί σε συντελεστές ασφαλείας 1.2 και 1.3 , δύναται να θεωρηθεί ότι το μέτωπο είναι προσωρινά ευσταθές- υπο την γεωτεχνική έννοια του όρου. Ενώ όταν ο συντελεστής ασφαλείας είναι της τάξεως του 1.4 , η πίεση υποστήριξης που εφαρμόζεται στο μέτωπο

είναι αρκετή για να επιτευχθεί μόνιμη ευστάθεια. Οι όροι προσωρινή και μόνιμη ευστάθεια είναι πιο δόκιμοι στην περίπτωση όπου η σήραγγα διανοίγεται με συμβατικό τρόπο και η υποστήριξη του μετώπου γίνεται με χρήση π.χ ακκυρίων μετώπου τύπου fiberglass. Όταν η διάνοιξη της σήραγγας γίνεται με την χρήση μηχανήματος ολομετώπου κοπής, τότε οι όροι αυτοί αποδίδουν κατά κάποιο τρόπο την κλιμάκωση του συντελεστή ασφαλείας έναντι κατάρρευσης του μετώπου, εκτός από την περίπτωση όπου γίνεται διακοπή της εργασίας του μηχανήματος.

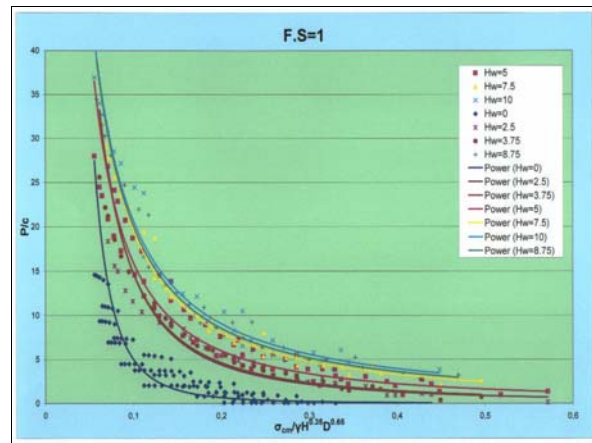
3.3 Πίεση υποστήριξης επι του μετώπου εκσκαφής

Για κάθε έναν συντελεστή ασφαλείας δημιουργήθηκε ένα διάγραμμα που συσχετίζει τους αδιάστατους παράγοντες P/c και TSF , για διάφορες τιμές της στάθμης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα H_w , με βάση το μοντέλο αστοχίας της εδαφικής «σφήνας». Σημειώνεται, ότι για κάθε μια συγκεκριμένη περίπτωση, δηλαδή για βραχομάζα με δεδομένα χαρακτηριστικά αντοχής c και ϕ , καθώς και για δεδομένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της σήραγγας και στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, η εκτίμηση της πίεσης υποστήριξης μέσω των διαγραμμάτων είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί για τις τιμές του $H_w = 0m, H/4$ και $H/2$.

Στις υποενότητες που ακολουθούν, δίνονται τα προαναφερθέντα διαγράμματα 3, 4, 5, 6 και 7, που αφορούν στην εκτίμηση της απαιτούμενης πίεσης υποστήριξης που πρέπει να ασκηθεί επι του μετώπου εκσκαφής. Παράλληλα, δίνονται και οι αντίστοιχες μαθηματικές σχέσεις (μορφής υπερβολής) που προέκυψαν με την καλύτερη δυνατή συσχέτιση των αποτελεσμάτων των παραμετρικών αναλύσεων.

3.3.1 Συντελεστής Ασφαλείας 1.0 (Οριακή Ισορροπία)

Πρόκειται για την περίπτωση όπου στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας επικρατεί οριακή ισορροπία. Θεωρήθηκε ότι όταν η πίεση υποστήριξης είναι τέτοια που να επιτυγχάνεται συντελεστής ασφαλείας 1, το μέτωπο έχει μεγάλη πιθανότητα να αστοχήσει.



Σχήμα 3. Πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής για συνθήκες οριακής ισορροπίας
Figure 3. Support pressure on the excavation face for limit equilibrium

$$H_w = 0 : \quad \frac{P}{c} = 0.0058 (TSF)^{-2.9344} \quad (7)$$

$$H_w = 2.5 : \quad \frac{P}{c} = 0.2618 (TSF)^{-1.7516} \quad (8)$$

$$H_w = 3.75 : \quad \frac{P}{c} = 0.3066 (TSF)^{-1.6843} \quad (9)$$

$$H_w = 5 : \quad \frac{P}{c} = 0.6068 (TSF)^{-1.4212} \quad (10)$$

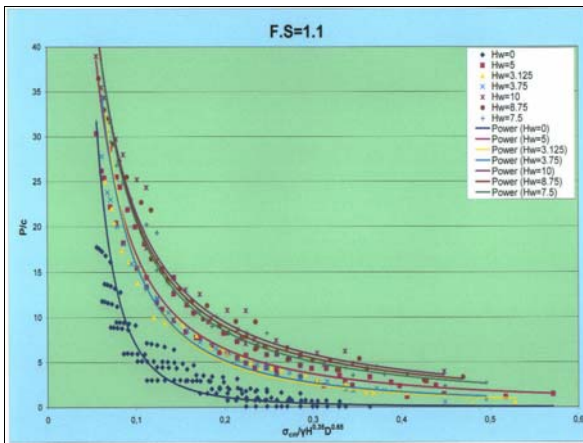
$$H_w = 7.5 : \quad \frac{P}{c} = 0.9997 (TSF)^{-1.2933} \quad (11)$$

$$H_w = 8.75 : \quad \frac{P}{c} = 1.1638 (TSF)^{-1.2375} \quad (12)$$

$$H_w = 10 : \quad \frac{P}{c} = 1.3255 (TSF)^{-1.1939} \quad (13)$$

3.3.2 Συντελεστής Ασφαλείας 1.1

Θεωρήθηκε, και στην περίπτωση αυτή, ότι το μέτωπο έχει μεγάλη πιθανότητα να αστοχήσει.



Σχήμα 4. Πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής για επίτευξη F.S=1.1
Figure 4. Support pressure on the excavation face for F.S=1.1

$$H_w = 0 : \quad P/c = 0.0161(TSF)^{-2.6322} \quad (14)$$

$$H_w = 3,125 : \quad P/c = 0.3232(TSF)^{-1.6982} \quad (15)$$

$$H_w = 3.75 : \quad P/c = 0.3832(TSF)^{-1.6195} \quad (16)$$

$$H_w = 5 : \quad P/c = 0.6853(TSF)^{-1.3975} \quad (17)$$

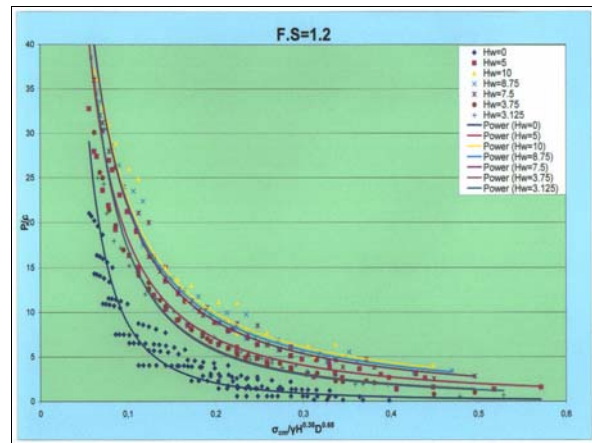
$$H_w = 7.5 : \quad P/c = 1.0691(TSF)^{-1.2872} \quad (18)$$

$$H_w = 8.75 : \quad P/c = 1.2281(TSF)^{-1.2352} \quad (19)$$

$$H_w = 10 : \quad P/c = 1.3857(TSF)^{-1.194} \quad (20)$$

3.3.3 Συντελεστής Ασφαλείας 1.2

Όταν ασκείται πίεση υποστήριξης στο μέτωπο που αντιστοιχεί σε συντελεστή ασφαλείας 1.2, δύναται να θεωρηθεί ότι το μέτωπο είναι προσωρινά ευσταθές



Σχήμα 5. Πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής για επίτευξη F.S=1.2
Figure 5. Support pressure on the excavation face for F.S=1.2

$$H_w = 0 : \quad P/c = 0.0724(TSF)^{-2.0797} \quad (21)$$

$$H_w = 3,125 : \quad P/c = 0.4288(TSF)^{-1.6017} \quad (22)$$

$$H_w = 3.75 : \quad P/c = 0.468(TSF)^{-1.564} \quad (23)$$

$$H_w = 5 : \quad P/c = 0.774(TSF)^{-1.3729} \quad (24)$$

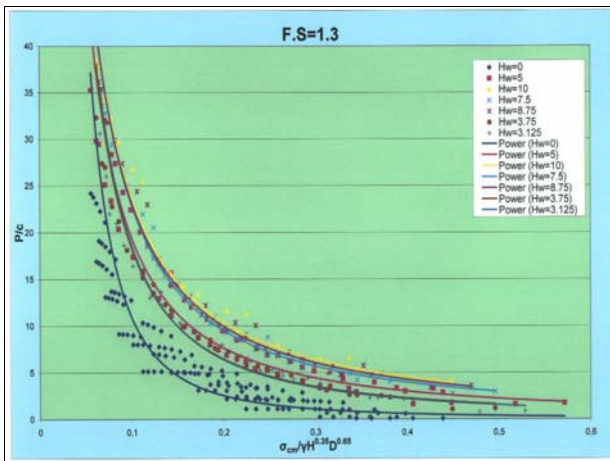
$$H_w = 7.5 : \quad P/c = 1.1477(TSF)^{-1.279} \quad (25)$$

$$H_w = 8.75 : \quad P/c = 1.3018(TSF)^{-1.2308} \quad (26)$$

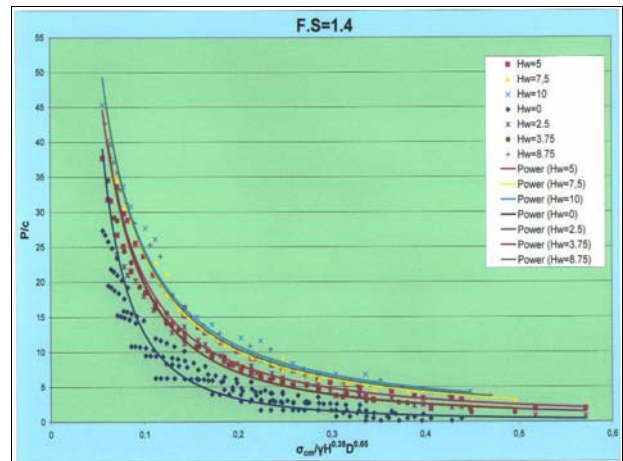
$$H_w = 10 : \quad P/c = 1.4539(TSF)^{-1.1926} \quad (27)$$

3.3.4 Συντελεστής Ασφαλείας 1.3

Θεωρήθηκε ότι όταν η πίεση υποστήριξης είναι τέτοια που να επιτυγχάνεται συντελεστής ασφαλείας 1.3, η ευστάθεια του μετώπου χαρακτηρίζεται ως προσωρινή.



Σχήμα 6. Πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής για επίτευξη F.S=1.3
Figure 6. Support pressure on the excavation face for F.S=1.3



Σχήμα 7. Πίεση υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής για επίτευξη F.S=1.4
Figure 7. Support pressure on the excavation face for F.S=1.4

$$Hw = 0 : \quad \frac{P}{c} = 0.0846(TSF)^{-2.1108} \quad (28)$$

$$Hw = 0 : \quad \frac{P}{c} = 0.1456(TSF)^{-1.9394} \quad (35)$$

$$Hw = 3,125 : \quad \frac{P}{c} = 0.5246(TSF)^{-1.5507} \quad (29)$$

$$Hw = 2,5 : \quad \frac{P}{c} = 0.6321(TSF)^{-1.4987} \quad (36)$$

$$Hw = 3.75 : \quad \frac{P}{c} = 0.5623(TSF)^{-1.5143} \quad (30)$$

$$Hw = 3.75 : \quad \frac{P}{c} = 0.6634(TSF)^{-1.4711} \quad (37)$$

$$Hw = 5 : \quad \frac{P}{c} = 0.8697(TSF)^{-1.3494} \quad (31)$$

$$Hw = 5 : \quad \frac{P}{c} = 0.9717(TSF)^{-1.3273} \quad (38)$$

$$Hw = 7.5 : \quad \frac{P}{c} = 1.235(TSF)^{-1.2687} \quad (32)$$

$$Hw = 7.5 : \quad \frac{P}{c} = 1.3282(TSF)^{-1.2582} \quad (39)$$

$$Hw = 8.75 : \quad \frac{P}{c} = 1.3812(TSF)^{-1.2261} \quad (33)$$

$$Hw = 8.75 : \quad \frac{P}{c} = 1.4679(TSF)^{-1.2196} \quad (40)$$

$$Hw = 10 : \quad \frac{P}{c} = 1.5292(TSF)^{-1.1899} \quad (34)$$

$$Hw = 10 : \quad \frac{P}{c} = 1.61(TSF)^{-1.1868} \quad (41)$$

3.3.5 Συντελεστής Ασφαλείας 1.4

Όταν ο συντελεστής ασφαλείας είναι της τάξεως του 1.4, η πίεση υποστήριξης που εφαρμόζεται στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας είναι αρκετή για να επιτευχθεί μόνιμη ευστάθεια. Οι εξισώσεις των γραμμών τάσης μορφής υπερβολής που αντιστοιχούν σε κάθε μια στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα Hw, είναι οι εξής :

4. Πεδίο Εφαρμογής των αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις παραμετρικές αναλύσεις έχουν εφαρμογή τόσο στην περίπτωση όπου η διάνοιξη της σήραγγας γίνεται με συμβατικό τρόπο, όσο και στην περίπτωση όπου γίνεται χρήση μηχανήματος ολομετώπου κοπής (T.B.M.). Σε περίπτωση συμβατικής διάνοιξης, η πίεση υποστήριξης P – για δεδομένο συντελεστή ασφαλείας – εύκολα μετατρέπεται σε δύναμη υποστήριξης και αυτή με την σειρά της σε αριθμό π.χ αγκυρίων μετώπου τύπου fiberglass δεδομένης εφελκυστικής αντοχής.

Όταν η διάνοιξη γίνεται με χρήση μηχανήματος τύπου slurry, τα αποτελέσματα έχουν πρακτική εφαρμογή στην περίπτωση όπου το slurry δεν διηθείται εντός του εδάφους, δηλαδή δημιουργείται στο μέτωπο μια αδιαπέρατη μεμβράνη (filter cake, όπως αναφέρεται στην διεθνή βιβλιογραφία). Εάν το μηχάνημα ολομετώπου κοπής είναι τύπου E.P.B., τότε η πρακτική εφαρμοσιμότητα των αποτελεσμάτων εξαρτάται από την διαπερατότητα του εδάφους εντός του οποίου γίνεται η διάνοιξη της σήραγγας. Εάν η διαπερατότητα του εδάφους είναι πολύ μικρή (σε βαθμό που δεν λαμβάνουν χώρα φαινόμενα υπόγειας υδατικής ροής και άρα δεν παρατηρούνται φαινόμενα διηθήσεως), τότε η χρήση των αποτελεσμάτων παρέχει μια αρκετά καλή εκτίμηση της απαιτούμενης πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής. Σε περίπτωση που παρατηρούνται φαινόμενα διηθήσεως, τότε τα αποτελέσματα υποεκτιμούν την απαιτούμενη πίεση υποστήριξης.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας, όλα σχεδόν τα συμπεράσματα που προέκυψαν, αναφέρονται σε σχέση με τον αδιάστατο παράγοντα TSF, όπως αυτός έχει ορισθεί προηγουμένως. Ο παράγοντας αυτός συσχετίζει τα γεωμηχανικά χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος γεωυλικού (c , ϕ και γ) με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της σήραγγας (H και D).

1. Όταν δεν υπάρχει υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας, δηλαδή όταν η τιμή του $H_w = 0$, τότε δεν απαιτείται η εφαρμογή πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο για τιμές του λόγου TSF που κυμαίνονται από 0.3 (που αντιστοιχεί σε συντελεστή ασφαλείας 1.0) έως ασυμπτωτικά το 0.6 (που αντιστοιχεί σε συντελεστή ασφαλείας 1.4).

2. Οι καμπύλες που συσχετίζουν την στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα για την κάθε τιμή του συντελεστή ασφαλείας έχουν την ίδια μορφή. Καθώς αυξάνεται η τιμή του συντελεστή ασφαλείας οι καμπύλες απλά μετατοπίζονται προς τα επάνω, αυξάνεται δηλαδή η απαιτούμενη πίεση υποστήριξης.

3. Για τιμές του παράγοντα TSF < 0.2 , η αναγκαία πίεση υποστήριξης P αυξάνεται πολύ απότομα. Για ένα έδαφος με δεδομένα χαρακτηριστικά αντοχής διατμητικής αντοχής c και ϕ , (δηλαδή σ_{cm}), και δεδομένο γεωστατικό ύψος H , αύξηση της διαμέτρου D προκαλεί εκθετική αύξηση της τιμής της πίεσης

υποστήριξης του μετώπου όταν ο λόγος TSF έχει τιμή μικρότερη ή ίση του 0.2 για την αρχική τιμή της διαμέτρου.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Horn M. (1961), "Horizontaler Erddruck auf senkrechte Abschlussflaechen von Tunneln", In : Landeskonferenz der ungarischen Tiefbauindustrie , Budapest (German translation, STUVA, Duesseldorf)

Jancsecz S. (1987), "Three dimensional calculation of required support pressures for the Hydroshield tunneling in Berlin U-8, Lot D 79., Report submitted to the Senate of city Berlin, FRG. 27 th , April. 1987

Janssen H. A. (1895), "Versuche uber Getreidedruck in Silozellen", Zeitschrift des Vereins deutscher Ingeniuere, Band XXXIX, No. 35, 1045-1049 (in German)

Κωνσταντής, Σ.Κ. (2003), «ΕΞΕΤΑΣΗ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΜΕΤΩΠΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΑΣΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ». Μεταπτυχιακή Εργασία Ε.Μ.Π.

Leca E. and Dormieux L. (1990), "Upper and lower bound solutions for the face stability of shallow circular tunnels in frictional material", Geotechnique 40, No. 4, pp. 581-606

Mihalīs, I.K. Kavvadas, M.J. Anagnostopoulos A.G., "Tunnel Stability Factor – A new parameter for weak rock tunneling", Proceedings, 15th Int. Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Istanbul, Vol. 2, pp. 1403 – 1406.