

Εκτίμηση των Επιφανειακών Καθιζήσεων λόγω της διάνοιξης Σηράγγων σε συνθήκες Ασθενούς Βραχώμαζας μέσω του Δείκτη Ευστάθειας Υπόγειου Ανοίγματος (Tunnel Stability Factor)

Estimation of Ground Surface Settlements due to Tunnelling in Weak Rock Conditions based on Tunnel Stability Factor

ΜΙΧΑΛΗΣ, Η. Κ. Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π., Εδαφομηχανικός MSc, DIC

ΓΕΩΡΓΟΠΟΥΛΟΣ Γ. Δ. Αγρον. Τοπογράφος Μηχανικός – Πολιτικός Μηχανικός, Λέκτορας Ε.Μ.Π.

ΑΝΑΓΝΩΣΤΟΠΟΥΛΟΣ Α. Γ. Πολιτικός Μηχανικός, Ομ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Η παρούσα εργασία αφορά στην εκτίμηση των επιφανειακών καθιζήσεων σε συνθήκες «ελεύθερου πεδίου», λόγω της διάνοιξης σηράγγων σε συνθήκες ασθενούς βραχώμαζας, με βάση τον Δείκτη Ευστάθειας Υπόγειου Ανοίγματος (Tunnel Stability Factor, (TSF)). Στην εργασία δίνεται η μαθηματική σχέση του δείκτη (TSF) και τεκμηριώνεται η εφαρμογή του μέσω αριθμού παραμετρικών αριθμητικών αναλύσεων. Επίσης παρουσιάζονται χρήσιμα νομογραφήματα και αναλυτικές σχέσεις για την εκτίμηση της σχετικής απώλειας εδαφικού όγκου και των μέγιστων τιμών των επιφανειακών καθιζήσεων συναρτήσει του δείκτη TSF σε συνθήκες ασθενούς βραχώμαζας.

ABSTRACT : This paper deals with the estimation of ground surface settlements, due to tunnelling in weak rock conditions, on the basis of a new parameter, the Tunnel Stability Factor (TSF). In this paper the mathematical expression of the tunnel stability factor is given and its usefulness is documented from the results of numerous parametric numerical analyses. Design charts and mathematical expressions are presented for the estimation of the relative ground loss and the maximum ground surface settlement by using the tunnel stability factor in weak rock conditions.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι διανοίξεις των σηράγγων προκαλούν μετακινήσεις στις υπερκείμενες εδαφικές μάζες. Αποτέλεσμα αυτών των μετακινήσεων είναι η εκδήλωση καθιζήσεων στην επιφάνεια του εδάφους. Οι εμφανιζόμενες επιφανειακές καθιζήσεις εξαρτώνται από το γεωτεχνικό περιβάλλον, εντός του οποίου γίνεται η διάνοιξη, το βάθος και τα γεωμετρικά στοιχεία της σήραγγας, καθώς επίσης κι από την μέθοδο που ακολουθήθηκε για την διάνοιξη της.

Ενώ η πλήρης εξάλειψη των καθιζήσεων κατά τη διάνοιξη μιας σήραγγας, είναι ουσιαστικά αδύνατη, είναι δυνατός ο σημαντικός περιορισμός τους, κατά τρόπον ώστε να μην εκδηλώνονται αστοχίες στην

επιφάνεια. Αυτό μπορεί να γίνει με την λήψη κατάλληλων μέτρων προβελτίωσης του εδάφους, αλλά και την εφαρμογή κατάλληλων μεθόδων υπόγειας διάνοιξης. Για την επιλογή των απαιτούμενων μέτρων και μεθόδων, μεταξύ των άλλων, χρειάζεται να γίνεται ρεαλιστική εκτίμηση του μεγέθους και της κατανομής των επιφανειακών καθιζήσεων.

Η κατανομή στον χώρο των επιφανειακών καθιζήσεων εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την απώλεια του εδαφικού όγκου που προκύπτει από μετακίνηση της εδαφικής μάζας, υπεράνω της σήραγγας, προς το εσωτερικό της υπόγειας εκσκαφής. Οι Peck (1969), Schmidt (1969) με εργασίες τους ερμηνεύουν τους μηχανισμούς οι οποίοι ευθύνονται για την δημιουργία απώλειας

εδαφικού όγκου κατά την διάρκεια των εργασιών διάνοιξης μιας σήραγγας.

Στην περίπτωση που η διάνοιξη της σήραγγας γίνεται σε αστικό περιβάλλον, οι επιφανειακές καθιζήσεις εάν ξεπεράσουν κάποιες τιμές είναι δυνατόν να προκαλέσουν αστοχίες, στις υπερκείμενες κατασκευές και ακόμη στα δίκτυα κοινής ωφέλειας της περιοχής.

Για την περίπτωση διάνοιξης σηράγγων σε συνθήκες ασθενούς βραχομάζας αρχικά ο M. Καββαδάς (1996) έχει προτείνει την προσέγγιση: "Weathered Rock Approach", η οποία διαθέτει συνδυασμένα στοιχεία από υπόγειες διανοίξεις σε εδαφικό υλικό και σε συνθήκες εξαλλοιωμένης βραχομάζας. Οι προτεινόμενες διαφοροποιήσεις καθορίζονται από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του υποβάθρου, τα οποία ποιοτικά εντάσσονται μεταξύ των ορίων εδαφικές συνθήκες – εξαλλοιωμένη βραχομάζα.

2. ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΚΑΘΙΖΗΣΕΙΣ

2.1. Κατανομή επιφανειακών καθιζήσεων

Πολλοί ερευνητές (Martos 1958, Peck, Schmidt 1969, Clough-Schmidt 1981, Attewell-Yeates 1984) θεωρούν ότι στην «τάφρο» των μετακινήσεων του εδάφους πάνω από την σήραγγα, υπό συνθήκες «ελευθέρου πεδίου», η κατανομή των καθιζήσεων, εγκάρσια του άξονα της σήραγγας, προσομοιώνεται με ικανοποιητική ακρίβεια από την ανεστραμμένη καμπύλη της κανονικής κατανομής (δηλ. καμπύλη του Gauss).

Η μαθηματική έκφραση της καμπύλης δίνεται από την γνωστή σχέση :

$$S = S_{\max} \cdot e^{\left(\frac{-\psi^2}{2i^2}\right)} \quad (1)$$

όπου S , η επιφανειακή καθίζηση σε απόσταση Ψ από τον άξονα της σήραγγας.

S_{\max} , η μέγιστη καθίζηση στην επιφάνεια του εδάφους, πάνω από τον άξονα της σήραγγας.

i , η απόσταση του σημείου καμπής από τον άξονα συμμετρίας της καμπύλης.

Την απόσταση i οι ερευνητές την συνδέουν με τον τύπο του εδάφους, την θέση και την γεωμετρία του υπόγειου ανοίγματος (Peck 1969, Mair και Taylor 1997, Clough Schmidt 1981) μέσω διαγραμμάτων. Οι Oteo Sagaseta (1982) βασισμένοι σε πλήθος αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία προτείνουν για τον

καθορισμό της απόστασης i την επόμενη σχέση :

$$i / R = 1.05(H / D) - 0.42 \quad (2)$$

όπου : R, D η ακτίνα κι η διάμετρος της σήραγγας αντιστοίχως

H το βάθος εκσκαφής της σήραγγας.

Η απώλεια εδαφικού όγκου V_s , συσχετίζεται με την τιμή της μέγιστης καθίζησης επιφανείας S_{\max} , μέσω της σχέσεως (3). Με βάση την V_s ορίζεται η V_l , η σχετική απώλεια εδαφικού όγκου (σχέση 4).

$$V_s = \int_{-\infty}^{+\infty} S d\psi \cong \sqrt{2\pi} i S_{\max} \quad (3)$$

$$V_l = V_s / V(\%) \quad (4)$$

όπου V είναι ο ιδεατός όγκος ανά μέτρο μήκους της διανοιχθείσας σήραγγας.

Είναι φανερό ότι με βάση την V_s (ή V_l) και την απόσταση i , μπορούν να εκτιμηθούν τα χαρακτηριστικά της κατανομής των επιφανειακών καθιζήσεων του εδάφους εξαιτίας της διάνοιξης σηράγγων.

Στην παρούσα εργασία η εκτίμηση των επιφανειακών καθιζήσεων, κατά την διάνοιξη σηράγγων σε συνθήκες ασθενούς βράχου, επιχειρείται μέσω αναλύσεων με την βοήθεια του Δείκτη Ευστάθειας Υπόγειου Ανοίγματος (Tunnel Stability Factor).

2.2 Δείκτης Ευστάθειας Υπόγειου Ανοίγματος

Οι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται γενικώς η κατανομή και το μέγεθος των επιφανειακών καθιζήσεων είναι η επιτόπου αντοχή της βραχομάζας, 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 Ανοίγματος (Tunnel Stability Factor, (TSF)), ο οποίος συνδυάζει όλους τους παραπάνω παράγοντες και είναι δυνατό να αποτελέσει σημαντική παράμετρο

για τον αρχικό καθορισμό της συμπεριφοράς των ανυποστήρικτων διατομών σήραγγων.

Έτσι, ο Δείκτης Ευστάθειας Υπογείου Ανοιγματος (TSF) ορίζεται μέσω της σχέσης :

$$TSF = \frac{\sigma_{cm}}{\gamma \cdot h^\alpha \cdot D^{1-\alpha}} \quad (5)$$

όπου: σ_{cm} η επιτόπου αντοχή (σε Kpa)
 γ το φαινόμενο βάρος της βραχώμαζας (σε KN/m³)

h το βάθος του άξονα της σήραγγας (σε m)

D η ισοδύναμη διάμετρος σήραγγας (σε m)

εκθέτης $\alpha = 0,75$

Η σ_{cm} εκτιμάται από την σχέση :

$$\sigma_{cm} = 0,02 \cdot \sigma_{ci} \cdot e^{\frac{GSI}{25,5}} \quad (6)$$

όπου: σ_{ci} η αντοχή του άρρηκτου υλικού

GSI ο δείκτης γεωλογικής αντοχής

Επειδή το βάθος h και η διάμετρος της σήραγγας D είναι συσχετισμένα με το ύψος των υπερκειμένων γαιών H ($h = H + D/2$), θεωρήθηκε σκόπιμο στη σχέση ορισμού του TSF να περιλαμβάνεται η παράμετρος H του ύψους των υπερκειμένων γαιών, αντί της h (Γ. Γεωργόπουλος 2004). Έτσι η σχέση (5) λαμβάνει τη μορφή :

$$TSF = \frac{\sigma_{cm}}{\gamma \cdot H^\alpha \cdot D^{1-\alpha}} \quad (7)$$

Μέσω παραμετρικών αναλύσεων, με την βοήθεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, προσδιορίστηκε η τιμή του εκθέτη α για τη σχέση (7), καθώς επίσης νομογραφήματα και σχέσεις, χρήσιμες για την εκτίμηση της σχετικής απώλειας εδαφικού όγκου και των μέγιστων τιμών των επιφανειακών καθιζήσεων σε ποικιλία συνθηκών ασθενούς βραχώμαζας.

3. ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

3.1 Ορισμός του Δείκτη Ευστάθειας Υπόγειου Ανοιγματος (TSF)

Στο πλαίσιο των παραμετρικών αναλύσεων εξετάστηκαν οι συνδυασμοί ανυποστήρικτων

κυκλικών σήραγγων με διαμέτρους D : 4m, 6m, 8m, 10m και ύψος υπερκειμένων γαιών H : 10m, 15m, 20m, 25m, οι οποίες διανοίγονται μέσα σε συνθήκες ασθενούς βραχωμάζας με τιμές αντοχής άρρηκτου πετρώματος σ_{ci} : 2.5Mpa, 5Mpa, 10Mpa και τιμές δείκτη γεωλογικής αντοχής GSI : 10, 20, 30, 40. Τα υπόλοιπα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά της βραχώμαζας θεωρήθηκαν ότι είναι $\gamma = 25KN/m^3$, $m_i = 10$, $K_o = 1$, $\nu = 0.35$.

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

$$TSF = \frac{\sigma_{cm}}{\gamma \cdot H^{0,70} \cdot D^{0,30}} \quad (8)$$

3.2 Κατανομή επιφανειακών καθιζήσεων

Με βάση την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των προαναφερόμενων παραμετρικών αναλύσεων, δίνεται στη συνέχεια το διάγραμμα 1 (έντονη γραμμή) το οποίο συσχετίζει το εύρος της κατανομής των καθιζήσεων επιφανείας, με το βάθος της σήραγγας και τα γεωμετρικά στοιχεία της διατομής της.

Η αντίστοιχη σχέση με την καλύτερη δυνατή συσχέτιση προκύπτει ως ακολούθως:

$$(i/R) = 1,79 \cdot (h/D) - 1,17 \quad (9)$$

3.3 Μέγεθος των επιφανειακών καθιζήσεων

Τα διαγράμματα 2 και 3 συσχετίζουν τη μέγιστη καθίζηση επιφανείας με τις τιμές του ποιοτικού δείκτη βραχώμαζας GSI .

3.4 Συσχέτιση TSF με επιφανειακές καθιζήσεις

Τα διαγράμματα 4, 5, 6 συσχετίζουν τον λόγο V_s/V , το μέγεθος της S_{max} με τις τιμές του TSF. Οι σχέσεις που προκύπτουν από τις ανωτέρω συσχετίσεις είναι οι ακόλουθες :

$$(V_s/V) = 0,0011 \cdot (TSF)^{(-1,69)} \quad (10)$$

$$(S_{max}/D) = 0,0002 \cdot (TSF)^{(-2,66)} \quad (11)$$

$$S_{max} = 0,0018 \cdot (TSF)^{(-3,15)} \quad (12)$$

Στο διάγραμμα 7 συσχετίζεται η σχετική απώλεια εδαφικού όγκου με τον συντελεστή υπερφόρτισης N για την περίπτωση σήραγγων που διανοίγονται σε συνθήκες ασθενούς βραχώμαζας. Οι Clough και Schmidt (1981) συνδέουν την $(V_s/V)\%$ με τον N , όπου :

$$N = (p_o - p_i) / s_u$$

p_o η ολική πίεση των υπερκειμένων γαιών στη στάθμη του άξονα της σήραγγας, p_i η πίεση στο εσωτερικό της σήραγγας λόγω της αντιστήριξης της, η οποία λαμβάνεται $p_i = 0$ υπέρ της ασφάλειας και s_u η αστράγγιστη διατμητική αντοχή της περιβάλλουσας τη σήραγγα εδαφικής μάζας. Η συσχέτιση αφορά σε περιπτώσεις ανεπένδυτων σηράγγων που διανοίγονται σε έδαφος με συμπεριφορά ιδεατά ελαστική ή ιδεατά ελαστοπλαστική, με ακραίες τιμές του δείκτη ακαμψίας $I_r = 100$ και $I_r = 200$ ($I_r = G/s_u$, G μέτρο διατμήσεως εδάφους) που είναι από τις πλέον διαδεδομένες. Στο διάγραμμα 8 συγκρίνονται τα αποτελέσματα αυτά με τα αντίστοιχα, για την αυτή απεικόνιση, τα οποία προέκυψαν από την παρούσα έρευνα για συνθήκες ασθενούς βραχώμαζας.

4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Στο πλαίσιο της εργασίας έγινε εφαρμογή μετρημένα στοιχεία από τις περιοχές Σταθμός Λαρίσης-Μεταξουργείο και Σταθμός Χολαργού του Μετρό της Αθήνας. Συγκεκριμένα, με δεδομένα την διάμετρο της σήραγγας (D), το ύψος των υπερκειμένων γαιών (H) και την ποιότητα της βραχώμαζας (GSI, σ_{ci}), εκτιμήθηκαν σε κάθε μια περίπτωση από τα νομογραφήματα, η (V_s/V) σχετική απώλεια όγκου, η μέγιστη καθίζηση (S_{max}) και η απόσταση (i). Τελικά οι εκτιμημένες ποσότητες συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες που είχαν υπολογισθεί μετά από μετρήσεις στο ύπαιθρο.

• Σταθμός Λαρίσης – Μεταξουργείο

Τα δεδομένα είναι : $D = 9,5m$, $H = 11m$, $GSI = 20$ και $\sigma_{ci} = 2,5Mpa$.

Από τις μετρήσεις υπολογίσθηκαν οι $V_s/V = 0,42\%$, $S_{max} \cong 0,02m$ και $i = 6,5m$.

Προσδιορίσθηκε ο $TSF = 0,42$.

Στη συνέχεια από την αναλυτική σχέση $(V_s/V) = 0,0011 \cdot (TSF)^{(-1,69)}$, εκτιμήθηκε η $V_s/V = 0,48\%$, η οποία όπως προέκυψε είναι της αυτής τάξης με την υπολογισμένη από τις μετρήσεις.

Από την $(S_{max}/D) = 0,0002 \cdot (TSF)^{(-2,66)}$, εκτιμήθηκε η τιμή $S_{max} = 0,019m$, η οποία είναι της ίδιας τάξης με την μετρηθείσα τιμή.

Από την σχέση $(i/R) = 1,79 \cdot (h/D) - 1,17$, εκτιμήθηκε η απόσταση $i \cong 8,50m$, για τη οποία όμως παρατηρείται απόκλιση από την υπολογισμένη μέσω μετρήσεων.

• Σταθμός Χολαργού

Τα δεδομένα είναι : $D = 14,5m$, $H = 12,3m$, $GSI = 30$ και $\sigma_{ci} = 2,5Mpa$.

Από τις μετρήσεις υπολογίσθηκαν οι $V_s/V = 0,31\%$, $S_{max} \cong 0,017m$ και $i = 11m$.

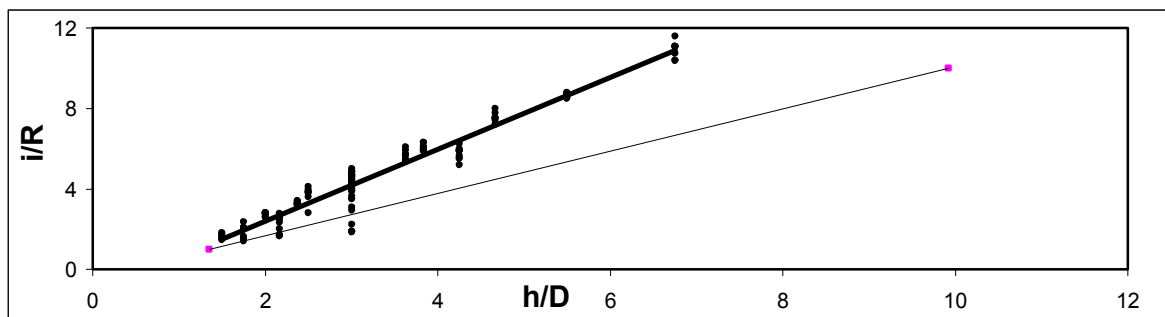
Προσδιορίσθηκε ο $TSF = 0,54$

Στη συνέχεια όπως και στην προηγούμενη περίπτωση εκτιμήθηκαν αναλυτικά οι ποσότητες :

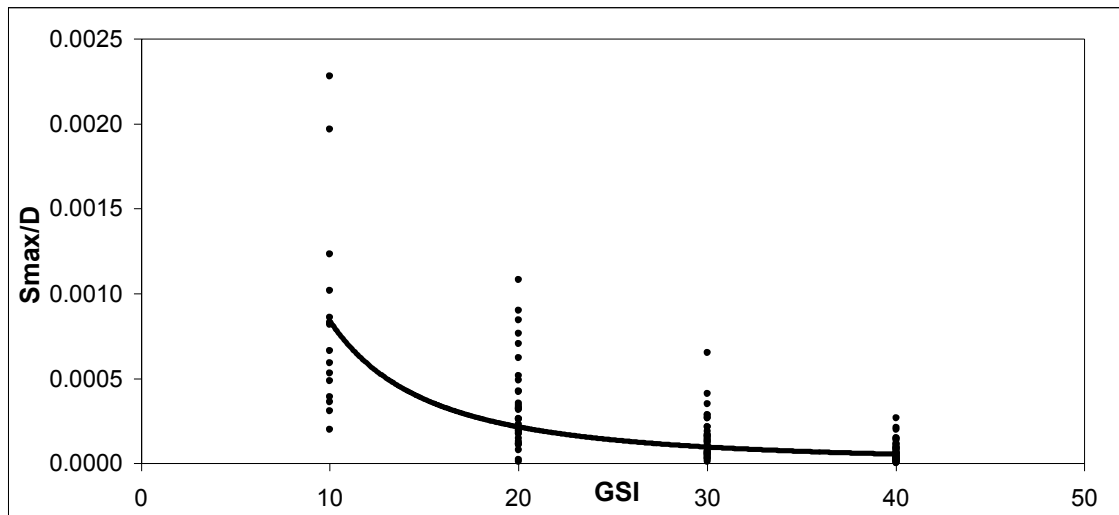
$V_s/V = 0,31\%$, η οποία συμπίπτει με την υπολογισμένη από τις μετρήσεις.

$S_{max} = 0,015m$, η οποία είναι της ίδιας τάξης με την υπολογισμένη από τις μετρήσεις.

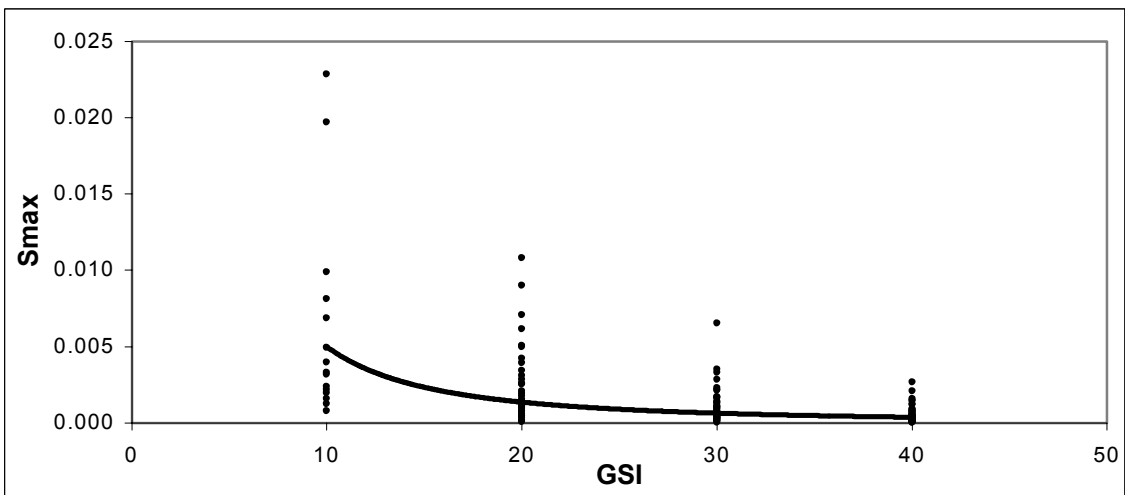
Ενώ η εκτίμηση του $i \cong 9m$, παρουσιάζει και πάλι απόκλιση.



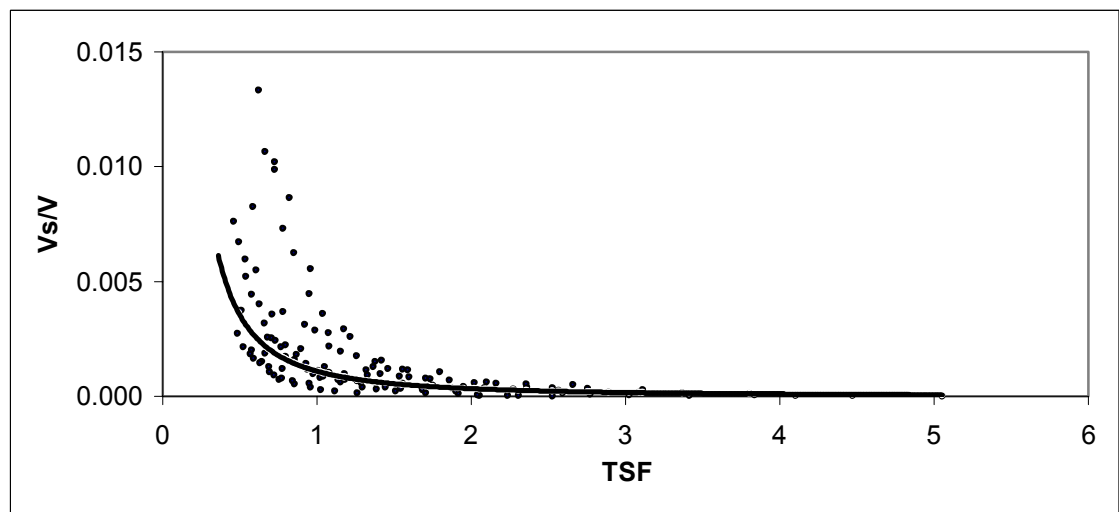
Διάγραμμα 1. Συσχέτιση μεταξύ i/R και h/D
Diagram 1. Correlation between i/R and h/D



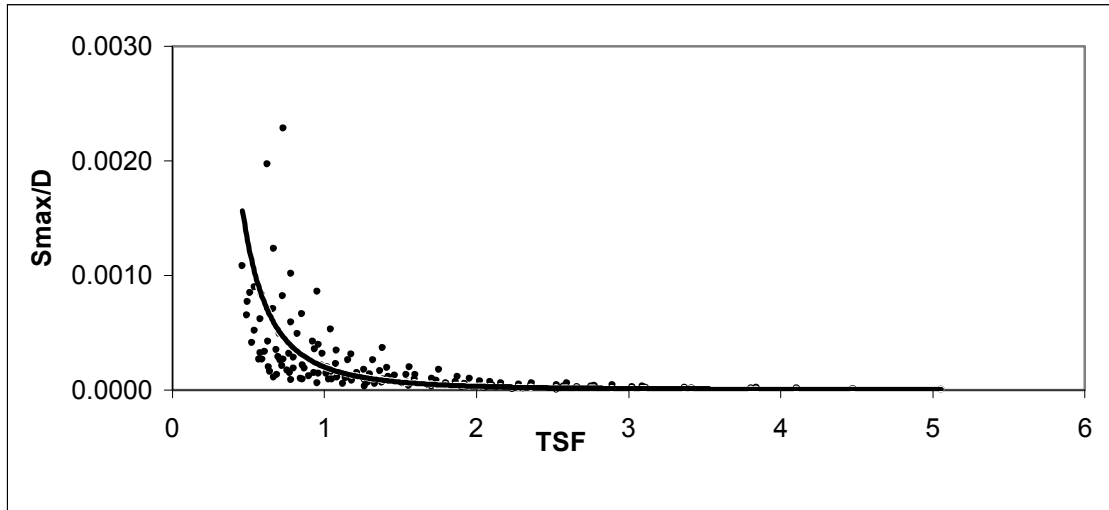
Διάγραμμα 2. Συσχέτιση S_{max}/D και GSI
 Diagram 2. Correlation between S_{max}/D and GSI



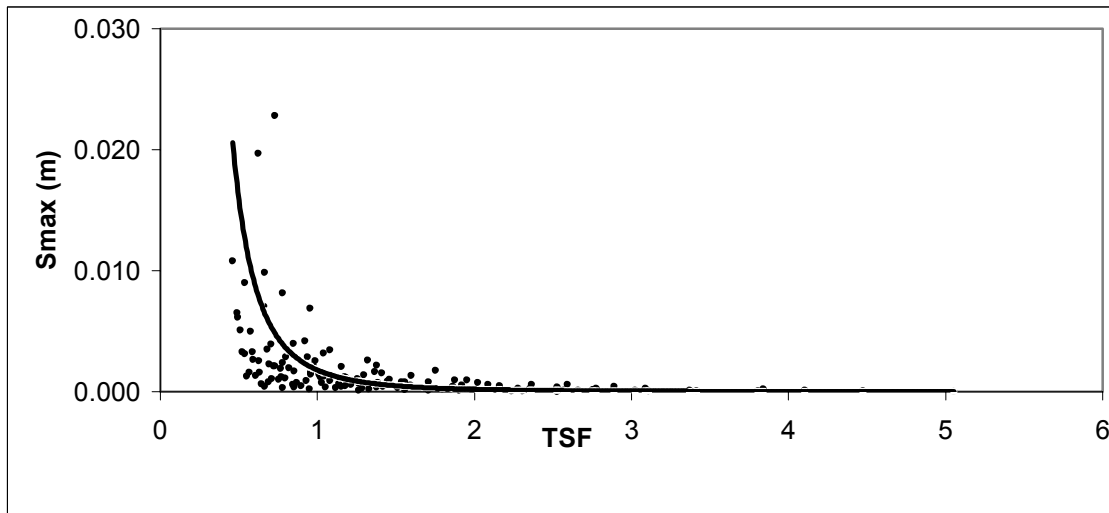
Διάγραμμα 3. Συσχέτιση S_{max} και GSI
 Diagram 3. Correlation between S_{max} and GSI



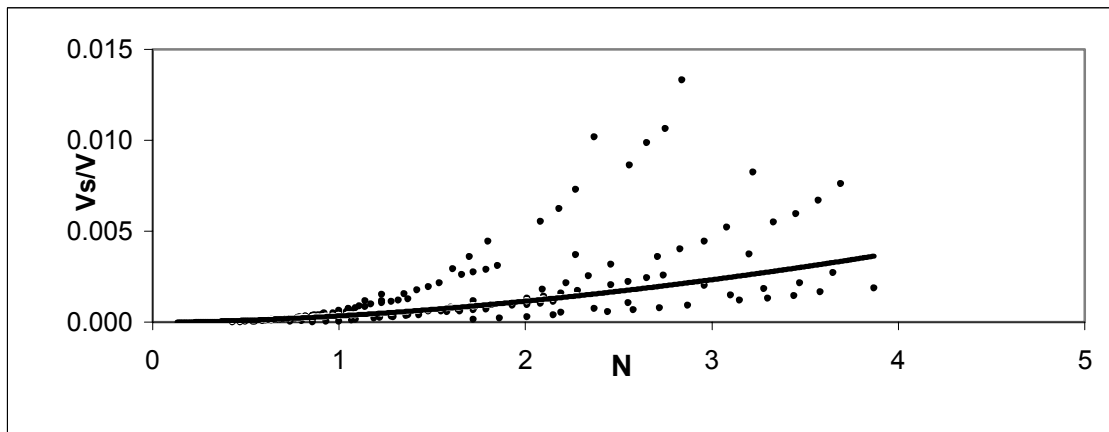
Διάγραμμα 4. Συσχέτιση V_s/V και TSF
 Diagram 4. Correlation between V_s/V and TSF



Διάγραμμα 5. Συσχέτιση S_{max}/D και TSF
 Diagram 5. Correlation between S_{max}/D and TSF



Διάγραμμα 6. Συσχέτιση S_{max} και TSF
 Diagram 6. Correlation between S_{max} and TSF



Διάγραμμα 7. Συσχέτιση V_s/V και N
 Diagram 7. Correlation between V_s/V and N

5. ΣΧΟΛΙΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας, με βάση τα νομογραφήματα τα οποία συντάχθηκαν, αλλά και τα αποτελέσματα των εφαρμογών που εξετάστηκαν προκύπτουν τα ακόλουθα πρόδρομα συμπεράσματα.

- Το διάγραμμα 1 (i/R vs h/D) συμπληρώνει την πρόταση των Oteo και Sagasetta (λεπτή γραμμή), καθώς πλέον περιλαμβάνει ευρύτερο φάσμα γεωτεχνικών συνθηκών διάνοιξης σπηραγγών (δηλαδή και συνθήκες ασθενούς βραχώμαζας). Παρατηρείται όμως ότι από περιορισμένο αριθμό μετρήσεων i υπάρχουν αποκλίσεις.

- Εκ των διαγραμμάτων 2 (S_{max}/D vs GSI) και 3 (S_{max} vs GSI), διαπιστώνεται σημαντική διασπορά των αποτελεσμάτων των παραμετρικών αναλύσεων ως προς τα μεγέθη των επιφανειακών καθιζήσεων συναρτήσει των τιμών του δείκτη GSI. Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί στο ότι ο γεωλογικός δείκτης GSI της βραχώμαζας δεν είναι δυνατόν να αποτελέσει παράμετρο μονοσήμαντης αντιστοίχισης με τη μηχανική συμπεριφορά αβαθούς υπογείου ανοίγματος.

- Όπως φαίνεται στα διαγράμματα 4 (V_S/V vs TSF), 5 (S_{max}/D vs TSF) και 6 (S_{max} vs TSF) η διασπορά των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων είναι περιορισμένη, ο μικρός αριθμός μετρήσεων τις επιβεβαιώνει.

- Η τιμή του δείκτη ευστάθειας υπόγειου ανοίγματος $TSF \approx 1$ μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελεί ικανή συνθήκη για την αποφυγή αστοχιών σε περιπτώσεις αβαθών σπηραγγών διανοιγμένων μέσα σε ασθενείς βραχώμαζες.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Αναγνωστόπουλος, Γ.Α. και Μιχάλης, Η.Κ. (2003), «Σημειώσεις Αντιστηρίξεων και Καθιζήσεων λόγω Εκσκαφών». Έκδ. Ε.Μ.Π., Αθήνα.

Attewell P.B., Yeates, J. (1984), "Tunneling in soil. Ground movements and their effects on structures", Attewell and Taylor eds., pp.132-215, Surrey Univ. Press.

Clough, W., Schmidt, B. (1981), "Design and performance of excavations and Tunnels in soft clay", Soft Clay Engineering, Elsevier, Amsterdam, pp. 562-634.

Γεωργόπουλος, Γ.Δ. (2004), «Κατανομή Επιφανειακών Καθιζήσεων λόγω της Διάνοιξης Αβαθών Σπηραγγών σε συνθήκες Ασθενούς Βραχώμαζας». Μεταπτυχιακή Εργασία Ε.Μ.Π.

Kavvasdas, M.J. (1996), "Tunnelling in weathered rock – Rock or soil mechanics approaches?". Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Mair & Taylor, Rotterdam; Balkema, pp.337-340.

Mair, R., Taylor, R.N. (1997), "Bored tunneling in the urban environment" Theme Lecture, Plenary Session 4, Proc. 14th Int. Conf. SMFE, Hamburg, Germany, 1997, vol. 4.

Mair R. J., (1998) "Geotechnical aspects of design criteria for bored tunneling in soft ground", Tunnel and Metropolises, Negro Jr & Ferreira, Rotterdam; Balkema, pp183-199.

Mihalis, I.K. Kavvasdas, 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.

Oteo, C.S., Sagasetta, C. (1982), "Prediction of settlements due to underground openings", Numerical Models in Geomechanics, R. Dungar, G. N. Pande and J. A. Studer, eds., Zurich, Switzerland.

Oteo, C.S., Sagasetta, C. (1996), Some Spanish experiences on measurements and evaluation of ground displacements around urban tunnels. Mair & Taylor (eds), Geotechnical Aspects of Underground Construction in soft Ground: Rotterdam; Balkema, pp 731-736.

Peck R.B. (1969), "Deep excavations and tunneling in soft ground", Proc. 7th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., State-of-the-Art Volume, pp 225-250.

Schmidt, B. (1969), "Settlement and ground movements associated with tunneling in soil", PhD Thesis, University of Illinois.