

Παραμετρική μελέτη μετακινήσεων τμηματικής και ολομέτωπης συμβατικής διάνοιξης σηράγγων

Parametric study of displacements on sequential and full face conventional excavation

ΣΠΥΡΙΔΩΝ ΠΑΠΑΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ. Πολιτικός Μηχανικός, Ινστιτούτο Βραχομηχανικής και Σηράγγων, Πολυτεχνείο του Γκράτς.

ΒΟΥΛΦ ΣΟΥΜΠΕΡΤ. Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής, Ινστιτούτο Βραχομηχανικής και Σηράγγων, Πολυτεχνείο του Γκράτς.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Κατά την διάνοιξη ρηχών σηράγγων σε δομημένες περιοχές σημαντικά ζητήματα είναι η ευστάθεια μετώπου στο ανυποστήριχτο τμήμα καθώς επίσης οι εδαφικές μετακινήσεις και η καθίζηση επιφάνειας. Σήμερα μπορούν να παρατηρηθούν δύο απόψεις για την αντιμετώπιση τέτοιων σηράγγων. Μία άποψη είναι ο διαχωρισμός του μετώπου σε πολλά στάδια εκσκαφής όπως εκσκαφή άνω ημικυκλίου, βαθμίδας και ανάστροφου πυθμένα με μία ορισμένη απόσταση μεταξύ των σταδίων. Η άλλη άποψη είναι η ολομέτωπη εκσκαφή με ένα γρήγορο κλείσιμο του δακτύλιου και ισχυρή υποστήριξη του μετώπου προς αντιμετώπιση της ευστάθειας του. Οι διαφορετικές ιδέες συγκρίθηκαν σε παραμετρική μελέτη με τη χρήση του κώδικα FLAC3D.

ABSTRACT: When constructing shallow tunnels in built up areas, stability of the face and in the unsupported span, as well as displacements of ground and subsidence are major issues. Presently two different concepts to deal with such tunnels can be observed. One concept is to subdivide the face into several excavation steps, like top heading bench and invert excavation with a certain distance between the steps. The other concept is a full face excavation with a quick ring closure and heavy support of the face to account for the face stability problem. The different concepts have been compared in a parametric study, using the code FLAC3D.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σύμφωνα με τον Αυστριακό Κανονισμό περί Σηράγγων του 2001, η συμπεριφορά του συστήματος ορίζεται ως η συμπεριφορά του σύνθετου συστήματος που προκύπτει από την βραχώμαζα και τα επιλεγμένα μέτρα κατασκευής (μέθοδος διάνοιξης και υποστήριξης, επικουρικά μέτρα). Κατά την διάνοιξη σηράγγων με χαμηλό υπερκείμενο η ανακατανομή των τάσεων συνδυασμένη με πτωχής ποιότητας έδαφος μπορεί να οδηγήσει σε αστάθεια του μετώπου και της κλειδας.

Διαμητρικές αστοχίες μπορούν να αναπτυχθούν προοδευτικά, χωρίς σημαντική προειδοποίηση (Schubert, Vavrovsky 1994).

Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική υπερεκσκαφή της κλειδας η ακόμα και σε αστοχία τύπου καμινάδας σε περίπτωση φτωχού εδάφους και χαμηλής πλευρικής πίεσης (Feder 1981).

Επομένως η παραμόρφωση θα πρέπει να τεθεί υπό έλεγχο με προσεκτικό τρόπο για να ελαχιστοποιηθεί ο κίνδυνος και η κλίμακα αστοχίας όπως επίσης και η επιφανειακή καθίζηση.

Οι υπερασπιστές της ολομέτωπης εκσκαφής ισχυρίζονται ότι η αύξηση της δυσκαμψίας του πυρήνα μπροστά από το μέτωπο είναι το κύριο μέσο ελέγχου της

προσύγκλισης και της σύγκλισης στην κοιλότητα (Lunardi 2000).

Σε περίπτωση χαμηλής ευστάθειας μετώπου εφαρμόζεται εκτεταμένη ενίσχυση του μετώπου κυμαινόμενη από έναν αριθμό 50- 60 αγκύρια σε ρηχές σήραγγες, έως 200 σε μεγαλύτερο υπερκείμενο η ακόμα και 400 σε εξαιρετικά αδύναμο έδαφος.

Γρήγορο κλείσιμο του δακτύλιου επίσης απαιτούνταν από κάποιους πρωταγωνιστές της NATM (Muller 1978). Ωστόσο, με το πέρασμα δεκαετιών η σταδιακή εκσκαφή σε φτωχά εδάφη με την εγκατάσταση ενός προσωρινού αναστροφου τόξου στο άνω ημικύκλιο έχει γίνει κοινή πρακτική. Σε περίπτωση πολύ αδύναμου εδάφους, το μέτωπο συνήθως υποστηρίζεται από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και ένα μικρό και επαρκή αριθμό αγκυρίων. Μέχρι τώρα δεν έχει επιχειρηθεί μία αντικειμενική αξιολόγηση των προτερημάτων και μειονεκτημάτων των διαφορετικών κατασκευαστικών μεθόδων. Για να γίνει δυνατή μία αντικειμενική σύγκριση των δύο μεθόδων προσέγγισης διενεργήθηκε μία παραμετρική μελέτη. Στην εργασία αυτή δόθηκε έμφαση στην αξιολόγηση των μετακινήσεων της σήραγγας, το έδαφος μπροστά από το μέτωπο και την επιφανειακή καθίζηση.

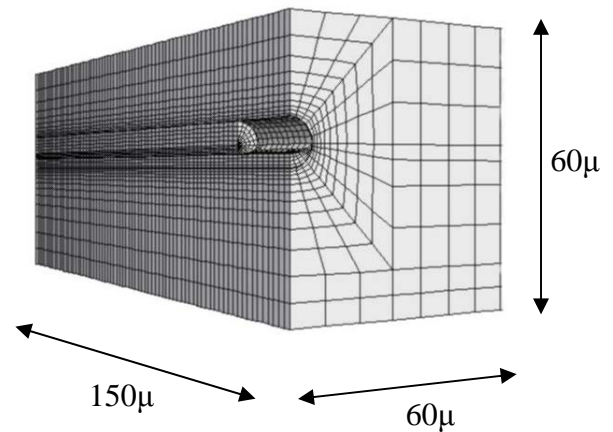
2. 3D ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Για την προσομοίωση της εκσκαφής της σήραγγας χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας FLAC3D.

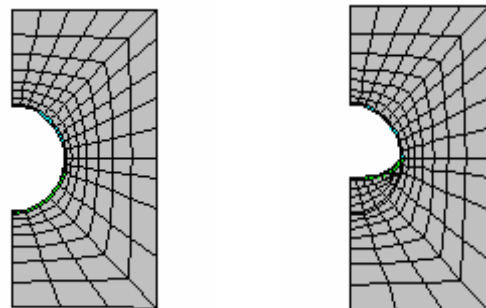
2.1 Γεωμετρία μοντέλου

Το μήκος του μοντέλου επιλέχθηκε με 150μ και το πλάτος με 60μ και 80μ για το πιο αδύναμο έδαφος αντίστοιχα. Η διάμετρος της σήραγγας είναι 10μ ενώ το υπερκείμενο 20μ.

Στη σταδιακή εκσκαφή το ύψος του άνω ημικυκλίου είναι 5μ με βάθος προσωρινού αναστροφου τόξου 2μ. Η γεωμετρία του μοντέλου φαίνεται στο διάγραμμα 1 και οι δύο μέθοδοι εκσκαφής στο διάγραμμα 2.



Διάγραμμα 1: Γεωμετρία 3D μο' Figure 1: Geometry of 3D model.



Ολομέτωπη εκσκαφή
Full face excavation

Σταδιακή εκσκαφή
Staged excavation

Διάγραμμα 2: Μέθοδοι εκσκαφής.
Figure 2: Excavation methods.

2.2 Παράμετροι υλικών

Για το έδαφος χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb ενώ το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα προσομοιώθηκε ελαστικά. Η παραμετρική μελέτη έγινε με διακύμανση συνοχής, συντελεστή ωθήσεων K_0 και γωνίας τριβής (Πίνακας 1).

Πίνακας 1.

Table 1.

Μοντέλο	Συνοχή (kPa)	Γωνία τριβής (°)	Μέτρο Young(MPa)	Λόγος Poisson (-)	K_0 (-)
1	10-100	25	40	0,3	1,0
2	20	15-25	40	0,3	1,0
3	30	25	40	0,3	0,5-1,0

Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα μοντελοποιήθηκε με ελαστική συμπεριφορά λαμβάνοντας υπόψη τις επιδράσεις χρονικής σκλήρυνσης, συστολής ξηράνσεως και ερπυσμού χρησιμοποιώντας ένα μέτρο του Young με μέγιστη τιμή 2000 MPa (Wittke et al, 2003, Schubert, 2001, Leitner, 2005). Ληφθήκαν υπόψη τρία στάδια σκλήρυνσης (Πίνακας 2).

Πίνακας 2.

Table 2.

Παράμετρος	1	2	3
$E_{c,eff}$ (MPa)	500	1000	2000

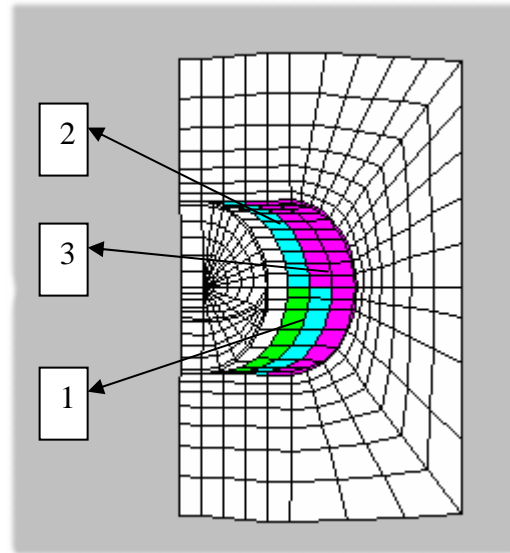
Για όλες τις προσομοιώσεις εφαρμόστηκε για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ένα πάχος 20 εκ.

2.3 Αλληλουχία εκσκαφής και τοποθέτησης υποστήριξης.

Εκσκαφή 80μ στη διαμήκη κατεύθυνσή προσομοιώθηκε σταδιακά με βήμα προχώρησης 2μ. Η εγκατάσταση της υποστήριξης και στις δύο κατασκευαστικές μεθόδους απεικονίζεται στα σχήματα 3,4.

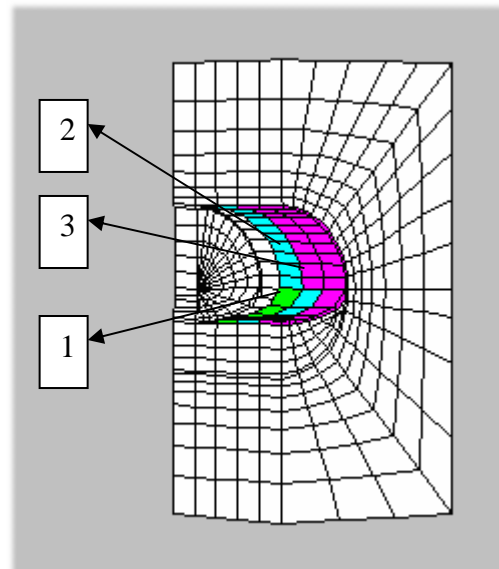
Οι αριθμοί 1,2 και 3 στα διαγράμματα αντιστοιχούν σε αυτές του πίνακα παραπάνω.

Για την σταδιακή εκσκαφή φάνηκε ότι λόγω του ανεστραμμένου τόξου στο άνω ημικύκλιο και το άμεσο κλείσιμο του δακτύλιου με την εκσκαφή βαθμίδας και ανεστραμμένου πυθμένα μόνο αμελητέες πρόσθετες μετακινήσεις εμφανίστηκαν κατά την εκσκαφή της βαθμίδας. Ως εκ τούτου τα αποτελέσματα εκσκαφής της βαθμίδας δεν παρουσιάζονται.



Διάγραμμα 3: Τοποθέτηση υποστήριξης για ολομέτωπη εκσκαφή.

Figure 3: Installation of support for full face excavation.



Διάγραμμα 4: Τοποθέτηση υποστήριξης για εκσκαφή άνω ημικυκλίου.

Figure 4: Installation of support for excavation of top heading.

2.4 Υποστήριξη μετώπου

Η υποστήριξη μετώπου προσομοιώθηκε με μια ομοιόμορφα κατανομημένη πίεση στο μέτωπο. Η επιρροή της πίεσης μετώπου στις μετακινήσεις μελετήθηκε και για τις δύο μεθόδους εκσκαφής. Η υποστήριξη εφαρμόστηκε στις περιπτώσεις που δεν μπορούσε να επέλθει σταθεροποίηση χωρίς αυτή. Για να αξιολογήσουμε τον ισοδύναμο αριθμό αγκυριών μετώπου, το μέσο φορτίο που παραλαμβάνει κάθε αγκύριο επιλέχθηκε 100 kN. Κάποιοι συγγραφείς χρησιμοποιούν την ανώτατη επιτρεπόμενη τιμή φορτίου των αγκυριών (Peila, 1994) για να αξιολογήσουν την ισοδύναμη πίεση μετώπου.

Άλλες μελέτες δείχνουν ότι το φορτίο που παραλαμβάνεται από ένα αγκύριο κυμαίνεται στη περιοχή με μέγιστο 100 kN ανεξαρτήτως αντοχής (Dias, 1999, Trompille, 1998, Leitner, 2005).

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Ορολογία

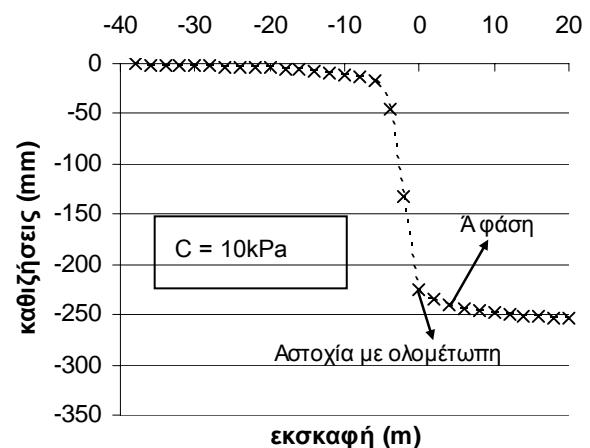
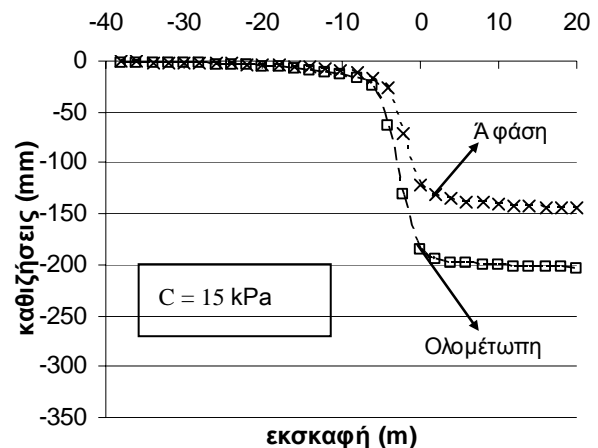
Σε αυτή τη μελέτη, η προκαθίζηση αναφέρεται στη καθίζηση που λαμβάνει χώρα μπροστά από το μέτωπο.

3.2 Επιρροή συνοχής

Για μία συνοχή κάτω από 50 kPa, οι προκαθιζήσεις (στη στάθμη της κλειδας καθώς επίσης και της επιφάνειας) που προκαλούνται από την σταδιακή εκσκαφή είναι μικρότερες από αυτές που προκαλούνται από την ολομέτωπη, παρα το ότι αυξάνονται με μείωση της συνοχής και στις δύο περιπτώσεις (διαγράμματα 5,6). Η διαταραχή του εδάφους μπροστά από το μέτωπο αυξάνεται με την ολομέτωπη εκσκαφή. Αυτό σύντομα οδηγεί σε μεγαλύτερες τελικές καθιζήσεις κλειδας καθώς επίσης και ελαφρά μεγαλύτερες επιφανειακές καθιζήσεις. Η κύρια διαφορά είναι ότι με την ολομέτωπη εκσκαφή οι προμετακινήσεις είναι σημαντικά μεγαλύτερες. Οι μετακινήσεις του μετώπου με αυτή την μέθοδο εκσκαφής είναι πολύ μεγαλύτερες απ'ότι στην περίπτωση της σταδιακής (διαγράμμα 7). Μεγαλύτερες μετακινήσεις μετώπου αυξάνουν τον κίνδυνο για το εργατικό δυναμικό και οδηγούν σε απαιτήσεις υποστήριξης μετώπου.

Εντοπισθηκε μία κρίσιμη τιμή συνοχής των 30 kPa για την οποία οι τελικές καθιζήσεις

κλειδας με σταδιακή εκσκαφή είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες με ολομέτωπη.

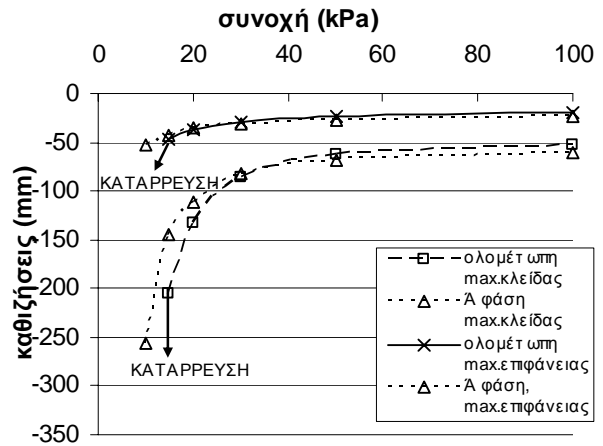
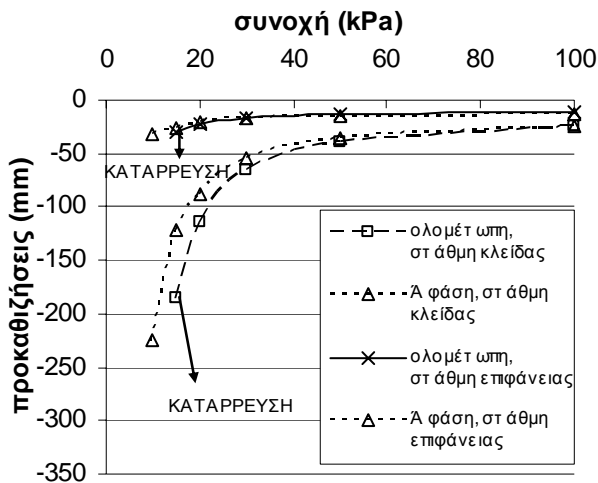


Διάγραμμα 5: Ιστορικό εξέλιξης καθιζήσεων κλειδας, σταθμός 40, $\phi = 25^\circ$, $K_0 = 1.0$, για $c = 10$ και 15 kPa.

Figure 5: History plot of settlements of crown for station 40, $\phi = 25^\circ$, $K_0 = 1.0$, for $c = 10$ and 15 kPa.

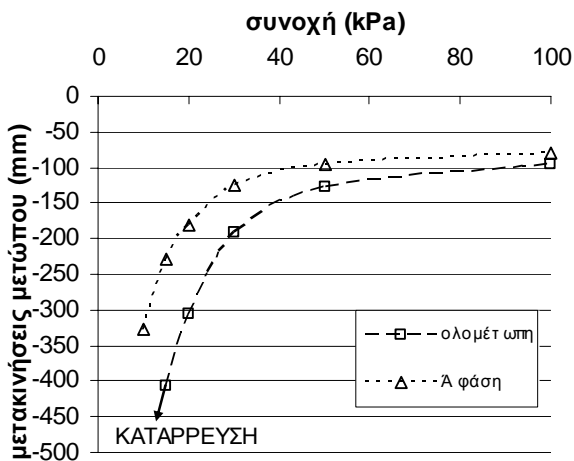
Με περαιτέρω μείωση της συνοχής κάτω από 20 kPa οι τελικές καθιζήσεις κλειδας αυξάνονται με την ολομέτωπη διάνοιξη περισσότερο απ'ότι με την τμηματική.

Όταν η συνοχή μειώνεται στα 10 kPa η σήραγγα διανοιγμένη με ολομέτωπη εκσκαφή οδηγείται σε κατάρρευση ενώ το στάδιο του ανω ημικυκλίου παραμένει ευσταθές.



Διάγραμμα 6: Προκαθιζήσεις και καθιζήσεις κλειδας και επιφάνειας, $\phi = 25^0$, $Ko=1.0$, διάφορη συνοχή

Figure 6: Pre-settlements and settlements at crown level and surface, $\phi = 25^0$, $Ko=1.0$, cohesion varied



Διάγραμμα 7: Μετακινήσεις μετώπου, $\phi = 25^0$, $Ko=1.0$, διάφορη συνοχή

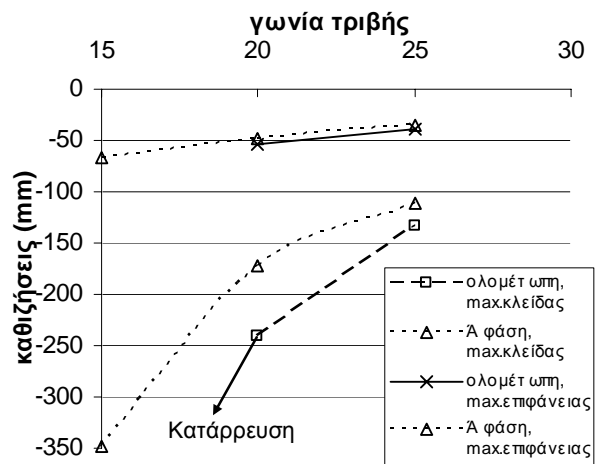
Figure 7: Face displacements, $\phi = 25^0$, $Ko=1.0$, cohesion varied

3.3 Επιρροή συντελεστή ωθήσεων K_0

Διερευνήθηκε μία διακύμανση του συντελεστή ωθήσεων σε ηρεμία K_0 για μία συνοχή 30 kPa. Αυτή έδειξε ότι αυτή η παράμετρος είχε μία ελάχιστη επίδραση στην εξέλιξη των μετακινήσεων με τις δύο διαφορετικές κατασκευαστικές μεθόδους.

3.4 Επιρροή γωνίας τριβής

Φανερώθηκε μία μεγάλη ευαισθησία των μετακινήσεων σε αυτή τη παράμετρο αντοχής ακόμα και με μικρές μεταβολές της τιμής της, διατηρώντας την συνοχή στα 20 kPa και την παράμετρο K_0 στο 1.0. Οι καθιζήσεις κλειδας και επιφάνειας αυξάνονται σημαντικά για μια μείωση της γωνίας τριβής κατά 5^0 από 25^0 στις 20^0 (διάγραμμα 7).



Διάγραμμα 8: Μέγιστες καθιζήσεις κλειδας και επιφάνειας, $c= 20$ kPa, $Ko=1.0$, διάφορη γωνία τριβής

Figure 8: Crown and surface maximal settlements, $c= 20$ kPa, $Ko=1.0$, friction varied

Όταν η γωνία τριβής μειώνεται στις 15^0 , η σήραγγα με την ολομέτωση διάνοιξη

καταρρέει. Σε περίπτωση που υπάρχει μία έντονη διακύμανση της γωνίας τριβής του εδάφους, η διάνοιξη της σήραγγας ολομέτωπα εμφανίζεται να είναι ριψοκίνδυνη διότι οι μετακινήσεις κλιμακώνονται αρκετά γρήγορα και δεν μπορούν να ανασχεθούν εύκολα στο πεδίο.

3.5 Διακύμανση πίεσης μετώπου

Σε περιπτώσεις όπου η ολομέτωπη διάνοιξη θα οδηγούσε σε αστοχία (σε αυτή τη περίπτωση $c = 10 \text{ kPa}$) μία πίεση εφαρμόστηκε στο μέτωπο σε κάθε βήμα εκσκαφής. Διεξάχθηκε επίσης παραμετρική μελέτη για το στάδιο της εκσκαφής του άνω ημικυκλίου για να βρούμε την πίεση εκείνη για την οποία λαμβάνει χώρα κατά προσέγγιση ίδια καθίζηση κλειδας, επιφάνειας και μετακίνηση μετώπου με αυτές που συμβαίνουν όταν η σύραγγα διανοίγεται ολομέτωπα.

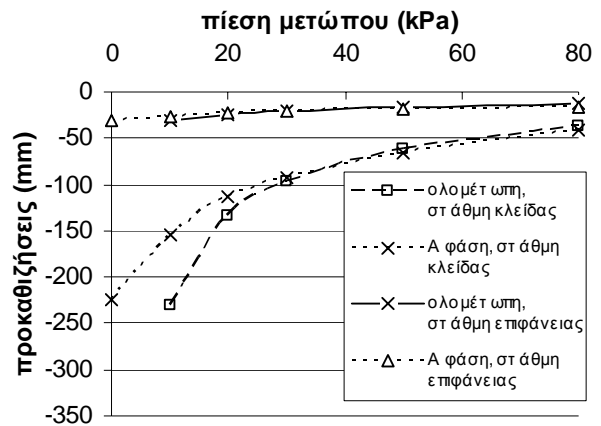
Όπως έχει τονισθεί πιο πρίν, μόνο ένα μικρό ποσοστό της αντοχής των αγκυρίων μετώπου στις ρηχές σήραγγες ενεργοποιείται, προσεγγιστικά 100 kN . Αυτή η τιμή παραμένει μία αισιόδοξη εκτίμηση, καθώς το ενεργό φορτίο σε κάθε αγκύριο εξαρτάται από την θέση και το μήκος επικάλυψης (Leitner, 2005).

Θεωρώντας ένα τέτοιο ενεργοποιημένο φορτίο, βρήκαμε ότι η ολομέτωπη εκσκαφή απαιτεί πίεση 30 kPa (Διάγραμμα 9, 10) που ισοδυναμεί με 24 αγκύρια μετώπου και η εκσκαφή του άνω τμήματος της σήραγγας αντίστοιχα 12 αγκύρια μετώπου για να προκύψουν περίπου οι ίδιες καθιζήσεις κλειδας και επιφάνειας.

Αν το κριτήριο σχεδιασμού είναι μόνο η μετακίνηση μετώπου, το μέτωπο κατά την ολομέτωπη διάνοιξη θα απαιτούσε 16 αγκύρια περισσότερα από το μέτωπο κατά το στάδιο της άνω προχώρησης.

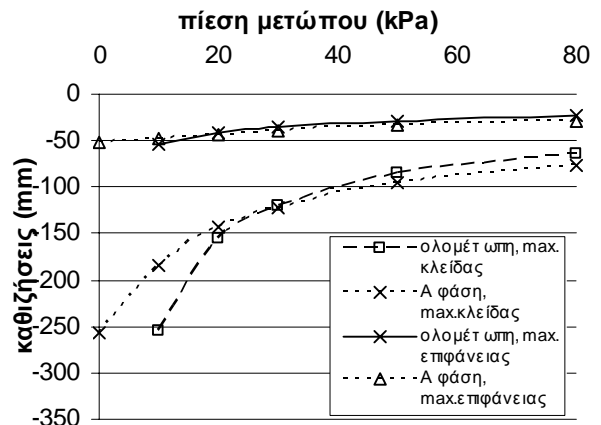
Πρόσθετα, μπορεί να παρατηρήσει κανείς ότι μία αύξηση της πυκνότητας αγκυρίων πέρα από μία κρίσιμη τιμή μειώνει ασήμαντα τις μετακινήσεις. Ένα τέτοιο επακόλουθο έχει ήδη αποδειχθεί αλλά μόνο για βαθιές σήραγγες.

Μία κρίσιμη τιμή πυκνότητας αγκυρίων, $0.5 \text{ αγκ./}\mu^2$ και $0.2 \text{ αγκ./}\mu^2$, μέχρι την οποία υπάρχει σημαντική επιρροή των αγκυρίων στις μετακινήσεις βρέθηκε για ολομέτωπη διάνοιξη από τον Cosciotti (2001).



Διάγραμμα 9: Προκαθιζήσεις στη στάθμη κλειδας και επιφάνειας, $c = 10 \text{ kPa}$, $K_0 = 1.0$, $\varphi = 25^\circ$, διάφορη πίεση μετώπου.

Figure 9: Pre-settlements at crown and surface level, $c = 10 \text{ kPa}$, $K_0 = 1.0$, $\varphi = 25^\circ$, face pressure varied.



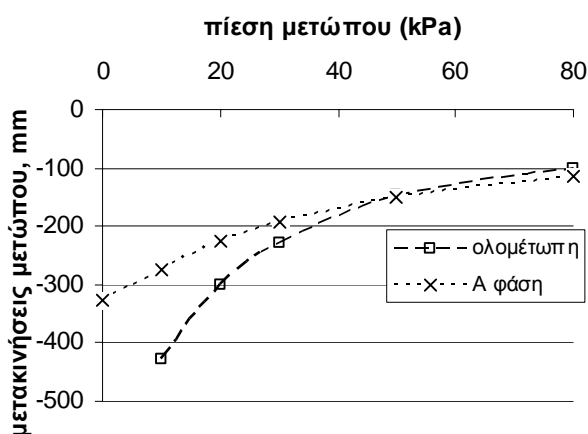
Διάγραμμα 10: Μέγιστες καθιζήσεις κλειδας και επιφάνειας, $c = 10 \text{ kPa}$, $K_0 = 1.0$, $\varphi = 25^\circ$, διάφορη πίεση μετώπου.

Figure 10: Maximal settlements of crown and surface, $c = 10 \text{ kPa}$, $K_0 = 1.0$, $\varphi = 25^\circ$, face pressure varied.

Στη μελέτη μας, βρέθηκε μία βέλτιστη πίεση μετώπου 30 kPa και για τις δύο μεθόδους και για κάθε μετακίνηση υπό εξέταση (Διάγραμμα 10, 11), που σημαίνει $0.3 \text{ αγκ./}\mu^2$ για το στάδιο εκσκαφής του άνω ημικυκλίου και $0.6 \text{ αγκ./}\mu^2$ για την ολομέτωπη, που είναι κοντά στα ευρήματα του Cosciotti.

Πίεση μετώπου μεγαλύτερη από 50 kPa κάνει ελαφρά καλύτερη την ολομέτωπη

διάνοιξη από την σταδιακή σχετικά με τις καθιζήσεις κλειδας.



Διάγραμμα 11: Μετακινήσεις μετώπου, $c=10$ kPa, $K_0=1.0$, $\varphi=25^\circ$, διάφορη πίεση μετώπου.

Figure 11: Face displacements, $c=10$ kPa, $K_0=1.0$, $\varphi=25^\circ$, face pressure varied.

Παρόλ'αυτά, σε μία τέτοια περίπτωση είναι μεγάλος ο αριθμός των αγκυριών μετώπου (40 αγκύρια).

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα της παραμετρικής αυτής μελέτης έδειξαν ότι για μία κρίσιμη τιμή συνοχής, η σταδιακή εκσκαφή οδηγεί σε μικρότερες προμετακινήσεις και συνολικές μετακινήσεις από τις αντίστοιχες με ολομέτωπη μέθοδο. Το τμήμα των προμετακινήσεων ρυθμίζει κυρίως τον ρυθμό και την τελική τιμή των καθιζήσεων κλειδας και επιφάνειας.

Για μία τιμή συνοχής ίση με 10 kPa συνέβηκε κατάρρευση με την ολομέτωπη προχώρηση ενώ η σταδιακή προχώρηση του άνω ημικυκλίου παρέμεινε ευσταθής.

Η ολομέτωπη διάνοιξη οδήγησε επίσης σε κατάρρευση για ένα έδαφος με συνοχή 20 kPa και γωνία τριβής 15° . Αυτό σημαίνει ότι για πολύ πτωχής ποιότητας έδαφος η πιο ασφαλής κατασκευαστική μέθοδος σήραγγας είναι η σταδιακή εκσκαφή. Η γωνία τριβής αποδείχτηκε να έχει μεγαλύτερη επιρροή στην εξέλιξη των μετακινήσεων απ'ότι η συνοχή.

Συνεπώς σε ένα γεωλογικό περιβάλλον με χαμηλή ή συχνά μεταβαλλόμενη γωνία τριβής η σταδιακή εκσκαφή μειώνει τον κίνδυνο απότομης και ανεξέλεγκτης διάδοσης των μετακινήσεων καθώς και κατάρρευσης.

Όπως έδειξε πρόσφατα η έρευνα, τα ενεργοποιημένα φορτία των αγκυριών μετώπου σε ρηχές σήραγγες είναι σχετικά χαμηλά. Όταν χρησιμοποιούμε την αντοχή του αγκυρίου για εκτίμηση της ισοδύναμης πίεσης μετώπου, η επίδραση των αγκυριών υπερεκτιμάται.

Η μελέτη έδειξε επίσης ότι με τη σταδιακή εκσκαφή απαιτείται μία σημαντικά χαμηλότερη υποστήριξη μετώπου απ'ότι με την ολομέτωπη προς επίτευξη των ίδιων μεγεθών παραμόρφωσης. Έδειξε ότι με σταδιακή εκσκαφή δεν απαιτείται υποστήριξη του μετώπου της βαθμίδας, με την προϋπόθεση ότι διατηρείται μία επαρκής απόσταση μεταξύ άνω και κάτω προχώρησης.

Η αποτελεσματικότητα της αγκύρωσης του μετώπου ελατώνεται προοδευτικά πέρα από μία πυκνότητα 0.3 αγκ./ μ^2 για το στάδιο εκσκαφής του άνω ημικυκλίου και 0.6 αγκ./ μ^2 για την ολομέτωπη.

Η μελέτη δείχνει ότι, σε πολύ πτωχό έδαφος η σταδιακή εκσκαφή είναι προτιμητέα από την άποψη μετακινήσεων κλειδας, επιφάνειας, μετώπου και κινδύνου κατάρρευσης του μετώπου. Για να επιτύχουμε ένα ισοδύναμο επίπεδο ασφάλειας, η ολομέτωπη εκσκαφή θα απαιτούσε έναν σημαντικό αριθμό αγκυριών μετώπου.

Η τελική απόφαση σχετικά με το ποιά κατασκευαστική μέθοδος είναι για ειδικές εδαφικές συνθήκες προτιμητέα πρέπει να βασίζεται σε μία ανάλυση χρόνου, δαπανών και κινδύνου συσχετισμένη με κάθε μέθοδο.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Cosciotti, L., Lembo, F., Boldini, D., Graziani, A. Simplified behaviour models of tunnel faces supported by shotcrete and bolts. International Symposium of Modern Tunneling Science and Technology, Kyoto 2001
- Dias, D. 1999. Renforcement du front de taille des tunnels par boulonnage. Etude numérique et application à un cas réel en site urbain. Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France
- Feder, G. 1981. Firstniederbrüche im Tunnelbau. Forschung und Praxis 27: 52-63
- Leitner, R. 2005. Numerical Investigation on Failure Mechanisms and Function of Tunnel Support systems. Diploma Thesis, Institut of Rockmechanics and Tunneling, Graz University of Technology, Austria

Lunardi, P. 2000. Design and constructing tunnels: A.DE.CO.- RS approach. Tunnels and Tunneling International, May 2000

Österreichische Gesellschaft für Geomechanik, 2001. Richtlinie für die Geomechanische Planung von Untertagebauarbeiten mit zyklischem Vortrieb.

Peila, D. A theoretical study of reinforcement influence on the stability of a tunnel face. 1994. Geotechnical and Geological Engineering 12: 145-168

Schubert, W., 3G- Gruppe Geotechnik Graz. 2001. Remarks on input for shotcrete properties for numerical models, Eastern Highway Tunnel Project Section Suao- Hopping, Tunnels 6 & 7

Schubert, P., Vavrovsky, G-M. 1994. Interpretation of Monitoring Results. World Tunneling, November 1994: 351-356

Trompille, V. 1998. Mouvements d'extrusion du front de taille d'un tunnel renforcé par des boulons en fibre de verre: comparaison entre des mesures in situ et un modèle analytique développé à l'ENTPE. DEA, ENTPE, Lyon, France