

**ΔΙΗΜΕΡΙΔΑ
"ΟΙ ΣΗΡΑΓΓΕΣ
ΤΗΣ ΕΓΝΑΤΙΑΣ ΟΔΟΥ"**

**ΧΡΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΓΙΑ ΤΗ
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΤΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ 5.2**

**Εισηγητής : ΑΙΜ. ΚΩΜΟΔΡΟΜΟΣ
Επ. Καθ. Παν. Θεσσαλίας**

**Ιωάννινα, 15-16/10/99
"ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ Α.Ε."
& ΕΕΣΥΕ**

ΧΡΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΤΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ 5.2

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στα πλαίσια της εκπόνησης των σηράγγων Σ2.1, Σ3 και Σ5 του τμήματος Λευκόπετρα-Κουλούρα (τμήμα 5.2) της Εγνατίας Οδού, πραγματοποιήθηκε σειρά αναλύσεων για την διαστασιολόγηση και τον σχεδιασμό των σηράγγων και των στομιών τους. Οι ιδιαιτερότητες χάραξης της οδοποιίας στη περιοχή, σε συνδυασμό με την γεωμορφολογία και την χαμηλή διατμητική αντοχή του εδάφους, οδήγησαν στην ανάγκη συνολικής θεώρησης και ανάλυσης του προβλήματος των δίδυμων σηράγγων. Διάφορες εμπειρικές και καθοδηγητικές μεθοδολογίες χρησιμοποιήθηκαν ώστε να τεθούν τα πλαίσια του πολύπλοκου προβλήματος με στόχο τον ασφαλή και οικονομικό σχεδιασμό των σηράγγων. Η τελική προσέγγιση και ο σχεδιασμός πραγματοποιήθηκαν με βάση τα αποτελέσματα πολυσταδιακών μη γραμμικών αναλύσεων, με προσομοίωση των κύριων φάσεων εκσκαφής και ετεροχρονισμένης τοποθέτησης των μέτρων άμεσης υποστήριξης και της μόνιμης επένδυσης. Οι σχετικές με τα έργα των σηράγγων διατάξεις των κανονισμών ΟΣΜΕΟ και ΟΣΑΤ καθόρισαν επίσης εν μέρει τον σχεδιασμό των σηράγγων. Στα επόμενα κεφάλαια αναφέρονται οι ιδιαιτερότητες του προβλήματος, αναλύεται ο τρόπος προσέγγισης και ανάλυσης του, ενώ δίνονται χαρακτηριστικές αναλύσεις και τα κυριότερα συμπεράσματα ή απόψεις προς συζήτηση και περαιτέρω διερεύνηση.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χρήση αριθμητικών μεθόδων για τον σχεδιασμό και την διαστασιολόγηση των μέτρων άμεσης υποστήριξης και της μόνιμης επένδυσης των σηράγγων παρεμβάλλεται μεταξύ δύο εξ ίσου σημαντικών φάσεων. Η ταξινόμηση και απόδοση ιδιοτήτων στο μέσο διέλευσης της σήραγγας (υδρογεωλογική αναγνώριση, δομή, σύσταση και γεωτεχνικές παράμετροι) αποτελούν την προαπαιτούμενη φάση, ενώ η κατασκευή περιλαμβανομένων των οργανομετρήσεων και των καταγραφών αποτελεί την ύστερη φάση. Τονίζεται ευθύς εξ αρχής ότι η επιτυχία του έργου καθορίζεται από την κατά το δυνατόν άριστη εκπόνηση όλων των σταδίων, ενώ είναι φανερό ότι λανθασμένες εκτιμήσεις κατά τις αρχικές φάσεις οδηγούν σε συσσώρευση λαθών. Οι τρεις αυτές φάσεις, με τα επιμέρους στάδια δεν ολοκληρώνονται πρακτικά με παράδοση σκυτάλης. Αντίθετα βρίσκονται σε παράλληλη και συνεχή διάταξη με κοινά όρια την αποπεράτωση της σήραγγας. Κατά την φάση αναγνώρισης της περιοχής και εν συνεχεία του προσδιορισμού των παραμέτρων αντοχής και παραμορφωσιμότητας καθώς και άλλων παραγόντων (υπογείων ροών), συχνά πραγματοποιούνται παραδοχές και χρησιμοποιούνται εμπειρικοί τύποι. Η αναγωγή ενός ασυνεχούς υλικού σε συνεχές ισότροπο ή ανισότροπο, ομογενές ή ετερογενές, με γραμμική ή ελαστοπλαστική συμπεριφορά, με απλούς ή σύνθετους καταστατικούς νόμους δεν είναι μονοσήμαντη διαδικασία ν κάθε άλλο. Η φάση της κατασκευής επιτρέπει την άμεση εξέταση του υλικού μέσου, ενώ οι μετρήσεις και οι συγκρίσεις με τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης μπορούν να επιτρέψουν τον επανακαθορισμό των δεδομένων της ανάλυσης ώστε να πραγματοποιηθεί δεύτερος ακριβέστερος κύκλος προσέγγισης. Η συνεχής διεξαγωγή της διαδικασίας αυτής μπορεί να οδηγήσει τελικά σε υψηλής ακρίβειας ανάλυση και επίτευξη του βέλτιστου συνδυασμού ασφάλειας και οικονομίας. Επιπρόσθετα η εμπειρία που μπορεί να αποκομίσει κανείς από την ανωτέρω διαδικασία μπορεί

Χρήση Αριθμητικών Μεθόδων για τη Προσομοίωση των Σηράγγων του Τμήματος 5.2

να επιτρέψει την επιστημονική βελτίωση διαφόρων εμπειρικών τύπων, των οποίων ο προσδιορισμός έγινε από κατασκευές σε διαφορετικές πιθανά εδαφολογικές συνθήκες.

2. ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ – ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΕΡΓΟΥ

2.1 ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Γεωμορφολογικά η περιοχή κατασκευής των σηράγγων χαρακτηρίζεται από ήπιες έως μέτριες κλίσεις, οι οποίες στις θέσεις των στομιών είναι της τάξης των 20°. Κατά την εγκάρσια έννοια οι θέσεις διέλευσης των σηράγγων βρίσκονται σε πλαγιές λόφων με εγκάρσιες κλίσεις της τάξης των 20° έως 30°. Το υπερκείμενο των σηράγγων πάχος των εδαφικών και βραχωδών σχηματισμών είναι σχετικά περιορισμένο, με μέγιστη τιμή της τάξης των 30,0 m, ενώ το ύψος των 10,0 m έως 20,0 m καλύπτει το μεγαλύτερο ποσοστό του συνολικού των σηράγγων.

Η ευρύτερη περιοχή των υπό μελέτη σηράγγων εντάσσεται στη Πελαγονική γεωτεκτονική ζώνη, η οποία, στη περιοχή αυτή, αποτελείται από γνεύσιους, μάρμαρα, σχιστόλιθους/φυλλίτες και κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους. Οι σχηματισμοί της Πελαγονικής ζώνης έχουν υποστεί την επίδραση πολλαπλών τεκτονικών φάσεων με αποτέλεσμα τη δημιουργία τεκτονικών διαρρήξεων και ευρείας έκτασης συγκλινικών και αντικλινικών δομών. Η στάθμη του υπόγειου ορίζοντα βρίσκεται σε επίπεδο χαμηλότερο από αυτό των σηράγγων και κατά συνέπεια η δράση υπογείων νερών είναι πρακτικά αμελητέα, καθ'ότι περιορίζεται στις κατεισδύσεις ομβρίων και στην ύπαρξη ενεργού πορώδους, το οποίο κρίνεται, με εξαίρεση την περιοχή της σήραγγας Σ5, σχετικά μικρό.

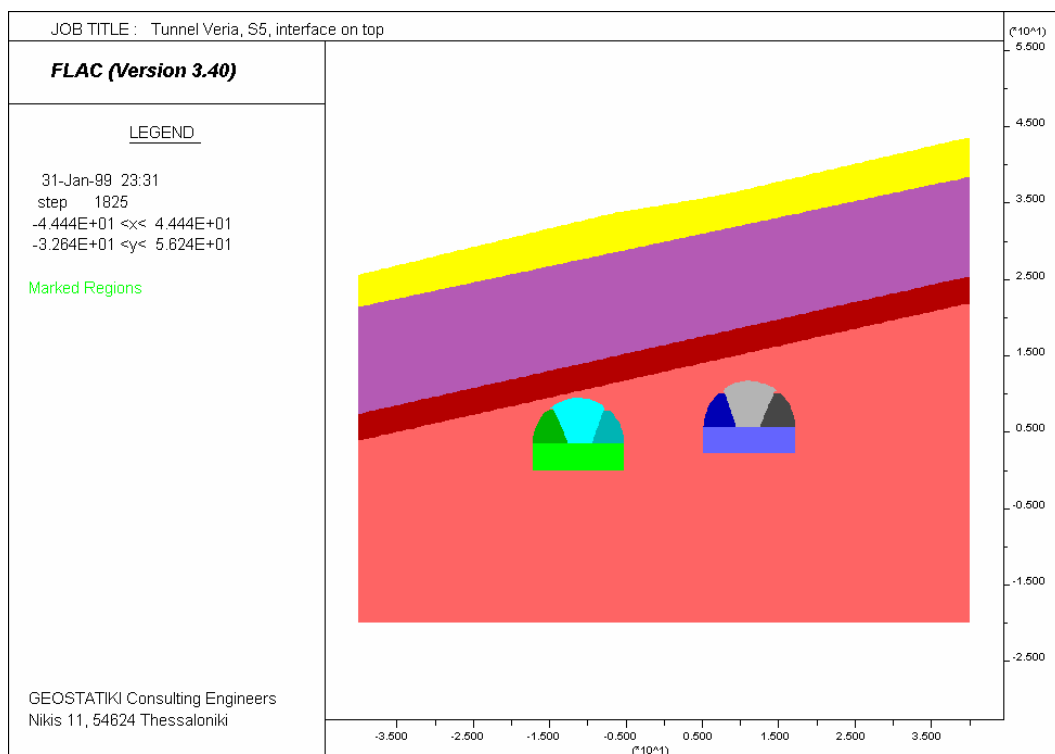
2.2 ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΕΡΓΟΥ

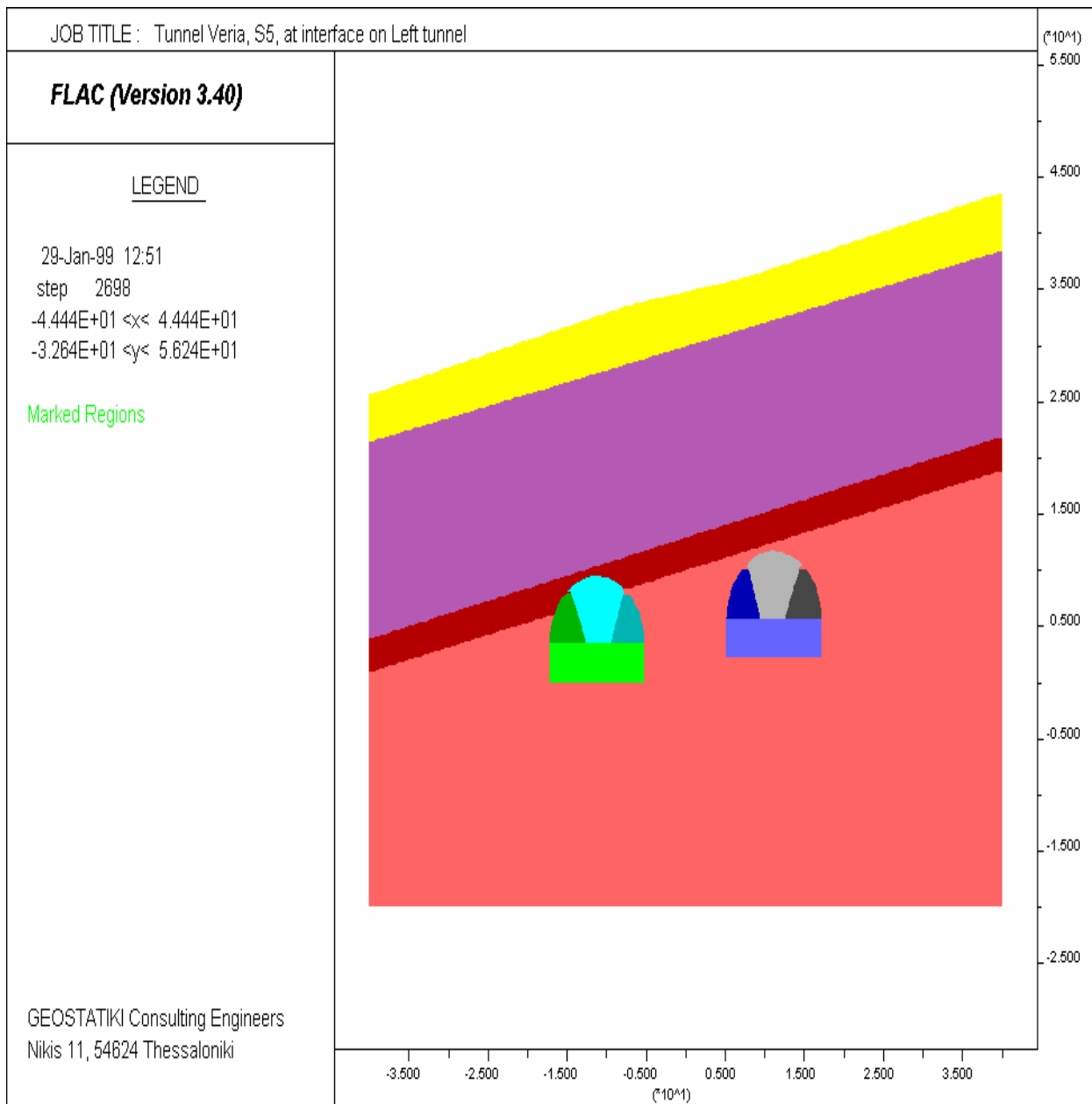
Οι εξεταζόμενες δίδυμες σήραγγες βρίσκονται σε αξονική απόσταση 24,0 m, γεγονός που οδηγεί σε ενδιάμεση απόσταση μεταξύ των παρειών των δύο εκσκαφών ίση με 10,0 m. Η απόσταση αυτή κρίνεται ιδιαίτερα μικρή και αναμένεται να προκαλέσει έντονη αλληλεπίδραση μεταξύ του εντατικού και κινηματικού πεδίου των δύο σηράγγων. Σύμφωνα με αρχικούς προκαταρκτικούς υπολογισμούς, η απομάκρυνση των δύο κλάδων, κατά τουλάχιστον 10,0 m θα είχε σημαντικώς ευεργετικά αποτελέσματα, τόσο στην κατασκευαστική διαδικασία, όσο και στις απαιτήσεις μέτρων προσωρινής υποστήριξης. Σε αλλαγή της χάραξης που πραγματοποιήθηκε κατά την διάρκεια εκπόνησης των μελετών, η ενδιάμεση αυτή απόσταση για τη σήραγγα Σ3 αυξήθηκε στα 15 m, με αποτέλεσμα σημαντική μείωση της αλληλεπίδρασης των δύο κλάδων. Τον βαθμό αλληλεπίδρασης των δύο κλάδων επιτείνει ακόμη περισσότερο η γεωμορφολογία σε συνδυασμό με το μικρό υπερκείμενο και την ανισοσταθμία μεταξύ των δύο κλάδων, βλ. σχήμα 1.

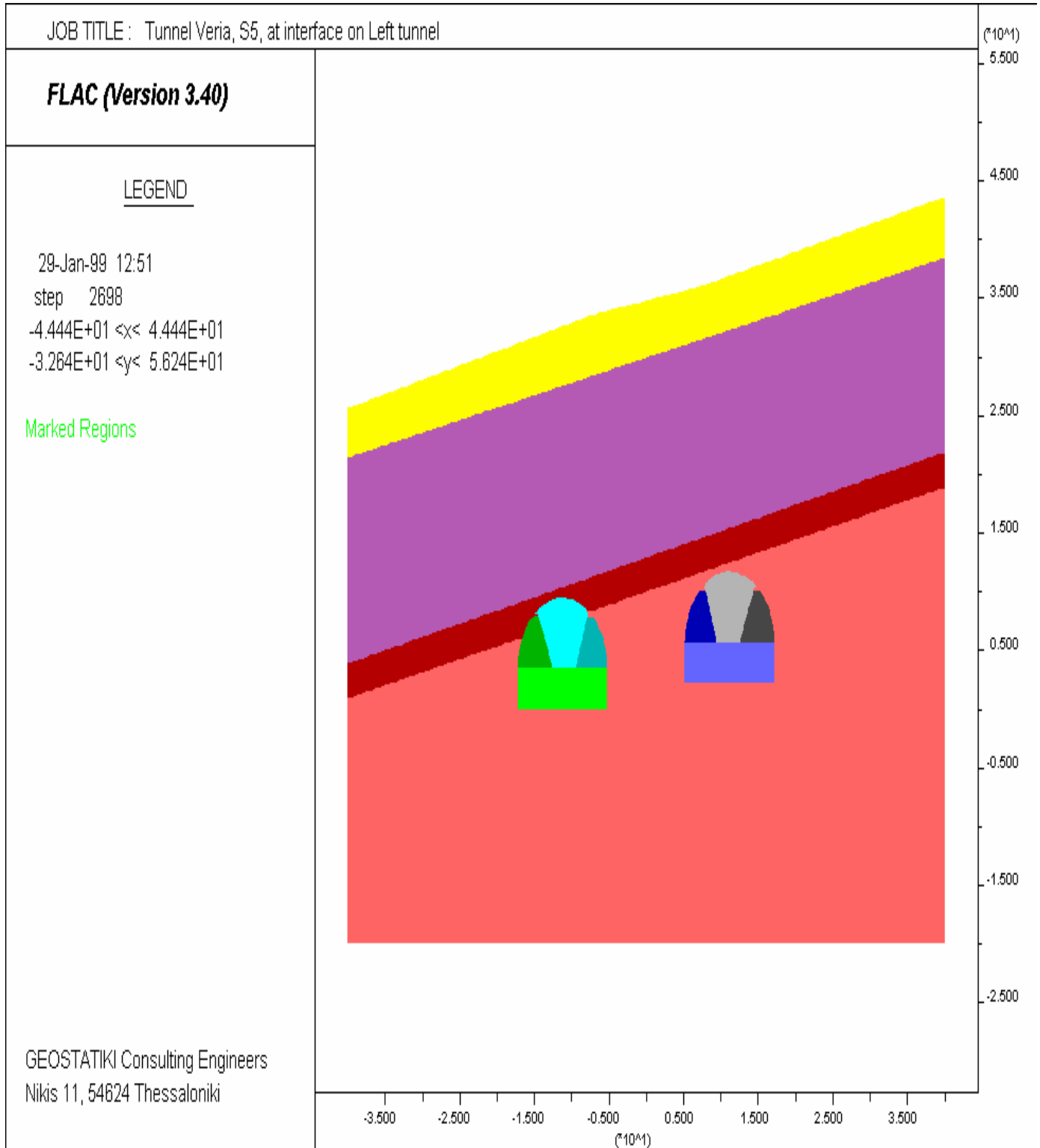
Η αποδοχή της ενδιάμεσης απόστασης κρίθηκε δυνατή και η κατασκευή των σηράγγων υλοποιήσιμη, σε βάρος εντούτοις της πιθανής αύξησης των μέτρων υποστήριξης, του περιορισμού του βήματος προώθησης και πιθανής ανάγκης προενίσχυσης της ενδιάμεσης ζώνης, ανάλογα με την ποιότητα της βραχομάζας. Ως γνωστόν σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου NATM (New Austrian Tunnel Method) αποτελεί η δυνατότητα ελέγχου του βαθμού εκτόνωσης της βραχομάζας. Κατάλληλη επιλογή του βαθμού εκτόνωσης μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικό βαθμό ασφαλούς χαλάρωσης, έτσι ώστε να προκύψει ο πλέον οικονομικός και ταυτόχρονα ασφαλής σχεδιασμός μέτρων υποστήριξης. Στη συγκεκριμένη όμως περίπτωση,

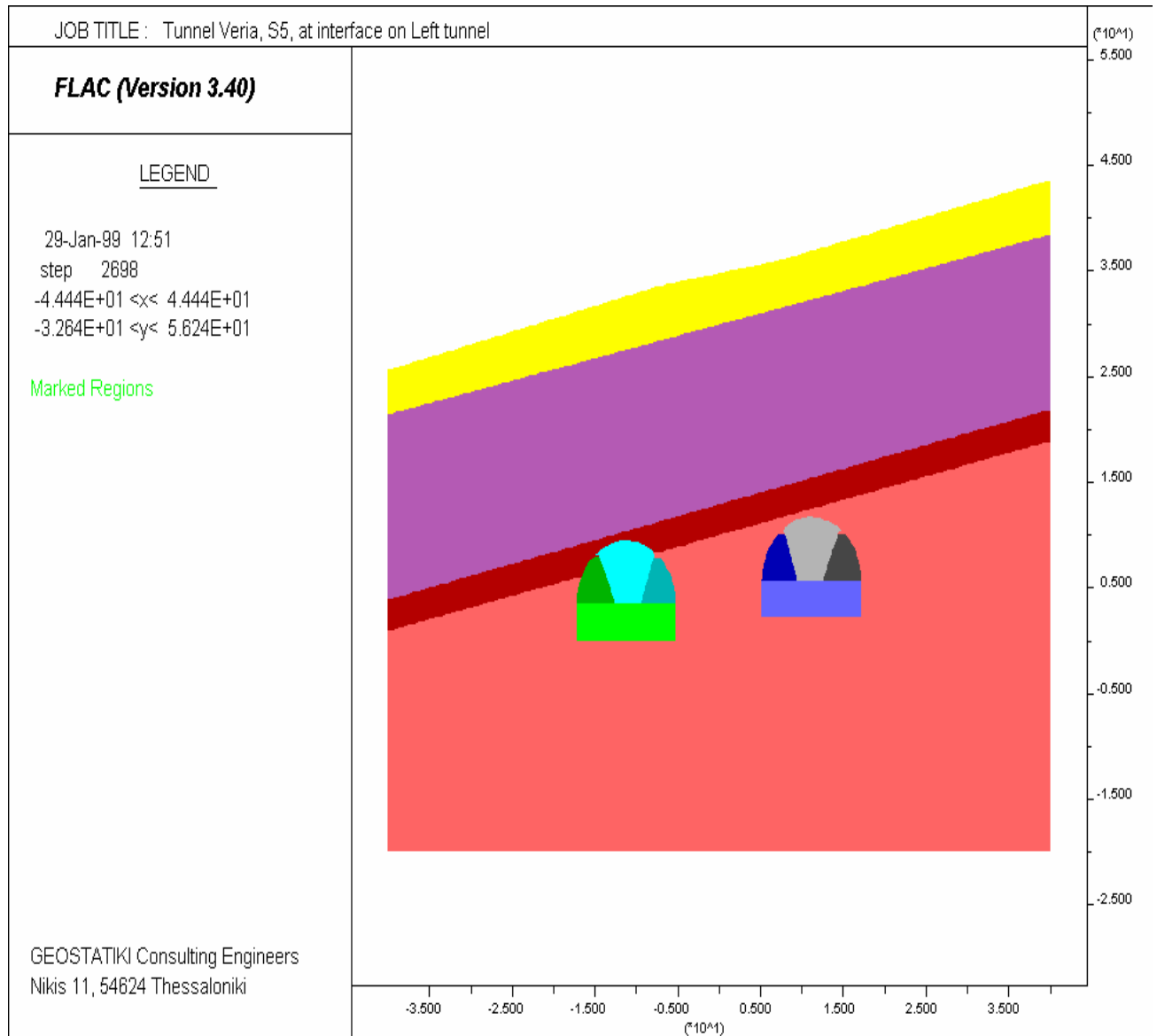
Χρήση Αριθμητικών Μεθόδων για τη Προσομοίωση των Σηράγγων του Τμήματος 5.2

όπου αναμένεται έντονη αλληλεπίδραση σε ένα μέσο με μικρή διατμητική αντοχή και αντίσταση σε ελκυσμό με αναμενόμενη απελευθέρωση και ανακατανομή τάσεων, η εκτόνωση της βραχομάζας θα πρέπει να περιορισθεί και να αποφευχθεί η χαλάρωση, ώστε κατά την φάση διάτρησης του δεύτερου κλάδου να μην προκύψουν προβλήματα ευστάθειας και τοπικών αστοχιών. Για την επίτευξη του στόχου αυτού εξετάσθηκε πιθανή υιοθέτηση μικρού βήματος προώθησης και άμεση εγκατάσταση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης. Είναι φανερό ότι η διαδικασία αυτή περιορίζει την εκτόνωση και το εσωτερικό τασικό πεδίο παραμένει υψηλό. Αποτέλεσμα αποτελεί η ανάγκη ισχυρών μέτρων υποστήριξης, με αντιστάθμισμα τον περιορισμό των διαδρομών εκτροπής τάσεων και της διαρροής και θραύσης της βραχομάζας. Από τις παραπάνω επισημάνσεις καθίσταται φανερό ότι ο προσδιορισμός των αναγκαίων μέτρων υποστήριξης και της βέλτιστης κατασκευαστικής διαδικασίας (καθορισμός βήματος και σταδίων εκσκαφών και μέτρων υποστήριξης) μπορεί να προκύψει μόνο μετά από μη γραμμική αριθμητική ανάλυση αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής, με επίλυση που να περιλαμβάνει εξ αρχής και τους δύο κλάδους της σήραγγας.



Χρήση Αριθμητικών Μεθόδων για τη Προσομοίωση των Σηράγγων του Τμήματος 5.2


Χρήση Αριθμητικών Μεθόδων για τη Προσομοίωση των Σηράγγων του Τμήματος 5.2


Χρήση Αριθμητικών Μεθόδων για τη Προσομοίωση των Σηράγγων του Τμήματος 5.2


Σχήμα 1: Τοπολογία σηράγγων επιτείνουσα την αλληλεπίδραση των δύο κλάδων, χαρακτηριζόμενη από μικρή ενδιάμεση απόσταση κλάδων, σημαντική εγκάρσια κλίση και ανισοσταθμία των δύο σηράγγων.

3. ΧΡΗΣΗ – ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το πρόβλημα της κατασκευής και του υπολογισμού των σηράγγων είναι ιδιαίτερα σύνθετο, με πολλαπλές συνιστώσες παραμέτρους, διαφορετικής και μεταβαλλόμενης δράσης. Η διάσταση του προβλήματος είναι κατ' αρχήν χαρακτηριστική περίπτωση τρισδιάστατου προβλήματος, το περιβάλλον μέσο εμφανίζει κατά κανόνα μη γραμμική συμπεριφορά, ενώ το είδος, ο χρόνος και ο τρόπος τοποθέτησης των μέτρων άμεσης υποστήριξης μπορούν να αλλάξουν καθοριστικά την συνολική απόκριση του προβλήματος. Η ανάλυση των ανωτέρω μηχανισμών μπορεί να ήταν αισθητή από αρχαιότατων χρόνων, η σύνθεση τους εντούτοις σε μαθηματικές εξισώσεις αποτελούσε και αποτελεί ιδιαίτερα δύσκολο πρόβλημα. Δεδομένου ότι οι επικρατούσες υδρογεωλογικές συνθήκες είναι καθοριστικές στην απόκριση του έργου, η μέθοδος του καθορισμού των μέτρων με βάση την συνεχή εξέταση και επεξεργασία των επιτόπου παρατηρήσεων αποτέλεσε την πρώτη προσέγγιση του προβλήματος. Η συνεχής εξέλιξη της προσέγγισης αυτής με την βοήθεια της συσσωρευμένης εμπειρίας οδήγησε στην διατύπωση μεθόδων προσδιορισμού των μέτρων υποστήριξης με βάση τον τύπο, την κατάσταση, τον τεκτονισμό και την ποιότητα της βραχομάζας σε συνδυασμό με τις διαστάσεις του έργου. Οι προσεγγίσεις αυτές θα μπορούσαν να θεωρηθούν καταβολές των μεθόδων Bieniawski και Barton, οι οποίες κατά κύριο λόγο εφαρμόζονται σήμερα για την προδιαστασιολόγηση ή τον προσδιορισμό του πλαισίου των μέτρων υποστήριξης.

Παράλληλα με την εξέλιξη των ανωτέρω μεθόδων εμφανίζονται, κατά τις πρώτες δεκαετίες του 20^{ου} αιώνα οι πρώτες προσπάθειες αναλυτικής προσέγγισης του προβλήματος. Με την θεώρηση σημαντικών απλουστεύσεων (υπεραπλουστεύσεων) ως προς μορφή του προβλήματος και την συμπεριφορά των συστατικών υλικών προτάθηκαν οι μέθοδοι των Terzaghi (1946), Protodiakonov, Lauffer (1958). Οι προσεγγίσεις αυτές εξέταζαν την ισορροπία στερεού σώματος χωρίς να είναι σε θέση να δώσουν πληροφορίες για την αναμενόμενη μεταβολή του εντατικού και κινηματικού πεδίου. Επόμενη φάση αποτελεί η χρήση αναλυτικών εξισώσεων για τον υπολογισμό των σηράγγων με θεώρηση του προβλήματος ως κυκλικής διατομής, του εδαφικού υλικού ως ομογενούς ισότροπου και της αρχικής εντατικής κατάστασης χωρίς μεταβολή καθ' ύψος. Με τον τρόπο αυτό δίνονται επιλύσεις για συγκεκριμένο εξεταζόμενο σημείο. Στις επιλύσεις αυτές, αντί των μέτρων υποστήριξης, θεωρείται η αντίστοιχη εσωτερική πίεση υποστήριξης.

Ο συνδυασμός των ανωτέρω μεθόδων αποτέλεσε για μεγάλο διάστημα την κύρια προσέγγιση για τον σχεδιασμό των μέτρων άμεσης προστασίας και της μόνιμης επένδυσης των σηράγγων. Η χρήση τους εντούτοις μπορεί να προσεγγίζει σε γενικές γραμμές το πρόβλημα, δίνοντας την αρχική εκτίμηση και το πλαίσιο εργασίας, δεν μπορεί όμως να προσεγγίσει με ιδιαίτερη ακρίβεια το πρόβλημα, να δώσει πληροφορίες για την αναμενόμενη εντατική κατάσταση των στοιχείων υποστήριξης και του περιβάλλοντος εδαφικού σχηματισμού ή ακόμα να διαφοροποιήσει τις προτεινόμενες λύσεις ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες του κάθε προβλήματος. Αυτό που πρακτικά απαιτείται για την ακριβέστερη δυνατή προσέγγιση είναι η σύζευξη των δύο μεθοδολογιών και όχι ο συνδυασμός των συμπερασμάτων τους. Προσπάθειες συνολικής επίλυσης του προβλήματος με εισαγωγή όλων των παραμέτρων παρατηρείται κατά την τελευταία, κατά κύριο λόγο, δεκαετία. Σύμφωνα με όσα χαρακτηριστικά αναφέρει ο καθ. Duddeck (1991) σε σχετική state-of-the art δημοσίευση του "αν η εμπλεκόμενη κατασκευή είναι τόσο περίπλοκη όσο το εδαφικό πεδίο γύρω από μία σήραγγα και η συμπεριφορά του υλικού

Χρήση Αριθμητικών Μεθόδων για τη Προσομοίωση των Σηράγγων του Τμήματος 5.2

(εδαφικού) είναι μη γραμμική, τότε μόνο μέθοδοι Αριθμητικής Ανάλυσης είναι σε θέση να επιλύσουν το πρόβλημα¹.

3.2 ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΗ ΧΡΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

Η πρώτη εφαρμογή της αριθμητικής ανάλυσης εμφανίζεται με την χρήση ελατηριακών σταθερών προσομοίωσης της απόκρισης του περιβάλλοντος εδάφους. Η προσέγγιση παραβλέπει σημαντικά καθοριστικά σημεία. Η προσομοίωση της αλληλεπίδραση εδάφους και μέτρων υποστήριξης είναι πρακτικά περιορισμένη τόσο ως προς την παρακολούθηση των φάσεων κατασκευής όσο και ως προς την απόκριση του εδαφικού υλικού. Συγκεκριμένα, κάθε ελατηριακή σταθερά παρουσιάζει πρακτικά διαφορετική συμπεριφορά, εξαρτώμενη όχι μόνο από την δυσκαμψία των μέτρων άμεσης υποστήριξης αλλά και από την διαδρομή τάσεων του περιβάλλοντος εδάφους, η οποία εντούτοις δεν αποτελεί μέρος της διακριτοποίησης στην δεδομένη ανάλυση. Σημαντικό επίσης μειονέκτημα της προσέγγισης αυτής αποτελεί το γεγονός ότι τα αποτελέσματα της ανάλυσης δεν είναι ικανοποιητικά για την πραγματοποίηση αντίστροφης ανάλυσης. Η χρησιμότητα της συνίσταται ουσιαστικά στην διαστασιολόγηση του έργου με παράλειψη αρκετών παραμέτρων του προβλήματος, με άγνωστα περιθώρια ασφαλείας, χωρίς να είναι εντούτοις γνωστή η ακρίβεια, η ασφάλεια και ο οικονομικός σχεδιασμός του έργου. Ακόμη και στην περίπτωση πλήρους ενοργάνωσης του έργου, τα αποτελέσματα της ανάλυσης δεν μπορούν πρακτικά να συγκριθούν με αυτά των μετρήσεων.

Η συνεχής ανάπτυξη των αριθμητικών μεθόδων (εξελιγμένοι καταστατικοί νόμοι συμπεριφοράς σε συνδυασμό με υπολογιστικά συστήματα μεγάλης ισχύος) επιτρέπει τη συνεχή βελτίωση προσέγγισης του προβλήματος, παρέχοντας δυνατότητα προσομοίωσης τόσο των διαφόρων κατασκευαστικών φάσεων (σταδιακή εκσκαφή) όσο και του είδους των επεμβάσεων (τοποθέτηση στοιχείων δοκού ή ράβδου με δυνατότητα ενεργοποίησης - απενεργοποίησης και επιβολή προέντασης κατά τις διάφορες φάσεις). Οι αριθμητικές μέθοδοι παρέχουν επίσης τη δυνατότητα παρακολούθησης της εντατικής και κινηματικής κατάστασης είτε ακόμα τις διαδρομές τάσεων στα σημεία ολοκλήρωσης και καταδεικνύουν με τον τρόπο αυτό τις ασθενέστερες ζώνες, όπου και αν χρειάζεται άμεση υποστήριξη, καθώς και πιθανές αυτοφερόμενες ζώνες όπου δεν απαιτείται λήψη ειδικών μέτρων υποστήριξης. Στην παρούσα φάση οι αναλύσεις πραγματοποιούνται, κατά κύριο λόγο, σε καθεστώς επίπεδης παραμόρφωσης λαμβάνοντας εμμέσως υπόψη τον τρισδιάστατο χαρακτήρα του προβλήματος, ενώ οι αναλύσεις σε κατάσταση τριών διαστάσεων εισάγονται δειλά-δειλά στο πεδίο ανάλυσης. Ουσιαστικό πλεονέκτημα της αριθμητικής ανάλυσης σε καθεστώς επίπεδης παραμόρφωσης (ή ακόμα τριών διαστάσεων αν είναι δυνατόν), αποτελεί η δυνατότητα διεξαγωγής αντίστροφης ανάλυσης. Η διαδικασία αυτή αποτελεί την μόνη μεθοδολογία απόκτησης εμπειρίας σχετικά με την προσομοίωση-απόκριση της βραχομάζας, η οποία προσδιορίζεται με εμπειρικές σχέσεις. Κατά τον τρόπο αυτό παρέχεται η δυνατότητα συνεχούς βελτίωσης της προσομοίωσης, της ακρίβειας των επιλύσεων και την εξασφάλιση ικανοποιητικού βαθμού ασφαλείας με μικρότερο οικονομικό κόστος. Το τελευταίο αυτό πλεονέκτημα αποτελεί το κύριο κίνητρο ώθησης προς την χρήση αριθμητικών μεθόδων στην ανάλυση και τον σχεδιασμό των σηράγγων (και πολλών βεβαίως άλλων γενικών και ειδικών έργων).

¹ Απόδοση της φράσης 'If the involved structure is as complex as the ground around a tunnel excavation and if the material behaves non-linearly, then only numerical methods are capable of solving the problem'

3.3 ΔΙΑΘΕΣΙΜΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Οι αριθμητικές αναλύσεις πραγματοποιούνται κατά κύριο λόγο με προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method, FEM) σε συνδυασμό ή όχι με συνοριακά στοιχεία (Boundary Element Method, BEM), ενώ η χρήση πεπερασμένων διαφορών (Finite Difference Method, FDM), στο ειδικό αυτό πρόβλημα παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα και τυγχάνει ευρείας εφαρμογής. Οι δύο πρώτες μέθοδοι εντάσσονται στην κατηγορία όπου χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι και διαδικασίες επίλυσης τύπου *implicit*, ενώ η FDM εντάσσεται στην κατηγορία *explicit*. Σε γενικές γραμμές οι διαδικασίες *implicit* εμφανίζονται πιο αποδοτικές καθ'ότι χρησιμοποιούν υπερμητρώα δυσκαμψίας και ειδικούς για κάθε περίπτωση αλγορίθμους σύγκλισης, με αποτέλεσμα την κατά πολύ ταχύτερη επίλυση των προβλημάτων σε περιπτώσεις γραμμικής ελαστικότητας ή ακόμη σε περιπτώσεις με μερική και τοπική εισαγωγή του προβλήματος στην μετελαστική συμπεριφορά. Μειονέκτημα των διαδικασιών *implicit* είναι η βαριά και επίπονη προγραμματιστική εργασία που απαιτείται για την ανάπτυξη αλγορίθμων τροποποίησης οριακών συνθηκών, παραμέτρων συστατικών υλικών, των ορίων του προβλήματος κατά την διαδικασία επίλυσης πολυσταδιακών προβλημάτων, καθώς επίσης και η εισαγωγή του αρχικού εντατικού πεδίου σε προβλήματα με επιφάνεια εδάφους περίπλοκης μορφής. Η FDM πλεονεκτεί όσον αφορά όλα τα ανωτέρω, με κύριο μειονέκτημα της, τον απαιτούμενο χρόνο επίλυσης. Η χρήση ειδικών αλγορίθμων (π.χ. *mixed discretization*) μπορεί να βελτιώσει το πρόβλημα χωρίς εντούτοις να μπορεί να καταστήσει την μέθοδο εξ ίσου γρήγορη με αυτήν των Πεπερασμένων Στοιχείων.

Ανάλογα με το είδος του προβλήματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί και γραμμική ελαστική ανάλυση (απλούστερη περίπτωση), ενώ σε προβλήματα σε μέσο με μεταβαλλόμενη συμπεριφορά (μεταβολή του μητρώου δυσκαμψίας συναρτήσει της εντατικής και κινηματικής κατάστασης) επιβάλλεται η μη γραμμική ανάλυση. Οι κυριότεροι καταστατικοί νόμοι συμπεριφοράς στηρίζονται στη θεωρία ελαστοπλαστικότητας (τέλεια ή κρατυνόμενη), παρέχουν δε την δυνατότητα μνήμης για τη καταγραφή της ιστορίας παραμόρφωσης κατά τις διάφορες διαδρομές τάσεων, ενώ παράλληλα δεν παρουσιάζουν θερμοδυναμικές διαταράξεις (παραγωγή έργου κατά διαδρομές φόρτισης- αποφόρτισης). Τα δύο αυτά πλεονεκτήματα δίνουν σαφές προβάδισμα της θεωρίας Ελαστοπλαστικότητας έναντι των θεωριών Παραμορφώσεων (Deformation Theory), Διαδοχικών Βημάτων (Incremental Theory) και της Ενδοχρονικής θεωρίας (Endochronic Theory).

Μειονέκτημα των μεθόδων Αριθμητικής Ανάλυσης, ιδιαίτερα στη περίπτωση κρατυνόμενης συμπεριφοράς με μη συζευγμένο νόμο διαρροής (*non associated flow rule*), αποτελεί η σημαντικότερη επιβάρυνση που συνοδεύει την υπολογιστική διαδικασία και η ιδιαίτερα επίπονη διαδικασία προσδιορισμού και ελέγχου των απαραίτητων για την ανάλυση παραμέτρων (συνάρτηση διαρροής, φόρτισης και θραύσης). Μειονέκτημα όμως του οποίου το βάρος μειώνεται αυξανόμενης της υπολογιστικής ισχύος των υπολογιστών, η οποία για τα σημερινά δεδομένα κρίνεται ικανοποιητική για την επίλυση της μεγάλης πλειοψηφίας των περιπτώσεων των προβλημάτων. Η απλούστευση προσομοίωσης των προβλημάτων με την πραγμα-τοποίηση θεμελιωδών παραδοχών είναι σε θέση, στις περισσότερες των περιπτώσεων, να οδηγήσει σε δραματική μείωση του απαιτούμενου χρόνου υπολογισμών. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, με εξαίρεση την περιοχή των στομιών, και ανάλογα με την συμπεριφορά των σχηματισμών σε συνδυασμό και με την μέθοδο κατασκευής, μπορεί η προσομοίωση να γίνει με θεώρηση επίπεδης παραμόρφωσης αντί της τρισδιάστατης κατάστασης, χωρίς η ακρίβεια των προβλέψεων να μειωθεί αισθητά.

Χρήση Αριθμητικών Μεθόδων για τη Προσομοίωση των Σηράγγων του Τμήματος 5.2

Κατά την παρούσα φάση διατίθεται μεγάλος αριθμός προγραμμάτων ηλεκτρονικού υπολογιστή για την προσομοίωση και ανάλυση σηράγγων. Αρκετά από αυτά είναι γενικών εφαρμογών, ενώ αρκετά επίσης είναι ειδικού προσανατολισμού προς θέματα γεωτεχνικής μηχανικής ή ακόμα τελείως εξειδικευμένα σε προβλήματα σηράγγων. Κυκλοφορούν τόσο για περίπτωση ανάλυσης σε δύο ή τρεις διαστάσεις με διαφοροποιήσεις βέβαια ως προς τον τρόπο εισαγωγής δεδομένων, τους αλγορίθμους επίλυσης, ειδικούς αλγορίθμους προσομοίωσης και καταστατικούς νόμους συμπεριφοράς. Η ευχρηστία κάθε προγράμματος είναι θέμα σημαντικό, παραμένει εντούτοις υποκειμενικό και οπωσδήποτε δεν επηρεάζει την ακρίβεια των επιλύσεων. Δεν γίνεται κατά συνέπεια αναφορά σε θέματα προετοιμασίας δεδομένων ή εκμετάλλευσης και παρουσίασης αποτελεσμάτων, παρ'ότι πρακτικά τα σημεία αυτά είναι ιδιαίτερα σημαντικά για τους χρήστες. Αντίθετα, αναφέρονται στη συνέχεια τα κύρια χαρακτηριστικά και δυνατότητες που πρέπει να παρέχει ένα πρόγραμμα ώστε να είναι ικανό να δώσει επιλύσεις απαλλαγμένες αριθμητικών σφαλμάτων.

- Προσομοίωση Εκσκαφής

Η αφαίρεση στοιχείων κατά τις διάφορες φάσεις κατασκευής αλλάζει την τοπολογία του συστήματος ανάλυσης. Καθολική λύση του προβλήματος απαιτεί χρήση ειδικού αλγορίθμου για προσομοίωση προβλημάτων με μεταβλητά όρια και διαστάσεις. Η χρήση απειροστής δυσκαμψίας για τα προς αφαίρεση στοιχεία μπορεί να είναι λογικοφανής, προκαλεί εντούτοις αριθμητικά σφάλματα στην διαδικασία επίλυσης, τα οποία εν μέρει μπορούν να λυθούν με χρήση αλγορίθμων διπλής οδήγησης.

- Πολυσταδιακή Ανάλυση

Η διαδικασία εκσκαφής και κατασκευής των σηράγγων πραγματοποιείται κατά ετεροχρονισμένα στάδια. Η προσομοίωση των φάσεων πρέπει να βρίσκεται σε αντιστοιχία με την πραγματική κατασκευή του έργου. Σε κάθε περίπτωση, η προσομοίωση σε ένα και μόνο στάδιο δεν είναι σε θέση να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα, ενώ ο αριθμός των σταδίων εξαρτάται από την πλαστικοποίηση του υλικού που επιφέρουν οι διαδρομές τάσεων, βλ. Comodromos 1992b. Για κάθε στοιχείο που ενεργοποιείται μεσούσης της ανάλυσης θα πρέπει να καταγράφεται η κατάσταση παραμόρφωσης του προηγούμενου σταδίου και όχι η αρχική (καταγραφή ιστορίας παραμόρφωσης και ενεργοποίησης των στοιχείων).

- Μεταβολή Δυσκαμψίας Στοιχείων

Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, το σπλισμένο σκυρόδεμα, η φέρουσα ικανότητα των αγκυριών, είναι μερικά από τα στοιχεία των οποίων η δυσκαμψία και η αντοχή μεταβάλλονται με τον χρόνο. Δεδομένου ότι κατά τις φάσεις κατασκευής των σηράγγων η διαδοχή των σταδίων πραγματοποιείται κατά την μετάβαση από ένα στάδιο σε άλλο, θα πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα μεταβολής της δυσκαμψίας. Πέραν τούτου θα πρέπει ο αλγόριθμος επίλυσης να έχει την δυνατότητα ανακατανομής των δυνάμεων και να εξισορροπεί το εσωτερικό και εξωτερικό έργο.

- Προσομοίωση Ρηγμάτωσης

Κατά την φάση υπολογισμού είναι δυνατόν οι ασκούμενες ελκτικές δυνάμεις να υπερβούν την αντοχή σε ελκισμό. Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει το πρόγραμμα να διαθέτει εσωτερικό βρόγχο ανακατανομής των τάσεων του προς ρηγμάτωση στοιχείου και ταυτόχρονη μείωση της διατμητικής και μηδενισμό της αντοχής σε ελκισμό.

4. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

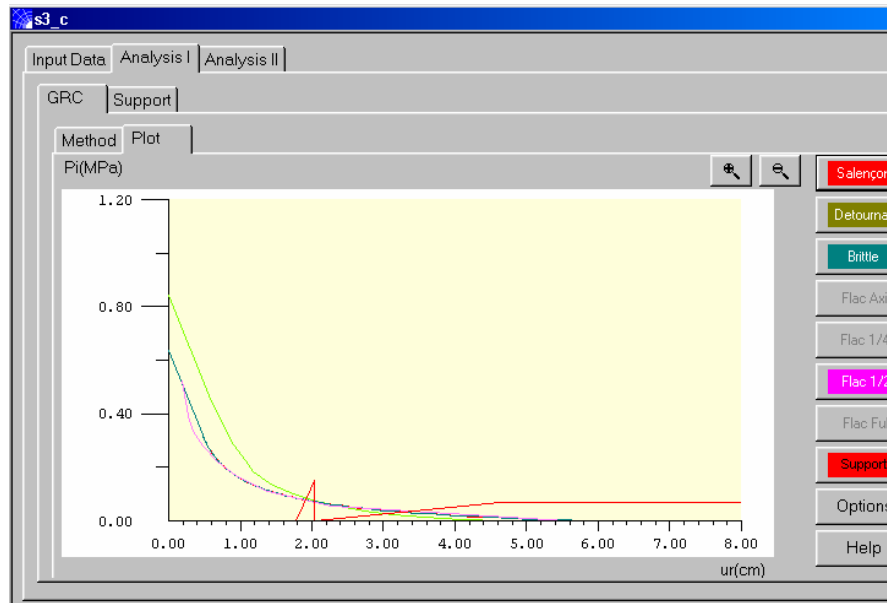
4.1 ΑΡΧΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Οι κύριες προσομοιώσεις για τον σχεδιασμό των σηράγγων του τμήματος 5.2 πραγματοποιούνται σε καθεστώς επίπεδης παραμόρφωσης αντιστοιχώντας στην εγκάρσια έννοια. Η προσομοίωση περιλαμβάνει και τις δύο σήραγγες, για δε την επίτευξη της μεγαλύτερης δυνατής ακρίβειας ακολουθείται, όσο γίνεται καλύτερα, η κατασκευαστική διαδικασία της σήραγγας. Τα στάδια προσομοίωσης έχουν ως ακολούθως:

1. Εισαγωγή της στρωματογραφίας, των οριακών συνθηκών και της αρχικής εντατικής κατάστασης στη περιοχή μελέτης.
2. Μερική εκτόνωση της περιβάλλουσας βραχομάζας που προέρχεται από το μέγεθος του ανυποστήρικτου τμήματος στο μέτωπο εκσκαφής και το είδος των μέτρων άμεσης υποστήριξης, σύμφωνα με τις καμπύλες απόκρισης του περιβάλλοντος εδάφους, βλ. σχήμα 2.
3. Αφαίρεση των στοιχείων του άνω τμήματος της αριστερής σήραγγας και ενεργοποίηση των στοιχείων άμεσης υποστήριξης της περιοχής. Μείωση της δυσκαμψίας των στοιχείων του επόμενου προς αφαίρεση τμήματος.
4. Αφαίρεση των στοιχείων του επόμενου βήματος και ενεργοποίηση των στοιχείων άμεσης υποστήριξης που αντιστοιχούν σε αυτό. Μεταβολή της δυσκαμψίας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος του προηγούμενου σταδίου. Μείωση της δυσκαμψίας των στοιχείων του προς εκσκαφή επόμενου τμήματος. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι την πλήρη εκσκαφή των διατομών των δύο σηράγγων.
5. Κατασκευή τελικής επένδυσης, θεώρηση πλήρους χαλάρωσης των αγκυρίων, μηδενισμό της δυσκαμψίας των υπολοίπων μέτρων άμεσης υποστήριξης και τροποποίηση των συνοριακών συνθηκών, ανάλογα με την μορφή και την αναμενόμενη λειτουργία της μόνιμης επένδυσης.
6. Πρόσθετη επιφόρτιση λόγω άσκησης υδροστατικής πίεσης και θερμοκρασιακών διαφορών στη μόνιμη επένδυση της σήραγγας, όπως προβλέπεται από τον ΟΣΜΕΟ.

Πέραν των ανωτέρω βημάτων πραγματοποιήθηκε και ανάλυση σεισμικής δράσης σε περιοχή με ζώνη διάτμησης, καθώς και ανάλυση τοπικών αστοχιών και καταπτώσεων οροφής σε περιοχή διεπιφανειών έντονης διάτμησης σχηματισμών που υπέρκεινται της σήραγγας. Πραγματοποιήθηκαν επίσης επιλύσεις κατά την διαμήκη έννοια για την διαστασιολόγηση των δοκών προπορείας στη θέση εισόδου των σηράγγων και σε θέσεις διέλευσης από ζώνη διάτμησης.

Χρήση Αριθμητικών Μεθόδων για τη Προσομοίωση των Σηράγγων του Τμήματος 5.2



Σχήμα 2: Καμπύλες απόκρισης περιβάλλοντος χώρου της σήραγγας – Προσδιορισμός του βαθμού μείωσης δυσκαμψίας των εκσκαπτομένων στοιχείων.

4.2 ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΤΟΜΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΣΕ ΔΙΑΤΡΗΣΗ

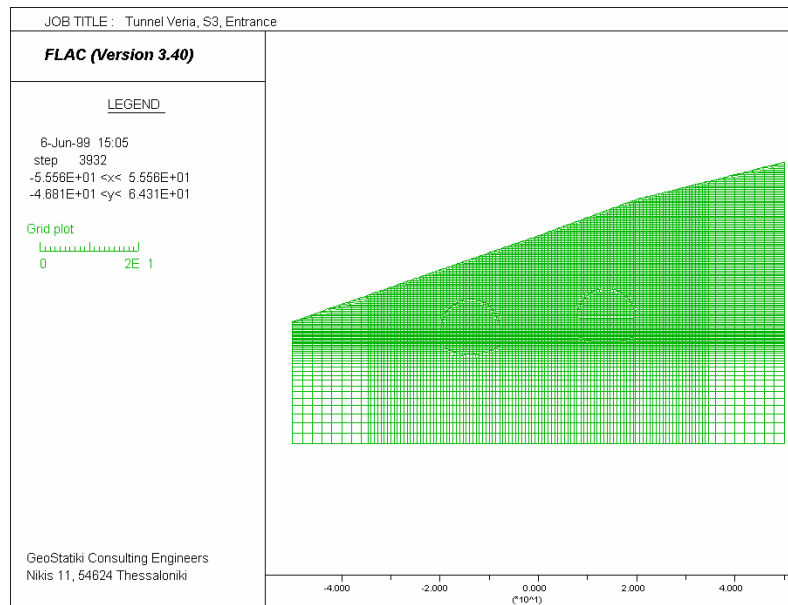
Για κάθε σήραγγα πραγματοποιήθηκαν τουλάχιστον τρεις αναλύσεις κατά την εγκάρσια έννοια έτσι ώστε να ληφθούν υπόψη οι γεωμετρικές διαφορές (μεταβολή πάχους υπερκειμένου σχηματισμού), καθώς και η μεταβολή της ποιότητας της βραχομάζας. Τα εντατικά και κινηματικά μεγέθη όλων των σταδίων παρουσιάζονται σε γραφήματα έτσι ώστε να δίνεται εποπτικά η μεταβολή ανά στάδιο. Στο σχήμα 4 δίνεται γραφική απεικόνιση των κατακορύφων μετακινήσεων σε θέση της σήραγγας Σ3.

Τα κυριότερα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν από όλες τις επιλύσεις κατά την εγκάρσια έννοια είναι τα ακόλουθα:

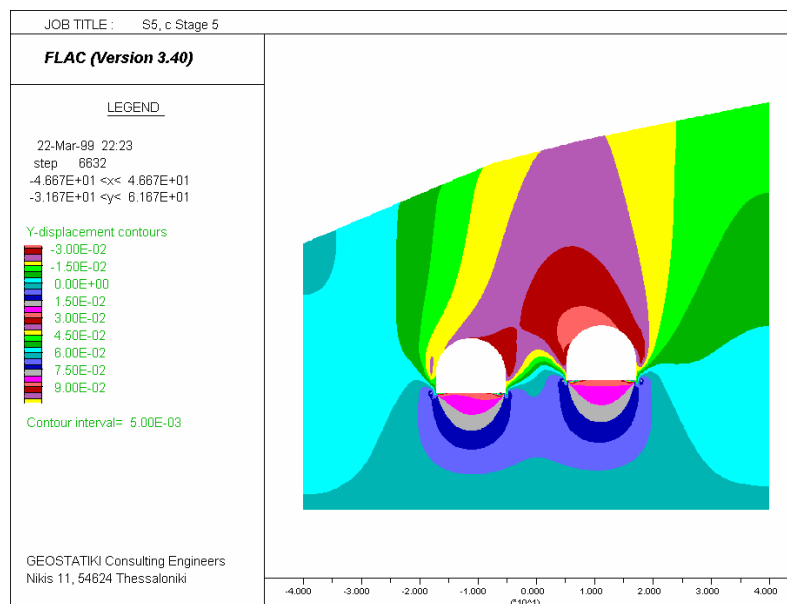
- Ο βαθμός αλληλεπίδρασης για την δεδομένη απόσταση και διάταξη είναι ιδιαίτερα σημαντικός. Η ανάλυση και των δύο κλάδων δίνει μέχρι και διπλάσιες μετακινήσεις απ'ότι η ανάλυση του ενός και μόνο κλάδου (θεώρηση μηδενικής αλληλεπίδρασης).
- Ως βέλτιστη σειρά εκσκαφής προτείνεται η εκσκαφή του κατάντη κλάδου (αριστερού) και εν συνεχεία του ανάντη. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται η υποσκαφή του ανάντη κλάδου ενώ περιορίζονται και τα αποτελέσματα της αλληλεπίδρασης κατά 20%.
- Η μικρή διατμητική αντοχή, το μικρό υπερκείμενο και η μικρή ενδιάμεση απόσταση των δύο κλάδων δημιουργούν διαφορετικούς μηχανισμούς διατμητικών παραμορφώσεων και εντατικού πεδίου. Οι μηχανισμοί αστοχίας, σε περίπτωση θραύσης, εκτείνονται μέχρι την επιφάνεια του εδάφους σε μορφή καμινάδας.

Χρήση Αριθμητικών Μεθόδων για τη Προσομοίωση των Σηράγγων του Τμήματος 5.2

- Η σεισμική δράση επηρεάζει σημαντικά το εντατικό και κινηματικό πεδίο καθώς και τις αναλαμβανόμενες από τα μέτρα υποστήριξης εντάσεις μόνο στην θέση διέλευσης της ζώνης έντονης διάτμησης.



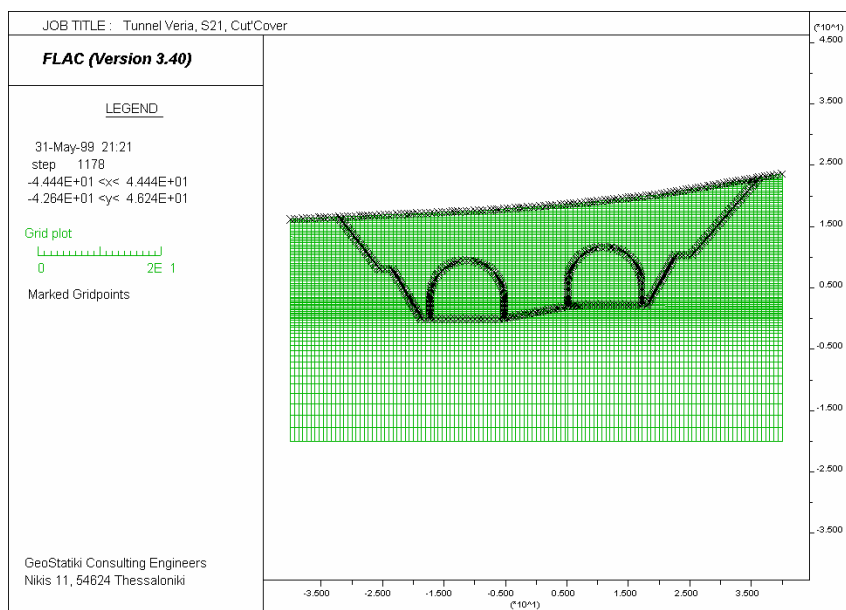
Σχήμα 3: Κάνναβος διακριτοποίησης του χώρου ανάλυσης της δίδυμης σήραγγας Σ3.



Σχήμα 4: Απεικόνιση κατακόρυφων μετακινήσεων μετά την ολοκλήρωση των σταδίων εκσκαφής και εφαρμογής των μέτρων άμεσης υποστήριξης στους δύο κλάδους της σήραγγας Σ3.

4.3 ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΤΟΜΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΜΕ ΕΚΣΚΑΦΗ ΚΑΙ ΕΠΑΝΕΠΙΧΩΣΗ

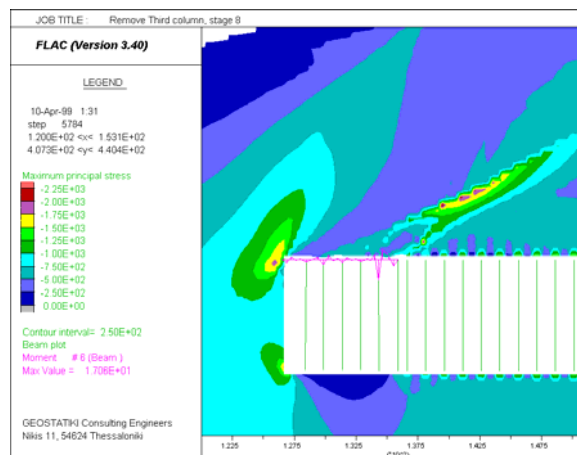
Στο σχήμα 5 δίνεται ο κάρναβος διακριτοποίησης σήραγγας με κατασκευή εκσκαφής και επανεπίχωσης. Τα στάδια προσομοίωσης περιλαμβάνουν την εισαγωγή του αρχικού εντατικού πεδίου, την εκσκαφή στο χώρο κατασκευή της σήραγγας, την κατασκευή της σήραγγας και εν συνεχεία την επανεπίχωση. Τελευταίο στάδιο αποτελεί η σεισμική δράση. Από την επεξεργασία των αναλύσεων προκύπτει ότι επιβάλλεται η χρήση διεπιφάνειας ανάμεσα στα στοιχεία προσομοίωσης της σήραγγας και το υλικό επανεπίχωσης. Σε αντίθετη περίπτωση πρακτικά το υλικό επανεπίχωσης αναρτάται από τα στοιχεία της σήραγγας, με αποτέλεσμα οι επιλύσεις να δίνουν μεγάλες θλιπτικές δυνάμεις. Οι δυνάμεις αυτές οδηγούν στην μείωση του οπλισμού κάμψης με αποτέλεσμα, στο βαθμό που όπως αναμένεται δεν εξασκηθούν, να υπάρχει κίνδυνος αστοχίας, η μείωση του βαθμού ασφαλείας. Το σημείο αυτό θα πρέπει να συμπεριληφθεί στις επισημάνσεις του ΟΣΜΕΟ, ενώ η περαιτέρω εξέταση του, μέσω μετρήσεων και αντίστροφης ανάλυσης, θα αποτελούσε ιδιαίτερη συνεισφορά στην ακριβέστερη και τεκμηριωμένη μελέτη του προβλήματος. Η σεισμική δράση δεν φαίνεται να επιδεινώνει την εντατική και κινηματική κατάσταση. Συγκεκριμένα παρατηρείται μεταφορά της μέγιστης έντασης (καμπτικής ροπής) σε διάφορες θέσεις των δομικών στοιχείων της σήραγγας χωρίς ωστόσο να υπάρχει ουσιαστική αύξηση της τιμής της.



Σχήμα 5: Κάρναβος διακριτοποίησης του χώρου ανάλυσης σήραγγας με εκσκαφή και επανεπίχωση.

4.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΔΟΚΩΝ ΠΡΟΠΟΡΕΙΑΣ

Οι δοκοί προπορείας αποτελούν ενδιάμεσα στοιχεία ενίσχυσης του εδάφους έναντι καταπτώσεων (λειτουργία τόξου στο εδαφικό υλικό ανάμεσα στις δοκούς), και δεν πρέπει να θεωρούνται στοιχεία φέροντα καθ' ότι είναι ουσιαστικά στηριζόμενα στα εγκάρσια στοιχεία άμεσης υποστήριξης (χαλύβδινα πλαίσια, ή ακόμα και δικτυωτά πλαίσια όπου οι συνθήκες το επιτρέπουν). Για τον έλεγχο και διαστασιολόγηση των δοκών προπορείας πραγματοποιήθηκαν διάφορες αναλύσεις είτε στις θέσεις των στομιών είτε σε ειδικές περιοχές, όπως θέση με υπερκείμενη χαλαρωμένη ζώνη διάτμησης. Η ανάλυση πραγματοποιείται κατά την διαμήκη έννοια σε κατάσταση επίπεδης παραμόρφωσης. Η παραδοχή αυτή είναι σαφώς συντηρητική, τα δε αποτελέσματα της μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τις δοκούς προπορείας στη θέση της κλειδας. Για τις υπόλοιπες θέσεις η υιοθέτηση των εντατικών μεγεθών είναι μεν συντηρητική, συχνά όμως κατασκευαστικά επιβαλλόμενη. Στο σχήμα 6 απεικονίζεται η εντατική κατάσταση στην περιοχή διέλευσης χαλαρωμένης υπερκείμενης ζώνης, ενώ ταυτόχρονα δίνεται και το διάγραμμα καμπτικών ροπών στις δοκούς προπορείας.

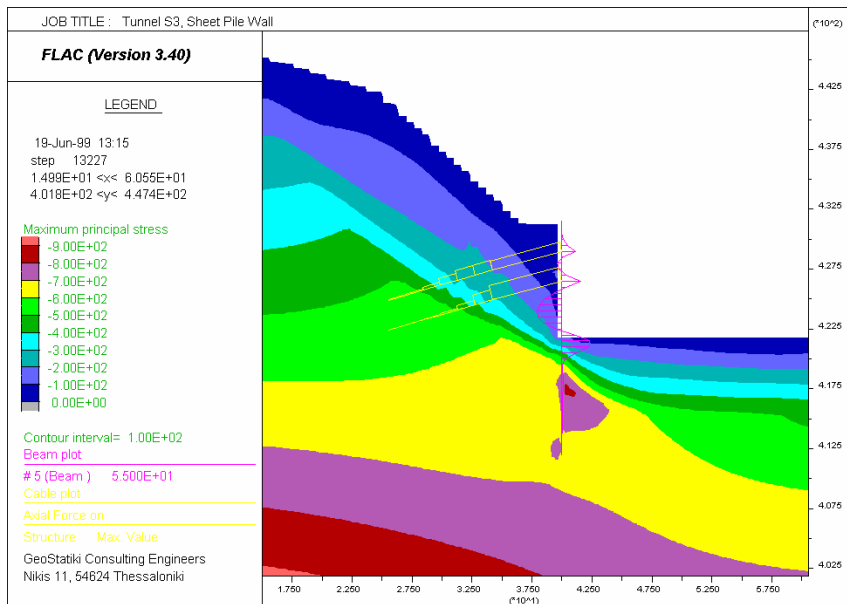


Σχήμα 6: Απεικόνιση μέγιστων κυρίων τάσεων εδάφους και καμπτικών ροπών δοκού προπορείας.

4.5 ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΣΤΙΣ ΘΕΣΕΙΣ ΤΩΝ ΣΤΟΜΙΩΝ

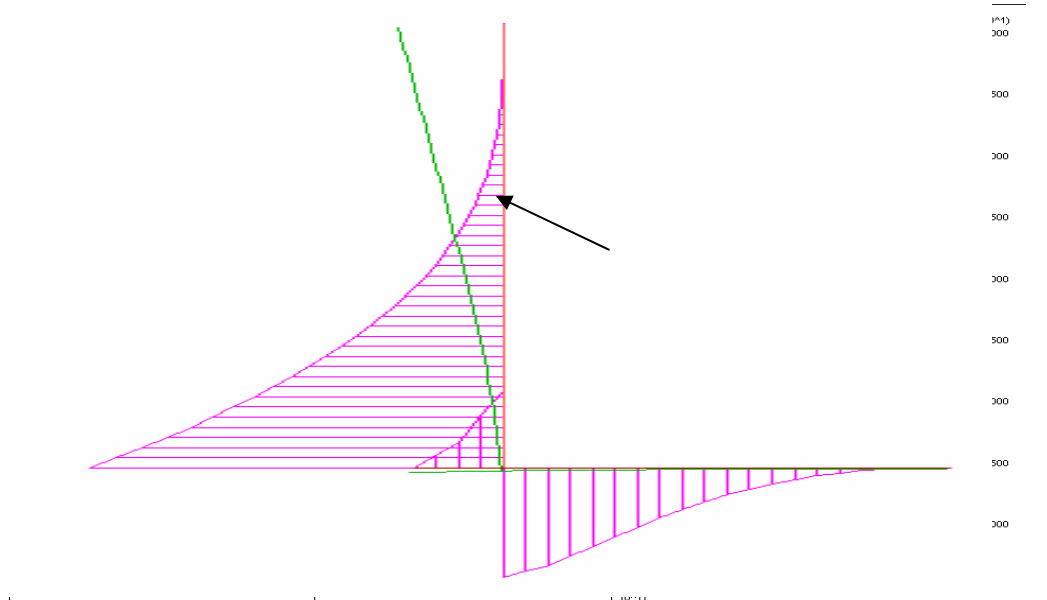
Οι αναλύσεις στις θέσεις των στομιών περιλαμβάνουν κατ' αρχάς την συνολική εξέταση της ευστάθειας των πρηνών, την κατασκευή στοιχείων αντιστήριξης για την εξασφάλιση ευστάθειας πλευρικά των σηράγγων, καθώς και αναλύσεις για την εξέταση ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής, για τον προσδιορισμό των μέτρων ενίσχυσης σε περίπτωση ασθενών σχηματισμών. Δεδομένης της μορφολογίας στις θέσεις των στομιών καθίσταται προβληματική η εφαρμογή συμβατικών μεθόδων σχεδιασμού στοιχείων αντιστήριξης. Επιπρόσθετα σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως η κατασκευή πασσαλοδιαφράγματος, η επίλυση απαιτεί θεώρηση πλήρους αλληλεπίδρασης εδάφους κατασκευής. Η χρήση αριθμητικών μεθόδων για την επίλυση και τον σχεδιασμό έργων αντιστήριξης δίνει την δυνατότητα ακριβέστερης προσέγγισης του προβλήματος και κατά κανόνα οδηγεί σε οικονομικότερες διατομές. Στο σχήμα 7 απεικονίζεται το τασικό πεδίο και τα εντατικά μεγέθη των στοιχείων αντιστήριξης στην ανάντη περιοχή της σήραγγας Σ3. Στο σχήμα 8 επίσης απεικονίζονται τα εντατικά μεγέθη τοίχου αντιστήριξης στην είσοδο της σήραγγας όπου καταλήγει το τμήμα με εκσκαφή και επανεπίχωση

Χρήση Αριθμητικών Μεθόδων για τη Προσομοίωση των Σηράγγων του Τμήματος 5.2



Σχήμα 7: Απεικόνιση μέγιστων κυρίων τάσεων εδάφους και εντατικών μεγεθών στοιχείων αντιστήριξης στην περιοχή της Σ3

Σχήμα 8: Απεικόνιση μέγιστων κυρίων τάσεων εδάφους και καμπτικών ροπών



τοίχου αντιστήριξης στη θέση του τμήματος εκσκαφής και επανεπίχωσης της σήραγγας Σ 2.1.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Χρήση Αριθμητικών Μεθόδων για τη Προσομοίωση των Σηράγγων του Τμήματος 5.2

Η χρήση μεθόδων αριθμητικής ανάλυσης για τον σχεδιασμό και την διαστασιολόγηση των σηράγγων Σ2.1, Σ3 και Σ5 αποτέλεσε πεδίο δύσκολο λόγω των ιδιαιτεροτήτων που περιγράφονται στις προηγούμενες παραγράφους, και οι οποίες πηγάζουν τόσο από την παθολογία του μέσου όσο και από την τοπολογία του έργου. Ο συνδυασμός παθολογίας και τοπολογίας υπήρξε ιδιαίτερα απαιτητικός σε θέματα προσομοίωσης και ανάλυσης. Γενικό συμπέρασμα αποτελεί ότι οι δύο αυτοί όροι αλληλεπιδρούν, χαρακτηριστική περίπτωση αποτελεί η σήραγγα Σ3 όπου η αύξηση της ενδιάμεσης απόστασης των δύο κλάδων κατά 5 μέτρα μετέβαλε καθοριστικά την παθολογία του συστήματος.

Οι μεταβολές των μέτρων παραμορφωσιμότητας της βραχομάζας μεταβάλλουν αισθητά τις αναλαμβανόμενες από τα αγκύρια δυνάμεις, ενώ σημαντική είναι και η διαφορά που επιφέρει ο τρόπος προσομοίωσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος (σταδιακή ανάπτυξη θλιπτικής αντοχής). Ιδιαίτερη είναι επίσης και η συμβολή του βήματος εκσκαφής στην μεταβολή των εντατικών και κινηματικών αποτελεσμάτων.

Η σεισμική δράση σε περιοχές χαλαρωμένης ζώνης διάτμησης που διαπερνά την σήραγγα προκαλούν σημαντική αύξηση των εντατικών μεγεθών. Αντίθετα στην περίπτωση των σηράγγων με εκσκαφή και επανεπίχωση η αύξηση είναι πρακτικά αμελητέα, παρατηρείται εντούτοις μετάθεση των μεγίστων εντατικών μεγεθών.

Πέραν των συμπερασμάτων που προέκυψαν από τα αποτελέσματα της ανάλυσης κατατίθενται και διάφοροι προβληματισμοί και προτάσεις αναφορικά με τον τρόπο προσέγγισης του προβλήματος και της προσομοίωσης του. Κατ'αρχήν θα πρέπει να θεωρείται επιβεβλημένη η χρήση μεθόδων αριθμητικής ανάλυσης για την επίλυση και την διαστασιολόγηση του προβλήματος. Κύριο λόγο αποτελεί η ακρίβεια των αποτελεσμάτων, με βασική βέβαια προϋπόθεση ότι τα δεδομένα του προβλήματος προσδιορίστηκαν με την απαραίτητη ακρίβεια. Εξ ίσου σημαντικός λόγος είναι επίσης η δυνατότητα βελτίωση της προσέγγισης μέσω των μετρήσεων και διεξαγωγής αντίστροφης ανάλυσης. Η χρήση της αντίστροφης ανάλυσης είναι σε θέση ακόμη και να επαναπροσδιορίσει παραμέτρους παραμορφωσιμότητας που εμπειρικά και μόνο προσδιορίζονται κατά την αρχική ανάλυση. Η εμπειρία που μπορεί να αντληθεί από την διεξαγωγή αντίστροφων αναλύσεων είναι ιδιαίτερα σημαντική. Αν δε τούτο γίνει συνολικά για το σύνολο των σηράγγων που κατασκευάζονται και θα κατασκευασθούν από την Εγνατία Οδό Α.Ε. θα πρέπει να θεωρείται βέβαιο ότι ο βαθμός ακρίβειας, οικονομίας και ασφάλειας θα βελτιωθούν αισθητά, ενώ θα περιορισθεί και η τάση υπερδιαστασιολόγησης στην οποία συχνά καταφεύγει κανείς υπό το κλίμα της αβεβαιότητας. Η προσομοίωση θα πρέπει να είναι πολυσταδιακή, ελαστοπλαστική και να καθορίζεται από την κατασκευαστική διαδικασία.

Θα πρέπει να διερευνηθεί περισσότερο ο τρόπος υπολογισμού των εντατικών μεγεθών της μόνιμης επένδυσης. Συγκεκριμένα η διάταξη του ΟΣΜΕΟ περί πλήρους αγνόησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης (υπό το πνεύμα της μη θετικής συνεισφοράς προφανώς) δεν φαίνεται να ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για παράδειγμα τελεί υπό καθεστώς τριαξονικής θλίψης και θα συνεχίζει να αναλαμβάνει θλιπτική δύναμη, γεγονός που οδηγεί σε αύξηση σπλισμού κάμψης της μόνιμης επένδυσης. Η κατάσταση αυτή προσεγγίζει καλύτερα την πραγματικότητα και είναι δυσμενέστερη από την διάταξη του ΟΣΜΕΟ. Πέραν τούτου θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ελαστοπλαστική ανάλυση για την διαστασιολόγηση των μέτρων άμεσης υποστήριξης είναι πρακτικά ανάλυση λειτουργικότητας, ενώ η εν συνεχεία ανάλυση διαστασιολόγησης της μόνιμης επένδυσης αποσκοπεί στον έλεγχο θραύσης. Αν υποθεθεί εντούτοις ότι η οργανομέτρηση στο σώμα της μόνιμης επένδυσης θα πραγματοποιηθεί

Χρήση Αριθμητικών Μεθόδων για τη Προσομοίωση των Σηράγγων του Τμήματος 5.2

και οι μετρήσεις θα ληφθούν, πρακτικά δεν θα αξιοποιηθούν αφού δεν προβλέπεται ανάλυση λειτουργικότητας.

Σημείο επίσης που απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση και θα πρέπει να καθορισθεί στις διατάξεις του ΟΣΜΕΟ αποτελεί ο τρόπος επίλυσης των σηράγγων με εκσκαφή και επανεπίχωση. Η χρήση αριθμητικών μεθόδων παρουσιάζει τα ίδια πλεονεκτήματα που αναφέρονται και ανωτέρω, σε σχέση με επιλύσεις υπερστατικών φορέων με ελατηριακές σταθερές και απλοποιήσεις φορτίων. Ακόμη όμως και με την χρήση αριθμητικών μεθόδων θα πρέπει να τονισθεί ότι κατά την προσομοίωση πρέπει να χρησιμοποιείται διεπιφάνεια ανάμεσα στον φορέα της σήραγγας και το υλικό επανεπίχωσης. Σε αντίθετη περίπτωση προκύπτουν εξωπραγματικές θλιπτικές δυνάμεις στις διατομές τις σήραγγας, οι οποίες πέραν των άλλων οδηγούν σε μείωση του σπλισμού κάμψης.

Συμπερασματικά, ο μεγάλος αριθμός των σηράγγων της Εγνατίας Οδού Α.Ε., με διαφορετική τοπολογία και παθολογία, είναι σε θέση να πυροδοτήσει την έναρξη ενός γόνιμου διαλόγου ανταλλαγής απόψεων ώστε να επιτευχθεί βελτίωση του τρόπου ανάλυσης και σύνθεσης του προβλήματος των σηράγγων. Επιπρόσθετα, οι συστηματικές οργανομετρήσεις μπορούν να δώσουν επαρκή στοιχεία για την διεξαγωγή αντίστροφων αναλύσεων και την απόκτηση δημιουργικής εμπειρίας σε τομείς όπου γίνονται θεμελιώδεις παραδοχές και χρήσεις εμπειρικών τύπων για τον προσδιορισμό παραμέτρων, των οποίων ενίοτε η ακρίβεια είναι αβέβαιη.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ASCE (1982). *Finite Element Analysis of Reinforced Concrete. State-of-the-Art Report*, Spec. Publ. ASCE, N.Y.
- Bathe, K.J. 1981. *ADINA - A finite Element Program for Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis*, Report AE91-1, ADINA Engineering.
- Bockel, J.O., Kuesel, R.T. and King, H. E. 1996. *Tunnel Engineering Handbook*, Chapman & Hall, N.Y., USA.
- Bouvard-Lecoanet, A, Colombet, G. et Esteulle, F. 1988. *Ouvrages Souterrains – Conception – Realisation – Entretien*, Presses Ponts et Chaussees, Paris.
- Comodromos, E., T. Hatzigogos, T., K. Pitolakis 1991. *Procedure Numerique pour la Simulation des Excavations des Sols Elastoplastiques*, *Revue Francaise de Geotechnique*, **No 58**, pp. 51-66.
- Comodromos, E., T. Hatzigogos and K. Pitolakis 1992a. *Finite Element Algorithm for Analyzing Geotechnical Problems with Variable Domain and Boundaries*, *In Proc. IV Numer. Mod. in Geomech.*, pp. 577-587, Swansea, U.K.
- Comodromos, E., T. Hatzigogos and K. Pitolakis 1992b. *Multi-stage Finite Element Algorithm for excavation in Elastoplastic Soils*, *Computers & Structures*, **Vol. 46**, No 2, pp. 289-298.

Χρήση Αριθμητικών Μεθόδων για τη Προσομοίωση των Σηράγγων του Τμήματος 5.2

Comodromos, E. 1993. "Numerical Method of Tunnelling in Hard Soils-Soft Rocks", *Int. Symp. on Hard Soils-Soft Rocks*, Athens, pp. 1993-1400.

Duddeck, H. 1991. Application of Numerical Analyses for Tunnelling, *Int. J. Numer. Anal. Method Geomech.*, **15**, pp. 223-239.

FLAC 1998. Fast Lagrangian Analysis of Continua, Itasca: A Consulting Group Inc. Computer Software, Manuals version 3.3 and 3.4.

Hoek, E., Kaiser, P.K. and Bawden, W.F. 1995. *Support of Underground Excavations in Hard Rock*, A. A. Balkema, Brookfield, VT 05036, USA.

Hoek, E., 1998. Rock Engineering, Course Notes, Evert Hoek Consulting Engineer Inc., Vancouver, Canada.

Hoek, E., 1997. 'Practical Estimates of Rock Mass Strength', *Int. J. Rock. Min. Sci.* Vol. 34, No. 8 pp. 1165-1186, Elsevier Sci. Ltd, GB.

Hoek, E., 1998. 'Reliability of Hoek-Brown Estimates of Rock Mass Properties and their Impact on Design', Technical Note, *Int. J. Rock. Min. Sci.* Vol. 35 No. 1 pp. 63-68, Elsevier Sci. Ltd, GB.

Parreira, A.B. and Azevedo, R.F. 1992. Prediction of Displacements in Soft-Ground Tunnelling, *In Proc. IV Numer. Mod. in Geomech.*, pp. 675-683, Swansea, U.K.

Sofistik G.m.b.H. 1993. SOFiSTiK Computer Software, Manuals.

Swoboda, G. and Moussa, A. 1992. Numerical Modelling of Shotcrete in Tunneling, *In Proc. IV Numer. Mod. in Geomech.*, pp. 717-727, Swansea, U.K.

Tunnel Support Modeller 1998. Computer Program, Itasca: A Consulting Group Inc. Computer Software.

Wyllie, D. C. 1992. *Foundation on Rock*, Chapman & Hall, London, pp. 333.