

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ & ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ**

Διπλωματική

**Διερεύνηση αλληλεπίδρασης υφιστάμενης
σταθεροποιημένης κατολίσθησης με υπό διάνοιξη
δίδυμες σήραγγες**

ΚΟΡΟΜΗΛΑΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΜΙΧΑΗΛ ΣΑΚΕΛΛΑΡΙΟΥ

Αθήνα 2009

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	2
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	4
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	6
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ	7
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	8
ABSTRACT	9
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	10
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	11
1.1 Γενικά Για Σήραγγες Στον Ελλαδικό χώρο.....	14
1.2 Γεωλογικές – Γεωμορφολογικές Συνθήκες Στην Ευρύτερη Περιοχή Μελέτης 17	17
1.2.1 Γενικά	17
1.2.2 Γεωμορφολογία	17
1.2.3 Στρωματογραφία	18
1.2.4 Τεκτονική	19
1.2.5 Σεισμικότητα	20
2 ΑΝΑΛΥΣΗ.....	22
2.1 Γεωμετρική Ανάλυση	25
2.2 Παραμετρική Ανάλυση.....	27
2.2.1 Γεωτεχνικές παράμετροι αντοχής του εδάφους	27
2.2.1.1 Κριτήρια αστοχίας Mohr-Coulomb – Hoek-Brown.....	29
2.2.1.2 Εκτίμηση των παραμέτρων c, ϕ του κριτηρίου Mohr-Coulomb για τη βραχομάζα (Υλικό 3).....	31
2.2.2 Κατασκευαστική αλληλουχία εκσκαφής.....	35

2.2.2.1	Νέα Αυστριακή Μέθοδος Διάνοιξης Σηράγγων	36
2.2.3	Εξέταση στοιχείων υποστήριξης διαφορετικής στιβαρότητας.....	37
2.2.3.1	Μέθοδος ανάλυσης διάνοιξης-υποστήριξης σηράγγων με καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης.....	37
2.2.3.2	Μέθοδος ισοδύναμης χαλάρωσης της βραχόμαζας	42
2.2.3.3	Διαγράμματα Panet	44
2.2.3.4	Εκτίμηση πιθανών μέτρων προσωρινής υποστήριξης από εμπειρικές σχέσεις Hoek και Brown	46
2.2.4	Χαρακτηριστικές τιμές συνοχής (c) ζώνης υπολειμματικής αντοχής – ζώνης αστοχίας.....	50
3	ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ – ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	51
3.1	Γενικά Στοιχεία Συγκλίσεων Εκσκαφής	52
3.2	Γενικά Στοιχεία Επιφανειακών Μετακινήσεων.....	53
3.3	Αποτελέσματα Ανάλυσης Συγκλίσεων Εκσκαφής.....	56
3.3.1	Συγκλίσεις εκσκαφής για τη γεωμετρία Α	56
3.3.2	Συγκλίσεις εκσκαφής για τη γεωμετρία Β.....	65
3.4	Αποτελέσματα Ανάλυσης Επιφανειακών Μετακινήσεων.....	75
3.4.1	Μεταβολή επιφανειακού συνόρου υπό την επιρροή διάνοιξης των κλάδων της σήραγγας.....	75
3.4.1.1	Μεταβολή επιφανειακού συνόρου στην περίπτωση γεωμετρίας Α.....	75
3.4.1.2	Μεταβολή επιφανειακού συνόρου στην περίπτωση γεωμετρίας Β.....	77
3.4.2	Μέγιστες τιμές επιφανειακών μετακινήσεων.....	78
3.4.2.1	Μέγιστες τιμές επιφανειακών μετακινήσεων για γεωμετρία Α.....	79
3.4.2.2	Μέγιστες τιμές επιφανειακών μετακινήσεων για γεωμετρία Β.....	81
4	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	83
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	87

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Κεφάλαιο 1

Σχήμα 1.1: Απεικόνιση γεωμετρίας A

Σχήμα 1.2: Απεικόνιση γεωμετρίας B

Σχήμα 1.3: Απεικόνιση περιοχής η οποία δέχεται επιρροή και από τους δύο κλάδους της σήραγγας

Σχήμα 1.4: Γεωτεκτονικός χάρτης του Ελλαδικού χώρου που απεικονίζει τις δυσχέρειες διάνοιξης σηράγγων λόγω δυσμενών γεωλογικών συνθηκών

Σχήμα 1.5: Οι τρεις (I, II, III) κατηγορίες ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας στις οποίες χωρίστηκε ο Ελληνικός χώρος, σύμφωνα με την τελευταία τροποποίηση

Σχήμα 1.6: Φάσματα σχεδιασμού σύμφωνα με τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (ΕΑΚ, 2003)

Κεφάλαιο 2

Σχήμα:2.1: Κάνναβος γεωμετρίας A

Σχήμα 2.2: Κάνναβος γεωμετρίας B

Σχήμα 2.3: Απεικόνιση της γεωμετρίας A παρουσία των τεσσάρων εδαφικών ζωνών

Σχήμα 2.4: Απεικόνιση της γεωμετρίας B παρουσία των τεσσάρων εδαφικών ζωνών

Σχήμα 2.5: Εξισώσεις μεταξύ κύριων τάσεων όπως αυτές προκύπτουν τόσο από το κριτήριο Hoek-Brown όσο και από το ισοδύναμο κριτήριο Mohr-Coulomb

Σχήμα 2.6: Το βασικό διάγραμμα του Δείκτη Γεωλογικής Αντοχής GSI

Σχήμα 2.7: Διαγράμματα συσχέτισης των περιβαλλουσών για τα δύο κριτήρια αστοχίας όπου απεικονίζεται με μπλε χρώμα (περιβάλλουσα Mohr-Coulomb) και με κόκκινο χρώμα (περιβάλλουσα Hoek-Brown)

Σχήμα 2.8: Καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης και καμπύλες Panet σε ανυποστήρικτη σήραγγα

Σχήμα 2.9: Τυπικές μορφές καμπύλων Panet κατά μήκος του άξονα της σήραγγας, για διάφορες τιμές του συντελεστή υπερφόρτισης (N_s)

Σχήμα 2.10: Καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης και καμπύλες Panet σε σήραγγα υποστηριζόμενη με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Σχήμα 2.11: Τυπικές μορφές των καμπύλων Panet σε ανυποστήρικτη σήραγγα για διάφορες τιμές του συντελεστή υπερφόρτισης N_s

Σχήμα 2.12: Εκτίμηση μέγιστης ικανότητας για διάφορα συστήματα υποστήριξης σε σήραγγες κυκλικής διατομής

Σχήμα 2.13 : Εκτίμηση μέγιστης ικανότητας εκτοξευόμενου σκυροδέματος

Κεφάλαιο 3

Σχήμα 3.1: Μορφή της παραμόρφωσης στη βραχώμαζα που περιβάλλει μια υπό διάνοιξη σήραγγα (Hoek, 2000)

Σχήμα 3.2: Φάση A με ελαφρού τύπου υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας $0kPa$

Σχήμα 3.3: Φάση B με ελαφρού τύπου υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας $0kPa$

Σχήμα 3.4: Φάση A με βαρέως τύπου υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας $15kPa$

Σχήμα 3.5: Φάση B με βαρέως τύπου υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας $15kPa$

Σχήμα 3.6: Φάση A με ελαφρού τύπου υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας $0kPa$

Σχήμα 3.7: Φάση B με ελαφρού τύπου υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας $0kPa$

Σχήμα 3.8: Φάση A με βαρέως τύπου υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας $15kPa$

Σχήμα 3.9: Φάση B με βαρέως τύπου υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας $15kPa$

Σχήμα 3.10: Φάση A με ελαφρού τύπου υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας $0kPa$

Σχήμα 3.11: Φάση B με ελαφρού τύπου υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας $0kPa$

Σχήμα 3.12: Φάση A με βαρέως τύπου υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας $15kPa$

Σχήμα 3.13: Φάση B με βαρέως τύπου υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας $15kPa$

Σχήμα 3.14: Φάση A με ελαφρού τύπου υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας $0kPa$

Σχήμα 3.15: Φάση B με ελαφρού τύπου υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας $0kPa$

Σχήμα 3.16: Φάση A με βαρέως τύπου υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας $15kPa$

Σχήμα 3.17: Φάση B με βαρέως τύπου υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας $15kPa$

Σχήμα 3.18: Φάση A με ελαφρού τύπου υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας $0kPa$

Σχήμα 3.19: Φάση B με ελαφρού τύπου υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας $0kPa$

- Σχήμα 3.20: Φάση Α με βαρέως τύπου υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας 15kPa
- Σχήμα 3.21: Φάση Β με βαρέως τύπου υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας 15kPa
- Σχήμα 3.22: Φάση Α με ελαφρού τύπου υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας 0kPa
- Σχήμα 3.23: Φάση Β με ελαφρού τύπου υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας 0kPa
- Σχήμα 3.24: Φάση Α με βαρέως τύπου υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας 15kPa
- Σχήμα 3.25: Φάση Β με βαρέως τύπου υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας 15kPa
- Σχήμα 3.26: Φάση Α με ελαφρού τύπου υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας 0kPa
- Σχήμα 3.27: Φάση Β με ελαφρού τύπου υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας 0kPa
- Σχήμα 3.28: Φάση Α με βαρέως τύπου υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας 15kPa
- Σχήμα 3.29: Φάση Β με βαρέως τύπου υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας 15kPa
- Σχήμα 3.30: Φάση Α με ελαφρού τύπου υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας 0kPa
- Σχήμα 3.31: Φάση Β με ελαφρού τύπου υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας 0kPa
- Σχήμα 3.32: Φάση Α με βαρέως τύπου υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας 15kPa
- Σχήμα 3.33: Φάση Β με βαρέως τύπου υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας 15kPa
- Σχήμα 3.34: Καμπύλη υποχωρήσεων της επιφάνειας του εδάφους
- Σχήμα 3.35: Απεικόνιση μεταβολής συνόρου της γεωμετρίας Α κατά τη διάνοιξη αρχικά του δεξιού κλάδου της σήραγγας
- Σχήμα 3.36: Απεικόνιση μεταβολής συνόρου της γεωμετρίας Α κατά τη διάνοιξη και των δύο κλάδων της σήραγγας
- Σχήμα 3.37: Απεικόνιση μεταβολής συνόρου της γεωμετρίας Α κατά τη διάνοιξη αρχικά του αριστερού κλάδου της σήραγγας
- Σχήμα 3.38: Απεικόνιση μεταβολής συνόρου της γεωμετρίας Β κατά τη διάνοιξη αρχικά του δεξιού κλάδου της σήραγγας
- Σχήμα 3.39: Απεικόνιση μεταβολής συνόρου της γεωμετρίας Β κατά τη διάνοιξη και των δύο κλάδων της σήραγγας
- Σχήμα 3.40: Απεικόνιση μεταβολής συνόρου της γεωμετρίας Β κατά τη διάνοιξη αρχικά του αριστερού κλάδου της σήραγγας

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Κεφάλαιο 2

Πίνακας 2.1: Γεωτεχνικές παράμετροι αντοχής Ανάλυσης I

Πίνακας 2.2: Γεωτεχνικές παράμετροι αντοχής Ανάλυσης II

Πίνακας 2.3: Ταξινόμηση βραχώδους υλικού με βάση την αντοχή του σε μονοαξονική θλίψη (ISRM, 1981)

Πίνακας 2.4: Πίνακας εκτίμησης του βαθμού διαταραχής *D*

Κεφάλαιο 3

Πίνακας 3.1: Αναλυτική παρουσίαση όλων των δυνατών συνδυασμών Παραμετρικής και Γεωμετρικής ανάλυσης

Πίνακας 3.2: Μέγιστες συγκλίσεις κλάδων σήραγγας στην περίπτωση γεωμετρίας A, Ανάλυσης I και διάνοιξης αρχικά του δεξιού κλάδου

Πίνακας 3.3: Μέγιστες συγκλίσεις κλάδων σήραγγας στην περίπτωση γεωμετρίας A, Ανάλυσης I και διάνοιξης αρχικά του αριστερού κλάδου

Πίνακας 3.4: Μέγιστες συγκλίσεις κλάδων σήραγγας στην περίπτωση γεωμετρίας A, Ανάλυσης II και διάνοιξης αρχικά του δεξιού κλάδου

Πίνακας 3.5: Μέγιστες συγκλίσεις κλάδων σήραγγας στην περίπτωση γεωμετρίας A, Ανάλυσης II και διάνοιξης αρχικά του αριστερού κλάδου

Πίνακας 3.6: Μέγιστες συγκλίσεις κλάδων σήραγγας στην περίπτωση γεωμετρίας B, Ανάλυσης I και διάνοιξης αρχικά του δεξιού κλάδου

Πίνακας 3.7: Μέγιστες συγκλίσεις κλάδων σήραγγας στην περίπτωση γεωμετρίας B, Ανάλυσης I και διάνοιξης αρχικά του αριστερού κλάδου

Πίνακας 3.8: Μέγιστες συγκλίσεις κλάδων σήραγγας στην περίπτωση γεωμετρίας B, Ανάλυσης II και διάνοιξης αρχικά του δεξιού κλάδου

Πίνακας 3.9: Μέγιστες συγκλίσεις κλάδων σήραγγας στην περίπτωση γεωμετρίας B, Ανάλυσης II και διάνοιξης αρχικά του αριστερού κλάδου

Πίνακας 3.10: Πίνακας μέγιστων επιφανειακών μετακινήσεων στην περίπτωση της γεωμετρίας A, Ανάλυσης I και διάνοιξης αρχικά του δεξιού κλάδου

Πίνακας 3.11: Πίνακας μέγιστων επιφανειακών μετακινήσεων στην περίπτωση της γεωμετρίας A, Ανάλυσης I και διάνοιξης αρχικά του αριστερού κλάδου

Πίνακας 3.12: Πίνακας μέγιστων επιφανειακών μετακινήσεων στην περίπτωση της γεωμετρίας A, Ανάλυσης II και διάνοιξης αρχικά του δεξιού κλάδου

Πίνακας 3.13: Πίνακας μέγιστων επιφανειακών μετακινήσεων στην περίπτωση της γεωμετρίας A, Ανάλυσης II και διάνοιξης αρχικά του αριστερού κλάδου

Πίνακας 3.14: Πίνακας μέγιστων επιφανειακών μετακινήσεων στην περίπτωση της γεωμετρίας B, Ανάλυσης I και διάνοιξης αρχικά του δεξιού κλάδου

Πίνακας 3.15: Πίνακας μέγιστων επιφανειακών μετακινήσεων στην περίπτωση της γεωμετρίας B, Ανάλυσης I και διάνοιξης αρχικά του αριστερού κλάδου

Πίνακας 3.16: Πίνακας μέγιστων επιφανειακών μετακινήσεων στην περίπτωση της γεωμετρίας B, Ανάλυσης II και διάνοιξης αρχικά του δεξιού κλάδου

Πίνακας 3.17: Πίνακας μέγιστων επιφανειακών μετακινήσεων στην περίπτωση της γεωμετρίας B, Ανάλυσης II και διάνοιξης αρχικά του αριστερού κλάδου

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

α - σεισμικός συντελεστής
 A - σεισμική επιτάχυνση εδάφους
 g - η επιτάχυνση της βαρύτητας
 γ_i - συντελεστής σπουδαιότητας του έργου
 q - συντελεστής σεισμικής συμπεριφοράς
 n - διορθωτικός συντελεστής απόσβεσης
 θ - συντελεστής θεμελίωσης
 T_1, T_2 - χαρακτηριστικές περιόδους του φάσματος
 A, B, Γ, Δ - κατηγορία του εδάφους
 φ, c - γωνία τριβής, συνοχή – κριτήριο Mohr-Coulomb
 E, ν - ελαστικές σταθερές
 γ - ειδικό βάρος βραχώμαζας
 τ - διατμητική αντοχή
 m_i - παράμετρος καμπυλότητας άρρηκτου πετρώματος – κριτήριο Hoek-Brown
 m, s - παράμετροι της βραχώμαζας – κριτήριο Hoek-Brown
 m_b, S, a - ως άνω – γενικευμένο κριτήριο Hoek-Brown
 GSI - Geological Strength Index - Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής
 D - disturbance factor - Βαθμός Διαταραχής Πετρώματος
 R - ακτίνα σήραγγας
 u_R - σύγκλιση τοιχώματος σήραγγας
 N_s - συντελεστής υπερφόρτισης
 p, p_i - πίεση, εσωτερική πίεση λόγω αποτόνωσης ή μέτρων υποστήριξης
 λ - συντελεστής αποτόνωσης
 K_o - συντελεστής οριζόντιας πίεσης
 d - διάμετρος σήραγγας
 σ_{ci} – μονοαξονική αντοχή σε θλίψη ακέραιου βράχου

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο σχεδιασμός και η κατασκευή σηράγγων συνεχίζει να αποτελεί πρόκληση για τους μηχανικούς παγκοσμίως. Ο Ελλαδικός χώρος όντας μια περιοχή εξόχως ορεινή με έντονο ανάγλυφο καθιστά την κατασκευή και το σχεδιασμό ακόμα πιο δύσκολο εγχείρημα.

Με αυτό το αντικείμενο ασχολείται η παρούσα εργασία η οποία εστιάζει το ενδιαφέρον της σε δίδυμη οδική σήραγγα, η οποία διατρέχει υφιστάμενη σταθεροποιημένη κατολισθήση και είναι σχετικά αβαθής. Η Βόρεια Πελοπόννησος που αποτελεί την ευρύτερη περιοχή μελέτης παρουσιάζει επιπλέον ιδιαίτερο ενδιαφέρον δεδομένου του έντονου γεωλογικού και γεωτεκτονικού καθεστώτος της. Η παρουσία ρηγμάτων και κατολισθήσεων με την πολύ ασθενή και παραμορφώσιμη φύση υλικών παρουσιάζει ειδικές προκλήσεις στην κατασκευή σηράγγων επειδή μπορεί να οδηγήσει σε αιφνίδιες και μη ελεγχόμενες αστοχίες σε περίπτωση που δεν ληφθούν τα αναγκαία μέτρα.

Προκειμένου να αξιολογήσουμε τη συμπεριφορά της βραχομάζας κατά τη διάνοιξη των κλάδων της σήραγγας διεξάγουμε γεωμετρική και παραμετρική ανάλυση με το λογισμικό *SOFISTIK* που βασίζεται στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Οι προκαλούμενες συγκλίσεις εκσκαφής θα μας οδηγήσουν στην εκτίμηση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης τα οποία είναι αναγκαία να ληφθούν και η μελέτη των επιφανειακών μετακινήσεων θα μας δείξει την επιρροή της εκσκαφής.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα προαναφερόμενα στοιχεία καταλήγουμε αιτιολογημένα στην διατύπωση συμπερασμάτων.

ABSTRACT

The design and construction of tunnels continues to constitute a challenge for engineers globally. Because of the steep mountainous terrain of Greece the design and construction of tunnels is even more difficult venture.

This paper is concerned with this matter focusing its interest in twin road tunnel, which crosses shear-zone and is relatively shallow. North Peloponnese which is the study area presents special interest because of its geological – geotectonic conditions. The presence of faults and shear zones with the very weak and highly deformable nature of materials is special challenge for tunneling because they can lead to sudden and uncontrolled collapses.

In order to evaluate rock mass behaviour I am conducting a geometrical and parametric analysis with software *SOFISTIK* which is based on the method of finite elements. The occurring convergences on the excavation boundary will lead to an estimation of support system which is necessary to be taken and the study of grounds displacements will show us the boundary's influence.

Taking into consideration all these elements we come to the conclusion.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για τις ελλείψεις και τα λάθη αυτής της διπλωματικής, ο αποκλειστικά υπεύθυνος φυσικά είναι ο γράφων, αλλά για το γεγονός ότι ολοκληρώθηκε όσο και για τα θετικά στοιχεία που έχει να προσφέρει, «υπεύθυνοι» είναι μια σειρά ανθρώπων χωρίς την βοήθεια των οποίων η πραγματοποίηση αυτής της εργασίας θα ήταν αδύνατη.

Θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον επιβλέποντα αυτής της διπλωματικής Καθηγητή κ. Μιχαήλ Σακελλαρίου. Η ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας έγινε πραγματικότητα χάρις στη δική του συνεργασία, καθοδήγηση και ενθάρρυνση. Οι συμβουλές και οι προτάσεις του καθώς και οι διορθώσεις των κειμένων κατά τη συγγραφή βελτίωσαν σημαντικά τη τελική μορφή αυτής της διπλωματικής. Σας ευχαριστώ για το συνεχές ενδιαφέρον σας για τη πρόοδο της δουλειάς μου και για την ικανότητα σας να ρίχνετε πάντα άπλετο φως σε οτιδήποτε φάνταζε απόλυτο σκοτάδι.

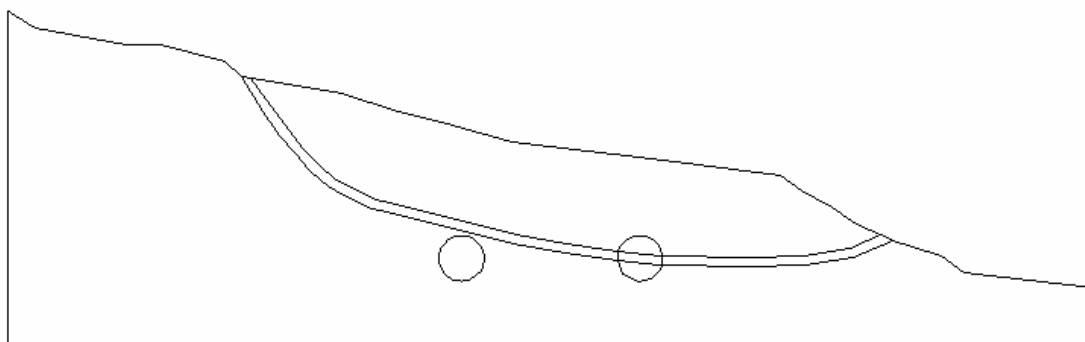
Θα ήθελα επίσης να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στο Πολιτικό Μηχανικό και υποψήφιο διδάκτορα του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου κ. Σπύρο Μασσίνα για την πολύτιμη βοήθεια του και τις ώρες που αφιέρωσε μαζί μου ώστε να με εξασκήσει στο λογισμικό το οποίο χρησιμοποίησα, καθώς και για το υλικό που μου εμπιστεύθηκε ώστε αυτή η ιδέα να πάρει σάρκα και οστά. Οι γνώσεις του, οι εμπειρίες του και οι συμβουλές που μου προσέφερε υπήρξαν καθοριστικές για την διεκπεραίωση της παρούσας εργασίας.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

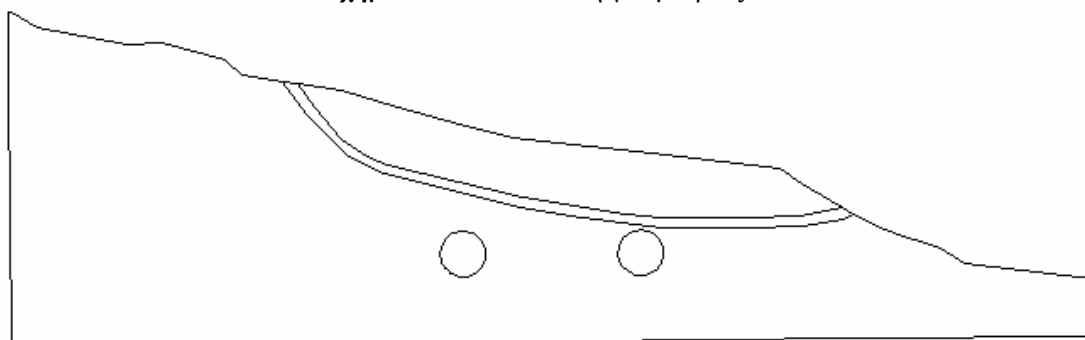
Σκοπός της παρούσας διπλωματικής, όπως άλλωστε αποτυπώνεται στο τίτλο της είναι η διερεύνηση πιθανής ενεργοποίησης υφιστάμενης σταθεροποιημένης κατολίσθησης λόγω διάνοιξης δίδυμων οδικών σηράγγων. Η διεξαγωγή της γεωμετρικής και παραμετρικής ανάλυσης πραγματοποιείται με το λογισμικό *SOFISTIK* το οποίο βασίζεται στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Με την ανάλυση που διεξάγεται θα διερευνήσουμε το παραμορφωσιακό πεδίο (καθεστώς) της βραχομάζας κατά τη διάνοιξη των δύο κλάδων της δίδυμης οδικής σήραγγας. Αυτό το οποίο μας ενδιαφέρει να αξιολογήσουμε κατά κύριο λόγο είναι οι προκαλούμενες συγκλίσεις κατά την εκσκαφή, και κατά δεύτερο οι επιφανειακές μετακινήσεις. Η διερεύνηση του παραμορφωσιακού πεδίου θα μας οδηγήσει σε εκτίμηση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης τα οποία θα χρειαστεί να ληφθούν για την αποφυγή πιθανής αστοχίας κατά τη διάρκεια διάνοιξης των κλάδων της σήραγγας και οι επιφανειακές μετακινήσεις θα μας δείξουν την επιρροή της εκσκαφής στο επιφανειακό σύνορο.

Πριν ξεκινήσω να αναφερθώ στη διαδικασία ανάλυσης οφείλω να ορίσω τη γεωμετρία του υπό μελέτη έργου καθώς και τις παραμέτρους που θα συμπεριληφθούν στη διεξαγωγή της παραμετρικής ανάλυσης.

Εξετάζω δύο πιθανές γεωμετρίες του υπό μελέτη έργου τη γεωμετρία A και τη γεωμετρία B, με αλλαγή της θέσης της ζώνης κατολίσθησης ως προς τους άξονες των υπό μελέτη σηράγγων που παραμένουν στην ίδια θέση. Πρόκειται δηλαδή για δύο διατομές σε διαφορετικές χιλιομετρικές θέσεις. Στη γεωμετρία A ο δεξιός κλάδος της σήραγγας καταλαμβάνεται κατά ένα τμήμα του από τη ζώνη αστοχίας με υπολειμματική αντοχή και από το κύριο σώμα της κατολίσθησης δηλαδή αποτελείται από προϊόν κατολίσθησης, ενώ ο αριστερός κλάδος βρίσκεται εξ' ολοκλήρου στη βραχομάζα. Αντιθέτως στη γεωμετρία B και οι δύο κλάδοι της σήραγγας βρίσκονται εξ' ολοκλήρου μέσα στη βραχομάζα.



Σχήμα 1.1: Απεικόνιση γεωμετρίας A



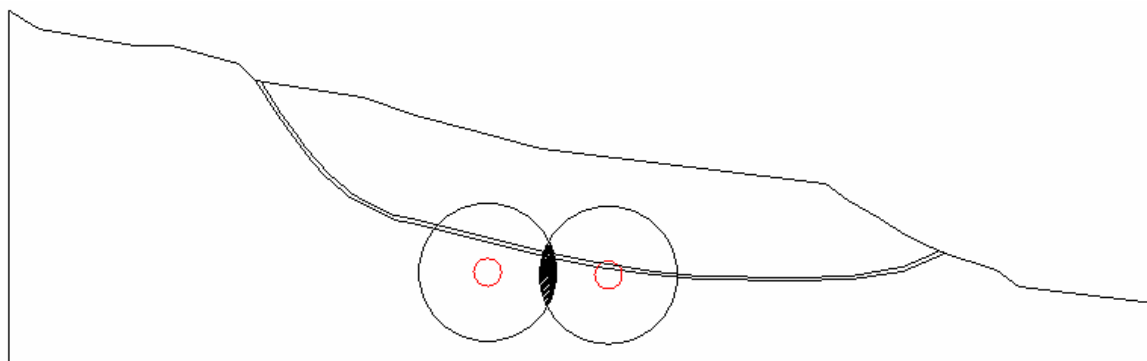
Σχήμα 1.2: Απεικόνιση γεωμετρίας B

Έχοντας πλέον ορίσει τη γεωμετρία του υπό μελέτη έργου πάνω στην οποία στηρίζεται η γεωμετρική ανάλυση ακολουθεί η παραμετρική ανάλυση. Η παραμετρική ανάλυση περιλαμβάνει τις ακόλουθες τέσσερις κατηγορίες:

- Μέγιστες και ελάχιστες τιμές γεωτεχνικών παραμέτρων αντοχής του εδάφους
- Διαφορετική κατασκευαστική ακολουθία-αλληλουχία εκσκαφής των δύο κλάδων της σήραγγας
- Εξέταση στοιχείων υποστήριξης διαφορετικής στιβαρότητας (stiffness)
- Μέγιστη και ελάχιστη τιμή της συνοχής c της ζώνης αστοχίας με υπολειμματική αντοχή

Δεδομένου του βάθους της υπό μελέτης οδικής σήραγγας το οποίο είναι της τάξης των $70m$, όντως αναφερόμαστε σε περίπτωση σχετικά αβαθούς σήραγγας, καθώς ο άξονας της σήραγγας βρίσκεται σε βάθος περίπου ίσο προς $10R$, με όριο επιρροής συνόρου το $25R$ (Bray,1987), όπου R είναι η ακτίνα των υπό μελέτη σηράγγων, η οποία θεωρείται ίση με $7m$.

Επιπλέον η περιοχή που βρίσκεται μεταξύ των δύο σηράγγων δέχεται επιρροή και από τους δύο κλάδους. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 1.3), σχεδιάζοντας δύο κύκλους για κάθε κλάδο της σήραγγας, με κέντρο τον άξονα κάθε κλάδου και ακτίνα $5R$ (όπου R η ακτίνα των υπό μελέτη οδικών σηράγγων) παρατηρώ ότι οι δύο κύκλοι τέμνονται. Αυτό σημαίνει ότι η περιοχή η οποία στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται με μαύρο φόντο δέχεται επιρροή και από τους δύο κλάδους δηλαδή υπάρχει αλληλοτομία των δύο ζωνών επιρροής.



Σχήμα 1.3: Απεικόνιση αλληλοτομίας των δύο ζωνών επιρροής

Τα όσο περιγράφηκαν παραπάνω αποτελούν το βασικό άξονα της παρούσας διπλωματικής πάνω στον οποίο θα βασιστώ και θα εξάγω αξιόλογα συμπεράσματα. Η παρούσα διπλωματική περιλαμβάνει τα εξής τέσσερα (4) κεφάλαια:

Το πρώτο κεφάλαιο περιλαμβάνει μια γενική αναφορά για τις σήραγγες στον Ελλαδικό χώρο σε συνδυασμό με το δύσκολο γεωτεκτονικό περιβάλλον, κάνοντας στη συνέχεια αναφορά στις γεωτεκτονικές-γεωμορφολογικές συνθήκες της ευρύτερης περιοχής μελέτης.

Το δεύτερο κεφάλαιο αποτελεί τον πυρήνα της παρούσας εργασίας διότι αναφέρεται στη διαδικασία της ανάλυσης που ακολούθησα και περιλαμβάνει δύο βασικούς άξονες τη γεωμετρική καθώς και την παραμετρική ανάλυση.

Το τρίτο κεφάλαιο συμπεριλαμβάνει την περιγραφή και τον σχολιασμό των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την ανάλυση που διεξήχθη. Το κεφάλαιο αυτό χωρίζεται σε δύο μέρη με το πρώτο να αναφέρεται στις προκαλούμενες συγκλίσεις εκσκαφής και το δεύτερο στις επιφανειακές μετακινήσεις.

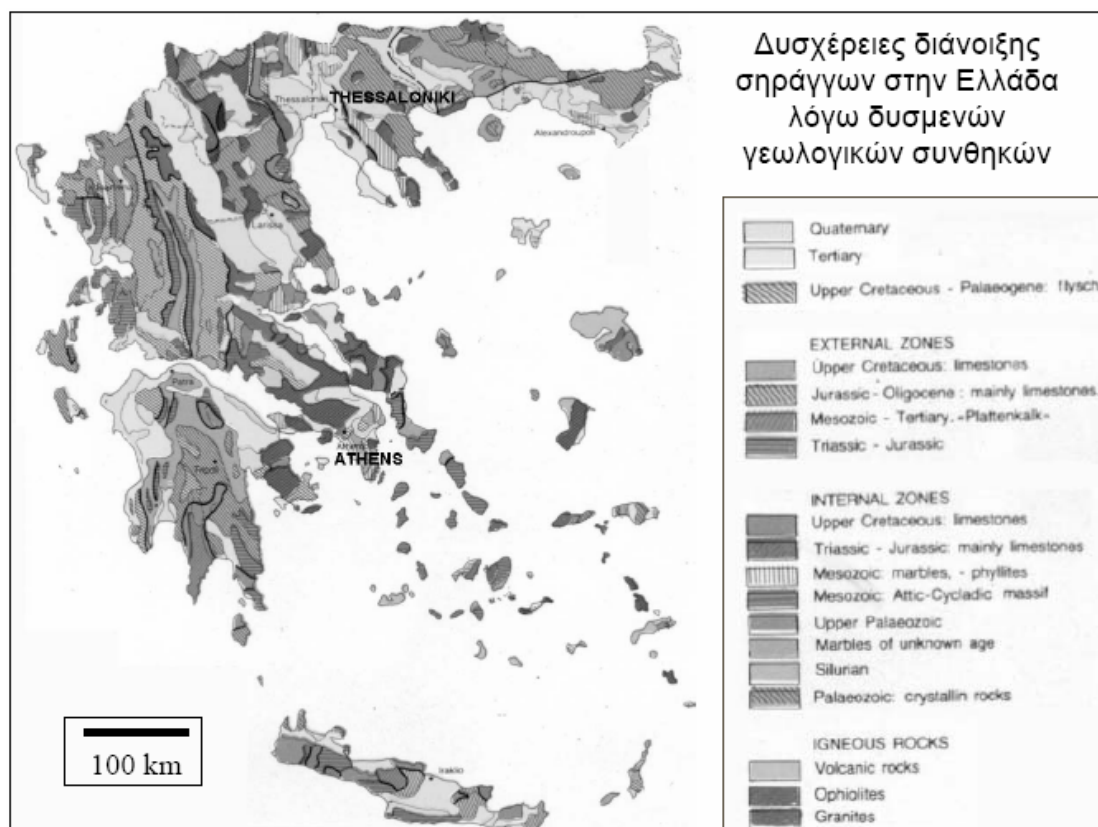
Το τέταρτο κεφάλαιο αποτελεί το κεφάλαιο των συμπερασμάτων όπου παραθέτω τα δικά μου συμπεράσματα όπως αυτά προκύπτουν από ολόκληρη τη διαδικασία ανάλυσης.

1.1 Γενικά Για Σήραγγες Στον Ελλαδικό χώρο

Τα υπόγεια έργα εμφανίστηκαν στον Ελλαδικό χώρο πολύ νωρίς. Ακόμη σώζεται το Ευπαλίνιο όρυγμα στη Σάμο, σημαντικό υδραυλικό έργο της Αρχαϊκής εποχής. Σημαντικές είναι οι υπόγειες μεταλλευτικές δραστηριότητες, τόσο της Κλασσικής (Λαύριο), όσο, και της Ελληνιστικής περιόδου (Παγγαίου). Υπόγεια συγκοινωνιακά έργα με την μορφή σιδηροδρομικών σιηράγγων, εμφανίζονται στην Ελλάδα κατά την περίοδο ανάπτυξης των ελληνικών σιδηροδρόμων (τέλη του προηγούμενου και αρχές του παρόντος αιώνας). Σε περιορισμένη έκταση υπόγεια έργα αναπτύσσονται πριν από τα μέσα του παρόντος αιώνας κατά την κατασκευή του μητροπολιτικού σιδηροδρόμου της Αθήνας και στις σχεδιαζόμενες επεκτάσεις των ελληνικών σιδηροδρόμων. Στις δεκαετίες των 60-80 σημειώνεται σημαντική ανάπτυξη των υπόγειων έργων με την σύγχρονη πλέον μηχανοποιημένη έννοια, στα υδραυλικά και κυρίως υδροηλεκτρικά έργα της Ελλάδας. Τη δεκαετία του 70, δειλά αρχίζουν να εμφανίζονται και οι πρώτες πολύ μικρές σε μήκος, οδικές σήραγγες, όπως αυτές του δρόμου προς το Σούνιο, της Φιλιππιάδας, των Δελφών και της Κρήτης, ενώ τη δεκαετία του 80 αρχίζουν οι κατασκευές των μεγάλων οδικών σιηράγγων, του Μετσόβου της Εγνατίας Οδού και του Αρτεμισίου στη Πελοπόννησο. Η δεκαετία του 90 και ειδικά η περίοδος των τελευταίων χρόνων της (δεκαετίας) θα μπορούσε να θεωρηθεί σημαντικότερη περίοδος ανάπτυξης των οδικών υπόγειων έργων με αιχμή του δόρατος της ανάπτυξης, το σύνολο των υπογείων έργων της Εγνατίας Οδού.

Η Ελλάδα ως γνωστόν είναι εξόχως ορεινή με έντονο ανάγλυφο. Η βελτίωση του οδικού και σιδηροδρομικού δικτύου της δεν μπορεί να επιτευχθεί χωρίς την κατασκευή πολυάριθμων σιηράγγων, η εξόρυξη των οποίων συνήθως δεν αποτελεί απλό εγχείρημα. Η πολύπλοκη γεωλογική και τεκτονική δομή του Ελλαδικού χώρου, η αντιμετώπιση ασταθών τασικών πεδίων, οι μεγάλες συγκλίσεις ιδιαίτερα σε τεκτονικώς διαταραχθείσες περιοχές και η κακή ποιότητα των εδαφών σε ορισμένες ζώνες καθιστούν την διάνοιξη σιηράγγων μια διαδικασία γεμάτη εκπλήξεις, οι περισσότερες από τις οποίες, θα έλεγε κανείς ότι από μια περιέργη συγκυρία εμφανίζονται σε απίθανες θέσεις και σε ακατάλληλο χρόνο (Οικονομόπουλος, 1989). Οι σήραγγες αποτελούν έργα που χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής από πλευρά μηχανικού, όμως άρρηκτα συνδεδεμένα όσο κανένα άλλο τεχνικό έργο με τις τεχνικογεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες του χώρου διέλευσης, από το στάδιο σχεδιασμού του έργου μέχρι και αυτό της λειτουργίας του. Κατά συνέπεια οι γεωλογικές συνθήκες μαζί με την τεκτονική αποτελούν πρωταρχικούς παράγοντες στο σχεδιασμό και την κατασκευή των σιηράγγων, αφού η γεωμάζα σε αντίθεση με άλλες κατασκευές επιφέρει τις διάφορες φορτίσεις στη σήραγγα ενώ παράλληλα προσφέρεται σαν το αρχικό μέσο υποστήριξης. Καθώς δηλαδή η εκσκαφή προχωρεί, η αντοχή των σχηματισμών συνήθως κρατά τη σήραγγα ανοικτή για το αναγκαίο διάστημα εγκατάστασης της υποστήριξης. Άρα, οι εδαφικοί ή βραχώδεις γεωλογικοί σχηματισμοί που περιβάλλουν μια σήραγγα αποτελούν κατά κάποιο τρόπο υλικό κατασκευής, του οποίου οι γεωμηχανικές ιδιότητες είναι σημαντικές. Αναγκαία είναι λοιπόν η διερεύνηση των τεχνικογεωλογικών και υδρογεωλογικών συνθηκών στην περιοχή κατασκευής, αφού βοηθά στον ορθολογικό σχεδιασμό του έργου για ασφάλεια και οικονομία.

Ιδιαίτερος στην Ελλάδα η ποικιλία των γεωλογικών καταστάσεων είναι μεγάλη με άμεση συνέπεια κάθε γεωτεκτονική ζώνη να έχει τις δικές της ιδιαιτερότητες, με τα δικά της ασθενή στρώματα και τις δικές της, ενδεχομένως, ασταθείς, χωροθετικά διατάξεις των πετρωμάτων. Η κατανόηση αυτής της εξαιρετικά πολύπλοκης κατάστασης αποτελεί την απαραίτητη βάση για την σωστή, αρχικώς, επιλογή των χαράξεων και στη συνέχεια τον ορθό σχεδιασμό. Το σχήμα που ακολουθεί απεικονίζει πράγματι το γεγονός ότι το μη φιλικό γεωλογικό υπόβαθρο του Ελλαδικού χώρου προκαλεί ιδιαίτερες δυσχέρειες στην διάνοιξη των σιηράγγων.



Σχήμα 1.4: Γεωτεκτονικός χάρτης του Ελλαδικού χώρου που απεικονίζει τις δυσχέρειες διάνοιξης σηράγγων λόγω δυσμενών γεωλογικών συνθηκών

Προκειμένου όμως να πραγματοποιηθεί η κατασκευή μιας σήραγγας δεν αρκεί μόνο λεπτομερής γεωλογική χαρτογράφηση και ερευνητικές γεωτρήσεις που θα οδηγήσουν στη σύνταξη της γεωλογικής τομής πρόβλεψης αλλά απαιτείται και η εξέταση όλων εκείνων των παραμέτρων που επηρεάζουν την τεχνική συμπεριφορά της βραχομάζας.

Απαιτείται συνεπώς μια ειδική ταξινόμηση βραχομάζας που να αντανακλά την συμπεριφορά της κατά τη διάνοιξη μιας σήραγγας. Χαρακτηριστικό είναι ότι για τον ίδιο γεωλογικό σχηματισμό, η βραχομάζα μπορεί να είναι διαφορετική παίρνοντας ακραίες τιμές από θέση σε θέση ακόμα και μέσα στην περιοχή του ίδιου τεχνικού έργου. Συνεπώς η εκτίμηση των μηχανικών παραμέτρων αντοχής και παραμορφωσιμότητας της βραχομάζας είναι ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα κατά το σχεδιασμό της διάνοιξης και υποστήριξης των υπόγειων έργων. Η κυριότερη δυσχέρεια στην επίλυση του προβλήματος είναι ότι οι εργαστηριακές δοκιμές γίνονται σε δείγματα αραγούς βράχου (χωρίς ασυνέχειες) και συνεπώς δεν είναι αντιπροσωπευτικές της μηχανικής συμπεριφοράς της βραχομάζας η οποία περιλαμβάνει και ασυνέχειες. Σημειώνεται ότι για την εκτέλεση των εργαστηριακών δοκιμών συνήθως επιλέγονται τα υγιέστερα δείγματα βράχου (επειδή σε αυτά είναι ευχερέστερη η μόρφωση δοκιμίων), πράγμα που επιτείνει τη μη αντιπροσωπευτικότητα των αποτελεσμάτων των εργαστηριακών δοκιμών. Τέλος, ακόμη και οι επιτόπου δοκιμές γίνονται σε περιορισμένου όγκου δείγματα και συνεπώς δεν είναι αντιπροσωπευτικές των επιτόπου συνθηκών και δεν παρέχουν αντιπροσωπευτικές τιμές των μηχανικών παραμέτρων της βραχομάζας. Ως εκ τούτου οι μηχανικές παράμετροι της βραχομάζας συνήθως εκτιμώνται με έμμεσο τρόπο επί τη βάσει εμπειρικών συσχετίσεων με δείκτες ποιότητας της βραχομάζας που προκύπτουν από τις μεθόδους ταξινόμησης της βραχομάζας. Για να προκύπτει όμως αξιόλογο αποτέλεσμα πρέπει να επιλέγεται το κατάλληλο κάθε φορά σύστημα, η περιγραφή της βραχομάζας να γίνεται με μεγάλη προσοχή, και να μην χρησιμοποιούνται τα συστήματα αυτά σαν βιβλίο συνταγών αλλά πάντοτε να παρεμβαίνει η γεωλογική και γεωτεχνική κρίση του μελετητή (Μαρίνος, 1999).

Το τασικό πεδίο που αναπτύσσεται στο εσωτερικό της βραχομάζας εξαρτάται από το βάρος των υπερκειμένων στρωμάτων και την γεωλογική ιστορία της βραχομάζας. Αυτό το τασικό πεδίο διαταράσσεται όταν πραγματοποιείται μία υπόγεια εκσκαφή και σε αρκετές περιπτώσεις, οι κατ' αυτόν τον τρόπο προκαλούμενες τάσεις, είναι τέτοιου μεγέθους που ξεπερνούν την αντοχή της βραχομάζας. Σε αυτές τις περιπτώσεις εκδηλώνονται αστοχίες υπό μορφή μεγάλων παραμορφώσεων, πτώσης της οροφής ή ακόμα και θραύσης των τοιχωμάτων των εκσκαφών.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω σημαντική τομή στην ανάπτυξη των οδικών υπόγειων έργων αποτέλεσε και αποτελεί η Εγνατία Οδός η οποία διατρέχει ολόκληρη την γεωλογική ιστορία της Ελλάδος και συνεπώς μια μεγάλη ποικιλία γεωλογικών σχηματισμών που επιβάλλουν διαφορετικούς κατά περίπτωση σχεδιασμούς. Οι εμπειρίες λοιπόν που έχουν αποκτηθεί από την κατασκευή των σηράγγων της Εγνατίας Οδού προσφέρουν ιδανικό υλικό για την έρευνα της συμπεριφοράς του γεωυλικού, την επίδραση της στις μεθόδους σχεδιασμού και κατασκευής και στη διαμόρφωση του τελικού κόστους των σηράγγων. Με σκοπό την αξιοποίηση του υλικού αυτού δημιουργήθηκε μια κεντρική τράπεζα δεδομένων, η οποία ονομάστηκε «Σύστημα Ανάλυσης Πληροφοριών Σηράγγων» και αναφέρεται ως TIAS (Tunnel Information Analysis System). Σκοπός της τράπεζας είναι η αξιοποίηση των πληροφοριών και εμπειριών που αποκτήθηκαν κατά την κατασκευή σηράγγων της Εγνατίας Οδού, έτσι ώστε να μπορούν να καταστούν χρήσιμες τόσο στη διαχείριση των κατασκευασθέντων έργων, όσο και στην άντληση συγκεκριμένων και επεξεργασμένων πληροφοριών χρήσιμων στη μελέτη και κατασκευή νέων έργων. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό η εμπειρία και τα στοιχεία που έχουν αποκτηθεί να συγκεντρωθούν, ώστε να αποτελέσουν πηγή για την εξαγωγή νέων πληροφοριών και συμπερασμάτων.

Με αυτό τον τρόπο καθίσταται σαφές ότι κατά το σχεδιασμό και μελέτη των υπόγειων αυτών έργων θα πρέπει όσο το δυνατόν ακριβέστερα και ρεαλιστικότερα να προσδιορίζουμε τα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών που περιβάλλουν το έργο καθώς και να στοχεύουμε στην καλύτερη κατανόηση και αξιολόγηση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών κάθε περιοχής. Ακολουθώντας τη συγκεκριμένη συλλογιστική θα κατανοήσουμε τις ιδιαιτερότητες κάθε έργου, καταλήγοντας στον ορθότερο σχεδιασμό που τελικά θα οδηγήσει σε ένα ασφαλές και χρήσιμο για την κοινωνία έργο.

Συνεπώς οι στόχοι της σχεδίασης μιας υπόγειας εκσκαφής είναι :

1. Ο έλεγχος των παραμορφώσεων
 - A. Του συνόρου εκσκαφής
 - B. Της επιφάνειας του εδάφους
2. Η εξασφάλιση ενός συστήματος υποστήριξης αρκετά ισχυρού ώστε να παρέχει τις απαιτούμενες δυνάμεις στήριξης (αντιδράσεις), αλλά και αρκούντως παραμορφώσιμου, έτσι ώστε οι δυνάμεις στήριξης (αντιδράσεις) να μην προκαλούν αστοχία της υποστήριξης.
3. Η πρόληψη ανάπτυξης μεγάλου μεγέθους ενέργειας παραμορφώσεων, η οποία σε περίπτωση απότομης έκλυσης θα μπορούσε να οδηγήσει σε αστοχία.
4. Στην περίπτωση σηράγγων υπό πίεση να διαθέτουν αδιαπέρατη μόνωση ώστε να αποκλείουν την διαφυγή του νερού, που θα μπορούσε να οδηγήσει σε αστάθεια του έργου.

1.2 Γεωλογικές – Γεωμορφολογικές Συνθήκες Στην Ευρύτερη Περιοχή Μελέτης

1.2.1 Γενικά

Η περιοχή μελέτης τοποθετείται στη παράκτια περιοχή της Κορινθιακής τεκτονικής τάφρου. Η Κορινθιακή τεκτονική τάφρος έχει μήκος 100km, πλάτος βύθισης 40km και χωρίζει τη προ-Νεογενή λεκάνη της Ηπειρωτικής Ελλάδας και της Πελοποννήσου. Σχηματίστηκε στο ανώτερο Πλειόκαινο κατά τη διάρκεια ενός ραγδαίου εφελκυσμού (εξάπλωσης) του φλοιού με διεύθυνση B-N. Το μοτίβο των κανονικών ρηγμάτων περιλαμβάνει δύο κυρίαρχες τάσεις:

- Δ-B-Δ διαμήκη κανονικά ρήγματα
- B-B-A εγκάρσια ρήγματα που προκαλούν λοξές (διαγώνιες) μετακινήσεις

Η ιζηματογενής επικάλυψη συντίθεται από λιμναίες, λιμνοθαλάσσιες, παράκτιες και ποτάμιες αποθέσεις πάχους άνω των 600m που σχηματίστηκαν μεταξύ του ύστερου Πλειόκαινου και του νεωτέρου Πλειστόκαινου. Είναι ασύμφωνα επικαλυμμένη με ριπιδιακά αλλούβια και δελταϊκές ριπιδιακές αποθέσεις μέγιστου πάχους 500m και επιπλέον με θαλάσσιες αναβαθμίδες πάχους άνω των 30m.

Η Κορινθιακή τεκτονική τάφρος περιλαμβάνει δύο τεμάχη με τάσεις Δ-B-Δ διεύθυνσης:

- Το Βόρειο το οποίο σήμερα καταλαμβάνεται από τον Κορινθιακό κόλπο και έχει παρουσιάσει την μεγαλύτερη τοπική επέκταση
- Το Νότιο το οποίο καταλαμβάνει την παράκτια περιοχή της Βόρειας Πελοποννήσου και έχει ανυψωθεί πάνω από 1000m από την σημερινή στάθμη της θάλασσας.

Τα δύο τεμάχη χωρίζονται από ένα πλήθος κύριων βυθιζόμενων ρηγμάτων με διεύθυνση προς Βορρά τα οποία διατρέχουν τις ακτές της Πελοποννήσου και είναι σεισμικώς ενεργά.

1.2.2 Γεωμορφολογία

Η γεωμορφολογική εικόνα της περιοχής είναι αποτέλεσμα της λιθολογικής σύστασης, της τεκτονικής και της συνδυασμένης δράσης των διαβρωτικών και αποσαθρωτικών διεργασιών. Ειδικότερα, το σημερινό ανάγλυφο διαμόρφωσαν οι μεταλπικές τεκτονικές κινήσεις, καθώς και η εξέλιξη των διάφορων μορφολογικών κύκλων που συνεχίζονται έως σήμερα.

Οι ορεινοί όγκοι του Παναχαϊκού, Σκόλι και Ερύμανθου, που περιβάλλουν τη περιοχή αυτή από Ανατολικά και Νότια, έχουν γενική διεύθυνση ορεογραφικών αξόνων ΒΒΔ-ΝΝΑ/κή, δημιουργήθηκαν κατά το στάδιο των αλπικών πτυχώσεων και δέχτηκαν επίσης την επίδραση μεταορογενετικής ανύψωσης από το Πλειόκαινο έως σήμερα. Ο τεκτονισμός είναι σημαντικός σχηματίζοντας ένα πολύ τραχύ και πολυσχιδές ανάγλυφο με αναπτυγμένο υδρογραφικό δίκτυο.

Εξετάζοντας τις υδρολογικές συνθήκες η υπό μελέτη περιοχή χαρακτηρίζεται γενικότερα από σημαντικές ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις οι οποίες έχουν σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία ρεμάτων με αξιόλογη απορροή. Ειδικότερα, ρέματα σημαντικής ή και ασήμαντης επιφανειακής εκροής αναπτύσσονται καθ' όλο το έτος, κάτι το οποίο μαρτυρά το γεγονός ότι τροφοδοτούνται (πηγάζουν) από πηγές της ορεινής περιοχής καθώς και από την υπόγεια αποστράγγιση του υδροφόρου ορίζοντα. Κατά τη διάρκεια της καλοκαιρινής

περιόδου η υδατική εκροή είναι λιγότερη εξαιτίας της μείωσης των βροχοπτώσεων, αλλά και της εκμετάλλευσης του νερού μέσω αρδευτικών καναλιών για τις καλλιέργειες της περιοχής.

Επιπλέον η επιφανειακή απορροή είναι σημαντική εξαιτίας των αδιαπέραστων μαργών οι οποίες καλύπτουν τη λεκάνη απορροής της περιοχής. Θεωρείται ότι τα χαμηλότερα τμήματα των ρεμάτων προσωρινά πλημμυρίζουν σε περίπτωση δυνατής και πολύωρης βροχόπτωσης.

1.2.3 Στρωματογραφία

Οι λιθολογικοί σχηματισμοί που συναντώνται στην ευρύτερη περιοχή διάνοιξης της σήραγγας σύμφωνα με επιτόπου γεωλογικές έρευνες και την υπάρχουσα πληροφορία διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

Τεταρτογενής περίοδος

- Ελούβιος σχηματισμός, αποτελούμενος από λεπτόκοκκα υλικά αργίλου-ίλους-άμμου και χάλικες διαφόρων μεγεθών τα οποία υπέρκεινται στο πάνω μέρος του βραχώδους υποστρώματος εξαιτίας της αποσύνθεσης τους.
- Θαλάσσια αναβαθμίδα αποτελούμενη από λεπτόκοκκες, δυνατά συγκολλημένες κροκαλοπαγείς αποθέσεις οι οποίες συντίθενται από στρογγυλεμένους και καλά ταξινομημένους ασβεστολιθικούς χάλικες και ψαμμίτη ασβεστολιθικής σύστασης. Επιπλέον έχουν παρατηρηθεί ενστρώσεις συγκολλημένης απολιθωμένης άμμου.
- Τμήματα ποτάμιων αποθέσεων αποτελούμενες από εναλλαγές κοκκινωπού ιλυοαμμόδους υλικού και κροκαλοπαγείς λατύπες σχηματοποιημένες από τη κοίτη του ποταμού. Το επάνω μέρος του σχηματισμού αποτελείται από εδαφικό υλικό εξαιτίας των διαδικασιών διάβρωσης.
- Δελταϊκές ριπιδιακές αποθέσεις αποτελούμενες από συνεκτικά, μέτρια ως πολύ στρωματοποιημένα θραυσματοπαγή ή κύριας σύστασης κροκαλοπαγή τα οποία αποτελούνται από φτωχά ταξινομημένες και αποστρογγυλεμένες λατύπες και βότσαλα ασβεστολιθικής σύστασης.

Νεώτερο Πλειστόκαινο

- Αποθέσεις παράκτιων πεδιάδων αποτελούμενες από καστανοκίτρινες προς γκρίζες μάργες με ενστρώσεις ασβεστολιθικών βοτσαλωτών κροκαλοπαγών. Κοκκινωπά εδαφικά υλικά έχουν επίσης παρατηρηθεί σε διάφορα βάθη.

Προ-Νεογενές

- Ασβεστόλιθοι με μέση έως λεπτή στρωματοποίηση έντονα κατακερματισμένοι με μη συχνές λεπτές ενστρώσεις ερυθρού σχιστόλιθου και κατά μέρους με κερατόλιθους. Αυτός ο σχηματισμός είναι μέρος της γεωτεκτονικής ενότητας της Πίνδου. Οι ασβεστόλιθοι παρουσιάζονται έντονα πτυχωμένοι και κατακερματισμένοι αποτελώντας το Αλπικό υπόβαθρο της περιοχής.

Το γεωλογικό μοντέλο της υπό μελέτη περιοχής συνοψίζεται στα εξής τρία στάδια εξέλιξης:

- Ύστερο Πλειόκαινο - Νεαρό Πλειστόκαινο: Περιβάλλον παράκτιων αποθέσεων προκάλεσε την ιζηματοποίηση των μαργών με ενστρώσεις από κροκαλοπαγή

- Μέσο Πλειστόκαινο: Εδαφικά υλικά (βότσαλα, λατύπες) εισήλθαν στη λεκάνη και δελταϊκές ριπιδιακές αποθέσεις συσσωρεύτηκαν.
- Ύστερο Πλειστόκαινο: Κύρια τεκτονική δραστηριότητα της σημερινής κύριας παράκτιας ρηξιγενούς ζώνης προκάλεσε την ανύψωση της περιοχής μελέτης πάνω από τη στάθμη της θάλασσας. Ταυτόχρονα η δραστηριότητα των εγκάρσιων ρηγμάτων δημιούργησε μορφολογία αναβαθμίδας και η διαφοροποίηση στις αποθέσεις από το δυτικό κομμάτι. Η συνεχής πτώσης της θάλασσας ή η ανύψωση της υπό μελέτη περιοχής δημιουργεί τη σημερινή ακτογραμμή του Κορινθιακού κόλπου.

Από τους προαναφερόμενους λιθολογικούς σχηματισμούς, η γεωλογική ενότητα η οποία θα συναντηθεί κατά την διάρκεια της υπόγειας εκσκαφής είναι αποθέσεις παράκτιων πεδιάδων αποτελούμενες από καστανοκίτρινες έως γκρίζες μάργες με ενστρώσεις από ασβεστολιθικά κροκαλοπαγή και ενστρώσεις άμμου πυκνής απόθεσης ή χαλικώδους άμμου με πάχος από 30cm έως 3m το μέγιστο. Οι μάργες εμφανίζονται συνήθως συνεκτικές ως σκληρές παρουσιάζοντας τη γεωτεχνική συμπεριφορά μαλακού βράχου.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της επιτόπου γεωλογικής έρευνας, οι μάργες εμφανίζονται σε οριζόντιες ή περίπου οριζόντιες στρώσεις (στρώματα που βυθίζονται με μέγιστη κλίση 30° με διεύθυνση N-N-A). Η ποικιλία στις κλίσεις δεν είναι πάντα εξαιτίας της ύπαρξης ρήγματος αλλά εξαιτίας της εσωτερικής ιζηματογένεσης η οποία αντανακλάται στις διάφορες ετερογενείς λιθολογικές αποθέσεις.

Θεωρείται ότι η στρωματοποιημένη επιφάνεια των μαργών δεν έχει σημαντική επιρροή στη φυσική σταθερότητα της πλαγιάς από τη στιγμή που σε όλες τις περιπτώσεις το στρωσιγενές κεκλιμένο επίπεδο που δημιουργείται παρουσιάζει ευνοϊκό προσανατολισμό σε σχέση με τη φυσική σταθερότητα της πλαγιάς.

Επιπλέον τμήματα ποτάμιων αποθέσεων υπέρκεινται του σχηματισμού των μαργών, όπως επίσης και λεπτοστρωματώδεις ασβεστόλιθοι του Αλπικού υπόβαθρου. Παρόλο τη πτυχωμένη τους δομή οι ασβεστόλιθοι παρουσιάζουν παρατάξεις με διεύθυνση A-Δ οι οποίες βυθίζονται προς N-NΔ με γωνία από 20° ως 60°. Επιπλέον στην ίδια περιοχή εξαιτίας της απότομης μορφολογίας και των τεκτονικά ελεγχόμενων ορίων μεταξύ Νεογενούς και Αλπικού υπόβαθρου παρουσιάζονται φαινόμενα αστάθειας.

Οι υγιείς μάργες οι οποίες βρέθηκαν στην επιφάνεια του εδάφους φαίνονται εξαλλοιομένες με δεικτικότητα προς διάβρωση. Στην επιφάνεια του εδάφους σε περίπτωση χαμηλής βλάστησης παρουσιάζονται φαινόμενα αυλακώσεων που οφείλονται στη χαμηλή διαβρωτική τους αντίσταση. Στην επιφάνεια είναι πάντα υπό μορφή χαλαρού και αποσαθρωμένου υλικού το οποίο ίσως προκαλέσει κατά μέρους επιφανειακές αστάθειες αλλά χωρίς να επηρεάζει την υποκείμενη υγιή βραχομάζα που εκτείνεται στο βάθος.

1.2.4 Τεκτονική

Η Βόρεια Πελοπόννησος μετά το τελευταίο στάδιο της αλπικής ορογένεσης, και τις συμπιεστικές τάσεις που επικράτησαν κατά τη διάρκεια αυτού, βρίσκεται σε μια συνεχή γεωδυναμική και νεοτεκτονική εξέλιξη από το ανώτερο Πλειόκαινο μέχρι σήμερα, που χαρακτηρίζεται από γενική διαστολή λόγω της διαρκούς μετανάστευσης της, επέκτασης του Αιγαίου τόξου προς Δυτικά.

Η διαπιστωμένη από πολλούς ερευνητές κατάσταση των τάσεων που επικρατεί στον ευρύτερο χώρο, είναι (Doutsos et al., 1988):

1. Στη ζώνη βύθισης της μεσογειακής λιθόσφαιρας όπου σχηματίζεται το ορογενετικό μέτωπο επικρατούν τάσεις συμπίεσης

2. Ανατολικά, πίσω από το ορογενετικό μέτωπο, επικρατούν εφελκυστικές τάσεις με αποτέλεσμα το σχηματισμό νεοτεκτονικών λεκανών

Αυτό το καθεστώς των τάσεων μεταναστεύει προς τα Δυτικά από την ηπειρωτική Ελλάδα προς τα Ιόνια νησιά, από το Πλειόκαινο (Doutsos et al., 1987).

1.2.5 Σεισμικότητα

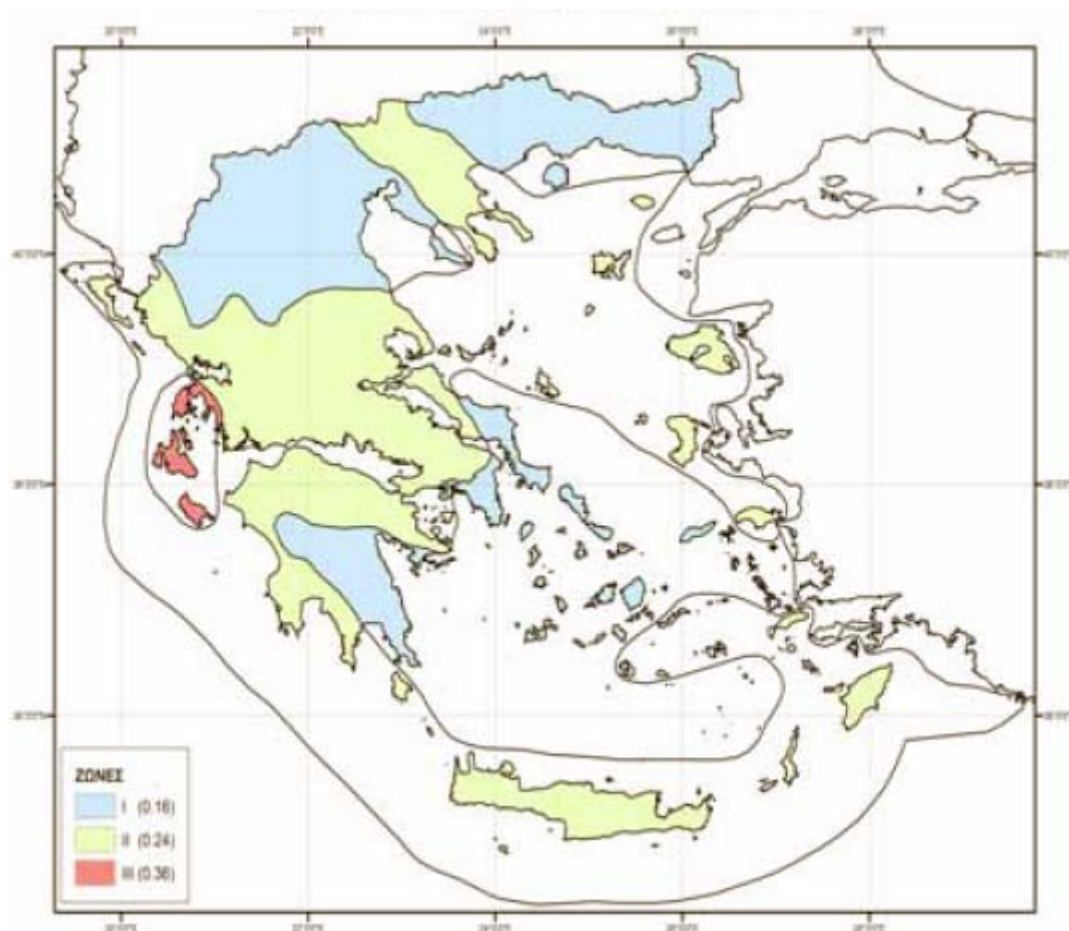
Η περιοχή έρευνας ανήκει στο ευρύτερο τμήμα της Δυτικής Ελλάδας που έχει χαρακτηριστεί από πολλούς ερευνητές ως μία πολύπλοκη περιοχή τόσο από γεωλογικής όσο και από γεωτεκτονικής άποψης. Η δυναμική φόρτιση που επιφέρουν οι συχνοί, ως επί το πλείστον αβαθείς και συνήθως μεγάλου μεγέθους σεισμοί στους διάφορους γεωλογικούς σχηματισμούς, εκτός από τα άμεσα αποτελέσματα που προκαλούν, προκαλούν συχνά και την εκδήλωση δευτερογενών φαινομένων (κατολισθήσεις, καταπτώσεις, ρευστοποιήσεις κτλ) που ενδιαφέρουν από γεωτεχνικής πλευράς καθώς πλήττουν διάφορα τεχνικά έργα.

Σύμφωνα λοιπόν με το νέο χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας και τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (ΕΑΚ, 2003) η υπό μελέτη περιοχή κατατάσσεται στη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας II, δηλαδή στις μέτρια ως ισχυρά σεισμόπληκτες περιοχές. Ο σεισμικός συντελεστής a ισούται με:

$$a = 0.24$$

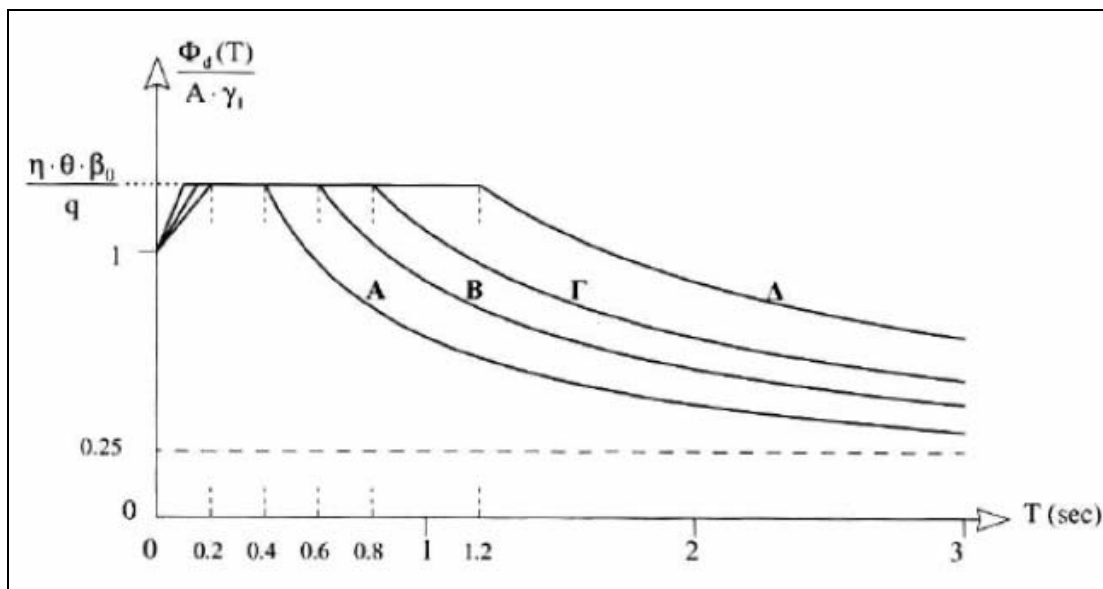
Έτσι η σεισμική επιτάχυνση εδάφους A ισούται με:

$$A = a \cdot g = 0.24 \cdot g$$



Σχήμα 1.5: Οι τρεις (I, II, III) κατηγορίες ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας στις οποίες χωρίσθηκε ο Ελληνικός χώρος, σύμφωνα με την τελευταία τροποποίηση (ΕΑΚ, 2003)

Επιπλέον σύμφωνα με τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (ΕΑΚ, 2003) οι σεισμικές κινήσεις καθορίζονται με φάσματα επιταχύνσεων. Το Σχήμα 1.6 απεικονίζει τα φάσματα σχεδιασμού όπως τα ορίζει ο Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός (ΕΑΚ, 2003). Το φάσμα τροποποιείται σύμφωνα με τις πέντε κατηγορίες διάκρισης των εδαφών (A, B, Γ, Δ, X) ανάλογα με την καταλληλότητα τους για τη θεμελίωση τεχνικών έργων.



Σχήμα 1.6: Φάσματα σχεδιασμού σύμφωνα με τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (ΕΑΚ, 2003)

όπου:

A: η σεισμική επιτάχυνση του εδάφους

g: η επιτάχυνση της βαρύτητας

γ_i : ο συντελεστής σπουδαιότητας του έργου

q: ο συντελεστής σεισμικής συμπεριφοράς

n: ο διορθωτικός συντελεστής απόσβεσης

θ : ο συντελεστής θεμελίωσης

T_1, T_2 : οι χαρακτηριστικές περίοδοι του φάσματος

A, B, Γ, Δ: η κατηγορία του εδάφους

2 ΑΝΑΛΥΣΗ

Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό *SOFISTIK* το οποίο βασίζεται στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Η χρησιμοποιούμενη μέθοδος ανάλυσης της διάνοιξης και άμεσης υποστήριξης των σηράγγων είναι η διδιάστατη ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία στο επίπεδο της διατομής της σήραγγας.

Θέλοντας ουσιαστικά να προσομοιώσουμε τις φάσεις εκσκαφής που θα γίνουν στη πραγματικότητα, δηλαδή τη Νέα Αυστριακή Μέθοδο Διάνοιξης Σηράγγων (NATM), προσομοιώνουμε τις διαδοχικές φάσεις (στάδια) εκσκαφής και υποστήριξης της σήραγγας καθώς και τη χρονική υστέρηση στην τοποθέτηση των μέτρων υποστήριξης μετά την εκσκαφή κάθε φάσης. Η βραχομάζα αλλά και τα στοιχεία της άμεσης υποστήριξης προσομοιώνονται ως ελαστοπλαστικά υλικά με κάποια ελαστικά χαρακτηριστικά και ένα κριτήριο αστοχίας που καθορίζει το πέρας της ελαστικής τους συμπεριφοράς.

Από την ανάλυση που πραγματοποιείται υπολογίζονται:

1. Οι συγκλίσεις εκσκαφής
2. Οι επιφανειακές μετακινήσεις

Αξίζει να σημειωθεί ότι όταν αναφερόμαστε στις συγκλίσεις εκσκαφής εννοούμε τη συνισταμένη αυτών τόσο δηλαδή της κατακόρυφης όσο και της οριζόντιας συνιστώσας. Με την ίδια ακριβώς λογική αναφερόμαστε στις επιφανειακές μετακινήσεις καθώς η συνισταμένη τους εν γένει έχει κατακόρυφη και οριζόντια συνιστώσα μέσα στο κατακόρυφο επίπεδο που είναι κάθετο στους άξονες των υπό μελέτη σηράγγων. Αυτό όμως που κατά κύριο λόγο μας ενδιαφέρει και θα ληφθεί σε πολύ μεγάλο βαθμό υπόψη στην παρούσα εργασία είναι οι προκαλούμενες συγκλίσεις εκσκαφής μιας και το αντικείμενο είναι υπόγειο έργο. Με βάση αυτές άλλωστε θα γίνει εκτίμηση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης. Σε καμία περίπτωση δεν επιθυμούμε να παραλείψουμε ούτε να υποτιμήσουμε τη σημασία των επιφανειακών μετακινήσεων που προκαλούνται απλά στην περίπτωση της παρούσας εργασίας είναι δευτερεύουσας σημασίας. Το επιχείρημα αυτό ενισχύεται περισσότερο λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι η διάνοιξη της δίδυμης οδικής σήραγγας δε λαμβάνει χώρα σε αστικό περιβάλλον συνεπώς δεν υπάρχει κίνδυνος ζημιών σε κτήρια ή ακόμα και σε δίκτυα κοινής ωφέλειας.

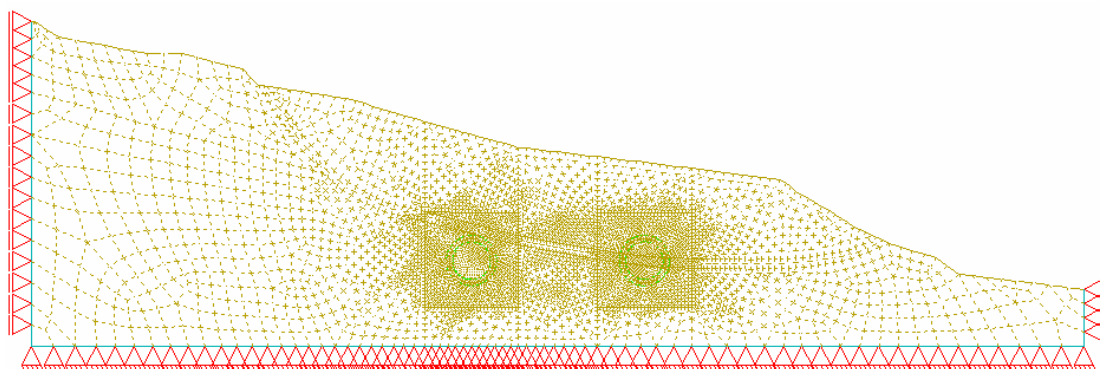
Σκοπός της ανάλυσης είναι η διερεύνηση του παραμορφωσιακού πεδίου (καθεστώτος) της βραχομάζας κατά τη διάνοιξη των δύο κλάδων της μελέτη σήραγγας. Η κλίμακα των μετακινήσεων που θα παρουσιάσω θα βασίζεται στα εξής τρία επίπεδα:

- Μικρή διακινδύνευση ενεργοποίησης της κατολίσθησης με μετακινήσεις της βραχομάζας 3-5cm
- Μεσαία διακινδύνευση ενεργοποίησης της κατολίσθησης με μετακινήσεις της βραχομάζας 5-10cm
- Υψηλή διακινδύνευση ενεργοποίησης της κατολίσθησης με μετακινήσεις της βραχομάζας >10cm

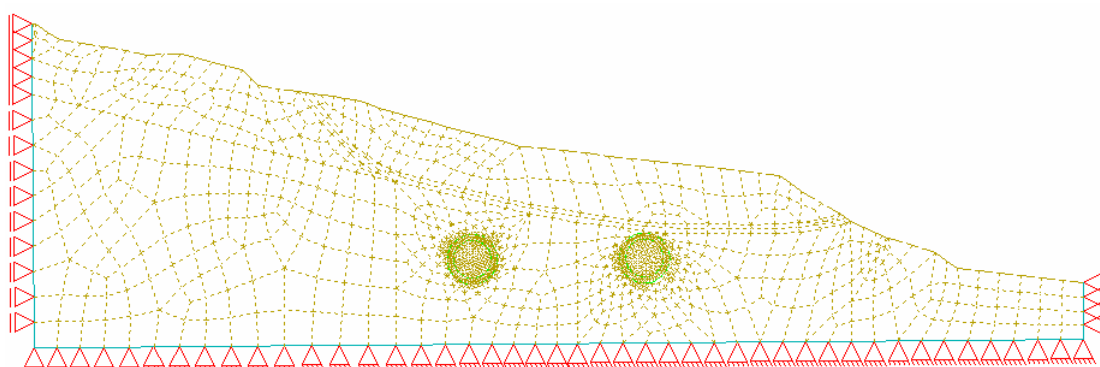
Ο παραπάνω διαχωρισμός σε τρία επίπεδα ιεράρχησης της διακινδύνευσης ενεργοποίησης της κατολίσθησης γίνεται με βάση τη διεθνή εμπειρία εφόσον δεν υπάρχει κάποια συγκεκριμένη θεωρία η οποία να μας δίνει συγκεκριμένα όρια τα οποία δύναται να ενεργοποιήσουν μια οποιαδήποτε κατολίσθηση. Σαν ελάχιστο όριο χρησιμοποιούμε τα 3cm παραμένουσας παραμόρφωσης, η οποία σε γαιώδη πρανή δε δημιουργεί κάποιο

πρόβλημα στη λειτουργικότητα του έργου. Επιπλέον τα 5cm μετακίνησης της βραχομάζας είναι συμβατά βιβλιογραφικά για παραμένουσες παραμορφώσεις μετά από σεισμό.

Η διαδικασία της ανάλυσης με το συγκεκριμένο λογισμικό χωρίζεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο κατασκευάστηκε ο κάνναβος ή πλέγμα (αρχείο τύπου *GEN*), για τις δύο εναλλακτικές γεωμετρίες που εξετάζω (γεωμετρία A & γεωμετρία B). Τα ακόλουθα σχήματα (Σχήμα 2.1 & Σχήμα 2.2) απεικονίζουν τους καννάβους κάθε γεωμετρίας.



Σχήμα 2.1: Κάνναβος γεωμετρίας A



Σχήμα 2.2: Κάνναβος γεωμετρίας B

Από τα δύο παραπάνω σχήματα παρατηρούμε ότι γύρω από τους δύο κλάδους της σήραγγας έχουμε μεγαλύτερη διακριτοποίηση, δηλαδή πυκνότερο κάνναβο. Πράγματι η περιοχή γύρω από τους δύο κλάδους της σήραγγας είναι εκείνη η οποία θα διαταραχθεί περισσότερο διότι θα παρέμβουμε με τη διάνοιξη αυτών, κάτι το οποίο θα προκαλέσει έντονη μεταβολή του τασικού πεδίου. Ο ρυθμός μεταβολής των τάσεων περιμετρικά των δύο κλάδων της σήραγγας θα είναι πολύ μεγαλύτερος σε σχέση με κάποια άλλη περιοχή. Ειδικότερα, στην περίπτωση της γεωμετρίας A όπου υπάρχει επιπλέον τομή του δεξιού κλάδου της σήραγγας με τη ζώνη αστοχίας με υπολειμματική αντοχή και το κύριο σώμα της κατολίσθησης η πυκνότητα του καννάβου είναι ακόμα πιο έντονη δεδομένου της διαταραχής που θα προκληθεί από την εκσκαφή μέσα σε ασθενές υλικό. Αντιθέτως στην περίπτωση της γεωμετρίας B ο κάνναβος δεν είναι τόσο πυκνός δεδομένου ότι και οι δύο κλάδοι της σήραγγας βρίσκονται μέσα στη βραχομάζα συνεπώς δεν λαμβάνει χώρα τομή της ζώνης αστοχίας με υπολειμματική αντοχή με κάποιο κλάδο της σήραγγας. Αξίζει να σημειωθεί ότι εμείς έχουμε επιλέξει την πυκνότερη δομή του καννάβου στην περίπτωση της γεωμετρίας A δεδομένης της ιδιαιτερότητας της συγκεκριμένης γεωμετρίας, δεν προέκυψε μόνο του από το πρόγραμμα.

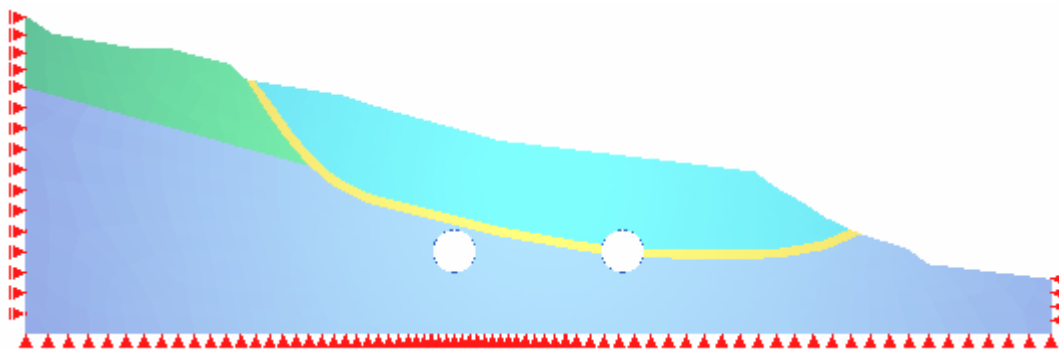
Το δεύτερο στάδιο της ανάλυσης αποτελεί την επίλυση με ένα συγκεκριμένο αλγόριθμο (αρχείο τύπου *DAT*). Ο αλγόριθμος περιλαμβάνει τρία πρότυπα (modules) τα οποία είναι τα εξής:

- Το *aqua* όπου πραγματοποιείται ο ορισμός της διατομής και των υλικών που χρησιμοποιούμε κατά την ανάλυση
- Το *genf* δηλαδή το κατασκευαστή του καννάβου που όμως στην δική μας περίπτωση είναι ήδη έτοιμος (αρχείο τύπου *GEN*) και απλά γίνεται ανάγνωση αυτού
- Το *talpa* όπου πραγματοποιείται η επίλυση, δηλαδή μία ελαστοπλαστική διδιάστατη ανάλυση

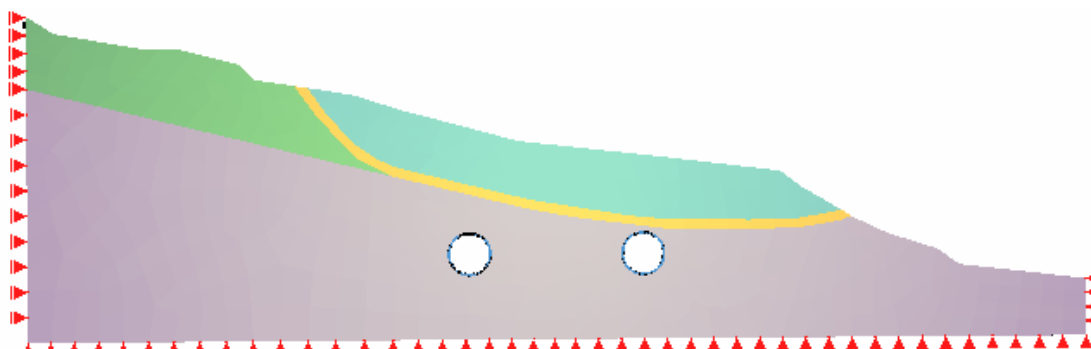
Έχοντας πλέον περιγράψει τον γενικό άξονα πάνω στον οποίο στηρίχτηκε η ανάλυση στις επόμενες παραγράφους ακολουθεί εκτενής περιγραφή τόσο της γεωμετρικής όσο και της παραμετρικής ανάλυσης.

2.1 Γεωμετρική Ανάλυση

Στη γεωμετρική ανάλυση εξετάζουμε δύο διαφορετικές θέσεις της ζώνης αστοχίας με υπολειμματική αντοχή ως προς τους κλάδους της σήραγγας, τις οποίες ονομάζουμε γεωμετρία Α και γεωμετρία Β. Η κάθε γεωμετρία χωρίζεται σε τέσσερις ζώνες. Η πρώτη και η δεύτερη ζώνη αποτελούν το άνω μέρος της κάθε διατομής και αποτελούν προϊόν κατολίσθησης, η τρίτη ζώνη αποτελεί τη ζώνη αστοχίας με υπολειμματική αντοχή η οποία δύναται να ενεργοποιήσει την κατολίσθηση και η τέταρτη ζώνη που εκτείνεται στο κάτω μέρος αποτελεί τη βραχομάζα. Στα δύο παρακάτω σχήματα φαίνεται καθαρά η διάκριση των τεσσάρων προαναφερθεισών ζωνών για κάθε γεωμετρία χωριστά.



Σχήμα 2.3: Απεικόνιση γεωμετρίας Α παρουσία των τεσσάρων εδαφικών ζωνών



Σχήμα 2.4: Απεικόνιση γεωμετρίας Β παρουσία των τεσσάρων εδαφικών ζωνών

Επιπλέον με βάση τα παραπάνω σχήματα παρατηρούμε την εξής ειδοποιό διαφορά μεταξύ των δύο γεωμετριών:

- Στη γεωμετρία Α η ζώνη αστοχίας με υπολειμματική αντοχή και το κύριο σώμα της κατολίσθησης τέμνουν τον δεξιό κλάδο της σήραγγας. Στην προκειμένη περίπτωση ένα τμήμα του δεξιού κλάδου της σήραγγας δεν αποτελείται μόνο από υλικό βραχομάζας αλλά και από προϊόν κατολίσθησης (ασθενές υλικό).
- Στη γεωμετρία Β η ζώνη αστοχίας με υπολειμματική αντοχή βρίσκεται πάνω από τους δύο κλάδους της σήραγγας χωρίς να τέμνει κανέναν από αυτούς. Συνεπώς και οι δύο κλάδοι της υπό μελέτη οδικής σήραγγας βρίσκονται μέσα στη βραχομάζα.

Οι δύο αυτές εναλλακτικές γεωμετρίες δεν υπήρξαν τυχαία επιλογή αλλά αποτελούν δύο πιθανές θέσεις της ζώνης κατολίσθησης. Η περίπτωση της γεωμετρίας Α αποτελεί μια δυσμενή κατάσταση δεδομένης της τομής της κατολίσθησης με κλάδο της σήραγγας και συγκεκριμένα τον δεξιό, ενώ η γεωμετρία Β μια ευνοϊκή γεωμετρία δεδομένης της μη τομής της κατολίσθησης με κάποιον από τους κλάδους της σήραγγας.

Η θέση της ζώνης αστοχίας με υπολειμματική αντοχή δεν είναι εύκολα ευδιάκριτη συνεπώς οι δύο εναλλακτικές θέσεις που εξετάζουμε αποτελούν μια εκτίμηση. Συνεπώς οι παραπάνω γεωμετρίες είναι πολύ πιθανό να συναντηθούν κατά τη διάνοιξη των δύο κλάδων. Για το λόγο αυτό είναι πολύ χρήσιμο να εξάγουμε συμπεράσματα για την συμπεριφορά κάθε γεωμετρίας κατά τη διάρκεια εκσκαφής των δύο κλάδων.

2.2 Παραμετρική Ανάλυση

Σε ότι έχει σχέση με την παραμετρική ανάλυση εξετάζουμε τις ακόλουθες τέσσερις βασικές περιπτώσεις:

1. Μέγιστες και ελάχιστες γεωτεχνικές παράμετροι αντοχής του εδάφους
2. Διαφορετική κατασκευαστική ακολουθία-αλληλουχία εκσκαφής των δύο κλάδων της σήραγγας
3. Εξέταση στοιχείων υποστήριξης διαφορετικής στιβαρότητας (stiffness)
4. Μέγιστη και ελάχιστη τιμή της συνοχής c της ζώνης αστοχίας με υπολειμματική αντοχή

2.2.1 Γεωτεχνικές παράμετροι αντοχής του εδάφους

Η εξέταση των γεωτεχνικών παραμέτρων αντοχής του εδάφους χωρίζεται σε δύο υποπεριπτώσεις με τις ελάχιστες "Ανάλυση I" και τις μέγιστες "Ανάλυση II" τιμές αντίστοιχα. Οι γεωτεχνικές παράμετροι αντοχής του εδάφους είναι οι εξής:

1. Το μέτρο ελαστικότητας E (MPa), που ορίζεται από το νόμο του Hooke σαν ο λόγος της εξασκούμενης αξονικής τάσης προς την αξονική παραμόρφωση και αντιπροσωπεύει τη δυσκαμψία του υλικού. Όσο μεγαλύτερη τιμή έχει το E τόσο το βραχώδες υλικό είναι περισσότερο δύσκαμπτο. Το μέτρο ελαστικότητας της βραχομάζας μπορεί να εκτιμηθεί από την εμπειρική σχέση:

$$E = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100} \cdot a \log\left(\frac{RMR-10}{40}\right)} \quad (\text{Hoek, 1998}) \quad (2.1)$$

όπου σ_{ci} (MPa) είναι η μονοαξονική αντοχή του πετρώματος χωρίς ασυνέχειες, RMR είναι ο δείκτης Bieniawski (Rock Mass Rating) ή ο δείκτης GSI (Geological Strength Index) και το μέτρο ελαστικότητας προκύπτει σε GPa. Η σχέση αυτή προτάθηκε προσφάτως από τον Hoek (1997) και αποτελεί τροποποίηση της εμπειρικής σχέσης των Serafim και Pereira (1983).

2. Η συνοχή c (kPa) που μοιάζει με τη δράση της κόλλας και εκφράζει τις ελκτικές δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ των κόκκων του εδάφους.
3. Η γωνία εσωτερικής τριβής του πετρώματος φ (°).
4. Ο λόγος Poisson ν , που ορίζεται σαν ο λόγος της πλευρικής προς την αξονική παραμόρφωση του υλικού και είναι καθαρός αριθμός.
5. Το ειδικό βάρος της βραχομάζας γ (kN/m³).

Επιπλέον στην παραμετρική ανάλυση με βάση τις γεωτεχνικές παραμέτρους αντοχής του εδάφους το έδαφος κατηγοριοποιείται σε τέσσερα διαφορετικά υλικά τα οποία είναι τα ακόλουθα:

1. Το Υλικό 1 αποτελεί το κύριο σώμα της κατολίσθησης
2. Το Υλικό 2 βρίσκεται κάτω από το κύριο σώμα της κατολίσθησης και αποτελεί τη ζώνη αστοχίας με υπολειμματική αντοχή
3. Το Υλικό 3 αποτελεί τη βραχομάζα
4. Το Υλικό 4 έχει τις γεωτεχνικές παραμέτρους αντοχής του Υλικού 1 και αποτελεί τμήμα της κατολίσθησης

Όπως φαίνεται και στους παρακάτω πίνακες (Πίνακας 2.1 & Πίνακας 2.2) οι γεωτεχνικές παράμετροι αντοχής για το Υλικό 1 και το Υλικό 4 είναι ίδιες. Το ίδιο ισχύει και για το Υλικό 2 εκτός όμως από την τιμή της συνοχής (c), που όπως θα αναφέρω σε επόμενη παράγραφο (§2.2.4), μεταβάλλεται κρατώντας τις υπόλοιπες γεωτεχνικές παραμέτρους σταθερές. Το Υλικό 3 έχει διαφορετικές τιμές γεωτεχνικών παραμέτρων από τα υπόλοιπα τρία υλικά (Υλικό 1, Υλικό 2, Υλικό 4). Τα παραπάνω ποιοτικά χαρακτηριστικά ισχύουν τόσο για την *Ανάλυση I* όσο και την *Ανάλυση II*. Είναι προφανές ότι τα ποσοτικά χαρακτηριστικά των τεσσάρων υλικών διαφέρουν στην *Ανάλυση I* και στην *Ανάλυση II* δεδομένου ότι εξετάζουμε ελάχιστες και μέγιστες τιμές γεωτεχνικών παραμέτρων αντοχής αντίστοιχα.

Τα υλικά που συμμετέχουν στη διαδικασία της παραμετρικής ανάλυσης ανήκουν σε δύο διαφορετικές γεωτεχνικές ενότητες όπου η κάθε μια έχει τα δικά της ξεχωριστά χαρακτηριστικά. Η πρώτη γεωτεχνική ενότητα περιλαμβάνει τα Υλικά 1,2,4 ενώ η δεύτερη γεωτεχνική ενότητα το Υλικό 3.

Η πρώτη γεωτεχνική ενότητα αποτελείται από εναλλαγές χαλαρού ιλλο-αμμώδους υλικού με κροκαλοπαγή σχηματοποιημένα με αυλάκια και μαλακές ως ημισυνεκτικές εξαλοιωμένες μάργες. Επιπλέον μπορεί να συναντηθούν και πιο συνεκτικά ή πυκνής απόθεσης εδαφικά υλικά τα οποία όμως δεν επηρεάζουν σημαντικά τη δομή αυτής της ενότητας. Τα υλικά αυτής της γεωτεχνικής ενότητας είναι πολύ ευάλωτα στις καιρικές συνθήκες, έχοντας σαν αποτέλεσμα την περαιτέρω επιδείνωση της δομής τους και των μηχανικών τους ιδιοτήτων.

Αντιθέτως τα υλικά της δεύτερης γεωτεχνικής ενότητας επιδεικνύουν γεωτεχνική συμπεριφορά μαλακού βράχου ως και σκληρού εδάφους και αποτελούνται κυρίως από πολύ συνεκτικές αργιλώδεις ή αμμώδεις μάργες, ή ελαφρά ως χαλαρά συγκολλημένα κροκολοπαγή με ενστρώσεις περιορισμένου πάχους πυκνής απόθεσης άμμου, ή άλλα χαλαρά αδρόκοκκα υλικά περιορισμένου πάχους.

Οι γεωτεχνικές ενότητες μπορεί να συναντηθούν κατά μήκος της περιοχής όπου πρόκειται να γίνει εκσκαφή. Δεδομένου του μήκους της σήραγγας το οποίο είναι της τάξης του χιλιομέτρου (km) είναι πολύ πιθανόν να υπάρχουν εναλλαγές του υλικού το οποίο πρόκειται να εκσκαφεί για αυτό άλλωστε το λόγο εξετάζουμε δύο εναλλακτικές γεωμετρίες.

Ανάλυση I				
Γεωτεχνικές παράμετροι	Υλικό 1	Υλικό 2	Υλικό 3	Υλικό 4
E (MPa)	28	28	150	28
c (kPa)	15	0-15	80	15
φ ($^{\circ}$)	30	30	28	30
ν	0.35	0.35	0.30	0.35
γ (kN/m ³)	23	23	23	23

Πίνακας 2.1: Γεωτεχνικές παράμετροι αντοχής Ανάλυσης I

Ανάλυση II				
Γεωτεχνικές παράμετροι	Υλικό 1	Υλικό 2	Υλικό 3	Υλικό 4
E (MPa)	35	35	180	35
c (kPa)	25	0-15	90	25
φ ($^{\circ}$)	35	35	30	35
ν	0.35	0.35	0.30	0.35
γ (kN/m ³)	23	23	23	23

Πίνακας 2.2: Γεωτεχνικές παράμετροι αντοχής Ανάλυσης II

Οι τιμές των γεωτεχνικών παραμέτρων αντοχής του εδάφους μου δόθηκαν αλλά έχοντας στη διάθεση μας και στοιχεία για την λιθολογία της περιοχής θέλησα να κάνω διασταύρωση της λιθολογίας και της δομής του πετρώματος με τις παραμέτρους αντοχής. Για το λόγο αυτό για το Υλικό 3 δηλαδή τη βραχομάζα εργαστήκαμε στο λογισμικό *Roclab* της *Rocscience*, όπου ορίζοντας κάποιες παραμέτρους για την ταξινόμηση της δομής του πετρώματος της βραχομάζας σύμφωνα με τους Hoek-Brown υπολογίστηκαν οι παράμετροι του κριτηρίου αστοχίας Hoek-Brown αλλά και οι αντίστοιχες για το κριτήριο Mohr-Coulomb.

Πριν αναφερθώ στη διαδικασία που πραγματοποιήθηκε για την συμβατότητα των παραμέτρων των δύο κριτηρίων είναι εύλογο να περιγράψω τα προαναφερόμενα κριτήρια αστοχίας (Mohr-Coulomb – Hoek-Brown).

2.2.1.1 Κριτήρια αστοχίας Mohr-Coulomb – Hoek-Brown

Το πιο απλό κριτήριο θραύσης είναι των Mohr-Coulomb, η γραφική απεικόνιση του οποίου είναι η ευθεία που εφάπτεται σε όλους τους κύκλους Mohr (περιβάλλουσα). Οι κύκλοι Mohr αντιπροσωπεύουν κρίσιμους συνδυασμούς των κύριων τάσεων (σ_1 & σ_3), ενώ η εξίσωση του κριτηρίου θραύσης Mohr-Coulomb είναι η εξής:

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \varphi \quad (2.2)$$

όπου:

τ : η διατμητική αντοχή

c : η συνοχή του πετρώματος

σ : η εφαρμοζόμενη ορθή τάση

φ : η γωνία εσωτερικής τριβής του πετρώματος

Από πειραματικά αποτελέσματα όμως έχει γίνει σαφές ότι η σχέση των κύριων τάσεων και συγκεκριμένα της διαφορικής τάσης ($\sigma_1 - \sigma_3$) και της πλευρικής (σ_3) δεν ακολουθεί γραμμική σχέση αλλά αντιπροσωπεύεται από μια καμπύλη γραμμή.

Οι Hoek & Brown (1980) δημοσίευσαν ένα εμπειρικό κριτήριο αντοχής του βραχώδους υλικού που δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \cdot \left[m \cdot \left(\frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} \right) + s \right]^{1/2} \quad (2.3)$$

όπου:

σ_1', σ_3' : η μέγιστη και ελάχιστη ενεργή τάση αντίστοιχα κατά τη θραύση

σ_{ci} : η αντοχή σε μοναξονική θλίψη

m, s : σταθερές του υλικού, στη περίπτωση ακέραίου βράχου το $s = 1$

Σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση (Σχέση 2.3), η σχέση μεταξύ των κύριων τάσεων (σ_1 & σ_3), κατά τη θραύση για ένα συγκεκριμένο πέτρωμα καθορίζεται από τους εξής παράγοντες, την αντοχή σε μοναξονική θλίψη (σ_{ci}) και τις σταθερές m, s . Ο προσδιορισμός αυτών των παραγόντων μπορεί να γίνει από απλή στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων δοκιμών σε τριαξονική φόρτιση σε βραχώδη δοκίμια.

Οι Hoek & Brown (1980) προτείνουν την εκτέλεση τριαξονικών δοκιμών που περιλαμβάνουν τουλάχιστον πέντε δοκίμια του πετρώματος με διαφορετικές πλευρικές

τάσεις που οι τιμές τους κυμαίνονται από $0 < \sigma_3 < 0.5 \sigma_{ci}$. Τα αποτελέσματα τους αναλύονται στατιστικά για τον προσδιορισμό των σ_{ci} και m_i .

Το σημαντικό πλεονέκτημα του παραπάνω κριτηρίου είναι ότι αυτό μπορεί να εφαρμοστεί με πολύ καλή προσέγγιση στη βραχομάζα με τη μορφή (Hoek & Brown, 1988):

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \cdot \left[m_b \cdot \left(\frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} \right) + s \right]^a \quad (2.4)$$

όπου:

σ_1', σ_3' : η αξονική και πλευρική ενεργή τάση αντίστοιχα

σ_{ci} : η αντοχή σε μοναξονική θλίψη

m_b, s, a : σταθερές που εξαρτώνται από τις ιδιότητες του βραχώδους υλικού και από χαρακτηριστικά της βραχομάζας (ασυνέχειες, κερματισμός). Οι παραπάνω σταθερές (m_b, s, a) εκτιμώνται με βάση το σύστημα ταξινόμησης RMR (Hoek & Brown), υποθέτοντας εντελώς στεγνές συνθήκες στη βραχομάζα και πολύ ευνοϊκό προσανατολισμό ασυνεχειών.

όπου:

- για Διαταραγμένες βραχομάζες

$$\frac{m_b}{m_i} = \exp((RMR - 100) / 14)$$

$$m_i$$

$$s = \exp((RMR - 100) / 6)$$

- για αδιατάραχτες ή αλληλοεμπλεκόμενες βραχομάζες

$$\frac{m_b}{m_i} = \exp((RMR - 100) / 28)$$

$$m_i$$

$$s = \exp((RMR - 100) / 9)$$

Όμως για να ξεπεραστούν οι ελλείψεις που παρουσίαζε το σύστημα ταξινόμησης RMR του Berniawski εισήχθη ο Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής (GSI). Η διάκριση μεταξύ διαταραγμένων και αδιατάραχτων καταργήθηκε με την δικαιολογία ότι η διαταραχή γενικά προκαλείται από μηχανικές δραστηριότητες και θα πρέπει να απομειώνεται μέσω της τιμής του GSI. Συνεπώς σύμφωνα με τους (Hoek 1994, Hoek Kaiser & Bawden 1995) έγινε η εισαγωγή του γενικευμένου κριτηρίου Hoek-Brown, ενσωματώνοντας τόσο το πρωτότυπο κριτήριο για μέτρια μέχρι πολύ πτωχή ποιότητα βραχομάζας όσο και το τροποποιημένο κριτήριο για πολύ πτωχή ποιότητα βραχομάζας με αυξανόμενη περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα.

όπου:

- για $GSI > 25$

$$\frac{m_b}{m_i} = \exp((GSI - 100) / 28)$$

$$m_i$$

$$s = \exp((GSI - 100) / 9)$$

$$\alpha = 0.5$$

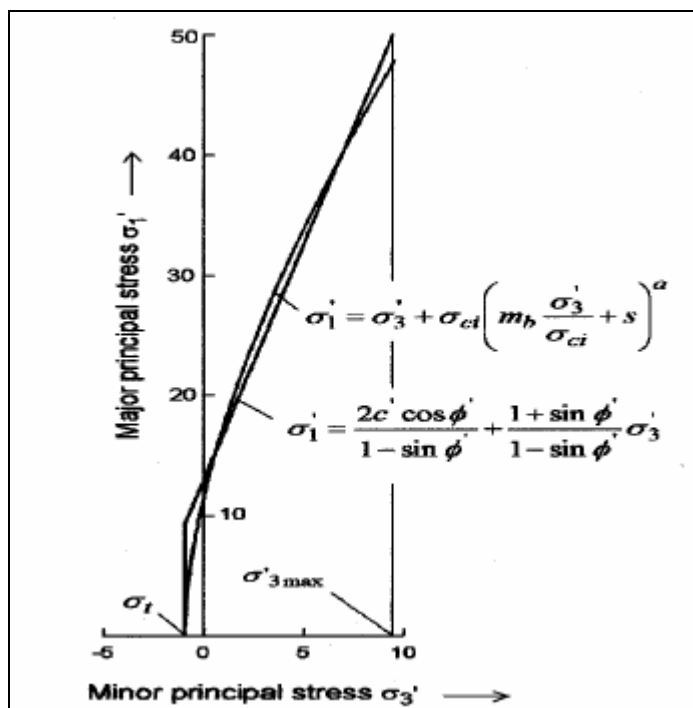
- για $GSI < 25$

$$s = 0$$

$$\alpha = 0.65 - \frac{GSI}{200}$$

Επειδή όμως αντικείμενο της παρούσας εργασίας δεν είναι η πλήρης περιγραφή του κριτηρίου Hoek-Brown αλλά μια συνοπτική αναφορά, υπάρχει δυνατότητα σε οποιονδήποτε ενδιαφέρεται να ενημερωθεί για τη νεότερη επίλυση του συγκεκριμένου κριτηρίου στην αντίστοιχη βιβλιογραφία.

Το επόμενο Σχήμα απεικονίζει την προσαρμογή της γραμμικής περιβάλλουσας του κριτηρίου Mohr-Coulomb με την καμπύλη περιβάλλουσα του κριτηρίου Hoek-Brown.



Σχήμα 2.5: Εξισώσεις μεταξύ κύριων τάσεων όπως αυτές προκύπτουν τόσο από το κριτήριο Hoek-Brown όσο και από το ισοδύναμο κριτήριο Mohr-Coulomb

2.2.1.2 Εκτίμηση των παραμέτρων c, ϕ του κριτηρίου Mohr-Coulomb για τη βραχομάζα (Υλικό 3)

Έχοντας πλέον αποκτήσει μια εικόνα των δύο κριτηρίων αστοχίας επανέρχοντας σε αυτό που είχαμε αρχίσει παραπάνω, ταξινομώντας τη δομή του πετρώματος της βραχομάζας σύμφωνα με τους Hoek-Brown υπολογίζονται οι παράμετροι m_b, s, a του κριτηρίου Hoek-Brown καθώς και οι παράμετροι (c, ϕ) του κριτηρίου Mohr-Coulomb. Το εν λόγω λογισμικό *Roclab* εφαρμόζει τη πιο πρόσφατη επίλυση του κριτηρίου Hoek-Brown και μπορεί να αναζητηθεί ελεύθερα στο διαδίκτυο (www.roscience.com). Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τιμές που θέτουμε στις παραμέτρους αποτελούν μια εκτίμηση βάση του γεωλογικού υποβάθρου για την υπό μελέτη περιοχή (λιθολογίας της περιοχής). Οι παράμετροι που ορίζουμε και οι τιμές που θέτουμε σε κάθε μία από αυτές (παράμετρο) περιγράφονται παρακάτω:

1. Η μονοαξονική θλιπτική τάση για ακέραιο βράχο (Intact Uniaxial Compressive Strength) σ_{ci} εκφράζει την μηχανική αντοχή του πετρώματος από το οποίο δομείται η βραχομάζα. Η τιμή της μονοαξονικής θλιπτικής τάσης τίθεται ίση με $25MPa$, δηλαδή χαρακτηρίζεται ως ασθενές πέτρωμα

το οποίο δύσκολα χαράσσεται με μαχαίρι. Η ταξινόμηση του βραχώδους υλικού σύμφωνα με την αντοχή του σε ανεμπόδιστη μονοαξονική θλίψη δίνεται στο Πίνακα 2.3.

Κατάταξη πετρώματος	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (MPa)	Επί τόπου εκτίμηση
Εξαιρετικά υψηλής αντοχής	>250	Ο πυρήνας (δείγμα) δεν σπάει με το γεωλογικό σφυρί
Πολύ υψηλής αντοχής	100 – 250	Για να σπάσει ο πυρήνας (δείγμα) χρειάζονται πολλά κτυπήματα με το γεωλογικό σφυρί
Υψηλής αντοχής	50 – 100	Για να σπάσει ο πυρήνας χρειάζονται περιοκότερα από ένα κτυπήματα
Μέσης αντοχής	25 – 50	Ο πυρήνας δεν χαράσσεται με μαχαίρι και μπορεί να σπάσει με ένα κτύπημα γεωλογικού σφυριού.
Χαμηλής αντοχής	5 – 25	Ο πυρήνας χαράσσεται δύσκολα με το μαχαίρι και η μίτη του γεωλογικού σφυριού δημιουργεί αβαθείς χαραγιές
Πολύ χαμηλής αντοχής	1 – 5	Ο πυρήνας σπάει σε πολλά κομμάτια με ένα κτύπημα με το γεωλογικό σφυρί και χαράσσεται εύκολα με το μαχαίρι.
Εξαιρετικά χαμηλής αντοχής	0.25 – 1	Ο πυρήνας χαράσσεται εύκολα με το νύχι του αντίχειρα

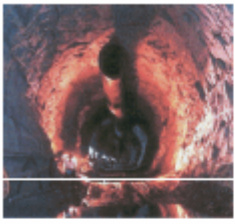


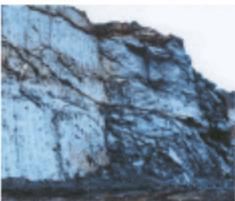
Πίνακας 2.3: Ταξινόμηση βραχώδους υλικού με βάση την αντοχή του σε μονοαξονική θλίψη (ISRM, 1981)

2. Ο Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής GSI (Geological Strength Index) που έχει διεθνώς καθιερωθεί για το ποσοτικό χαρακτηρισμό της ποιότητας μιας βραχομάζας, έχει ευρεία χρήση και στην Ελλάδα. Ο δείκτης GSI, εισήχθη από τους Hoek, Wood and Shah (1992), επεκτάθηκε για τις ασθενείς βραχομάζες από τους Hoek, Marinos and Benissi (1998), Marinos and Hoek (2001, Σχήμα 2.6). Ο δείκτης εκτός από τη ταξινόμηση, εκφράζει αριθμητικά την απομείωση των σταθερών του υλικού, ανάλογα με τη ρηγμάτωση της βραχομάζας. Στην περίπτωση μας ο Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής τίθεται ίσος με 16, δηλαδή ανήκει στη κατηγορία της ισχυρά κατακερματισμένης βραχομάζας με πτωχό αλληλοκλείδωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιωδών και αποστρογγυλοποιημένων τεμαχών. Αξίζει να τονιστεί ότι το σύστημα GSI εφαρμόζεται σε βραχομάζες με αλληλεμπλοκή μεταξύ των βραχωδών τεμαχών, δηλαδή σε βραχομάζες με μικρό ποσοστό συμμετοχής εδαφικού υλικού (τυπικά λιγότερο από το 20% του συνολικού όγκου της βραχομάζας).

<p>ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΡΗΓΜΑΤΩΜΕΝΟΥΣ ΒΡΑΧΟΥΣ (Hoek and Marinos, 2000)</p> <p>Βασίζομενοι στην εμφάνιση της βραχώμαζας (περιγραφή δομής και κατάσταση επιφανείας ασυνχειών) εκτιμήστε τη μέση τιμή του GSI, χωρίς υποχρεωτικά μεγάλη ακρίβεια. Το να επιλέξετε ένα εύρος τιμών από 33 ως 37 είναι πιο ρεαλιστικό από το να δηλώσετε ότι GSI=35. Σημειώνεται ότι ο Πίνακας δεν εφαρμόζεται σε κινηματικά ελεγχόμενες αστάθειες. Στην περίπτωση που οι ασθενείς επίπεδες επιφάνειες έχουν μη ευνοϊκό προσανατολισμό σε σχέση με το πρανές εκσκαφής, τότε αυτές καθορίζουν την συμπεριφορά της βραχώμαζας. Η διατμητική αντοχή επιφανειών σε βράχους που υπόκεινται σε εξασθένηση λόγω διακύμανσης της περιεκτικότητας σε υγρασία, είναι περαιτέρω μειωμένη όταν υπάρχει νερό. Όταν, οι βραχώμαζες ανήκουν στις μέτριες έως πτωχές κατηγορίες και υπάρχει νερό τότε μετακινούμαστε προς τα δεξιά. Η υδροστατική πίεση λαμβάνεται υπόψη με την ανάλυση ενεργών τάσεων.</p> <p>ΔΟΜΗ</p>		<p>ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΧΕΙΑΣ</p> <p>ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ Πολύ τραχείες, μη αποσβεσμένες επιφάνειες</p> <p>ΚΑΛΗ Τραχείες, ελαφρώς αποσβεσμένες και οξείδωμένες επιφάνειες</p> <p>ΜΕΤΡΙΑ Λείες, μετρίως αποσβεσμένες και εβαλλοκλιμένες επιφάνειες</p> <p>ΠΤΩΧΗ Επιφάνειες ολίσθησης, πολύ αποσβεσμένες με συμπαγή επιρροϊκάτα ή υλικό πλήρωσης με κοιλιάδα βραχομάζας</p> <p>ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ Επιφάνειες ολίσθησης, πολύ αποσβεσμένες με μετακινούμενο υλικό πλήρωσης</p>					
		<p>ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΧΕΙΩΝ →</p>					
	<p>INTACT OR MASSIVE - Άρρηκτα βραχώδη τεμάχια ή άστρωτος βράχος με λίγες ασυνέχειες σε μεγάλη απόσταση</p>	90				N/A	N/A
	<p>BLOCKY - Αδιατάρακτη βραχώμαζα με πολύ καλό αλληλοκλειδώμα που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από τρεις ορθογώνια τεμνόμενες οικογένειες ασυνχειών</p>	80					
	<p>VERY BLOCKY- Μερικώς διαταραγμένη βραχώμαζα με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια (blocks) που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνχειών</p>		70				
	<p>BLOCKY/DISTURBED/SEAMY Πτυχωμένη με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από πολλές αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνχειών. Εμμονή στρώσης ή σχιστότητας</p>		60				
	<p>DISINTEGRATED - Ισχυρά κερματισμένη βραχώμαζα με πτωχό αλληλοκλειδώμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιωδών και αποστρωγυλωμένων τεμαχίων</p>		50				
	<p>LAMINATED/SHEARED - Φυλλώδης ή σχιστοποιημένη και τεκτονικώς διατμημένη ασθενής βραχώμαζα. Η σχιστότητα επικρατεί έναντι οποιασδήποτε άλλης οικογένειας ασυνχειών εμποδίζοντας την δημιουργία γωνιωδών τεμαχίων</p>		40				
			30				
			20				
			10				
		N/A					
		N/A					

Σχήμα 2.6: Το βασικό διάγραμμα του Δείκτη Γεωλογικής Αντοχής GSI

3. Ο συντελεστής m_i ο οποίος εξαρτάται από το είδος του πετρώματος τίθεται ίσος με 6 δεδομένου το εδαφικό υλικό αποτελείται από σχηματισμό μαργών. Αξίζει να σημειωθεί ότι στο *Roclab* υπάρχει δυνατότητα επιλογής της τιμής m_i ανάλογα με το είδος του πετρώματος.
4. Ο βαθμός διαταραχής (Disturbance Factor) D γνωρίζοντας ότι η διάνοιξη της σήραγγας θα γίνει με τη χρησιμοποίηση συμβατικών μέσων σε πτωχής ποιότητας βραχομάζα και χωρίς χρήση εκρηκτικών τίθεται ίσος με 0.3. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ελάχιστη διαταραχή στη βραχομάζα που περιβάλλει την σήραγγα. Ο επόμενος Πίνακας μας διαφωτίζει περισσότερο με προτεινόμενες τιμές του βαθμού διαταραχής D .

ΕΙΚΟΝΑ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ	ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕ ΝΗ ΤΙΜΗ ΤΟΥ D
	Η εξαιρετικής ποιότητας ελεγχόμενη χρήση εκρηκτικών (controlled blasting) ή διάνοιξη με την μέθοδο TBM έχει ως αποτέλεσμα την ελάχιστη διαταραχή στην βραχομάζα που περιβάλλει την σήραγγα.	D = 0
	Εισκαφή είτε με μηχανικά μέσα είτε με το χέρι σε πτωχής ποιότητας βραχομάζες (χωρίς την χρήση εκρηκτικών) έχει ως αποτέλεσμα την ελάχιστη διαταραχή στην βραχομάζα που περιβάλλει την σήραγγα. Όπου τα προβλήματα σύνθλιψης έχουν ως αποτέλεσμα την σημαντική ανύψωση του δαπέδου, η διαταραχή μπορεί να είναι σοβαρή εκτός εάν τοποθετηθεί ένα προσωρινό αντεστραμμένο τόξο της επένδυσης.	D = 0 D = 0,5 Χωρίς αντεστραμμένο τόξο επένδυσης
	Πολύ πτωχής ποιότητας χρήση εκρηκτικών σε μια σκληρού βράχου σήραγγα έχει ως αποτέλεσμα σοβαρή τοπική ζημιά, η οποία επεκτείνεται μέχρι 2 και 3 μ. στην περιβάλλουσα βραχομάζα.	D = 0,8
	Μικρής κλίμακας χρήση εκρηκτικών σε πρηνή μόνιμων έργων μηχανικού (όχι μεταλλεία) έχει ως αποτέλεσμα μέτρια ζημιά στην βραχομάζα, ειδικά αν χρησιμοποιείται ελεγχόμενη χρήση εκρηκτικών, όπως αυτή παρουσιάζεται στην δίπλα φωτογραφία. Ωστόσο, η εκτόνωση των τάσεων προκαλεί μερική διαταραχή.	D = 0,7 Καλή χρήση εκρηκτικών D = 0,5 Πτωχή χρήση εκρηκτικών

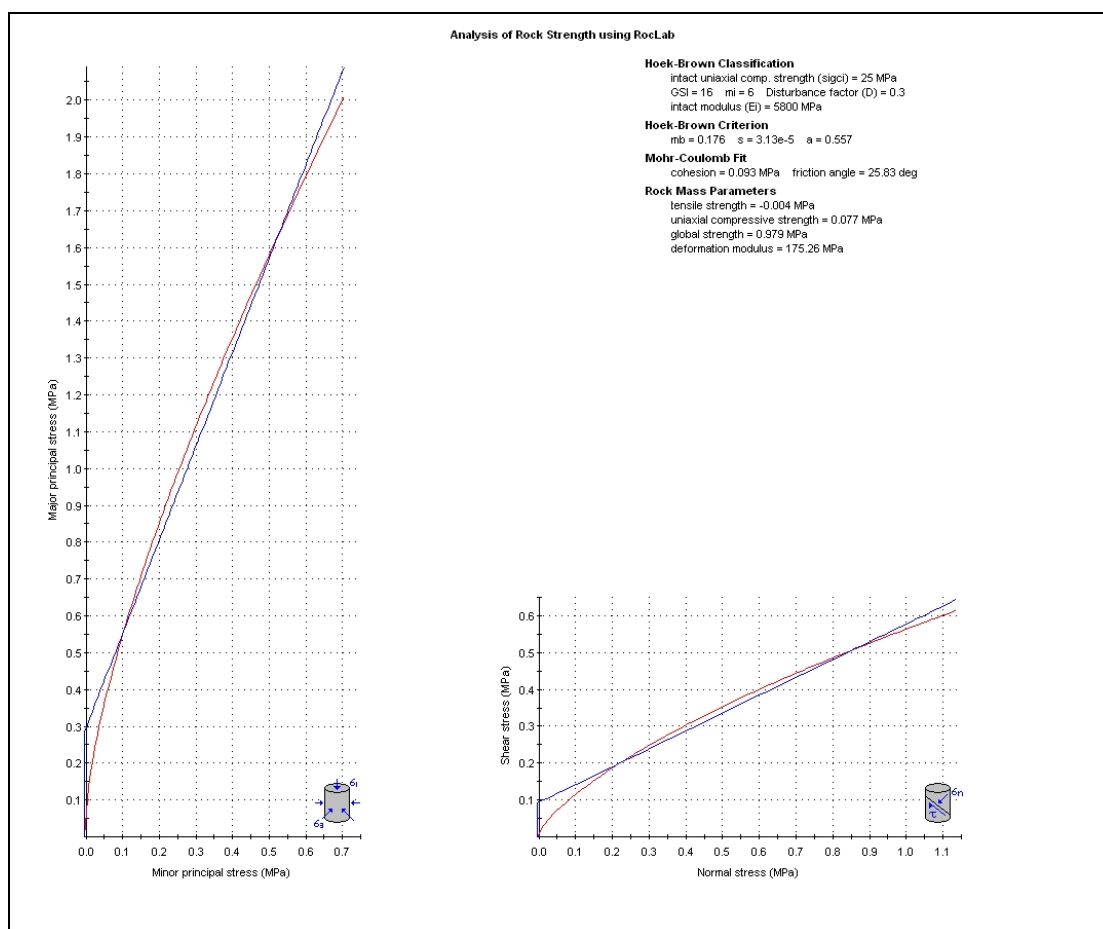
Πίνακας 2.4: Πίνακας εκτίμησης του βαθμού διαταραχής D

5. Το μέτρο ελαστικότητας για τον αέριο βράχο θεωρήθηκε ίσο με $E_r=5800MPa$
6. Το βάθος της σήραγγας είναι ίσο με 70m

Εισάγοντας όλα τα παραπάνω στοιχεία στο λογισμικό προέκυψε ότι με βάση το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb η συνοχή $c=92kPa$ και η γωνία τριβής $\varphi=26^\circ$. Στην πραγματικότητα με αυτό τον τρόπο έγινε συσχέτιση των δύο κριτηρίων, δηλαδή ο υπολογισμός των παραμέτρων αντοχής (c, φ) του κριτηρίου Mohr-Coulomb που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες τιμές των παραμέτρων του κριτηρίου Hoek-Brown. Είναι προφανές ότι λόγω της διαφορετικής μορφής της περιβάλλουσας αστοχίας, καμπύλη περιβάλλουσα στο κριτήριο Hoek-Brown και ευθύγραμμη στο κριτήριο Mohr-Coulomb, η αντιστοιχία μεταξύ των δύο κριτηρίων αναφέρεται σε συγκεκριμένη περιοχή τάσεων όπου η καμπύλη περιβάλλουσα του κριτηρίου Hoek-Brown προσεγγίζεται με μία ευθεία. Επιπλέον το μέτρο ελαστικότητας E υπολογίστηκε ίσο με $175MPa$ με τις δοθείσες τιμές να είναι $150MPa$ η ελάχιστη και $180MPa$ η μέγιστη.

Με τον τρόπο πραγματοποιήθηκε διασταύρωση της λιθολογίας της υπό μελέτη περιοχής και της δομής του πετρώματος της βραχομάζας με τις παραμέτρους αντοχής και κυρίως με το μέτρο ελαστικότητας. Με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρατηρούμε ότι οι παράμετροι αντοχής είναι συμβατές του μέτρου παραμόρφωσης που μας έχει δοθεί.

Παρακάτω απεικονίζεται το σχήμα με τις περιβάλλουσες αστοχίας (Σχήμα 2.8) και για τα δύο κριτήρια αστοχίας όπως προέκυψε μετά από την εφαρμογή των παραπάνω τιμών στο *Roclab*.



Σχήμα 2.7: Διαγράμματα συσχέτισης των περιβαλλουσών για τα δύο κριτήρια αστοχίας όπου απεικονίζεται με μπλε χρώμα η περιβάλλουσα Mohr-Coulomb και με κόκκινο χρώμα η περιβάλλουσα Hoek-Brown

2.2.2 Κατασκευαστική αλληλουχία εκσκαφής

Εφαρμόζουμε διαφορετική κατασκευαστική ακολουθία-αλληλουχία εκσκαφής των δύο κλάδων της σήραγγας. Κατά τη Φάση Α γίνεται πλήρης εκσκαφή του πρώτου κλάδου είτε του δεξιού είτε του αριστερού κλάδου ανάλογα με την περίπτωση που εξετάζω κάθε φορά, ενώ κατά τη Φάση Β πραγματοποιείται η πλήρης εκσκαφή του δεύτερου κλάδου αυτού δηλαδή που έχει απομείνει να εκσκαφεί. Συνεπώς στη Φάση Β και οι δύο κλάδοι της σήραγγας έχουν εκσκαφεί πλήρως. Η αλληλουχία εκσκαφής θα είναι ιδιαίτερη χρήσιμη στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων διότι είναι μια παράμετρος η οποία πρέπει να ληφθεί σε μεγάλο βαθμό υπόψη κατά το σχεδιασμό των υπό μελέτη σηράγγων. Αξιοποιώντας τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από την ανάλυση θα μπορούσαμε να εξάγουμε συμπέρασμα κατά πόσο η εκσκαφή του ενός κλάδου επηρεάζει τον άλλο κλάδο τόσο στις συγκλίσεις εκσκαφής όσο και στις επιφανειακές μετακινήσεις.

Όμως κάθε φάση αποτελείται από υποφάσεις οι οποίες οδηγούν σταδιακά στη διάνοιξη τόσο του δεξιού όσο και του αριστερού κλάδου. Αυτή η προσομοίωση των φάσεων εκσκαφής αντικατοπτρίζει τη Νέα Αυστριακή Μέθοδο Διάνοιξης Σηράγγων (NATM) της οποίας τα βασικά χαρακτηριστικά περιγράφονται παρακάτω. Η σταδιακή διάνοιξη κάθε

κλάδου της σήραγγας προκαλεί σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας ενεργοποιώντας (φορτίζοντας) τη βραχομάζα μειώνοντας με αυτό τον τρόπο τα φορτία που θα αναληφθούν από την προσωρινή υποστήριξη.

2.2.2.1 Νέα Αυστριακή Μέθοδος Διάνοιξης Σηράγγων

Η λεγόμενη "Νέα Αυστριακή Μέθοδος Διάνοιξης Σηράγγων" (New Austrian Tunneling Method NATM) ουσιαστικώς δεν αποτελεί μια "μέθοδο" αλλά περιλαμβάνει ένα σύνολο τεχνικών διάνοιξης και υποστήριξης σηράγγων οι οποίες εφαρμόστηκαν συστηματικά κατά τη διάνοιξη σηράγγων στις Αυστριακές Άλπεις στις αρχές της δεκαετίας του 1960. Οι τεχνικές αυτές είχαν εφαρμοσθεί και πριν το 1960 τόσο στην Αυστρία όσο και σε άλλα μέρη του κόσμου αλλά η συστηματοποίηση τους και η ονομασία τους (NATM) έγινε από Αυστριακούς μηχανικούς (Rabczewicz, Mueller, Brunner και Pacher) περί το 1960. Έτσι, αν και η "Μέθοδος NATM" όταν προτάθηκε δεν ήταν ούτε "Νέα" ούτε "Αυστριακή" αφού είχε εφαρμοσθεί και στο παρελθόν σε άλλες χώρες, αλλά ούτε και "Μέθοδος" αφού ουσιαστικά αποτελείται από ένα σύνολο τεχνικών οι οποίες μάλιστα αλλάζουν με την πρόοδο της τεχνολογίας, διατήρησε διεθνώς μέχρι σήμερα το όνομά της.

Αν και δεν υπάρχει γενικώς αποδεκτός ορισμός της "Μεθόδου NATM", ο όρος συνήθως χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη διάνοιξη σηράγγων με εκτεθειμένο το μέτωπο εκσκαφής δηλαδή χωρίς την εφαρμογή πίεσης με μηχανικά μέσα και υποστήριξη του τοιχώματος της σήραγγας με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (απλό ή οπλισμένο) ή και αγκύρια βράχου. Σύμφωνα με τα ανωτέρω, οι εναλλακτικοί τρόποι διάνοιξης σηράγγων που δεν υπάγονται στη μέθοδο NATM είναι:

1. Διάνοιξη με μηχανήματα ολομέτωπης κοπής (TBM), επειδή κατά τη μέθοδο αυτή η κοπτική κεφαλή του μηχανήματος ασκεί πίεση επί του μετώπου εκσκαφής.
2. Διάνοιξη με προστατευτική ασπίδα (shield) επειδή η άμεση υποστήριξη του τοιχώματος της σήραγγας γίνεται μέσω της ασπίδας και όχι με εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος ή αγκυρίων.
3. Οποιαδήποτε άλλη μέθοδος διάνοιξης κατά την οποία η άμεση υποστήριξη του τοιχώματος της σήραγγας γίνεται χωρίς εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ή αγκύρια, όπως π.χ. με έγχυτο σκυρόδεμα, προκατασκευασμένα στοιχεία από σκυρόδεμα, μέταλλο ή άλλο υλικό.

Τα κύρια χαρακτηριστικά της *Νέας Αυστριακής Μεθόδου Διάνοιξης Σηράγγων* σύμφωνα με τον Brown (1981) είναι τα εξής:

Κύρια υποστήριξη

1. Η υποστήριξη αποτελείται από ένα ενσωματωμένο σύστημα μπουλονιών ή κοχλιών, αγκυρίων βράχου, πλέγματος, εκτοξευόμενου σκυροδέματος και αν είναι απαραίτητο από εύκαμπτα αγκύρια τα οποία σχηματίζουν μια λεπτού πάχους εύκαμπτη επένδυση γύρω από τη περιφέρεια της περιοχής διάνοιξης.
2. Η υποστήριξη τοποθετείται αμέσως μετά την εκσκαφή. Κυκλικά τρυπάνια και μέθοδοι ελεγχόμενης έκρηξης χρησιμοποιούνται γενικά κατά την εκσκαφή. Η υποστήριξη τοποθετείται κατά παρόμοιο κυκλικό τρόπο, προσπαθώντας όσο το δυνατό να ελαχιστοποιήσουμε την ύπαρξη ανυποστήρικτων τμημάτων του τόξου.
3. Οι ασκούμενες τάσεις του βράχου ή εδάφους θα πρέπει να προστατευθούν και να ακινητοποιηθούν κατά το μέγιστο δυνατό τρόπο. Η ελεγχόμενη παραμόρφωση είναι απαραίτητη ώστε να επιτρέψει στο έδαφος να αναπτύξει τις πλήρεις τάσεις του. Η υπερβολική όμως μη ελεγχόμενη παραμόρφωση μπορεί να οδηγήσει σε

απώλεια των εδαφικών τάσεων και υποχώρηση του μετώπου της σήραγγας κάτι το οποίο πρέπει να αποφεύγεται.

4. Η υποστήριξη είναι σχεδιασμένη να είναι εύκαμπτη, να παραμένει σε στενή επαφή με το έδαφος και να έχει τη ικανότητα να μπορεί να παραμορφώνεται μαζί με αυτό.
5. Οι παραμορφώσεις και τα φορτία παρακολουθούνται (καταγράφονται) ώστε να παρέχουν πληροφορίες για την απόδοση της υποστήριξης.

Δευτερεύουσα υποστήριξη

1. Η δευτερεύουσα υποστήριξη είναι σχεδιασμένη επί τη βάσει παραμορφώσεων και μετρήσεων των φορτίων της κύριας υποστήριξης και του εδάφους.
2. Η κύρια υποστήριξη αποτελεί δομικό κομμάτι της δευτερεύουσας υποστήριξης.
3. Η δευτερεύουσα υποστήριξη περιλαμβάνει συνήθως επί τόπου εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και ιδανικά, εγκαθίσταται μετά τη παραμόρφωση της κύριας υποστήριξης η οποία έχει σταματήσει ή έχει μειωθεί σε σημαντικό βαθμό.

2.2.3 Εξέταση στοιχείων υποστήριξης διαφορετικής στιβαρότητας

Στην παραμετρική ανάλυση εξετάζουμε στοιχεία υποστήριξης διαφορετικής στιβαρότητας (stiffness). Οι τρεις διαφορετικοί τύποι μέτρων προσωρινής υποστήριξης διακρίνονται σε:

1. Ελαφρού (Light) τύπου προσωρινή υποστήριξη
2. Μεσαίου (Medium) τύπου προσωρινή υποστήριξη
3. Βαρέως (Stiff) τύπου προσωρινή υποστήριξη

Η θεώρηση μέτρων προσωρινής υποστήριξης διαφορετικής στιβαρότητας εφαρμόζεται στις δύο γεωμετρίες του υπό μελέτη έργου, στην *Ανάλυση I* και *Ανάλυση II*, καθώς και στην περίπτωση διαφορετικής αλληλουχίας εκσκαφής.

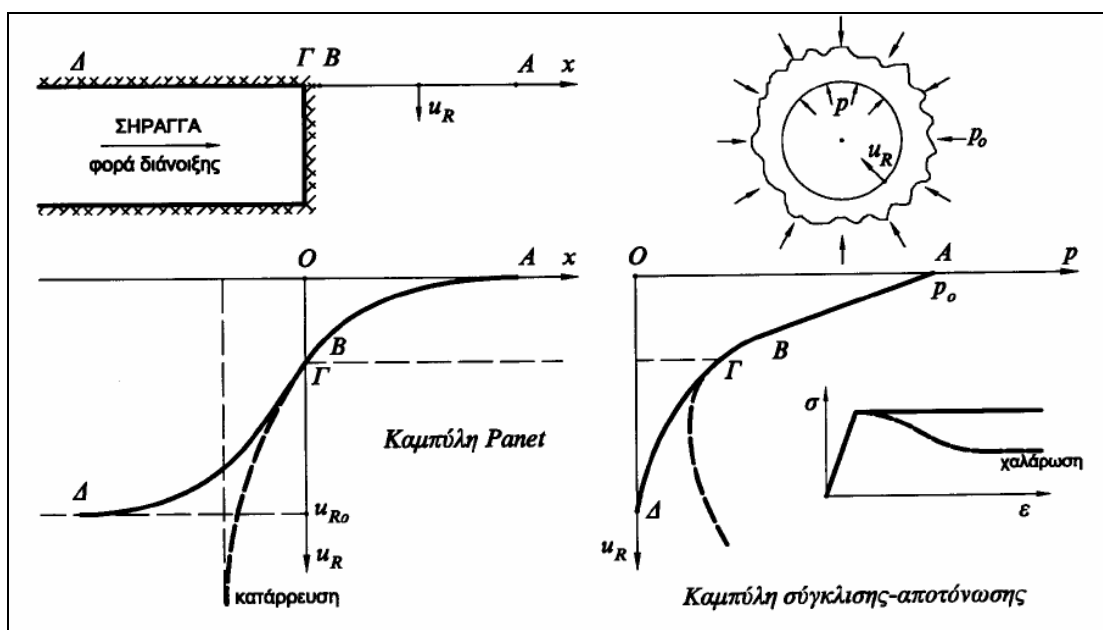
Σκοπός των μέτρων προσωρινής υποστήριξης είναι η συγκράτηση των μετακινήσεων του εδάφους που αρχίζουν σε θέσεις αρκετά εμπρός από το μέτωπο διάνοιξης, δηλαδή πριν το μέτωπο εκσκαφής φτάσει σε κάποια συγκεκριμένη θέση. Επιπλέον στοχεύει στη προστασία του προσωπικού και των μηχανημάτων κατά τη διάρκεια των εργασιών διάνοιξης δημιουργώντας ένα ασφαλές περιβάλλον εργασίας, ενώ παράλληλα περιγράφει τη θέση τοποθέτησης της τελικής επένδυσης.

Η μέθοδος ανάλυσης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης είναι η ανάλυση της διάνοιξης και υποστήριξης σηράγγων με καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης – Καμπύλες Panet. Στο μέτωπο της σήραγγας το πρόβλημα που έχουμε να αντιμετωπίσουμε είναι τριδιάστατο ενώ η ανάλυση που πραγματοποιείται είναι διδιάστατη. Το υπολογιστικό μειονέκτημα να το αντιμετωπίσουμε ως διδιάστατο και όχι ως τριδιάστατο επιτυγχάνεται μέσω των Καμπύλων Panet.

2.2.3.1 Μέθοδος ανάλυσης διάνοιξης-υποστήριξης σηράγγων με καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης

Κατά τη διάνοιξη σηράγγων οι μετακινήσεις του εδάφους αρχίζουν σε θέσεις αρκετά εμπρός από το μέτωπο, πριν ακόμα το μέτωπο εκσκαφής φτάσει σε κάποια συγκεκριμένη θέση. Το παρακάτω σχήμα (Σχήμα 2.9) παρουσιάζει μια τέτοια καμπύλη (ΑΒΓΔ) εξέλιξης

της σύγκλισης για ανυποστήρικτη σήραγγα, σε διάγραμμα $x-u_R$ όπου (u_R) είναι η σύγκλιση της οροφής της σήραγγας και (x) είναι η απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής. Από το σχήμα φαίνεται ότι ένα σημαντικό ποσοστό της συνολικής σύγκλισης (u_{R0}), της τάξεως του 30-35% της συνολικής σύγκλισης, συμβαίνει εμπρός από το μέτωπο της σήραγγας. Στο ίδιο σχήμα φαίνεται και η αντίστοιχη καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης. Συνεπώς, σε κάθε θέση (x) κατά μήκος του άξονα της σήραγγας αντιστοιχεί μέσω της καμπύλης $x-u_R$ μια τιμή της σύγκλισης του τοιχώματος (u_R). Για τη συγκεκριμένη τιμή (u_R) αντιστοιχεί μέσω της καμπύλης σύγκλισης-αποτόνωσης μια τιμή της πίεσης (p), η οποία είναι μικρότερη από την αρχική γεωστατική πίεση (p_0). Η πίεση (p) ονομάζεται "ισοδύναμη εσωτερική πίεση" επειδή προκαλεί την ίδια σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας με αυτή που συμβαίνει σε απόσταση (x) από το μέτωπο της σήραγγας. Σημειώνεται ότι εάν η συμπεριφορά του εδάφους παρουσιάζει χαρακτηριστικά έντονης χαλάρωσης (δηλαδή μείωσης της αντοχής με παρατεταμένη παραμόρφωση) τότε η διατομή της σήραγγας δεν ισορροπεί, η σύγκλιση της οροφής αυξάνει απεριόριστα και η διατομή καταρρέει.



Σχήμα 2.8: Καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης και Καμπύλες Panet σε ανυποστήρικτη σήραγγα

Η συσχέτιση της σύγκλισης (u_R) του τοιχώματος της σήραγγας με την απόσταση (x) από το μέτωπο εκσκαφής είναι πολύ χρήσιμη γιατί επιτρέπει την εκτίμηση της σύγκλισης του τοιχώματος της σήραγγας που έχει συμβεί πριν από την εφαρμογή της προσωρινής υποστήριξης. Σημειώνεται ότι ακόμη και στην περίπτωση όπου η προσωρινή υποστήριξη εφαρμόζεται ακριβώς στη θέση του μετώπου εκσκαφής, κάποια σύγκλιση έχει ήδη συμβεί (της τάξεως του 30-35% της συνολικής σύγκλισης).

Η σύγκλιση της βραχομάζας πριν από την εφαρμογή των μέτρων υποστήριξης συντελεί στην αποτόνωση της βραχομάζας και τη μείωση των πιέσεων που θα ασκηθούν επί των μέτρων υποστήριξης. Κατά συνέπεια, η εκτίμηση της ως άνω σύγκλισης επηρεάζει σημαντικά το σχεδιασμό των μέτρων υποστήριξης. Παρακάτω εκτιμάται η σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας συναρτήσει της απόστασης (x) από το μέτωπο εκσκαφής.

Η σύγκλιση $u_R(x)$ του τοιχώματος ανυποστήρικτης σήραγγας σε απόσταση ($x < 0$) πίσω από το μέτωπο εκσκαφής (που βρίσκεται στη θέση $x=0$) δίνεται από την προσεγγιστική σχέση (Panet, 1995):

$$u_R(x) = u_R(0) + [u_{R\infty} - u_R(0)] \left\{ 1 - \left[\frac{m}{m + \xi(-x/R)} \right]^{-2} \right\} \quad (2.5)$$

όπου:

$u_{R\infty}$: η τελική σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας σε μεγάλη απόσταση ($x = -\infty$) πίσω από το μέτωπο εκσκαφής

R : η ακτίνα της σήραγγας

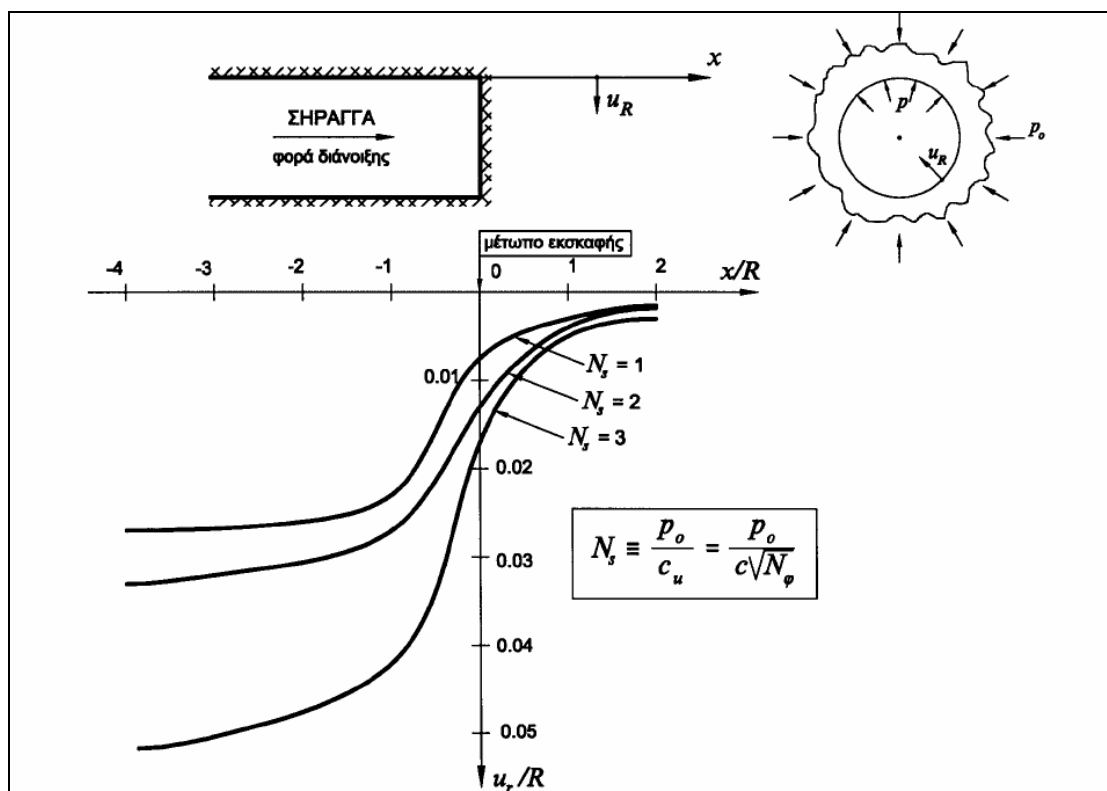
ξ : ο συντελεστής που ισούται με το λόγο της ελαστικής προς την ελαστοπλαστική τελική σύγκλιση

$u_R(0)$: η σύγκλιση του τοιχώματος στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας (θέση $x=0$)

m : συντελεστής

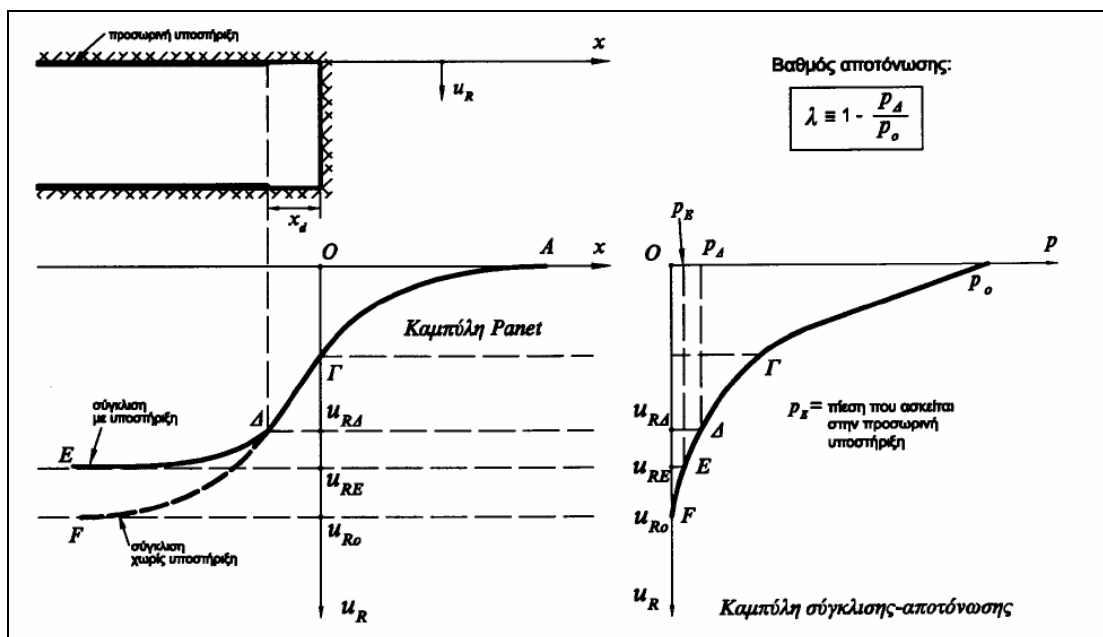
Οι τιμές των δύο τελευταίων συντελεστών εξαρτώνται από το συντελεστή υπερφόρτισης της βραχομάζας $N_s = 2p_o / \sigma_{cm}$ (σ_{cm} η αντοχή της βραχομάζας σε μονοαξονική θλίψη).

Τέτοιες τυπικές καμπύλες σύγκλισης του τοιχώματος σε διάφορες θέσεις πίσω από το μέτωπο εκσκαφής φαίνονται στο Σχήμα 2.10.



Σχήμα 2.9: Τυπικές μορφές Καμπύλων Panet κατά μήκος του άξονα της σήραγγας, για διάφορες τιμές του συντελεστή υπερφόρτισης (N_s)

Το επόμενο σχήμα παρουσιάζει τις αντίστοιχες καμπύλες σε διατομή σήραγγας που υποστηρίζεται με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

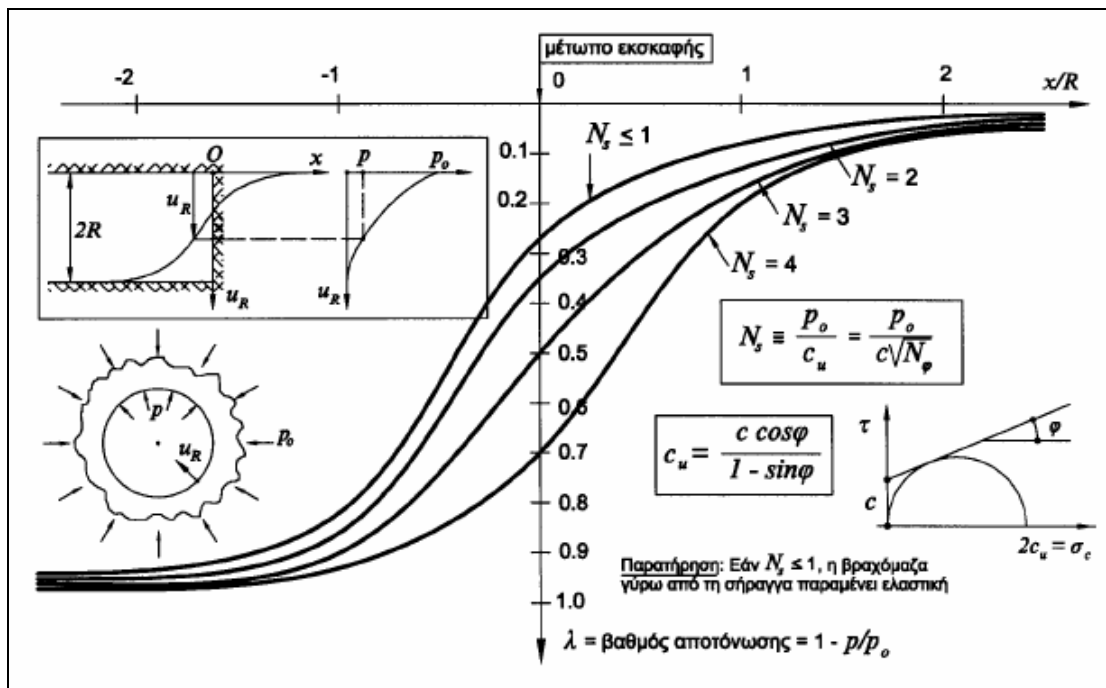


Σχήμα 2.10: Καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης και Καμπύλες Panet σε σήραγγα υποστηριζόμενη με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

Η καμπύλη $x-u_R$ ακολουθεί τη διαδρομή ΑΓΔΕ και η τελική σύγκλιση (u_{RE}) είναι μικρότερη από την αντίστοιχη σύγκλιση της ανυποστήρικτης διατομής (u_{Ro}). Αντιστοίχως, στη τελική κατάσταση ισορροπίας (κατάσταση Ε) ασκείται πίεση (p_E) στην προσωρινή υποστήριξη. Εάν (Δ) είναι η κατάσταση κατά τη στιγμή της τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης (σε απόσταση x_d πίσω από το μέτωπο διάνοιξης της σήραγγας), τότε στο σημείο Δ αντιστοιχεί μια τιμή της σύγκλισης (u_{RA}) και μια ισοδύναμη εσωτερική πίεση ($p_Δ$). Ο βαθμός αποτόνωσης (deconfinement ratio) των εδαφικών τάσεων κατά την τοποθέτηση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης ορίζεται από τη σχέση:

$$\lambda \equiv 1 - \frac{p_Δ}{p_o} \quad (2.6)$$

όπου (p_o) είναι η αρχική γεωστατική πίεση και ($p_Δ$) είναι η ισοδύναμη εσωτερική πίεση που αντιστοιχεί στη θέση τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης. Είναι προφανές ότι ο βαθμός αποτόνωσης των τάσεων είναι μικρότερος από τη μονάδα. Το Σχήμα 2.12 παρουσιάζει τη συσχέτιση μεταξύ του βαθμού αποτόνωσης (λ) και της θέσης τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης (Καμπύλες Panet).



Σχήμα 2.11: Τυπικές μορφές των Καμπύλων Panet σε ανυποστήρικτη σήραγγα για διάφορες τιμές του συντελεστή υπερφόρτισης N_s

Ο βαθμός αποτόνωσης (λ), δηλαδή η μείωση της εσωτερικής πίεσης από την αρχική τιμή της (p_o) σε μια μικρότερη τιμή (p) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση της χρονικής υστέρησης στην τοποθέτηση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης σιηράγγων. Πράγματι, μέσω των Καμπύλων Panet, μπορεί να υπολογισθεί η εσωτερική πίεση (p) που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη απόσταση (x) τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης ως προς το μέτωπο διάνοιξης της σήραγγας. Στη συνέχεια, η προσομοίωση της διάνοιξης και υποστήριξης της σήραγγας γίνεται σε δύο φάσεις ως εξής:

1. Η εσωτερική πίεση μειώνεται από (p_o) σε (p). Η σύγκλιση της διατομής που προκύπτει αντιστοιχεί στη μετακίνηση του τοιχώματος πριν από την τοποθέτηση της προσωρινής υποστήριξης.
2. Τοποθετούνται τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης (αγκύρια, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα) και στη συνέχεια η εσωτερική πίεση μειώνεται από την τιμή (p) στο μηδέν. Αυτή η μείωση της εσωτερικής πίεσης προκαλεί κάποια περαιτέρω σύγκλιση του τοιχώματος και φόρτιση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης.

Είναι προφανές ότι όσο αργότερα τοποθετηθούν τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης τόσο μικρότερο φορτίο θα αναλάβουν και τόσο μεγαλύτερη θα είναι η συνολική σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας.

Είναι πολύ χρήσιμο να αναφέρω ότι το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποίησα για την ανάλυση της διάνοιξης και προσωρινής υποστήριξης σιηράγγων σε δύο διαστάσεις (δηλαδή στο επίπεδο της διατομής της σήραγγας) δεν επιτρέπει την απομείωση των εσωτερικών τάσεων κατά το βαθμό αποτόνωσης (λ): $p = p_o \cdot (1 - \lambda)$. Για αυτό το λόγο στη συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποίησα τη μέθοδο της ισοδύναμης χαλάρωσης της βραχώμαζας στο εσωτερικό της σήραγγας (ground loosening method) η οποία αναλύεται στην επόμενη παράγραφο (§2.2.3.2).

2.2.3.2 Μέθοδος ισοδύναμης χαλάρωσης της βραχομάζας

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην αρχή ότι η μείωση του μέτρου ελαστικότητας από την αρχική τιμή (E_o) σε μια μικρότερη τιμή (E) σε μια περιοχή της βραχομάζας και συγκεκριμένα στην περιοχή όπου προβλέπεται να εκσκαφεί η σήραγγα προκαλεί σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας με τον ίδιο τρόπο που θα προκαλούσε η μείωση της εσωτερικής πίεσης από την αρχική τιμή (p_o) σε μια μικρότερη τιμή (p).

Με αυτό τον τρόπο για κάθε φάση εκσκαφής θεωρήσα ένα ζεύγος L_1 και L_2 που ουσιαστικά εκφράζει το ποσοστό μείωσης του μέτρου ελαστικότητας από την τιμή (E_o) σε (E). Δηλαδή, κάθε ζευγάρι L_1 και L_2 αντιστοιχεί σε κάποια μέτρα προσωρινής υποστήριξης. Η αποτόνωση L_1 αναφέρεται στην αρχική αποτόνωση είτε δεξιού είτε αριστερού κλάδου, ενώ η L_2 στη δεύτερη αποτόνωση του ίδιου κλάδου δεξιού ή αριστερού αντίστοιχα. Συνεπώς το ζεύγος κάθε φορά είναι ίδιο και για τους δύο κλάδους απλά το μόνο που αλλάζει είναι η σειρά αποτόνωσης των κλάδων ανάλογα με την αλληλουχία εκσκαφής που εξετάζω. Έχοντας στην ανάλυση μου θεωρήσει τρεις διαφορετικούς τύπους μέτρων προσωρινής υποστήριξης, έχω και τα ανάλογα ζεύγη (L_1 & L_2) τα οποία είναι τα εξής:

1. Ελαφρού (Light) τύπου προσωρινή υποστήριξη το ζεύγος $L_1=0.2$ & $L_2=0.1$
2. Μεσαίου (Medium) τύπου προσωρινή υποστήριξη το ζεύγος $L_1=0.3$ & $L_2=0.15$
3. Βαρέως (Stiff) τύπου προσωρινή υποστήριξη το ζεύγος $L_1=0.4$ & $L_2=0.2$

Η επιλογή των παραπάνω τιμών βασίζεται στην εμπειρία μελετών από αντίστοιχα έργα. Τα ζεύγη L_1 & L_2 αποτελούν το λόγο του μέτρου ελαστικότητας (E) προς την αρχική τιμή του μέτρου ελαστικότητας (E_o) δηλαδή μπορούν να γραφούν και ως εξής :

$$L_1 = L_2 = \frac{E}{E_o} \quad (2.7)$$

Η διάρθρωση του αλγορίθμου δηλαδή του αρχείου *DAT* είναι τέτοια ώστε η ανάλυση μας να ακολουθεί κάποιες συγκεκριμένες στάδια (υποφάσεις). Τα στάδια διάνοιξης των δύο κλάδων παραμένουν τα ίδια, όμως το μόνο που αλλάζει κάθε φορά είναι η αλληλουχία εκσκαφής καθώς και ο βαθμός αποτόνωσης που εφαρμόζεται σε κάθε κλάδο ανάλογα με την στιβαρότητα των μέτρων προσωρινής υποστήριξης.

Ακολουθεί η περιγραφή της διάρθρωσης του αλγορίθμου κατά τη διάνοιξη αρχικά του δεξιού κλάδου και κατόπιν η περίπτωση διάνοιξης αρχικά του αριστερού κλάδου.

Διάνοιξη αρχικά του δεξιού κλάδου

1. Αρχικό στάδιο - Πεδίο αρχικών τάσεων
2. Πρώτη αποτόνωση του δεξιού κλάδου δηλαδή χαλάρωση του εδάφους στην περιοχή που πρόκειται να γίνει εκσκαφή. Θεωρώ ότι η μείωση του μέτρου ελαστικότητας από την αρχική τιμή (E_o) σε μια μικρότερη τιμή (E) στην περιοχή που προβλέπεται να εκσκαφεί η σήραγγα προκαλεί σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας με τον ίδιο τρόπο που θα προκαλούσε η μείωση της εσωτερικής πίεσης από την αρχική τιμή (p_o) σε μια μικρότερη τιμή (p). Η πρώτη αποτόνωση είναι 0.2 για ελαφρού (Light) τύπου υποστήριξη, 0.3 για μεσαίου (Medium) τύπου υποστήριξη και 0.4 για βαρέως (Stiff) τύπου υποστήριξη.
3. Δεύτερη αποτόνωση στο δεξιό κλάδο. Η αποτόνωση που πραγματοποιείται είναι 0.1 για ελαφρού (Light) τύπου υποστήριξη, 0.15 για μεσαίου (Medium) τύπου υποστήριξη και 0.2 για βαρέως (Stiff) τύπου υποστήριξη. Επιπλέον εφαρμόζεται

τμηματική τοποθέτηση του κελύφους (beam elements) δηλαδή εκτοξευόμενου σκυροδέματος για να λάβω υπόψη το χρόνο ωρίμανσης.

4. Πλήρης εκσκαφή του δεξιού κλάδου και τοποθέτηση πλήρους κελύφους (beam elements) δηλαδή εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Ολοκληρώνεται η εκσκαφή της συγκεκριμένης περιοχής της διατομής της σήραγγας. Το βήμα αυτό προσομοιώνεται με πλήρη αφαίρεση του εδαφικού υλικού στη συγκεκριμένη περιοχή της σήραγγας. Με τον τρόπο αυτό προκαλούνται περαιτέρω συγκλίσεις του τοιχώματος της σήραγγας και ανάληψη φορτίων από τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης της διατομής.

Τα ανωτέρω τρία βήματα (βήμα 2,3,4) επαναλαμβάνονται και κατά τη διάνοιξη του δεύτερου κλάδου της σήραγγας που απομένει να εκσκαφεί, δηλαδή του αριστερού στην προκειμένη περίπτωση. Τα βήματα 2,3,4 αποτελούν στάδια (υποφάσεις) της Φάσης Α (πλήρους εκσκαφής του δεξιού κλάδου) καθώς και της Φάσης Β για την πλήρη εκσκαφή του αριστερού κλάδου αντίστοιχα.

Ακολουθεί η περιγραφή της περίπτωσης της πλήρους εκσκαφής αρχικά του αριστερού κλάδου:

Διάνοιξη αρχικά του αριστερού κλάδου

1. Αρχικό στάδιο – Πεδίο αρχικών τάσεων
2. Πρώτη αποτόνωση του αριστερού κλάδου δηλαδή χαλάρωση του εδάφους στην περιοχή που πρόκειται να γίνει εκσκαφή. Θεωρώ ότι η μείωση του μέτρου ελαστικότητας από την αρχική τιμή (E_0) σε μια μικρότερη τιμή (E) στην περιοχή που προβλέπεται να εκσκαφεί η σήραγγα προκαλεί σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας με τον ίδιο τρόπο που θα προκαλούσε η μείωση της εσωτερικής πίεσης από την αρχική τιμή (p_0) σε μια μικρότερη τιμή (p). Η πρώτη αποτόνωση είναι 0.2 για ελαφρού (Light) τύπου υποστήριξη, 0.3 για μεσαίου (Medium) τύπου υποστήριξη και 0.4 για βαρέως (Stiff) τύπου υποστήριξη.
3. Δεύτερη αποτόνωση στον αριστερό κλάδο. Η αποτόνωση που πραγματοποιείται είναι 0.1 για ελαφρού (Light) τύπου υποστήριξη, 0.15 για μεσαίου (Medium) τύπου υποστήριξη και 0.2 για βαρέως (Stiff) τύπου υποστήριξη. Επιπλέον εφαρμόζεται τμηματική τοποθέτηση του κελύφους (beam elements) δηλαδή εκτοξευόμενου σκυροδέματος για να λάβω υπόψη το χρόνο ωρίμανσης.
4. Πλήρης εκσκαφή του αριστερού κλάδου και τοποθέτηση πλήρους κελύφους (beam elements) δηλαδή εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Ολοκληρώνεται η εκσκαφή της συγκεκριμένης περιοχής της διατομής της σήραγγας. Το βήμα αυτό προσομοιώνεται με πλήρη αφαίρεση του εδαφικού υλικού στη συγκεκριμένη περιοχή της σήραγγας. Με τον τρόπο αυτό προκαλούνται περαιτέρω συγκλίσεις του τοιχώματος της σήραγγας και ανάληψη φορτίων από τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης της διατομής.

Τα ανωτέρω τρία βήματα (βήμα 2,3,4) επαναλαμβάνονται και κατά τη διάνοιξη του δεύτερου κλάδου της σήραγγας δηλαδή του δεξιού κλάδου.

2.2.3.3 Διαγράμματα Panet

Με βάση λοιπόν τα διαγράμματα Panet για τη συγκεκριμένη ανάλυση που έγιναν σε λογιστικό φύλλο excel μπορέσαμε να βρούμε σε ποιο βαθμό αποτόνωσης (λ) αντιστοιχεί η μείωση του μέτρου ελαστικότητας (E/E_o).

Αξίζει να τονιστεί ότι τα στοιχεία εισόδου για τα διαγράμματα Panet είναι:

1. Γεωτεχνικές παράμετροι αντοχής της βραχομάζας (Υλικού 3)
2. Βάθος της σήραγγας το οποίο είναι ίσο με 70m
3. Συντελεστής οριζόντιας πίεσης K_o

Το ότι συμμετέχουν οι παράμετροι αντοχής της βραχομάζας (Υλικό 3) οφείλεται στο εξής γεγονός: Στην περίπτωση της γεωμετρίας B το υλικό που σκάβεται είναι το Υλικό 3 και για τους δύο κλάδους της σήραγγας, στην περίπτωση της γεωμετρίας A μπορεί ένα κομμάτι του δεξιού κλάδου να αποτελεί προϊόν κατολίσθησης αλλά το μεγαλύτερο ποσοστό του υλικού που αφαιρείται είναι βραχομάζα (Υλικό 3). Συνεπώς η βραχομάζα είναι το υλικό που μας ενδιαφέρει και συμμετέχει σε μεγαλύτερο βαθμό στη διαδικασία εκσκαφής.

Επιπλέον ο συντελεστής οριζόντιας πίεσης (K_o) συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 0.4-1.0 χωρίς να αποκλείονται και μικρότερες ή μεγαλύτερες τιμές. Ειδικότερα, σε υγιείς βραχομάζες χωρίς επιρροή από τεκτονικές πιέσεις λαμβάνει τιμές 0.6-1.0 ενώ σε αποσθρωμένες βραχομάζες λαμβάνει τιμές 0.4-0.7. Στην περίπτωση όπου η βραχομάζα επηρεάζεται από τεκτονικές πιέσεις ο συντελεστής K_o μπορεί να υπερβαίνει σημαντικά τη μονάδα (έχουν μετρηθεί τιμές έως και 4 στην περίπτωση έντονου θλιπτικού τεκτονικού καθεστώτος) αλλά και να έχει πολύ μικρές τιμές ($K_o = 0-0.3$ στην περίπτωση έντονου εφελκυστικού τεκτονικού καθεστώτος). Η διεθνής εμπειρία δείχνει ότι σε μεγάλα βάθη (άνω των 400-500m) η γεωστατική εντατική κατάσταση είναι πρακτικώς ισότροπη ($K_o = 1$), ενώ αντίθετα, σε μικρά βάθη (100m-400m) συνήθως μετρώνται τιμές του K_o αρκετά μεγαλύτερες από τη μονάδα. Στην περίπτωση μας το K_o έχει επιλεγεί ίσο με 0.75.

Έτσι λοιπόν με βάση τα διαγράμματα Panet που προκύπτουν για την *Ανάλυση I* και *II* για κάθε τιμή (E/E_o) αντιστοιχεί ένας βαθμός αποτόνωσης (λ). Γνωρίζοντας το βαθμό αποτόνωσης λ μπορούμε να υπολογίσουμε τη πίεση (p_i) που ασκείται ως ποσοστό της αρχικής γεωστατικής πίεσης (p_o) όπως φαίνεται παρακάτω.

Ανάλυση I

Ελαφρού (Light) τύπου υποστήριξη

$$\frac{E}{E_o} = L_1 = 0.20 \rightarrow \lambda = 0.52 \Leftrightarrow \left(1 - \frac{p_{i,1}}{p_o}\right) = 0.52 \Leftrightarrow p_{i,1} = 48\% \cdot p_o \quad (2.8)$$

$$\frac{E}{E_o} = L_2 = 0.10 \rightarrow \lambda = 0.7 \Leftrightarrow \left(1 - \frac{p_{i,2}}{p_o}\right) = 0.7 \Leftrightarrow p_{i,2} = 30\% \cdot p_o \quad (2.9)$$

Μεσαίου (Medium) τύπου υποστήριξη

$$\frac{E}{E_o} = L_1 = 0.30 \rightarrow \lambda = 0.4 \Leftrightarrow \left(1 - \frac{p_{i,1}}{p_o}\right) = 0.4 \Leftrightarrow p_{i,1} = 60\% \cdot p_o \quad (2.10)$$

$$\frac{E}{E_o} = L_2 = 0.15 \rightarrow \lambda = 0.63 \Leftrightarrow \left(1 - \frac{p_{i,2}}{p_o}\right) = 0.63 \Leftrightarrow p_{i,2} = 37\% \cdot p_o \quad (2.11)$$

Βαρέως (Stiff) τύπου υποστήριξη

$$\frac{E}{E_o} = L_1 = 0.40 \rightarrow \lambda = 0.3 \Leftrightarrow \left(1 - \frac{p_{i,1}}{p_o}\right) = 0.3 \Leftrightarrow p_{i,1} = 70\% \cdot p_o \quad (2.12)$$

$$\frac{E}{E_o} = L_2 = 0.2 \rightarrow \lambda = 0.52 \Leftrightarrow \left(1 - \frac{p_{i,2}}{p_o}\right) = 0.52 \Leftrightarrow p_{i,2} = 48\% \cdot p_o \quad (2.13)$$

Ανάλυση II**Ελαφρού (Light) τύπου υποστήριξη**

$$\frac{E}{E_o} = L_1 = 0.20 \rightarrow \lambda = 0.52 \Leftrightarrow \left(1 - \frac{p_{i,1}}{p_o}\right) = 0.52 \Leftrightarrow p_{i,1} = 48\% \cdot p_o \quad (2.14)$$

$$\frac{E}{E_o} = L_2 = 0.10 \rightarrow \lambda = 0.725 \Leftrightarrow \left(1 - \frac{p_{i,2}}{p_o}\right) = 0.725 \Leftrightarrow p_{i,2} = 27\% \cdot p_o \quad (2.15)$$

Μεσαίου (Medium) τύπου υποστήριξη

$$\frac{E}{E_o} = L_1 = 0.30 \rightarrow \lambda = 0.4 \Leftrightarrow \left(1 - \frac{p_{i,1}}{p_o}\right) = 0.4 \Leftrightarrow p_{i,1} = 60\% \cdot p_o \quad (2.16)$$

$$\frac{E}{E_o} = L_2 = 0.15 \rightarrow \lambda = 0.625 \Leftrightarrow \left(1 - \frac{p_{i,2}}{p_o}\right) = 0.625 \Leftrightarrow p_{i,2} = 37\% \cdot p_o \quad (2.17)$$

Βαρέως (Stiff) τύπου υποστήριξη

$$\frac{E}{E_o} = L_1 = 0.40 \rightarrow \lambda = 0.3 \Leftrightarrow \left(1 - \frac{p_{i,1}}{p_o}\right) = 0.3 \Leftrightarrow p_{i,1} = 70\% \cdot p_o \quad (2.18)$$

$$\frac{E}{E_o} = L_2 = 0.2 \rightarrow \lambda = 0.52 \Leftrightarrow \left(1 - \frac{p_{i,2}}{p_o}\right) = 0.52 \Leftrightarrow p_{i,2} = 48\% \cdot p_o \quad (2.19)$$

όπου:

λ : ο βαθμός αποτόνωσης

$p_{i,1}$: η ισοδύναμη εσωτερική πίεση κατά τη πρώτη αποτόνωση

$p_{i,2}$: η ισοδύναμη εσωτερική πίεση κατά τη δεύτερη αποτόνωση

Επιπλέον έχει υπολογιστεί και η αρχική γεωστατική πίεση (p_o) η οποία είναι ίδια για την *Ανάλυση I & II* καθώς για τον υπολογισμό της λαμβάνουν μέρος το ειδικό βάρος της βραχομάζας (γ), το βάθος της σήραγγας και ο συντελεστής οριζόντιας πίεσης K_o , τα οποία παραμένουν ίδια και στις δύο αναλύσεις (*Ανάλυση I & II*).

Η τιμή της αρχικής γεωστατικής πίεσης (p_o) είναι:

$$p_o = 1.35 \text{MPa}$$

Γνωρίζοντας την αρχική γεωστατική πίεση μπορούμε πλέον να υπολογίσουμε αριθμητικά τις πιέσεις ($p_{i,1}$ και $p_{i,2}$) για κάθε υποφάση εκσκαφής καθώς και για κάθε τύπο προσωρινής υποστήριξης.

Ανάλυση I

Ελαφρού (Light) τύπου υποστήριξη

$$p_{i,1} = 48\% \cdot p_o = 0.65 \text{MPa} \quad (2.20)$$

$$p_{i,2} = 30\% \cdot p_o = 0.41 \text{MPa} \quad (2.21)$$

Μεσαίου (Medium) τύπου υποστήριξη

$$p_{i,1} = 60\% \cdot p_o = 0.81 \text{MPa} \quad (2.22)$$

$$p_{i,2} = 37\% \cdot p_o = 0.50 \text{MPa} \quad (2.23)$$

Βαρέως (Stiff) τύπου υποστήριξη

$$p_{i,1} = 70\% \cdot p_o = 0.95 \text{MPa} \quad (2.24)$$

$$p_{i,2} = 48\% \cdot p_o = 0.65 \text{MPa} \quad (2.25)$$

Ανάλυση II

Ελαφρού (Light) τύπου υποστήριξη

$$p_{i,1} = 48\% \cdot p_o = 0.65 \text{MPa} \quad (2.26)$$

$$p_{i,2} = 27\% \cdot p_o = 0.36 \text{MPa} \quad (2.27)$$

Μεσαίου (Medium) τύπου υποστήριξη

$$p_{i,1} = 60\% \cdot p_o = 0.81 \text{MPa} \quad (2.28)$$

$$p_{i,2} = 37\% \cdot p_o = 0.50 \text{MPa} \quad (2.29)$$

Βαρέως (Stiff) τύπου υποστήριξη

$$p_{i,1} = 70\% \cdot p_o = 0.95 \text{MPa} \quad (2.30)$$

$$p_{i,2} = 48\% \cdot p_o = 0.65 \text{MPa} \quad (2.31)$$

2.2.3.4 Εκτίμηση πιθανών μέτρων προσωρινής υποστήριξης από εμπειρικές σχέσεις Hoek και Brown







Οι παραπάνω υπολογισμένες πιέσεις μεταφράζονται σε μέτρα προσωρινής υποστήριξης, τα οποία είναι κατασκευασμένα να τις αντέχουν. Οι Hoek και Brown (1980) και ύστερα οι Brady και Brown (1990) έχουν δημοσιεύσει εμπειρικές εξισώσεις για τον υπολογισμό της μέγιστης φέρουσας ικανότητας διαφόρων συστημάτων υποστήριξης. Τα μέτρα αυτά που λαμβάνονται ονομάζονται στη βιβλιογραφία με τον όρο υποστήριξη (Οικονομόπουλος, 1989). Παρόμοιος είναι και ο όρος support που χρησιμοποιείται στην αντίστοιχη αγγλοσαξονική βιβλιογραφία (Hoek, Kaiser, Bawden, 1995).

Οι διάφοροι τύποι μέτρων προσωρινής υποστήριξης καθώς και οι εξισώσεις που μας δίνουν τη μέγιστη πίεση υποστήριξης (maximum support pressure) απεικονίζονται στα παρακάτω σχήματα (Σχήματα 2.13 & 2.14). Παρατηρώντας προσεκτικά τα δύο σχήματα οι


σχέσεις με τις οποίες υπολογίζεται η μέγιστη φέρουσα ικανότητα κάθε συστήματος υποστήριξης εξαρτάται από τους εξής δύο παράγοντες:

1. Τη διάμετρο D (m) της σήραγγας
2. Την απόσταση s (m) που απέχουν μεταξύ τους τα συστήματα προσωρινής υποστήριξης κατά την τοποθέτησή τους

Επισημαίνω ότι δεν είναι σκοπός μας ο τελικός σχεδιασμός των μέτρων προσωρινής υποστήριξης της υπό μελέτη οδικής σήραγγας, αλλά μια εκτίμηση αυτών. Η εκτίμηση αυτή θα είναι ιδιαίτερη χρήσιμη την εξαγωγή συμπερασμάτων με τα οποία θα μπορούσαμε να συσχετίσουμε τους διάφορους τύπους μέτρων προσωρινής υποστήριξης με τις παραδοχές που έχουμε κάνει στην ανάλυση, τόσο τη γεωμετρική όσο και την παραμετρική.

Support type	Flange width - mm	Section depth - mm	Weight - kg/m	Curve number	Maximum support pressure p_{max} (MPa) for a tunnel of diameter D (metres) and a set spacing of s (metres)
 Wide flange rib	305	305	97	1	$p_{max} = 19.9D^{-1.23}/s$
	203	203	67	2	$p_{max} = 13.2D^{-1.3}/s$
	150	150	32	3	$p_{max} = 7.0D^{-1.4}/s$
 I section rib	203	254	82	4	$p_{max} = 17.6D^{-1.26}/s$
	152	203	52	5	$p_{max} = 11.1D^{-1.33}/s$
 TH section rib	171	138	38	6	$p_{max} = 15.5D^{-1.24}/s$
	124	108	21	7	$p_{max} = 8.8D^{-1.27}/s$
 3 bar lattice girder	220	190	19	8	$p_{max} = 8.6D^{-1.03}/s$
	140	130	18		
 4 bar lattice girder	220	280	29	9	$p_{max} = 18.3D^{-1.02}/s$
	140	200	26		
 Rockbolts or cables spaced on a grid of $s \times s$ metres	34 mm rockbolt			10	$p_{max} = 0.354/s^2$
	25 mm rockbolt			11	$p_{max} = 0.267/s^2$
	19 mm rockbolt			12	$p_{max} = 0.184/s^2$
	17 mm rockbolt			13	$p_{max} = 0.10/s^2$
	SS39 Split set			14	$p_{max} = 0.05/s^2$
	EXX Swelox			15	$p_{max} = 0.11/s^2$
	20mm rebar			16	$p_{max} = 0.17/s^2$
	22mm fibreglass			17	$p_{max} = 0.26/s^2$
	Plain cable			18	$p_{max} = 0.15/s^2$
	Birdcage cable			19	$p_{max} = 0.30/s^2$

Σχήμα 2.12: Εκτίμηση μέγιστης ικανότητας για διάφορα συστήματα υποστήριξης σε σήραγγες κυκλικής διατομής

Support type	Thickness - mm	Age - days	UCS - MPa	Cure number	Maximum support pressure $p_{i\max}$ (MPa) for a tunnel of diameter D (metres)
 Concrete or shotcrete lining	1m	28	35	20	$p_{i\max} = 57.8D^{-0.92}$
	300	28	35	21	$p_{i\max} = 19.1D^{-0.92}$
	150	28	35	22	$p_{i\max} = 10.6D^{-0.97}$
	100	28	35	23	$p_{i\max} = 7.3D^{-0.98}$
	50	28	35	24	$p_{i\max} = 3.8D^{-0.99}$
	50	3	11	25	$p_{i\max} = 1.1D^{-0.97}$
	50	0.5	6	26	$p_{i\max} = 0.6D^{-1.0}$

Σχήμα 2.13 : Εκτίμηση μέγιστης ικανότητας εκτοξευόμενου σκυροδέματος

Γνωρίζοντας από την παραπάνω παράγραφο (§2.2.3.3) την ισοδύναμη εσωτερική πίεση που αντιστοιχεί σε κάθε στάδιο (υποφάση) εκσκαφής, τη διάμετρο της σήραγγας $D = 14m$ και υποθέτοντας ότι η τοποθέτηση κάποιου συστήματος προσωρινής υποστήριξης γίνεται ανά $s = 2m$ προκύπτουν οι εξής εκτιμήσεις προσωρινών μέτρων υποστήριξης για την Ανάλυση I και II.

Ανάλυση I

Ελαφρού (Light) τύπου υποστήριξη

Τα $0.65MPa$ αντιστοιχούν σε:

- 50mm εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αντοχής $35MPa$ όπου:
 $p_{i\max} = 3.8 \cdot D^{-0.99} = 0.28MPa$
- wide flange rib 305mm x 305mm όπου $p_{i\max} = 19.9 \cdot D^{-0.23} / s = 0.39MPa$

Τα $0.41MPa$ αντιστοιχούν σε:

- 50mm εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αντοχής $35MPa$ όπου:
 $p_{i\max} = 3.8 \cdot D^{-0.99} = 0.28MPa$
- TH section rib 124mm x 108mm όπου $p_{i\max} = 8.8 \cdot D^{-1.27} / s = 0.15MPa$

Μεσαίου (Medium) τύπου υποστήριξη

Τα $0.81MPa$ αντιστοιχούν σε:

- 100mm εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αντοχής $35MPa$ όπου:
 $p_{i\max} = 7.3 \cdot D^{-0.98} = 0.55MPa$
- I section rib 203mm x 254mm όπου $p_{i\max} = 17.6 \cdot D^{-1.29} / s = 0.29MPa$

Τα $0.50MPa$ αντιστοιχούν σε:

- 100mm εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αντοχής $35MPa$ όπου:
 $p_{i\max} = 7.3 \cdot D^{-0.98} = 0.55MPa$

Βαρέως (Stiff) τύπου υποστήριξη

Τα $0.95MPa$ αντιστοιχούν σε:

- 150mm εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αντοχής 35MPa όπου:
 $p_{i\max} = 10.6 \cdot D^{-0.97} = 0.82MPa$
- TH section rib 124mm x 108mm όπου $p_{i\max} = 8.8 \cdot D^{-1.27} / s = 0.15MPa$

Τα 0.65MPa αντιστοιχούν σε:

- 100mm εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αντοχής 35MPa όπου:
 $p_{i\max} = 7.3 \cdot D^{-0.98} = 0.55MPa$
- TH section rib 124mm x 108mm όπου $p_{i\max} = 8.8 \cdot D^{-1.27} / s = 0.15MPa$

Ανάλυση II

Ελαφρού (Light) τύπου υποστήριξη

Τα 0.65MPa αντιστοιχούν σε:

- 50mm εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αντοχής 35MPa όπου:
 $p_{i\max} = 3.8 \cdot D^{-0.99} = 0.28MPa$
- wide flange rib 305mm x 305mm όπου $p_{i\max} = 19.9 \cdot D^{-0.23} / s = 0.39MPa$

Τα 0.36MPa αντιστοιχούν σε:

- 50mm εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αντοχής 35MPa όπου:
 $p_{i\max} = 3.8 \cdot D^{-0.99} = 0.28MPa$
- wide flange rib 150mm x 150mm όπου $p_{i\max} = 7.0 \cdot D^{-1.4} = 0.09MPa$

Μεσαίου (Medium) τύπου υποστήριξη

Τα 0.81MPa αντιστοιχούν σε:

- 100mm εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αντοχής 35MPa όπου:
 $p_{i\max} = 7.3 \cdot D^{-0.98} = 0.55MPa$
- I section rib 203mm x 254mm όπου $p_{i\max} = 17.6 \cdot D^{-1.29} / s = 0.29MPa$

Τα 0.50MPa αντιστοιχούν σε:

- 100mm εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αντοχής 35MPa όπου:
 $p_{i\max} = 7.3 \cdot D^{-0.98} = 0.55MPa$

Βαρέως (Stiff) τύπου υποστήριξη

Τα 0.95MPa αντιστοιχούν σε:

- 150mm εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αντοχής 35MPa όπου:
 $p_{i\max} = 10.6 \cdot D^{-0.97} = 0.82MPa$
- TH section rib 124mm x 108mm όπου $p_{i\max} = 8.8 \cdot D^{-1.27} / s = 0.15MPa$

Τα 0.65MPa αντιστοιχούν σε:

- 100mm εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αντοχής 35MPa όπου:

$$p_{i\max} = 7.3 \cdot D^{-0.98} = 0.55MPa$$
- TH section rib 124mm x 108mm όπου $p_{i\max} = 8.8 \cdot D^{-1.27} / s = 0.15MPa$

Σύμφωνα με τους παραπάνω υπολογισμούς προκύπτουν τα εξής μέτρα προσωρινής υποστήριξης:

- Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (shotcrete)

Ο όρος χρησιμοποιείται για σκυροδέματα που συνίστανται από τσιμέντο, νερό και λεπτόκοκκα αδρανή (συνήθως έως 10mm) τα οποία εφαρμόζονται με εκτόξευση δηλαδή με τη βοήθεια πεπιεσμένου αέρα. Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα παρασκευάζεται είτε ως ξηρό μίγμα (dry mix) με προσθήκη νερού στο στόμιο εκτοξέσεως είτε ως υγρό μίγμα (wet mix) όπου η ανάμιξη με νερό γίνεται στον αναδευτήρα κατά την Παρασκευή του μίγματος. Το υγρό μίγμα χρησιμοποιείται συχνότερα στις περιπτώσεις κατανάλωσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε μεγάλες ποσότητες.

- Διάφορα χαλύβδινα πλαίσια και συγκεκριμένα:
 1. wide flange rib
 2. TH section rib
 3. I section rib

Τα χαλύβδινα πλαίσια λειτουργούν κυρίως ως οπλισμός του εκτοξευόμενου σκυροδέματος για την αύξηση της δυσκαμψίας και της πλαστιμότητας του αλλά και για τη βελτίωση της δυνατότητας ανάληψης φορτίων. Τα χαλύβδινα πλαίσια τοποθετούνται κατά τη διατομή της σήραγγας. Τα συγκεκριμένα χαλύβδινα πλαίσια αποτελούν τυποποιημένες διατομές. Το wide flange rib αποτελεί πλατύπελμη διατομή, το TH section rib διατομή τύπου TH και το I section rib διατομή τύπου I. Το χαλύβδινο τόξο (rib) είναι πάντα καμπύλος φορέας και αποτελεί τμήμα του πλαισίου των παραπάνω τριών χαλύβδινων πλαισίων.

2.2.4 Χαρακτηριστικές τιμές συνοχής (c) ζώνης υπολειμματικής αντοχής – ζώνης αστοχίας

Όπως έχω ήδη αναφέρει παραπάνω κάτω από το κύριο σώμα της κατολίσθησης (Υλικό 1) βρίσκεται η ζώνη αστοχίας με υπολειμματική αντοχή (Υλικό 2). Θεωρήσαμε ορθό κατά τη διεξαγωγή της παραμετρικής ανάλυσης να εξετάσουμε δύο χαρακτηριστικές τιμές της συνοχής του υλικού από το οποίο αποτελείται αυτή η ζώνη (ζώνη αστοχίας) μια ελάχιστη και μια μέγιστη. Επιλέξαμε ελάχιστη τιμή συνοχής $c = 0kPa$ και μέγιστη τιμή $c = 15kPa$. Για το συγκεκριμένο υλικό (Υλικό 2) η ελάχιστη τιμή της συνοχής είναι μια λογική τιμή σε αντίθεση με τη μέγιστη την οποία, δύσκολα μπορεί να αποκτήσει. Όμως για το συγκεκριμένο υλικό σκόπιμα επιλέξαμε δύο τιμές συνοχής c διότι θέλαμε να εξετάσουμε τη συμπεριφορά της συγκεκριμένης ζώνης μιας και αυτή η ζώνη στην περίπτωση της γεωμετρίας A αποτελεί κομμάτι του δεξιού κλάδου. Επιπλέον η συγκεκριμένη ζώνη αποτελεί το κομμάτι σύνδεσης μεταξύ της βραχομάζας (Υλικό 3) και του κυρίως σώματος της κατολίσθησης (Υλικό 1) συνεπώς η συμπεριφορά της ενδέχεται να επηρεάσει την ενεργοποίηση της κατολίσθησης.

3 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ – ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Με βάση λοιπόν όλους τους δυνατούς συνδυασμούς της ανάλυσης που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 2) προκύπτουν συνολικά σαράντα οκτώ αναλύσεις. Ο πίνακας που ακολουθεί (Πίνακας 3.1) περιλαμβάνει όλους τους δυνατούς συνδυασμούς της Γεωμετρικής και της Παραμετρικής ανάλυσης.

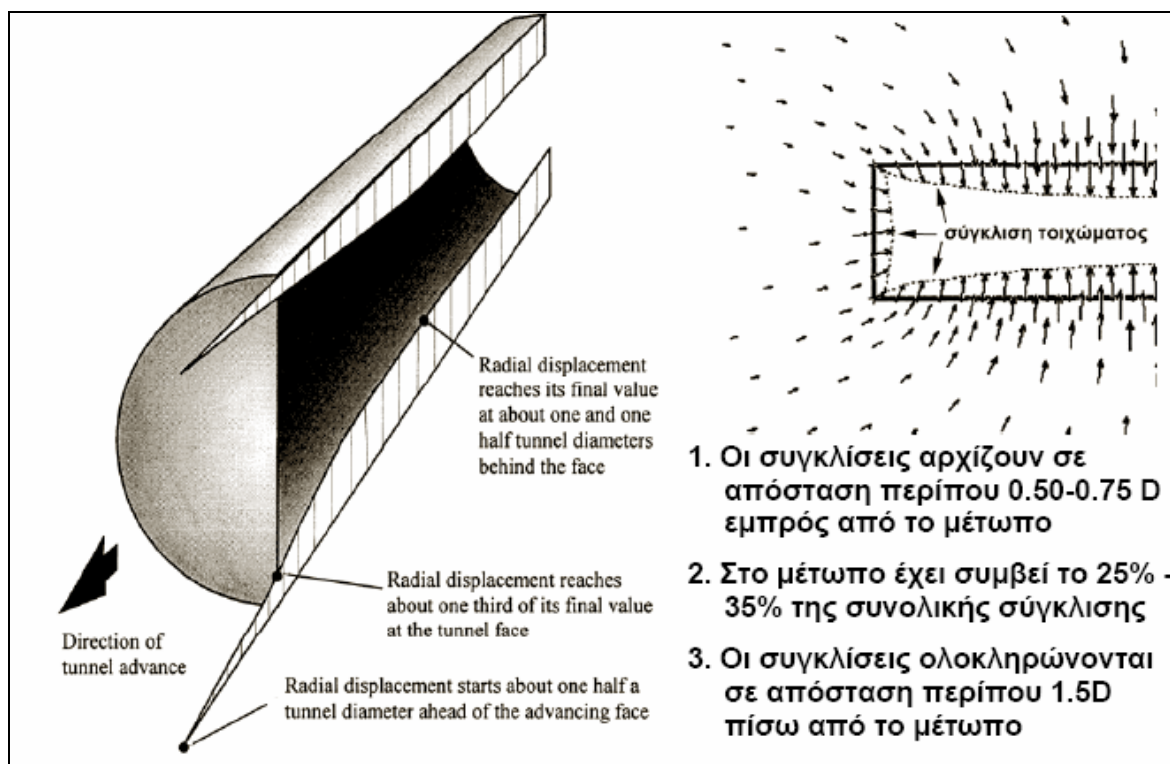
Συνδυασμοί Παραμετρικής & Γεωμετρικής Ανάλυσης				
Γεωμετρία	Ανάλυση	Αλληλουχία εκσκαφής	<i>c</i> (kPa) Υλικού 2	Μέτρα υποστήριξης
A	I	Δεξιός	0	Ελαφρού-Μέσαίου-Βαρέως
A	I	Αριστερός	0	Ελαφρού-Μέσαίου-Βαρέως
A	I	Δεξιός	15	Ελαφρού-Μέσαίου-Βαρέως
A	I	Αριστερός	15	Ελαφρού-Μέσαίου-Βαρέως
A	II	Δεξιός	0	Ελαφρού-Μέσαίου-Βαρέως
A	II	Αριστερός	0	Ελαφρού-Μέσαίου-Βαρέως
A	II	Δεξιός	15	Ελαφρού-Μέσαίου-Βαρέως
A	II	Αριστερός	15	Ελαφρού-Μέσαίου-Βαρέως
B	I	Δεξιός	0	Ελαφρού-Μέσαίου-Βαρέως
B	I	Αριστερός	0	Ελαφρού-Μέσαίου-Βαρέως
B	I	Δεξιός	15	Ελαφρού-Μέσαίου-Βαρέως
B	I	Αριστερός	15	Ελαφρού-Μέσαίου-Βαρέως
B	II	Δεξιός	0	Ελαφρού-Μέσαίου-Βαρέως
B	II	Αριστερός	0	Ελαφρού-Μέσαίου-Βαρέως
B	II	Δεξιός	15	Ελαφρού-Μέσαίου-Βαρέως
B	II	Αριστερός	15	Ελαφρού-Μέσαίου-Βαρέως

Πίνακας 3.1.: Αναλυτική παρουσίαση όλων των δυνατών συνδυασμών Παραμετρικής και Γεωμετρικής ανάλυσης

Αυτό που κατά κύριο λόγο μας ενδιαφέρει στην παρούσα εργασία από τις αναλύσεις είναι οι συγκλίσεις που εμφανίζονται κατά την εκσκαφή και για τους δύο κλάδους της σήραγγας καθώς και οι επιφανειακές μετακινήσεις που προκύπτουν από τη διάνοιξη αυτών. Συνεπώς το κεφάλαιο αυτό χωρίζεται σε δύο μέρη, με το πρώτο να αναφέρεται στις προκαλούμενες συγκλίσεις ενώ το δεύτερο στις επιφανειακές μετακινήσεις. Πριν όμως αναφερθούμε διεξοδικά στα αποτελέσματα της παρούσα ανάλυσης είναι σκόπιμο να γίνει μια συνοπτική περιγραφή κάποιων γενικών θεωρητικών στοιχείων για τις προκαλούμενες συγκλίσεις εκσκαφής αλλά και τις επιφανειακές μετακινήσεις.

3.1 Γενικά Στοιχεία Συγκλίσεων Εκσκαφής

Κατά τη διάνοιξη σήραγγας οι μετατοπίσεις του εδάφους αρχίζουν σε θέσεις αρκετά μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής, δηλαδή πριν αυτό φτάσει σε κάποια συγκεκριμένη θέση. Η παραμόρφωση της βραχομάζας ξεκινά σε απόσταση περίπου $(0.5-0.75)d$ μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής, όπου d είναι η διάμετρος της σήραγγας και αποκτά τη μέγιστη τιμή της σε απόσταση περίπου $1.5d$ πίσω από το μέτωπο εκσκαφής (Hoek, Kaiser, Bawden, 1995). Κατά πόσο οι παραμορφώσεις αυτές προκαλούν ή όχι προβλήματα ευστάθειας στη σήραγγα εξαρτάται από το βαθμό αντοχής της βραχομάζας στο επίπεδο των επί τόπου τάσεων. Εάν η συμπεριφορά του εδάφους παρουσιάζει χαρακτηριστικά έντονης χαλάρωσης (δηλαδή μείωση της αντοχής με παρατεταμένη παραμόρφωση) τότε η διατομή της σήραγγας δεν ισορροπεί, η σύγκλιση της οροφής αυξάνει απεριόριστα και η διατομή καταρρέει. Τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης τοποθετούνται σε κάποια μικρή απόσταση πίσω από το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας. Σκοπός της τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης είναι ο περιορισμός της σύγκλισης του τοιχώματος της σήραγγας, η αποφυγή κατάρρευσης της οροφής καθώς και η αποφυγή αποσφηνώσεων βραχωδών τεμαχίων. Το παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.1) απεικονίζει τη μορφή της παραμόρφωσης της βραχομάζας που περιβάλλει μια υπό διάνοιξη σήραγγα.



Σχήμα 3.1: Μορφή της παραμόρφωσης στη βραχομάζα που περιβάλλει μια υπό διάνοιξη σήραγγα (Hoek, 2000)

3.2 Γενικά Στοιχεία Επιφανειακών Μετακινήσεων

Έχει παρατηρηθεί ότι σε μία ευρύτερη περιοχή του περιβάλλοντος, όπου διανοίγεται μία σήραγγα, αλλά και κατά τη διαδικασία κατασκευής της προκαλούνται μετακινήσεις στις υπερκείμενες εδαφικές μάζες. Αποτέλεσμα αυτών των μετακινήσεων είναι η εκδήλωση καθιζήσεων στην επιφάνεια του εδάφους. Η εκτίμηση του μεγέθους της υποχώρησης της επιφάνειας του εδάφους αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα της κατασκευής υπόγειων έργων λόγω των πιθανών βλαβών που μπορεί να προκαλέσουν.

Οι υποχωρήσεις της επιφάνειας του εδάφους λόγω της κατασκευής υπόγειων εκσκαφών εξαρτώνται από:

1. Το είδος και τα μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους - γεωτεχνικό περιβάλλον
2. Το βάθος του υπόγειου έργου από την επιφάνεια του εδάφους
3. Το μέγεθος της εκσκαφής
4. Τον τρόπο εκσκαφής, δηλαδή τον αριθμό και τις διαστάσεις των φάσεων εκσκαφής, τη χρήση TBM ή NATM κλπ
5. Το είδος, τη πυκνότητα και τον τρόπο εφαρμογής των μέτρων άμεσης υποστήριξης (π.χ. την απόσταση κατασκευής της άμεσης υποστήριξης από το μέτωπο εκσκαφής)
6. Τον τρόπο υποστήριξης του μετώπου εκσκαφής, π.χ. με δοκούς προπορείας (forepoling), με αγκύρια βράχου κατά τον άξονα της σήραγγας κτλ
7. Τη λήψη άλλων μέτρων βελτίωσης του εδάφους, όπως την κατασκευή πιλοτικής σήραγγας, τσιμεντενέσεων κτλ

Από τους ανωτέρω παράγοντες, οι πρώτοι τρεις μπορούν να αναλυθούν ποσοτικά μέσω εμπειρικών ή ημι-αναλυτικών σχέσεων. Οι υπόλοιποι τέσσερις παράγοντες εξαρτώνται από τη συγκεκριμένη περίπτωση κατασκευής και συνεπώς δεν μπορούν να εκτιμηθούν εκ των προτέρων.

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 εκσκαφής. 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 στο χώρο των επιφανειακών καθιζήσεων εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την απώλεια του εδαφικού όγκου που προκύπτει από τη 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.

Στα επόμενα παρουσιάζονται ορισμένες εμπειρικές σχέσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση των υποχωρήσεων της επιφάνειας του εδάφους σε συνθήκες συνθήκες κατασκευής σιράγγων.

Η κατανομή της υποχώρησης (s) της επιφάνειας του εδάφους κατά τη διατομή της σήραγγας (δηλαδή κάθετα στον άξονα της σήραγγας) μπορεί να περιγραφεί από την

ανεστραμμένη καμπύλη της κανονικής κατανομής (καμπύλη του Gauss), όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.34 και δίνεται από τη παρακάτω εξίσωση:

$$s = s_{\max} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2 \cdot i^2}\right)$$

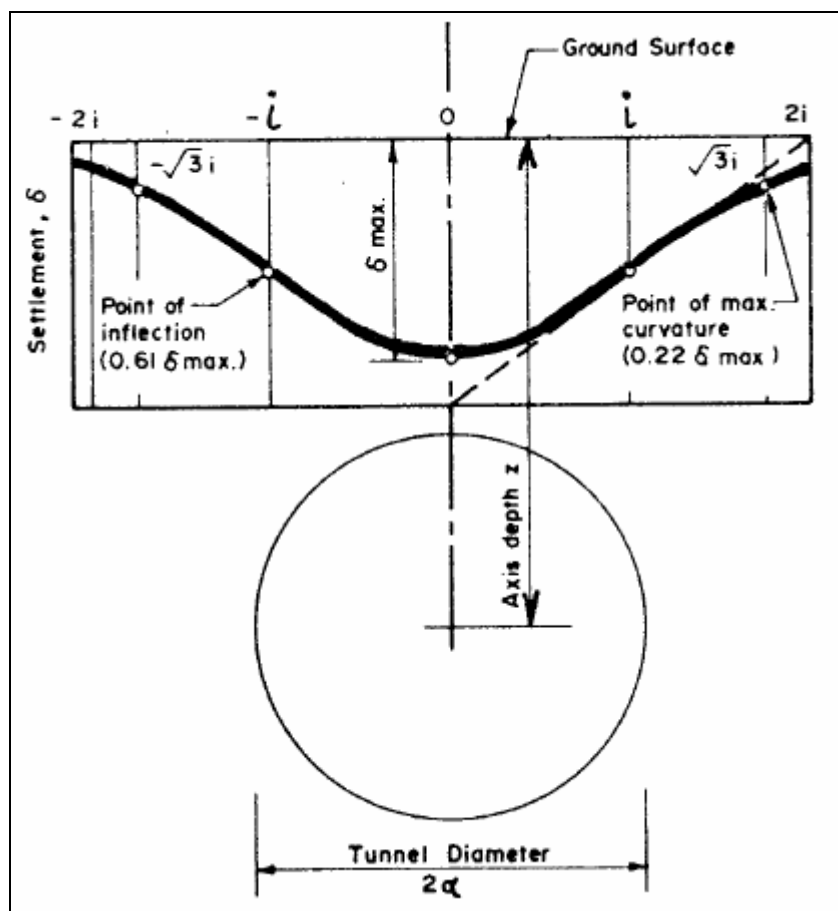
όπου:

x : η οριζόντια απόσταση από τον άξονα της σήραγγας

s_{\max} : η μέγιστη υποχώρηση που συμβαίνει στον άξονα της σήραγγας ($x=0$)

i : η οριζόντια απόσταση από τον άξονα της σήραγγας όπου η καμπύλη της υποχώρησης

παρουσιάζει τη μέγιστη κλίση $\left(\frac{d^2s}{dx^2} = 0\right)$



Σχήμα 3.34: Καμπύλη υποχωρήσεων της επιφάνειας του εδάφους

Από την ανωτέρω σχέση προκύπτει ότι η κλίση της καμπύλης υποχώρησης σε κάποια θέση (x) είναι:

$$\frac{ds}{dx} = \frac{x \cdot s}{i^2}$$

Η μέγιστη κλίση της καμπύλης συμβαίνει για $x=i$ και είναι:

$$\left(\frac{ds}{dx}\right)_{\max} = 0.61 \cdot \frac{s_{\max}}{i} \text{ για } x=i$$

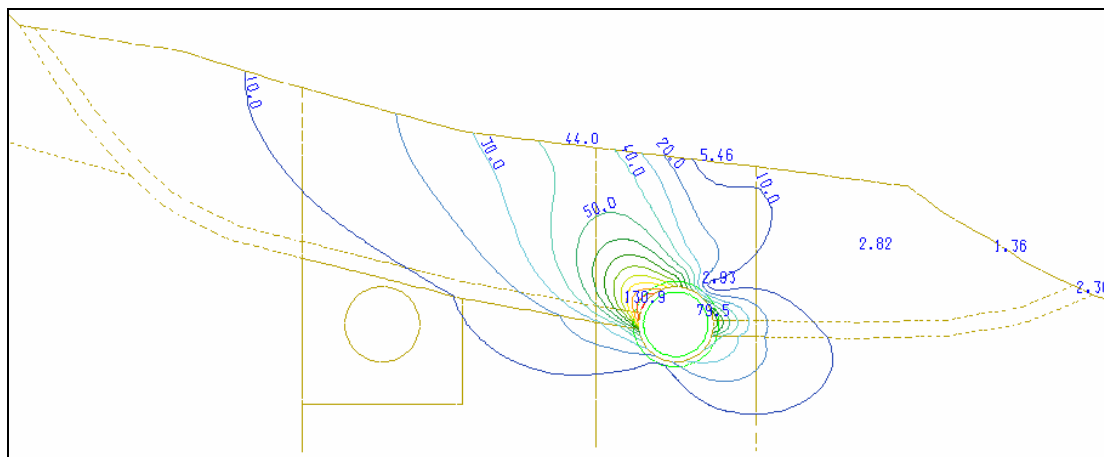
Το ολικό εύρος της καμπύλης υποχώρησης είναι περίπου $6i$, αφού $\frac{s}{s_{\max}} = 0.01$ για $x = \pm 3i$ όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

3.3 Αποτελέσματα Ανάλυσης Συγκλίσεων Εκσκαφής

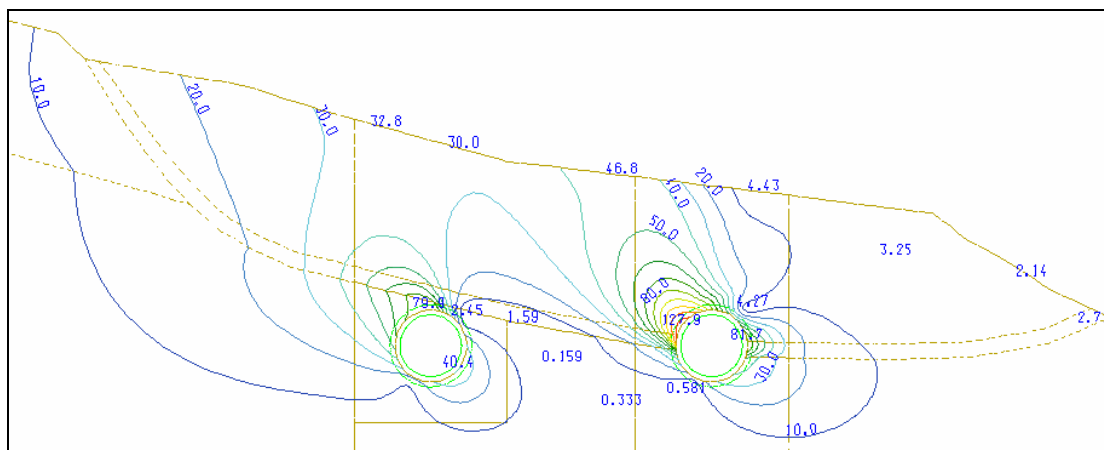
Τα αποτελέσματα από κάθε συνδυασμό ανάλυσης προκύπτουν γραφικά με τη μορφή ισοκαθιζησιακών καμπυλών (isoline) οι οποίες απεικονίζουν την κατανομή των συγκλίσεων εκσκαφής και για τους δύο κλάδους της σήραγγας. Θεωρήσαμε σκόπιμο στο συγκεκριμένο Κεφάλαιο να παρουσιάσουμε τις περιπτώσεις συνδυασμών ανάλυσης στις οποίες προκύπτουν οι ελάχιστες και οι μέγιστες συγκλίσεις αντίστοιχα. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται οι περιπτώσεις ελαφρού (Light) τύπου προσωρινής υποστήριξης καθώς και βαρέως (Stiff) τύπου προσωρινής υποστήριξης. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση ελαφρού (Light) τύπου προσωρινής υποστήριξης η συνοχή (c) της ζώνης αστοχίας με υπολειμματική αντοχή είναι $0kPa$ ενώ η αντίστοιχη (συνοχή) βαρέως (Stiff) τύπου προσωρινής υποστήριξης είναι $15kPa$. Τα δύο παραπάνω στοιχεία του τύπου των μέτρων προσωρινής υποστήριξης καθώς και της συνοχής (c) της ζώνης αστοχίας ισχύουν στην *Ανάλυση I* και *Ανάλυση II*, στη διαφορετική κατασκευαστική αλληλουχία, αλλά και στην περίπτωση της γεωμετρίας A και B.

3.3.1 Συγκλίσεις εκσκαφής για τη γεωμετρία A

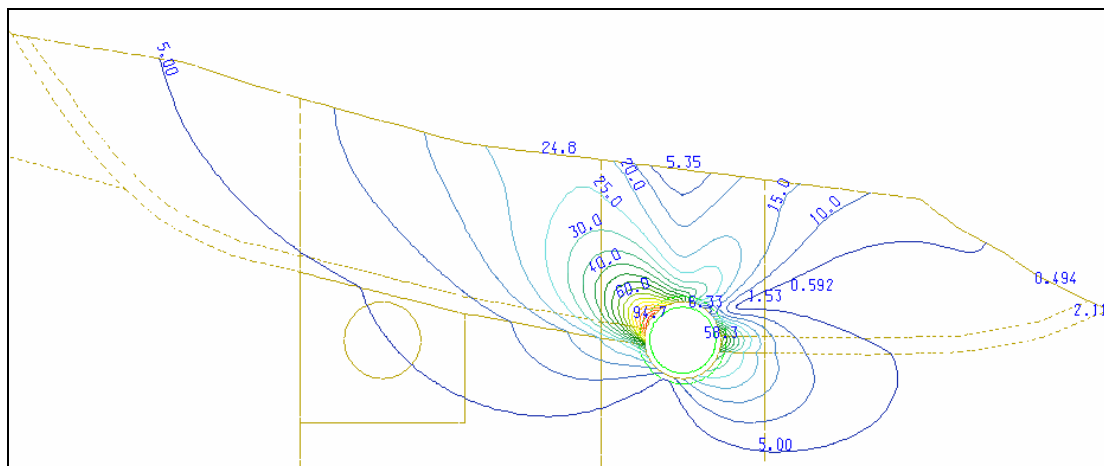
- Ανάλυση I & πλήρης εκσκαφή αρχικά του δεξιού κλάδου



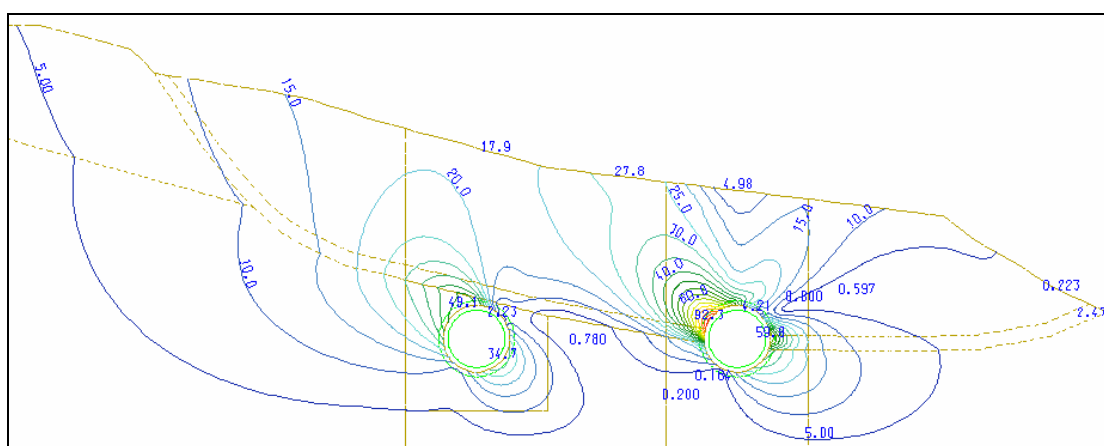
Σχήμα 3.2: Φάση A με ελαφρού τύπου υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας $0kPa$



Σχήμα 3.3: Φάση B με ελαφρού τύπου υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας $0kPa$



Σχήμα 3.4: Φάση Α με βαρέως τύπου υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας 15kPa



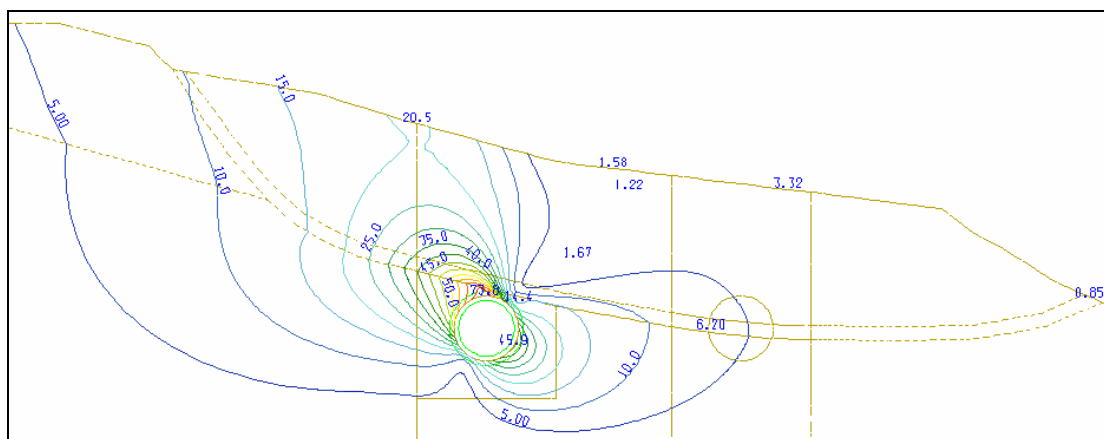
Σχήμα 3.5: Φάση Β με βαρέως τύπου υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας 15kPa

Από τα τέσσερα παραπάνω σχήματα τα οποία αφορούν την *Ανάλυση Ι* (ελάχιστες γεωτεχνικές παράμετροι αντοχής του εδάφους) παρατηρούμε ότι καθοριστικό παράγοντα στις συγκλίσεις εκσκαφής διαδραματίζουν τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης. Όσο πιο στιβαρά μέτρα προσωρινής υποστήριξης θεωρούμε κατά την ανάλυση, τόσο περιορίζεται το μέγεθος των συγκλίσεων.

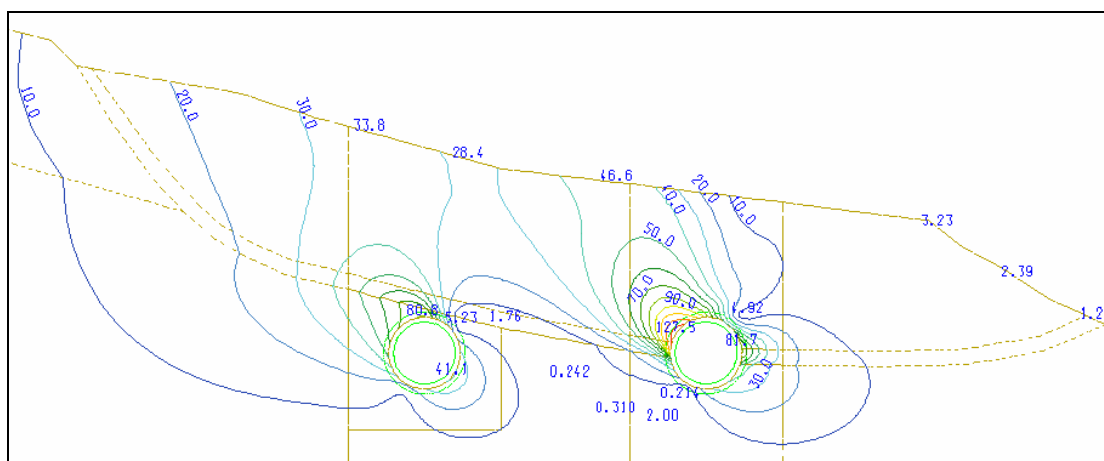
Ειδικότερα, στην περίπτωση ελαφρού τύπου προσωρινής υποστήριξης οι συγκλίσεις στην οροφή του δεξιού κλάδου είναι της τάξης των 13cm ενώ στον αριστερό κλάδο τα 8cm. Αντιθέτως στην περίπτωση θεώρησης βαρέως τύπου μέτρων προσωρινής υποστήριξης κατά την ανάλυση οι συγκλίσεις μειώνονται αισθητά. Για τον δεξιό κλάδο είναι 9.5cm ενώ για τον αριστερό στα 5cm. Το ίδιο ακριβώς ισχύει και για τις εμφανιζόμενες συγκλίσεις στο δάπεδο κάθε κλάδου όπου για την ελαφρού τύπου υποστήριξη είναι της τάξης των 8cm και 4cm για τον δεξιό και τον αριστερό κλάδο αντίστοιχα, ενώ για τοποθέτηση βαρέως τύπου υποστήριξης της τάξης των 6cm και 3.5cm αντίστοιχα. Παρατηρούμε μια ευαισθησία του δεξιού κλάδου της σήραγγας ο οποίος βρίσκεται κατά ένα τμήμα του σε προϊόν κατολίθωσης (ασθενές υλικό) και σαφώς αυτό το γεγονός επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό τις προκαλούμενες συγκλίσεις εκσκαφής.

Επιπλέον η διαφοροποίηση στη τιμή της συνοχής (c) της ζώνης αστοχίας με υπολειμματική αντοχή δεν επιφέρει καμία ουσιαστική μεταβολή στις προκαλούμενες συγκλίσεις. Συγκεκριμένα στον αριστερό κλάδο οι συγκλίσεις για τον ίδιο τύπο προσωρινής υποστήριξης είτε με μέγιστη ή ελάχιστη τιμή είναι ίδιες, για τον δε δεξιό κλάδο είναι της τάξης του χιλιοστού (mm) δηλαδή δεν συμβαίνει καμία ουσιαστική μεταβολή.

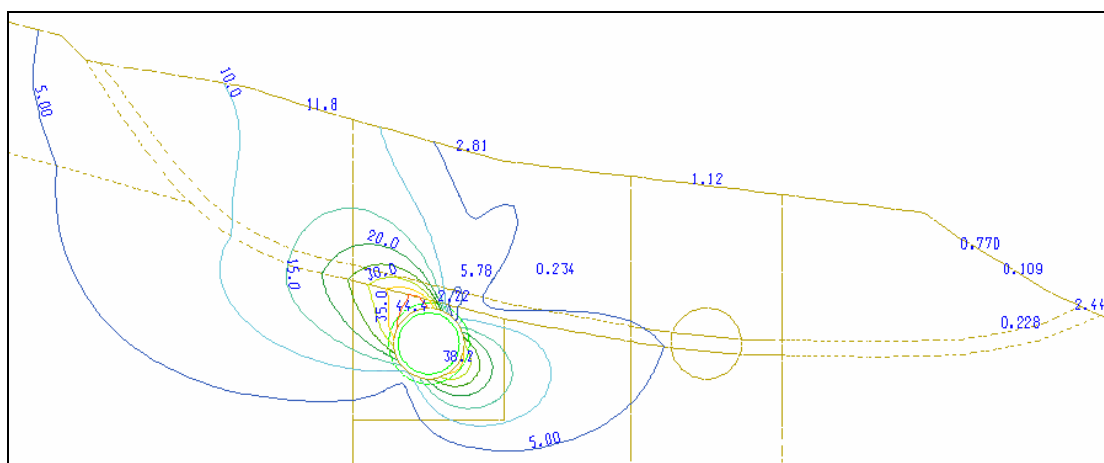
- **Ανάλυση I & πλήρης εκσκαφή αρχικά του αριστερού κλάδου**



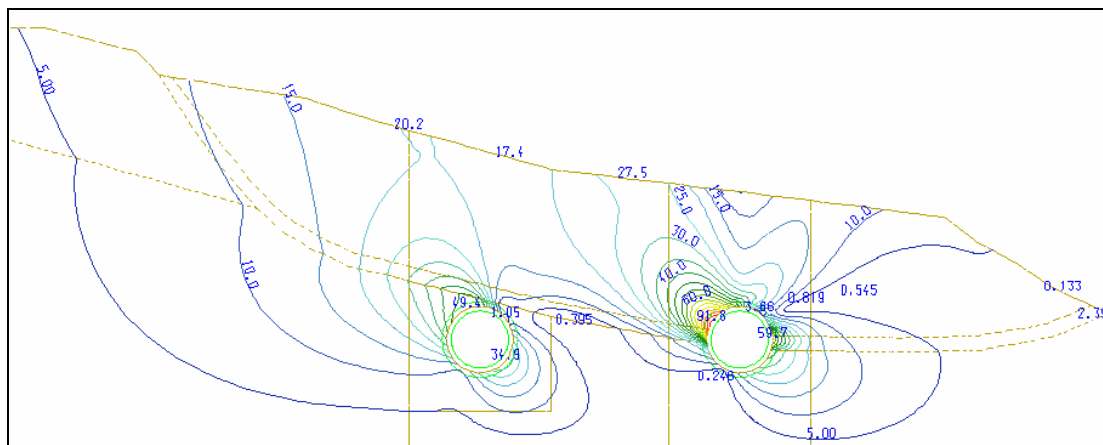
Σχήμα 3.6: Φάση Α με ελαφρού τύπου προσωρινή υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας 0kPa



Σχήμα 3.7: Φάση Β με ελαφρού τύπου προσωρινή υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας 0kPa



Σχήμα 3.8: Φάση Α με βαρέως τύπου προσωρινή υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας 15kPa

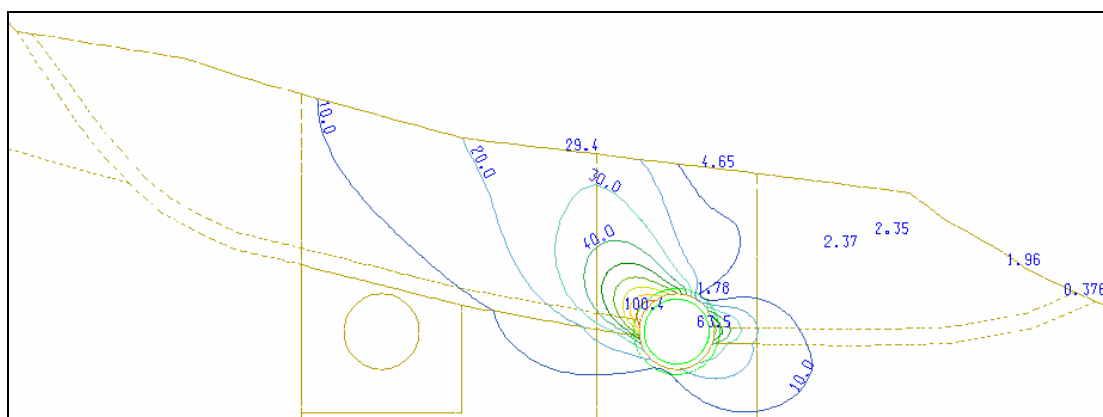


Σχήμα 3.9: Φάση Β με βαρέως τύπου προσωρινή υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας 15kPa

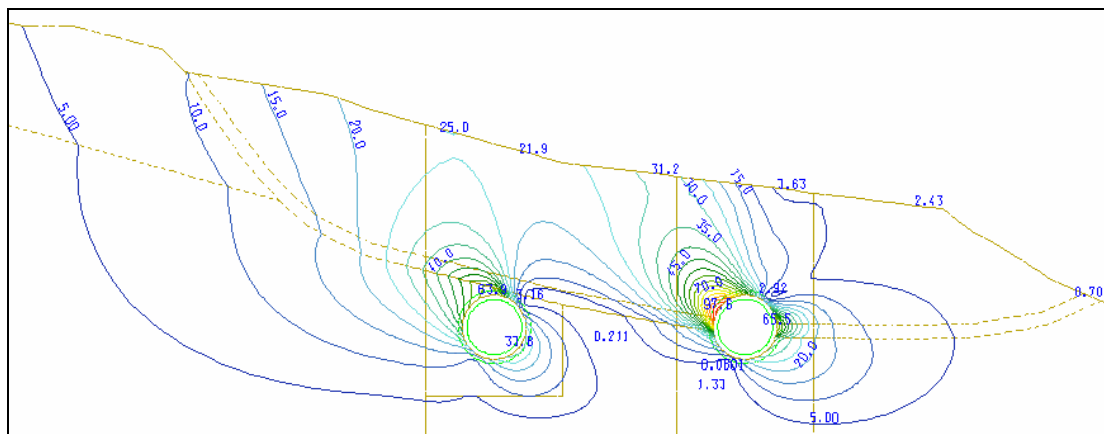
Αναλύοντας την περίπτωση της πλήρους εκσκαφής αρχικά του αριστερού κλάδου παρατηρούμε ότι στη τελική φάση (Φάση Β) όπου και οι δύο κλάδοι έχουν διανοιχθεί πλήρως τα μεγέθη των συγκλίσεων εκσκαφής που προκύπτουν είναι ίδια με αυτά στην περίπτωση που διανοιχθεί αρχικά ο δεξιός κλάδος. Παρόλο που τα τελικά αποτελέσματα είναι ίδια η ειδοποιός διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι στην περίπτωση αυτή (πλήρους εκσκαφής αρχικά του αριστερού κλάδου) ο αριστερός κλάδος φτάνει στην μέγιστη σύγκλιση του κατά τη Φάση Β (πλήρης εκσκαφή και των δύο κλάδων). Αυτό δείχνει ότι η εκσκαφή του δεξιού κλάδου κατά τη Φάση Β ασκεί επιρροή στις συγκλίσεις του ήδη εκσκαμμένου αριστερού κλάδου. Συγκεκριμένα η εκσκαφή του δεξιού κλάδου προκαλεί μια αύξηση περίπου της τάξης του 15% στις προϋπάρχουσες συγκλίσεις εκσκαφής του αριστερού κλάδου.

Επιπλέον και σε αυτή την περίπτωση ο δεξιός κλάδος είναι αυτός που παρουσιάζει τις μεγαλύτερες συγκλίσεις οι οποίες είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με αυτές που προκύπτουν στην περίπτωση της πλήρους εκσκαφής αρχικά του δεξιού κλάδου. Ειδικότερα στην περίπτωση του ελαφρού τύπου προσωρινής υποστήριξης οι συγκλίσεις στην οροφή του δεξιού κλάδου είναι της τάξης των 13cm ενώ για τον αριστερό της τάξης των 8cm, οι δε συγκλίσεις στο δάπεδο είναι της τάξης των 8cm και 4cm αντίστοιχα. Η περίπτωση του βαρέως τύπου προσωρινής υποστήριξης παρουσιάζει αισθητή μείωση στις συγκλίσεις φτάνοντας τα 9cm και 6cm για την οροφή και το δάπεδο του δεξιού κλάδου, τα 5cm και 3.5cm για την οροφή και το δάπεδο του αριστερού κλάδου.

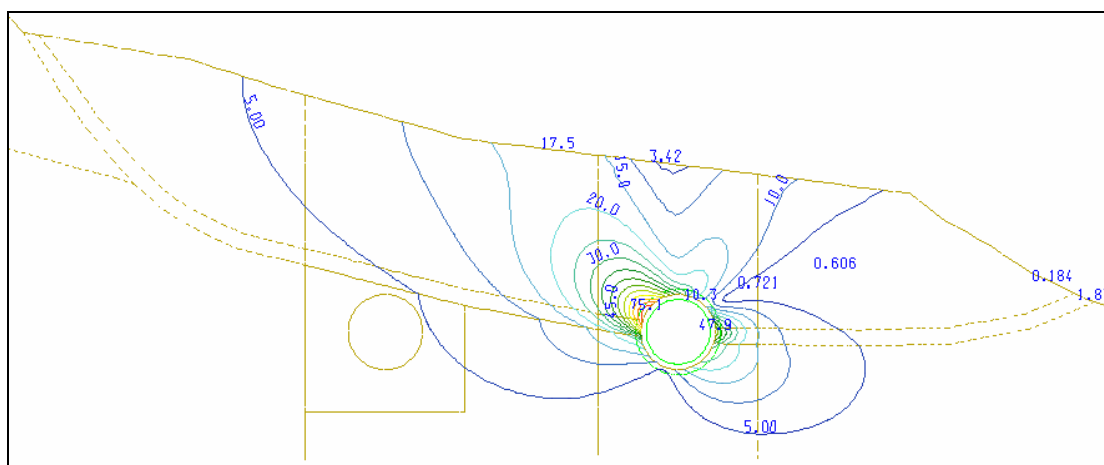
- **Ανάλυση II & πλήρης εκσκαφή αρχικά του δεξιού κλάδου**



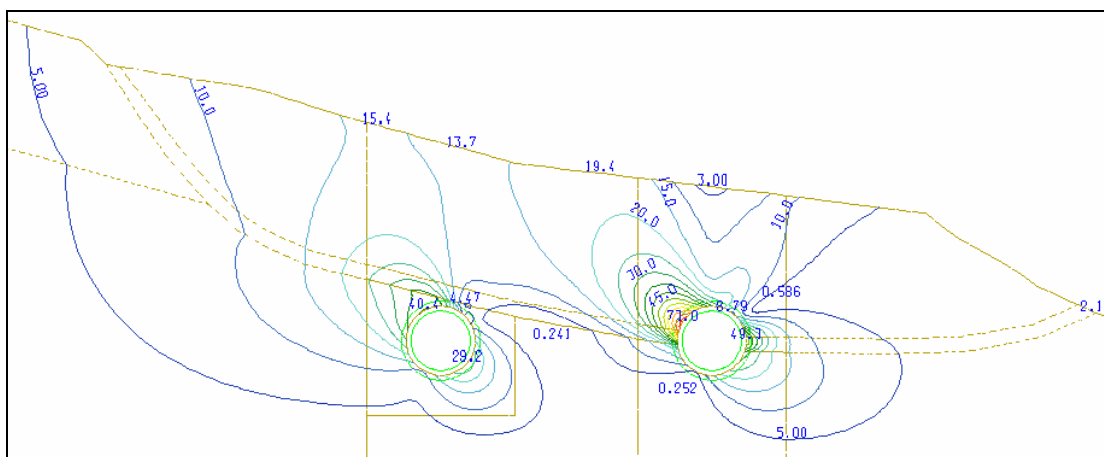
Σχήμα 3.10: Φάση Α με ελαφρού τύπου προσωρινή υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας 0kPa



Σχήμα 3.11: Φάση Β με ελαφρού τύπου προσωρινή υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας 0kPa



Σχήμα 3.12: Φάση Α με βαρέως τύπου προσωρινή υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας 15kPa



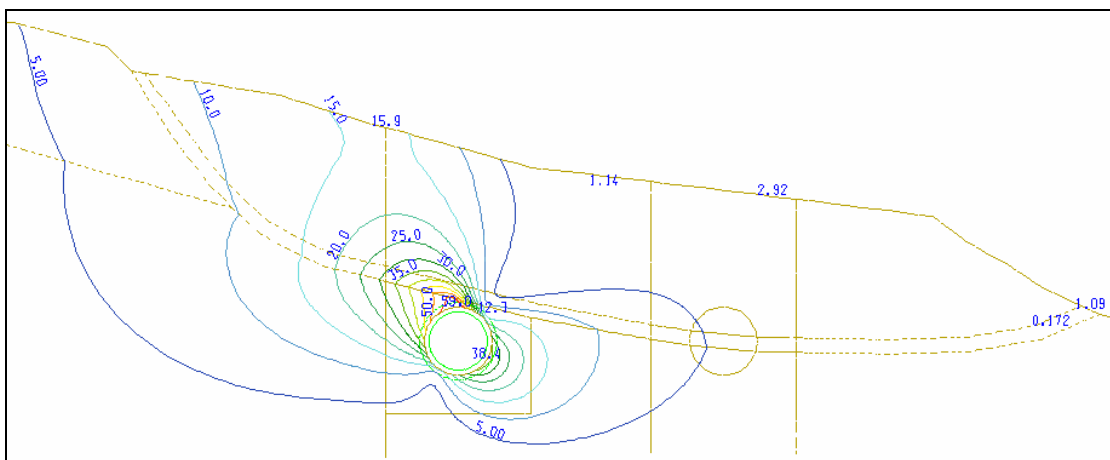
Σχήμα 3.13: Φάση Β με βαρέως τύπου προσωρινή υποστήριξη και συνοχή ζώνης υπολειμματικής αντοχής 15kPa

Στην περίπτωση της *Ανάλυσης II* σαφώς οι συγκλίσεις εκσκαφής που προκύπτουν είναι μικρότερες από την *Ανάλυση I* δεδομένου των μέγιστων τιμών των γεωτεχνικών παραμέτρων αντοχής του εδάφους. Όμως και σε αυτή την περίπτωση καθοριστικός είναι ο ρόλος των μέτρων προσωρινής υποστήριξης τα οποία όσο πιο στιβαρά είναι, τόσο το μέγεθος των συγκλίσεων μειώνεται σημαντικά. Η δυσμενέστερη περίπτωση παρουσιάζει σύγκλιση στην οροφή της τάξης των 10cm ενώ στο δάπεδο 6cm για τον δεξιό κλάδο, ενώ για τον αριστερό 6.5cm και 3.5cm αντίστοιχα. Στην περίπτωση θεώρησης βαρέως τύπου προσωρινής υποστήριξης η μείωση των προκαλούμενων συγκλίσεων από την εκσκαφή

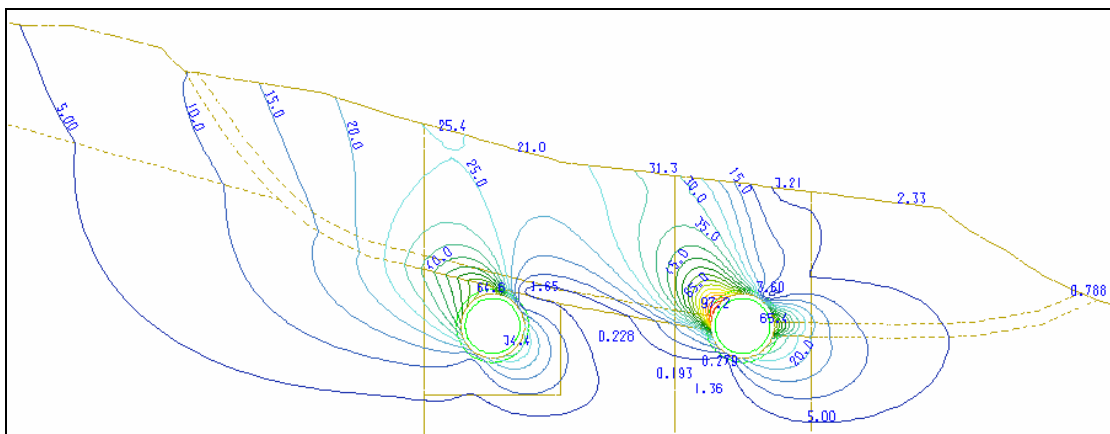
είναι αισθητή. Ειδικότερα για τον δεξιό κλάδο η σύγκλιση στην οροφή είναι της τάξης των 7cm και στο δάπεδο 5cm τη στιγμή που ο αριστερός κλάδος στην οροφή παρουσιάζει σύγκλιση 4cm και στο δάπεδο 3cm .

Ωστόσο η επίδραση της ζώνης κατολίστησης είναι εμφανής στον δεξιό κλάδο της σήραγγας παρόλο που κατά την ανάλυση χρησιμοποιούνται οι μέγιστες τιμές των παραμέτρων αντοχής του εδάφους δεδομένου του μεγέθους των συγκλίσεων εκσκαφής. Και σε αυτή την περίπτωση ο δεξιός κλάδος λαμβάνει την μέγιστη τιμή σύγκλισης κατά τη Φάση Α. Η εκσκαφή δηλαδή του αριστερού κλάδου δεν μεταβάλλει τις συγκλίσεις του εκσκαμμένου κατά τη Φάση Α δεξιού κλάδου συνεπώς η επιρροή του αριστερού κλάδου στις συγκλίσεις του δεξιού κλάδου είναι μηδενική. Με λίγα λόγια ότι σύγκλιση είχε να αποκτήσει ο δεξιός κλάδος την αποκτά κατά την εκσκαφή του και μόνο.

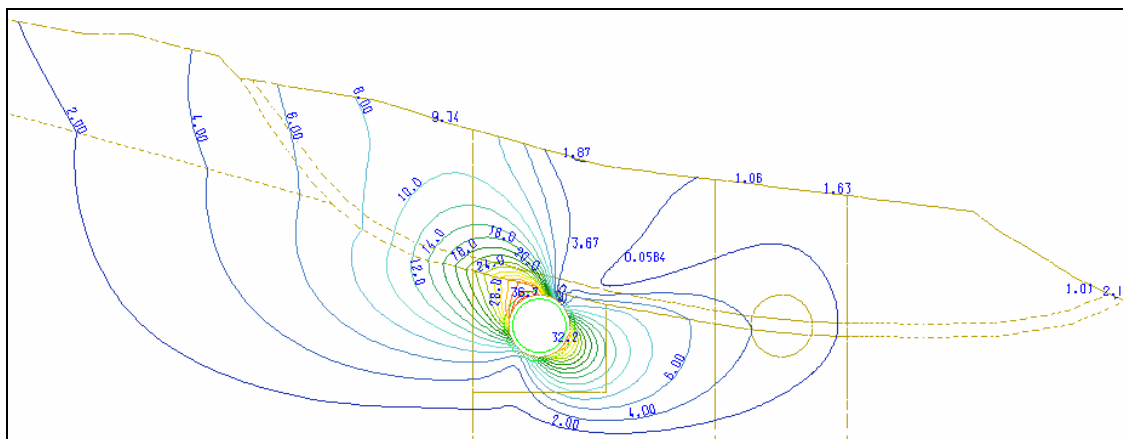
- **Ανάλυση II & πλήρης εκσκαφή αρχικά του αριστερού κλάδου**



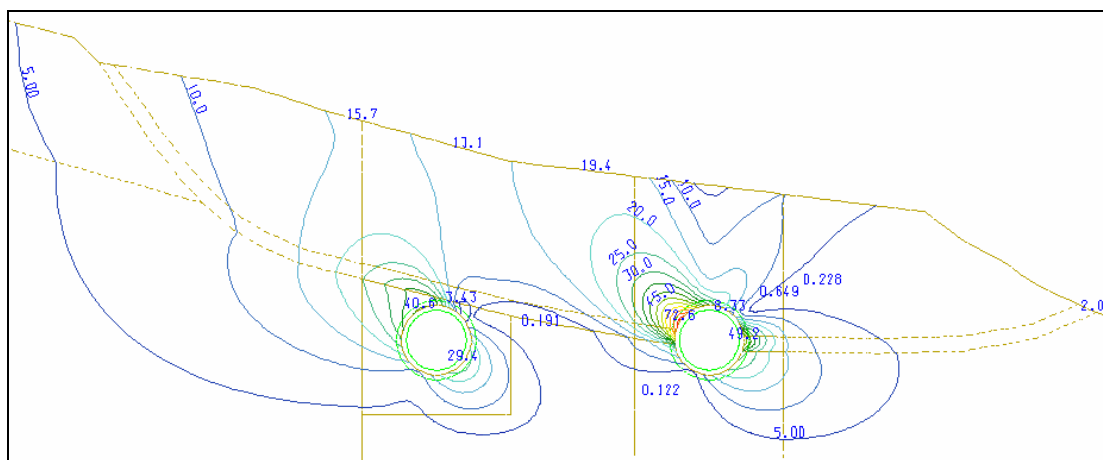
Σχήμα 3.14: Φάση Α με ελαφρού τύπου προσωρινή υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας 0kPa



Σχήμα 3.15: Φάση Β με ελαφρού τύπου προσωρινή υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας 0kPa



Σχήμα 3.16: Φάση Α με βαρέως τύπου προσωρινή υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας 15kPa



Σχήμα 3.17: Φάση Β με βαρέως τύπου προσωρινή υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας 15kPa

Κατά την πλήρη εκσκαφή αρχικά του αριστερού κλάδου παρατηρούμε ότι ο εν λόγω κλάδος λαμβάνει την μέγιστη τιμή συγκλίσεων κατά τη Φάση Β δηλαδή όταν έχει γίνει πλήρης εκσκαφή και των δύο κλάδων της σήραγγας. Δηλαδή η εκσκαφή του δεξιού κλάδου επηρεάζει τις ήδη υπάρχουσες συγκλίσεις του αριστερού κλάδου.

Ειδικότερα, στην περίπτωση του δεξιού κλάδου η σύγκλιση στην οροφή είναι της τάξης των 10cm ενώ στο δάπεδο των 6.5cm, ενώ για τον αριστερό 6.5cm και 3.5cm αντίστοιχα. Αντιθέτως με την παραδοχή τοποθέτησης βαρέως τύπου προσωρινής υποστήριξης η μείωση των προκαλούμενων συγκλίσεων είναι εμφανής. Στον δεξιό κλάδο η σύγκλιση στην οροφή είναι της τάξης των 7cm και στο δάπεδο 5cm τη στιγμή που ο αριστερός κλάδος παρουσιάζει σύγκλιση 4cm και 3cm αντίστοιχα.

Παρατηρώντας συνολικά τα αποτελέσματα της γεωμετρίας Α για την *Ανάλυση Ι* και *Ανάλυση ΙΙ* η εικόνα που μας δίνεται καταρχήν είναι ότι τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης είναι αυτά που κατά κύριο λόγο καθορίζουν το μέγεθος των προκαλούμενων συγκλίσεων. Είναι προφανές ότι όσο πιο στιβαρά μέτρα προσωρινής υποστήριξης εφαρμόζουμε κατά την ανάλυση τόσο πιο πολύ αποφεύγεται η πρόκληση αξιοσημείωτων συγκλίσεων εκσκαφής. Επιπλέον για τη γεωμετρία Α κρίσιμο παράγοντα αποτελεί το γεγονός ότι ο δεξιός κλάδος της σήραγγας βρίσκεται σε ευαίσθητη περιοχή με χαμηλές παραμέτρους αντοχής μιας και το υλικό είναι προϊόν κατολίσθησης (Υλικά 1,2). Το γεγονός αυτό επιδρά αρνητικά στον δεξιό κλάδο ο οποίος κατά ένα τμήμα του χωροθετείται στη ζώνη κατολίσθησης με αποτέλεσμα οι προκαλούμενες συγκλίσεις να είναι σε ιδιαίτερα υψηλά επίπεδα.

Θα ήθελα ωστόσο να προσθέσω ότι στην περίπτωση που εξετάζω τα ίδια μέτρα προσωρινής υποστήριξης αλλά με τιμές συνοχής για τη ζώνη αστοχίας με υπολειμματική αντοχή $c=0kPa$ και $c=15kPa$ η διαφορά στις συγκλίσεις για τον δεξιό κλάδο είναι μηδαμινές της τάξης του χιλιοστού (mm), για τον δε αριστερό κλάδο δεν υπάρχει διαφορά, εξαιτίας της μη εμπλοκής (τομής) αυτού (αριστερού κλάδου) με την ζώνη κατολίσθησης.

Μια άλλη σημαντική λεπτομέρεια που αναδεικνύεται είναι η επιρροή (αλληλεπίδραση) του ενός κλάδου στον άλλο. Συγκεκριμένα η διάνοιξη του δεξιού κλάδου επηρεάζει τις συγκλίσεις του ήδη εκσκαμένου αριστερού κλάδου, ενώ η διάνοιξη του αριστερού κλάδου δεν επηρεάζει τις συγκλίσεις του ήδη εκσκαμένου δεξιού κλάδου. Θα τολμούσα να πω ότι ο δεξιός κλάδος επηρεάζει τον ίδιο του τον εαυτό μιας και οι συγκλίσεις που έχει να αποκτήσει αποκτούνται ανεξάρτητα από το αν προηγείται ή έπεται ο αριστερός κλάδος.

Αξίζει ωστόσο να σημειωθεί το γεγονός ότι τα γραφήματα των ισοκαθιζησιακών καμπύλων που προκύπτουν παρουσιάζουν μια ομοιογένεια. Συγκεκριμένα ο προσανατολισμός των προκαλούμενων συγκλίσεων και για τους δύο κλάδους της σήραγγας παραμένει ο ίδιος σε όλους τους εξεταζόμενους συνδυασμούς ανάλυσης. Οι προκαλούμενες συγκλίσεις δεν εμφανίζονται ακριβώς στην οροφή και στο δάπεδο όπως συμβαίνει στην περίπτωση που η εκσκαφή γίνεται κάτω από οριζόντιο επίπεδο. Στην υπό μελέτη περιοχή η εκσκαφή γίνεται σε επίπεδο το οποίο παρουσιάζει κάποια κλίση (πρανές) για αυτό το λόγο ο προσανατολισμός των προκαλούμενων συγκλίσεων παρουσιάζει μια στροφή ως προς το οριζόντιο διδιάστατο επίπεδο. Δεν παύει όμως οι προκαλούμενες συγκλίσεις εκσκαφής να εμφανίζονται στο άνω τόξο του μετώπου εκσκαφής δηλαδή στην περιοχή της οροφής και οι αντίστοιχες του κάτω τόξου να αποτελούν τις συγκλίσεις του δαπέδου.

Υπάρχει όμως μια διαφοροποίηση στις συγκλίσεις του δαπέδου του δεξιού κλάδου οι οποίες εμφανίζονται στην περιοχή όπου υπάρχει τομή του δεξιού κλάδου με την ζώνη αστοχίας με υπολειμματική αντοχή. Αντιθέτως στον αριστερό κλάδο οι συγκλίσεις δαπέδου εμφανίζονται λίγο χαμηλότερα. Όντως η παρουσία της ζώνης αστοχίας στον δεξιό κλάδο αποτελεί σημαντική πηγή πρόκλησης συγκλίσεων όχι μόνο στο μέγεθος τους αλλά και στην θέση που παρουσιάζονται αυτές.

Έχοντας πλέον αποκτήσει γενική εικόνα της συμπεριφοράς των συγκλίσεων εκσκαφής για τη γεωμετρία Α ακολουθούν τέσσερις συγκεντρωτικοί πίνακες οι οποίοι παρουσιάζουν τις μέγιστες τιμές των προκαλούμενων συγκλίσεων εκσκαφής και για τους δύο κλάδους της σήραγγας.

Γεωμετρία Α							
Ανάλυση Ι - Διάνοιξη αρχικά του δεξιού κλάδου							
		Συγκλίσεις Κλάδων Σήραγγας (mm)					
		Α φάση		Β φάση			
Τύπος Υποστήριξης	c (kPa)	Δεξιός Κλάδος		Αριστερός Κλάδος		Δεξιός Κλάδος	
Ελαφρύς	0	Οροφή	131	Οροφή	80	Οροφή	128
		Δάπεδο	79	Δάπεδο	40	Δάπεδο	82
Ελαφρύς	15	Οροφή	130	Οροφή	80	Οροφή	127
		Δάπεδο	80	Δάπεδο	40	Δάπεδο	82
Μεσαίος	0	Οροφή	109	Οροφή	60	Οροφή	106
		Δάπεδο	67	Δάπεδο	37	Δάπεδο	68
Μεσαίος	15	Οροφή	108	Οροφή	60	Οροφή	105
		Δάπεδο	66	Δάπεδο	37	Δάπεδο	68
Βαρύς	0	Οροφή	95	Οροφή	49	Οροφή	93
		Δάπεδο	59	Δάπεδο	35	Δάπεδο	60
Βαρύς	15	Οροφή	95	Οροφή	49	Οροφή	92
		Δάπεδο	58	Δάπεδο	35	Δάπεδο	60

Πίνακας 3.2: Μέγιστες συγκλίσεις κλάδων σήραγγας στην περίπτωση γεωμετρίας Α, Ανάλυσης Ι και διάνοιξης αρχικά του δεξιού κλάδου

Γεωμετρία Α							
Ανάλυση Ι - Διάνοιξη αρχικά του αριστερού κλάδου							
		Συγκλίσεις Κλάδων Σήραγγας (mm)					
		Α φάση		Β φάση			
Τύπος Υποστήριξης	c (kPa)	Αριστερός Κλάδος		Αριστερός Κλάδος		Δεξιός Κλάδος	
Ελαφρύς	0	Οροφή	74	Οροφή	81	Οροφή	128
		Δάπεδο	46	Δάπεδο	41	Δάπεδο	82
Ελαφρύς	15	Οροφή	74	Οροφή	81	Οροφή	127
		Δάπεδο	46	Δάπεδο	41	Δάπεδο	82
Μεσαίος	0	Οροφή	55	Οροφή	61	Οροφή	106
		Δάπεδο	41	Δάπεδο	37	Δάπεδο	69
Μεσαίος	15	Οροφή	55	Οροφή	61	Οροφή	105
		Δάπεδο	41	Δάπεδο	37	Δάπεδο	68
Βαρύς	0	Οροφή	44	Οροφή	49	Οροφή	92
		Δάπεδο	38	Δάπεδο	35	Δάπεδο	60
Βαρύς	15	Οροφή	44	Οροφή	49	Οροφή	92
		Δάπεδο	38	Δάπεδο	35	Δάπεδο	60

Πίνακας 3.3: Μέγιστες συγκλίσεις κλάδων σήραγγας στην περίπτωση γεωμετρίας Α, Ανάλυσης Ι και διάνοιξης αρχικά του αριστερού κλάδου

Γεωμετρία Α							
Ανάλυση II - Διάνοιξη αρχικά του δεξιού κλάδου							
		Συγκλίσεις Κλάδων Σήραγγας (mm)					
		Α φάση		B φάση			
Τύπος Υποστήριξης	c (kPa)	Δεξιός Κλάδος		Αριστερός Κλάδος		Δεξιός Κλάδος	
Ελαφρύς	0	Οροφή	100	Οροφή	64	Οροφή	97
		Δάπεδο	63	Δάπεδο	34	Δάπεδο	65
Ελαφρύς	15	Οροφή	100	Οροφή	64	Οροφή	97
		Δάπεδο	63	Δάπεδο	34	Δάπεδο	65
Μεσαίος	0	Οροφή	85	Οροφή	49	Οροφή	83
		Δάπεδο	54	Δάπεδο	31	Δάπεδο	56
Μεσαίος	15	Οροφή	85	Οροφή	49	Οροφή	82
		Δάπεδο	54	Δάπεδο	31	Δάπεδο	55
Βαρύς	0	Οροφή	75	Οροφή	40	Οροφή	73
		Δάπεδο	48	Δάπεδο	29	Δάπεδο	49
Βαρύς	15	Οροφή	75	Οροφή	40	Οροφή	73
		Δάπεδο	48	Δάπεδο	29	Δάπεδο	49

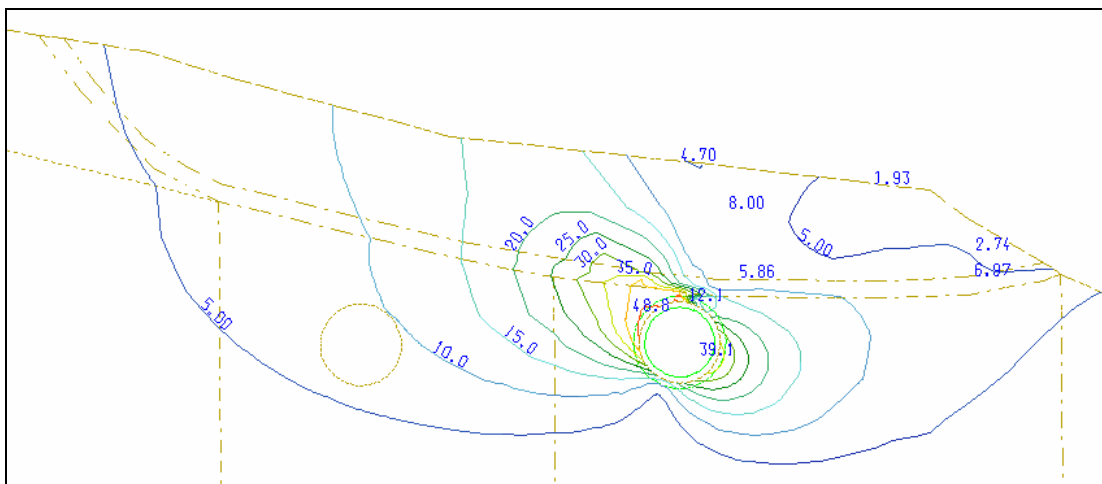
Πίνακας 3.4: Μέγιστες συγκλίσεις κλάδων σήραγγας στην περίπτωση γεωμετρίας Α, Ανάλυσης II και διάνοιξης αρχικά του δεξιού κλάδου

Γεωμετρία Α							
Ανάλυση II - Διάνοιξη αρχικά του αριστερού κλάδου							
		Μέγιστες συγκλίσεις κλάδων σήραγγας (mm)					
		Α φάση		B φάση			
Τύπος Υποστήριξης	c (kPa)	Αριστερός Κλάδος		Αριστερός Κλάδος		Δεξιός Κλάδος	
Ελαφρύς	0	Οροφή	59	Οροφή	65	Οροφή	97
		Δάπεδο	38	Δάπεδο	34	Δάπεδο	65
Ελαφρύς	15	Οροφή	59	Οροφή	65	Οροφή	97
		Δάπεδο	38	Δάπεδο	34	Δάπεδο	65
Μεσαίος	0	Οροφή	45	Οροφή	49	Οροφή	82
		Δάπεδο	35	Δάπεδο	31	Δάπεδο	55
Μεσαίος	15	Οροφή	44	Οροφή	49	Οροφή	82
		Δάπεδο	35	Δάπεδο	31	Δάπεδο	55
Βαρύς	0	Οροφή	37	Οροφή	41	Οροφή	73
		Δάπεδο	32	Δάπεδο	29	Δάπεδο	49
Βαρύς	15	Οροφή	37	Οροφή	41	Οροφή	73
		Δάπεδο	32	Δάπεδο	29	Δάπεδο	49

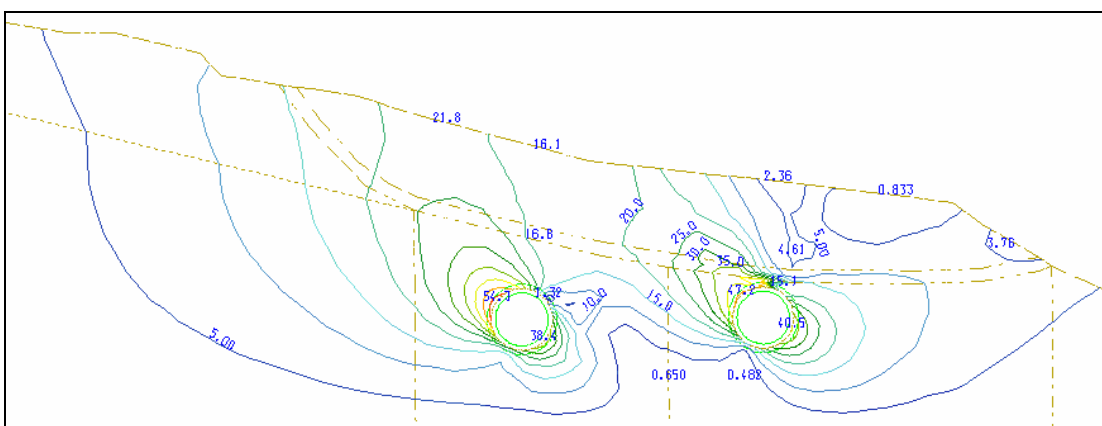
Πίνακας 3.5: Μέγιστες συγκλίσεις κλάδων σήραγγας στην περίπτωση γεωμετρίας Α, Ανάλυσης II και διάνοιξης αρχικά του αριστερού κλάδου

3.3.2 Συγκλίσεις εκσκαφής για τη γεωμετρία Β

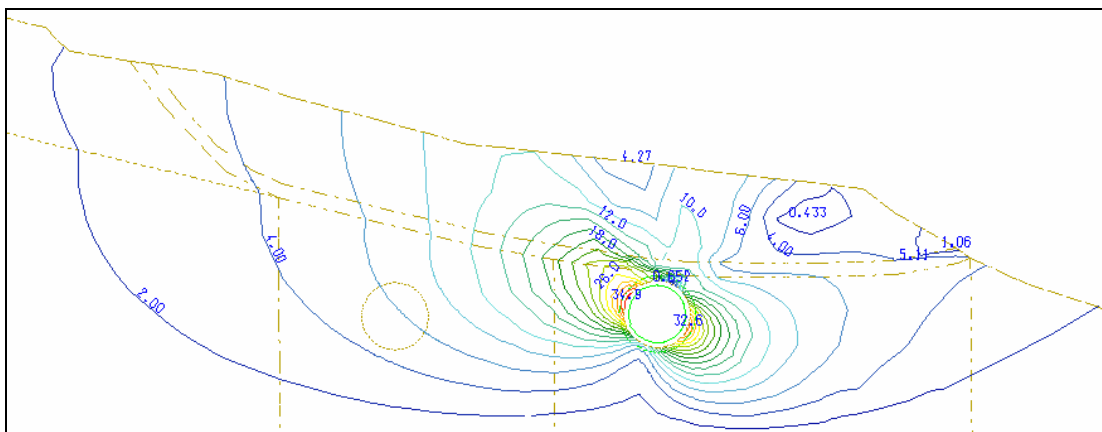
- Ανάλυση I & πλήρης εκσκαφή αρχικά του δεξιού κλάδου



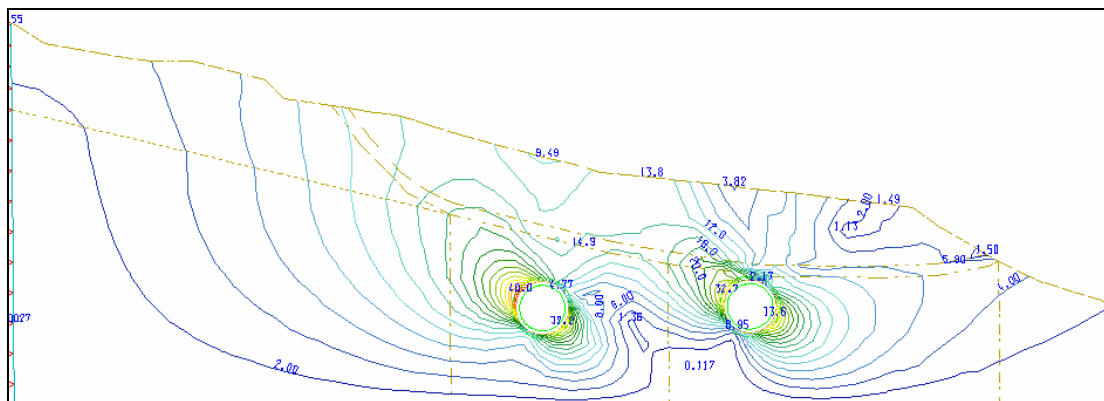
Σχήμα 3.18: Φάση Α με ελαφρού τύπου προσωρινή υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας 0kPa



Σχήμα 3.19: Φάση Β με ελαφρού τύπου προσωρινή υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας 0kPa



Σχήμα 3.20: Φάση Α με βαρέως τύπου προσωρινή υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας 15kPa



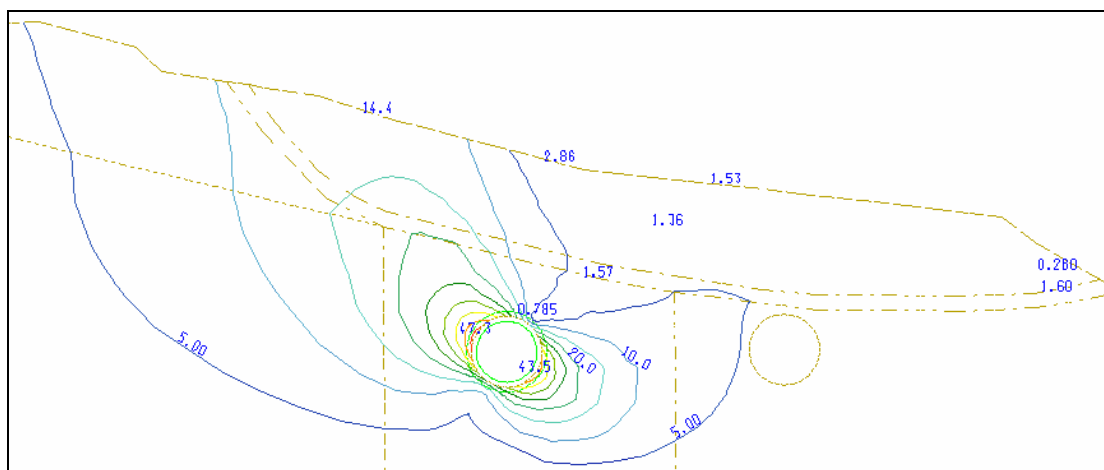
Σχήμα 3.21: Φάση Β με βαρέως τύπου προσωρινή υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας $15kPa$

Αξιολογώντας τα τέσσερα παραπάνω σχήματα παρατηρούμε ότι οι προκαλούμενες συγκλίσεις εκσκαφής είναι αισθητά μειωμένες σε σύγκριση με αυτές που προέκυπταν κατά την ανάλυση της γεωμετρίας Α. Αυτό είναι λογικό δεδομένου ότι στη γεωμετρία Β και οι δύο κλάδοι της σήραγγας βρίσκονται μέσα στη βραχομάζα (Υλικό 3), σε υλικό το οποίο εμφανίζει υψηλότερες παραμέτρους αντοχής εν συγκρίσει με τα υπόλοιπα υλικά της υπό μελέτη διατομής.

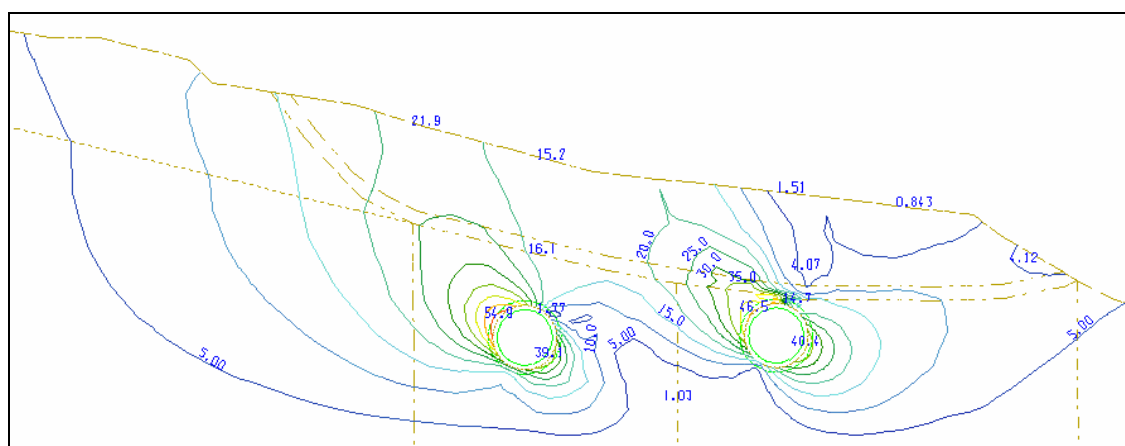
Όμως στην περίπτωση της γεωμετρίας Β οι μεγαλύτερες σε μέγεθος συγκλίσεις εκσκαφής εμφανίζονται στον αριστερό κλάδο της σήραγγας σε αντίθεση με τη γεωμετρία Α όπου ο δεξιός κλάδος εμφάνιζε τις μεγαλύτερες συγκλίσεις. Πράγματι ο αριστερός κλάδος έχει μεγαλύτερο υπερκείμενο συνεπώς οι εδαφικές τάσεις που δέχεται είναι μεγαλύτερες εμφανίζοντας μεγαλύτερες τιμές συγκλίσεων. Οι συγκλίσεις στο δάπεδο και για τους δύο κλάδους παραμένουν στα ίδια επίπεδα με διαφορές της τάξης των μερικών χιλιοστών (2-3mm). Συγκεκριμένα για ελαφρού τύπου προσωρινή υποστήριξη για τον αριστερό κλάδο είναι της τάξης των 5.5cm και 4.0cm για την οροφή και το δάπεδο αντίστοιχα, της τάξης των 4.5cm και 4.0cm για τον δεξιό κλάδο (οροφή & δάπεδο). Η βαρέως τύπου προσωρινή υποστήριξη παρουσιάζει τα ίδια ποιοτικά χαρακτηριστικά με την ελαφρού τύπου υποστήριξη, όμως με τις προκαλούμενες συγκλίσεις ελαφρά μειωμένες. Για το μεν αριστερό κλάδο της τάξης των 4.0cm και 3.0cm (οροφή & δάπεδο αντίστοιχα), για τον δε δεξιό της τάξης των 3.0cm (οροφή & δάπεδο).

Και σε αυτή την περίπτωση ο δεξιός κλάδος αποκτά τις συγκλίσεις που έχει να αποκτήσει κατά τη διάρκεια της εκσκαφής του χωρίς δηλαδή να επηρεάζεται από την εκσκαφή του αριστερού κλάδου. Μπορεί στη γεωμετρία Β ο δεξιός κλάδος να μην τέμνει τη ζώνη αστοχίας με υπολειμματική αντοχή όμως το γεγονός ότι βρίσκεται πολύ κοντά σε αυτή (ζώνη αστοχίας) τον επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό.

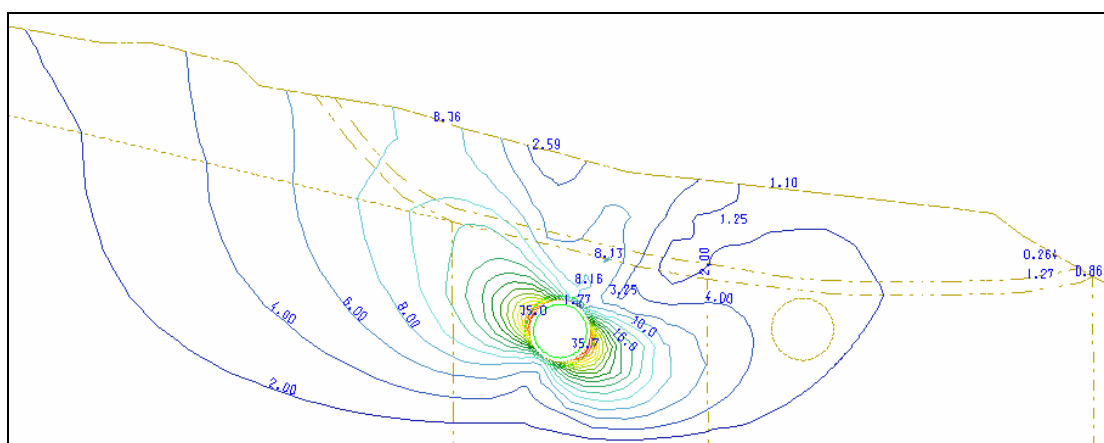
- **Ανάλυση I & πλήρης εκσκαφή αρχικά του αριστερού κλάδου**



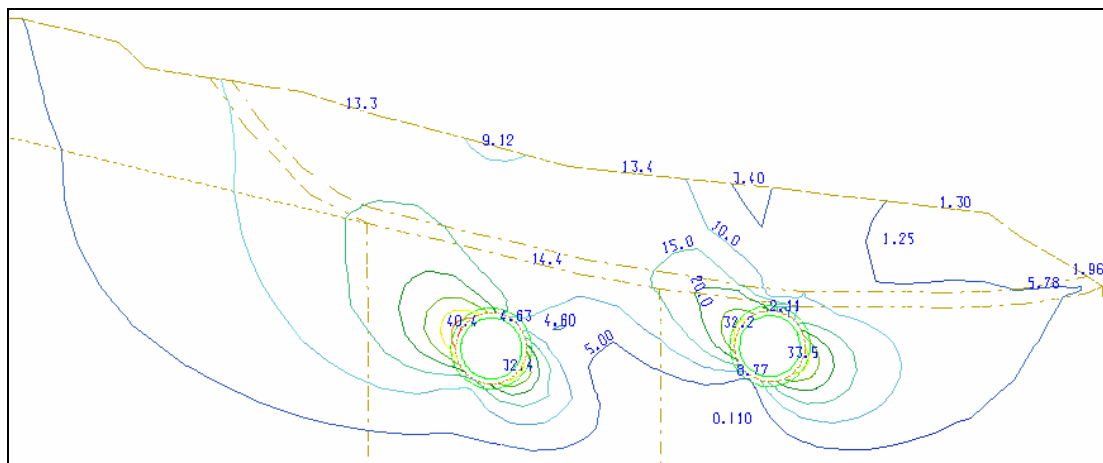
Σχήμα 3.22: Φάση Α με ελαφρού τύπου προσωρινή υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας 0kPa



Σχήμα 3.23: Φάση Β με ελαφρού τύπου προσωρινή υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας 0kPa



Σχήμα 3.24: Φάση Α με βαρέως τύπου προσωρινή υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας 15kPa



Σχήμα 3.25: Φάση Β με βαρέως τύπου προσωρινή υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας 15kPa

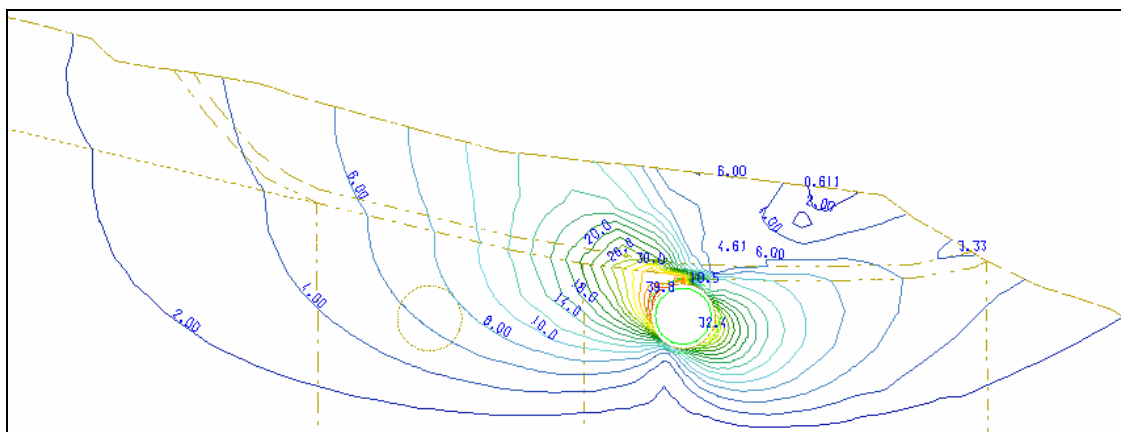
Κατά την πλήρη εκσκαφή αρχικά του αριστερού κλάδου τόσο τα ποιοτικά όσο και τα ποσοτικά χαρακτηριστικά των συγκλίσεων εκσκαφής που προκύπτουν είναι ίδια με την περίπτωση της διάνοιξης αρχικά του δεξιού κλάδου. Όμως σε αυτή την περίπτωση ο αριστερός κλάδος φτάνει στη μέγιστη σύγκλιση του κατά τη Φάση Β δηλαδή αφότου διανοιχθεί ο δεξιός κλάδος δηλαδή υπάρχει αλληλεπίδραση του δεξιού κλάδου στις συγκλίσεις του εκσκαμένου αριστερού κλάδου.

Στην περίπτωση εφαρμογής ελαφρού τύπου προσωρινής υποστήριξης για τον δεξιό κλάδο οι προκαλούμενες συγκλίσεις φτάνουν στην οροφή τα 4.5cm και για το δάπεδο τα 4cm, ο δε αριστερός κλάδος τα 5.5cm και 4cm αντίστοιχα. Η βαρέως τύπου προσωρινή υποστήριξη περιορίζει τις συγκλίσεις για τον δεξιό κλάδο στα 3cm για οροφή και δάπεδο για τον δε αριστερό κλάδο στα 4cm και 3cm αντίστοιχα.

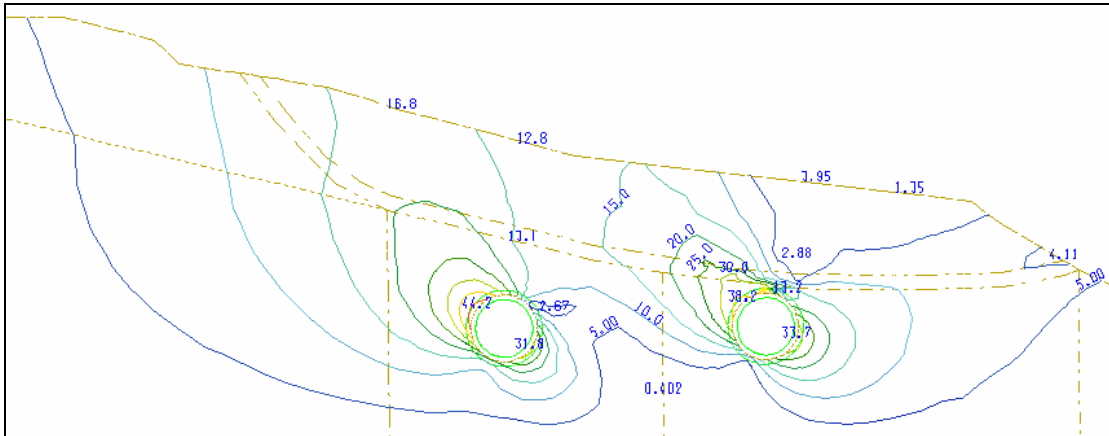
Παρατηρώντας τώρα συνολικά την ανάπτυξη των συγκλίσεων εκσκαφής στην *Ανάλυση I* για τη γεωμετρία Β συμπεραίνω καταρχήν ότι στη γεωμετρία Β σε σχέση με την Α (γεωμετρία) οι συγκλίσεις του δεξιού κλάδου είναι μικρότερες εξαιτίας της ύπαρξης ολόκληρου του κλάδου μέσα στη βραχομάζα, κάτι το οποίο συμβαίνει και στον αριστερό κλάδο. Όμως δεδομένου του μεγαλύτερου υπερκειμένου ο αριστερός κλάδος παρουσιάζει μεγαλύτερες συγκλίσεις στην οροφή.

Ωστόσο δεν υπάρχει διαφορά στο μέγεθος των συγκλίσεων όταν για τα ίδια μέτρα υποστήριξης εξετάζω διαφορετική τιμή της συνοχής (c) της ζώνης αστοχίας με υπολειμματική αντοχή, πολύ περισσότερο που στη γεωμετρία Β η ζώνη αστοχίας με υπολειμματική αντοχή δε μετέχει σε κανένα από τους δύο κλάδους της σήραγγας.

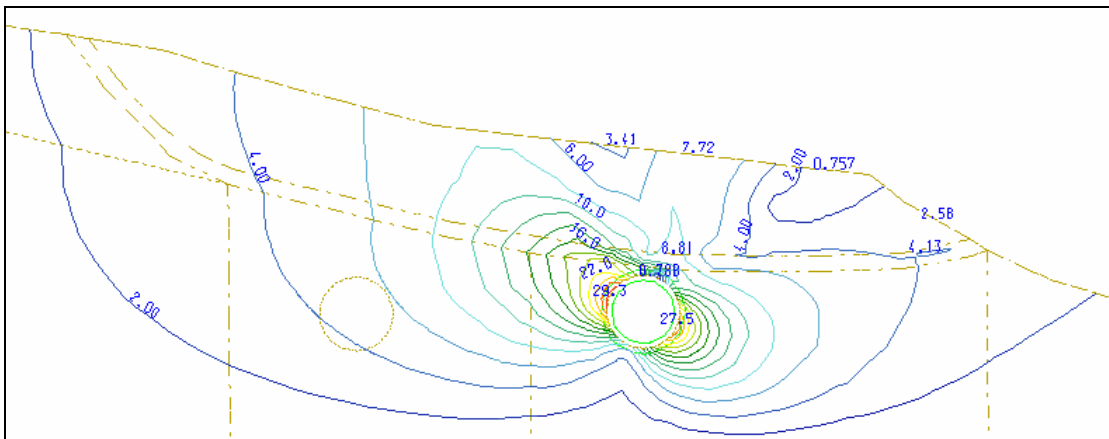
- **Ανάλυση II & πλήρης εκσκαφή αρχικά του δεξιού κλάδου**



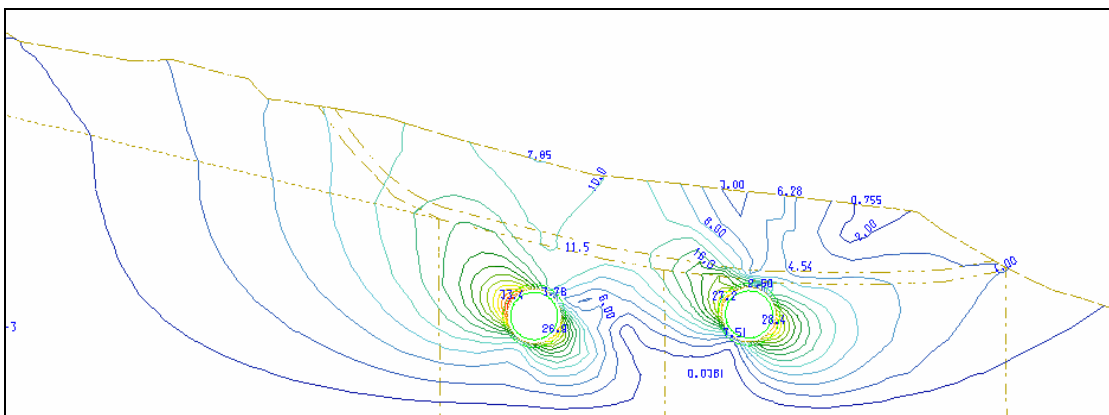
Σχήμα 3.26: Φάση Α με ελαφρού τύπου προσωρινή υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας 0kPa



Σχήμα 3.27: Φάση Β με ελαφρού τύπου προσωρινή υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας 0kPa



Σχήμα 3.28: Φάση Α με βαρέως τύπου προσωρινή υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας 15kPa



Σχήμα 3.29: Φάση Β με βαρέως τύπου προσωρινή υποστήριξη και συνοχή ζώνης υπολειμματικής αντοχής 15kPa

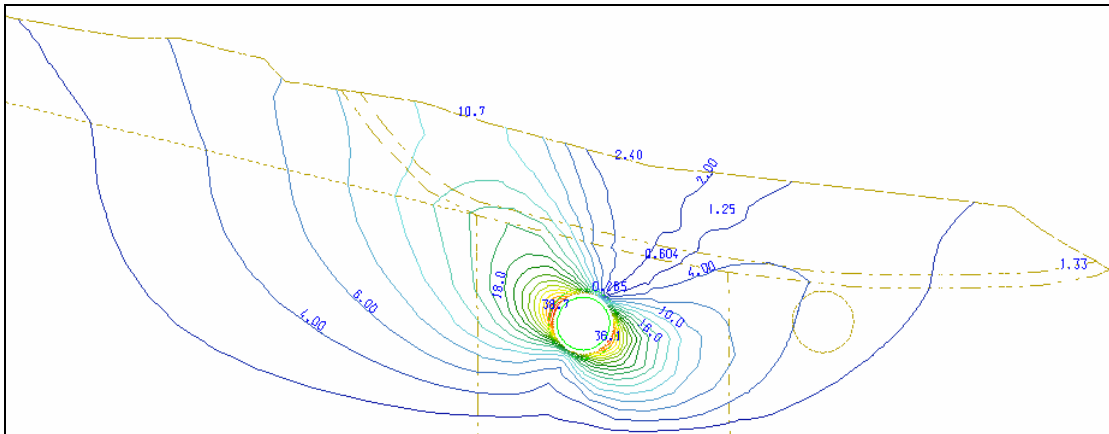
Η *Ανάλυση II* (μέγιστες γεωτεχνικές παράμετροι αντοχής του εδάφους) σε συνδυασμό με τη γεωμετρία Β εμφανίζει τις ελάχιστες συγκλίσεις και για τους δύο κλάδους της σήραγγας. Η ελαφρού τύπου προσωρινή υποστήριξη μας δίνει συγκλίσεις στην οροφή της τάξης των 4.0cm και στο δάπεδο 3.0cm και για τους δύο κλάδους ενώ η βαρέως τύπου υποστήριξη της τάξης των 3.0cm και 2.5cm και για τους δύο κλάδους.

Επιπλέον και σε αυτή την περίπτωση ο δεξιός κλάδος αποκτά τις μέγιστες συγκλίσεις κατά τη Φάση Α κάτι το οποίο δείχνει ότι η παρουσία του εν λόγω κλάδου σε κοντινή

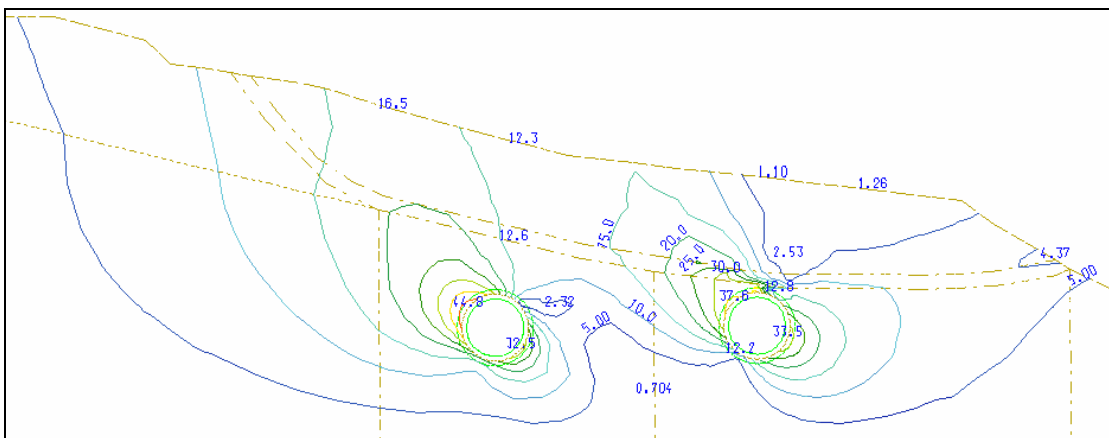
απόσταση με την ζώνη αστοχίας τον επηρεάζει δίνοντας του τις συγκλίσεις που έχει να αποκτήσει ανεξάρτητα από το αν προηγείται ή έπεται η εκσκαφή του αριστερού κλάδου.

Στη γεωμετρία Β η μορφή των προκαλούμενων συγκλίσεων είναι ακριβώς η ίδια δηλαδή οι προκαλούμενες συγκλίσεις εμφανίζονται στην ίδια θέση τόσο για τον δεξιό όσο και τον αριστερό κλάδο. Επισημαίνω αυτή την ποιοτική διαφορά διότι στη γεωμετρία Α η παρουσία του δεξιού κλάδου μέσα στην ζώνη κατολίθησης προκαλούσε συγκλίσεις στο δάπεδο σε άλλη θέση και συγκεκριμένα στην περιοχή τομής της ζώνης αστοχίας με τον εν λόγω κλάδο.

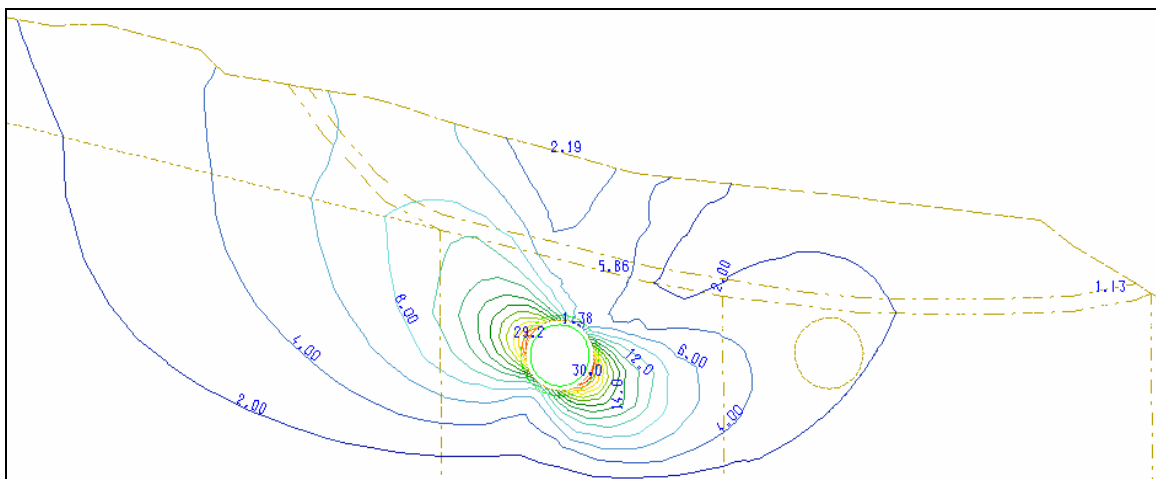
- **Ανάλυση II & πλήρης διάνοιξη αρχικά του αριστερού κλάδου**



Σχήμα 3.30: Φάση Α με ελαφρού τύπου προσωρινή υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας 0kPa



Σχήμα 3.31: Φάση Β με ελαφρού τύπου προσωρινή υποστήριξη και συνοχή ζώνης αστοχίας 0kPa



Γεωμετρία Β							
Ανάλυση Ι - Διάνοιξη αρχικά του δεξιού κλάδου							
		Συγκλίσεις Κλάδων Σήραγγας (mm)					
		Α φάση		Β φάση			
Τύπος Υποστήριξης	c (kPa)	Δεξιός Κλάδος		Αριστερός Κλάδος		Δεξιός Κλάδος	
Ελαφρύς	0	Οροφή	49	Οροφή	54	Οροφή	47
		Δάπεδο	39	Δάπεδο	38	Δάπεδο	40
Ελαφρύς	15	Οροφή	49	Οροφή	54	Οροφή	47
		Δάπεδο	39	Δάπεδο	38	Δάπεδο	40
Μεσαίος	0	Οροφή	40	Οροφή	46	Οροφή	38
		Δάπεδο	35	Δάπεδο	35	Δάπεδο	36
Μεσαίος	15	Οροφή	40	Οροφή	46	Οροφή	38
		Δάπεδο	35	Δάπεδο	35	Δάπεδο	36
Βαρύς	0	Οροφή	35	Οροφή	40	Οροφή	33
		Δάπεδο	32	Δάπεδο	32	Δάπεδο	33
Βαρύς	15	Οροφή	35	Οροφή	40	Οροφή	33
		Δάπεδο	32	Δάπεδο	32	Δάπεδο	33

Πίνακας 3.6: Μέγιστες συγκλίσεις κλάδων σήραγγας στην περίπτωση γεωμετρίας Β, Ανάλυσης Ι και διάνοιξης αρχικά του δεξιού κλάδου

Γεωμετρία Β							
Ανάλυση Ι - Διάνοιξη αρχικά του αριστερού κλάδου							
		Συγκλίσεις Κλάδων Σήραγγας (mm)					
		Α φάση		Β φάση			
Τύπος Υποστήριξης	c (kPa)	Αριστερός Κλάδος		Αριστερός Κλάδος		Δεξιός Κλάδος	
Ελαφρύς	0	Οροφή	47	Οροφή	55	Οροφή	47
		Δάπεδο	43	Δάπεδο	39	Δάπεδο	40
Ελαφρύς	15	Οροφή	47	Οροφή	55	Οροφή	46
		Δάπεδο	43	Δάπεδο	39	Δάπεδο	40
Μεσαίος	0	Οροφή	39	Οροφή	46	Οροφή	37
		Δάπεδο	38	Δάπεδο	35	Δάπεδο	36
Μεσαίος	15	Οροφή	39	Οροφή	46	Οροφή	37
		Δάπεδο	38	Δάπεδο	35	Δάπεδο	36
Βαρύς	0	Οροφή	35	Οροφή	40	Οροφή	32
		Δάπεδο	35	Δάπεδο	32	Δάπεδο	33
Βαρύς	15	Οροφή	35	Οροφή	40	Οροφή	32
		Δάπεδο	35	Δάπεδο	32	Δάπεδο	33

Πίνακας 3.7: Μέγιστες συγκλίσεις κλάδων σήραγγας στην περίπτωση γεωμετρίας Β, Ανάλυσης Ι και διάνοιξης αρχικά του αριστερού κλάδου

Γεωμετρία Β							
Ανάλυση II - Διάνοιξη αρχικά του δεξιού κλάδου							
		Συγκλίσεις Κλάδων Σήραγγας (mm)					
		Α φάση		B φάση			
Τύπος Υποστήριξης	c (kPa)	Δεξιός Κλάδος		Αριστερός Κλάδος		Δεξιός Κλάδος	
Ελαφρύς	0	Οροφή	39	Οροφή	45	Οροφή	38
		Δάπεδο	32	Δάπεδο	32	Δάπεδο	33
Ελαφρύς	15	Οροφή	39	Οροφή	44	Οροφή	38
		Δάπεδο	32	Δάπεδο	32	Δάπεδο	33
Μεσαίος	0	Οροφή	33	Οροφή	38	Οροφή	31
		Δάπεδο	29	Δάπεδο	29	Δάπεδο	30
Μεσαίος	15	Οροφή	33	Οροφή	38	Οροφή	31
		Δάπεδο	29	Δάπεδο	29	Δάπεδο	30
Βαρύς	0	Οροφή	29	Οροφή	33	Οροφή	27
		Δάπεδο	27	Δάπεδο	27	Δάπεδο	28
Βαρύς	15	Οροφή	29	Οροφή	33	Οροφή	27
		Δάπεδο	27	Δάπεδο	27	Δάπεδο	28

Πίνακας 3.8: Μέγιστες συγκλίσεις κλάδων σήραγγας στην περίπτωση γεωμετρίας Β, Ανάλυσης II και διάνοιξης αρχικά του δεξιού κλάδου

Γεωμετρία Β							
Ανάλυση II - Διάνοιξη αρχικά του αριστερού κλάδου							
		Συγκλίσεις Κλάδων Σήραγγας (mm)					
		Α φάση		B φάση			
Τύπος Υποστήριξης	c (kPa)	Αριστερός Κλάδος		Αριστερός Κλάδος		Δεξιός Κλάδος	
Ελαφρύς	0	Οροφή	39	Οροφή	45	Οροφή	38
		Δάπεδο	36	Δάπεδο	32	Δάπεδο	33
Ελαφρύς	15	Οροφή	39	Οροφή	45	Οροφή	38
		Δάπεδο	36	Δάπεδο	32	Δάπεδο	33
Μεσαίος	0	Οροφή	33	Οροφή	38	Οροφή	30
		Δάπεδο	32	Δάπεδο	29	Δάπεδο	30
Μεσαίος	15	Οροφή	33	Οροφή	38	Οροφή	30
		Δάπεδο	32	Δάπεδο	29	Δάπεδο	30
Βαρύς	0	Οροφή	29	Οροφή	33	Οροφή	27
		Δάπεδο	30	Δάπεδο	27	Δάπεδο	28
Βαρύς	15	Οροφή	29	Οροφή	33	Οροφή	27
		Δάπεδο	30	Δάπεδο	27	Δάπεδο	28

Πίνακας 3.9: Μέγιστες συγκλίσεις κλάδων σήραγγας στην περίπτωση γεωμετρίας Β, Ανάλυσης II και διάνοιξης αρχικά του αριστερού κλάδου

3.4 Αποτελέσματα Ανάλυσης Επιφανειακών Μετακινήσεων

Στην παρούσα εργασία αυτό που κατά βάση μας ενδιαφέρει είναι η επιρροή της διάνοιξης των δύο κλάδων της σήραγγας στο επιφανειακό σύνορο. Ο επιφανειακός χώρος πάνω στον οποίο εδράζεται το υπό μελέτη έργο είναι μη αστικό περιβάλλον συνεπώς οι διάφορες αστοχίες που είναι πιθανόν να προκληθούν είναι δευτερεύουσας σημασίας. Αντιθέτως σε περίπτωση ύπαρξης κτιρίων, διάφορων τεχνικών έργων, δικτύων κοινής ωφέλειας θα οφείλαμε να λάβουμε υπόψη τις προκαλούμενες επιφανειακές μετακινήσεις. Όμως στην περίπτωση μας αυτό που θα εξετάσουμε είναι:

1. Η μεταβολή του επιφανειακού συνόρου υπό την επιρροή διάνοιξης των κλάδων της σήραγγας
2. Οι μέγιστες τιμές των επιφανειακών μετακινήσεων

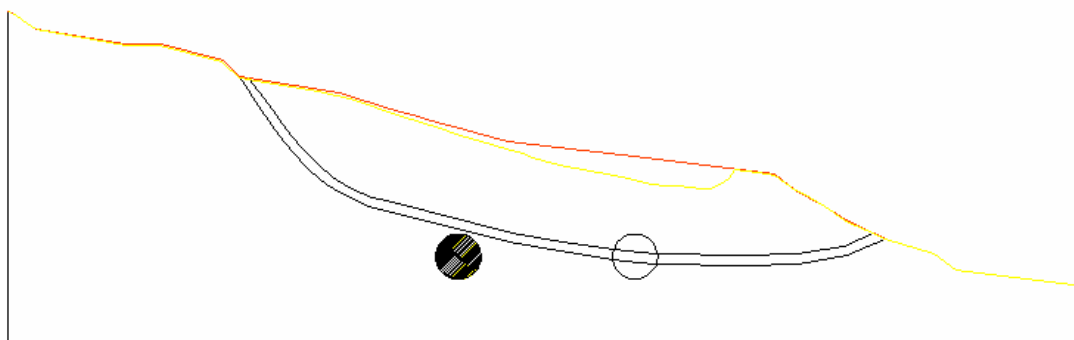
3.4.1 Μεταβολή επιφανειακού συνόρου υπό την επιρροή διάνοιξης των κλάδων της σήραγγας

Στις επόμενες δύο παραγράφους αυτό που πρόκειται να εξετάσουμε, είναι κατά πόσο η διαφορετική ακολουθία-αλληλουχία εκσκαφής επηρεάζει τις προκαλούμενες επιφανειακές μετακινήσεις καθώς και η τελική μορφή του επιφανειακού συνόρου μετά την εκσκαφή των κλάδων. Το λογισμικό στο οποίο εργάστηκα μας δίνει τη δυνατότητα να μελετήσουμε τις επιφανειακές μετακινήσεις με διανύσματα ποικίλων χρωμάτων ανάλογα με το μέγεθος κάθε επιφανειακής μετακίνησης (vector with variable colors) όμως εξαιτίας της πυκνότητας των διανυσμάτων η μορφή των επιφανειακών μετακινήσεων δεν ήταν σαφής συνεπώς θεώρησα προτιμότερο να εργαστώ ως εξής: Στο σχεδιαστικό περιβάλλον *Autocad* σχεδίασα τη μορφή του επιφανειακού συνόρου πριν και μετά τη διάνοιξη των κλάδων της σήραγγας. Με αυτό τον τρόπο η εικόνα της μορφής του επιφανειακού συνόρου υπό την επιρροή της διάνοιξης των κλάδων της σήραγγας είναι ξεκάθαρη. Ακολουθεί σχετική παράγραφος για την περίπτωση της γεωμετρίας A και κατόπιν για την περίπτωση της γεωμετρίας B.

3.4.1.1 Μεταβολή επιφανειακού συνόρου στην περίπτωση γεωμετρίας A

Στη παρούσα παράγραφο εξετάζουμε την περίπτωση της γεωμετρίας A με διαφορετική αλληλουχία-ακολουθία εκσκαφής των κλάδων. Αναλύουμε κυρίως τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των επιφανειακών μετακινήσεων κατά τη Φάση A δηλαδή την περίπτωση πλήρους εκσκαφής του πρώτου κλάδου και κατόπιν την περίπτωση διάνοιξης και του δεύτερου κλάδου (Φάση B).

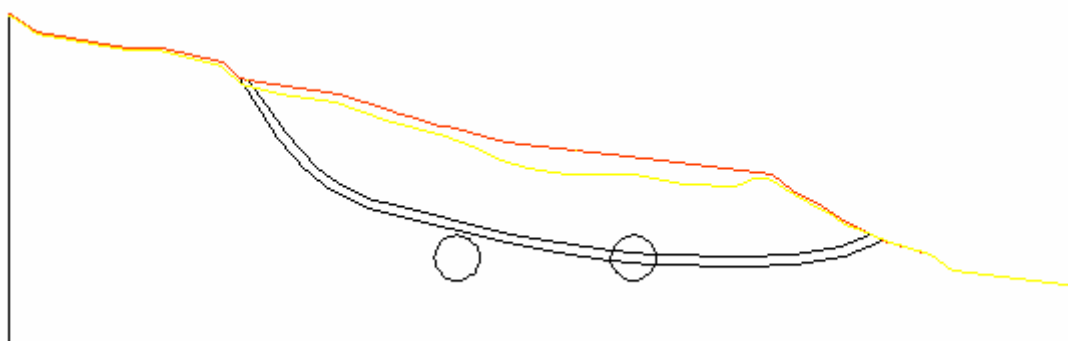
Το επόμενο σχήμα (Σχήμα 3.35) παρουσιάζει τη μορφή του επιφανειακού συνόρου κατά τη Φάση A, αφότου έχει διανοιχθεί ο δεξιός κλάδος της σήραγγας. Αξίζει να επισημανθεί ότι με κόκκινο χρώμα απεικονίζεται το επιφανειακό σύνορο πριν οποιαδήποτε εκσκαφή και με κίτρινο χρώμα η μορφή του επιφανειακού συνόρου μετά την εκσκαφή κάποιου κλάδου ή και των δύο κλάδων ανάλογα με την περίπτωση που εξετάζουμε.



Σχήμα 3.35: Απεικόνιση μεταβολής συνόρου της γεωμετρίας A κατά τη διάνοιξη αρχικά του δεξιού κλάδου της σήραγγας

Παρατηρώντας το παραπάνω σχήμα προκύπτουν τα εξής: Κατά τη Φάση A δηλαδή τη διάνοιξη αρχικά του δεξιού κλάδου παρατηρείται μια τάφρος πάνω από τον εκσκαμμένο δεξιό κλάδο. Επιπλέον είναι αισθητή η επιρροή του δεξιού κλάδου στην περιοχή πάνω από τον αριστερό κλάδο δεδομένου ότι η τάφρος όπως φαίνεται και από το σχήμα αρχίζει να κάνει την εμφάνιση δεξιά του αριστερού κλάδου. Παρόλο που ο αριστερός κλάδος δεν έχει εκσκαφεί η περιοχή πάνω από αυτόν εμφανίζει επιφανειακές μετακινήσεις. Όμως πλησιάζοντας πάνω από τον δεξιό κλάδο η τάφρος αρχίζει να μεγαλώνει αποκτώντας τη μέγιστη τιμή της.

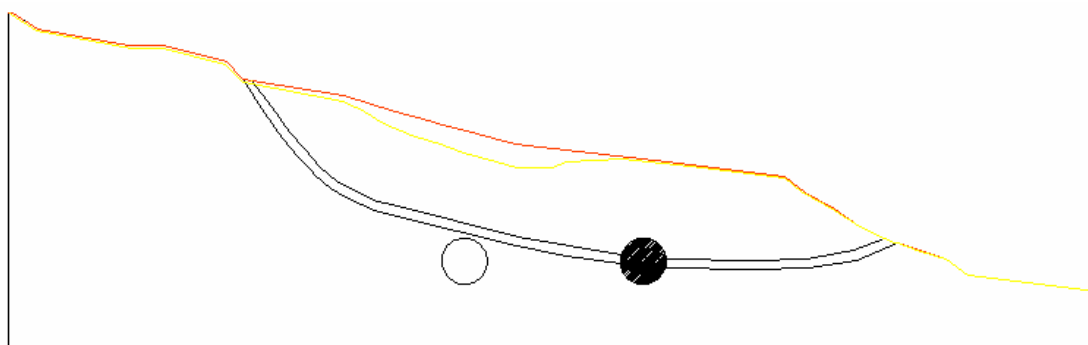
Ωστόσο κατά μήκος του επιφανειακού συνόρου εμφανίζονται επιφανειακές μετακινήσεις οι τιμές των οποίων ποικίλουν ανάλογα με την θέση τους από τους κλάδους της σήραγγας. Αν λόγω χάρη ξεκινήσουμε από το αριστερό άκρο της υπό μελέτη διατομής οι τιμές των επιφανειακών μετακινήσεων είναι της τάξης των μερικών χιλιοστών (2-3mm), ενώ όσο πλησιάζουμε πάνω από τους κλάδους της σήραγγας αρχίζουν να αυξάνονται με μέγιστη τιμή πάνω από τον δεξιό κλάδο. Όσο απομακρυνόμαστε από τον δεξιό κλάδο οι επιφανειακές μετακινήσεις μειώνονται αισθητά.



Σχήμα 3.36: Απεικόνιση μεταβολής συνόρου της γεωμετρίας A κατά τη διάνοιξη και των δύο κλάδων της σήραγγας

Στην περίπτωση της Φάσης B δηλαδή όταν και οι δύο κλάδοι έχουν εκσκαφεί πλήρως παρατηρείται ένα μέγιστο στο μέσο περίπου των δύο κλάδων. Η τάφρος των επιφανειακών καθιζήσεων έχει μια συνέχεια, και στην περιοχή πάνω από τον δεξιό κλάδο εμφανίζεται σαν μια δεύτερη ανεξάρτητη τάφρος. Πλέον η εκσκαφή και του αριστερού κλάδου αυξάνει τις επιφανειακές μετακινήσεις πάνω από τον αριστερό κλάδο. Επιπλέον σε αυτή την περίπτωση στο αριστερό άκρο της διατομής οι επιφανειακές μετακινήσεις εν συγκρίσει με τη Φάση A είναι μεγαλύτερες κάτι το οποίο είναι λογικό δεδομένης της επιρροής του αριστερού κλάδου στην αριστερή πλευρά του επιφανειακού συνόρου.

Αξίζει να σημειωθεί ότι καταλήγοντας στη Φάση Β με εκσκαφή αρχικά είτε του δεξιού είτε του αριστερού κλάδου η τελική μορφή του επιφανειακού συνόρου είναι ίδια κάτι το οποίο θίγεται σε επόμενη παράγραφο όπου εστιάζουμε κυρίως στα ποσοτικά χαρακτηριστικά των προκαλούμενων επιφανειακών μετακινήσεων.

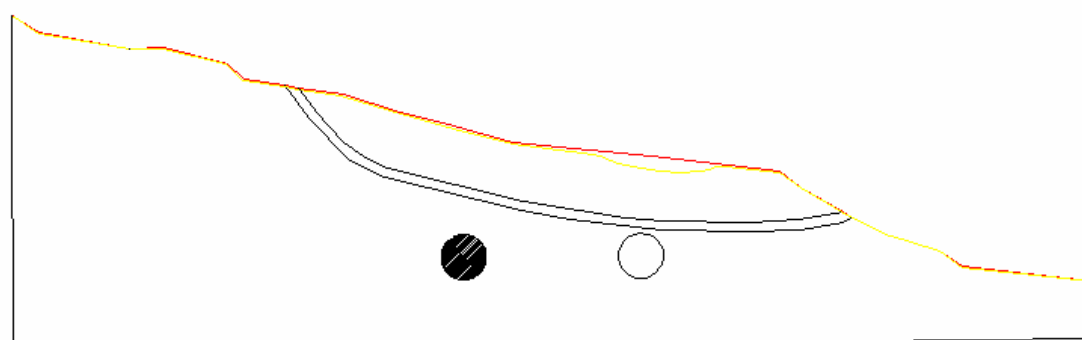


Σχήμα 3.37: Απεικόνιση μεταβολής συνόρου της γεωμετρίας Α κατά τη διάνοιξη αρχικά του αριστερού κλάδου της σήραγγας

Στην περίπτωση διάνοιξης αρχικά του αριστερού κλάδου παρατηρούμε τη δημιουργία τάφρου πάνω από τον αριστερό κλάδο. Η τάφρος αρχίζει να δημιουργείται αριστερά του κλάδου στην προέκταση της διεύθυνσης των συγκλίσεων και όσο πλησιάζει πάνω από τον κλάδο αρχίζει να αυξάνεται αποκτώντας τη μέγιστη τιμή της. Επιπλέον όπως φαίνεται και στο σχήμα η επιρροή του αριστερού κλάδου στην περιοχή πάνω από το μη εκσκαμένο δεξιό κλάδο είναι πάρα πολύ μικρή με αποτέλεσμα οι επιφανειακές μετακινήσεις πάνω από τον δεξιό κλάδο να είναι πάρα πολύ μικρού μεγέθους.

3.4.1.2 Μεταβολή επιφανειακού συνόρου στην περίπτωση γεωμετρίας Β

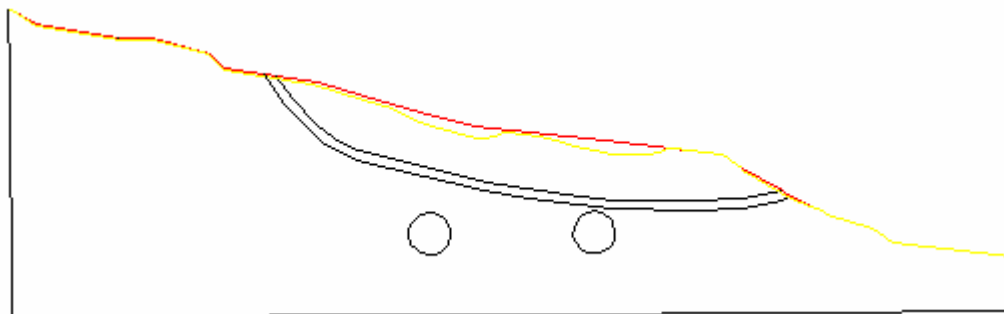
Η διαδικασία που ακολουθούμε είναι παρόμοια με αυτή της προηγούμενης παραγράφου με τη διαφορά ότι στη προκειμένη περίπτωση αναφερόμαστε στη γεωμετρία Β δηλαδή η ζώνη κατολίσθησης δεν τέμνει κάποιον από τους κλάδους της σήραγγας.



Σχήμα 3.38: Απεικόνιση μεταβολής συνόρου της γεωμετρίας Β κατά τη διάνοιξη αρχικά του δεξιού κλάδου της σήραγγας

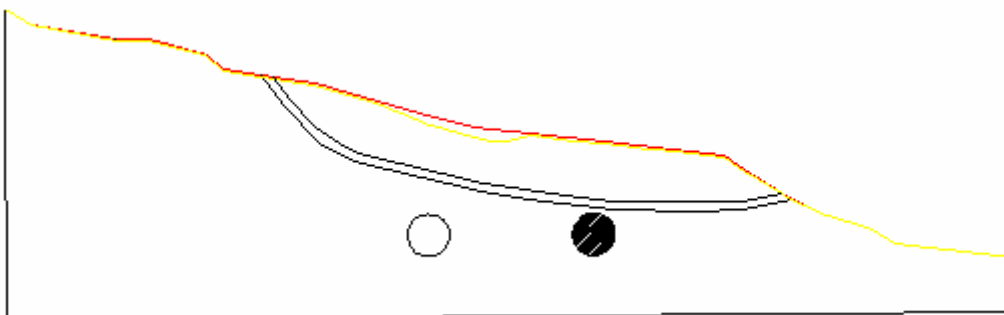
Στην περίπτωση της γεωμετρίας Β παρατηρούμε μια πιο ομαλή συμπεριφορά των επιφανειακών μετακινήσεων εξαιτίας του γεγονότος ότι και οι δύο κλάδοι της σήραγγας είναι ανεξάρτητοι της ζώνης αστοχίας με υπολειμματική αντοχή. Συνεπώς κατά τη διάνοιξη αρχικά του δεξιού κλάδου εμφανίζεται τάφρος σχεδόν πάνω από τον άξονα της σήραγγας και όσο απομακρυνόμαστε από τον εν λόγω κλάδο οι επιφανειακές μετακινήσεις μειώνονται αισθητά. Το μέγεθος των επιφανειακών μετακινήσεων είναι σαφώς μειωμένο

στην περίπτωση της γεωμετρίας B σε σχέση με τη γεωμετρία A. Η εκσκαφή του δεξιού κλάδου επηρεάζει τις επιφανειακές μετακινήσεις πάνω από τον αριστερό κλάδο αλλά δεδομένου του γεγονότος ότι εκ των πραγμάτων στη γεωμετρία B οι επιφανειακές μετακινήσεις είναι μικρότερες δεν φαίνεται καθαρά στο παραπάνω σχήμα.



Σχήμα 3.39: Απεικόνιση μεταβολής συνόρου της γεωμετρίας B κατά τη διάνοιξη και των δύο κλάδων της σήραγγας

Κατά τη Φάση B παρατηρούμε την δημιουργία δύο μεγίστων το κάθε ένα σχεδόν πάνω από τον άξονα κάθε κλάδου. Η τάφος που προϋπήρχε από τη Φάση A πάνω από το δεξιό κλάδο παραμένει η ίδια διότι όπως προείπα η επιρροή του αριστερού κλάδου στις επιφανειακές μετακινήσεις του δεξιού κλάδου είναι τόσο μικρή που στην ουσία δεν προκαλεί καμία ουσιαστική μεταβολή.



Σχήμα 3.40: Απεικόνιση μεταβολής συνόρου της γεωμετρίας B κατά τη διάνοιξη αρχικά του αριστερού κλάδου της σήραγγας

Κατά τη διάνοιξη αρχικά του αριστερού κλάδου η τάφος εμφανίζεται πάνω από τον αριστερό κλάδο. Επιπλέον οι μεγαλύτερες τιμές των επιφανειακών μετακινήσεων εμφανίζονται στην περιοχή που βρίσκεται πάνω από τους κλάδους της σήραγγας ενώ όσο απομακρυνόμαστε από αυτούς οι τιμές των επιφανειακών μετακινήσεων είναι αισθητά μειωμένες έως ασήμαντες.

3.4.2 Μέγιστες τιμές επιφανειακών μετακινήσεων

Έχοντας πλέον αποκτήσει την εικόνα της μορφής του επιφανειακού συνόρου που προκαλείται από τις επιφανειακές μετακινήσεις στην παρούσα παράγραφο ακολουθούν πίνακες οι οποίοι παρουσιάζουν τις μέγιστες τιμές των επιφανειακών μετακινήσεων που εμφανίζονται πάνω από κάθε κλάδο της σήραγγας για κάθε συνδυασμό ανάλυσης που εξετάζω. Συγκεκριμένα παρουσιάζεται η υπό εξέταση γεωμετρία, η υπό εξέταση ανάλυση ανάλογα με τις τιμές των γεωτεχνικών παραμέτρων αντοχής του εδάφους, ο τύπος των μέτρων προσωρινής υποστήριξης, καθώς και ποιος κλάδος προηγείται κατά την εκσκαφή.

Επιπλέον αναγράφεται για κάθε φάση ξεχωριστά οι επιφανειακές μετακινήσεις που προκύπτουν πάνω από κάθε κλάδο.

3.4.2.1 Μέγιστες τιμές επιφανειακών μετακινήσεων για γεωμετρία A

Γεωμετρία A					
Ανάλυση I - Διάνοιξη αρχικά του δεξιού κλάδου					
		Επιφανειακές Μετακινήσεις (mm)			
		Φάση A		Φάση B	
Τύπος Υποστήριξης	c (kPa)	Δεξιός Κλάδος	Αριστερός κλάδος	Αριστερός Κλάδος	Δεξιός Κλάδος
Ελαφρύς	0	44	16	33	47
Ελαφρύς	15	44	18	33	47
Μεσαίος	0	32	15	24	34
Μεσαίος	15	32	15	24	34
Βαρύς	0	25	10	18	28
Βαρύς	15	25	10	18	28

Πίνακας 3.10: Πίνακας μέγιστων επιφανειακών μετακινήσεων στην περίπτωση της γεωμετρίας A, Ανάλυσης I και διάνοιξης αρχικά του δεξιού κλάδου

Γεωμετρία A					
Ανάλυση I - Διάνοιξη αρχικά του αριστερού κλάδου					
		Επιφανειακές Μετακινήσεις (mm)			
		Φάση A		Φάση B	
Τύπος Υποστήριξης	c (kPa)	Δεξιός Κλάδος	Αριστερός κλάδος	Αριστερός Κλάδος	Δεξιός Κλάδος
Ελαφρύς	0	4	21	34	47
Ελαφρύς	15	4	21	34	47
Μεσαίος	0	4	15	25	34
Μεσαίος	15	4	15	25	34
Βαρύς	0	2	11	20	28
Βαρύς	15	2	11	20	28

Πίνακας 3.11: Πίνακας μέγιστων επιφανειακών μετακινήσεων στην περίπτωση της γεωμετρίας A, Ανάλυσης I και διάνοιξης αρχικά του αριστερού κλάδου

Γεωμετρία A					
Ανάλυση II - Διάνοιξη αρχικά του δεξιού κλάδου					
		Επιφανειακές Μετακινήσεις (mm)			
		Φάση A		Φάση B	
Τύπος Υποστήριξης	c (kPa)	Δεξιός Κλάδος	Αριστερός κλάδος	Αριστερός Κλάδος	Δεξιός Κλάδος
Ελαφρύς	0	29	10	25	31
Ελαφρύς	15	29	10	25	31
Μεσαίος	0	22	9	19	24
Μεσαίος	15	22	9	19	24
Βαρύς	0	17	8	15	19
Βαρύς	15	17	8	15	19

Πίνακας 3.12: Πίνακας μέγιστων επιφανειακών μετακινήσεων στην περίπτωση της γεωμετρίας A, Ανάλυσης II και διάνοιξης αρχικά του δεξιού κλάδου

Γεωμετρία Α					
Ανάλυση II - Διάνοιξη αρχικά του αριστερού κλάδου					
		Επιφανειακές Μετακινήσεις (mm)			
		Φάση Α		Φάση Β	
Τύπος Υποστήριξης	c (kPa)	Δεξιός Κλάδος	Αριστερός Κλάδος	Αριστερός Κλάδος	Δεξιός Κλάδος
Ελαφρύς	0	3	16	25	31
Ελαφρύς	15	3	16	25	31
Μεσαίος	0	2	12	19	24
Μεσαίος	15	2	12	19	24
Βαρύς	0	1	9	16	19
Βαρύς	15	1	9	16	19

Πίνακας 3.13: Πίνακας μέγιστων επιφανειακών μετακινήσεων στην περίπτωση της γεωμετρίας Α, Ανάλυσης II και διάνοιξης αρχικά του αριστερού κλάδου

Σχολιάζοντας συνολικά για τη γεωμετρία Α τις μέγιστες τιμές των επιφανειακών μετακινήσεων παρατηρούμε ότι η δυσμενέστερη περίπτωση είναι αυτή της *Ανάλυσης I* (ελάχιστες γεωτεχνικές παράμετροι αντοχής του εδάφους) σε συνδυασμό με τη διάνοιξη αρχικά του δεξιού κλάδου ή και του αριστερού κλάδου. Ειδικότερα για την περίπτωση ελαφρού τύπου προσωρινής υποστήριξης η μέγιστη τιμή αγγίζει τα 5cm στην περιοχή πάνω από τον δεξιό κλάδο και τα 3cm στην περιοχή πάνω από τον αριστερό κλάδο. Με τη θεώρηση όμως μεσαίου ή βαρέως τύπου προσωρινής υποστήριξης οι επιφανειακές μετακινήσεις μειώνονται σε μεγάλο βαθμό φτάνοντας τα 2.5cm για την περιοχή πάνω από τον δεξιό κλάδο και το 1.5cm για την περιοχή πάνω από τον αριστερό κλάδο.

Εν τω μεταξύ όπως συνέβαινε με τις συγκλίσεις εκσκαφής και στην περίπτωση των επιφανειακών μετακινήσεων τα τελικά αποτελέσματα είναι ίδια ανεξαρτήτως διάνοιξης αρχικά του δεξιού ή του αριστερού κλάδου. Υπάρχει όμως μια σημαντική λεπτομέρεια η οποία πρέπει να αναφερθεί. Η εκσκαφή του δεξιού κλάδου προκαλεί επιφανειακές μετακινήσεις πάνω από αυτόν οι οποίες αποκτούν τη μέγιστη τιμή τους κατά τη Φάση Α. Παράλληλα η διάνοιξη του δεξιού κλάδου επηρεάζει την περιοχή πάνω από τον αριστερό κλάδο παρόλο που ο αριστερός κλάδος δεν έχει εκσκαφεί. Θα μπορούσα να πω ότι η διάνοιξη του δεξιού κλάδου "τραβάει", "έλκει" το πρανές προς το μέρος του προκαλώντας αξιοσημείωτες επιφανειακές μετακινήσεις. Αυτό συμβαίνει στην *Ανάλυση I* και στην *Ανάλυση II* με διαφορές βέβαια στη τιμή των επιφανειακών μετακινήσεων. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν φαίνεται ότι το 50% της τελικής επιφανειακής μετακίνησης πάνω από τον αριστερό κλάδο αποκτάται κατά τη Φάση Α δηλαδή κατά την πλήρη εκσκαφή του δεξιού κλάδου. Επισημαίνεται ότι κατά τη Φάση Α ο αριστερός κλάδος δεν έχει εκσκαφεί.

Αντιθέτως κατά τη διάνοιξη αρχικά του αριστερού κλάδου η περιοχή πάνω από τον δεξιό κλάδο επηρεάζεται ελάχιστα από τη διάνοιξη του εν λόγω κλάδου. Ειδικότερα, μόνο το 10% της τελικής μέγιστης επιφανειακής μετακίνησης προκαλείται από τη διάνοιξη του αριστερού κλάδου. Συνεπώς κατά κύριο λόγο η περιοχή πάνω από τον δεξιό κλάδο αποκτά τη μέγιστη επιφανειακή μετακίνηση κατά την εκσκαφή του ίδιου του δεξιού κλάδου.

3.4.2.2 Μέγιστες τιμές επιφανειακών μετακινήσεων για γεωμετρία B

Γεωμετρία B					
Ανάλυση I - Διάνοιξη αρχικά του δεξιού κλάδου					
		Επιφανειακές Μετακινήσεις (mm)			
		Φάση A		Φάση B	
Τύπος Υποστήριξης	c (kPa)	Δεξιός Κλάδος	Αριστερός Κλάδος	Αριστερός Κλάδος	Δεξιός Κλάδος
Ελαφρύς	0	17	10	21	20
Ελαφρύς	15	17	10	22	20
Μεσαίος	0	12	9	16	16
Μεσαίος	15	12	9	16	16
Βαρύς	0	10	7	13	12
Βαρύς	15	10	7	13	12

Πίνακας 3.14: Πίνακας μέγιστων επιφανειακών μετακινήσεων στην περίπτωση της γεωμετρίας B, Ανάλυσης I και διάνοιξης αρχικά του δεξιού κλάδου

Γεωμετρία B					
Ανάλυση I - Διάνοιξη αρχικά του αριστερού κλάδου					
		Επιφανειακές Μετακινήσεις (mm)			
		Φάση A		Φάση B	
Τύπος Υποστήριξης	c (kPa)	Αριστερός Κλάδος	Δεξιός Κλάδος	Αριστερός Κλάδος	Δεξιός Κλάδος
Ελαφρύς	0	14	3	22	20
Ελαφρύς	15	14	3	22	20
Μεσαίος	0	10	2	16	16
Μεσαίος	15	10	2	16	15
Βαρύς	0	8	1	13	12
Βαρύς	15	8	1	13	11

Πίνακας 3.15: Πίνακας μέγιστων επιφανειακών μετακινήσεων στην περίπτωση της γεωμετρίας B, Ανάλυσης I και διάνοιξης αρχικά του αριστερού κλάδου

Για την περίπτωση της γεωμετρίας B παρατηρούμε ότι οι επιφανειακές μετακινήσεις είναι πολύ μικρότερες από αυτές που εμφανίζονται στη γεωμετρία A. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι η επίδραση της γεωμετρίας δεν περιορίζεται μόνο στις προκαλούμενες συγκλίσεις εκσκαφής αλλά και στις επιφανειακές μετακινήσεις.

Επιπλέον ο τύπος μέτρων προσωρινής υποστήριξης που θεωρούμε κατά την ανάλυση επηρεάζει τις τιμές των επιφανειακών μετακινήσεων που προκαλούνται. Όσο πιο στιβαρά είναι τα στοιχεία υποστήριξης τόσο οι επιφανειακές μετακινήσεις συγκρατούνται. Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση ελαφρού τύπου υποστήριξης είναι αυξημένες, ενώ στην περίπτωση μεσαίου ή βαρέως τύπου υποστήριξης η μείωση των επιφανειακών μετακινήσεων είναι αισθητή. Για ελαφρού τύπου προσωρινή υποστήριξη φτάνουν τα 2cm, για μεσαίου τύπου το 1.5cm και για βαρέως τύπου το 1cm τόσο για τον αριστερό όσο και τον δεξιό.

Εν τω μεταξύ η διαφορετική αλληλουχία εκσκαφής επιδρά με διαφορετικό τρόπο στις προκαλούμενες μετακινήσεις της επιφάνειας του εδάφους. Κατά την πλήρη εκσκαφή αρχικά του δεξιού κλάδου η επιφανειακή περιοχή πάνω από τον αριστερό κλάδο εμφανίζει μετακινήσεις οι οποίες κυμαίνονται στο 1cm. Αντιθέτως στην περίπτωση διάνοιξης του αριστερού κλάδου η περιοχή πάνω από το δεξιό κλάδο φαίνεται να μην επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό με επιφανειακές μετακινήσεις πολύ μικρότερες του 0.5cm.

Ωστόσο από τους παραπάνω πίνακες μπορούμε να διακρίνουμε ότι στη Φάση B όταν δηλαδή και οι δύο κλάδοι έχουν εκσκαφεί πλήρως οι προκαλούμενες επιφανειακές

μετακινήσεις είναι της ίδιας τάξης μεγέθους και για τους δύο κλάδους. Υπάρχουν βέβαια κάποιες διαφορές μεταξύ των τιμών των επιφανειακών μετακινήσεων αλλά η απόκλιση μεταξύ τους είναι πολύ μικρή. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι υπάρχει σταθερή συμπεριφορά και για τους δύο κλάδους οι οποίοι ας μην ξεχνάμε ότι βρίσκονται στη βραχομάζα.

Γεωμετρία Β					
Ανάλυση II - Διάνοιξη αρχικά του δεξιού κλάδου					
		Επιφανειακές Μετακινήσεις (mm)			
		Φάση Α		Φάση Β	
Τύπος Υποστήριξης	c (kPa)	Δεξιός Κλάδος	Αριστερός Κλάδος	Αριστερός Κλάδος	Δεξιός Κλάδος
Ελαφρύς	0	13	7	17	15
Ελαφρύς	15	13	7	17	15
Μεσαίος	0	10	5	13	10
Μεσαίος	15	10	5	13	10
Βαρύς	0	6	4	10	8
Βαρύς	15	6	4	10	8

Πίνακας 3.16: Πίνακας μέγιστων επιφανειακών μετακινήσεων στην περίπτωση της γεωμετρίας Β, Ανάλυσης II και διάνοιξης αρχικά του δεξιού κλάδου

Γεωμετρία Β					
Ανάλυση II - Διάνοιξη αρχικά του αριστερού κλάδου					
		Επιφανειακές Μετακινήσεις (mm)			
		Φάση Α		Φάση Β	
Τύπος Υποστήριξης	c (kPa)	Αριστερός Κλάδος	Δεξιός Κλάδος	Αριστερός Κλάδος	Δεξιός Κλάδος
Ελαφρύς	0	11	2	16	15
Ελαφρύς	15	11	2	16	15
Μεσαίος	0	8	2	12	12
Μεσαίος	15	8	2	12	12
Βαρύς	0	6	1	10	8
Βαρύς	15	6	1	10	8

Πίνακας 3.17: Πίνακας μέγιστων επιφανειακών μετακινήσεων στην περίπτωση της γεωμετρίας Β, Ανάλυσης II και διάνοιξης αρχικά του αριστερού κλάδου

Ακριβώς τα ίδια ποιοτικά χαρακτηριστικά με αυτά που αναφέρονται παραπάνω εμφανίζονται για την *Ανάλυση II* δηλαδή για τις μέγιστες τιμές γεωτεχνικών παραμέτρων αντοχής του εδάφους. Προφανώς οι προκαλούμενες επιφανειακές μετακινήσεις είναι μειωμένες δεδομένου τα υλικά που αποτελούν την υπό ανάλυση διατομή λαμβάνουν τις μέγιστες τιμές τους. Συγκεκριμένα για ελαφρού τύπου προσωρινή υποστήριξη η μέγιστη τιμή επιφανειακών μετακινήσεων φτάνει το 1.5cm, το 1cm για μεσαίου τύπου και λίγο μικρότερο του 1cm για βαρέως τύπου υποστήριξη.

Αξίζει ωστόσο να θίξουμε το γεγονός ότι η μεταβολή της συνοχής (c) της ζώνης αστοχίας με υπολειμματική αντοχή δεν παρουσιάζει καμία μεταβολή στις τιμές των προκαλούμενων επιφανειακών μετακινήσεων δεδομένης της γεωμετρίας στην οποία ζώνη κατολίσθησης και κλάδοι της σήραγγας δεν τέμνονται.

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα προηγούμενα κεφάλαια της παρούσας εργασίας μας έδωσαν να κατανοήσουμε πλήρως το αντικείμενο με το οποίο ασχοληθήκαμε αλλά και όλη τη διαδικασία η οποία ακολουθήθηκε ώστε να καταλήξουμε στα αποτελέσματα της ανάλυσης που προκύπτουν και παρουσιάστηκαν αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3. Αντικείμενο του παρόντος κεφαλαίου είναι η εξαγωγή συμπερασμάτων τα οποία αναδείχτηκαν μέσα από τη διαδικασία της ανάλυσης που διεξήχθει. Η επίδραση που έχει η επιλογή της κάθε παραμέτρου στα αποτελέσματα των συγκλίσεων εκσκαφής και των επιφανειακών μετακινήσεων αλλά και η αλληλεπίδραση μεταξύ των παραμέτρων είναι αυτό το οποίο θα μας απασχολήσει. Συνεπώς οι δύο εναλλακτικές γεωμετρίες του έργου, οι γεωτεχνικές παράμετροι αντοχής του εδάφους, η διαφορετική ακολουθία-αλληλουχία εκσκαφής των δύο κλάδων της σήραγγας καθώς και τα στοιχεία υποστήριξης διαφορετικής στιβαρότητας είναι παράμετροι οι οποίες θα μας δείξουν την επιρροή τους στο έργο και κατά πόσο η μία παράμετρος επηρεάζει την άλλη.

Έχοντας ορίσει τα τρία επίπεδα ιεράρχησης της διακινδύνευσης ενεργοποίησης της κατολίσθησης τα αποτελέσματα που προκύπτουν μας δείχνουν ότι:

Στην περίπτωση της γεωμετρίας A, της *Ανάλυσης I* (ελάχιστες τιμές γεωτεχνικών παραμέτρων αντοχής του εδάφους) και διάνοιξης αρχικά του δεξιού ή αριστερού κλάδου προκύπτουν μετακινήσεις της βραχομάζας με μεγάλη διακινδύνευση ενεργοποίησης της κατολίσθησης. Υπενθυμίζω ότι στη συγκεκριμένη κατηγορία ανήκουν μετακινήσεις της βραχομάζας μεγαλύτερες των 10cm και συγκεκριμένα για την συγκεκριμένη περίπτωση προέκυψαν μετακινήσεις της τάξης των 13cm. Τα προηγούμενα ισχύουν τόσο για ελαφρού τύπου προσωρινή υποστήριξη όσο και για μεσαίου τύπου προσωρινή υποστήριξη.

Η βαρέως τύπου προσωρινή υποστήριξη μας οδηγεί στο δεύτερο επίπεδο ιεράρχησης δηλαδή σε μεσαία διακινδύνευση ενεργοποίησης της κατολίσθησης δηλαδή μετακινήσεις της βραχομάζας της τάξης των 9cm.

Συνεχίζοντας για την ίδια γεωμετρία αλλά με την θεώρηση των μέγιστων παραμέτρων αντοχής του εδάφους-*Ανάλυση II* προκύπτουν μετακινήσεις της βραχομάζας μεσαίας διακινδύνευσης ενεργοποίησης της κατολίσθησης κάτι το οποίο ισχύει και για τους τρεις τύπους προσωρινής υποστήριξης. Συνεπώς στην περίπτωση της γεωμετρίας A παρατηρούμε ότι οι μετακινήσεις της βραχομάζας κινούνται σε αρκετά υψηλά επίπεδα. Δε θα έλεγα ότι οι μετακινήσεις της βραχομάζας αυτής της τάξης μεγέθους είναι απαγορευτικές αλλά χρειάζεται να δώσουμε ιδιαίτερη προσοχή.

Στην περίπτωση της γεωμετρίας B, της *Ανάλυσης I* και διάνοιξης αρχικά του δεξιού ή αριστερού κλάδου προκύπτουν τα εξής: Για ελαφρού τύπου προσωρινή υποστήριξη προκύπτουν μετακινήσεις της βραχομάζας μεσαίας διακινδύνευσης ενεργοποίησης της κατολίσθησης, ενώ για μεσαίου ή βαρέως τύπου προσωρινής υποστήριξης μικρή διακινδύνευση ενεργοποίησης της κατολίσθησης. Στην περίπτωση δε της *Ανάλυσης II* προκύπτουν μετακινήσεις της βραχομάζας μικρής διακινδύνευσης ενεργοποίησης της κατολίσθησης για όλους τους τύπους προσωρινής υποστήριξης. Παρατηρούμε ότι η αλλαγή της θέσης της ζώνης κατολίσθησης ως προς τους κλάδους της υπό μελέτη οδικής σήραγγας προκαλεί στη δυσμενέστερη περίπτωση προκαλεί μετακινήσεις της βραχομάζας μεσαίας διακινδύνευσης ενώ στους υπόλοιπους συνδυασμούς ανάλυσης μετακινήσεις μικρής διακινδύνευσης της ενεργοποίησης κατολίσθησης.

Με βάση την παραπάνω περιγραφή διαπιστώνουμε ότι η εκσκαφή των κλάδων της σήραγγας για την υπό μελέτη περιοχή χρήζει ιδιαίτερης προσοχής δεδομένης της ύπαρξης ζώνης κατολίσθησης δηλαδή ασθενούς υλικού το οποίο υπάρχει πιθανότητα να εμπλέκεται στην εκσκαφή κάποιου κλάδου. Ανάλογα με την χιλιομετρική θέση πιθανόν να έχουμε να αντιμετωπίσουμε τη γεωμετρία Α ή τη γεωμετρία Β. Προφανώς στη γεωμετρία Β η διάνοιξη των δύο κλάδων είναι ευνοϊκότερη δεδομένης της παρουσίας των κλάδων μέσα στη βραχομάζα σε αντίθεση με τη γεωμετρία Α η οποία είναι μια δυσμενής περίπτωση δεδομένου ότι ο δεξιός κλάδος εμπλέκεται στην ζώνη κατολίσθησης. Συνεπώς κατά την εκσκαφή του δεξιού κλάδου πρέπει να λάβουμε τα κατάλληλα μέτρα προσωρινής υποστήριξης αλλιώς θα οδηγηθούμε σε συγκλίσεις εκσκαφής οι οποίες είναι μεγάλου μεγέθους κάτι το οποίο μπορεί να ενέχει και σοβαρό κίνδυνο. Με την τοποθέτηση όμως της πιο στιβαρής προσωρινής υποστήριξης η δυσκολία που έχουμε να αντιμετωπίσουμε υποβαθμίζεται συνεχίζοντας την εκσκαφή του κλάδου χωρίς ιδιαίτερο κίνδυνο για το έργο αλλά και για το προσωπικό το οποίο εργάζεται κάτω από ιδιαίτερα δύσκολες συνθήκες.

Βέβαια θα μπορούσε κάποιος να ισχυριστεί ότι ίσως απαιτείται αλλαγή της χάραξης του εν λόγω έργου δεδομένου του μεγέθους των συγκλίσεων ιδιαίτερα στην περίπτωση της γεωμετρίας Α. Όμως κατά πόσο αυτός ο ισχυρισμός έχει βάση;

Αλλαγή της γεωμετρίας σημαίνει αλλαγή της χάραξης κάτι το οποίο εκτός του ότι είναι εξαιρετικά δύσκολο να γίνει, πραγματοποιείται σε εξαιρετικά ειδικές περιπτώσεις. Όταν εννοώ αλλαγή της γεωμετρίας αναφέρομαι στην αλλαγή θέσης του άξονα των υπό μελέτη κλάδων έτσι ώστε κατά μήκος της εκσκαφής να μην υπάρξει τομή κάποιου κλάδου με τη ζώνη κατολίσθησης.

Στα περισσότερα τεχνικά έργα αλλά κυρίως σε περιπτώσεις υπόγειων έργων όπως είναι και το υπό εξέταση έργο η αλλαγή της χάραξης μπορεί να επιφέρει μεγαλύτερο οικονομικό κόστος δεδομένης της αύξησης του μήκους της σήραγγας αλλά και των τροποποιήσεων που θα γίνουν στην οριζοντιογραφία και τη μηκοτομή. Καθίσταται με αυτό τον τρόπο σαφές ότι είναι οικονομικότερο να χρησιμοποιήσουμε τα πιο στιβαρά μέτρα προσωρινής υποστήριξης εκεί που είναι απαραίτητα από το να οδηγηθούμε σε αλλαγή της χάραξης η οποία δεν είναι και σίγουρο ότι θα μας αποφέρει τα αναμενόμενα αποτελέσματα.

Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε δεν περιορίστηκε μόνο στην θέση της ζώνης κατολίσθησης ως προς τους άξονες των υπό μελέτη κλάδων αλλά και στις παραμέτρους αντοχής του εδάφους. Έτσι, συγκρίνοντας τις δύο αναλύσεις για ελάχιστες και μέγιστες τιμές των παραμέτρων αντοχής (*Ανάλυση I* και *Ανάλυση II*) είναι λογικό ότι η *Ανάλυση II* παρουσιάζει μια ανθεκτικότητα στα αποτελέσματα μιας και οι γεωτεχνικές παράμετροι αντοχής των υλικών λαμβάνουν τις μέγιστες τιμές τους. Παρουσιάζεται δηλαδή μια συγκράτηση στις τιμές των αποτελεσμάτων σε σύγκριση με την *Ανάλυση I*. Στην περίπτωση βέβαια που συνδυάζεται η γεωμετρία Β με την *Ανάλυση II* τα αποτελέσματα που προκύπτουν στις συγκλίσεις εκσκαφής και τις επιφανειακές μετακινήσεις είναι τα ελάχιστα. Όμως οι παράμετροι αντοχής του εδάφους αποτελούν κάτι το οποίο δεν είναι δυνατόν να αλλάξει διότι αποτελεί κάτι δεδομένο. Είναι το έδαφος το οποίο έχουμε να αντιμετωπίσουμε κατά τη διάνοιξη των σηράγγων συνεπώς αποτελεί μια παράμετρο η οποία δεν επιδέχεται κάποια παρέμβαση. Εν τω μεταξύ το γεγονός ότι η εκσκαφή των κλάδων πραγματοποιείται σε μήκος της τάξης του ενός χιλιομέτρου (*km*) περίπου οι παράμετροι αντοχής του υλικού που πρόκειται να συναντηθεί κατά τη διάνοιξη των κλάδων ποικίλει, συνεπώς από θέση σε θέση οι γεωτεχνικές παράμετροι αντοχής θα έχουν διαφορετικές τιμές. Αυτό άλλωστε είναι και το νόημα ύπαρξης ενός εύρους τιμών των γεωτεχνικών παραμέτρων αντοχής που δείχνει στην ουσία ότι το εδαφικό υλικό το οποίο θα συναντηθεί κατά τη διάνοιξη δεν είναι κάτι δεδομένο αλλά θα κυμαίνεται μεταξύ αυτών των τιμών.

Η μελέτη της διαφορετικής ακολουθίας-αλληλουχίας εκσκαφής των κλάδων της σήραγγας μας οδήγησε επίσης σε αξιόλογα και χρήσιμα συμπεράσματα τόσο για τις προκαλούμενες από την εκσκαφή συγκλίσεις όσο και για τις επιφανειακές μετακινήσεις.

Στις συγκλίσεις εκσκαφής η διαφορετική ακολουθία-αλληλουχία εκσκαφής των κλάδων μας οδήγησε στα εξής συμπεράσματα.

Στην περίπτωση της διάνοιξης αρχικά του δεξιού κλάδου, παρατηρούμε ότι ο εν λόγω κλάδος αποκτά τις μέγιστες τιμές συγκλίσεων στη Φάση A δηλαδή στην περίπτωση της πλήρους εκσκαφής του χωρίς ο αριστερός κλάδος να έχει εκσκαφεί. Η εκσκαφή του αριστερού κλάδου η οποία πραγματοποιείται στη Φάση B σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης μας δείχνει ότι δεν επηρεάζει τον ήδη εκσκαμμένο δεξιό κλάδο ο οποίος όπως προείπα από μόνος του έχει αποκτήσει τη μέγιστη τιμή συγκλίσεων. Συνεπώς δεν υπάρχει αλληλεπίδραση της εκσκαφής του αριστερού κλάδου στις συγκλίσεις του δεξιού κλάδου.

Αντιθέτως η αλληλεπίδραση του δεξιού κλάδου στον αριστερό κλάδο είναι κάτι το οποίο αναδεικνύεται από τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Όταν διανοίγεται αρχικά ο αριστερός κλάδος αποκτά συγκλίσεις οι οποίες έχουν κάποια τιμή. Η μετέπειτα εκσκαφή του δεξιού κλάδου (Φάση B) προκαλεί μια αύξηση στις ήδη υπάρχουσες συγκλίσεις του αριστερού κλάδου. Συγκεκριμένα παρατηρείται μια μεταβολή της τάξης του 15% για τις συγκλίσεις μεταξύ Φάσης A (πλήρης εκσκαφή αριστερού κλάδου) και Φάσης B (εκσκαφή αριστερού κλάδου δηλαδή είναι εκσκαμμένοι και οι δύο κλάδοι). Γίνεται λοιπόν σαφές ότι είτε προηγείται είτε έπεται η εκσκαφή του αριστερού κλάδου ο δεξιός κλάδος επηρεάζει τον ίδιο του τον εαυτό στις προκαλούμενες από την εκσκαφή συγκλίσεις.

Σε ότι έχει σχέση με τις επιφανειακές μετακινήσεις η αλληλουχία εκσκαφής μας οδήγησε στο εξής συμπέρασμα. Ο δεξιός κλάδος ο οποίος χωροθετείται κατάντη του πρανούς, κατά τη διάνοιξη του εκτός του ότι προκαλεί επιφανειακές μετακινήσεις πάνω από αυτόν έλκει (τραβάει) το πρανές προς το μέρος του με αποτέλεσμα να προκαλεί επιφανειακές μετακινήσεις πάνω από τον αριστερό κλάδο ο οποίος δεν έχει ακόμα εκσκαφεί. Η μεταβολή που προκαλεί στις προκαλούμενες μετακινήσεις είναι περίπου 50% δηλαδή οι μισές επιφανειακές μετακινήσεις προκαλούνται από τη διάνοιξη του δεξιού κλάδου κατά τη Φάση A με τις υπόλοιπες να οφείλουν την ανάπτυξη τους στη διάνοιξη του αριστερού κλάδου κατά τη Φάση B.

Αντιθέτως η διάνοιξη αρχικά του αριστερού κλάδου δεν δείχνει να επηρεάζει την περιοχή πάνω από τον δεξιό κλάδο. Συγκεκριμένα η πλήρης εκσκαφή του αριστερού κλάδου κατά τη Φάση A προκαλεί το 10% των τελικών επιφανειακών μετακινήσεων του δεξιού κλάδου. Συνεπώς οι μετακινήσεις πάνω από τον δεξιό κλάδο οφείλονται κατά κύριο λόγο στη διάνοιξη του ιδίου του δεξιού κλάδου. Αυτά ισχύουν τόσο στη γεωμετρία A όσο και στη γεωμετρία B.

Στην περίπτωση που εξετάζω τα αποτελέσματα της ανάλυσης όταν λαμβάνω την τιμή της συνοχής (c) της ζώνης αστοχίας με υπολειμματική αντοχή μέγιστη και ελάχιστη δε παρατηρείται καμία διαφορά στις τιμές των συγκλίσεων στον αριστερό κλάδο και για τις δύο γεωμετρίες (γεωμετρία A και B).

Όσον αφορά τον δεξιό κλάδο στην περίπτωση της γεωμετρίας B δεν παρατηρείται καμία διαφοροποίηση, όμως στην περίπτωση της γεωμετρίας A η διαφορά στις συγκλίσεις είναι της τάξης των μερικών χιλιοστών (2-3mm) κάτι το οποίο οφείλεται στη τομή που υπάρχει μεταξύ δεξιού κλάδου και της ζώνης αστοχίας με υπολειμματική αντοχή. Η επιλογή της συγκεκριμένης παραμέτρου στην ανάλυση δεν υπήρξε τυχαία αλλά θέλαμε να εξετάσουμε την συμπεριφορά της συγκεκριμένης ζώνης με διαφορετική τιμή συνοχής κάθε φορά διότι η συγκεκριμένη ζώνη αποτελεί κομμάτι σύνδεσης της βραχομάζας και του κυρίως

σώματος της κατολίσθησης. Η διαφοροποίηση της συγκεκριμένης τιμής της συνοχής έδειξε ότι στην ουσία δεν προκαλεί κάποια συνταρακτική μεταβολή.

Σε ότι έχει σχέση με τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης είναι προφανές ότι όσο πιο στιβαρά είναι, τόσο περιορίζονται οι τιμές των συγκλίσεων εκσκαφής. Ουσιαστικά στην ανάλυση θεωρήσαμε μια αύξουσα διαβάθμιση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης δεδομένης της ευαισθησίας της περιοχής μελέτης τόσο από γεωτεκτονικής όσο και γεωτεχνικής άποψης. Ιδιαίτερα στην περίπτωση που μέτρα προσωρινής υποστήριξης ελαφρού τύπου θεωρούνται κατά την ανάλυση, και μας οδηγούν σε μετακινήσεις της βραχομάζας μεγάλης διακινδύνευσης ενεργοποίησης κατολίσθησης σημαίνει ότι αυτά τα μέτρα δεν είναι επαρκή και η τοποθέτηση προσωρινής υποστήριξης βαρέως τύπου είναι επιβεβλημένη.

Θέλοντας να κλείσω το παρόν κεφάλαιο αλλά και ολόκληρη την εργασία επιθυμώ να κάνω μια γενική διαπίστωση η οποία και μέσω αυτής της εργασίας φαντάζει ακόμα πιο επίκαιρη. Στην Ελληνική πραγματικότητα επικρατούν γεωλογικές συνθήκες, τέτοιες ώστε να έχουν δημιουργηθεί αρκετοί σχηματισμοί των οποίων η συμπεριφορά τους κατά την κατασκευή ενός υπόγειου έργου κρύβει αρκετούς κινδύνους αλλά και δυσκολίες. Καθώς τα τελευταία χρόνια γίνονται πολλά έργα υποδομής όπου υπεισέρχεται σε μεγάλο βαθμό ο γεωτεχνικός κλάδος πρέπει να λαμβάνουν υπόψη όλες τις ειδικές συνθήκες που επικρατούν σε ένα έργο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

Hoek, E., '*Support for very weak rock associated with faults and shear zones*', Distinguished lecture for the opening of the *International Symposium on Rock Support and Reinforcement Practice in Mining*, Kalgoorlie, Australia, 14-19 March, 1999

Brown, E.T., (November 1981), '*Putting the NATM into perspective Tunnels and Tunnelling*', pp 13-17

Bray, J. W., (1987), Some applications of elasticity theory: '*In analytical and computational methods in engineering rock mechanics*' (ed E.T. Brown) London : Allen and Unwin

Hoek, E., Kaiser, P.K., Bawden, W.F., (1995), '*Support of underground excavations in hard rock*', A.A. Balkema Rotterdam Brookfield

Hoek, E. and Brown, E. T.(1980), '*Underground Excavations in Rock*' , Institution of Mining and Metallurgy

Ελληνόγλωσση Βιβλιογραφία

Σακελλαρίου, Μ., (2003), '*Εδαφομηχανική-Θεμελιώσεις*', Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

Σακελλαρίου, Μ., (2005), '*Γεωτεχνική Μηχανική*', Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

Καββαδάς, Μ., (Μάρτιος 2005), '*Σημειώσεις Σχεδιασμού Υπόγειων Έργων*', Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

Σακελλαρίου, Μ., (Νοέμβριος 2008), '*Μηχανική Συνεχούς Μέσου*', Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

Καββαδάς, Μ., (Ακαδ. Έτος 2007-2008), Σειρά Μεταπτυχιακών Διαλέξεων στο ΕΜΠ: Σχεδιασμός Υπόγειων Έργων

Κορδελούλη, Μ., Μιχαλοπούλου, Α., Σακελλαρίου, Μ. , '*Καθιζήσεις και συγκλίσεις προκαλούμενες από την διάνοιξη αβαθών σηράγγων. Αναλυτικές και υπολογιστικές μέθοδοι εκτίμησης.*' , 2^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Οδοποιίας, Βόλος, 18-20 Μαΐου 2005

Πρακτικά 5^ο Πανελληνίου Συνεδρίου Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής , Ξάνθη 31/5-2/6 2006, '*Οι σήραγγες της Εγνατίας Οδού. Σχεδιασμός σε ποικιλία από βραχώμαζες κάτω από δύσκολες γεωλογικές συνθήκες*', Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας Ελληνική Επιστημονική Εταιρία Εδαφομηχανικής & Θεμελιώσεων, Τόμος 3, σελ. 517-524

Πρακτικά 5^ο Πανελληνίου Συνεδρίου Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής , Ξάνθη 31/5-2/6 2006, **'Η δημιουργία γεωτεχνικής βάσης δεδομένων σηράγγων για την Εγνατία Οδό Α.Ε.'**, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας Ελληνική Επιστημονική Εταιρεία Εδαφομηχανικής & Θεμελιώσεων, Τόμος 3, σελ. 525-531

Πρακτικά 5^ο Πανελληνίου Συνεδρίου Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής , Ξάνθη 31/5-2/6 2006, **'Εκτίμηση των Επιφανειακών Καθιζήσεων λόγω της διάνοιξης σηράγγων σε συνθήκες ασθενούς βραχώμαζας μέσω του Δείκτη Υπόγειου Ανοίγματος'**, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας Ελληνική Επιστημονική Εταιρεία Εδαφομηχανικής & Θεμελιώσεων, Τόμος 3, σελ. 541-548

Ρόζος, Δ., **'Εγχειρίδιο Τεχνικής Γεωλογίας Ι'**, Ηλεκτρονικές Σημειώσεις Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών ΕΜΠ

Μαρίνος, Π., **'Από η κλίμακα της γεωλογίας στην βραχώμαζα'**, Ιωάννινα 15-16/10/99 ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ ΑΕ & Ε.Ε.Σ.Υ.Ε

Καζίλης, Ν., **'Οι σήραγγες της Εγνατίας Οδού'**, Ιωάννινα 15-16/10/99 ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ ΑΕ & Ε.Ε.Σ.Υ.Ε

Μαρίνος, Β.Π., Μαρίνος, Π.Γ., Hoek, E., **'Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής, GSI: Εφαρμογή, Συστάσεις, Περιορισμοί και Πεδία Μεταβολών ανάλογα με το Τύπο του Πετρώματος'**

Μαρκέτος, Ε.Γ., (1998), **'Τεχνική Μηχανική: Αντοχή των Υλικών'**, Τόμος ΙΙ, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα

Χριστοδούλου, Γ.Ε., (1991), **'Τετράγλωσσο Λεξικό Γεωλογικών Όρων'**, Ινστιτούτο Γεωλογικών & Μεταλλευτικών Ερευνών, Αθήνα

Σελίδες του διαδικτύου με πρόσθετο υλικό:

www.roscience.com