



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

Διερεύνηση της συμπεριφοράς της σήραγγας Καλλιδρόμου σε περιοχές δυσμενών γεωλογικών συνθηκών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



Άννα Π. Ιωαννίδου

Επιβλέπων : Μιχάλης Ι. Καββαδάς
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάιος 2014

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στη συμπεριφορά που παρουσίασε η σιδηροδρομική σήραγγα του Καλλιδρόμου κατά τη διάνοιξη και υποστήριξή της σε γεωλογικούς σχηματισμούς με πολύ πτωχά βραχομηχανικά χαρακτηριστικά.

Αρχικά γίνεται αναφορά στο έργο της σήραγγας του Καλλιδρόμου. Παρουσιάζονται γενικά στοιχεία, οι γεωλογικοί σχηματισμοί και οι τεχνικογεωλογικές ενότητες κατά μήκος της σήραγγας όπως πρόεκυψαν από τις αντίστοιχες μελέτες. Παρουσιάζονται επίσης οι τυπικές διατομές, η μέθοδος εκσκαφής και τα μέτρα υποστήριξης που χρησιμοποιήθηκαν κατά την κατασκευή του έργου.

Στη συνέχεια, περιγράφονται προβλήματα κατά τη κατασκευή του έργου στο οφιολιθικό σύμπλεγμα του βόρειου μετώπου και το σχιστώδη σερπεντινίτη (τμήμα του οφιολιθικού συμπλέγματος) του νότιου μετώπου.

Η περιοχή του νοτίου μετώπου έχει επιλεγεί να προσομοιωθεί με πεπερασμένα στοιχεία, λόγω της δυσκολίας που παρουσιάστηκε κατά τη διάνοιξη και υποστήριξη της.

Εν κατακλείδι, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των ανάστροφων αναλύσεων και δίνονται κατευθυντήριες προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση.

Η εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας βασίστηκε σε στοιχεία τα οποία τα οποία χορηγήθηκαν από την ΕΡΓΟΣΕ Α.Ε.

Abstract

The current diploma thesis presents the behavior that occurred at the Kallidromo railway tunnel during its excavation and support in geological formations of poor rock mass features.

Initially, reference is been made to the Kallidromo tunnel project. General attributes, regarding the project, the geological formations and the engineering geological features across the tunnel are presented. Typical cross sections, the excavation procedure and the support measures that have been utilized during tunnel's construction are also presented.

Afterwards, problems that occurred during the construction at the ophiolitic sequence of the Northern heading and schistous serpentinite (part of the ophiolitic sequence) of the Southern heading are described.

The Southern heading area has been selected to be simulated with finite elements, due to the difficulties that occurred during excavation and support.

Finally, the back-analysis results are illustrated and recommendation guidelines are discussed for further investigation.

The preparation of this thesis has been based on the data, which were provided by ERGOSE S.A..

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Αν. Καθηγητή του Ε.Μ.Π. κ. Μ. Καββαδά, για την ανάθεση της συγκεκριμένης Διπλωματικής Εργασίας, καθώς και για τις συμβουλές και την καθοδήγηση του κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Ιδιαίτερα ευχαριστώ τον Υποψήφιο Διδάκτορα Φ. Χόρτη για την πολύ σημαντική βοήθεια που μου παρείχε, τόσο στο επιστημονικό όσο και στο οργανωτικό κομμάτι της εργασίας αυτής.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την ΕΡΓΟΣΕ Α.Ε. και ιδιαιτέρως τους κυρίους Γ. Κοτσακά, Α. Καπένη, Π. Αμερικάνο, Γ. Τρύφωνα καθώς και την κυρία Ε. Βαγιώτου, για την παραχώρηση στοιχείων και την πολύτιμη βοήθειά τους καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να απευθύνω ένα μεγάλο ευχαριστώ στη οικογένεια μου για την αμέριστη συμπαράστασή και υποστήριξη τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1	1
<u>Εισαγωγή</u>	1
1.1. Σήραγγα Καλλιδρόμου – Γενικά Στοιχεία	1
1.2. Στόχοι της εργασίας	4
Κεφάλαιο 2	5
<u>Γεωλογικά & Γεωτεχνικά Στοιχεία Έργου</u>	5
2.1. Γεωμορφολογία – Γενικά Στοιχεία	5
2.2. Λιθοστρωματογραφία	8
2.3. Υδρογεωλογικές Συνθήκες	15
2.4. Τεχνικογεωλογικές Συνθήκες	17
2.4.1. Αξιολόγηση Γεωτεχνικών ερευνών	17
2.4.2. Μεταλπικοί Σχηματισμοί	19
2.4.3. Αλπικοί Σχηματισμοί	21
2.5. Χαρακτηριστικά βραχομάζας	26
2.5.1. Ταξινόμηση κατά RMR	26
2.5.2. Ταξινόμηση Κατά G.S.I	29
2.6. Τεχνικογεωλογική Περιγραφή κατά μήκος της σήραγγας	30
2.7. Τεχνικογεωλογική συμπεριφορά των οφιολιθικών σχηματισμών	39
2.7.1. Γεωλογικά στοιχεία οφιολιθικού συμπλέγματος	39
2.7.2. Τεχνικογεωλογικός χαρακτηρισμός των οφιολίθων	41
2.7.3. Συμπεριφορά κατά τη διάνοιξη σήραγγας	46
Κεφάλαιο 3	52
<u>Διατομές & Μέτρα Υποστήριξης</u>	52
3.1. Αρχές σχεδιασμού	52
3.2. Μήκος σήραγγας, χάραξη και κλίση	56
3.3. Ελεύθερη διατομή και εγκαταστάσεις	56
3.4. Τυπικές διατομές	58
3.5. Εκσκαφή και μέτρα Υποστήριξης στη σήραγγα Καλλιδρόμου	60
3.5.1. Εκσκαφή μετώπου - NATM	60
3.5.2. Μέτρα Υποστήριξης Διατομής	62
Κεφάλαιο 4	64
<u>Προβλήματα κατά την κατασκευή του έργου</u>	64
4.1. Βόρειο Μέτωπο – Κατασκευή	64
4.2. Κεντρικό Τμήμα σήραγγας – Περιοχές Σχιστώδους Σερπεντινίτη	70
Κεφάλαιο 5	80
<u>Ανάστροφες αναλύσεις σε δυσμενείς περιοχές</u>	80
5.1. Γενικά	80
5.2. Προσομοίωση στο περιβάλλον εργασίας του Phase2	81
5.2.1. Γεωμετρία μοντέλου – Διατομές	81
5.2.2. Προσομοίωση των σταδίων διάνοιξης της σήραγγας	83
5.2.3. Γεωυλικό περιβάλλοντος διάνοιξης	89
5.2.4. Μέτρα υποστήριξης	90
5.2.5. Ανάλυση με ύπαρξη Υδροφόρου Ορίζοντα (Υ.Ο)	94
5.2.6. Ερπυσμός	94
5.3. Καταγεγραμμένες συγκλίσεις διατομών	95
5.4. Παράμετροι και παραδοχές σχεδιασμού	99
5.5. Αποτελέσματα ανάστροφων αναλύσεων	100

<u>5.5.1. Προσομοίωση 001</u>	100
<u>5.5.2. Προσομοίωση 002</u>	102
<u>5.5.3. Προσομοίωση 003</u>	104
<u>5.5.4. Προσομοίωση 004</u>	106
<u>5.5.5. Προσομοίωση 005</u>	108
<u>5.5.6. Προσομοίωση 006</u>	110
<u>5.5.7. Προσομοίωση 007</u>	112
<u>5.5.8. Προσομοίωση 008</u>	114
<u>5.5.9. Προσομοίωση 009</u>	116
<u>5.5.10. Προσομοιώσεις 010 με 018</u>	118
<u>5.5.11. Προσομοίωση 019</u>	119
<u>5.5.12. Προσομοιώσεις 002pp, 005pp & 008pp (παρουσία υδροφόρου ορίζοντα)</u>	119
<u>5.5.13. Εκτενής παρουσίαση Προσομοίωσης 019 PP</u>	120
<u>5.6. Επεξεργασία αποτελεσμάτων από τις ανάστροφες αναλύσεις</u>	140
<u>Κεφάλαιο 6</u>	152
<u>Συμπεράσματα - Προτάσεις</u>	152
<u>6.1. Συμπεράσματα</u>	152
<u>6.2. Προτάσεις</u>	154
<u>Βιβλιογραφία</u>	155

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1: Σήραγγα Καλλιδρόμου - Βόρειο Μέτωπο	1
Εικόνα 1.2: Ν.Δ.Σ.Γ.Υ.Τ. Τιθορέα -Λιανοκλάδι-Δομοκός	2
Εικόνα 1.3: Ν.Δ.Σ.Γ.Υ.Τ. Τιθορέας -Λιανοκλαδίου	3
Εικόνα 2.1: Θέση της χάραξης του έργου και ευρύτερη περιοχή	5
Εικόνα 2.2: Γεωλογική τομή Σήραγγας Καλλιδρόμου, Μάιος 2013	7
Εικόνα 2.3: Στρωματογραφική στήλη των αλπικών σχηματισμών που απαντώνται στην περιοχή μελέτης	9
Εικόνα 2.4: Διακλάσεις και επιφάνειες σχιστότητας στην ασβεστολιθική ανθρακική ενότητα (kj) στην βόρεια περιοχή του Καλλιδρόμου	10
Εικόνα 2.5: Σερπεντινίτης (se) με χαρακτηριστικές μορφές boudinage	12
Εικόνα 2.6: Στρωματογραφική στήλη των αλπικών σχηματισμών που απαντώνται στην περιοχή μελέτης	13
Εικόνα 2.7: Ερευνητική Γεώτρηση ΚΤ5 και δειγματοληψία(Βάθος: 458,30m - 463,20m, Σχιστώδης Σερπεντινίτης	17
Εικόνα 2.8: Αργιλικός Σχηματισμός - Νότιο Μέτωπο: Οι πιέσεις στο κέλυφος της σήραγγας οδήγησαν σε θραύση του θόλου της σήραγγας σε μήκος 40m ..	19
Εικόνα 2.9: Κροκαλολατυποπαγή (br) στην περιοχή βορείου τμήματος Καλλιδρόμου	20
Εικόνα 2.10: Ζώνη διάτμησης (Shear zone, sz) στους χαρτζβουργίτες (ha)	21
Εικόνα 2.11: Μαγκωμένα κομμάτια κρυσταλλικού ασβεστόλιθου (kj) μέσα στους σχιστώδεις σερπεντινίτες. (se.s) Περιοχή νοτίου τμήματος Καλλιδρόμου (Αναγνώριση πεδίου)	22
Εικόνα 2.12: Εξαλλιωμένος χαρτζβουργίτης με φλεβίδια χαλαζία (ha.q)	24
Εικόνα 2.13: Ανθρακική ενότητα υποβάθρου (kj), νότιο τμήμα (Μόδι)	24
Εικόνα 2.14: Πτυχώσεις στην ασβεστολιθική ανθρακική ενότητα (kj) του υποβάθρου στη βόρεια περιοχή του Καλλιδρόμου	25
Εικόνα 2.15: Καλή ποιότητα περιδοτίτη (τύπος I) από το όρος Όρθρυς	43
Εικόνα 2.16: Καλή ποιότητα περιδοτίτη (τύπος II)	44
Εικόνα 2.17: Συμπαγής και σχιστοποιημένος σερπεντινίτης (τύπος III)	45
Εικόνα 2.18: Διατμημένοι - φυλλώδεις σερπεπεντινίτες σε οφιόλιθο (τύπος IV)	45
Εικόνα 2.19: Οφιολιθικό σύμπλεγμα με σχιστοκερατόλιθους (τύπος V)	46
Εικόνα 3.1: Σήραγγα Καλλιδρόμου: Συνδετήρια Σήραγγα υπο κατασκευή	56
Εικόνα 3.2: Βόρειο μέτωπο - Α' φάση (Ασβεστόλιθος)/ γόμωση για εκσκαφή με χρήση εκρηκτικών υλών	60
Εικόνα 3.3: Νότιο μέτωπο - Αργιλικός σχηματισμός, Άκαμπτη Υποστήριξη Α' Φάση	61
Εικόνα 3.4: Νότιο μέτωπο - Αργιλικός σχηματισμός, Άκαμπτη Υποστήριξη Β' Φάση & Invert	61
Εικόνα 3.5: Νότιο μέτωπο - Αργιλικός σχηματισμός, Άκαμπτη Υποστήριξη - Οπλισμοί ...	62
Εικόνα 3.6: Κατασκευή Invert μόνιμης επένδυσης	63
Εικόνα 3.7: Μόνιμη επένδυση	63
Εικόνα 4.1: Νότιο Μέτωπο - Σχιστώδης Σερπεντινίτης. Αστοχία προσωρινής υποστήριξης λόγω συγκλίσεων [21].....	70
Εικόνα 4.2: Σχιστώδης Σερπεντινίτης (se.s) & Σερπεντινίτης (se) όπως λήφθηκε από τη γεώτρηση ΚΤ-3 σε βάθος 425,70 - 430,85 μέτρα	72
Εικόνα 4.3: Παράδειγμα κατασκευής της διατομής ενδοτικού τύπου στον αργιλικό σχηματισμό στο νότιο μέτωπο	77
Εικόνα 4.4: Νότιο μέτωπο - Αστοχία σε Σχιστώδη Σερπεντινίτη	78
Εικόνα 4.5: Νότιο μέτωπο - Σχιστώδης Σερπεντινίτης, Εκτεταμένες επιπρόσθετες υλώσεις	78
Εικόνα 4.6: Νότιο μέτωπο - Σχιστώδης Σερπεντινίτης, Τοποθέτηση πλαισίων	79

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Ιδεατή διαμήκης τομή σήραγγας Καλλιδρόμου.....	30
Σχήμα 2.2: Εγκάρσια τομή στη Χ.Θ. 7+168	32
Σχήμα 2.3: Εγκάρσια τομή στη Χ.Θ. 8+288	32
Σχήμα 2.4: Εγκάρσια τομή στη Χ.Θ. 8+768	33
Σχήμα 2.5: Εγκάρσια τομή στη Χ.Θ. 9+408	34
Σχήμα 2.6: Εγκάρσια τομή στη Χ.Θ. 9+788	36
Σχήμα 2.7: Εγκάρσια τομή στη Χ.Θ. 10+408	36
Σχήμα 2.8: Εγκάρσια τομή στη Χ.Θ. 10+928	38
Σχήμα 2.9: Εγκάρσια τομή στη Χ.Θ. 11+309	38
Σχήμα 2.10: Όφιολιθικός σχηματισμός - ψευδοστρωματική ακολουθία	40
Σχήμα 2.11: Εύρη τιμών GSI για διάφορους τύπους οφιολιθικών πετρωμάτων	42
Σχήμα 2.12: Συμπεριφορά που οφιολιθικών πετρωμάτων κατά τη διάνοιξη σηράγγων	47
Σχήμα 2.13: Πιθανή αστοχία - Κατηγορία I	48
Σχήμα 2.14: Πιθανή αστοχία - Κατηγορία II	48
Σχήμα 2.15: Πιθανή αστοχία - Κατηγορία II/III	49
Σχήμα 2.16: Πιθανή αστοχία - Κατηγορία III	49
Σχήμα 3.1: Φιλοσοφία Σχεδιασμού Σήραγγας Καλλιδρόμου	53
Σχήμα 3.2: Τυπική διατομή, εσωτερικό περίγραμμα με το περιτύπωμα του τρένου	57
Σχήμα 3.3: Τυπικές διατομές σήραγγας Καλλιδρόμου, (a) με κλειστό και (b) με ανοικτό ανεστραμμένο θόλο αντίστοιχα	58
Σχήμα 3.4: Τυπική διατομή των δύο σηράγγων στη συνδετήρια στοά - Τύπου DB	59
Σχήμα 3.5: Κάτοψη συνδετήριας σήραγγας	59
Σχήμα 4.1: Κάτοψη Βόρειου τμήματος	65
Σχήμα 4.2: Κάτοψη Βόρειου τμήματος με τα παρουσιασθέντα προβλήματα κατά την κατασκευή	66
Σχήμα 4.3: Βόρειο μέτωπο σε οφιολιθικό σχηματισμό - Εγκάρσια τομή σταθμών 131/132 με μετρήσεις	67
Σχήμα 4.4: Βόρειο μέτωπο σε οφιολιθικό σχηματισμό - Εγκάρσια τομή σταθμών 131/132 με μετακινήσεις εσωτερικής επένδυσης	68
Σχήμα 4.5: Γεωλογική τομή σήραγγας Καλλιδρόμου (Δεξιός Κλάδος) - Κεντρικό Τμήμα Σήραγγας	71
Σχήμα 4.6: Σχιστώδης Σερπεντινίτης (se.s), μέγιστο υπερκείμενο και στάθμη υδροφόρου ορίζοντα στο βόρειο και νότιο μέτωπο	73
Σχήμα 4.7: Διατομή άκαμπτης υποστήριξης, εφαρμογή στην περιοχή του σερπεντινίτη (se) και σχιστώδη σερπεντινίτη (se.s)	74
Σχήμα 4.8: Διατομή ελεγχόμενης παραμόρφωσης (ενδοτικού τύπου), εφαρμογή στην περιοχή του σερπεντινίτη (se) και σχιστώδη σερπεντινίτη (se.s)	75
Σχήμα 4.9: Λεπτομέρεια υποστήριξης διατομής ενδοτικού τύπου	76
Σχήμα 4.10: Διατομή ενδοτικού τύπου	76
Σχήμα 5.1: Γεωμετρία διατομής κατηγορίας A-7A-8	81
Σχήμα 5.2: Γεωλογικό προσομοίωμα.....	82
Σχήμα 5.3: 1ο στάδιο: Γεωστατικό Πεδίο.....	83
Σχήμα 5.4: 2ο στάδιο: Αποτόνωση βραχομάζας Α' φάσης αριστερού κλάδου.....	84
Σχήμα 5.5: 3ο στάδιο: Εκσκαφή και Υποστήριξη της Α' φάσης του Αριστερού κλάδου. .	84
Σχήμα 5.6: 4ο στάδιο: Αποτόνωση βραχομάζας της Β' φάσης του αριστερού κλάδου. .	85

Σχήμα 5.7:	5ο στάδιο: Εκσκαφή και Υποστήριξη της Β' φάσης του Αριστερού κλάδου.	85
Σχήμα 5.8:	6ο στάδιο: Αποτόνωση βραχομάζας Α' φάσης δεξιού κλάδου.....	86
Σχήμα 5.9:	7ο στάδιο: Εκσκαφή και Υποστήριξη της Α' φάσης του Δεξιού κλάδου.....	86
Σχήμα 5.10:	8ο στάδιο: Αποτόνωση της βραχομάζας της Β' φάσης του δεξιού κλάδου.	87
Σχήμα 5.11:	9ο στάδιο: Εκσκαφή και υποστήριξη της Β' φάσης του δεξιού κλάδου.....	87
Σχήμα 5.12:	10ο στάδιο: Τοποθέτηση τελικής υποστήριξης και στους δύο κλάδους.....	88
Σχήμα 5.13:	11ο στάδιο: Προσομοίωση ερπυστικών παραμορφώσεων.....	88
Σχήμα 5.14:	Αποτόνωση του περιβάλλοντος γεωυλικού με χρήση κατανεμημένου φορτίου κατά την Α' φάση εκσκαφής.....	89
Σχήμα 5.15:	Διατομή κατηγορίας Α-7Α-8 - Διαμήκης τομή	90
Σχήμα 5.16:	Εγκάρσια τομή Ι-Ι - Διάνοιξη και υποστήριξη (Α' φάση)	91
Σχήμα 5.17:	Εγκάρσια τομή ΙΙ-ΙΙ - Διάνοιξη και υποστήριξη (Β' φάση)	91
Σχήμα 5.18:	Λεπτομέρεια υποστήριξης και εσωτερικής επένδυσης	92
Σχήμα 5.19:	Ανάλυση με ύπαρξη υδροφόρου ορίζοντα - Ελαχιστοποίηση πίεσης στα τοιχώματα της σήραγγας.....	94
Σχήμα 5.20:	Οριζόντιες μετακινήσεις στη Χ.Θ 9+064,35 του αριστερού κλάδου των νοτίων μετώπων κατά το χρονικό διάστημα 27/06/2010 με 27/03/2011. Η άνω δεξιά παρειά της σήραγγας (σημείο 2) μετακινήθηκε προς το εσωτερικό κατά 420mm ενώ η άνω αριστερή (σημείο 3) κατά 249mm	95
Σχήμα 5.21:	Κατακόρυφες μετακινήσεις στη Χ.Θ 9+064,35 του αριστερού κλάδου των νοτίων μετώπων κατά το χρονικό διάστημα 27/06/2010 με 27/03/2011. Η άνω δεξιά παρειά της σήραγγας βυθίστηκε κατά 287mm, η άνω αριστερή βυθίστηκε κατά 700mm και η στέψη βυθίστηκε κατά 258mm	96
Σχήμα 5.22:	Οριζόντιες μετακινήσεις στη Χ.Θ 9+080,05 του δεξιού κλάδου των νοτίων μετώπων κατά το χρονικό διάστημα 03/08/2010 με 2/11/2010. Η άνω δεξιά παρειά της σήραγγας μετακινήθηκε προς το εσωτερικό κατά 171mm ενώ η άνω αριστερή κατά 280mm	96
Σχήμα 5.23:	Κατακόρυφες μετακινήσεις στη Χ.Θ 9+080,05 του δεξιού κλάδου των νοτίων μετώπων κατά το χρονικό διάστημα 03/08/2010 με 2/11/2010. Η άνω δεξιά παρειά της σήραγγας βυθίστηκε κατά 177mm, η άνω αριστερή βυθίστηκε κατά 228mm και η στέψη βυθίστηκε κατά 232mm	97
Σχήμα 5.24:	Συνολικές μετακινήσεις στη Χ.Θ. 9+080,5 του δεξιού κλάδου των νοτίων μετώπων κατά το χρονικό διάστημα 03/08/2010 με 2/11/2010. Η συνολική μετακίνηση της αριστερής παρειάς (σημείο 2) ξεπερνάει τα 360mm	97
Σχήμα 5.25:	Οριζόντιες μετακινήσεις στη Χ.Θ 9+063,10 του δεξιού κλάδου των νοτίων μετώπων κατά το χρονικό διάστημα 03/07/2010 με 19/10/2010. Η κάτω δεξιά παρειά της σήραγγας μετακινήθηκε προς το εσωτερικό κατά 997mm	98
Σχήμα 5.26:	Κατακόρυφες μετακινήσεις στη Χ.Θ 9+063,40 του δεξιού κλάδου των νοτίων μετώπων κατά το χρονικό διάστημα 03/07/2010 με 19/10/2010. Η άνω δεξιά παρειά της σήραγγας βυθίστηκε κατά 177mm, η άνω αριστερή βυθίστηκε κατά 623mm και η στέψη βυθίστηκε κατά 257mm	98
Σχήμα 5.27:	Συνολικές μετακινήσεις (συγκλίσεις) κατά το στάδιο 10 περιμετρικά των σηράγγων (προσομοίωση 001).....	101
Σχήμα 5.28:	Εξέλιξη συνολικών μετακινήσεων (συγκλίσεις) ανά στάδιο προσομοίωσης σε έξι χαρακτηριστικά σημεία των δύο κλάδων (προσομοίωση 001).....	101
Σχήμα 5.29:	Συνολικές μετακινήσεις (συγκλίσεις) κατά το στάδιο 10 περιμετρικά των σηράγγων (προσομοίωση 002).....	103
Σχήμα 5.30:	Εξέλιξη συνολικών μετακινήσεων (συγκλίσεις) ανά στάδιο προσομοίωσης σε έξι χαρακτηριστικά σημεία των δύο κλάδων (προσομοίωση 002).....	103

Σχήμα 5.31: Συνολικές μετακινήσεις (συγκλίσεις) κατά το στάδιο 10 περιμετρικά των σηράγγων (προσομοίωση 003).....	105
Σχήμα 5.32: Εξέλιξη συνολικών μετακινήσεων (συγκλίσεις) ανά στάδιο προσομοίωσης σε έξι χαρακτηριστικά σημεία των δύο κλάδων (προσομοίωση 003).....	105
Σχήμα 5.33: Συνολικές μετακινήσεις (συγκλίσεις) κατά το στάδιο 10 περιμετρικά των σηράγγων (προσομοίωση 004).....	107
Σχήμα 5.34: Εξέλιξη συνολικών μετακινήσεων (συγκλίσεις) ανά στάδιο προσομοίωσης σε έξι χαρακτηριστικά σημεία των δύο κλάδων (προσομοίωση 004).....	107
Σχήμα 5.35: Συνολικές μετακινήσεις (συγκλίσεις) κατά το στάδιο 10 περιμετρικά των σηράγγων (προσομοίωση 005).....	109
Σχήμα 5.36: Εξέλιξη συνολικών μετακινήσεων (συγκλίσεις) ανά στάδιο προσομοίωσης σε έξι χαρακτηριστικά σημεία των δύο κλάδων (προσομοίωση 005).....	109
Σχήμα 5.37: Συνολικές μετακινήσεις (συγκλίσεις) κατά το στάδιο 10 περιμετρικά των σηράγγων (προσομοίωση 006).....	111
Σχήμα 5.38: Εξέλιξη συνολικών μετακινήσεων (συγκλίσεις) ανά στάδιο προσομοίωσης σε έξι χαρακτηριστικά σημεία των δύο κλάδων (προσομοίωση 006).....	111
Σχήμα 5.39: Συνολικές μετακινήσεις (συγκλίσεις) κατά το στάδιο 10 περιμετρικά των σηράγγων (προσομοίωση 007).....	113
Σχήμα 5.40: Εξέλιξη συνολικών μετακινήσεων (συγκλίσεις) ανά στάδιο προσομοίωσης σε έξι χαρακτηριστικά σημεία των δύο κλάδων (προσομοίωση 007).....	113
Σχήμα 5.41: Συνολικές μετακινήσεις (συγκλίσεις) κατά το στάδιο 10 περιμετρικά των σηράγγων (προσομοίωση 008).....	115
Σχήμα 5.42: Εξέλιξη συνολικών μετακινήσεων (συγκλίσεις) ανά στάδιο προσομοίωσης σε έξι χαρακτηριστικά σημεία των δύο κλάδων (προσομοίωση 008).....	115
Σχήμα 5.43: Συνολικές μετακινήσεις (συγκλίσεις) κατά το στάδιο 10 περιμετρικά των σηράγγων (προσομοίωση 009).....	117
Σχήμα 5.44: Εξέλιξη συνολικών μετακινήσεων (συγκλίσεις) ανά στάδιο προσομοίωσης σε έξι χαρακτηριστικά σημεία των δύο κλάδων (προσομοίωση 009).....	117
Σχήμα 5.45: Εξέλιξη συνολικών μετακινήσεων (συγκλίσεις) ανά στάδιο προσομοίωσης σε έξι χαρακτηριστικά σημεία των δύο κλάδων (προσομοίωση 019pp).....	122
Σχήμα 5.46: Εξέλιξη εδαφικών μετακινήσεων ανά στάδιο προσομοίωσης (στάδια 1 με 4)	123
Σχήμα 5.47: Εξέλιξη εδαφικών μετακινήσεων ανά στάδιο προσομοίωσης (στάδια 5 με 8)	124
Σχήμα 5.48: Εξέλιξη εδαφικών μετακινήσεων ανά στάδιο προσομοίωσης (στάδια 9 με 11)	125
Σχήμα 5.49: Τάσεις von Mises κατά το στάδιο 10 (προσομοίωση 019pp).....	126
Σχήμα 5.50: Τάσεις von Mises κατά το στάδιο 11 (προσομοίωση 019pp).....	126
Σχήμα 5.51: Ζώνη πλαστικοποίησης κατά τα στάδια 2, 3, 4 και 5 (προσομοίωση 019pp)	127
Σχήμα 5.52: Ζώνη πλαστικοποίησης κατά το στάδιο 10 (προσομοίωση 019pp).....	128
Σχήμα 5.53: Ζώνη πλαστικοποίησης κατά το στάδιο 11 (προσομοίωση 019pp).....	128
Σχήμα 5.54: Πιέσεις πόρων κατά το στάδιο 11 (προσομοίωση 019pp).....	129
Σχήμα 5.55: Εξέλιξη πιέσεων πόρων για τα στάδια 1 με 4 (προσομοίωση 019pp).....	131
Σχήμα 5.56: Εξέλιξη πιέσεων πόρων για τα στάδια 5 με 8 (προσομοίωση 019pp).....	132
Σχήμα 5.57: Εξέλιξη πιέσεων πόρων για τα στάδια 9 με 11 (προσομοίωση 019pp).....	133
Σχήμα 5.58: Ολικό ύψος εδαφικών στοιχείων για τα στάδια 1 με 4 (προσομοίωση 019pp)	134
Σχήμα 5.59: Ολικό ύψος εδαφικών στοιχείων για τα στάδια 5 με 8 (προσομοίωση 019pp)	135

Σχήμα 5.60: Ολικό ύψος εδαφικών στοιχείων για τα στάδια 9 με 11 (προσομοίωση 019pp)	136
Σχήμα 5.61: Κατανομή αξονικής δύναμης N και καμπτικής ροπής M περιμετρικά του μανδύα Ε.Σ. της αριστερής διατομής	137
Σχήμα 5.62: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης αξονικής δύναμης και καμπτικής ροπής για τον εξωτερικό μανδύα Ε.Σ. πάχους 40cm στον αριστερό κλάδο (στάδια 3 με 5)	138
Σχήμα 5.63: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης αξονικής δύναμης και καμπτικής ροπής για τον εσωτερικό μανδύα Ε.Σ. πάχους 60cm στον αριστερό κλάδο (στάδιο 5)...	138
Σχήμα 5.64: Σημεία που έχουν πλαστικοποιηθεί στον μανδύα άμεσης υποστήριξης Ε.Σ. στην αριστερή σήραγγα	139
Σχήμα 5.65: Διάγραμμα συγκλίσεων στο θόλο της αριστερής σήραγγας κατά το στάδιο 11 για διάφορες τιμές του c με σταθερό E	141
Σχήμα 5.66: Διάγραμμα συγκλίσεων στην παρειά της αριστερής σήραγγας κατά το στάδιο 11 για διάφορες τιμές του c με σταθερό E	142
Σχήμα 5.67: Διάγραμμα συγκλίσεων στον πυθμένα της αριστερής σήραγγας κατά το στάδιο 11 για διάφορες τιμές του c με σταθερό E	142
Σχήμα 5.68: Διάγραμμα συγκλίσεων στο θόλο της αριστερής σήραγγας κατά το στάδιο 11	144
Σχήμα 5.69: Διάγραμμα συγκλίσεων στην παρειά της αριστερής σήραγγας κατά το στάδιο 11 για διάφορες τιμές του E με σταθερό c	145
Σχήμα 5.70: Διάγραμμα συγκλίσεων στον πυθμένα της αριστερής σήραγγας κατά το στάδιο 11 για διάφορες τιμές του E με σταθερό c	145
Σχήμα 5.71: Τάσεις Von Mises για την προσομοίωση 008 (στάδιο 10 και 11).....	148
Σχήμα 5.72: Διεκτροπική τάση για την προσομοίωση 008 (στάδιο 10 και 11).....	149
Σχήμα 5.73: Ζώνη πλαστικοποίησης περιμετρικά των σηράγγων κατά το στάδιο 10 για τις προσομοιώσεις 4,5 και 6.....	150

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Κατηγορίες Συντελεστών Διαπερατότητας κατά Terzaghi and Peck (1967).	15
Πίνακας 2.2: Τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά σχηματισμών.....	18
Πίνακας 2.3: Αντοχή ακέραίου πετρώματος και RQD.....	27
Πίνακας 2.4: Αποτελέσματα Ταξινόμησης Βραχομάζας κατά RMR - Προσαρμογή για σήραγγες.....	28
Πίνακας 2.5: Αποτελέσματα ταξινόμησης βραχομάζας κατά GSI- εφαρμογή για σήραγγες. 29	29
Πίνακας 2.6: Σύνοψη πιθανών κατηγοριών αστοχίας σε οφιολιθικό σχηματισμό.....	49
Πίνακας 5.1: Προσομοιώσεις και γεωτεχνικές παράμετροι που επιλέχθηκαν.....	99
Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα συγκλίσεων για την προσομοίωση 001	100
Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα συγκλίσεων για την προσομοίωση 002.....	102
Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα συγκλίσεων για την προσομοίωση 003.....	104
Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα συγκλίσεων για την προσομοίωση 004.....	106
Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα συγκλίσεων για την προσομοίωση 005.....	108
Πίνακας 5.7: Αποτελέσματα συγκλίσεων για την προσομοίωση 006.....	110
Πίνακας 5.8: Αποτελέσματα συγκλίσεων για την προσομοίωση 007.....	112
Πίνακας 5.9: Αποτελέσματα συγκλίσεων για την προσομοίωση 008.....	114
Πίνακας 5.10: Αποτελέσματα συγκλίσεων για την προσομοίωση 009.....	116
Πίνακας 5.11: Αποτελέσματα συγκλίσεων για τις προσομοιώσεις 010 με 018.....	118

Πίνακας 5.12: Αποτελέσματα συγκλίσεων για την προσομοίωση 019.....	119
Πίνακας 5.13: Αποτελέσματα συγκλίσεων για τις προσομοιώσεις 002pp, 005pp και 008pp	119
Πίνακας 5.14: Αποτελέσματα συγκλίσεων για την προσομοίωση 019pp.....	120
Πίνακας 5.15 Αποτελέσματα εδαφικών μετακινήσεων για την προσομοίωση 019 και 019pp	130
Πίνακας 5.16 Μεταβολή των συγκλίσεων σε 3 σημεία της αριστερής σήραγγας για σταθερό μέτρο ελαστικότητας E.....	141
Πίνακας 5.17 Μεταβολή των συγκλίσεων σε 3 σημεία της αριστερής σήραγγας για σταθερή συνοχή c.....	144
Πίνακας 5.18 Μεταβολή συγκλίσεων στην αριστερή σήραγγα (αποτόνωση) για $\lambda=0,6$ & $0,7$	146
Πίνακας 5.19 Μεταβολή συγκλίσεων στην αριστερή σήραγγα (στάδιο 11) για $\lambda= 0,6$ και $0,7$	147
Πίνακας 5.20: Επίδραση του Υδροφόρου ορίζοντα στις συγκλίσεις.....	151

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Στο εισαγωγικό κεφάλαιο θα παρουσιασθούν γενικά στοιχεία [21] αναφορικά με τη σήραγγα του Καλλιδρόμου, οι στόχοι της παρούσας εργασίας πρόκειται να ακολουθήσουν.

1.1. Σήραγγα Καλλιδρόμου - Γενικά Στοιχεία

Η σήραγγα του Καλλιδρόμου βρίσκεται βορειοδυτικά της Αθήνας στον ορεινό όγκο του Καλλιδρόμου. Αποτελεί τμήμα της Νέας Διπλής Σιδηροδρομικής Γραμμής Υψηλών Ταχυτήτων (Ν.Δ.Σ.Γ.Υ.Τ.) Τιθορέας - Λιανοκλαδίου - Δομοκού, η οποία έχει σχεδιασθεί για ταχύτητες έως 200 km/h, μειώνοντας το χρόνο ταξιδιού μεταξύ Αθήνας - Θεσσαλονίκης κατά μία (1) ώρα.



Εικόνα 1.1: Σήραγγα Καλλιδρόμου – Βόρειο Μέτωπο [21]

Η νέα χάραξη ξεκινά από το Σιδηροδρομικό Σταθμό Τιθορέας κατευθύνεται ανατολικά διασχίζοντας το όρος Καλλιδρόμο με δίδυμη σήραγγα μήκους 9.250 μέτρων η κάθε μία και ακολουθώντας πεδινή διαδρομή μέσω της πεδιάδας του Σπερχειού ποταμού καταλήγει στο Σιδηροδρομικό Σταθμό Λιανοκλαδίου.

Στη συνέχεια διασχίζει το όρος Όθρυς με δίδυμη σήραγγα μήκους 6.380 μέτρων η κάθε μία και ακολουθώντας πεδινή διαδρομή μέσω του οροπέδιου του Δομοκού (αποξηραμένη λίμνη Ξυνιάδας) κατέρχεται τον ορεινό όγκο του Δομοκού καταλήγοντας στην Θεσσαλική πεδιάδα και στον Σιδηροδρομικό Σταθμό Δομοκού.

Η (Ν.Δ.Σ.Γ.Υ.Τ.) Τιθορέας - Λιανοκλαδίου - Δομοκού σχεδιάζεται και κατασκευάζεται με τις πλέον εξελιγμένες τεχνολογίες σιδηροδρομικών έργων, Βάσει Ευρωπαϊκών προδιαγραφών. Παρακάτω, παρουσιάζεται περιληπτικά το φυσικό αντικείμενο του συγκεκριμένου έργου:

- 106 Km. Διπλής Σιδηροδρομικής Γραμμής
- 4 Σήραγγες μονής γραμμής συνολικού μήκους 30.837,00 m. (Σήραγγες Καλλιδρόμου και Όθρυος)
- 12 Σήραγγες διπλής γραμμής συνολικού μήκους 4.499,61 m.
- 18 Cut & Cover διπλής γραμμής συνολικού μήκους 2.374,75 m.
- 6 Cut & Cover μονής γραμμής συνολικού μήκους 1.708,00 m.
- 49 Σιδηροδρομικές Γέφυρες συνολικού μήκους 6.086,88 m.
- 32 Ανισόπεδες Διαβάσεις συνολικού μήκους 2.764,50 m.
- 2 Νέους Σιδηροδρομικούς Σταθμούς στο Μώλο και στον Άγιο Στέφανο και 2 νέες στάσεις στις Αγγείες και στο Θαυμακό και η πλήρης ανακαίνιση των Σιδηροδρομικών Σταθμών Τιθορέας, Λιανοκλαδίου, Δομοκού.



Εικόνα 1.2: Ν.Δ.Σ.Γ.Υ.Τ. Τιθορέα -Λιανοκλάδι-Δομοκός [21]

Με την κατασκευή του έργου στο τμήμα αυτό αντικαθίσταται το ορεινό κομμάτι (ορεινός όγκος του Μπράλου) της μονής σιδηροδρομικής γραμμής από Τιθορέα έως Λιανοκλάδι μήκους 56 Km με νέα διπλή σιδηροδρομική γραμμή μήκους 54 Km .

Στο τμήμα αυτό η χάραξη διέρχεται από εδάφη με ιδιαίτερα κακές γεωμορφολογικές συνθήκες. Η χάραξη χωρίζεται σε τρία (3) υποτμήματα:

- 1ο Υποτμήμα : Από Σιδηροδρομικό Σταθμό Τιθορέας (χιλιομετρική θέση 0) έως το 19ο χιλιόμετρο (στο υποτμήμα αυτό κατασκευάζεται η σήραγγα Καλλιδρόμου).
- 2ο Υποτμήμα: Από το 19ο έως το 40ο χιλιόμετρο (Στο εν λόγω τμήμα έχουν ολοκληρωθεί οι εργασίες).
- 3ο Υποτμήμα: Από το 40ο έως το 54ο χιλιόμετρο (τέλος τμήματος στον Σιδηροδρομικό Σταθμό Λιανοκλαδίου).

Στο 1ο υποτμήμα, μεταξύ των χιλιομετρικών θέσεων 0 έως 19, περιλαμβάνονται:

- 2 σήραγγες του Καλλιδρόμου συνολικού μήκους 18 Km ωφέλιμης διατομής 58 m².
- 7 Cut & cover, συνολικού μήκους 1.080 m.
- Γέφυρες συνολικού μήκους 506 m.
- 9 Km επιχωμάτων & ορυγμάτων.
- Παράπλευρη οδοποιία.



Εικόνα 1.3: Ν.Δ.Σ.Γ.Υ.Τ. Τιθορέας -Λιανοκλαδίου [21]

Το Έργο του Καλλιδρόμου είναι μέρος του Προγράμματος Αναβάθμισης και Εκσυγχρονισμού του Σιδηροδρομικού Διαδρόμου για τη προαναφερθείσα σιδηροδρομική γραμμή. Η αναβάθμιση της σιδηροδρομικής γραμμής Αθήνας - Θεσσαλονίκης παρέχει τη δυνατότητα ανάπτυξης των εμπορευματικών συνδυασμένων μεταφορών με τη σύνδεση του σύγχρονου σιδηροδρομικού δικτύου με τους διεθνείς λιμένες και την υλοποίηση σημαντικών επενδύσεων, αναδεικνύοντας την χώρα μας σε διεθνή κόμβο διακίνησης της ανατολικής μεσογείου. Η κατασκευή της σήραγγας του Καλλιδρόμου ξεκίνησε το 1997 και εκτιμάται ότι ο χρόνος διαδρομής Αθήνα - Θεσσαλονίκη πρόκειται να μειωθεί σε 3,5 ώρες. Πραγματοποιήθηκαν αρκετές αναθεωρήσεις της σύμβασης και το έργο ολοκληρώθηκε το 2013 (έγινε το breakthrough - “ξετρύπημα”).

1.2. Στόχοι της εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία χωρίζεται σε 2 μέρη. Στο πρώτο μέρος παρουσιάζονται γενικά στοιχεία της σήραγγας Καλλιδρόμου. Αναπτύσσονται οι επικρατούσες γεωλογικές συνθήκες αλλά και τα τεχνικογεωλογικά στοιχεία κατά μήκος της σήραγγας. Δίδονται επιπλέον κατασκευαστικές λεπτομέρειες σχετικά με τις διατομές που χρησιμοποιήθηκαν στο έργο, τη μέθοδο που ακολουθήθηκε για τη διάνοιξη και υποστήριξη της σήραγγας. Στο τέλος του πρώτου μέρους η διπλωματική εργασία εστιάζει σε προβλήματα που δημιουργήθηκαν κατά την κατασκευή της σήραγγας στο οφιολιθικό σύμπλεγμα του βορείου μετώπου και τον σχιστώδη σερπεντινίτη του νοτίου μετώπου.

Γίνεται η προσπάθεια ώστε το πρώτο μέρος να αποτελέσει μία έγκυρη βιβλιογραφική πηγή σχετικά με το έργο της σήραγγας του Καλλιδρόμου.

Στο δεύτερο μέρος, εστιάζεται η προσοχή στην περιοχή του σχιστώδη σερπεντινίτη στο νότιο τμήμα της σήραγγας Καλλιδρόμου, καθώς αποτέλεσε κομμάτι με δυσμενείς γεωλογικές συνθήκες διάνοιξης. Συλλέγονται όλες οι απαραίτητες πληροφορίες, δημιουργείται ένα γενικό προσομοίωμα με διάφορες γεωτεχνικές παραμέτρους στο περιβάλλον εργασίας του προγράμματος Phase2 και πραγματοποιούνται ανάστροφες αναλύσεις. Στόχος των ανάστροφων αναλύσεων είναι η προσέγγιση των πραγματικών γεωτεχνικών παραμέτρων της προαναφερθείσας περιοχής.

Κεφάλαιο 2

Γεωλογικά & Γεωτεχνικά Στοιχεία Έργου

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο πρόκειται να παρουσιασθούν οι γεωλογικές συνθήκες καθώς και γεωτεχνικά στοιχεία της σήραγγας Καλλιδρόμου όπως εκτιμήθηκαν από τη γεωλογική μελέτη [17]. Η οριστική γεωλογική μελέτη, βάσει της οποίας εκπονήθηκε η παρούσα διπλωματική εργασία, χωρίζεται σε 4 βασικούς άξονες - θεματικές ενότητες: Γεωλογικά, τεκτονικά, υδρογεωλογικά και τεχνικογεωλογικά στοιχεία. Στοιχεία της γεωλογικής μελέτης αναλύονται στις επόμενες παραγράφους. Ο τρόπος δόμησης του παρόντος κεφαλαίου υιοθετεί τη λογική διαδικασία της προαναφερθείσας μελέτης με βάση την οποία συντίθενται όλα τα γεωλογικά στοιχεία της περιοχής τα οποία πρόκειται να οδηγήσουν στον ασφαλή σχεδιασμό της σήραγγας του Καλλιδρόμου.

2.1. Γεωμορφολογία - Γενικά Στοιχεία

Το όρος Καλλίδρομο βρίσκεται στον Νομό Φθιώτιδας μεταξύ Ευβοϊκού κόλπου και της κοιλάδας του Κηφισού ποταμού, καλύπτει το μεγαλύτερο τμήμα της επαρχίας της Λοκρίδας. Αποτελεί έναν επιμήκη ορεινό όγκο μέσης διεύθυνσης ΔΒΔ - ΑΝΑ με μήκος περίπου 30Κm. Το υψηλότερο σημείο είναι η κορυφή Σταυρός με μέγιστο υψόμετρο 1399m, η οποία βρίσκεται κοντά στη δυτική άκρη του όρους.



Εικόνα 2.1: Θέση της χάραξης του έργου και ευρύτερη περιοχή [17]

Αναφορικά με τη μορφολογία του όρους Καλλιδρόμο στα μεγάλα υψόμετρα εντοπίζουμε απόκρημνες πλαγιές ενώ στα χαμηλότερα και μέχρι ενός σχετικά μεγάλου απολύτου υψόμετρου η κλίση είναι μικρή. Έντονο ανάγλυφο σε χαμηλά υψόμετρα παρατηρούμε στο κεντρικό τμήμα από την Αμφίκλεια.

Τα βόρεια πρηνή του όρους Καλλιδρόμου είναι ιδιαίτερα απότομα λόγω της δραστηριότητας της ομώνυμης ρηξιγενούς ζώνης αλλά και της παρουσίας ανθεκτικών πετρωμάτων. Τα νότια πρηνή εμφανίζουν μικρότερες κλίσεις και αισθητά μικρότερο κατά βάθος διάβρωση ρευμάτων.

Το ανάγλυφο σε ολόκληρη την περιοχή (κλίση πρηνών και ρέματα) διαφοροποιείται ακολουθώντας κυρίως τη γεωλογική και τεκτονική δομή.

Το υδρογραφικό δίκτυο στην περιοχή του Καλλιδρόμου είναι αρκετά ανεπτυγμένο με μικρής τάξης κλάδους (1-4^{ης}) ρεμάτων δενδριτικού κυρίως τύπου στους αλπικούς σχηματισμούς, που εξελίσσονται σε μονόκλινα μεγάλης τάξης (>4^{ης}) και μήκους ρέματα στους μεταλπικούς σχηματισμούς, τόσο στα βόρεια όσο και στα νότια.

Γενικά η λιθολογική σύσταση του υπό μελέτη ορεινού όγκου είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη και αναλύεται σε επόμενο εδάφιο. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι μεγάλο μέρος του ορεινού όγκου δομείται από ασβεστόλιθο αλλά και από πετρώματα οφιολιθικής σύστασης. Επιπλέον μεγάλο μέρος καλύπτεται από σχιστοκερατόλιθους και προσχώσεις. Οι πλαγιές των κλιτύων καλύπτονται από λιμναίες αποθέσεις, κλαστικά ιζήματα μολασικού τύπου καθώς και μερικά κορήματα.

Η υπό μελέτη περιοχή βρίσκεται σε ακτίνα υψηλής σεισμικής επικινδυνότητας, που ελέγχεται από το σεισμικά ενεργό ρήγμα της Αταλάντης. Από το ρήγμα αυτό αναμένεται μέγιστο μέγεθος σεισμού 7 R και μέγιστη αναμενόμενη επιτάχυνση 160 cm/sec². (Σεισμοτεκτονικός χάρτης, ΙΓΜΕ 1989).

Άλλη επικίνδυνη ρηξιγενής δομή στην ευρύτερη περιοχή, χωρίς να αποκλείεται ενεργοποίηση και αυτής της ίδιας της ρηξιγενούς ζώνης Καλλιδρόμου, είναι η ρηξιγενής ζώνη Αρκίτσας-Καμένων Βούρλων - Ηράκλειας.

Με βάση χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας κατά ΕΑΚ, 2000 η περιοχή εντάσσεται στη ζώνη III, για την οποία δίνεται επιτάχυνση σχεδιασμού (δ) 0,24.

Παρακάτω παρουσιάζεται η γεωλογική τομή της σήραγγας Καλλιδρόμου, όπως ελήφθη από παρουσίαση της ΕΡΓΟΣΕ τον Μάιο του 2013.

2.2. Λιθοστρωματογραφία

Η περιοχή ενδιαφέροντος δομείται από αλπικούς σχηματισμούς της Υποπελαγονικής ζώνης, οι οποίοι αποτελούν το γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής και καταλαμβάνουν τη μεγαλύτερη έκταση της περιοχής ενδιαφέροντος δομώντας τον ορεινό όγκο του Καλλιδρόμου. Ασύμφωνα επικάθονται οι υπερκείμενοι μεταλπικοί σχηματισμοί, οι οποίοι αναπτύσσονται κυρίως στα βόρεια και νότια πρηνή και πρόβουνους (λόφους) του ορεινού όγκου. Μικρές εμφανίσεις μεταλπικών σχηματισμών απαντώνται σποραδικά στον κύριο ορεινό όγκο

Το μεγαλύτερο ύψος υπερκείμενων γαιών είναι προσεγγιστικά 540μ στο μέσο της σήραγγας.

Βάσει της γεωλογικής μελέτης [17] αναφέρεται πως, η γεωλογική δομή και η λιθοστρωματογραφία της περιοχής μελέτης πραγματοποιήθηκε με βάση τη γεωλογική χαρτογράφηση της όλης περιοχής σε κλίμακα 1:5.000 και της στενής περιοχής στην είσοδο και έξοδο της σήραγγας του Καλλιδρόμου σε κλίμακα 1:2.000, σε συνδυασμό με τις γεωλογικές μηκοτομές που συντάχθηκαν για τις ανάγκες του έργου.

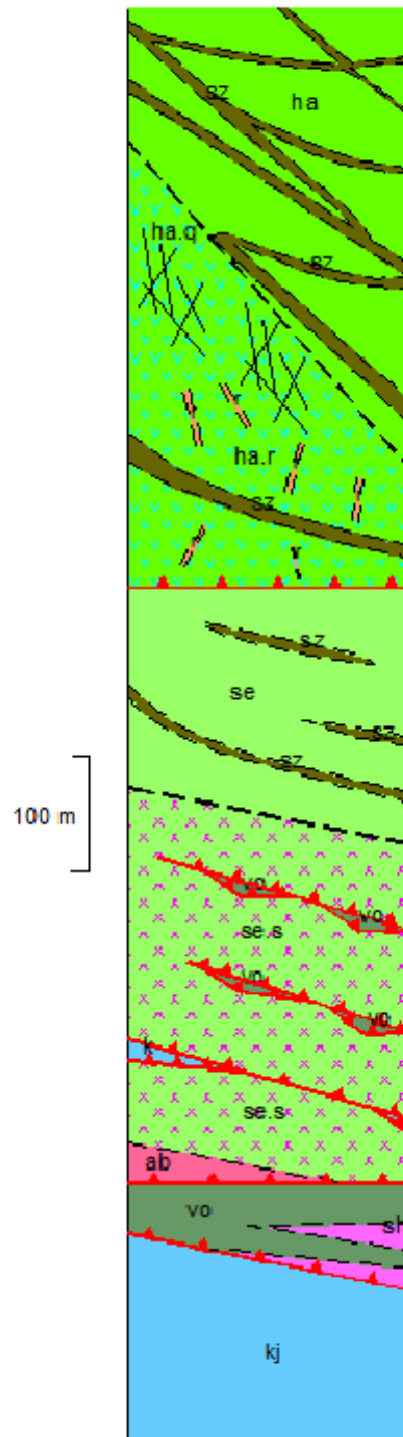
2.2.1.1. Αλπικοί σχηματισμοί

Οι αλπικοί σχηματισμοί διακρίνονται στις παρακάτω κύριες κατηγορίες σχηματισμών (από κάτω προς τα πάνω):

- A) ανθρακική ενότητα υπόβαθρου
- B) τεκτονικό κάλυμμα ηφαιστειοιζηματογενών σχηματισμών
- C) οφιολιθικό τεκτονικό κάλυμμα

Επιπλέον, σημειώνεται πως, το οφιολιθικό κάλυμμα υπέρκειται των ηφαιστειοιζηματογενών σχηματισμών και οι δυο σχηματισμοί είναι επωθημένοι στην ανθρακική ενότητα.

Στην παρακάτω εικόνα σκιαγραφείται η στρωματογραφική στήλη στην περιοχή μελέτης.



Εικόνα 2.3: Στρωματογραφική στήλη των αλπικών σχηματισμών που απαντώνται στην περιοχή μελέτης [17]

Στη συνέχεια αναλύονται εκτενώς, από κάτω προς τα επάνω, τα χαρακτηριστικά των κύριων λιθοστρωματογραφικών σχηματισμών κατά ενότητες.

A) Ανθρακική ενότητα υποβάθρου (kj)

Η ανθρακική ενότητα υποβάθρου δομείται από ανθρακικά πετρώματα, κυρίως ασβεστόλιθους και λιγότερο δολομίτες. Απαντάται σε μεγάλη έκταση στα δυτικά και βόρεια τμήματα της περιοχής μελέτης, ενώ παρουσιάζεται κατά θέσεις κάτω από επωθημένους σχηματισμούς.

Το ασβεστολιθικό υπόβαθρο στο Βόρειο τμήμα της σήραγγας έχει υποστεί εντονότερο τεκτονισμό σε σύγκριση με αυτό του Νότιου τμήματος και διαμορφώνονται επάλληλες συγκλινικές και αντικλινικές δομές. Κατά τα αξονικά επίπεδα και σε περιοχές έντονων πτυχώσεων αναμένονται εντονότερος κατακερματισμός, πτωχότερης ποιότητας βραχώμαζα.



Εικόνα 2.4: Διακλάσεις και επιφάνειες σχιστότητας στην ασβεστολιθική ανθρακική ενότητα (kj) στην βόρεια περιοχή του Καλλιδρόμου [17]

B) Τεκτονικό κάλυμμα ηφαιστειοζηματογενών σχηματισμών

Οι ηφαιστειοζηματογενείς σχηματισμοί απαντώνται τόσο στο βόρειο όσο και στο νότιο τμήμα της περιοχής ενδιαφέροντος και παρεμβάλλονται τεκτονικά μεταξύ της ανθρακικής ενότητας υποβάθρου και των επωθημένων σχηματισμών του οφιολιθικού τεκτονικού καλύμματος.

Έχουν αναγνωριστεί κατά θέσεις να παρεμβάλλονται τεκτονικά μέσα σε σχιστώδεις σερπεντινίτες με μορφή φακών λόγω εντατικών εφίππεύσεων στη βάση του οφιολιθικού καλύμματος.

Το εν λόγω τεκτονικό κάλυμμα δομείται από αργιλοπιρυτικούς σχηματισμούς μέσα στους οποίους παρεμβάλλονται ποικίλου πάχους και έκτασης ηφαιστειακά πετρώματα.

Οι αργιλοπιρυτικοί σχηματισμοί αποτελούν ένα σύστημα αργιλικών σχιστολίθων,

κερατολίθων και σε πολύ περιορισμένη έκταση ψαμμιτών και μαργαϊκών ασβεστολίθων που εναλλάσσονται μεταξύ τους σε λεπτά στρώματα.

Τα ηφαιστειακά πετρώματα (γν) αντιπροσωπεύονται από βασικές λάβες, βασαλτικής κυρίως σύστασης και παρουσιάζουν τόσο συμπαγή, όσο και μαξιλαροειδή μορφή.

Το πάχος των ηφαιστειοϊζηματογενών σχηματισμών κυμαίνεται από 40 έως και 100m.

Το σύνολο του σχηματισμού είναι έντονα τεκτονισμένο, πτυχωμένο και κατακερματισμένο.

C) Οφιολιθικό τεκτονικό κάλυμμα

Το οφιολιθικό τεκτονικό κάλυμμα απαντάται στην μεγαλύτερη έκταση της περιοχής μελέτης και δομεί εξολοκλήρου το κεντρικό τμήμα του ορεινού όγκου του Καλλίδρομου.

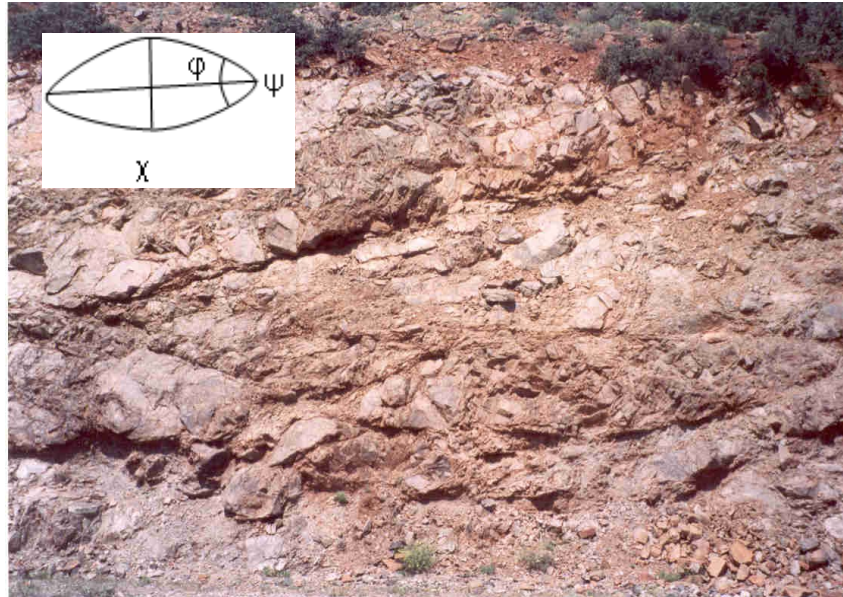
Συνιστούν γενικά μια συγκλινική μορφή μεταξύ του βόρειου και νότιου τμήματος. Σε θέσεις αντικλινικών δομών αναδύονται σε μορφή τεκτονικού παραθύρου τα ανθρακικά πετρώματα του υποβάθρου. Το συνολικό πάχος του καλύμματος φθάνει και τα 900 m.

Διακρίνεται σε τρεις πετρολογικές ενότητες - σχηματισμούς οι οποίοι από κάτω προς τα πάνω είναι:

- Σχιστώδεις σερπεντινίτες (se.s): Πρόκειται για ανομοιογενείς μάζες από τεκτονισμένους και σχιστοποιημένους σερπεντινίτες με έντονη φυλλώδη δομή. Μέσα σε αυτούς απαντώνται ενδιαστρώσεις μεταιζημάτων με σχιστώδη δομή που προσδίδουν κατά θέσεις στο σύνολο χαρακτήρα *mélange* (εικόνα μωσαϊκού). Απαντώνται στα κατώτερα στρώματα του οφιολιθικού συμπλέγματος.

- Σερπεντινίτες (se): Στην περιοχή ενδιαφέροντος έχει αναγνωριστεί έντονα τεκτονισμένη και πλήρως σερπεντιωμένη υπερβασική μάζα, η οποία παρουσιάζει ποικίλου βαθμού παραμόρφωση τύπου *boudinage*, γκριζοπράσινου χρώματος. Η μάζα αυτή υπόκειται τεκτονικά των σερπεντιωμένων χαζτβουργιτών.

Συχνά το όριό τους με τους σχιστώδεις σερπεντινίτες είναι ασαφές, ενώ η ένταση της παραμόρφωσης στην όλη μάζα μειώνεται προς τα ανώτερα μέλη τους. Αυτό διαπιστώνεται με την αύξηση των διαστάσεων του *boudinage* (άξονες x , ψ) και την οξεία γωνία που σχηματίζουν (φ).



Εικόνα 2.5: Σερπεντινίτης (se) με χαρακτηριστικές μορφές boudinage [17]

- Σερπεντινωμένοι χαρτζβουργίτες. Πρόκειται για υπερβασικά μέλη του οφιολιθικού καλύμματος, κυρίως χατζβουργικής σύστασης, τα οποία παρουσιάζουν ποικίλο βαθμό σερπεντινίωσης. Πρόκειται για γκριζοπράσινα διερρηγμένα πετρώματα με παρουσία ζωνών διάτμησης (ha). Σε μεγάλη έκταση στο νότιο τμήμα του οριοθετείται μάζα σερπεντινωμένου χατζβουργίτη (ha.r) η οποία διασχίζεται από ασυνεχείς ροδιγκιτιωμένες γαββρικές φλέβες ποικίλου πάχους (r). Η ίδια μάζα διασχίζεται κατά θέσεις από δίκτυο φλεβών, από μαγνισίτη - καολινίτη - χαλαζία - ασβεσίτη, το οποίο κατά ζώνες δημιουργεί πυκνό δίκτυο χαλαζιακών φλεβιδίων με παράλληλη τοπική υδροθερμική εξαλλοίωση των σερπεντινωμένων χατζβουργιτών (ha.q).

2.2.1.2. Μεταλπικοί Σχηματισμοί

Στο βόρειο και νότιο τμήμα της περιοχής ενδιαφέροντος αναπτύσσονται κατά κύριο λόγο οι μεταλπικοί σχηματισμοί οι οποίοι παρουσιάζουν ικανό πάχος και επικάθονται ασύμφωνα των αλπικών σχηματισμών. Οι εν λόγω σχηματισμοί αναπτύσσονται στα χαμηλότερα υψομετρικά τμήματα του ορεινού όγκου και οριοθετούνται με κρασπεδικά ρήγματα ικανού άλματος. Κατά θέσεις απαντώνται και στην ορεινή περιοχή.

Οι μεταλπικοί σχηματισμοί διακρίνονται, από κάτω προς τα επάνω σε:

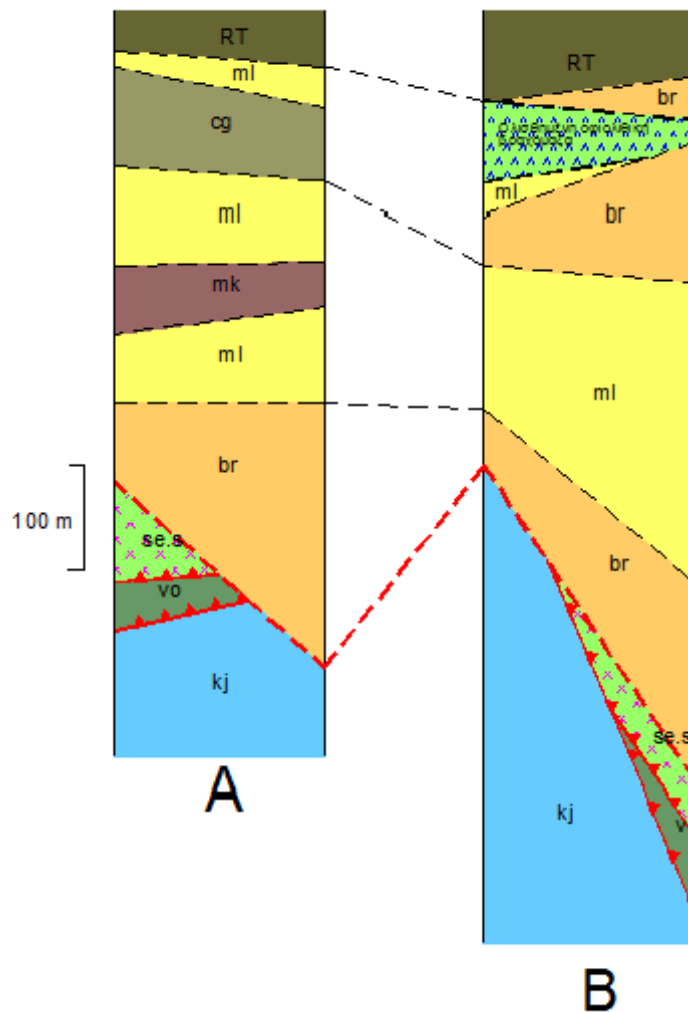
- A) Σχηματισμούς Ανωτέρου Πλειοκαίνου - Ανωτέρου Πλειστοκαίνου
- B) Σχηματισμούς και αποθέσεις Ανωτέρου Πλειστοκαίνου - Ολοκαίνου.

Οι σχηματισμοί του Ανωτέρου Πλειοκαίνου - Ανωτέρου Πλειστοκαίνου αποτελούν κυρίως κλαστικά και λιγότερο βιοχημικά - χημικά ιζήματα ποταμοχερσαίας και λιμναίας προέλευσης. Σχηματίστηκαν σε περιβάλλον συντεκτονικής βάθυνσης των μεταλπικών λεκανών, γεγονός το οποίο μπορεί να αιτιολογηθεί από την έλλειψη σταθερότητας στη σύστασή τους, τόσο κατά την στρωματογραφική, όσο και κατά την πλευρική τους εξέλιξη.

Αποτέλεσμα αυτού είναι οι συχνές πλευρικές μεταβάσεις και η εντατική αυξομείωση του πάχους των σχηματισμών από περιοχή σε περιοχή.

Οι σχηματισμοί του Ανωτέρου Πλειστοκαίνου - Ολοκαίνου αποτελούνται από ποταμοχερσαίες αποθέσεις, κορήματα και λιγότερο κώνους κορημάτων, από αδροκλαστικά υλικά, καθώς και αποθέσεις εντατικής κινητικότητας, διάβρωσης - εναπόθεσης προϋπαρχόντων μεταλλικών σχηματισμών.

Παρακάτω παρουσιάζεται η στρωματογραφική κολόνα της περιοχής μελέτης. Παρατηρούμε πως οι σχηματισμοί και αποθέσεις του Ανωτέρου Πλειστοκαίνου - Ολοκαίνου επίκεινται ασύμφωνα τόσο των σχηματισμών Ανωτέρου Πλειστοκαίνου - Ανωτέρου Πλειστοκαίνου, όσο και σχηματισμών του Αλπικού υποβάθρου



Εικόνα 2.6: Στρωματογραφική στήλη των αλπικών σχηματισμών που απαντώνται στην περιοχή μελέτης [17]

A) Σχηματισμοί Ανωτέρου Πλειοκαίνου - Ανωτέρου Πλειστοκαίνου

- Κροκαλολατυπαγή (br): Συνεκτικά κροκαλολατυπαγή οφιολιθικής και ασβεστολιθικής σύστασης με παρουσία στρώσεων η και φακών από αργίλους (κυρίως ερυθρές) αλλά και άμμους και χάλικες.

- Ασβεστιτική μάργα (mk): Συμπαγείς ασβεστιτικές μάργες κιτρινόλευκου χρώματος με παρουσία κατά θέσεις οργανικών ενστρώσεων. Καταλαμβάνει ικανή έκταση του νότιου τμήματος, περιοχή Μόδι, υπερκείμενο των προαναφερθέντων κροκαλολατυποπαγών.

Σε λίγες θέσεις όπου κατέστη δυνατή η παρατήρηση διαπιστώθηκε ότι αυτοί υπέρκεινται με δυσυμφωνία ή/και στρωματογραφική ασυμφωνία των κροκαλολατυποπαγών.

- Ασβεστολιθικά κροκαλοπαγή και λατυπαγή (cg): Συνεκτικά και κατά θέσεις ισχυρά συγκολλημένα ασβεστολιθικά λατυπαγή με συχνή παρουσία ογκολίθων, τα οποία παρουσιάζουν βραχώδη χαρακτήρα. Στα ανώτερα τμήματα συναντώνται κροκαλολατυπαγή.

B) Σχηματισμούς και αποθέσεις Ανωτέρου Πλειστοκαίνου - Ολοκαίνου.

- αποθέσεις αναβαθμίδων (RT): Ημισυνεκτικά έως και συνεκτικά ανοιχτόχρωμα υλικά, από κροκαλοπαγή, αργίλους και λιγότερο άμμους και χάλικες, σε στρώσεις η και φακούς. Το ποσοστό συμμετοχής των υλικών αυτών και το πάχος των στρώσεων διαφοροποιείται κατά περιοχές.

-πλευρικά κορήματα - κώνοι κορημάτων (SC): Ελαφρά συνεκτικά ασβεστολιθικά και λιγότερο οφιολιθικά λατυπαγή, κατά θέσεις συγκολλημένα με ασβεστολιθικό υλικό. Το χρώμα τους ποικίλει ανάλογα με τη σύσταση τους από το υπόλευκο ως το καστανέρυθρο.

-Αλλουβιακές αποθέσεις (AL): Χαλαρής δομής υλικά, αργιλικής κυρίως σύστασης με διάσπαρτες η και σε μικροενστρώσεις ασβεστολιθικές και οφιολιθικές κροκαλοτύπες, καστανέρυθρου χρώματος. Απαντώνται σε θέσεις μικρής μορφολογικής κλίσης, εσωτερικές λεκάνες και ποταμοχειμάρριες περιοχές.

2.3. Υδρογεωλογικές Συνθήκες

Παρουσιάζονται οι υδρογεωλογικές συνθήκες της ευρύτερη περιοχής της κατασκευής της σήραγγας. Σωστή περιγραφή και παρουσίαση της υδρογεωλογικής περιοχής δίνει τη δυνατότητα εύρεσης και αντιμετώπισης αναμενόμενων προβλημάτων λόγω υπόγειας ροής κατά τη διάρκεια κατασκευής της σήραγγας και λειτουργίας. Προκειμένου να περιγραφούν τα υδρολιθογικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών απογράφονται οι πηγαίες αναβλύσεις, εγκαθίστανται πιεζόμετρα σε επιλεκτικές θέσεις και αξιολογούνται οι μετρήσεις τους.

Η ταξινόμηση των γεωλογικών σχηματισμών ως προς την κατηγορία του συντελεστή διαπερατότητας k έγινε με βάση την ταξινόμηση κατά Terzaghi and Peck (1967), η οποία και παρουσιάζεται στον πίνακα που ακολουθεί.

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ k (m/sec)	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ
$10^{-3} \leq k$	Υψηλή
$10^{-5} \leq k < 10^{-3}$	Μέτρια
$10^{-7} \leq k < 10^{-5}$	Χαμηλή
$10^{-9} \leq k < 10^{-7}$	Πολύ χαμηλή
$k < 10^{-9}$	Πρακτικά αδιαπέρατος σχηματισμός

Πίνακας 2.1: Κατηγορίες Συντελεστών Διαπερατότητας κατά Terzaghi and Peck (1967) [17]

Η ταξινόμηση των γεωλογικών σχηματισμών στις κατηγορίες αυτές γίνεται κατ' εκτίμηση, σύμφωνα με υδρογεωλογικά κριτήρια και μακροσκοπικές παρατηρήσεις, καθώς δεν έχουν εκτελεσθεί επιτόπου δοκιμές διαπερατότητας.

Οι υδρολογικές συνθήκες της περιοχής έπειτα από αξιολόγηση των αποτελεσμάτων συνοψίζονται σε 3 περιπτώσεις ανάπτυξης υδροφόρων οριζόντων:

1. Αργιλομαργαϊκοί σχηματισμοί:

Αναμένεται υπό πίεση υδροφορία μικρής δυναμικότητας ($k \leq 10^{-7}$), η οποία αναπτύσσεται κυρίως στις αμμώδεις ενστρώσεις και φακούς των προαναφερθέντων σχηματισμών.

2. Σχηματισμοί οφιολιθικού συμπλέγματος

Σχετικά με τους σχηματισμούς οφιολιθικού συμπλέγματος, παρατηρούμε πως οι σερπεντινωμένοι χαρτζβουργίτες παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη διαπερατότητα. Θεωρούνται ημιδιαπερατοί σχηματισμοί και η κυκλοφορία νερού αναμένεται να είναι

μικρής δυναμικότητας και να πραγματοποιείται μέσω των ασυνεχειών του πετρώματος καθώς και των ζωνών διάτμησης και κατακερματισμού.

Λόγω της εκλεκτικής κυκλοφορίας νερού πλήθος μικροπηγών εκδηλώνονται σε όλη την έκταση τους. Σημαντικότερες πηγαίες αναβλύσεις από το σχηματισμό αυτό εκδηλώνονται στο Δυτικό τμήμα με δυναμικότητα της τάξης των 20 m³/h και στο Ανατολικό τμήμα. Αυτές οι πηγές εντοπίζονται στην επαφή με τους σερπεντινίτες (se) και σχιστώδεις σερπεντινίτες (se.s), σχηματισμοί οι οποίοι μπορούν να θεωρηθούν ως αδιαπέρατο υπόβαθρο.

3. Ανθρακικό υπόβαθρο

Παρατηρούμε πλούσια καρστική υδροφορία, η οποία εκφορτίζεται μέσω πηγών στα περιθώρια του ορεινού όγκου, στη ευρύτερη περιοχή του Καλλιδρόμου προς Β έως ΒΑ και Ν έως ΝΑ. Το επίπεδο βάσης της υδροφορίας αναμένεται να διαμορφώνεται χαμηλότερα από την ερυθρά της σήραγγας.

2.4. Τεχνικογεωλογικές Συνθήκες

Στο συγκεκριμένο εδάφιο παρουσιάζεται η φυσικομηχανική συμπεριφορά των γεωλογικών σχηματισμών. Λαμβάνοντας υπόψη τις μακροσκοπικές παρατηρήσεις υπαίθρου και τις εργαστηριακές δοκιμές οι γεωλογικοί σχηματισμοί ομαδοποιήθηκαν σε τεχνικογεωλογικές ενότητες οι οποίες παρουσιάζονται σε επόμενη υπό-παραγράφο. Σημειώνεται πως, για την σύνταξη των δεδομένων σχεδιασμού του έργου, και κατά συνέπεια των τεχνικογεωλογικών ενότητων, προηγήθηκε τεχνική αξιολόγηση 19 ερευνητικών γεωτρήσεων η οποία δίνει μία σαφή εικόνα της γεωλογικής δομής της υπερκείμενης μάζας της σήραγγας.

2.4.1. Αξιολόγηση Γεωτεχνικών ερευνών

Παρακάτω παρατίθεται εποπτικός πινάκας ο οποίος παρουσιάζει τις τεχνικογεωλογικές ενότητες και τα επιμέρους χαρακτηριστικά τις. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί έχουν διαχωριστεί σε 2 βασικές κατηγορίες: στους μεταλπικούς σχηματισμούς, οι οποίοι έχουν κυρίως κοκκώδη χαρακτηριστικά K1, K2, και στους αλπικούς σχηματισμούς οι οποίοι χαρακτηρίζονται κυρίως ως μέσο ασυνεχειών (A1, A2, ...).

Η ταξινόμηση σε τεχνικογεωλογικές ενότητες γίνεται κατά αύξουσα σειρά από αυτές με πτωκά μηχανικά χαρακτηριστικά προς αυτές με καλά.

Τα τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά που σχολιάζονται ανά τεχνικογεωλογική ενότητα είναι η ανομοιομορφία, η επιδεκτικότητα σε χαλάρωση και διάβρωση, η διαπερατότητα, η εκτιμώμενη εκσκαψιμότητα, η αναμενόμενη καταλληλότητα των υλικών και η σεισμική επικινδυνότητα, σύμφωνα με τον ΕΑΚ 2000.

Σημειώνεται, πως τα χαρακτηριστικά αυτά είναι ενδεικτικά και γι' αυτό δίνονται κατά περίπτωση εύρη τιμών ή κατηγοριών.



Εικόνα 2.7: Ερευνητική Γεώτρηση KT5 και δειγματοληψία(Βάθος: 458,30m - 463,20m, Σχιστώδης Σερπεντινίτης [17])

Πίνακας 2.2: Τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά σχηματισμών [17]

ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ	ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΝΟΤΗΤΑ	ΑΝΟΜΟΙΟΜΟΡΦΙΑ	ΕΥΚΟΛΙΑ ΣΤΗΝ ΑΠΟΣΛΑΘΡΩΣΗ	ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ	ΕΚΣΚΑΨΙΜΟΤΗΤΑ	ΑΝΑΜΕΝΟΜΕΝΗ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΗΤΑ ΥΛΙΚΩΝ	ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑ
1	2	3	4	5	6	7	8
I. ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ							
ΑΡΓΙΛΟΜΑΡΓΑΙΚΟΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ	ml (K1)	III	IV	A4/A5	Γ2/Γ3	E0	B
ΑΣΒΕΣΤΙΤΙΚΕΣ ΜΑΡΓΕΣ	mk (K2)	III	III	A4	Γ3	E0	B
ΚΡΟΚΑΛΟΛΑΤΥΠΟΠΑΓΕΣ	br (K3)	IV	III	K3/A4	Γ3/B4	E0/E1	B
ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΙΚΑ ΚΡΟΚΑΛΟΠΑΓΗ - ΛΑΤΥΠΟΠΑΓΗ	cg (K4)	III	II	K2/K3	Γ3/B4	E1/E2	B
II. ΑΛΠΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ							
ΖΩΝΕΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ - ΥΠΕΡΒΑΣΙΚΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ	sz (A1)	III	III	Π3/A4	Γ3	E0	B
ΣΧΙΣΤΩΔΕΙΣ ΣΕΡΠΕΝΤΙΝΙΤΕΣ	se.s (A2)	III	III	A4/A5	Γ3/B4	E1/E2	A
ΗΦΑΙΣΤΕΙΑΚΑ	vo (A3)	III	III	A4/A5	Γ3/B4	E1/E2	A
ΣΧΙΣΤΟΚΕΡΑΤΟΛΙΘΟΙ	sh (A4)	III	II	A4/A5	B4	E2	A
ΣΕΡΠΕΝΤΙΝΙΤΕΣ	se (A5)	II	II	K3/A4	B4	E3/4	A
ΣΕΡΠΕΝΤΙΝΙΩΜΕΝΟΙ ΧΑΡΤΖΒΟΥΡΓΙΤΕΣ	ha, ha.r, ha.c (A6)	II	I	K3	B5	E3/4	A
ΙΟΥΡΑΣΙΚΟΙ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΙ	kj (A7)	I	I	K1/K2	B5	E3/4	A

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

- 3, 4, I ΜΙΚΡΗ 5 1 $10^{-3} \leq k$ ΥΨΗΛΗ Π: ΠΟΡΩΔΕΣ ΜΕΣΟ
(m/sec)
II ΜΕΤΡΙΑ 2 $10^{-5} \leq k < 10^{-3}$ ΜΕΤΡΙΑ Κ: ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΚΑΙ ΡΩΓΜΑΤΩΜΕΝΟ ΜΕΣΟ
III ΜΕΓΑΛΗ 3 $10^{-7} \leq k < 10^{-5}$ ΧΑΜΗΛΗ Α: ΠΡΑΚΤΙΚΑ ΑΔΙΑΠΕΡΑΤΟΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ
IV ΠΟΛΥ ΜΕΓΑΛΗ 4 $10^{-9} \leq k < 10^{-7}$ ΠΟΛΥ ΧΑΜΗΛΗ
5 $k < 10^{-9}$ ΠΡΑΚΤΙΚΑ ΑΔΙΑΠΕΡΑΤΟΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ

Γ1 ΧΕΙΡΟΝΑΚΤΙΚΑ ΜΕΣΑ

Γ2 ΕΥΚΟΛΑ ΜΕ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΜΕΣΑ (ΕΚΣΚΑΦΕΑΣ)

Γ3 ΔΥΣΚΟΛΑ ΜΕ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΜΕΣΑ (ΠΡΟΩΘΗΤΗΡΑΣ)

B4 ΔΥΣΚΟΛΑ ΜΕ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΜΕΣΑ ΚΑΙ ΠΙΘΑΝΗ ΧΡΗΣΗ ΕΚΡΗΚΤΙΚΩΝ

B5 ΕΚΡΗΚΤΙΚΑ

ΓΑΙΟΗΜΙΒΡΑΧΟΣ

ΒΡΑΧΟΣ

7 E0 ΑΚΑΤΑΛΛΗΛΟ
E1 ΑΠΟΔΕΚΤΟ

E2 ΚΑΤΑΛΛΗΛΟ
E3/4 ΕΠΙΛΕΚΤΟ

8 ΕΑΚ, 2000

ΣΗΜ: ΟΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΙ ΒΑΣΙΖΟΝΤΑΙ ΣΕ ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

2.4.2. Μεταλλικοί Σχηματισμοί

Ενότητα K1

Αργιλομαργαίικός σχηματισμός (ml)

Η συγκεκριμένη τεχνικογεωλογική ενότητα παρουσιάζει τα πτωχότερα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά. Παρουσιάζει μεγάλη ετερογένεια, χαλαρότητα σε διάβρωση και δομείται από εναλλαγές ενστρώσεων στιφρών μπλε-γκρι ισχυρά σχιστοποιημένων αργίλων, οι οποίοι κατά θέσεις περιέχουν υπόλευκα ασβεστίτικα συντρίμματα και ενστρώσεων στιφρών καστανών αργίλων. Επιπλέον εμφανίζονται κατά θέσεις φακοειδείς ενστρώσεις κροκαλοπαγών. Στο αργιλικό τμήμα έχουν χαρτογραφηθεί επιφάνειες διάτμησης (slickenslides).

Ο υπό μελέτη σχηματισμός παρουσιάζει μέση έως υψηλή πλαστικότητα αλλά και διογκωσιμότητα. Σημειώνεται πως, το τελευταίο χαρακτηριστικό οφείλεται στη δόμηση της αργίλου από διογκούμενα ορυκτά (πχ. μοντμοριλονίτης).

Έχουν προκληθεί σοβαρές αστοχίες στο Δεξιό κλάδο του Νότιου Μετώπου, οι οποίες οφείλονται σε ένα σύμπλεγμα παραγόντων όπως της παρουσίας εντατικού πεδίου τάσεων λόγω της ενεργού τεκτονικής στην ευρύτερη περιοχή, της επιδεκτικότητας του υλικού σε παραμορφώσεις, και την παρουσία νερού στις αμμώδεις ενστρώσεις μέσα στην αργιλική μάζα.



Εικόνα 2.8: Αργιλικός Σχηματισμός - Νότιο Μέτωπο: Οι πιέσεις στο κέλυφος της σήραγγας οδήγησαν σε θραύση του θόλου της σήραγγας σε μήκος 40m [21]

Σοβαρό πρόβλημα στην ευστάθεια της διατομής δημιουργείται λόγω της ανομοιομόρφης δομής του σχηματισμού.

Κύριες μορφές αναμενόμενων αστοχιών μπορεί να είναι καταπτώσεις, όταν συναντώνται στην οροφή, υπερεκκαφές και άμεση εμφάνιση συγκλίσεων, όταν γίνεται απότομη εκτόνωση νερού. Αυτό μπορεί να συμβεί όταν διατηρηθούν με τις αγκυρώσεις φακοί αμμώδους υλικού με εγκλωβισμένο νερό.

Για την διάνοιξη της σήραγγας στο σχηματισμό αυτό έχει προταθεί από το μελετητή η χρήση δοκών προπορείας βαρέως τύπου, μικρό βήμα πρόσχωσης και άμεση τοποθέτηση ισχυρών μέτρων προσωρινής υποστήριξης.

Ενότητα K2

Ασβεστικές μάργες (mk)

Πρόκειται για συμπαγή σχηματισμό, κιτρινόλευκου χρώματος, ο οποίος παρουσιάζει μεγάλη ανομοιομορφία δομούμενος κατά θέσεις από οργανικές ενστρώσεις. Σημειώνεται πως οι ασβεστικές μάργες παρουσιάζουν ευκολία στην αποσάθρωση. Σύμφωνα με το μελετητή, δεν αναμένονται προβλήματα ευστάθειας όταν συναντάται ο σχηματισμός σε πλήρη διατομή.

Επιπλέον ο μελετητής υπογραμμίζει πως, τοπικές αστοχίες μπορεί να εκδηλωθούν με την μορφή καταπτώσεων στην περίπτωση κατά την οποία ο σχηματισμός συναντάται στην οροφή της σήραγγας και παρουσιάζει μικρό πάχος λόγω αποσφήνωσης μέσα στον αργιλομαργαϊό σχηματισμό.

Είναι αναμενόμενη εμφάνιση υγρασίας στην διεπιφάνεια με τις αργίλους.

Ενότητα K3

Κροκαλολατυπαγές (br)

Πρόκειται για σχηματισμό συνεκτικής φύσεως, ο οποίος συνίσταται από κροκάλες και λατύπες οφιολιθικής και ασβεστολιθικής προέλευσης. Συχνή είναι η παρουσία καστανέρυθρων αργιλικών ενστρώσεων ή φακών στη μάζα του σχηματισμού, πάχους 0,5 m έως 2 m περίπου. Σπανιότερα συναντώνται άμμοι και χάλικες.

Σημαντικό χαρακτηριστικό του σχηματισμού, το οποίο έχει αντίκτυπο στις συνθήκες ευστάθειας του μετώπου, είναι η πολύ μεγάλη ανομοιομορφία που παρουσιάζει με την συχνή εναλλαγή σχετικά συνεκτικών - ημιδιαπερατών και σχετικά χαλαρών - αδιαπέρατων υλικών. Οι συνθήκες αυτές ευνοούν την περιορισμένη κυκλοφορία νερού στα πλέον αδρομερή τμήματα και είναι αναμενόμενη η παρουσία σταγόνων έως μικρής ροής στην διεπιφάνεια.

Επίσης είναι πιθανές διογκώσεις στα αργιλικά μέλη.



Εικόνα 2.9: Κροκαλολατυποπαγή (br) στην περιοχή βορείου τμήματος Καλλιδρόμου [17]

Για την διάνοιξη της σήραγγας στο σχηματισμό αυτό έχει προταθεί από το μελετητή η χρήση δοκών προπορείας ελαφρού τύπου (spilling) και άμεση τοποθέτηση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης.

Ενότητα K4

Ασβεστολιθικά κροκαλοπαγή - λατυποπαγή (cg)

Ο εν λόγω σχηματισμός παρουσιάζει συνεκτικότητα με κυμαινόμενο βαθμό συγκόλλησης που συνίσταται από ασβεστολιθικές κροκάλες και κυρίως λατύπες σε ασβεστοαργιλικό έως ασβεστομαργαϊκό συνδετικό υλικό.

Συχνή είναι η παρουσία ογκόλιθων, οι οποίοι παρουσιάζουν βραχώδη χαρακτήρα.

2.4.3. Αλπικοί Σχηματισμοί

Ενότητα A1

Ζώνες διάτμησης (sz)

Αποτελούν εδαφοποιημένα, ασθενώς επανασυγκολλημένα και τεκτονικά διατμημένα υλικά. Υπερισχύουν ασυνέχειες πολύ αποσαθρωμένες με γραμμές ολίσθησης και γωνιώδη θραύσματα του πετρώματος.



Εικόνα 2.10: Ζώνη διάτμησης (Shear zone, sz) στους χαρτζβουργίτες (ha) [17]

Για την υπόγεια διάνοιξη των σηράγγων στην ενότητα αυτή, θεωρώντας συμβατικές μεθόδους εκσκαφής, εκτιμάται ότι θα απαιτηθούν αυξημένα μέτρα προστασίας και υποστήριξης ανάλογα με το μήκος συνάντησης (π.χ. δοκοί προπορείας, αγκύρια fiberglass στο μέτωπο, μικρό βήμα προχώρησης και άμεση επένδυση της διατομής).

Εκσκάπτονται δύσκολα με μηχανικά μέσα και τα υλικά που προκύπτουν κρίνονται με μακροσκοπικά κριτήρια ακατάλληλα έως οριακά αποδεκτά για χρήση σε επικώματα.

Ενότητα Α2

Σχιστώδεις Σερπεντινίτες (se.s)

Αποτελούν γαιοημιβραχώδη σχηματισμό με έντονη ετερογένεια. Έχει υποστεί έντονη τεκτονική καταπόνηση και παρουσιάζει φυλλώδη δομή. Βρίσκεται στη βάση του οφιολιθικού καλύμματος και παρουσιάζει πτωχή, κατά κύριο λόγο, αλληλοεμπλοκή και μηχανικά χαρακτηριστικά.

Κυρίαρχο σύστημα ασυνέχειας αποτελεί η σχιστότητα, τα επίπεδα της οποίας αποχωρίζονται εύκολα.

Μέσα στη μάζα του σχηματισμού αναμένονται εγκλωβισμένα τεκτονικά ηφαιστειακά, κερατολιθικά, ασβεστολιθικά σώματα τα οποία παρουσιάζουν καλύτερη σχετικά ποιότητας βραχώμαζα.



Εικόνα 2.11: Μαγκωμένα κομμάτια κρυσταλλικού ασβεστόλιθου (kj) μέσα στους σχιστώδεις σερπεντινίτες. (se.s) Περιοχή νοτίου τμήματος Καλλιδρόμου (Αναγνώριση πεδίου) [17]

Η εκσκαφή με μηχανικά μέσα παρουσιάζει αρκετές δυσκολίες και έχει προταθεί βοηθητικά η χρήση εκρηκτικών για τη χαλάρωση της βραχομάζας. Αυξημένα μέτρα προστασίας και υποστήριξης απαιτούνται κατά την υπόγεια διάνοιξη μετώπου με συμβατικά μέσα.

Ενότητα Α3

Ηφαιστειακά (vo)

Αποτελούν ανομοιόμορφο γαιοημιβραχώδη σχηματισμό, ο οποίος παρουσιάζει πτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά. Λόγω τεκτονισμού παρατηρούμε υψηλού βαθμού κατακερματισμό. Απαντώνται αρκετά αλληλοτεμνόμενα επίπεδα τα οποία δημιουργούν γωνιώδη τεμάχια με μέτρια έως πτωχή αλληλεμπλοκή. Κατά θέσεις παρατηρήθηκε παρουσία αργίλου. Ακόμη, σε δείγματα διαπιστώθηκε διογκώμενα αργιλικά ορυκτά (μοντμοριλλονίτης). Οι ασυνέχειες της βραχομάζας χαρακτηρίζονται κυρίως ως ομαλές και τοπικά ελαφρά τραχείες, κυματοειδείς και μέτρια αποσαθρωμένες.

Η εκσκαφή είναι δύσκολη με μηχανικά μέσα, έχει προταθεί, βοηθητικά, η χρήση εκρηκτικών.

Μέσα στη μάζα του εν λόγω σχηματισμού αναμένονται κερατολιθικά σώματα, καλύτερης ποιότητας βραχομάζας.

Ενότητα A4

Σχιστοκερατόλιθοι (sh)

Πρόκειται για βραχώδη σχηματισμό ο οποίος παρουσιάζει υψηλή αντοχή αμέραιου πετρώματος. Δομείται από λεπτοστρωματόδεις κερατόλιθους, αργιλικούς σχιστόλιθους και ιλυόλιθους με παρεμβολές ηφαιστειακών. Λόγω τεκτονισμού παρατηρούμε υψηλού βαθμού κατακερματισμό, απαντώνται αρκετά αλληλοτεμνόμενα επίπεδα τα οποία δημιουργούν γωνιώδη τεμάχια με μέτρια έως πτωχή αλληλεμπλοκή. Οι ασυνέχειες της βραχομάζας χαρακτηρίζονται τραχείες έως ελαφρά τραχείες, κλιμακωτές και ελαφρά αποσαθρωμένες. Η εκσκαφή είναι δύσκολη με μηχανικά μέσα, έχει προταθεί χρήση εκρηκτικών κυρίως όπου απαντώνται υγιείς στρώσεις κερατόλιθου.

Ενότητα A5

Σερπεντινίτες (se)

Αποτελούν βραχώδη σχηματισμό με αρκετά αλληλοτεμνόμενα επίπεδα ασυνεχειών, τα οποία δημιουργούν γωνιώδη τεμάχια με μέτρια αλληλοεμπλοκή.

Οι ασυνέχειες της βραχομάζας χαρακτηρίζονται κυρίως ως ομαλές, κυματοειδείς και ελαφρά αποσαθρωμένες.

Η σχιστότητα αποτελεί κύριο σύστημα με μέτριο σχετικά μήκος και η επιφάνεια της ασυνέχειας είναι συνήθως ολισθηρή. Τοπικά συναντώνται δύο συστήματα σχιστότητας λόγω boudinage. Συνήθως στις επιφάνειες των ασυνεχειών συναντάται σερπεντίνης, τάλκης και αντιγορίτης.

Για την υπόγεια διάνοξη των σπράγγων στην ενότητα αυτή, θεωρώντας συμβατικές μεθόδους εκσκαφής, λόγω των δυσμενών χαρακτηριστικών των ασυνεχειών, έχουν εκτιμηθεί από το μελετητή ότι θα απαιτηθούν αυξημένα μέτρα προστασίας και υποστήριξης (π.χ. μέτριο βήμα προχώρησης και άμεση επένδυση της διατομής).

Η εκσκαφή τους γίνεται δύσκολα με μηχανικά μέσα και βοηθητικά χρήση εκρηκτικών για τη χαλάρωση της βραχομάζας. Τα υλικά που προκύπτουν κρίνονται με μακροσκοπικά κριτήρια επίλεκτα για χρήση σε επικώματα.

Ενότητα A6

Σερπεντινωμένοι χαρτζβουργίτες (ha, ha.r, ha.q)

Αποτελούν βραχώδη σχηματισμό με μέτρια έως καλή αλληλοεμπλοκή, που διατέμνεται από 4 - 6 οικογένειες ασυνεχειών. Οι ασυνέχειες της βραχομάζας χαρακτηρίζονται κυρίως ομαλές έως ελαφρά τραχείες, κυματοειδείς και ελαφρά αποσαθρωμένες.

Η σχιστότητα, όπου γίνεται εμφανής έχει μεγάλο σχετικά μήκος και η επιφάνεια της ασυνέχειας είναι συνήθως ολισθηρή.

Συνήθως στις επιφάνειες των ασυνεχειών συναντάται σερπεντίνης, τάλκης και

αντιγορίτης.

Η εκσκαφή τους γίνεται αποκλειστικά με χρήση εκρηκτικών και τα υλικά που προκύπτουν κρίνονται με μακροσκοπικά κριτήρια επίλεκτα για χρήση σε επιχώματα.



Εικόνα 2.12: Εξαλλοιωμένος χαρτζβουργίτης με φλεβίδια χαλαζία (ha.q) [17]

Παρουσιάζουν δευτερογενές πορώδες λόγω των ασυνεχειών της βραχομάζας και αναμένεται να έχουν την σχετικά μεγαλύτερη διαπερατότητα στην οφιολιθική μάζα.

Ενότητα A7

Ασβεστόλιθοι (kj)

Αποτελούν βραχώδη σχηματισμό με 4 - 5 κύρια συστήματα ασυνεχειών με καλή αλληλοεμπλοκή, συνήθως με ασβεστιτικό υλικό. Οι ασυνέχειες της βραχομάζας χαρακτηρίζονται ως πολύ τραχείες και τοπικά τραχείες, κλιμακωτές και ελαφρά αποσαθρωμένες.



Εικόνα 2.13: Ανθρακική ενότητα υποβάθρου (kj), νότιο τμήμα (Μόδι) [17]

Η υπόγεια διάνοιξη των σηράγγων στην ενότητα αυτή, θεωρώντας συμβατικές μεθόδους εκσκαφής, έχει εκτιμηθεί ότι πραγματοποιείται χωρίς ιδιαίτερα τεχνικογεωλογικά προβλήματα τα οποία απαιτούν αυξημένα μέτρα προστασίας και υποστήριξης.

Στις ζώνες κατακερματισμού ρηγμάτων (kj.f), θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το πυκνότερο δίκτυο ασυνχειών που διατέμνει τη βραχώμαζα και τα απομειωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά.

Η εκσκαφή τους γίνεται αποκλειστικά με χρήση εκρηκτικών και τα υλικά που προκύπτουν κρίνονται με μακροσκοπικά κριτήρια επίλεκτα για χρήση σε επιχώματα.



Εικόνα 2.14: Πτυχώσεις στην ασβεστολιθική ανθρακική ενότητα (kj) του υποβάθρου στη βόρεια περιοχή του Καλλιδρόμου [17]

2.5. Χαρακτηριστικά Βραχομάζας

Η βραχομάζα είναι ένα ασυνεχές μέσο το οποίο παρουσιάζει ανομοιογένεια και ανισότροπη συμπεριφορά. Χαρακτηρίζεται από ρηγματώσεις, ποικίλα συστήματα ασυνεχειών, και παρουσιάζει μεταβλητό (από θέση σε θέση) βαθμό αποσάθρωσης και εξαλλοίωσης. Η γνώση της μηχανικής συμπεριφοράς είναι απαραίτητη για το σχεδιασμό αλλά και τη κατασκευή υπογείων έργων.

Στο παρόν κεφάλαιο εκτιμάται η συμπεριφορά της βραχομάζας, χωρίζεται σε κατηγορίες και προσδιορίζονται οι παράμετροι μηχανικής συμπεριφοράς κάθε κατηγορίας.

Για τις ταξινομήσεις βραχομάζας, στην οριστική γεωλογική μελέτη της Σήραγγας Καλλιδρόμου [17], ακολουθήθηκαν δύο μεθοδολογίες:

α) Ταξινόμηση κατά **RMR** (Bieniawski, 1989 Βελτιωμένη) και

β) Ταξινόμηση κατά **GSI** (Hoek et al, 2002).

Για τις περισσότερες ταξινομήσεις δίδονται εύρη τιμών και όχι μια μοναδιαία βαθμονόμηση.

Τονίζεται η τεχνική σημασία των ταξινομήσεων βραχομάζας, δηλαδή ότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν σχετικά με τη συνοχή, τη γωνία τριβής και το μέτρο ελαστικότητας δεν ενέχουν απαραίτητα θέση παραμέτρων σχεδιασμού.

2.5.1. Ταξινόμηση κατά RMR

Η Γεωμηχανική Ταξινόμηση βραχομάζας γίνεται κατά RMR (Bieniawski, 1989), όπως περιγράφεται στο "Engineering Rock Mass Classifications" (1989) του ίδιου συγγραφέα.

Οι παράμετροι ταξινόμησης του συστήματος RMR και οι παραδοχές που έγιναν είναι οι παρακάτω:

i. **Αντοχή συμπαγούς πετρώματος (MPa)**. Χρησιμοποιείται η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (σ_c) ή ο δείκτης σημειακής φόρτισης (I_{s50}). Ως πλέον αντιπροσωπευτική τιμή για το ακέραιο πέτρωμα θεωρείται η τιμή της σημειακής φόρτισης. Για τη βαθμονόμηση της παραμέτρου από το αντίστοιχο διάγραμμα Bieniawski, έγινε προσαρμογή της τιμής αυτής σε τιμή μονοαξονικής θλίψης σύμφωνα με τον τύπο $\sigma_c = 24 \cdot I_{s50}$ (ISRM, κατά BROCH, E. and FRANKLIN J.A., 1972). Οι χαρακτηριστικές τιμές αντοχής αμέραιου πετρώματος προέκυψαν από την στατιστική επεξεργασία των δειγμάτων όλων των γεωτρήσεων που έχουν εκτελεσθεί για το έργο, σύμφωνα με την τεχνικογεωλογική αξιολόγηση των ερευνητικών γεωτρήσεων.

ii. **Δείκτης ποιότητας βράχου, RQD (%)**. Οι τιμές του RQD προκύπτουν από στατιστική επεξεργασία των τιμών των ερευνητικών γεωτρήσεων. Οι τιμές που προκύπτουν παρουσιάζονται επίσης στον πίνακα που ακολουθεί.

ΛΙΘΟΛΟΓΙΑ	ΑΝΤΟΧΗ	RQD
	(MPa)	%
Χαρτζβουργίτης (ha, ha.r)	55	45
Σερπεντινίτης (se)	41	36
Σχιστώδης σερπεντινίτης (se.s)	19	30
Ηφαιστειακά (vo) (λατυποπαγούς μορφής)	22	58
Σχιστοκερατόλιθοι (sh)	35	25
Ασβεστόλιθος (kj)	68	47
Κατακερματισμένος ασβεστόλιθος (kj.f)	68	7
Ζώνη διάτμησης(sz)	4,5	18

Πίνακας 2.3: Αντοχή ακέραιου πετρώματος και RQD [17]

lii. **Απόσταση μεταξύ ασυνεχειών (mm).** Αυτή προέκυψε από τις παρατηρήσεις υπαίθρου κατά τη σύνταξη των τεκτονικών διαγραμμάτων. Η τελική βαθμονόμηση προέκυψε επίσης από το διάγραμμα απόστασης μεταξύ των ασυνεχειών.

iv. **Κατάσταση ασυνεχειών.** Δίδεται διαφορετική βαθμονόμηση για επιμέρους παραμέτρους όπως είναι το μήκος, το άνοιγμα, η τραχύτητα, το υλικό πλήρωσης και η κατάσταση αποσάθρωσης των ασυνεχειών. Ο χαρακτηρισμός κάθε μιας παραμέτρου προέκυψε όπως και προηγουμένως από τις παρατηρήσεις υπαίθρου και τη σύνταξη των τεκτονικών διαγραμμάτων. Η βαθμονόμηση έγινε από τους αντίστοιχους πίνακες.

v. **Υπόγειο νερό.** Γίνεται εκτίμηση των υδρογεωλογικών χαρακτηριστικών του γεωλογικού σχηματισμού.

Στην περιοχή μελέτης έγιναν 8 ταξινομήσεις βραχομάζας κατά RMR, αντιπροσωπευτικές των παραπάνω σχηματισμών και της φυσικομηχανικής συμπεριφοράς τους.

Οι τιμές c, φ και E αναφέρονται σε στεγνές συνθήκες βραχομάζας και ανεξάρτητα απομείωσης λόγω προσανατολισμού των ασυνεχειών.

Α/Α	ΛΙΘΟΛΟΓΙΑ	ΕΥΡΟΣ ΤΙΜΩΝ		ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ - ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ	ΣΥΝΟΧΗ C (kPa)	ΓΩΝΙΑ ΤΡΙΒΗΣ φ (°)	ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ E (GPa)	ΦΟΡΤΙΟ ΥΠΟΣΤΗΛΩΣΗΣ (t/m ²)
		RMR	RMR _{πρ}					
TB-1	ΣΕΡΠΕΝΤΙΝΙΩΜΕΝΟΙ ΧΑΡΤΖΒΟΥΡΓΙΤΕΣ (ha, ha.r)	52-62	42-49	III ΜΕΤΡΙΑ	200-300	25-35	15.85	12.6
TB-2	ΣΕΡΠΕΝΤΙΝΙΤΕΣ (se)	50-57	37-44	IV (III) ΠΤΩΧΗ	200-300	25-35	10.00	14.0
TB-3	ΣΧΙΣΤΩΔΕΙΣ ΣΕΡΠΕΝΤΙΝΙΤΕΣ (se.s)	42-48	30-35	IV ΠΤΩΧΗ	200-300	25-35	6.31	15.9
TB-4	ΗΦΑΙΣΤΕΙΑΚΑ ΛΑΤΥΠΟΠΑΓΗ (vo)	49-55	36-42	IV (III) ΠΤΩΧΗ	200-300	25-35	9.44	14.3
TB-5	ΣΧΙΣΤΟΚΕΡΑΤΟΛΙΘΟ I (sh)	57±3	47±3	III ΜΕΤΡΙΑ	200-300	25-35	14.96	12.4
TB-6	ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΙ (kj)	59-67	49-57	III ΜΕΤΡΙΑ	300-400	35-45	22.39	10.8
TB-7	ΖΩΝΕΣ ΚΑΤΑΚΕΡΜΑΤΙΣΜΟΥ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΩΝ (kj.f)	47±3	37±3	IV ΠΤΩΧΗ	200-300	25-35	8.41	14.7
TB-8	ΖΩΝΕΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ (sz)	26±3	16±3	V ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ	100-200	15-25	2.51	18.9

Πίνακας 2.4: Αποτελέσματα Ταξινόμησης βραχομάζας κατά RMR - Προσαρμογή για σήραγγες [17]

2.5.2. Ταξινόμηση Κατά G.S.I

Η ταξινόμηση βραχομάζας που προσδιορίζει τον Γεωλογικό Δείκτη Αντοχής (GSI) γίνεται σύμφωνα με τους Hoek, Kaizer, Bawden (1995) και όπως τροποποιήθηκε μεταγενέστερα κατά Hoek, Brown (1997), Hoek, Marinos, Benissi, (1998) και κ. Hoek, Marinos (2000), όπου συμπληρώθηκε ειδικά για την περίπτωση ετερογενών σχηματισμών όπως ο φλύσχης. Νεότερη συμπλήρωση έγινε κατά Hoek (2002).

Πρόσφατη αναθεώρησή έγινε κατα Hoek, Carraza, Torres, Corkum (2002), όπου βασίζεται η εφαρμογή Roclab ver. 1.003 (25/7/2002) της Rocscience Inc.

Κατά το σύστημα GSI έγιναν 8 ταξινομήσεις βραχομάζας για τους σχηματισμούς που αναφέρονται παραπάνω. Στον πίνακα που ακολουθεί, δίδονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των ταξινομήσεων βραχομάζας κατά GSI.

Για τις ανάγκες της ταξινόμησης με βάση την τελευταία αναθεώρηση, οι παράμετροι που απαιτούνται λαμβάνονται αναλυτικά ως εξής:

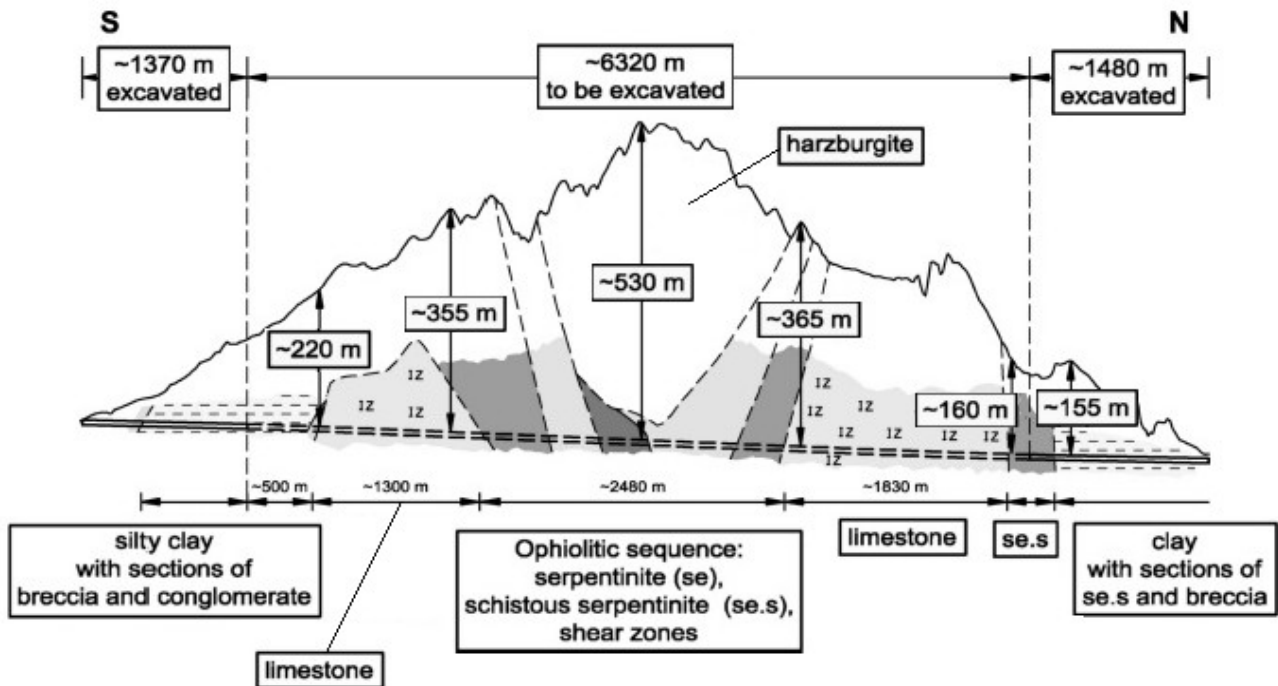
- Το δυσμενέστερο βάθος σήραγγας για κάθε επί μέρους σχηματισμό.
- Συντελεστής διατάραξης (D), 0 για την εκσκαφή της σήραγγας.

A/A	ΛΙΘΟΛΟΓΙΑ	GSI	σ_c (MPa)	mi	C/ σ_c	C (MPa)	φ (°)	ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ E (MPa)
TG-1	ΣΕΡΠΕΝΤΙΝΙΩΜΕΝΟΙ ΧΑΡΤΖΒΟΥΡΓΙΤΕΣ (ha, ha.r)	45-60	55	20	0.032-0.042	1.786-2.283	42-46	5561-13188
TG-2	ΣΕΡΠΕΝΤΙΝΙΤΕΣ (se)	38-52	41	15	0.033-0.041	1.347-1.699	35-39	3209-7184
TG-3	ΣΧΙΣΤΩΔΕΙΣ ΣΕΡΠΕΝΤΙΝΙΤΕΣ (se.s)	28-38	19	8	0.030-0.037	0.570-0.702	23-25	1229-2185
TG-4	ΗΦΑΙΣΤΕΙΑΚΑ (vo)	35-45	22	13	0.040-0.047	0.873-1.038	29-32	1978-3517
TG-5	ΣΧΙΣΤΟΚΕΡΑΤΟΛΙΘΟΙ (sh)	44-54	35	17	0.033-0.039	1.167-1.373	39-42	4188-7448
TG-6	ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΙ (kj)	55-65	68	12	0.025-0.032	1.694-2.194	45-47	10997-19555
TG-7	ΖΩΝΕΣ ΚΑΤΑΚΕΡΜΑΤΙΣΜΟΥ Υ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΩΝ (kj.f)	25-35	68	9	0.011-0.014	0.766-0.974	33-37	1955-3477
TG-8	ΖΩΝΕΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ (sz)	15-25	4.5	7	0.052-0.070	0.235-0.316	10-12	283-503

Πίνακας 2.5: Αποτελέσματα ταξινόμησης βραχομάζας κατά GSI- εφαρμογή για σήραγγες [17]

2.6. Τεχνικογεωλογική Περιγραφή κατά μήκος της σήραγγας

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται οι αναμενόμενες τεχνικογεωλογικές συνθήκες, βάσει της οριστικής γεωλογικής μελέτης, κατά την διάνοιξη του υπολειπόμενου τμήματος της σήραγγας. Ο σχολιασμός γίνεται για τον Δεξιό Κλάδο και δίνει μία σαφή εικόνα στον αναγνώστη της αλληλουχίας των σχηματισμών τόσο κατά μήκος της σήραγγας όσο και της στρωματογραφίας ανά τμήμα μελέτης.



Σχήμα 2.1: Ιδεατή διαμήκης τομή σήραγγας Καλλιδρόμου [6]

Επιπλέον παρατίθενται γεωλογικές τομές σε επιλεγμένες Χιλιομετρικές Θέσεις (Χ.Θ.) οι οποίες αποτυπώνουν τη στρωματογραφία, την ευρύτερη γεωλογία στις παραπάνω θέσεις, την υψομετρική τοποθέτηση των σηράγγων σε σχέση με τον ορεινό όγκο. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι εκάστοτε ερευνητικές γεωτρήσεις και η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα όπου είναι γνώστη.

2.6.1.1. Τμήμα από Χ.Θ. 6+625 έως Χ.Θ. 7+080

Λιθολογία: Το τμήμα αυτό διανοίγεται κατά το μεγαλύτερο μέρος στον αργιλομαργαϊκό σχηματισμό (ml), ενώ προς το τέλος, βάση της γεωλογικής μελέτης, αναμένεται να συναντηθούν τα κροκαλολατυποπαγή (br), η επαφή των οποίων με τον υπερκείμενο αργιλομαργαϊκό σχηματισμό (ml) και τους υποκείμενους ασβεστόλιθους (kj) δεν είναι επακριβώς γνωστή. Περί την Χ.Θ. 6+930 αναμένεται να συναντηθεί το πρώτο από τα δύο υποπαράλληλα κύρια ενεργά ρήγματα.

Τεχνικογεωλογικά προβλήματα: Σε συνέχεια των προβλημάτων που προέκυψαν κατά την διάνοιξη του Δεξιού Κλάδου (βλέπε ενότητα Κ1 Αργιλομαργαϊκός σχηματισμός), αναμένονται αντίστοιχα σε όλο αυτό το τμήμα που θα διανοιχτεί στον αργιλομαργαϊκό σχηματισμό. Το εντατικό πεδίο τάσεων που υφίσταται σε μία ζώνη ενεργού τεκτονικής μεταξύ των Χ.Θ. 6+550 ως Χ.Θ. 6+950 περίπου, όπου έχουν εκδηλωθεί εκτεταμένες και σύνθετες παλαιότερες κατολισθητικές και ολισθητικές κινήσεις σε συνδυασμό με την έντονα αργιλική σύσταση (με συμμετοχή μοντοριλλονιτών) του σχηματισμού και την παρουσία νερού υπό πίεση σε αμμώδεις ενστρώσεις ή φακούς, πιθανά και εγκλωβισμένου, δημιουργεί ευνοϊκές προϋποθέσεις για την εκδήλωση διογκώσεων και συγκλίσεων.

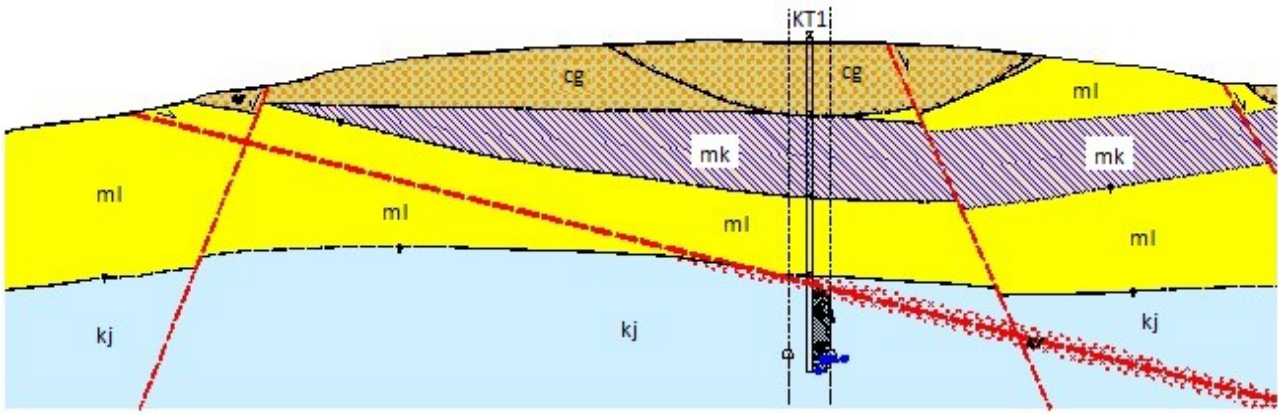
Κατά την διάνοιξη της σήραγγας στα κροκαλολατυποπαγή τα προβλήματα απομειώνονται, απαιτούνται όμως ισχυρά μέτρα προσωρινής υποστήριξης λόγω των συχνών εναλλαγών με αργιλικές ενστρώσεις.

2.6.1.2. Τμήμα από Χ.Θ. 7+080 έως Χ.Θ. 8+390

Λιθολογία: Η σήραγγα διανοίγεται στο ασβεστολιθικό υπόβαθρο (kj). Περί τη Χ.Θ. 7+150 αναμένεται να συναντηθεί το δεύτερο υποπαράλληλο κύριο ενεργό ρήγμα. Επίσης κύρια ενεργά ρήγματα αναμένονται περί τις Χ.Θ. 7+840 και Χ.Θ. 8+510.

Τεχνικογεωλογικά προβλήματα: Οι ασβεστόλιθοι χαρακτηρίζονται ως μέτριας ποιότητας βραχομάζα (RMR = 49-57, κατηγορία III και GSI = 55-65). Τοπικές σφηνοειδείς ολισθήσεις μικρού όγκου είναι αναμενόμενες. Στις ρηξιγενείς ζώνες αναμένεται έντονος κατακερματισμός της βραχομάζας, η οποία χαρακτηρίζεται ως πτωχής ποιότητας (RMR=34-40, κατηγορία IV και GSI=25-35).

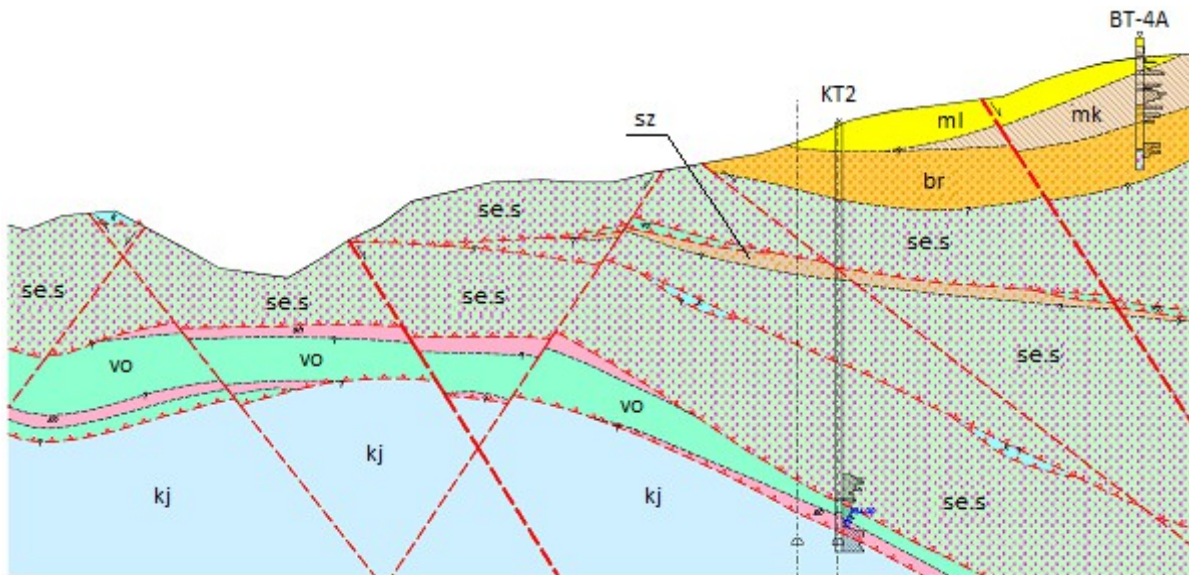
Σχετικά με την υδροφορία των ασβεστολίθων σ' αυτό το τμήμα, τονίζει ο μελετητής πως, θα πρέπει απαραίτητως να πραγματοποιείται διαρκώς κύκλος μετρήσεων των πιεζομέτρων, προκειμένου να επιβεβαιωθεί ότι η υδροφορία διαμορφώνεται σε στάθμη κάτω από το επίπεδο της ερυθράς.



H = 100m

7+168

Σχήμα 2.2: Εγκάρσια τομή στη Χ.Θ. 7+168 [17]



H = 100m

8+288

Σχήμα 2.3: Εγκάρσια τομή στη Χ.Θ. 8+288 [17]

2.6.1.3. Τμήμα από Χ.Θ. 8+390 έως Χ.Θ. 8+920

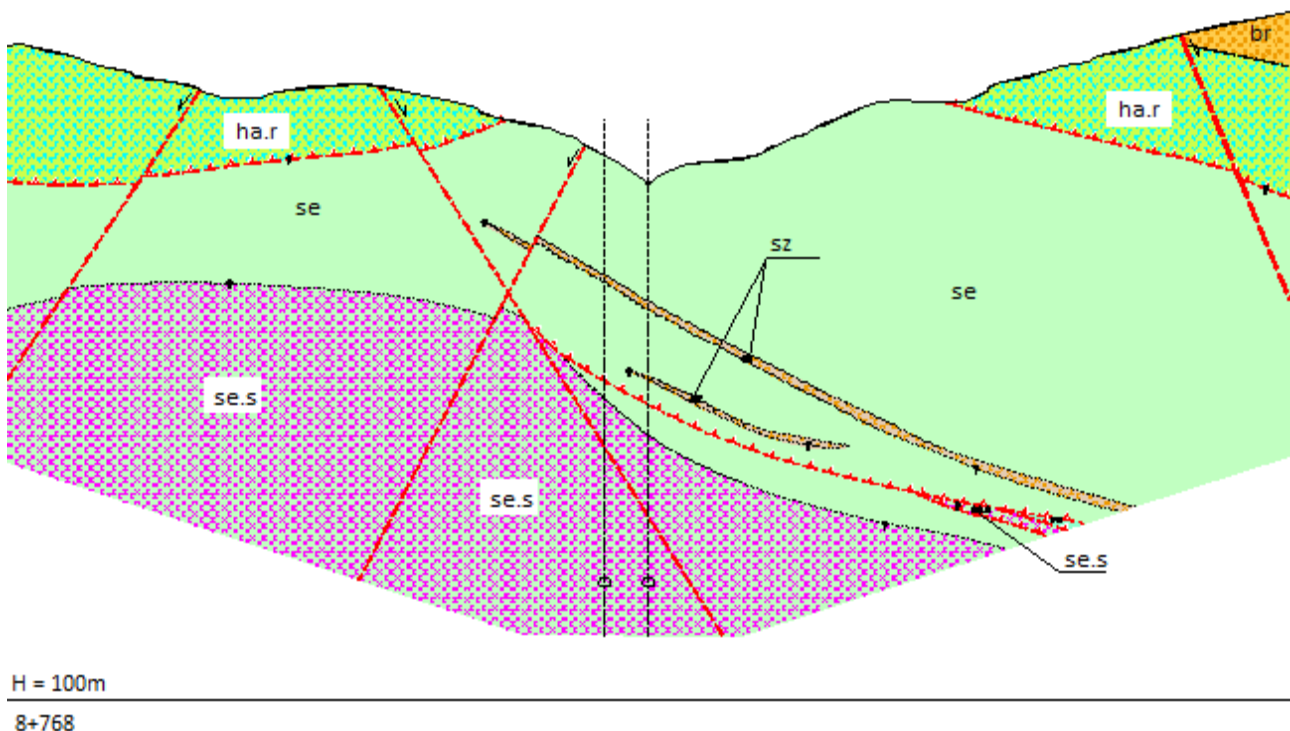
Λιθολογία: Η σήραγγα κατά το μεγαλύτερο μέρος της διανοίγεται στους σχιστώδεις σερπεντινίτες (se.s), οι οποίοι, όπως έχει αναφερθεί, έχουν έντονη ανομοιομορφία και μπορούν να περικλείουν στη μάζα τους τοπικά σημαντικού μεγέθους ασβεστολιθικά τεμάχια (kj) ή τεμάχια βασικών ηφαιστειακών (vo), η ακριβής θέση των οποίων δεν είναι δυνατό να προσδιορισθεί επακριβώς.

Επίσης στο αρχικό τμήμα αναμένεται να συναντηθούν σχιστοκερατόλιθοι (sh) και ηφαιστειακά (vo).

Κατά θέσεις θα συναντηθούν ζώνες διάτμησης (sz).

Τεχνικογεωλογικά προβλήματα: Οι σχιστώδεις σερπεντινίτες χαρακτηρίζονται ως πτωχή ποιότητα βραχομάζας (RMR=30-35, κατηγορία IV και GSI = 28-38). Αναμένεται να έχουν την πτωχότερη συμπεριφορά στο σύνολο της οφιολιθικής μάζας και γι' αυτό έχει απαιτηθεί από τη γεωλογική μελέτη μικρό βήμα προχώρησης και άμεσα μέτρα προσωρινής υποστήριξης. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στη λήψη μέτρων για την ευστάθεια του μετώπου, όπου αναμένονται καταπτώσεις λόγω της έντονης σχιστότητας και του φυλλώδους χαρακτήρα του σχηματισμού. Προβλήματα διήθησης νερού πολύ μικρής δυναμικότητας μέσω των διαπερατών ζωνών διάτμησης είναι αναμενόμενα.

Εφόσον η φορά διάνοιξης της σήραγγας στο τμήμα αυτό, θα είναι από Νότο προς Βορρά, η σχιστότητα θα είναι ευνοϊκά αντίρροπη ως προς το μέτωπο και τα προβλήματα αστάθειας περιορίζονται.



Σχήμα 2.4: Εγκάρσια τομή στη Χ.Θ. 8+768 [17]

2.6.1.4. Τμήμα από Χ.Θ. 8+920 έως Χ.Θ. 9+340

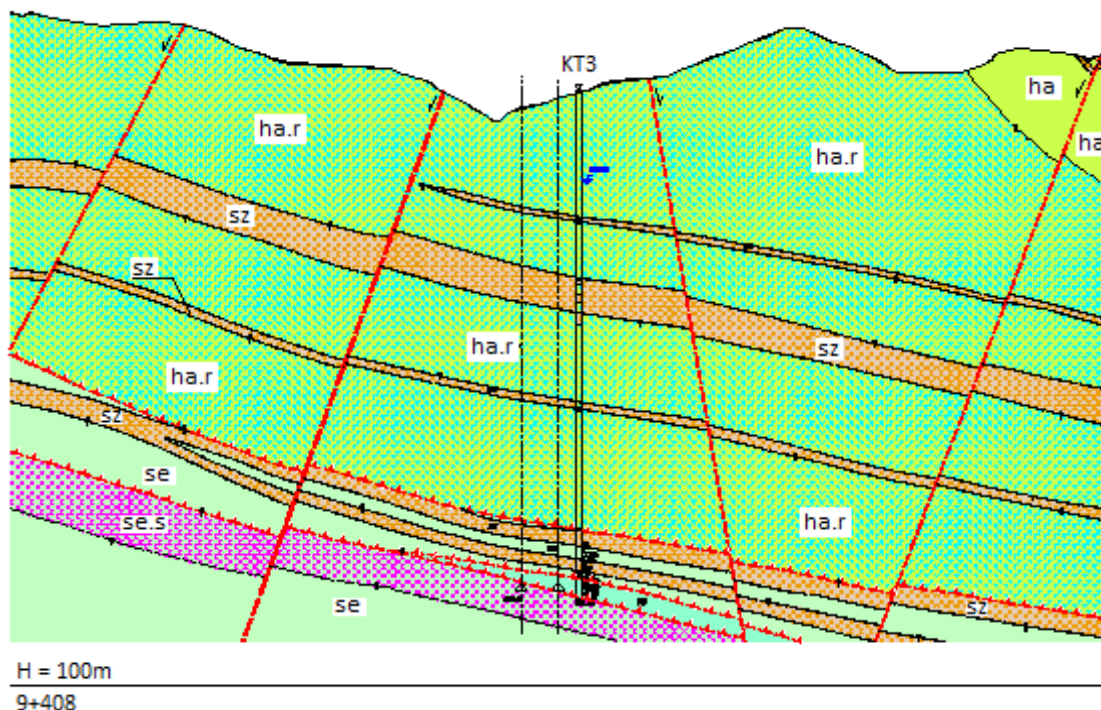
Λιθολογία: Στο τμήμα αυτό κατά το μεγαλύτερο μέρος η σήραγγα διανοίγεται στους σερπεντινίτες (se), ενώ τοπικά περί την Χ.Θ. 9+080 αναμένεται τεκτονικά λεπτός σχιστώδης σερπεντινίτης (se.s) και βασικά ηφαιστειακά (vo). Περί την Χ.Θ. 9+150 αναμένεται κύριο ενεργό ρήγμα.

Τεχνικογεωλογικά προβλήματα: Οι σερπεντινίτες χαρακτηρίζονται κυρίως ως πτωχής ποιότητας βραχώμαζα και τοπικά μέτριας (RMR=37-44, κατηγορία IV έως III και GSI=38-52). Προβλήματα αστάθειας στην οροφή και στις παρειές της σήραγγας αναμένονται, βάση της γεωλογικής μελέτης, κυρίως στις περιπτώσεις συνάντησης δομών τύπου “boudinage”, οπότε μπορούν δυνητικά να εκδηλωθούν σφηνοειδείς ολισθήσεις. Γι’ αυτό απαιτείται απαιτηθεί μέτριο βήμα προχώρησης και άμεση επένδυση της διατομής με τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης.

Περιορισμένες διηθήσεις νερού αναμένονται διαμέσου των ζωνών διάτμησης και των ρηξιγενών επιφανειών.

2.6.1.5. Τμήμα από Χ.Θ. 9+340 έως Χ.Θ. 9+740

Λιθολογία: Το τμήμα αυτό αποτελεί μια έντονα τεκτονισμένη ζώνη, από λέπη, όπου θα συναντηθούν οι σχιστώδεις σερπεντινίτες (se.s), βασικά ηφαιστειακά με την μορφή ηφαιστειακού λατυποπαγούς (vo), σερπεντινίτες (se) και σε σημαντικό μήκος σήραγγας ζώνες διάτμησης (sz). Το σύνολο μπορεί να χαρακτηριστεί σε όλη την έκταση της περιοχής ως ένα τεκτονικό οφιολιθικό melange.



Σχήμα 2.5: Εγκάρσια τομή στη Χ.Θ. 9+408 [17]

Τεχνικογεωλογικά προβλήματα: Το σημαντικότερο πρόβλημα στο τμήμα αυτό είναι η συχνή εναλλαγή διαφορετικής ποιότητας βραχομάζας με σημαντικότερη τις ζώνες διάτμησης, καθώς και η μικρού μέτρου κλίση των σχηματισμών, άρα και της σχιστότητας. Αυτές χαρακτηρίζονται ως πολύ πτωχής ποιότητας βραχομάζα (RMR = 13-19, κατηγορία V και GSI = 15-25). Αναμένονται προβλήματα ασταθειών στην οροφή και στις παρειές της σήραγγας και υπερεκκαφές, ιδιαίτερα με την παρουσία νερού, η κυκλοφορία του οποίου διευκολύνεται δια μέσου των ζωνών αυτών. Επίσης αναμένεται αστάθεια οροφής με την μορφή καταπτώσεων τεμαχών, όταν στην διατομή υπέρκειται καλύτερης ποιότητας υλικά και θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η παρουσία διογκομένων αργιλικών ορυκτών. Γι' αυτό απαιτείται μικρό βήμα προχώρησης και άμεση τοποθέτηση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης.

Στο τμήμα της σήραγγας που διανοίγεται στα ηφαιστειακά λατυποπαγή (vo) σε μήκος της τάξης των 50 m περίπου η βραχομάζα χαρακτηρίζεται κυρίως ως πτωχή έως μέτρια (RMR = 36-42, κατηγορία IV-III και GSI = 35-45).

Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στην διάνοιξη του υλικού αυτού, εφόσον έχει διαπιστωθεί η περιεκτικότητά του σε διογκούμενα αργιλικά ορυκτά (μοντμοριλλονίτης).

2.6.1.6. Τμήμα από Χ.Θ. 9+740 έως Χ.Θ. 10+490

Λιθολογία: Η σήραγγα διανοίγεται σε σερπεντινίτες (se), όπου τοπικά αναμένονται ζώνες διάτμησης (sz) κυρίως προς την επαφή με τους υποκείμενους σχιστώδεις σερπεντινίτες (se.s).

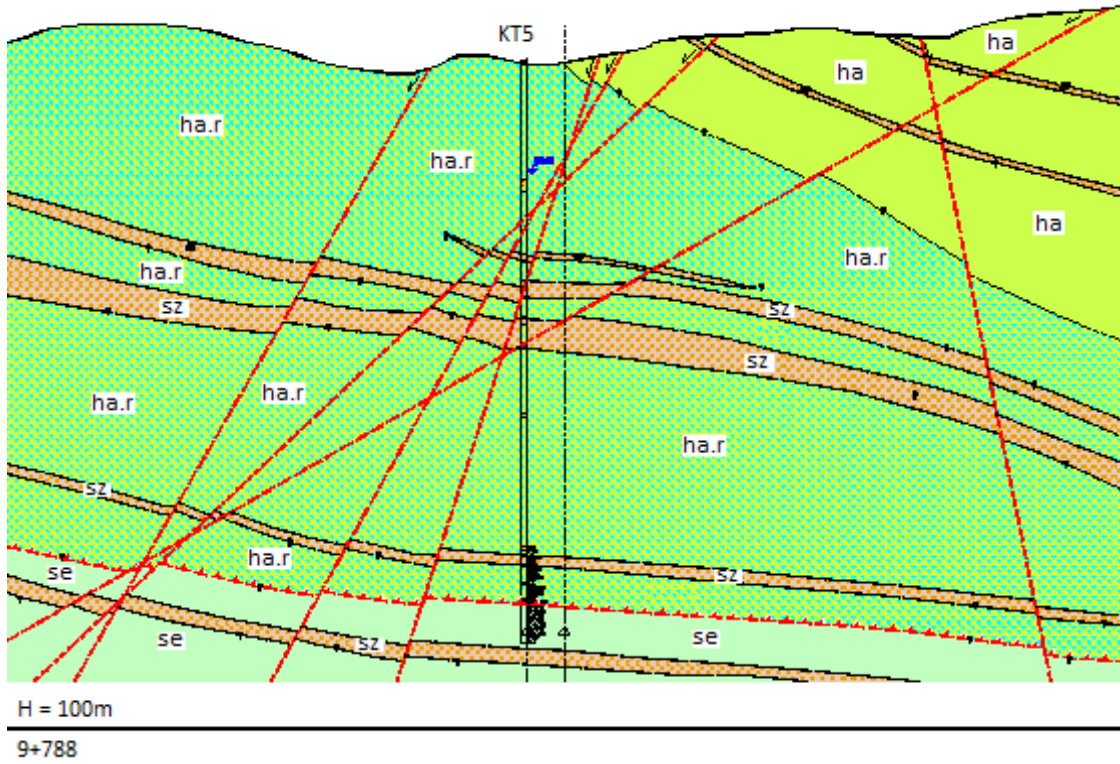
Τεχνικογεωλογικά προβλήματα: Για την διάνοιξη της σήραγγας στους σερπεντινίτες ισχύουν όσα έχουν αναφερθεί για τμήμα μεταξύ των Χ.Θ. 8+920 έως 9+340 με τις εξής διαφοροποιήσεις:

α) Η διάνοιξη της σήραγγας από την Χ.Θ. 10+000 και μετά ενδείκνυται κατ' εκτίμηση να γίνει με φορά από Βορρά προς Νότο για να ισχύει η ευνοϊκά αντίρροπη σχιστότητα του πετρώματος σε σχέση με την φορά διάνοιξης.

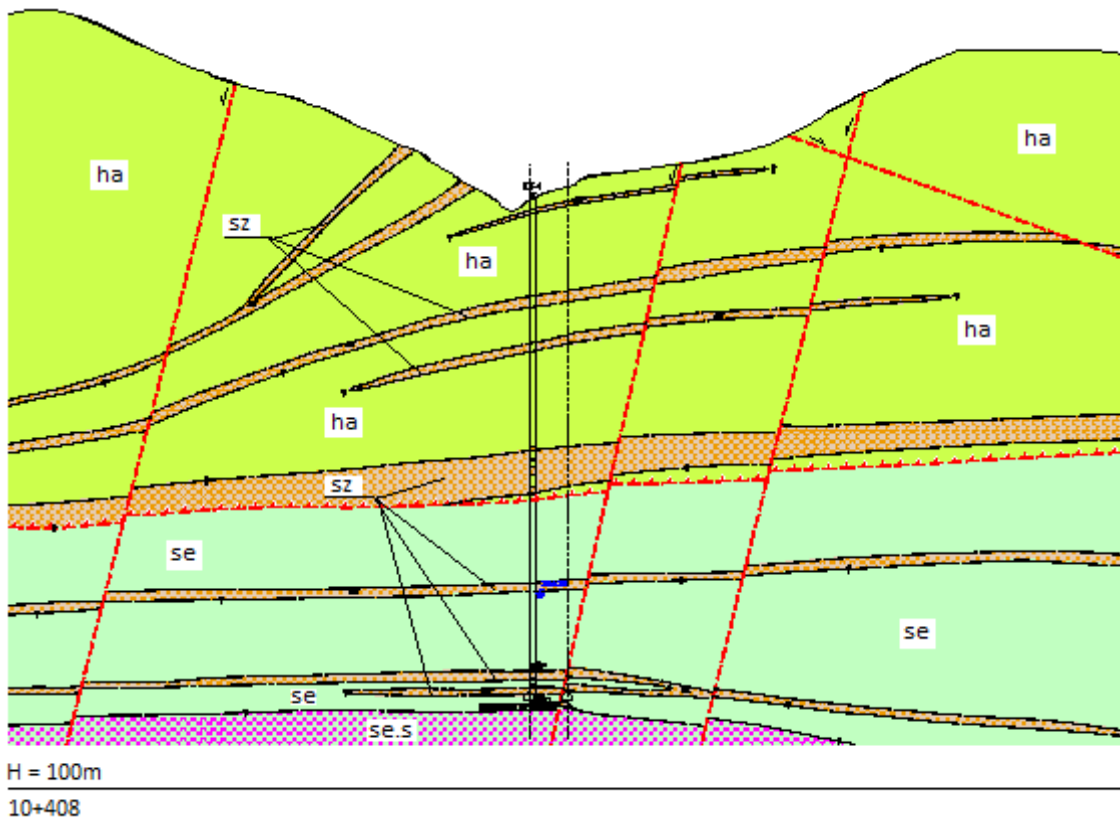
β) Γενική παρατήρηση είναι ότι οι βραχομάζες του οφιολιθικού συμπλέγματος στο βόρειο τμήμα παρουσιάζουν σχετικά καλύτερα χαρακτηριστικά λόγω μικρότερης τεκτονικής καταπόνησης σε σύγκριση με το νότιο τμήμα.

Στο τμήμα από Χ.Θ. 9+750 έως Χ.Θ. 10+150 περίπου εκτιμάται ότι συμβαίνει μεγαλύτερη διήθηση νερών λόγω αναμενόμενης διαμόρφωσης στάθμης υδροφόρου ορίζοντα στην υπερκείμενη χαρτζβουργιτική μάζα, εξαιτίας της συγκλινικής δομής του καλύμματος. Η στάθμη αυτή δεν είναι ακόμα επακριβώς γνωστή. Θα πρέπει να συνεχισθεί η παρακολούθηση των πιεζομέτρων ΚΤ-3 και ΚΤ-5.

Πάντως εκτιμάται ότι οι παροχές διηθήσεων δεν πρέπει να υπερβαίνουν τα $5 \text{ m}^3/\text{h}$.



Σχήμα 2.6: Εγκάρσια τομή στη Χ.Θ. 9+788 [17]



Σχήμα 2.7: Εγκάρσια τομή στη Χ.Θ. 10+408 [17]

2.6.1.7. Τμήμα από Χ.Θ. 10+490 έως Χ.Θ. 10+850

Λιθολογία: Η σήραγγα διανοίγεται στους σχιστώδεις σερπεντινίτες (se.s). Στο τέλος του τμήματος αναμένεται να συναντηθούν σε πολύ μικρό μήκος της τάξης των 10 m κερατόλιθοι (sh).

Τεχνικογεωλογικά προβλήματα: Ισχύουν όσα έχουν αναφερθεί για τους σχιστώδεις σερπεντινίτες στο τμήμα μεταξύ των Χ.Θ. 8+390 έως 8+920 και οι γενικές παρατηρήσεις του τμήματος 9+740 έως 10+490.

2.6.1.8. Τμήμα από Χ.Θ. 10+850 έως Χ.Θ. 12+632

Λιθολογία: Στο τμήμα αυτό συναντάται αποκλειστικά το ασβεστολιθικό υπόβαθρο (kj). Στο τέλος του τμήματος συναντώνται κύριο και δευτερεύον ενεργά ρήγματα της ενεργούς ρηξιγενούς ζώνης του Καλλιδρόμου.

Τεχνικογεωλογικά προβλήματα: Η ασβεστολιθική βραχόμαζα χαρακτηρίζεται ως μέτριας ποιότητας βραχόμαζα (RMR = 49-57, κατηγορία III και GSI = 55-65). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι ασβεστόλιθοι του Βόρειου τμήματος του Καλλιδρόμου, όπως έχει αναφερθεί, παρουσιάζονται εντονότερα τεκτονισμένοι σε σύγκριση με αυτούς του νότιου τμήματος.

Είναι χαρακτηριστικές οι επάλληλες συγκλινικές και αντικλινικές δομές που χαρτογραφήθηκαν και αποτυπώθηκαν στη γεωλογική μηκοτομή.

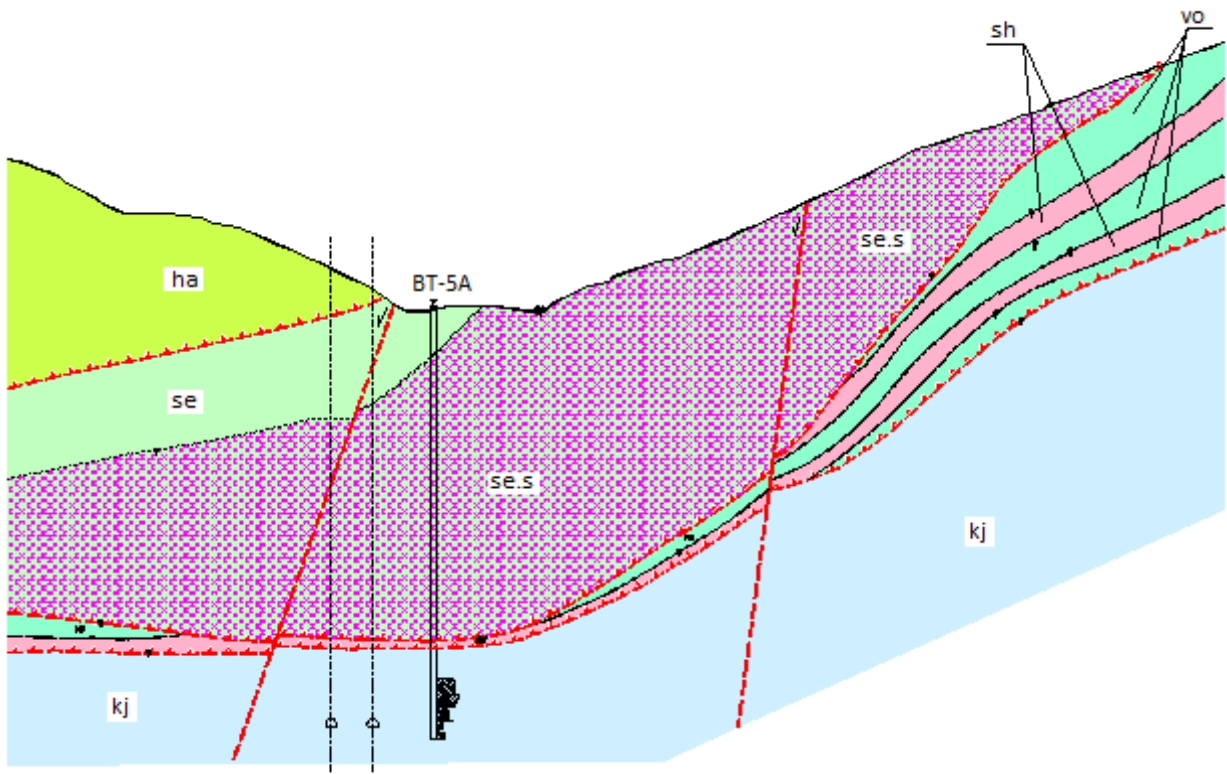
Η τεκτονική αυτή καταπόνηση επιφέρει γενικά ένα σχετικά εντονότερο κατακερματισμό του πετρώματος. Αυτό συμβαίνει κυρίως κατά τα αξονικά επίπεδα και ιδιαίτερος των πιο “κλειστών” πτυχών.

Αξίζει να σημειωθεί η περίπτωση της γεώτρησης BT-5, η οποία διέτρησε εξ' ολοκλήρου τους ασβεστόλιθους και η οποία έχει RQD στο μεγαλύτερο τμήμα της από 0 - 15% και σε μικρά μήκη τμημάτων υψηλότερες τιμές 35-58%.

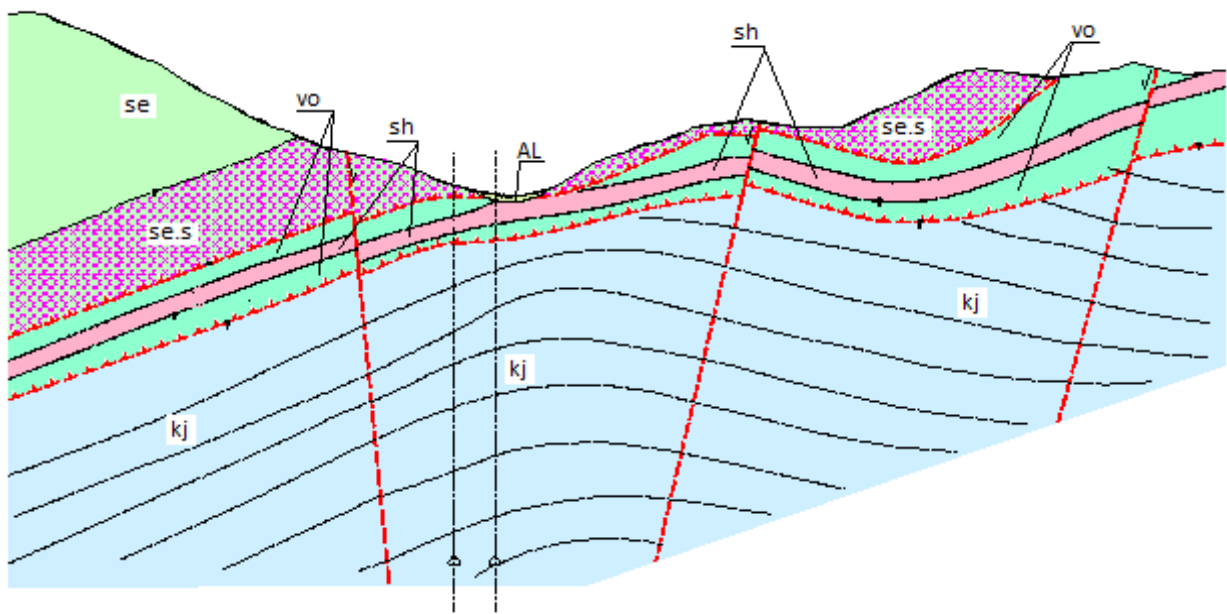
Εκτιμάται ότι οι χαμηλές τιμές RQD οφείλονται στον διαχωρισμό των πυρήνων σχεδόν σε οριζόντια επίπεδα λόγω του αξονικού επιπέδου, το οποίο διέτρησε η γεώτρηση. Αναφέρεται δε στη γεωλογική και γεωτεχνική μελέτη για την προμελέτη της σήραγγας, ότι αμέσως μετά τη δειγματοληψία ο δείκτης RQD ήταν υψηλότερος, 30-70% και ότι το φαινόμενο του διαχωρισμού των πυρήνων συνέβη βαθμιαία μερικές ημέρες μετά την δειγματοληψία.

Το γεγονός αυτό υποδεικνύει απελευθέρωση τάσεων της βραχομάζας και η οποία εκτιμάται ότι θα είναι εντονότερη στο τμήμα μεταξύ Χ.Θ. 11+310 έως Χ.Θ. 11+730 περίπου. Γι' αυτό η βραχόμαζα στο τμήμα αυτό χαρακτηρίζεται ως πτωχής ποιότητας (RMR = 34-40, κατηγορία IV και GSI = 25-35).

Στο τμήμα αυτό δεν αναμένονται προβλήματα με υπόγεια νερά παρά μόνο διηθήσεις μέσω των ασυνεχειών του πετρώματος, ιδιαίτερα μετά από έντονες βροχοπτώσεις.



Σχήμα 2.8: Εγκάρσια τομή στη Χ.Θ. 10+928 [17]



Σχήμα 2.9: Εγκάρσια τομή στη Χ.Θ. 11+309 [17]

2.7. Τεχνικογεωλογική συμπεριφορά των οφιολιθικών σχηματισμών

Στη συγκεκριμένη παράγραφο πρόκειται να αναπτυχθεί η γεωλογία του οφιολιθικού συμπλέγματος καθώς και η τεχνικογεωλογική του συμπεριφορά. Στοιχεία έχουν ληφθεί από τις εργασίες των Marinos P., Hoek E., Marinos V. [4] και Μαρίνος Β. [10]. Καθώς πρόκειται να παρουσιασθούν, σε επόμενο κεφάλαιο, προβλήματα κατά την κατασκευή της σήραγγας του Καλλιδρόμου που προέκυψαν σε οφιολιθικό σχηματισμό αλλά και σχιστώδη σερπεντινίτη (πέτρωμα που απαντάται στο οφιολιθικό σύμπλεγμα), ακολουθεί παρουσίαση της γεωλογικής και τεχνικής συμπεριφοράς του οφιόλιθου.

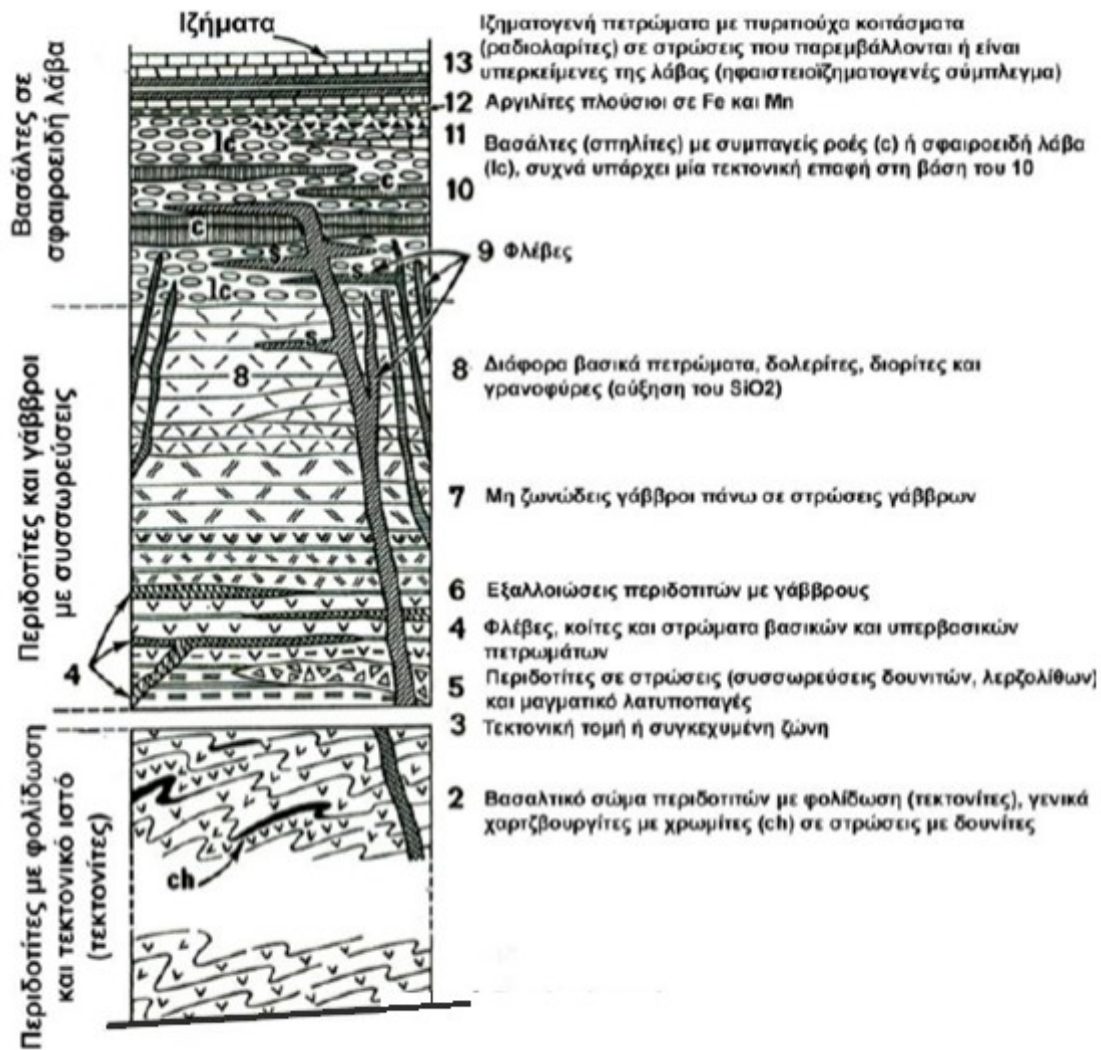
2.7.1. Γεωλογικά στοιχεία οφιολιθικού συμπλέγματος

Με τον όρο οφιόλιθο καλούμε ένα σύνολο βασικών και υπερβασικών μαγματιτών και των προϊόντων της μεταμορφώσεώς τους, όπως οι σερπεντινίτες. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, το οφιολιθικό σύμπλεγμα ανήκει στους αλπικούς σχηματισμούς. Οι οφιόλιθοι αποτελούνται από περιδοτικά πετρώματα τα οποία καλύπτονται από τα γαββρικά πετρώματα και αυτά με τη σειρά τους από βασάλτες. Στο παραπάνω σύμπλεγμα παρατηρούνται διάφορες πετρογραφικές παραλλαγές. Οι οφιόλιθοι είναι εκχύσεις μάγματος στο γεωσύγκλινο και εμπλέκονται γεωμετρικά με ιζηματογενείς σχηματισμούς που αποτίθενται μέσα στο γεωσύγκλινο (σχιστόλιθοι - ασβεστόλιθοι). Επομένως, τοπικά μπορούν να παρουσιάζουν στρωματοειδείς μορφές.

Παρατηρούνται επιπλέον τεκτονικές εναλλαγές της σύνθετης οφιολιθικής βραχομάζας με άλλα γεωυλικά όπως σχιστοκερατόλιθοι.

Στο οφιολιθικό σύμπλεγμα όπως αναφέρθηκε, διακρίνουμε τα υποκείμενα περιδοτικά πετρώματα (τεκτονίτες) τα οποία είναι μηχανικά καταπονημένα και παρουσιάζουν φολίδωση. Οι περιδοτίτες βάσεως ακολουθούνται από περιδοτίτες και γαββρικά πετρώματα τα οποία εμφανίζουν στρωματοειδή δομή (συσσωρευτική δομή) λόγω επακόλουθων εξαλλοιώσεων. Η παραπάνω συσσωρευτική δομή περιδοτίτων και γράββρων υπόκειται συμπαγών μη ζωνώδων γάββρων και άλλων πετρωμάτων πλουσιότερων σε SiO₂. Τέλος, όλων των παραπάνω σχηματισμών υπέρκεινται βασάλτες (σπηλίτες) οι οποίοι παρουσιάζονται συμπαγείς με τη μορφή σφαιροειδούς λάβας (pillow lavas).

Η στρωματογραφία του οφιολιθικού συμπλέγματος παρουσιάζεται διαταραγμένη, λόγω της ύπαρξης του σε τεκτονικές ζώνες με επαλληλία πολλαπλών επωθήσεων. Επιπλέον, όπως αναφέρθηκε, στο γεωλογικό σύμπλεγμα παρουσιάζονται φαινόμενα μεταμορφισμού, υψηλής σερπεντινίωσης και έντονων διατμητικών κινήσεων. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά δυσχεραίνουν την αναγνώριση της αρχικής σύστασης και υφής των συσσωρεύσεων.



Σχήμα 2.10: Όφιολιθικός σχηματισμός - ψευδοστρωματική ακολουθία [10]

Σερπεντινίωση

Είναι ο μετασχηματισμός σιδηρομαγνησιούχων ορυκτών, και συγκεκριμένα του ολιβίνη σε серπεντινίτη - ένα ορυκτό με ινώδη η φυλλώδη μορφή. Αυτή η ασυνήθης εξαλλοίωση είναι ένα φαινόμενο αυτοενυδάτωσης, το οποίο συμβαίνει κατά τις τελευταίες φάσεις κρυστάλλωσης του μάγματος, όπου υπάρχει πλεόνασμα νερού. Αυτό το νέο πέτρωμα είναι αρχικά συμπαγές, λιγότερο ισχυρό που μπορεί να διατμηθεί από τεκτονικές διεργασίες. Η серпεντινίωση μπορεί επίσης να αναπτυχθεί κατω από εξωγενείς συνθήκες με μετεωρικό νερό και σε κανονικές διεργασίες αποσάθρωσης.

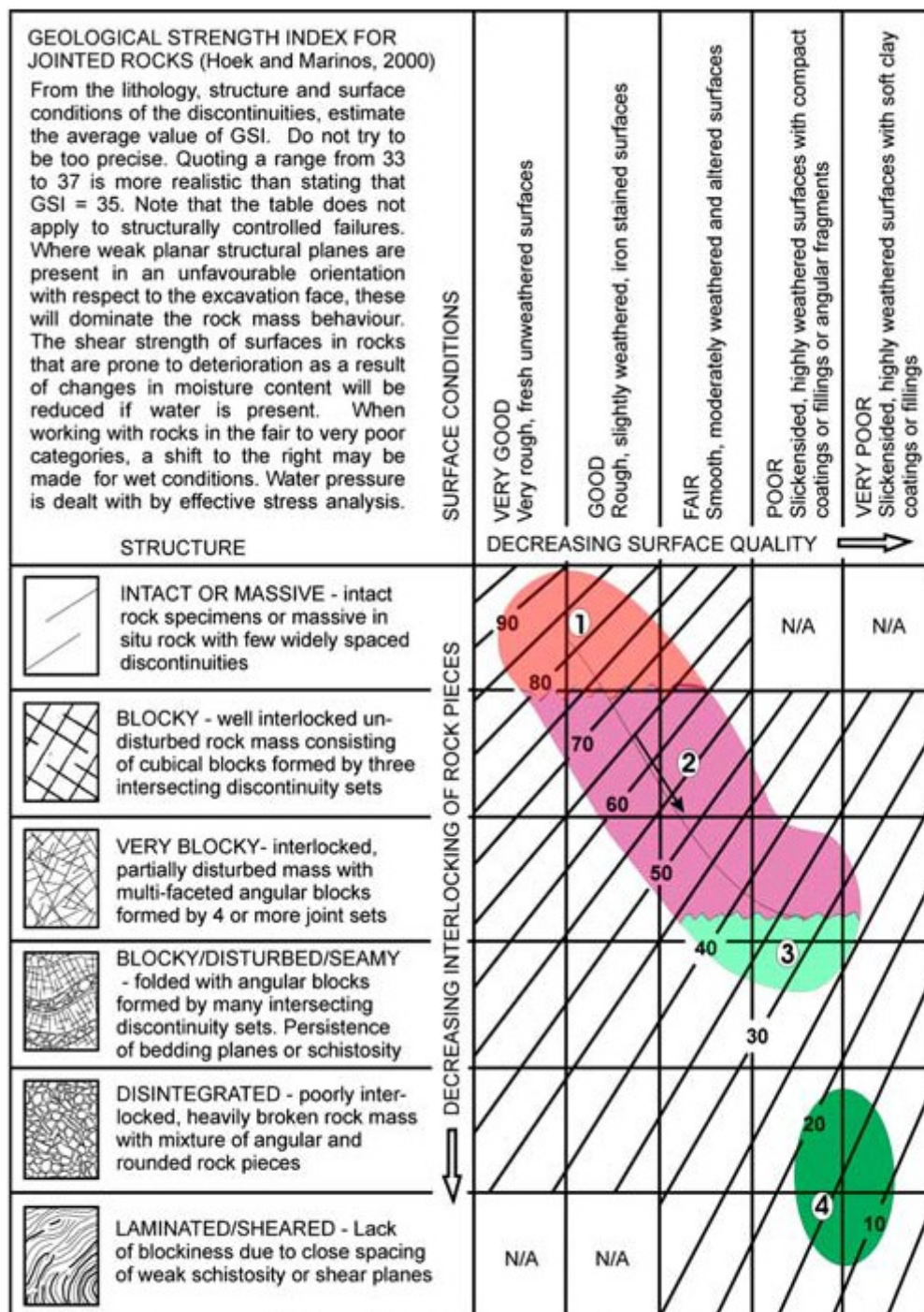
2.7.2. Τεχνικογεωλογικός χαρακτηρισμός των οφιολίθων

Παρουσιάζονται οι τεχνικογεωλογικές παράμετροι των πετρωμάτων που συνθέτουν το οφιολιθικό σύμπλεγμα. Λόγω της συνθετότητας του οφιολιθικού σχηματισμού είναι φανερό πως η ποιότητα βραχομάζας των οφιολιθων λαμβάνει μεγάλο εύρος τιμών από εξαιρετική (excellent) με πολύ καλή (fair) έως πτωχή (poor) με πολύ πτωχή (very poor), ανάλογα με το βαθμό σερπεντινίωσης και το μέγεθος διάτμησης που έχει πραγματοποιηθεί.

Παρακάτω αναφέρονται οι χαρακτηριστικοί τύποι του οφιολιθικού συμπλέγματος:

- I. Μη σερπεντιωμένος οφιόλιθος (περιδοτίτης, γάββρος)
- II. Σερπεντιωμένος οφιόλιθος (περιδοτίτης, γάββρος)
- III. Έντονα σερπεντιωμένος περιδοτίτης ή σερπεντινίτης με πιθανές ζώνες φυλλοποιημένου σερπεντινίτη.
- IV. Φυλλοποιημένος σερπεντινίτης (διατμημένοι σερπεντινίτες, και χαοτικές μάζες σε οφιολιθικά τεκτονικά μίγματα)
- V. Οφιολιθικό σύμπλεγμα με σχιστοκερατόλιθους

Ανάλογα με τον τύπο, που εξετάζεται, παρατίθενται οι τεχνικογεωλογικές παράμετροι που είναι πιθανό να συναντηθούν κατά τη διάνοιξη της σήραγγας σε οφιολιθικό σχηματισμό βάσει βιβλιογραφικών αναφορών και στοιχείων που προέκυψαν μετά από δειγματοληψία και επεξεργασία διαφόρων οφιολιθικών συμπλεγμάτων στη βόρεια και κεντρική Ελλάδα.



1. Massive strong peridotite with widely spaced discontinuities. The conditions of discontinuities are poorly only affected by serpentinisation
 2. Good to fair quality peridotite or compact serpentinite with discontinuities which may be severely affected from alteration.
 3. Schistose serpentinite. Schistosity may be more or less pronounced and their planes altered.
 4. Poor to very poor quality sheared serpentinite. The fragments consisting of weak materials
- Increase of presence of serpentines or other weak material (e.g talc) in joints or schistosity

Warning: The shaded areas indicate the ranges of GSI most likely to occur in these type of rocks. They may not be appropriate for a particular site specific case.

Σχήμα 2.11: Εύρη τιμών GSI για διάφορους τύπους οφιολιθικών πετρωμάτων [4]

Τύπος I - Μη σερπεντιωμένος οφιόλιθος (περιδοτίτης, γάββρος)

Στην παραπάνω κατηγορία, εντάσσονται υγιή και ανθεκτικά πετρώματα τα οποία παρουσιάζουν πολύ μεγάλη αντοχή (μερικές δεκάδες MPa έως πάνω από 100 MPa)

Ο περιδοτίτης είναι σκληρός και συμπαγής και παρουσιάζει καθόλου έως λίγες ασυνέχειες σε αραιά διαστήματα ακόμα και κοντά στην επιφάνεια. Η σερπεντινίωση έχει επηρεάσει τις ασυνέχειες από ελάχιστα έως καθόλου.

Η τεκτονική διαταραχή που παρουσιάζουν τα παραπάνω πετρώματα εκφράζεται σε σχέση με τις τεμνόμενες διακλάσεις των οποίων η παρουσία σχετίζεται με την κατάσταση των τάσεων κάτω από τις οποίες δημιουργήθηκαν.

Η κατάσταση των διακλάσεων είναι τραχείες με καλή έως πολύ καλή ποιότητα.

Στον παραπάνω τύπο περιδοτικής μάζας ο δείκτης GSI λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες από 65 (περιοχή 1 στο σχετικό διάγραμμα).



Εικόνα 2.15: Καλή ποιότητα περιδοτίτη (τύπος I) από το όρος Όρθρος [10]

Τύπος II - Σερπεντιωμένος οφιόλιθος (περιδοτίτης, γάββρος)

Η παραπάνω κατηγορία, εμφανίζει ένα ή περισσότερα συστήματα ασυνεχειών λόγω του τεκτονισμού που έχει υποστεί το οφιολιθικό σύμπλεγμα κατά τους γεωλογικούς χρόνους.

Η τεκτονική διαταραχή που παρουσιάζουν τα παραπάνω πετρώματα εκφράζεται σε σχέση με τις τεμνόμενες διακλάσεις των οποίων η παρουσία σχετίζεται με την κατάσταση των τάσεων κάτω από τις οποίες δημιουργήθηκαν.

Στις ασυνέχειες έχουν επιδράσει παράγοντες αποσάθρωσης ή εξαλλοίωσης προερχόμενη από ενδογενή αίτια. Οι περιδοτίτες ενδέχεται να εμφανίζονται λίγο έως πολύ σερπεντιωμένοι, με τη σερπεντινίωση να είναι κυρίως επιφανειακή στις ασυνέχειες μειώνοντας τις μηχανικές αντοχές της βραχομάζας. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η αρχική τραχεία κατάσταση των διακλάσεων μειώνεται δραματικά και χαρακτηρίζεται πτωχή ή πολύ πτωχή, με επιστρώσεις λείων και ολισθηρών υλικών όπως ο σερπεντινίτης ή ακόμα και ο τάλκης.

Η παραπάνω κατηγορία εμφανίζει αρκετές διακλάσεις ή είναι κατακερματισμένη, με

αποτέλεσμα ο δείκτης GSI να λαμβάνει τιμές από 40 μέχρι 55 (περιοχή 2 στο σχετικό διάγραμμα). Οι τιμές αυτές οφείλονται στη διαταραγμένη δομή αλλά και στην κατάσταση των ασυνεχειών οι οποίες αποκτούν σαπωνώδη υφή και χαρακτηρίζονται απαλές και ολισθηρές λόγω серπεντινίωσης.

Οι τιμές του σ_{ci} που χρησιμοποιούνται για σχεδιασμό σηράγγων στην Ελλάδα είναι ~ 50 MPa.



Εικόνα 2.16: Καλή ποιότητα περιδοτιτή (τύπος II) [10]

Τύπος III - Έντονα серπεντιωμένος περιδοτιτής ή серпεντινίτης με πιθανές ζώνες φυλλοποιημένου серпεντινίτη

Αναφορικά με τις μηχανικές παραμέτρους των серпεντινιτών της παραπάνω κατηγορίας, παρουσιάζονται προβλήματα μετρήσεων λόγω της επιρροής της σχιστότητας ή και του μεγάλου βαθμού κατακερματισμού των δειγμάτων.

Η βραχώμαζα παρουσιάζει ανισότροπη συμπεριφορά λόγω της σχιστότητας ενώ ο κατακερματισμός καθιστά δύσκολη την εύρεση ικανού μεγέθους τεμαχών άρρηκτου βράχου.

Για τον υπολογισμό της μονοαξονικής αντοχής του σχιστοποιημένου серпεντινίτη, συνίσταται να λαμβάνεται η αντίστοιχη μονοαξονική αντοχή του κανονικού серпεντινίτη μειωμένη κατά 30% ώστε να ερμηνεύεται η σχιστότητα.

Από περιπτώσεις στη βόρεια Ελλάδα θεωρείται ότι η τιμή των 40 MPa μπορεί να είναι ρεαλιστική για τη μονοαξονική αντοχή σ_{ci} του серпεντινίτη και 30 MPa για το σχιστοποιημένο серпεντινίτη.

Σε περιπτώσεις που η серпεντινίωση οφείλεται σε αποσάθρωση, και έχει επηρεάσει όλη την οφιολιθική βραχώμαζα, μετατρέποντας το πέτρωμα σε серпεντινίτη, παρουσιάζεται εκτεταμένος θρυμματισμός της δομής της βραχομάζας και μείωση των μηχανικών

παραμέτρων της. Σε περιπτώσεις που η σερπεντινίωση οφείλεται σε ενδογενείς αιτίες, η βραχώμαζα είναι πτωχή παρουσιάζοντας έντονα σχιστοποιημένη δομή και ο δείκτης GSI λαμβάνει τιμές 30 ή και λιγότερο (τμήμα περιοχής 3 - τιμές GSI από 25 έως 40).



Εικόνα 2.17: Συμπαγής και σχιστοποιημένος σερπεντινίτης (τύπος III) [10]

Τύπος IV - Φυλλοποιημένος σερπεντινίτης (διατμημένοι σερπεντινίτες, και χαοτικές μάζες σε οφιολιθικά τεκτονικά μίγματα)

Η παραπάνω κατηγορία απαντάται σε ζώνες διάτμησης, όπου το υλικό συχνά βρίσκεται πιο αλλοιωμένο και έντονα διαταραγμένο. Ο σερπεντινίτης αποκτά φυλλώδη δομή, χωρίς να μπορούν να διακριθούν τα τεμάχια της βραχομάζας, ενώ οι ασυνέχειες έχουν ολισθηρή επιφάνεια. Σε τέτοιες περιπτώσεις, ο δείκτης GSI λαμβάνει τιμές 10-20, ενώ η συμπεριφορά του σερπεντινίτη πολλές φορές πλησιάζει αυτή του εδάφους (περιοχή 4 στο σχετικό διάγραμμα).

Επιπλέον, ο φυλλοποιημένος σερπεντινίτης παρουσιάζει αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη άρρηκτου βράχου μεταξύ 5 και 20 MPa, χωρίς να αποκλείονται και χαμηλότερες.



Εικόνα 2.18: Διατμημένοι - φυλλώδεις σερπεντινίτες σε οφιόλιθο (τύπος IV) [10]

Τύπος V - Οφιολιθικό σύμπλεγμα με σχιστοκερατόλιθους

Η παραπάνω κατηγορία, συχνά εμφανίζει έντονη καταπόνηση (σχιστοποίηση). Η δομή της βραχομάζας αν και είναι σχιστώδης εμφανίζεται αρκετά συνεκτική λόγω της καλής συναρμογής των οφιολιθικών τεμαχών με τους σχιστοκερατόλιθους.

Η δομή παρουσιάζεται γενικά έντονα διαταραγμένη και αποδιοργανωμένη έως και φυλλώδης, ανάλογα με το πόσο επικρατεί η διατμημένη μάζα έναντι των κερματισμένων τεμαχιών τόσο των οφιολίθων όσο και των σχιστοποιημένων μεταφαισιτητών. Ο δείκτης GSI λαμβάνει τιμές από 20 έως 35.

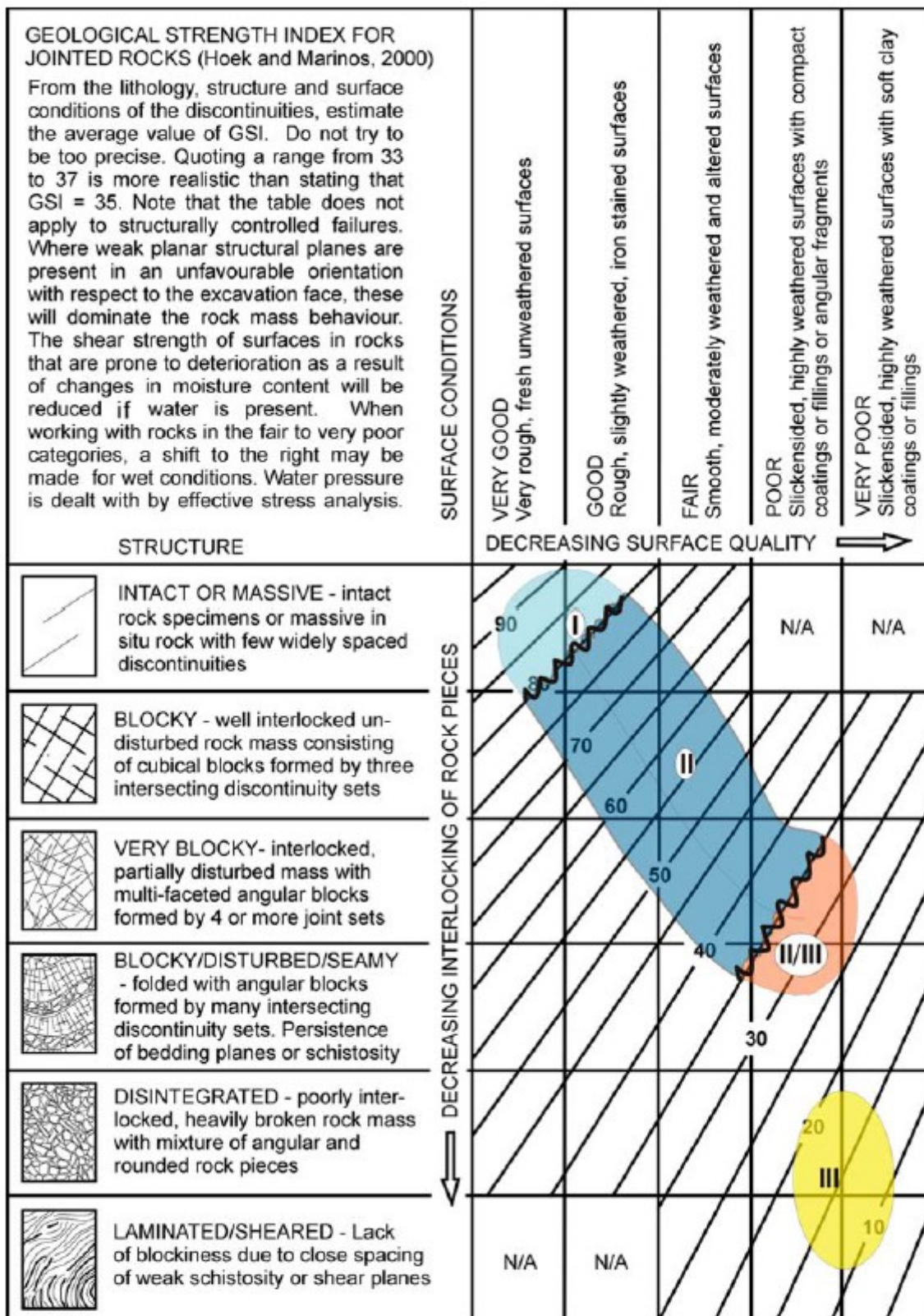
Οι παραπάνω βραχομάζες παρουσιάζουν σερπεντινίωση, η οποία ευθύνεται για τη μεταβολή τόσο των χαρακτηριστικών ασυνεχειών όσο και της δομής. Η μεταβολή της δομής της βραχομάζας επιπλέον οφείλεται σε φαινόμενα διάτμησης.



Εικόνα 2.19: Οφιολιθικό σύμπλεγμα με σχιστοκερατόλιθους (τύπος V) [10]

2.7.3. Συμπεριφορά κατά τη διάνοιξη σήραγγας

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενες παραγράφους, η ετερογένεια των τεχνικογεωλογικών χαρακτηριστικών των βραχωδών τεμαχών που απαντώνται στον οφιολιθικό σχηματισμό σε συνδιασμό με τη μη ομαλή μετάβαση από τον ένα σχηματισμό στον άλλο που συναντάται κατά τη διάνοιξη σήραγγων, εφιστά ιδιαίτερη προσοχή κατά το σχεδιασμό σήραγγων στον παραπάνω γεωλογικό σχηματισμό. Στον παρακάτω πίνακα, παρατίθεται η συμπεριφορά που εμφανίζουν τα οφιολιθικά πετρώματα κατά τη διάνοιξη σήραγγων, ενώ στη συνέχεια παρουσιάζεται λεπτομερής ανάλυση.



I. Stable conditions; only at great depths possibility of rock burst failures

II. Stability mainly controlled by structural failures

II/III. Stability controlled by structural failures or mild overstressing.

III. Stability controlled by stress dependent rock mass failure with significant squeezing at depth

Ravelling from the face may occur in masses corresponding in the low areas of zone II/III and in zone III

Σχήμα 2.12: Συμπεριφορά που οφιολιθικών πετρώματων κατά τη διάνοιξη σηράγγων [4]

Κατηγορία I

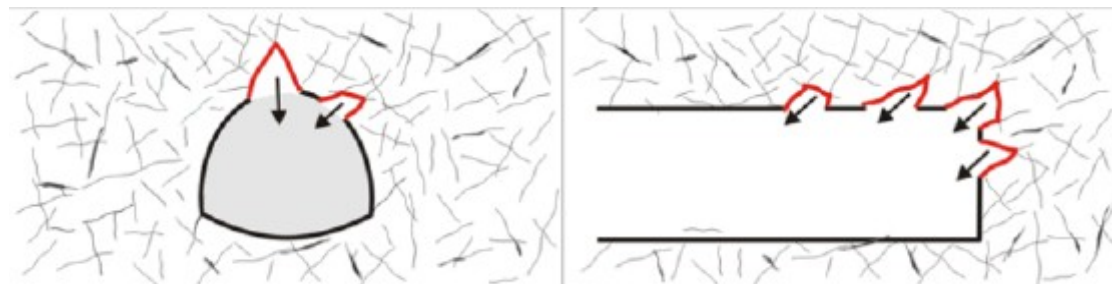
Η ποιότητα της βραχομάζας είναι εξαιρετική και αναμένονται απλές συνθήκες διάνοιξης στην παραπάνω κατηγορία ενώ είναι δυνατή η εκσκαφή της σήραγγας χωρίς υποστήριξη. Θα πρέπει να δοθεί προσοχή στην αποφυγή δομικών ασταθειών από σφήνες αλλά και σε φαινόμενα εκτίναξης πλακών από τις παρείες της σήραγγας σε μεγάλα βάθη (rock bursting) και φαινόμενα αποφλοίωσης (spalling). Ο δείκτης GSI λαμβάνει τιμές πάνω από 65, η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη παίρνει τιμές πάνω από 50MPa, ενώ οι τιμές της παραμέτρου m_i λαμβάνονται μεταξύ 15 -25 ή και μεγαλύτερες.



Σχήμα 2.13: Πιθανή αστοχία - Κατηγορία I [10]

Κατηγορία II

Η γεωμετρία των ασυνεχειών καθώς και η ποιότητα τους καθιστά πολύ πιθανή την αντιμετώπιση δομικών αστοχιών κατά τη διάνοιξη της σήραγγας όπως ολίσθηση σφηνών. Επιπλέον, μικρές έως μέτριες εισροές νερού είναι αναμενόμενες ανάλογα με τη θέση του υδροφόρου ορίζοντα. Σε μεγαλύτερα βάθη η βραχομάζα παρουσιάζει σφικτή δομή και οι αστοχίες αναμένονται κυρίως ως σφηνοειδείς ολισθήσεις και όχι ως παραμορφώσεις. Ο δείκτης GSI λαμβάνει τιμές μεταξύ 35 και 65, η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη παίρνει τιμές από 25 μέχρι 50MPa, ενώ οι τιμές της παραμέτρου m_i λαμβάνονται μεταξύ 10 - 20.

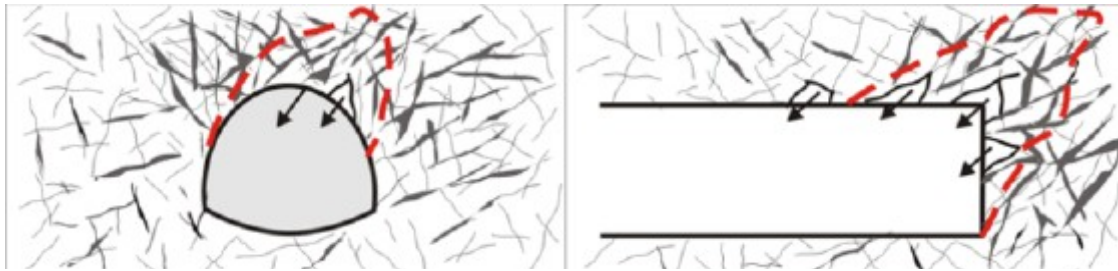


Σχήμα 2.14: Πιθανή αστοχία - Κατηγορία II [10]

Κατηγορία II/III

Η συμπεριφορά της βραχομάζας είναι ισότροπη όσον αφορά τις παραμορφώσεις και ανισότροπη όσον αφορά τις καταπτώσεις. Σε μεγαλύτερα βάθη ο κυριότερος παράγοντας αστοχιών είναι οι συγκλίσεις των τοιχωμάτων της σήραγγας. Σε αυτή την κατηγορία κρίσιμο παράγοντα αστοχίας μπορεί να αποτελέσει η κατάρρευση μετώπου, όπου σε σχετικά μικρά βάθη μπορεί να φτάσει την επιφάνεια (αστοχία τύπου καμινάδας). Ο

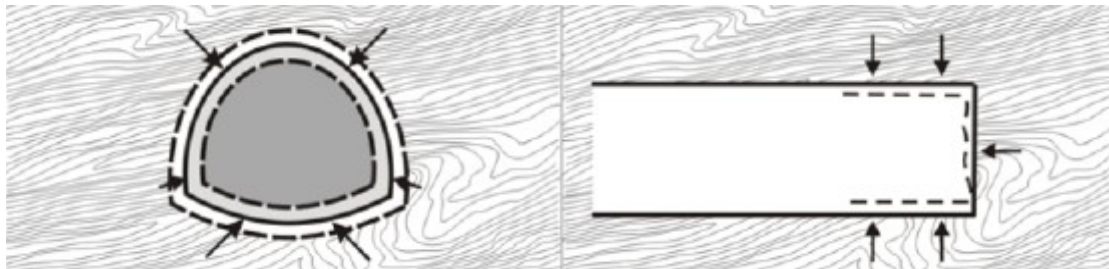
δείκτη GSI λαμβάνει τιμές μεταξύ 25 και 35, η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη παίρνει τιμές από 5 μέχρι 50MPa, ενώ οι τιμές της παραμέτρου m_i λαμβάνονται μεταξύ 10 - 15.



Σχήμα 2.15: Πιθανή αστοχία - Κατηγορία II/III [10]

Κατηγορία III

Ο κυριότερος τρόπος αστοχίας σε αυτή την κατηγορία είναι η σύγκλιση των τοιχωμάτων της σήραγγας. Οι συγκλίσεις πραγματοποιούνται με ταχύτητα και απαιτείται άμεση υποστήριξη στο μέτωπο (squeezing). Κρίσιμο παράγοντα αστοχίας μπορεί, επιπλέον, να αποτελέσει η κατάρρευση μετώπου, όπου σε σχετικά μικρά βάθη μπορεί να φτάσει την επιφάνεια (αστοχία τύπου καμινάδας). Ο δείκτη GSI λαμβάνει τιμές μεταξύ 10 και 20 η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη παίρνει τιμές κάτω από 10MPa, ενώ οι τιμές της παραμέτρου m_i λαμβάνονται κάτω από 12.



Σχήμα 2.16: Πιθανή αστοχία - Κατηγορία III [10]

Ακολουθεί πίνακας που παραθέτει για κάθε πιθανή κατηγορία αστοχίας, κατά τη διάνοιξη σήραγγας στον οφιολιθικό σχηματισμό, πιθανά/ αναμενόμενα εύρη τιμών του γεωλογικού δείκτη GSI και των αντίστοιχων μηχανικών παραμέτρων.

Κατηγορία αστοχίας	Δείκτης GSI	σ_{ci} (MPa)	m_i
I	>65	>50	15-25
II	35-65	25-100	10-20
II/III	25-35	5-50	10-15
III	10-20	<10	<12

Πίνακας 2.6: Σύνοψη πιθανών κατηγοριών αστοχίας σε οφιολιθικό σχηματισμό.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι επιμέρους λιθολογικοί τύποι του οφιολιθικού συμπλέγματος και η συμπεριφορά τους κατά τη διάνοιξη σήραγγας.

Τύπος I - Μη σερπεντιωμένος οφιόλιθος (περιδοτίτης, γάββρος)

Πρόκειται για πολύ καλής ποιότητας βραχομάζα περιδοτίτη και δεν αναμένονται ιδιαίτερα προβλήματα κατά τη διάνοιξη σηράγγων. Η συμπεριφορά της βραχομάζας είναι ισχυρά ανισότροπη. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, σε περιπτώσεις υγιούς πετρωμάτων πρέπει να δοθεί προσοχή σε δομικές αστοχίες από σφήνες. Σε σύγκριση με άλλες βραχομάζες, η παραπάνω κατηγορία εμφανίζει λίγες ομαλές ασυνέχειες οι οποίες όμως παρουσιάζουν χαμηλές ιδιότητες τριβής. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην παρουσία σερπεντιωμένου υλικού ακόμα και όταν η σερπεντινίωση δεν έχει επηρεάσει το υλικό του θεμελιώδους βράχου. Σε μεγάλα βάθη στη διανοιγόμενη σήραγγα πρέπει να δοθεί προσοχή στην αποφλοιώση του πετρώματος (spalling) αλλά και εκτίναξη (rockbursting) λόγω ψαθυρής θραύσης άρρηκτου πετρώματος στο οποίο οι ασυνέχειες έχουν μικρή επίδραση.

Η βραχομάζα κατατάσσεται στην κατηγορία I.

Τύπος II - Σερπεντιωμένος οφιόλιθος (περιδοτίτης, γάββρος)

Η συμπεριφορά της βραχομάζας στην παραπάνω κατηγορία είναι ανισότροπη. Προσοχή πρέπει να δοθεί στον έλεγχο δομικών αστοχιών από ολίσθηση σφηνών, λόγω της γεωμετρίας και της πτωχής έως πολύ πτωχής ποιότητας ασυνεχειών οι οποίες οφείλονται σε σερπεντινίωση. Οι ασυνέχειες του περιδοτίτη εμφανίζονται συχνά πιο λείες και με χαμηλότερη γωνία τριβής σε σχέση με αυτές των αντίστοιχων ισχυρών πετρωμάτων. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ανάλογα με τη θέση του υδροφόρου ορίζοντα, αναμένονται μικρές έως μέτριες εισροές νερού. Το φαινόμενο ολίσθησης σφηνών μπορεί να ενταθεί σε περίπτωση έντονης σερπεντινίωσης - φυλλοποίησης στις ασυνέχειες, γεγονός που αποχωρίζει ευκολότερα τα τεμάχια μεταξύ τους. Σε μεγαλύτερα βάθη η βραχομάζα παρουσιάζει σφικτή δομή και οι αστοχίες αναμένονται κυρίως ως σφηνοειδείς ολισθήσεις και όχι ως παραμορφώσεις.

Η βραχομάζα κατατάσσεται στην κατηγορία II.

Τύπος III - Έντονα σερπεντιωμένος περιδοτίτης ή σερπεντινίτης με πιθανές ζώνες φυλλοποιημένου σερπεντινίτη

Η συμπεριφορά της βραχομάζας στην παραπάνω κατηγορία είναι ισότροπη όσον αφορά τις παραμορφώσεις και ανισότροπη όσον αφορά τις ολισθήσεις. Σε αυτή την κατηγορία πετρώματος η κυρίως μάζα πετρώματος δεν έχει φυλλοποιηθεί και δεν έχει χάσει τη δομή της ενώ οι ασυνέχειες παρουσιάζουν πτωχή ποιότητα. Πρέπει να δοθεί προσοχή στον έλεγχο δομικών αστοχιών από ολίσθηση σφηνών, λόγω της γεωμετρίας και της πτωχής έως πολύ πτωχής ποιότητας ασυνεχειών οι οποίες οφείλονται σε σερπεντινίωση.

Σε περιπτώσεις έντονα τεμαχισμένου περιδοτίτη, σχιστώδη ή ασθενέστερου σερπεντινίτη

η συμπεριφορά ελέγχεται με ολίσθηση και περιστροφή σε επιφάνειες ασυνεχειών με σχετικά μικρή αστοχία των τεμαχίων του άρρηκτου βράχου. Οι τιμές των δεικτών GSI και RQD είναι πολύ μικρές. Ο έλεγχος σταθερότητας κατά τη διάνοιξη της σήραγγας μπορεί να βελτιωθεί αποτελεσματικά εάν διατηρηθεί η βραχομάζα υπό περιορισμό με τα κατάλληλα μέτρα υποστήριξης (άμεση υποστήριξη, χρήση δοκών προπορείας κλπ).

Η βραχομάζα κατατάσσεται στην κατηγορία III.

Τύπος IV - Φυλλοποιημένος σερπεντινίτης (διατμημένοι σερπεντινίτες, και χαοτικές μάζες σε οφιολιθικά τεκτονικά μίγματα)

Η συμπεριφορά της βραχομάζας με πτωχής ποιότητας φυλλοποιημένο σερπεντινίτη είναι ισότροπη όσον αφορά τις παραμορφώσεις. Το αλληλοκλείδωμα της βραχομάζας είναι πτωχό ή και μπορεί να έχει χαθεί πλήρως, λόγω αποσάθρωσης ή διάτμησης, και είναι πιθανή η παρουσία αργιλικών τμημάτων με διογκούμενα υλικά. Μπορούν παρατηρηθούν φαινόμενα παραμορφώσεων ακόμη και έντονων συνθλίψεων (squeezing), τα οποία εξαρτώνται από την πίεση των υπερκειμένων αλλά και την αντοχή του άρρηκτου βράχου. Τα παραπάνω φαινόμενα παραμορφώσεων περιορίζονται κατά τόπους αν οι φυλλώδεις ζώνες είναι περιορισμένες σε έκταση ή περικλείονται από καλής ποιότητας πέτρωμα. Σε περιπτώσεις όπου κακής ποιότητας βραχομάζας εντοπίζεται σε ένα σημείο της σήραγγας (πχ. θεμελίωση) ή απαντάται σε συγκεκριμένη διεύθυνση σε σχέση με το προσανατολισμό της σήραγγας μπορεί να παρατηρηθούν φαινόμενα ανισότροπων παραμορφώσεων.

Θα πρέπει να δοθεί προσοχή και να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα για την αποφυγή αστοχιών ευστάθειας μετώπου. Επιπλέον, σε αυτές τις περιπτώσεις είναι πιθανή η χρήση ολισθαινόντων πλαισίων για την αποφυγή αστοχίας λόγω μεγάλων παραμορφώσεων. Σε περίπτωση διάνοιξης με μηχανήμα ολομέτωπης κοπής (TBM) πρέπει να δοθεί προσοχή διότι μπορεί να παγιδευτεί λόγω συγκλίσεων.

Η βραχομάζα κατατάσσεται στην κατηγορία IV.

Τύπος V - Οφιολιθικό σύμπλεγμα με σχιστοκερατόλιθους

Η συμπεριφορά βραχομάζας όπου το σύνολο οφιολίθων - σχιστοκερατόλιθων παρουσιάζει χαοτική δομή είναι ισότροπη όσον αφορά τις παραμορφώσεις. Το μέγεθος των παραμορφώσεων κυμαίνεται από μικρό έως μεγάλο και εξαρτάται από την πίεση των υπερκείμενων αλλά και την αντοχή του άρρηκτου τεμάχους. Σε περιπτώσεις που η δομή της βραχομάζας είναι αρκετά συνεκτική, λόγω της καλής συναρμογής των οφιολιθικών τεμαχίων με τους σχιστοκερατόλιθους, και πραγματοποιείται διάνοιξη σε βάθος με μέτρια υπερκείμενα, οι συνθήκες διάνοιξης της σήραγγας είναι ευσταθείς. Φαινόμενα ολισθήσεων είναι λιγότερο πιθανό να συμβούν λόγω της έλλειψης συγκεκριμένων ασυνεχειών αλλά και ετερογένειας της βραχομάζας. Τα παραπάνω φαινόμενα είναι δυνατό να απαντηθούν σε περιπτώσεις λιγότερο σχιστοποιημένων ή/ και ακανόνιστων μπλοκ τα οποία ολισθαίνουν πάνω σε πιο σχιστοποιημένες και ολισθηρές ζώνες.

Κεφάλαιο 3

Διατομές & Μέτρα Υποστήριξης

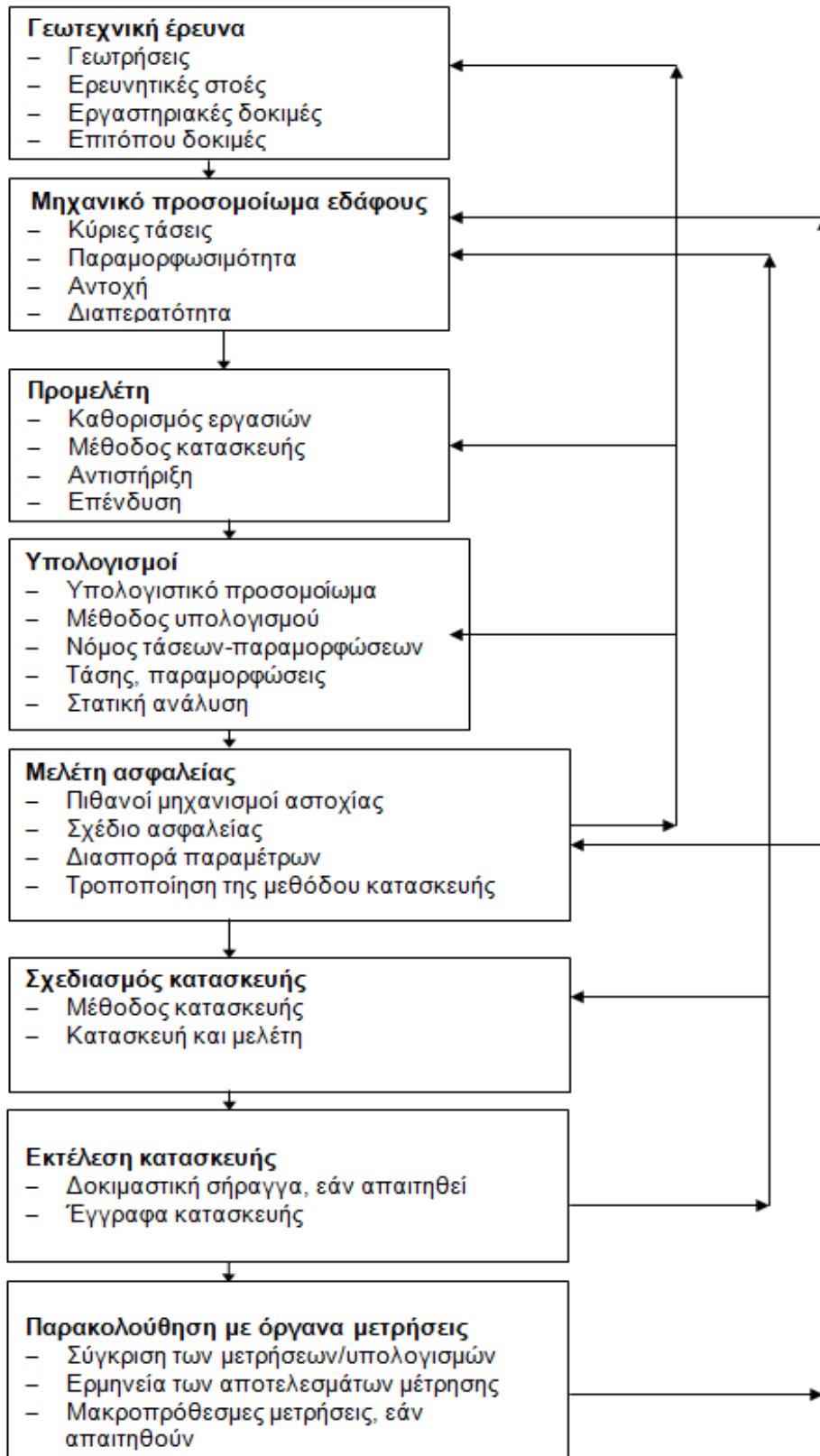
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται η φιλοσοφία εκσκαφής και υποστήριξης που ακολουθήθηκε στο υπό μελέτη έργο, στοιχεία της τεχνικής έκθεσης οριστικής μελέτης [18] καθώς επίσης και οι τυπικές διατομές που επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν στη σήραγγα του Καλλιδρόμου.

3.1. Αρχές σχεδιασμού

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζεται η φιλοσοφία και οι αρχές σχεδιασμού με βάση τις οποίες κατασκευάστηκε η σήραγγα του Καλλιδρόμου, όπως παρουσιάστηκε στη τεχνική έκθεση οριστικής μελέτης [18]. Προκειμένου να είναι επιτυχής η διάνοιξη μετώπου σήραγγας απαιτείται συνεργασία πολλών πεδίων ειδικοτήτων από την μία πλευρά, με την επαναληπτική διαδικασία σχεδιασμού, από την άλλη, επαναλαμβάνοντας, εάν είναι αναγκαίο, ορισμένες φάσεις του έργου περισσότερες φορές. Ο σχεδιασμός σηράγγων βασίζεται κυρίως σε:

- επαρκή γνώση της τοπικής γεωλογίας,
- αποτελέσματα διεξοδικών γεωτεχνικών ερευνών, που χρησιμοποιούνται - μαζί με την γνώση της τοπικής γεωλογίας και την πείρα - στο σχεδιασμό ενός ρεαλιστικού βραχομηχανικού μοντέλου και στην εξαγωγή βραχομηχανικών παραμέτρων,
- αναλύσεις ευστάθειας, που ταιριάζουν με τα χαρακτηριστικά του εδάφους και την μέθοδο κατασκευής, και περιγράφουν την αλληλεπίδραση βραχομάζας-υποστήριξης,
- μελέτη για εκσκαφή και υποστήριξη, που περιλαμβάνει την μέθοδο κατασκευής, βασισμένη στα παραπάνω θέματα,
- δημοπράτηση, που βασίζεται στα παραπάνω θέματα,
- προσεκτική επίβλεψη κατασκευής και παρακολούθηση μέσω χαρτογράφησης και επιτόπιων μετρήσεων κατά τη διάρκεια της κατασκευής, και ανάλογα με τις περιστάσεις και αργότερα,
- ανάστροφες αναλύσεις για μελλοντικά έργα, ή, εάν είναι αναγκαίο, για το ίδιο το έργο κατά την διάρκεια της κατασκευής.

Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά τα απαιτούμενα βήματα και στοιχεία για την εκπόνηση έργου.



Σχήμα 3.1: Φιλοσοφία Σχεδιασμού Σήραγγας Καλλιδρόμου [18]

Οι έρευνες του εδάφους και οι ταυτόχρονες δοκιμές για τον προσδιορισμό παραμέτρων είναι στοιχεία που πρέπει να λαμβάνονται νωρίς στο έργο. Το πρόγραμμα έρευνας πρέπει να είναι όσο το δυνατόν ευέλικτο και πρέπει να προσαρμόζεται στο αντίστοιχο επίπεδο γνώσης και στις εν λόγω κατασκευαστικές μεθόδους. Έτσι, στην πορεία των ερευνών, για παράδειγμα μία αλλαγή της χάραξης της σήραγγας ή της διατομής μπορεί να είναι σημαντική.

Είναι σημαντικό, λόγω της συνήθως κεντρικής σπουδαιότητας του φαινομένου κατανομής του φορτίου του εδάφους κατά την κατασκευή σήραγγας, να εκπονηθεί έγκαιρα ένα μηχανικό μοντέλο για το έδαφος κατασκευής (π.χ. συμπεριφορά τάσης-παραμόρφωσης, υδατοπερατότητα). Οι παράμετροι εδάφους ή βράχου απαραίτητες για τους υπολογισμούς ευστάθειας και παραμόρφωσης γι' αυτό το μοντέλο, πρέπει να εξαχθούν από τα αποτελέσματα ερευνών και την προηγούμενη πείρα. Τα αποτελέσματα των εργαστηριακών και επιτόπου δοκιμών πρέπει να ερμηνευθούν κριτικά, σε σχέση με την σπουδαιότητά τους για τις πραγματικές συνθήκες. Αποτελούν συνήθως μόνο μέρος μίας πλήρους θεώρησης ασφάλειας και ανάλυσης κινδύνων.

Γεωτεχνικές έρευνες μαζί με την κεκτημένη εμπειρία, καθώς επίσης και πιθανούς προκαταρκτικούς υπολογισμούς, είναι η βάση για μία κατάλληλη μέθοδο κατασκευής που επιλέγεται μετά από θεώρηση όλων των αναγκών απαιτήσεων. Στοιχεία της υποστήριξης και επένδυσης της σήραγγας σχεδιάζονται για την επιλεγμένη μέθοδο κατασκευής, που μπορεί να απαιτήσει συμπληρωματικές έρευνες εδάφους.

Όλες οι κατασκευαστικές μέθοδοι που επιλέγονται απαιτούν αναλύσεις ευστάθειας και παραμόρφωσης για όλα τα αποφασιστικά στάδια της κατασκευής και της φόρτισης. Οι εφαρμοζόμενες υπολογιστικές μέθοδοι πρέπει να αναπαριστούν μία ρεαλιστική θεώρηση των γεωμετρικών σχέσεων, της αλληλεπίδρασης ανάμεσα στην κατασκευή και το έδαφος καθώς και άλλες επιρροές. Το προσομοίωμα είναι η βάση για τον υπολογισμό των σταδίων της κατασκευής (χρονική αλληλουχία εργασιών) κατά την διάνοιξη της σήραγγας. Αυτό θα πρέπει να συνδυαστεί με μία υπολογιστική μέθοδο που επιτρέπει τον προσδιορισμό της σχέσης τάσης-παραμόρφωσης του εδάφους και της κατασκευής, μέσω κατάλληλων κριτηρίων τάσης-έντασης.

Οι υπολογισμοί πρέπει να ικανοποιούν συνθήκες ισορροπίας και συναρμογής και να δίνουν πληροφορίες για την εντατική κατάσταση και τις παραμορφώσεις προκειμένου να εξαχθούν κριτήρια σχεδιασμού. Είναι δυνατό να εφαρμοσθούν διαφορετικά υπολογιστικά μοντέλα ή/και μέθοδοι υπολογισμού για διαφορετικές φάσεις της μελέτης. Αποτελέσματα των επιτόπου μετρήσεων θα πρέπει να χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα, εφόσον είναι δυνατό, για τα μεγάλα έργα κατασκευών προκειμένου να βελτιωθούν τα υπολογιστικά μοντέλα προοδευτικής προχώρησης. Το ίδιο ισχύει και για τον υπολογισμό της στραγγιστικής ροής.

Οι υπολογισμοί διεξάγονται, έχοντας υπόψη τις θεωρήσεις ασφάλειας και λειτουργικότητας. Μία αρχή ασφάλειας που βασίζεται σε πιθανούς μηχανισμούς αστοχίας μπορεί να έχει κριτήρια όπως οι τάσεις, οι εντάσεις, οι μετατοπίσεις ή οι αντοχές. Ένας αριθμός παραμέτρων καθώς και απλοποιήσεων ή αβεβαιοτήτων στην επιλογή υπολογιστικών προσομοιωμάτων και υπολογιστικών μεθόδων θα πρέπει να ληφθεί υπόψη διεξάγοντας αναλύσεις ευαισθησίας. Η μέθοδος εκσκαφής και υποστήριξης, ή ακόμη και η όλη σύλληψη, πρέπει να μεταβληθεί εάν τα κριτήρια διασφαλίζουν ένα ανεπαρκές επίπεδο λειτουργικότητας ή μία επισφαλή ευστάθεια. Μία τροποποίηση της μεθόδου κατασκευής μπορεί να είναι αναπόφευκτη, εάν αυτή αποδειχτεί να είναι οικονομική.

Εάν τα κριτήρια ασφάλειας και λειτουργικότητας ικανοποιούνται, το επόμενο βήμα είναι ο σχεδιασμός της εκτέλεσης. Σε περίπτωση απρόβλεπτων κινδύνων μπορεί να είναι χρήσιμο και επικουρικό να σχεδιαστούν επιπλέον μέτρα υποστήριξης που θα χρησιμοποιηθούν ως εναλλακτική λύση, εάν αυτό απαιτηθεί. Αυτό ενέχει, για παράδειγμα, την παρουσία μέσων υποστήριξης στο εργοτάξιο που μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα και είναι ειδικά σχεδιασμένα για την αντίστοιχη μέθοδο κατασκευής και τις πιθανές πηγές κινδύνου.

Ο σχεδιασμός επαληθεύεται με την βοήθεια των επιτόπου μετρήσεων και της σύγκρισής τους με τα αποτελέσματα των υπολογισμών και τα κριτήρια ασφάλειας από την αρχή των εργασιών κατασκευής. Από μόνα τους, τα αποτελέσματα των μετρήσεων μπορεί να μην δίνουν κάποια ένδειξη για το πόσο κοντά σε μία απότομη αστοχία μπορεί να είναι το εν λόγω στάδιο της κατασκευής. Εάν οι μετρήσεις, που έγιναν κατά την διάρκεια των έργων κατασκευής, διαφέρουν σημαντικά από τα αποτελέσματα των υπολογισμών (π.χ. ανεπαρκής μείωση στον ρυθμό παραμόρφωσης), τότε διορθώσεις στην μέθοδο κατασκευής και υποστήριξης και στον σχεδιασμό της επένδυσης είναι αναγκαίες. Σε εξαιρετικές περιπτώσεις, ακόμη και αλλαγές ολόκληρης της μελέτης μπορεί να είναι αναγκαίες. Το προσομοίωμα υπολογισμού ή/και οι παράμετροι πρέπει ορισμένες φορές να προσαρμόζονται στις συνθήκες του εδάφους με συμπληρωματικούς υπολογισμούς προκειμένου για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων των μετρήσεων (ανάστροφη ανάλυση).

Δεν παρουσιάζονται ήδη όλες οι περιπτώσεις φορτίσεως στην αλληλουχία των εργασιών κατασκευής (π.χ. υδροστατική πίεση, πίεση διόγκωσης, φορτία κίνησης κλπ). Σε τέτοιες περιπτώσεις - προπαντός για δύσκολες κατασκευές με ευρύ φάσμα πιθανών ζημιών - πρέπει να ληφθεί πρόνοια για μακροπρόθεσμες μετρήσεις.

Το μηχανικό προσομοίωμα του εδάφους (παράμετροι), οι υπολογισμοί (υπολογιστικό μοντέλο, υπολογιστική μέθοδος, νόμοι τάσης-έντασης) και οι θεωρήσεις ασφάλειας, πρέπει όλα να κατανοούνται μαζί. Ανακρίβειες καθώς και πολλές απλοποιήσεις σε ένα μέρος του μοντέλου, έχουν αρνητική επιρροή στην αξιοπιστία, και έτσι παρομοίως και στην ασφάλεια, όλου του μοντέλου. Συνεπώς, οι απαιτήσεις ακρίβειας πρέπει να είναι καλά εξισορροπημένες για όλα τα τμήματα της μελέτης”

3.2. Μήκος σήραγγας, χάραξη και κλίση

Η σήραγγα του Καλλιδρόμου αποτελείται από ένα ζεύγος σηράγγων μονής γραμμής η κάθε μία και μήκους 9.036,44 και 9.035,17 m αντίστοιχα. Οι σήραγγες βρίσκονται αρχικά σε απόσταση 35 m μεταξύ τους. Αυτή η απόσταση αυξάνεται σταδιακά κατά μήκος τμήματος σήραγγας 850 m περίπου, στη βόρεια και νότια περιοχή, και φτάνει σε αξονική απόσταση 65 m στο κεντρικό τμήμα. Εκτός από αυτό το τμήμα όπως επίσης και από ένα τμήμα περί τα 400 m που ξεκινά από τη νότια είσοδο, η σήραγγα έχει ευθύγραμμη χάραξη. Η σήραγγα κλίνει ελαφρά προς βορρά με κλίση περίπου 5,2%. Η ταχύτητα σχεδιασμού για το υπό μελέτη τμήμα είναι 250 κλμ/ώρα.

3.3. Ελεύθερη διατομή και εγκαταστάσεις

Οι δυο σήραγγες συνδέονται με εγκάρσιες συνδετήριες σήραγγες κάθε 500 m. Τοπικά, εάν οι συνδετήριες σήραγγες βρίσκονται σε πολύ χαλαρές βραχώδεις μάζες με μικρή έκταση, όπως ζώνες διάτμησης, η θέση και η απόσταση των συνδετήριων σηράγγων προσαρμόζεται ελαφρά έτσι ώστε οι συνδετήριες σήραγγες να τοποθετούνται σε καλύτερες βραχώδεις μάζες. Έχει προβλεφθεί αποστραγγιστικό σύστημα για τις σήραγγες.



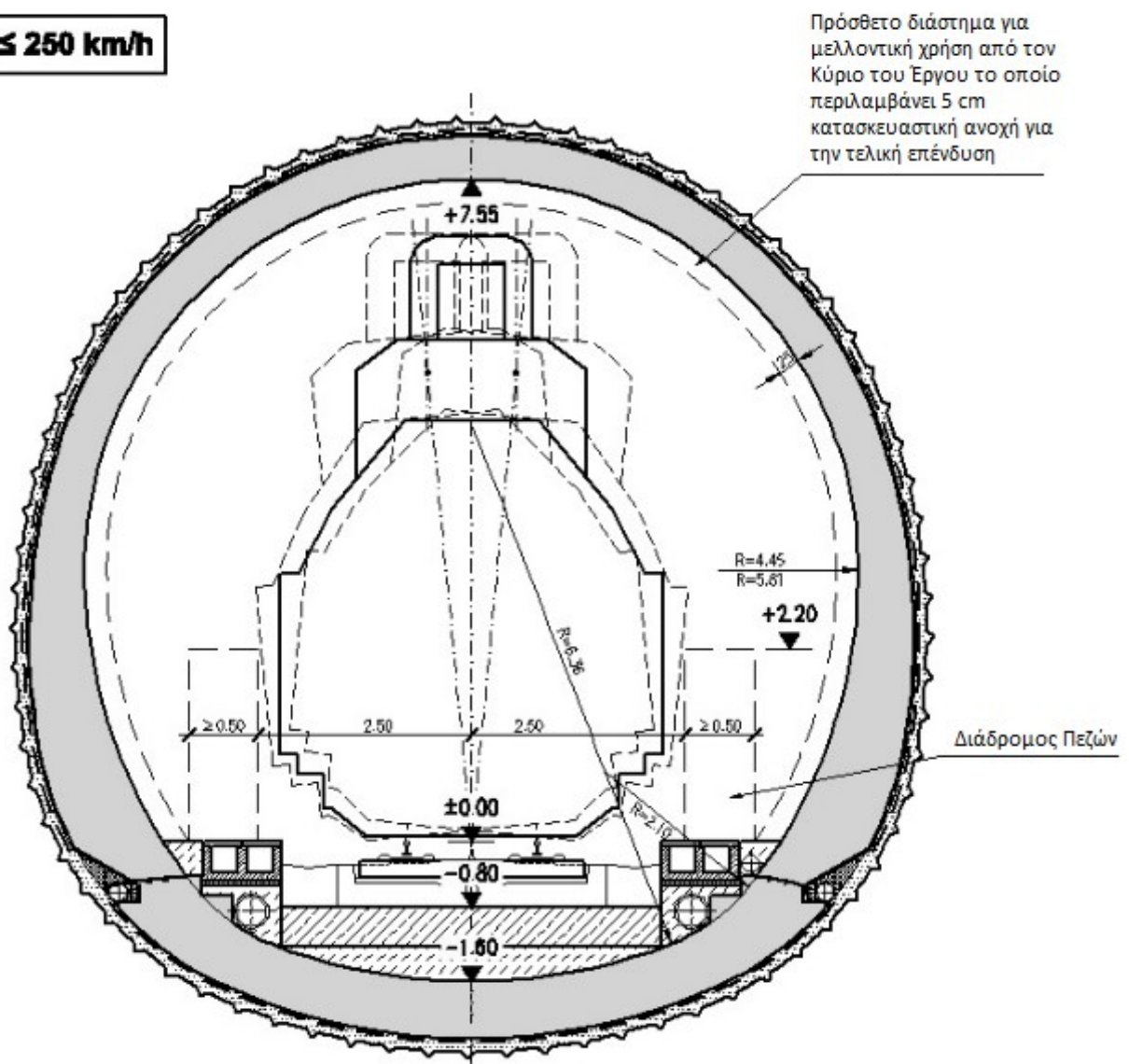
Εικόνα 3.1: Σήραγγα Καλλιδρόμου: Συνδετήρια Σήραγγα υπο κατασκευή [21]

Η διατομή της κάθε σήραγγας έχει ελεύθερο πλάτος περίπου 8,9 m και ελεύθερο ύψος περίπου 9,2 m. Το ελεύθερο ύψος πάνω από το άνω άκρο της σιδηροτροχιάς είναι περίπου 7,6 m. Προβλέπεται η εφαρμογή σταθερής επιδομής. Σε κάθε πλευρά της διατομής της σταθερής επιδομής τοποθετούνται αγωγοί διέλευσης καλωδίων δύο τμημάτων. Οι αγωγοί αυτοί συνδέονται μεταξύ τους και με ένα κιβώτιο διακοπών μέσω ενός εγκάρσιου καλωδίου κάθε 250 m. Πλευρικά του φρεατίου των καλωδίων, στις εσωτερικές παρειές των σηράγγων, τοποθετείται αγωγός πυρόσβεσης ο οποίος έχει

σημεία υδροληψίας κάθε 50 m. Στο κάτω μέρος των φρεατίων καλωδιώσεων και στις δύο πλευρές της σήραγγας κατασκευάζεται συλλεκτήριος αγωγός αποχέτευσης ο οποίος συνδέεται με σωλήνες αποστράγγισης, πού είναι εγκατεστημένοι στα πλευρικά τοιχώματα και στις δύο πλευρές, κάθε 50 m μέσω φρεατίων εκτόνωσης και επίσκεψης.

Ανά αποστάσεις 25 m προβλέπονται εσοχές οι οποίες εναλλάσσονται δεξιά και αριστερά της σήραγγας. Αυτές αποτελούν χώρους στους οποίους θα βρίσκονται τα φρεάτια ελέγχου, τα φρεάτια καλωδιώσεων και οι πυροσβεστικές φωλιές. Σε ορισμένα σημεία οι εσοχές εγκαταστάσεων αντικαθίστανται από καταφύγια στην εσωτερική επένδυση.

$v_e \leq 250 \text{ km/h}$



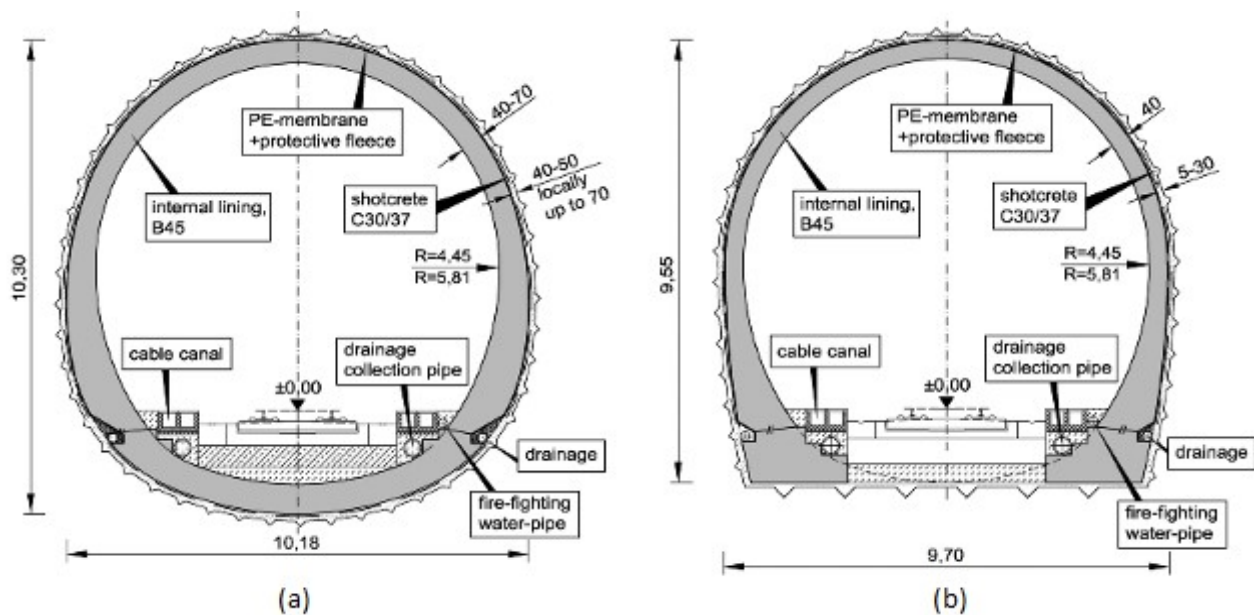
Σχήμα 3.2: Τυπική διατομή, εσωτερικό περίγραμμα με το περιτύπωμα του τρένου [18]

3.4. Τυπικές διατομές

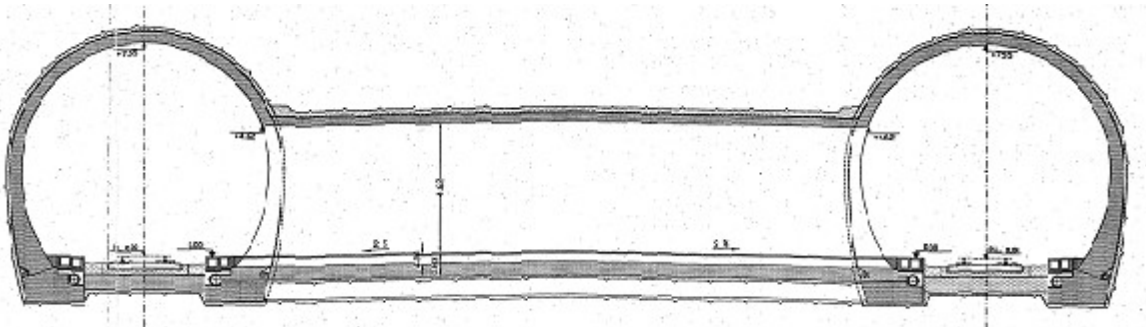
Στην μελέτη των κυρίων σηράγγων, χρησιμοποιούνται δύο γενικοί τύποι τυπικών διατομών. Αναφέρεται πως, και οι δύο τύποι διατομών έχουν την ίδια ελεύθερη διατομή και επιδομή ενώ έχει προβλεφθεί καθαρή διάμετρος περίπου 9μ. Διαφέρουν κατά την μορφή της εσωτερικής και εξωτερικής επένδυσης. Οι διατομές που κατασκευάζονται σε αργιλικούς και οφιολιθικούς σχηματισμούς έχουν σχεδιαστεί με κλειστό ανεστραμμένο θόλο και παρουσιάζουν κυκλική μορφή. Οι διατομές που κατασκευάζονται σε ασβεστολιθικούς σχηματισμούς έχουν σχεδιαστεί με ανοικτό ανάστροφο θόλο και πεταλοειδή μορφή.

Στη μελέτη, αντίστοιχα, για τις συνδετήριες σήραγγες, πού έχουν διανοικτεί, έχουν προβλεφθεί δύο τύποι (DA, DB) τυπικών διατομών. Ο τύπος DA έχει κλειστό ανάστροφο θόλο και σχεδόν κυκλική μορφή, ο τύπος DB έχει ανοικτό ανάστροφο θόλο και πεταλοειδή μορφή. Οι δύο προαναφερόμενοι τύποι συνδετήριων διατομών ακολουθούν τη φιλοσοφία σχεδιασμού των τυπικών διατομών, όπως περιγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο.

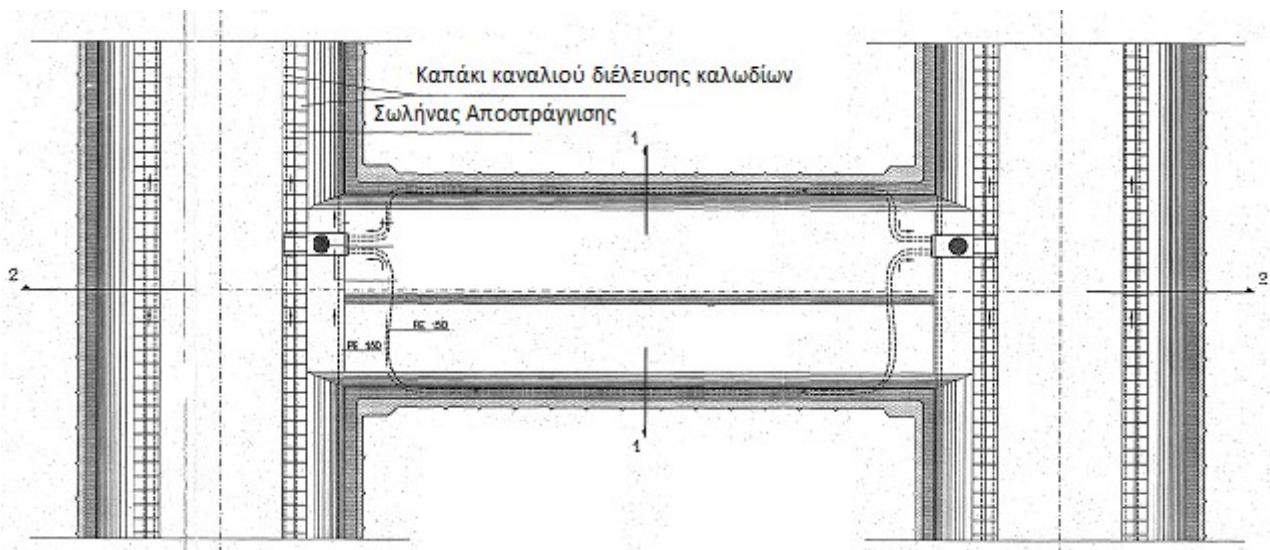
Στη συνέχεια παρουσιάζονται σχέδια των προαναφερθεισών διατομών ώστε ο αναγνώστης μία πιο σαφή εικόνα.



Σχήμα 3.3: Τυπικές διατομές σήραγγας Καλλιδρόμου, (a) με κλειστό και (b) με ανοικτό ανεστραμμένο θόλο αντίστοιχα [6]



Σχήμα 3.4: Τυπική διατομή των δύο σηράγγων στη συνδετήρια στοά - Τύπου DB [18]



Σχήμα 3.5: Κάτοψη συνδετήριας σήραγγας [18]

3.5. Εκσκαφή και μέτρα Υποστήριξης στη σήραγγα Καλλιδρόμου.

Στο συγκεκριμένο έργο τα υπό μελέτη τμήματα της σήραγγας, στα οποία εστιάζει η παρούσα Διπλωματική Εργασία, έχουν διανοιχθεί με τη μέθοδο NATM. Ανάλογα με την ποιότητα της βραχομάζας προβλέπεται διάνοιξη είτε με ολομέτωπη εκσκαφή είτε με τμηματική. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, σε συνθήκες διάνοιξης του μετώπου σε περιοχές ασβεστόλιθου, η σήραγγα αποτελείται από ανοικτή διατομή, ενώ στις υπόλοιπες περιπτώσεις προβλέπεται κλειστή διατομή της σήραγγας. Τμήμα των εκσκαφών πραγματοποιήθηκε με συμβατικά μηχανικά μέσα ενώ όπου απαιτήθηκε, λόγω ποιότητας πετρωμάτων ή και ασύμφορου οικονομικού κόστους εκσκαφής με συμβατικά μηχανικά μέσα, πραγματοποιήθηκε εκσκαφή με χρήση εκρηκτικών μέσων.

3.5.1. Εκσκαφή μετώπου - NATM

Στόχος της μελέτης βάσει των αρχών της NATM είναι να εκμεταλλευτεί κανείς όσο είναι δυνατό την ικανότητα αυτοϋποστήριξης της βραχομάζας διαμέσου προσεκτικού και εμπειριστατωμένου ελέγχου των ασκούμενων δυνάμεων κατά την διαδικασία αναδιάρταξης αυτών. Η αναδιάρταξη - ανακατανομή των δυνάμεων λαμβάνει χώρα στην περιβάλλουσα βραχομάζα έπειτα από την πραγματοποίηση της εκσκαφής. Ακολούθως και σύμφωνα με τα παραπάνω υιοθετείται η κατάλληλη μέθοδος υποστήριξης.

Σκοπός της είναι η επίτευξη ενός τεχνικά υγιούς, ασφαλούς και οικονομικού σχεδιασμού της κατασκευής.

Η τυπική εφαρμογή της NATM περιλαμβάνει δύο ξεχωριστές επενδύσεις. Η πρώτη αποτελείται από μία αρχική επένδυση ή υποστήριξη χρησιμοποιώντας εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, αγκύρια και άλλα επιβοηθητικά στοιχεία που εφαρμόζονται μετά την διάνοιξη. Η υποστήριξη σε πρώτη φάση παρέχει ασφάλεια και σταθερότητα κατά την διάρκεια της κατασκευής της σήραγγας.

Η δεύτερη είναι η μόνιμη επένδυση που παρέχει τον απαιτούμενο συντελεστή ασφαλείας του συστήματος επένδυσης της σήραγγας, και δίνει μία ομοιόμορφη εσωτερική επιφάνεια. Η συμπεριφορά της υποστήριξης καθώς και της περιβάλλουσας βραχομάζας κατά την διάρκεια της αναδιάρταξης των δυνάμεων μετά την διάνοιξη, ελέγχεται από ένα καλά σχεδιασμένο σύστημα οργάνων μέτρησης. Η μέτρηση των παραμορφώσεων αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα της NATM και είναι απαραίτητη όχι μόνο για λόγους ασφαλείας αλλά και για επαλήθευση των κατασκευαστικών παραδοχών, πριν από την εγκατάσταση της μόνιμης επένδυσης.



Εικόνα 3.2: Βόρειο μέτωπο - Α φάση (Ασβεστόλιθος)/ γόμωση για εκσκαφή με χρήση εκρηκτικών υλών [21]

Παρακάτω παρουσιάζονται φωτογραφίες απο το νότιο μέτωπο διάνοιξης σε αργιλικό σχηματισμό. Είναι εμφανής η τμηματική εκσκαφή που ακολουθήθηκε με τη μέθοδο NATM.



Εικόνα 3.3: Νότιο μέτωπο - Αργιλικός σχηματισμός, Άκαμπτη Υποστήριξη Α' Φάση [21]



Εικόνα 3.4: Νότιο μέτωπο - Αργιλικός σχηματισμός, Άκαμπτη Υποστήριξη Β' Φάση & Invert [21]

3.5.2. Μέτρα Υποστήριξης Διατομής

Με βάση τις μελέτες χρησιμοποιήθηκαν ενεργητικά και παθητικά μέτρα υποστήριξης της διατομής ώστε να επιτευχθεί η αυτουποστήριξη της βραχομάζας, η πρόληψη εκτεταμένων παραμορφώσεων αλλά και η ελάχιστη πρόκληση διαταράξεων στον περιβάλλοντα χώρο της κατασκευής. Περιληπτικά, μέτρα υποστήριξης τα οποία χρησιμοποιήθηκαν αποτελούν τα αγκύρια, οι χαλύβδινες δοκοί, η χρήση εκτοξευμένου σκυροδέματος. Σε θέσεις κατά τις οποίες απαιτήθηκε, λόγω ποιότητας της βραχομάζας, πραγματοποιήθηκε επιπλέον προσωρινή στήριξη μετώπου, αλλά και πρόσθετα μέτρα υποστήριξης όπως ηλώσεις και σωλήνες προπορείας (forepolling). Κατά θέσεις έχει πραγματοποιηθεί ελεγχόμενης παραμόρφωσης υποστήριξη για τη παραλαβή συγκλίσεων. Με βάση την [19] έχει προβλεφτεί χρονοδιάγραμμα εκσκαφών το οποίο υπαγορεύει την ταυτόχρονη διάνοιξη της σήραγγας σε 4 μέτωπα. Οι δύο κλάδοι της σήραγγας διανοίγονται από το Βόρειο και Νότιο μέτωπο αυτής ταυτόχρονα. Αρχικώς διανοίγονται και υποστηρίζονται, εκ νέου, μέρος των ήδη διανοιχθέντων τμημάτων με τα οποία είχαν παραμείνει με προσωρινή υποστήριξη ή τμήματα τα οποία για λόγους ασφαλείας είχαν επανεπικωθεί. Η κατασκευή της επένδυσης γίνεται παράλληλα με τη διάνοιξη και υποστήριξη της σήραγγας και η μεταφορά των προϊόντων εκσκαφής καθώς και των υλικών και μηχανημάτων πραγματοποιείται μέσω των εγκαρσίων συνδετήριων σηράγγων.

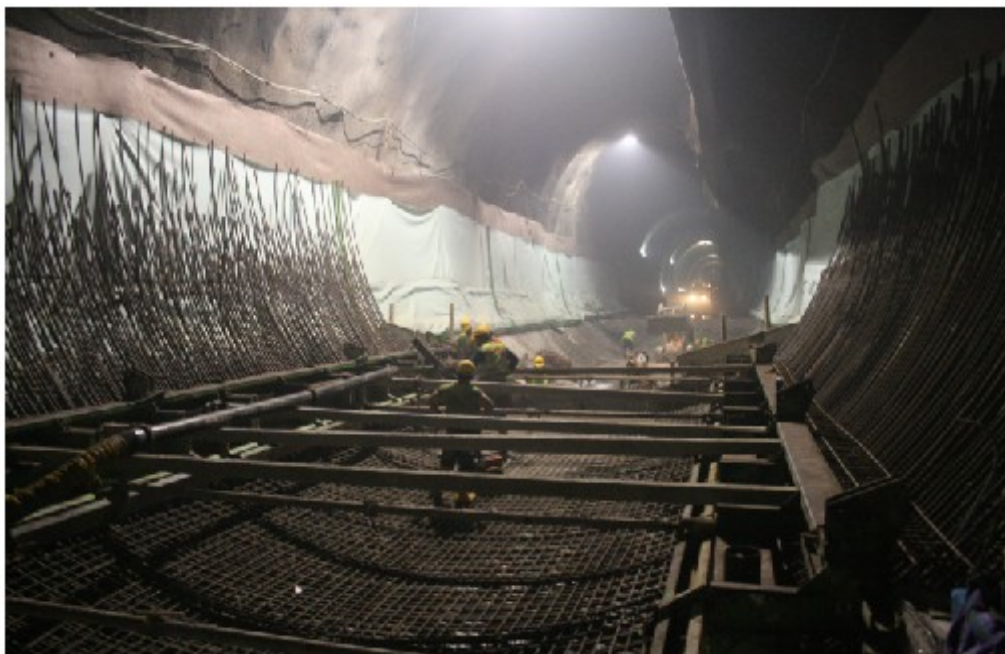


Εικόνα 3.5: Νότιο μέτωπο - Αργιλικός σχηματισμός, Άκαμπτη Υποστήριξη - Οπλισμοί [21]

Στα κεντρικά τμήματα της σήραγγας πραγματοποιήθηκαν προπορευόμενες διερευνητικές γεωτρήσεις με σκοπό τον εντοπισμό των ζωνών με πολύ χαμηλή αντοχή της βραχομάζας. Κατά τη διάρκεια της κατασκευής, έχει προβλεφθεί η λειτουργία εκτεταμένου προγράμματος παρακολούθησης σε συνδυασμό με ανάστροφες αναλύσεις από τον Κύριο του Έργου, με στόχο τη δημιουργία μιας ολοκληρωμένης βάσης δεδομένων για την ορθή επιλογή των κατάλληλων μεθόδων εκσκαφής και υποστήριξης. Το πρόγραμμα παρακολούθησης περιλαμβάνει μετρήσεις συγκλίσεων, μετρήσεις επιμηκύνσεων, αντοχής

αγκυρίων (anchor load cells) και μετρήσεις τάσεων. Ταυτόχρονα θα πραγματοποιούνται μετρήσεις της στάθμης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα στις διατηρούμενες υπάρχουσες γεωτρήσεις σε όλη τη διάρκεια της κατασκευής.

Μετά τη διάνοιξη της σήραγγας ολοκληρώθηκαν οι εναπομείνουσες εργασίες όπως εγκατάσταση αγωγών αποχέτευσης, καλωδιώσεων κλπ. Στις εισόδους και εξόδους των σηράγγων έχουν προβλεφθεί τεχνικά αεροδυναμικής προστασίας μήκους 12,50m έκαστο, που εξυπηρετούν τη σταδιακή διαφοροποίηση της πίεσης του αέρα γύρω από τους συρμούς κατά την είσοδο και έξοδο τους από τις σήραγγες λόγω μεγάλων ταχυτήτων.



Εικόνα 3.6: Κατασκευή Invert μόνιμης επένδυσης [21]



Εικόνα 3.7: Μόνιμη επένδυση [21]

Κεφάλαιο 4

Προβλήματα κατά την κατασκευή του έργου

Στο παρόν κεφάλαιο πρόκειται να παρουσιασθούν προβλήματα κατά την κατασκευή του έργου που προέκυψαν στις περιοχές του οφιολιθικού συμπλέγματος (ορη) και του σχιστώδη σερπεντινίτη (se.s), πέτρωμα το οποίο ανήκει στο οφιολιθικό σύμπλεγμα . Ο προαναφερθείς γεωλογικός σχηματισμός (se.s) εντοπίζεται σε τμήματα της σήραγγας που βρίσκονται κάτω από τον κύριο ορεινό όγκο του όρους Καλλιδρόμου αλλά και στο βόρειο μέτωπο. Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, στον κύριο όγκο της σήραγγας παρουσιάζεται μεγάλη ανομοιομορφία στις εδαφικές παραμέτρους και ,επιπλέον, το ύψος των υπερκειμένων ποικίλει μεταξύ 300 και 530 μέτρα. Αναλύσεις ευστάθειας διατομής και ανάστροφες αναλύσεις είχαν προηγηθεί στο βόρειο μέτωπο της σήραγγας σε οφιολιθικό σχηματισμό.

Αρχικά, αφιερώνεται εδάφιο σχετικά με τμήμα αναλύσεων που έλαβε χώρα στο βόρειο μέτωπο της σήραγγας.

Στη συνέχεια, ακολουθεί περιγραφή των προβλημάτων που προέκυψαν στο κύριο τμήμα της σήραγγας καθώς και τρόποι αντιμετώπισης τους.

4.1. Βόρειο Μέτωπο - Κατασκευή

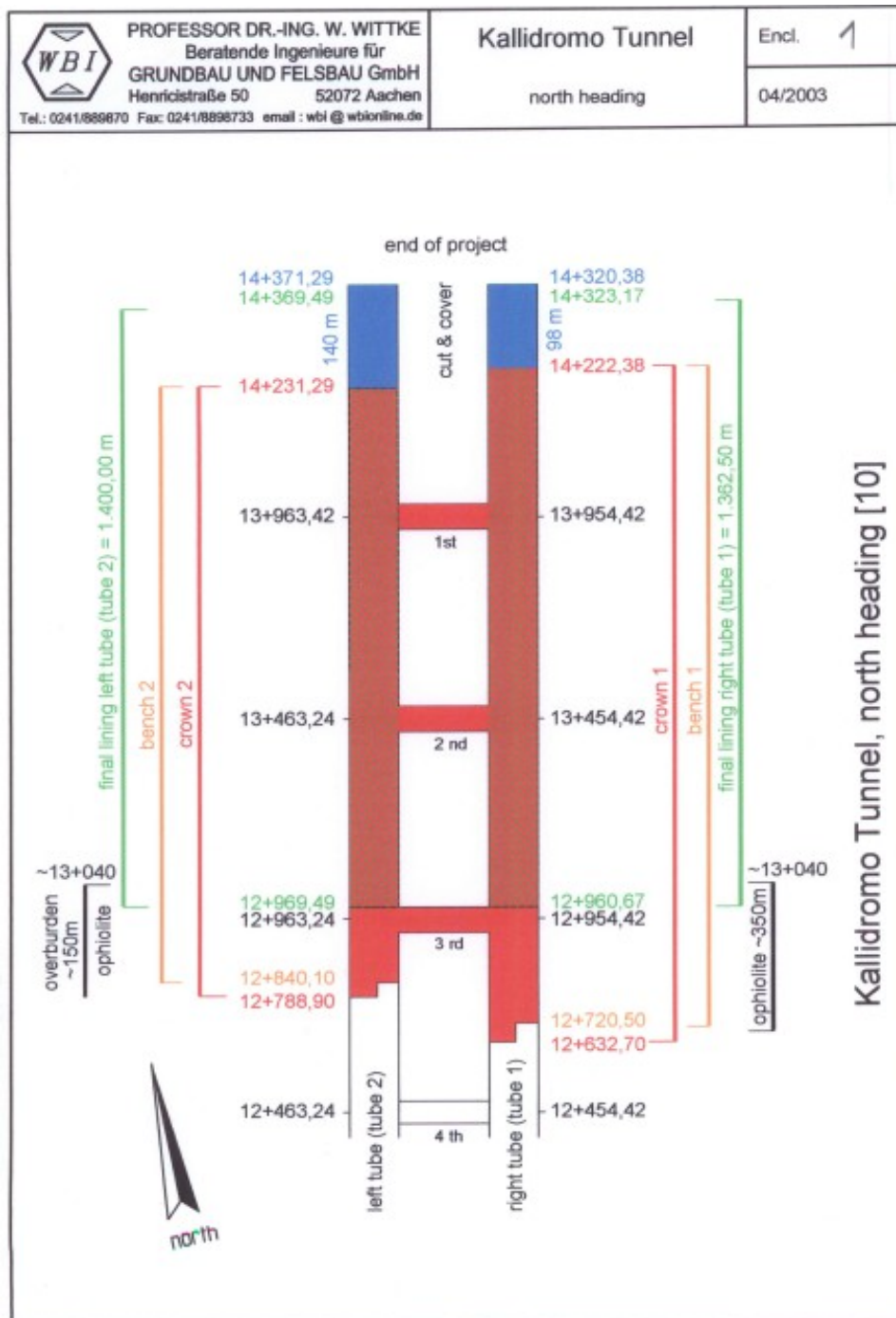
Στη παρούσα παράγραφο, όπως αναφέρθηκε, μελετώνται τα τμήματα της σήραγγας τα οποία βρίσκονται σε σχηματισμό οφιόλιθου στο Βόρειο μέτωπο. Έχουν παρουσιασθεί συγκλίσεις κατά τμήματα για τις οποίες χρειάστηκε ενίσχυση των μέτρων υποστήριξης κατά θέσεις.

Η σωστή και ασφαλής υποστήριξη - τελική επένδυση των συγκεκριμένων τμημάτων, άλλα και η εξαγωγή γεωτεχνικών παραμέτρων μέσω της ανάστροφης ανάλυσης αποτέλεσε καίριο σημείο της μελέτης, καθώς μεγάλο κεντρικό τμήμα της σήραγγας βρίσκεται σε περιοχή οφιολιθικών σχηματισμών με μεγάλο ύψος υπερκειμένων σχηματισμών (~530μ). Επιπλέον μέσω της διαδικασίας αντίστροφης ανάλυσης μελετήθηκε η διαπλάτυνση τμημάτων που ήδη είχαν εκσκαφτεί στον οφιολιθικό σχηματισμό του βορείου μετώπου.

- Γενικά στοιχεία

Με βάση την τεχνική έκθεση οριστικής μελέτης της σήραγγας Καλλιδρόμου [18], μετακινούμενοι από την βορινή είσοδο προς το νότο είχαν ήδη σκαφτεί περίπου 1500μ όταν εμφανίσθηκαν προβλήματα ρωγμών και συγκλίσεων στην υποστήριξη. Οι δυο σήραγγες εκσκάφτηκαν με τη μέθοδο NATM.

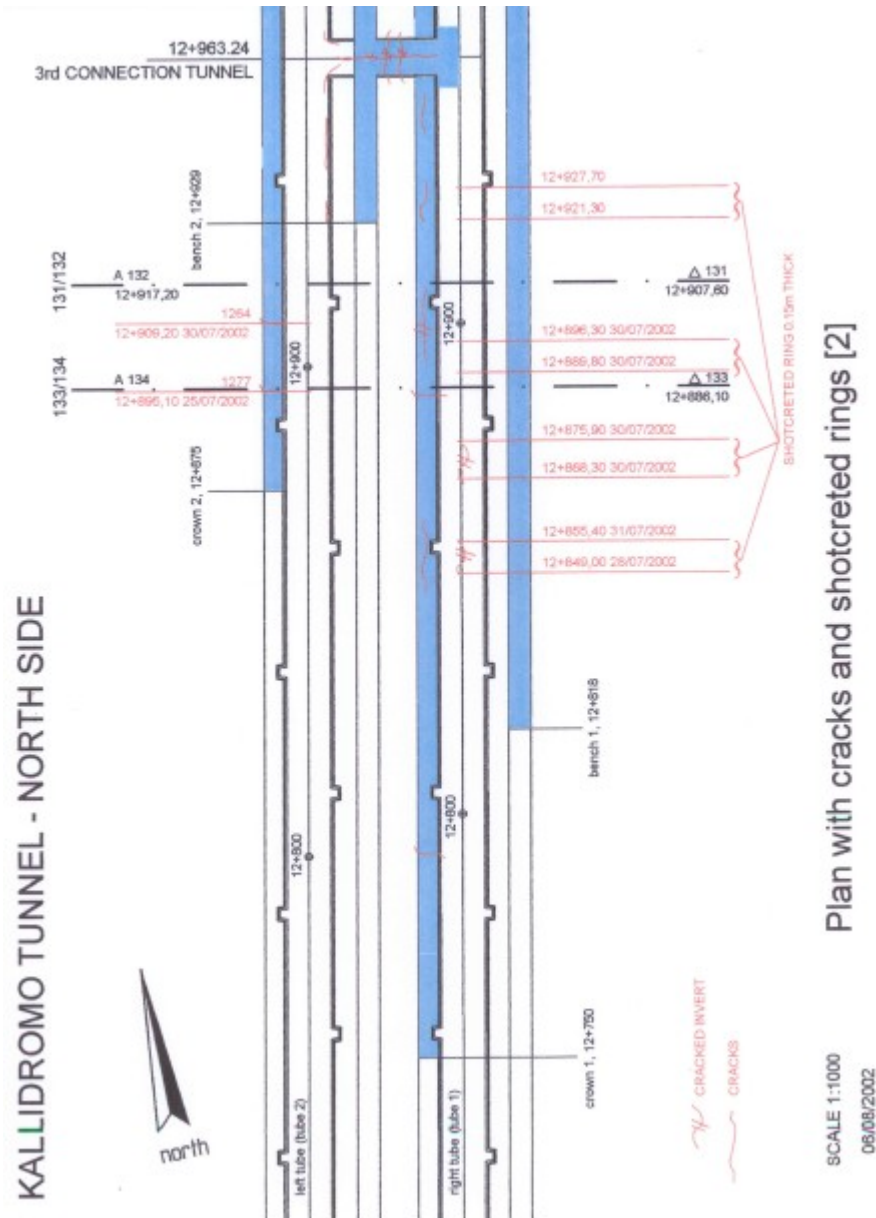
Παρακάτω δίνεται κάτοψη του βόρειου τμήματος. Η περιοχή ενδιαφέροντος στη συγκεκριμένη παράγραφο ορίζεται από τη Χ.Θ +13.040 και νότια όπου εντοπίζεται ο σχηματισμός οφιόλιθου με ύψος υπερκειμένων περίπου 150μ.



Σχήμα 4.1: Κάτοψη Βόρειου τμήματος [18]

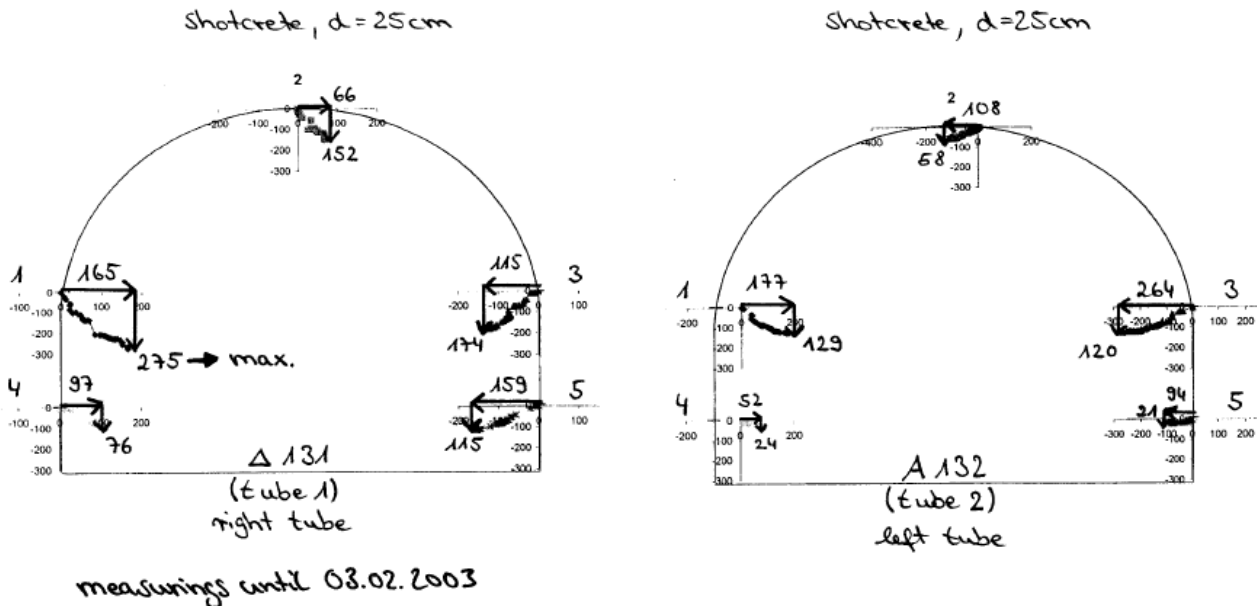
Και στις δύο σήραγγες πραγματοποιήθηκε εκσκαφή θόλου χωρίς προσωρινό αντίστροφο θόλο. Η εκσκαφή του θόλου ακολουθήθηκε από εκσκαφή παρειάς και ανάστροφου θόλου. Μετακινούμενοι προς το βορινό τμήμα των σηράγγων από τις Χ.Θ 12+772,4 (δεξιά σήραγγα) και Χ.Θ. 12+875,8 (αριστερή σήραγγα) αντίστοιχα, παρατηρούμε ότι η υποστήριξη είχε κατασκευαστεί από μανδύα εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 25cm και αγκύρια μήκους 6 έως 8m. Νότια των παραπάνω Χ.Θ., οι σήραγγες διανοίχθηκαν και αντιστηρίχθηκαν από μανδύα εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 35cm και αγκύρια μήκους 6 έως 9m.

Σχετικά με την παρακολούθηση των συγκλίσεων είχαν τοποθετηθεί ανά 10m περίπου σε κάθε διατομή 5 σημεία - σταθμοί μέτρησης των συγκλίσεων της διατομής. Νότια της τρίτης συνδετήριας σήραγγας κατά τη διάρκεια εκσκαφής στον οφιολίθο μετρήθηκαν μετακινήσεις μέχρι και 28cm. Επιπλέον κατά θέσεις Νότια της τρίτης συνδετήριας σήραγγας παρουσιάστηκαν μεγάλες μετακινήσεις, ζημιές και ρωγμές στην προσωρινή υποστήριξη. Παρακάτω παρατίθεται σκαρίφημα στο οποίο σημειώνονται οι περιοχές με τα παρουσιασθέντα προβλήματα.



Σχήμα 4.2: Κάτοψη Βόρειου τμήματος με τα παρουσιασθέντα προβλήματα κατά την κατασκευή [18]

Στη συγκεκριμένη παράγραφο παρουσιάζονται οι μετακινήσεις που ελήφθησαν σε δεδομένες διατομές- σταθμούς μέτρησης. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως οι μετακινήσεις των τοιχωμάτων της σήραγγας έχουν μετρηθεί σε 5 σημεία της διατομής. Παρακάτω παρατίθεται οι μετρήσεις που ελήφθησαν από τις διατομές μετρήσεων 131/132 στις 03.02.2003.



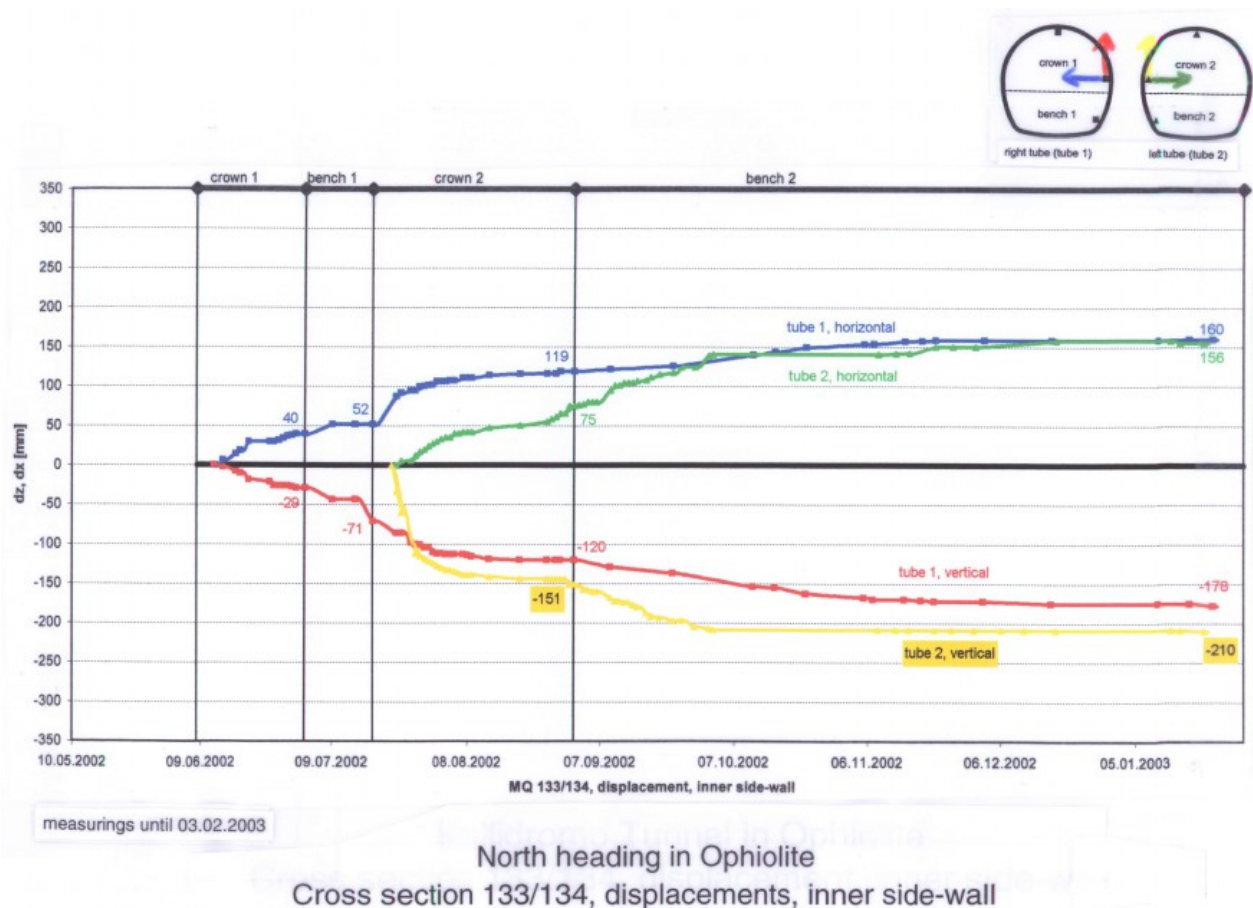
North heading in Ophiolite
Cross section 131/132 with measurements

Σχήμα 4.3: Βόρειο μέτωπο σε οφιολιθικό σχηματισμό - Εγκάρσια τομή σταθμών 131/132 με μετρήσεις [18]

Αντίστοιχες μετρήσεις έχουν ληφθεί στις διατομές μετρήσεων 128/129 έως 134/135. Η τεχνική μελέτη που εκπονήθηκε λόγω της δεδομένης κατάστασης στο Βόρειο μέτωπο της σήραγγας στοιχειοθετώντας όλες τις μετρήσεις στις διατομές - σταθμούς από τα όργανα παρακολούθησης κατέληξε στα εξής συμπεράσματα:

- Οι μετρημένες μετακινήσεις είναι συγκριτικά ανομοιογενείς.
- Στην κατακόρυφη διεύθυνση παρατηρήθηκαν μονάχα καθιζήσεις.
- Οι μετρημένες μετακινήσεις στα πλευρικά τοιχώματα σε οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση είναι ίδιας τάξης μεγέθους.

Παρατηρήθηκε επιπλέον, από το μελετητή, πως οι μετακινήσεις στη προπορευόμενη δεξιά σήραγγα, σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις, αυξανόντουσαν αξιοσημείωτα εξαιτίας της εκσκαφής της δεύτερης σήραγγας (αριστερή σήραγγα).



Σχήμα 4.4: Βόρειο μέτωπο σε οφιολιθικό σχηματισμό - Εγκάρσια τομή σταθμών 131/132 με μετακινήσεις εσωτερικής επένδυσης [18]

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε πως η εκσκαφή του θόλου της αριστερής σήραγγας στη διατομή μετρήσεων 133/134 οδήγησε σε μια αύξηση των οριζόντιων μετακινήσεων του πλευρικού τοιχώματος της δεξιάς σήραγγας από 52 mm έως 119 mm. Το κύριο ποσοστό των μετακινήσεων είναι αποτέλεσμα της εκσκαφής του θόλου. Επιπλέον, η εκσκαφή που ακολούθησε, την αντίστοιχη, εκσκαφή της παρειάς και του ανάστροφου θόλου της δεύτερης σήραγγας επίσης προκάλεσε αύξηση των μετακινήσεων, ωστόσο, η αύξηση ανά μονάδα χρόνου είναι συγκριτικά μικρή. Οι μετακινήσεις σταματήσανε 4 μήνες μετά την εκσκαφή της παρειάς και του ανάστροφου θόλου της δεύτερης σήραγγας .

Παρατηρήθηκε αστοχία του εδαφικού τμήματος μεταξύ των δυο παράλληλων σηράγγων με τοπικές αστοχίες του μανδύα εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

- Διατομές που ελήφθησαν υπόψη

Για την πραγματοποίηση των ανάστροφων αναλύσεων, ελήφθησαν υπόψη οι διατομές μετρήσεων 131/132 και 133/134, στις οποίες μετρήθηκαν συγκριτικά μεγάλες μετακινήσεις. Για τις αναλύσεις στις συγκεκριμένες διατομές θεωρήθηκε ότι ισχύει προσεγγιστικά δισδιάστατη εντατική κατάσταση. Η θεώρηση αυτή λήφθηκε από τον μελετητή, λόγω του ότι η απόσταση των διατομών από την τρίτη συνδετήρια σήραγγα είναι μεγαλύτερη από 40 m, και καταλήγει στο συμπέρασμα πως δεν αναμένεται καμιά

σημαντική επίδραση της συνδετήριας σήραγγας στην εντατική κατάσταση στην περιοχή των διατομών μετρήσεων.

- Αποτελέσματα Αντίστροφης Ανάλυσης.

Για την πραγματοποίηση ανάστροφων αναλύσεων ο μελετητής επέλεξε ένα ευρύ φάσμα παραμέτρων υπολογισμού. Χαρακτηριστικά αναφέρουμε πως για τις εξεταζόμενες περιπτώσεις λήφθηκε υπόψιν η συμπεριφορά του σκυροδέματος (ελαστική ή ρευστοπλαστική), το πάχος του μανδύα εκτοξευόμενου σκυροδέματος (25cm ή 35cm αντίστοιχα) ακόμη και επιλογή του αν θα προσομοιωθεί η εκσκαφή της 2ης σήραγγας .

Οι διδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων που ακολούθησαν οδήγησαν στο παρακάτω κατά προσέγγιση σύνολο παραμέτρων για τον οφιόλιθο στην περιοχή νότια από την τρίτη συνδετήρια σήραγγα:

- $E = 2000 \text{ MN/m}^2$,
- $\nu = 0.3$,
- $\sigma_u = 0,6 \text{ MN/m}^2$,
- $\Phi = 22^\circ$,
- $c = 0,2 \text{ MN/m}^2$

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η αντίστροφη ανάλυση των μετακινήσεων που μετρήθηκαν στα τμήματα της σήραγγας που βρίσκονται σε οφιόλιθο στο βόρειο μέτωπο διάνοιξης αποτέλεσε σημαντικό υπόβαθρο για τη μελέτη:

- της εκσκαφής και της υποστήριξης των υπολειπομένων τμημάτων σε οφιόλιθο, στο βόρειο μέτωπο διάνοιξης, και
- της διαπλάτυνσης των τμημάτων που έχουν ήδη σκαφτεί στον οφιόλιθο στο βόρειο μέτωπο διάνοιξης.

Γι' αυτά τα τμήματα της σήραγγας έχει μελετηθεί άκαμπτη υποστήριξη.

Επιπλέον, οι παραπάνω γεωτεχνικές παράμετροι αποτέλεσαν μία πρώτη βάση για την εκτίμηση των γεωτεχνικών παραμέτρων του οφιόλιθου στο κεντρικό τμήμα της σήραγγας η οποία αργότερα ανασχηματίστηκε λόγω των νέων αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την γεωλογική και γεωτεχνική έρευνα.

Κατά τόπους απαιτήθηκαν ενέργειες για την αποκατάσταση των προβλημάτων στο βόρειο μέτωπο στην περιοχή του οφιόλιθου. Χαρακτηριστικά αναφέρουμε ότι σε συγκεκριμένες περιοχές απαιτήθηκε ενίσχυση της υποστήριξης του θόλου με εκτοξευμένο σκυρόδεμα και οπλισμό και πρόσθετα πλαίσια και αγκύρια κοπτικής κεφαλής στα τοιχώματα.

4.2. Κεντρικό Τμήμα σήραγγας - Περιοχές Σχιστώδους Σερπεντινίτη

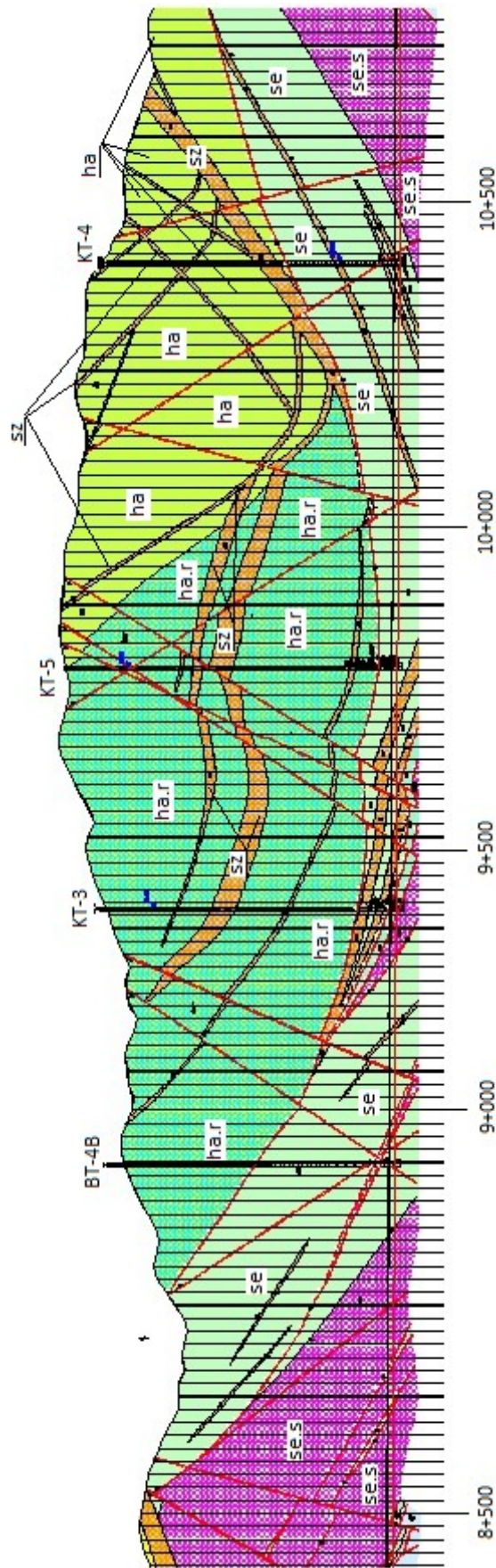
Στη συγκεκριμένη παράγραφο μελετώνται προβλήματα που δημιουργήθηκαν κατά τη διάνοιξη του μετώπου της σήραγγας στις Χ.Θ. 8+500 (Νότιο Μέτωπο) και Χ.Θ. 10+900 (Βόρειο Μέτωπο) αντίστοιχα. Οι προαναφερθείσες περιοχές ανήκουν στο κεντρικό τμήμα της σήραγγας του Καλλιδρόμου το οποίο εκτείνεται (δεξιός κλάδος) μεταξύ των ΧΘ. 8+395 και 10+900 και βρίσκονται σε στρώματα οφιολιθικού συμπλέγματος. Ποικίλοι σχηματισμοί συναντήθηκαν κατά τη διάνοιξη του κεντρικού τμήματος της σήραγγας όπως σερπεντινίτης (se) σχιστώδης σερπεντινίτης (se.s) ενώ παρεμβάλλονται και ζώνες διάτμησης (sz). Ο υπόψη γεωλογικός σχηματισμός που συνάντησε η χάραξη της σήραγγας στις υπό μελέτη Χ.Θ. 8+500 (Νότιο Μέτωπο) και Χ.Θ. 10+900 (Βόρειο Μέτωπο) είναι σχιστώδης σερπεντινίτης (se.s). Το ύψος των υπερκειμένων σχηματισμών στον σχιστώδη σερπεντινίτη (se.s) κυμαίνεται μεταξύ 310μ και 420μ.

Πρώτου το μέτωπο της σήραγγας συναντήσει τις περιοχές σχιστώδους σερπεντινίτη, η χάραξη της είχε συναντήσει προηγουμένως ασβεστόλιθο και η διάνοιξη πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις απαιτήσεις της μελέτης χωρίς σημαντικά προβλήματα.

Κατά τη διάνοιξη των συγκεκριμένων μετώπων παρουσιάσθηκαν ποικίλες αστοχίες στις διατομές της σήραγγας οι οποίες οφείλονται στις δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες της περιοχής και απαιτήθηκε η τροποποίηση της οριστικής μελέτης [23] & [24]. Παρατηρήθηκαν πολύ μεγάλες και χρονικά εξελισσόμενες συγκλίσεις της διατομής με συνέπεια την αστοχία του κελύφους του εκτοξευμένου σκυροδέματος και την ανάγκη διαρκούς αύξησης του πάχους του σε μεγέθη που φτάνουν τα 100cm του μέτρου.



Εικόνα 4.1: Νότιο Μέτωπο - Σχιστώδης Σερπεντινίτης. Αστοχία προσωρινής υποστήριξης λόγω συγκλίσεων [21]



Σχήμα 4.5: Γεωλογική τομή σήραγγας Καλλιτρόμου (Δεξιός Κλάδος) - Κεντρικό Τμήμα Σήραγγας [17]

α) Γενικά Στοιχεία

Βάσει της οριστικής μελέτης της σήραγγας του Καλλιδρόμου [18] η οποία εκπονήθηκε στις 29.04.04, ο σχιστώδης σερπεντινίτης (se.s), όπως και ο σερπεντινίτης (se), παρουσιάζει ευρεία ποικιλία βραχομηχανικών χαρακτηριστικών. Όπως προαναφέρθηκε, κατά τη διάνοιξη των μετώπων στις αρχές Φεβρουαρίου του 2009 στις Χ.Θ. 8+500 και 10+900 παρουσιάστηκαν σημαντικά προβλήματα κατά την κατασκευή. Η πολυπλοκότητα των γεωλογικών σχηματισμών ήταν αναμενόμενη και αντιμετωπίστηκε με σύνταξη μεγάλου αριθμού σπραγγολογικών κλάσεων αλλά και απαίτηση για παρακολούθηση κατά την κατασκευή.

Αναφέρεται βάσει της [18] ότι ο se.s παρουσιάζει χαρακτηριστική σχιστότητα με περιορισμένη διατμητική αντοχή, η οποία αποτελεί την επικρατούσα ασυνέχεια, με αποτέλεσμα την ανισότροπη αντοχή και παραμορφωσιμότητα του se.s. Η σχιστότητα προσπίπτει κάθετα στον άξονα της σήραγγας, ωστόσο, συμβαίνουν τοπικές μεταβολές που έχουν σαν αποτέλεσμα να παρουσιαστεί το ενδεχόμενο να συναντήσει τον άξονα διαγώνια. Στο νότο, η σχιστότητα βυθίζεται προς βορρά. Στο βορρά, η σχιστότητα βυθίζεται προς το νότο. Η γωνία βύθισης κυμαίνεται μεταξύ 30° και 45°. Παράλληλα με τη διεύθυνση της βύθισης, παρατηρούνται επιφάνειες ολίσθησης. Επιπλέον, παρατηρούνται ορθογώνιες ομάδες διακλάσεων από τις οποίες όμως, οι περισσότερες έχουν περιορισμένη έκταση γι' αυτό και αυτή είναι μικρής σημασίας για τη διάνοιξη σήραγγας. Οι χαρακτηριστικές ιδιότητες του σχιστώδη σερπεντινίτη (se.s) κατά θέσεις ποικίλουν. Παρατηρήθηκαν τμήματα με χαμηλή και αλλά με υψηλότερη αντοχή. Σημειώνεται πως, η οριστική μελέτη του 2004 έδινε τα αποτελέσματα των ελέγχων της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής να κυμαίνονται από 0 έως 24 MN/m² και μέχρι 50 MN/m² σε ιδιαίτερες περιπτώσεις.



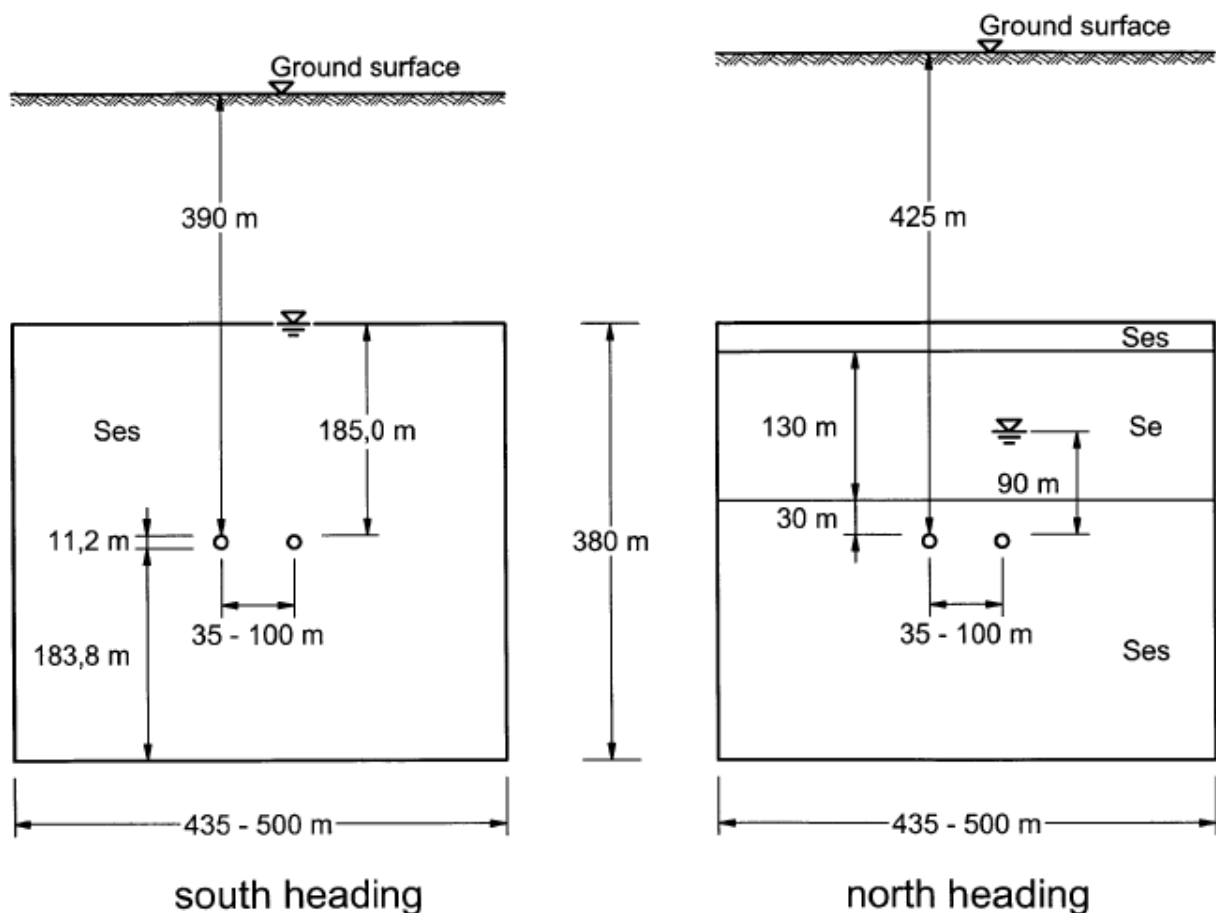
Εικόνα 4.2: Σχιστώδης Σερπεντινίτης (se.s) & Σερπεντινίτης (se) όπως λήφθηκε από τη γεώτρηση KT-3 σε βάθος 425,70 - 430,85 μέτρα [17]

Η στάθμη του Υδροφόρου Ορίζοντα στο κεντρικό τμήμα της σήραγγας απασχόλησε ιδιαίτερωσ το μελετητή. Αναφέρεται πως επάνω από τον se και se.s, αναμένεται ο χαρτζβουργίτης να βρίσκεται σε μία "λεκάνη". Αυτό το πέτρωμα έχει υψηλότερη μονοαξονική θλιπτική αντοχή και καλύτερες ιδιότητες. Ωστόσο, σύμφωνα με τα αποτελέσματα των γεωλογικών διερευνήσεων γίνεται η υπόθεση ότι το στρώμα αυτό δεν φτάνει μέχρι την σήραγγα.

Η διαπερατότητα του se.s και se αναμένεται να είναι χαμηλή της τάξης των 10^{-7} m/s. Για το χαρτζβουργίτη, ο οποίος στο κεντρικό τμήμα ΧΘ 9+300 και 10+300 βρίσκεται μόνο μερικές δεκάδες μέτρα πάνω από τη στέψη της σήραγγας, αναμένεται αρκετά μεγαλύτερη διαπερατότητα της τάξης των 10^{-5} με 10^{-6} m/s.

Ο υδροφόρος ορίζοντας στο χαρτζβουργίτη μετρήθηκε σε δύο γεωτρήσεις, όπου βρίσκεται περίπου 350 με 400 m πάνω από τη στέψη της σήραγγας. Επειδή οι ρηγματωμένες ζώνες είναι πιθανό να παρουσιάσουν μεγαλύτερη διαπερατότητα από τη γύρω βραχώμαζα, μπορεί να οδηγήσουν τα νερά του διαπερατού χαρτζβουργίτη στη σήραγγα μετά την εκσκαφή. Για τον λόγο αυτό, μεγαλύτερη εισροή υδάτων μπορεί να προκύψει όταν αυτές οι ρηγματωμένες ζώνες διασταυρωθούν με τη σήραγγα.

Στις παρακείμενες υπό μελέτη περιοχές στη βόρεια και νότια πλευρά (Χ.Θ. 8+500 και Χ.Θ. 10+900 αντίστοιχα), ο υδροφόρος ορίζοντας αναμένεται να είναι χαμηλότερος, αλλά και πάλι πολύ πιο πάνω από την σήραγγα. Επίσης εδώ, κάποια αύξηση στη διηθούμενη ροή πιθανώς προκύπτει όποτε οι ρηγματωμένες ζώνες διασταυρώνονται κατά τη διάρκεια της διάνοιξης των σηράγγων.

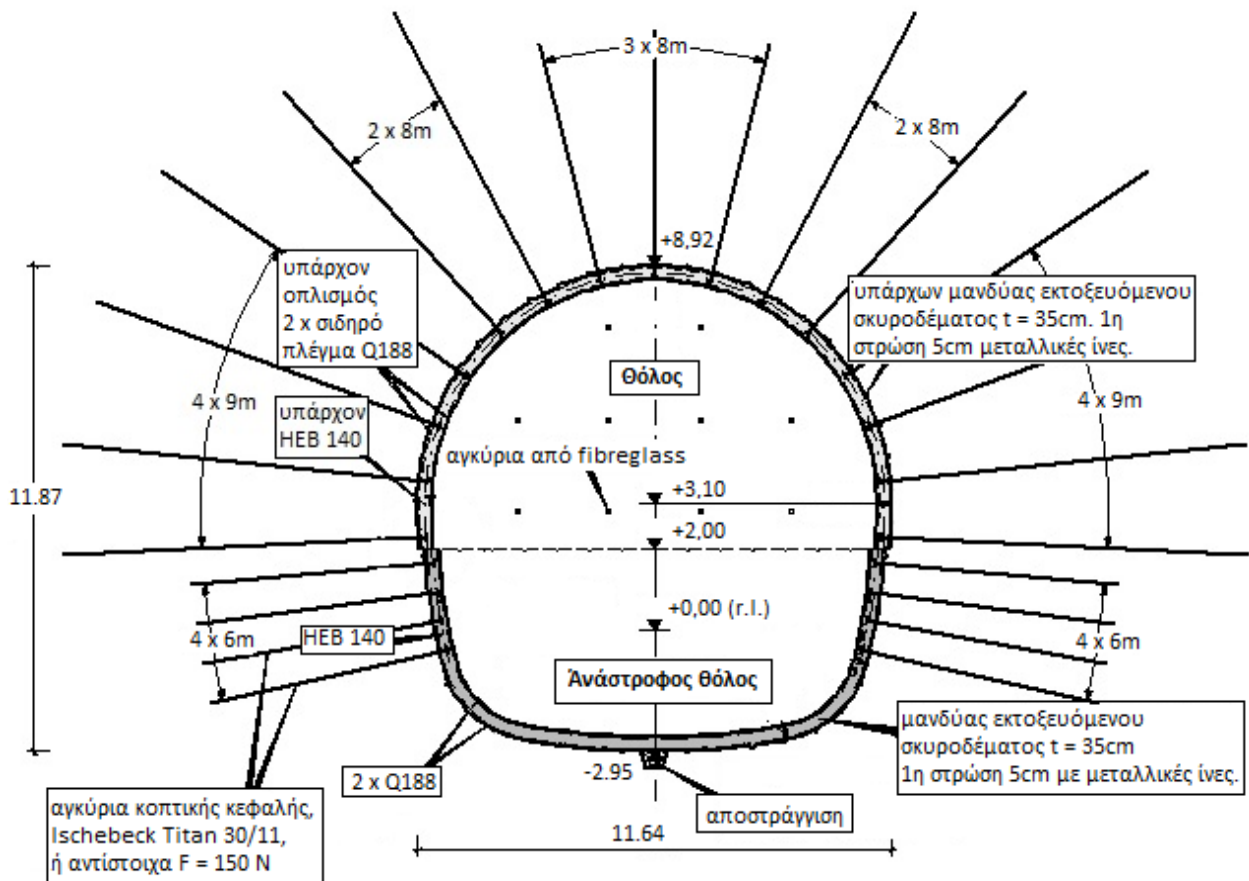


Σχήμα 4.6: Σχιστώδης Σερπεντινίτης (se.s), μέγιστο υπερκείμενο και στάθμη υδροφόρου ορίζοντα στο βόρειο και νότιο μέτωπο [18]

b) Αντιστήριξη στις υπό μελέτη Χ.Θ. και προβλήματα που προέκυψαν

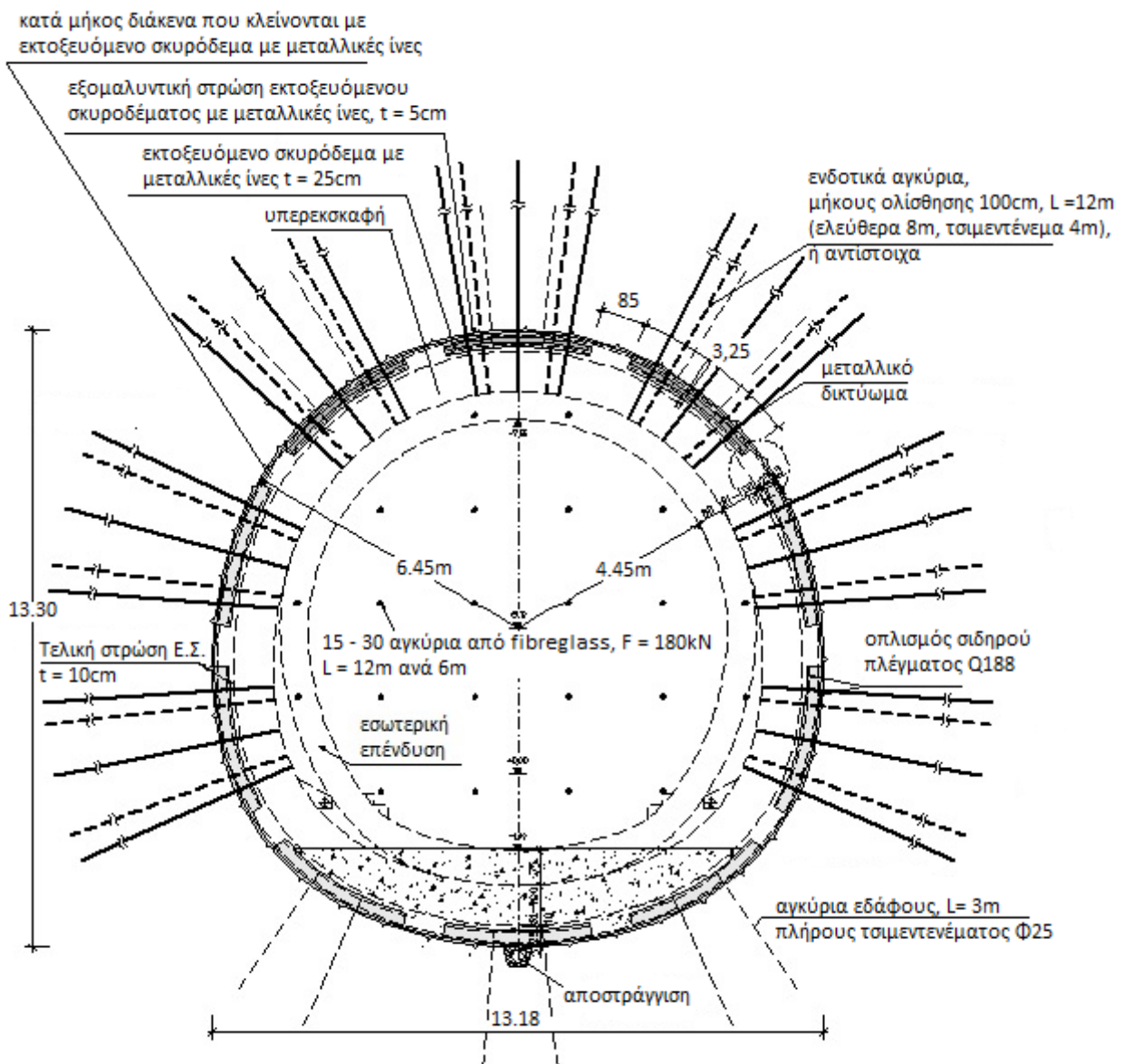
Η διάνοιξη και υποστήριξη της σήραγγας εντός της περιοχής τους σχιστώδους σερπεντινίτη βάσει της οριστικής μελέτης, σύμφωνα με την οποία δημοπρατήθηκε το έργο, προέβλεπε δυο κατηγορίες :

- Διατομές άκαμπτης υποστήριξης (stiff support): Ο συγκεκριμένος τύπος υποστήριξης προβλεπόταν να χρησιμοποιηθεί σε τμήματα της σήραγγας τα οποία αντιμετώπιζαν σχετικά ευνοϊκές συνθήκες διάνοιξης και αναμένονταν μικρές συγκλίσεις (Εκτιμώμενο ποσοστό χρήσης της συγκεκριμένης υποστήριξης: 60% στο βόρειο μέτωπο και 45% στο νότιο μέτωπο). Σημειώνεται πως στην οριστική μελέτη υπολογίσθηκαν αρκετοί τύποι άκαμπτης διατομής με διάφορα πάχη εκτοξευμένου σκυροδέματος (έως και 60cm), χρήση χαλύβδινων η δικτυωτών πλαισίων, αγκυρίων διαφόρων μηκών και λοιπών δομικών στοιχείων υποστήριξης. Βάση της τροποποιημένης μελέτης που συντάχθηκε σε μεταγενέστερο στάδιο λόγω των δυσμενών γεωτεχνικών συνθηκών, υπήρξαν βελτιώσεις στις προαναφερθείσες διατομές όπως λ.χ. διάνοιξη της διατομής σε 2 φάσεις, αύξηση πάχους του εκτοξευμένου σκυροδέματος (έως 100cm) αλλά και τροποποίηση του αριθμού και της διάταξης των αγκυρίων.

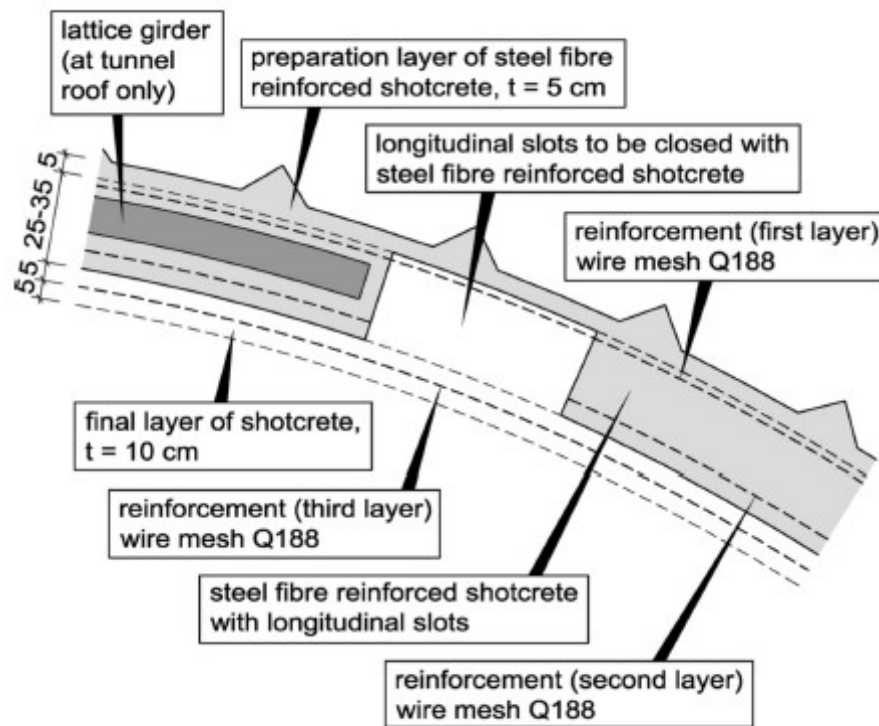


Σχήμα 4.7: Διατομή άκαμπτης υποστήριξης, εφαρμογή στην περιοχή του σερπεντινίτη (se) και σχιστώδη σερπεντινίτη (se.s) [18]

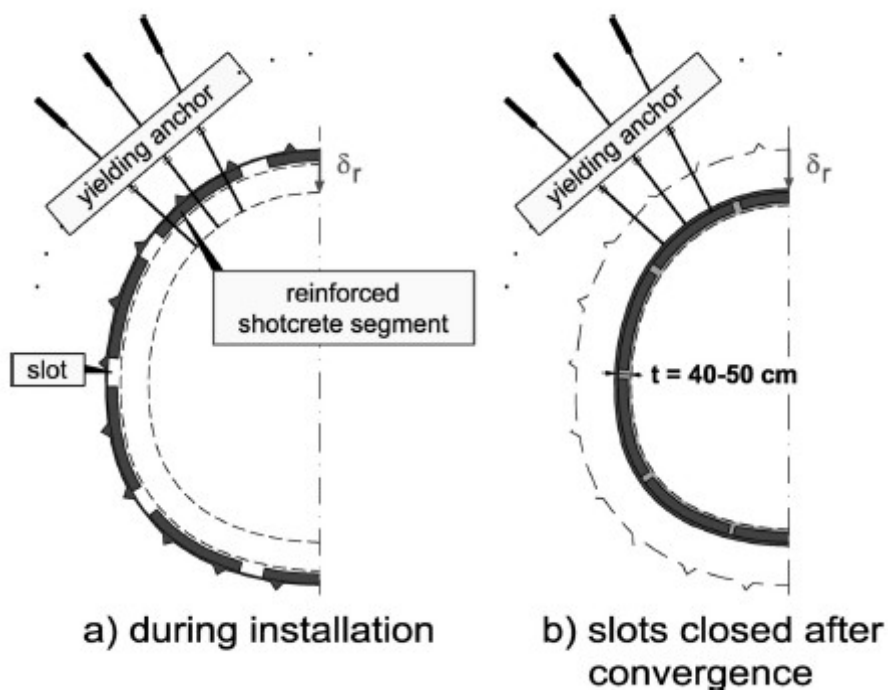
- Διατομή ελεγχόμενης παραμόρφωσης (yielding support): Ο συγκεκριμένος τύπος υποστήριξης προβλεπόταν να χρησιμοποιηθεί σε τμήματα της σήραγγας τα οποία παρουσίαζαν δυσμενείς συνθήκες διάνοιξης, πολύ κακής ποιότητας πέτρωμα και αναμένονταν μεγάλες συγκλίσεις (Εκτιμώμενο ποσοστό χρήσης της συγκεκριμένης υποστήριξης: 40% στο βόρειο μέτωπο και 55% στο νότιο μέτωπο). Δίδοντας μια περιγραφή της λειτουργίας της διατομής ελεγχόμενης παραμόρφωσης, προβλεπόταν βάσει της οριστικής μελέτης η κατασκευή διατομής με κατασκευή 10 κενών στον μανδύα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος (πλάτους έκαστου 50 cm) και χρήση ειδικών τύπου αγκυρίων ολίσθησης έτσι ώστε η σήραγγα να μπορεί να συγκλίνει μέχρι την επιθυμητή τιμή των 80 - 100 cm χωρίς να ρηγματωθεί ο μανδύας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Μετά το πέρας των συγκλίσεων προβλεπόταν η συμπλήρωση μανδύα εκτοξευόμενου σκυροδέματος (λόγω των περιμετρικών κενών) και η ολοκλήρωση της υποστήριξης της διατομής.



Σχήμα 4.8: Διατομή ελεγχόμενης παραμόρφωσης (ενδοτικού τύπου), εφαρμογή στην περιοχή του σερπεντινίτη (se) και σχιστώδη σερπεντινίτη (se.s) [18]



Σχήμα 4.9: Λεπτομέρεια υποστήριξης διατομής ενδοτικού τύπου [6]



Σχήμα 4.10: Διατομή ενδοτικού τύπου [6]

Δίδοντας το ιστορικό της μελέτης, ακολούθησε τροποποίηση της διατομής ελεγχόμενης παραμόρφωσης. Ο αριθμός των κενών μειώθηκε σε 4, προβλέφθηκαν συστοιχία μεταλλικών σωληνώσεων στη θέση των κενών, ώστε να υπάρξει καλύτερος ο έλεγχος της παραμόρφωσης του κελύφους του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Τέλος, τροποποιήθηκε ο αριθμός των παθητικών αγκυρίων τα οποία παρουσιάζουν την δυνατότητα ελεγχόμενης ολίσθησης της κεφαλής ώστε να υλοποιηθούν οι προβλεπόμενες συγκλίσεις του τοιχώματος χωρίς αστοχία της κεφαλής των αγκυρίων.



Εικόνα 4.3: Παράδειγμα κατασκευής της διατομής ενδοτικού τύπου στον αργιλικό σχηματισμό στο νότιο μέτωπο [21]

Αναφορικά με τις γεωτεχνικές συνθήκες που αντιμετώπισε η διάνοιξη του μετώπου στις εν λόγω περιοχές, πρέπει να σημειωθεί η μεγάλη ετερογένεια που παρουσιάζει ο σχηματισμός του σχιστώδη σερπεντινίτη. Ο προαναφερθείς σχηματισμός παρουσιάζει σημαντικές τεκτονικές τάσεις και έντονη ερπυστική συμπεριφορά (συνθλίβουσα). Αναφέρεται η δυσκολία προσδιορισμού των γεωτεχνικών παραμέτρων του σχιστώδη σερπεντινίτη μέσω γεωτεχνικών ερευνών και γεωτρήσεων. Οι πυρήνες γεωτρήσεων δεν διατηρούν τις επιτόπου τεκτονικές τάσεις πεδίου, οι οποίες διαφέρουν κατά θέσεις και επιπλέον τα ερπυστικά φαινόμενα σχετίζονται με τις τεκτονικές τάσεις. Επομένως, η αβεβαιότητα που παρουσιάζει ο σχιστώδης σερπεντινίτης στα γεωτεχνικά του χαρακτηριστικά καθιστά δυσχερή την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του κατά τη διάνοιξη της σήραγγας, λαμβάνοντας υπόψη γεωτεχνικά δεδομένα από την φάση εκπόνησης μελέτης πριν τη διάνοιξη της σήραγγας. Επιπλέον, σημειώνεται ότι κατά θέσεις όπου πραγματοποιούταν η διάνοιξη της σήραγγας στο σχηματισμό σχιστώδη σερπεντινίτη, ο εν λόγω σχηματισμός παρουσίαζε ποικίλη συμπεριφορά, αν και μακροσκοπικά και ποσοτικά εμφανιζόταν το ίδιο υλικό. Σημειώθηκαν περιπτώσεις όπου οι συνθήκες διάνοιξης αν και δυσχερείς ήταν διαχειρίσιμες, ενώ σε άλλες περιπτώσεις (όπου φαινομενικά αντιμετωπίζαμε τον ίδιο σχηματισμό) η συμπεριφορά του σχιστώδη σερπεντινίτη δεν ήταν διαχειρίσιμη και προκάλεσε εκτεταμένες συγκλίσεις και αστοχίες της προσωρινής υποστήριξης της διατομής.



Εικόνα 4.4: Νότιο μέτωπο - Αστοχία σε Σχιστώδη Σερπεντινίτη [21]



Εικόνα 4.5: Νότιο μέτωπο - Σχιστώδης Σερπεντινίτης, Εκτεταμένες επιπρόσθετες υλώσεις [21]



Εικόνα 4.6: Νότιο μέτωπο - Σχιστώδης Σερπεντινίτης, Τοποθέτηση πλαισίων [21]



Εικόνα 4.7: Νότιο μέτωπο - Σχιστώδης Σερπεντινίτης, Ολική ανακατασκευή διατομής [21]

Κεφάλαιο 5

Ανάστροφες αναλύσεις σε δυσμενείς περιοχές

5.1. Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιούνται ανάστροφες αναλύσεις στο σχηματισμό του σχιστώδη σερπεντινίτη. Οι χιλιομετρικές θέσεις που επιλέχθηκαν να προσομοιωθούν ανήκουν στο νότιο μέτωπο της σήραγγας Καλλιδρόμου και βρίσκονται μεταξύ των χιλιομετρικών θέσεων 9+037 - 9+100 (αριστερός κλάδος).

Η προσομοίωση της συμπεριφοράς εκσκαφής και υποστήριξης της σήραγγας Καλλιδρόμου, στις προαναφερθείσες χιλιομετρικές θέσεις του νότιου μετώπου, πραγματοποιήθηκε με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Phase2 version 8.0 της Rocscience Inc. Μέσω του προγράμματος είναι δυνατή η προσομοίωση των γεωτεχνικών παραμέτρων της βραχομάζας, των βημάτων εκσκαφής, των μέτρων υποστήριξης των διατομών όπως για παράδειγμα εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, χαλύβδινα πλαίσια και αγκύρια βράχου, η αλληλεπίδραση βραχομάζας υποστήριξης αλλά και η αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο κλάδων των σηράγγων.

Αρχικά παρουσιάζεται η γεωμετρία του γεωλογικού μοντέλου και των δύο κλάδων της σήραγγας Καλλιδρόμου, καθώς και η προσομοίωση τους στο περιβάλλον εργασίας του Phase2. Έπειτα, παρατίθεται η διαδικασία εκσκαφής και η τοποθέτηση των μέτρων υποστήριξης όπως πραγματοποιήθηκε, βάσει τεχνικών μελετών, στις υπό μελέτη διατομές της σήραγγας Καλλιδρόμου αλλά και ο τρόπος με τον οποίο προσομοιώθηκαν τα παραπάνω στοιχεία στο υπό μελέτη εδαφικό προφίλ.

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρατίθενται επιπλέον οι συγκλίσεις που παρουσιάστηκαν στο υπό μελέτη τμήμα της σήραγγας Καλλιδρόμου όπως ελήφθησαν από την ΕΡΓΟΣΕ.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι γεωτεχνικές παράμετροι και οι παραδοχές σχεδιασμού, οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν και τα αντίστοιχα αποτελέσματά τους.

Στόχος του παρόντος κεφαλαίου είναι η προσέγγιση των γεωτεχνικών παραμέτρων του σχηματισμού του σχιστώδη σερπεντινίτη, για τους δύο κλάδους της σήραγγας Καλλιδρόμου, μεταξύ των χιλιομετρικών θέσεων 9+037 - 9+100 (αριστερός κλάδος). Η εύρεση των ζητούμενων γεωτεχνικών παραμέτρων πραγματοποιείται μέσω της προσομοίωσης της διαδικασίας εκσκαφής και υποστήριξης των δύο κλάδων της σήραγγας Καλλιδρόμου, υπολογισμού των αντίστοιχων συγκλίσεων τους και εξέτασης τους με τις πραγματικές καταγεγραμμένες συγκλίσεις που σημειώθηκαν στο υπό μελέτη τμήμα.

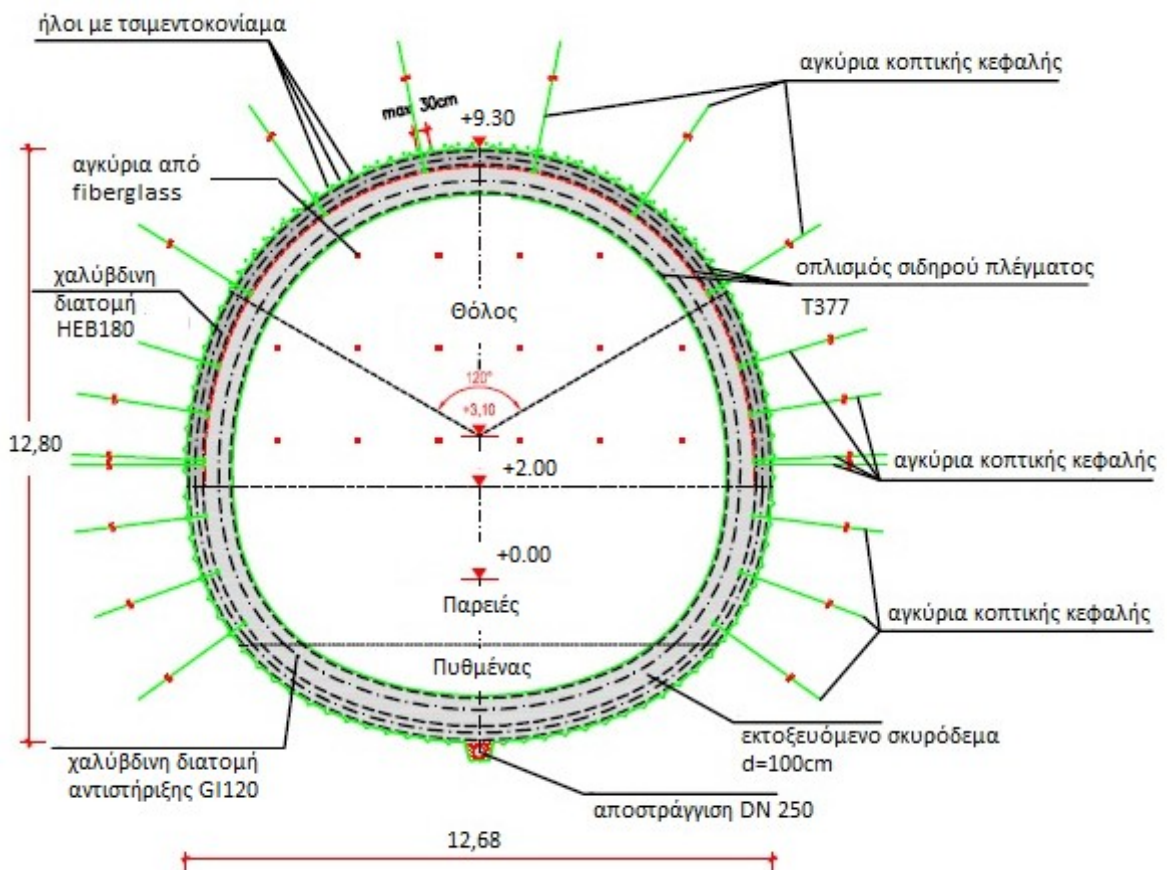
5.2. Προσομοίωση στο περιβάλλον εργασίας του Phase2

5.2.1. Γεωμετρία μοντέλου - Διατομές

Η γεωμετρία μοντέλου καθώς και των διατομών που πρόκειται να προσομοιωθούν επιλέχθηκε βάσει τεχνικών μελετών και στοιχείων όπως ελήφθησαν από την ΕΡΓΟΣΕ. Η στρωματογραφία των σχηματισμών καθώς και το ύψος τους επιλέχθηκε βάσει της οριστικής τεχνικής μελέτης στα 392m πάνω από το προσωρινό δάπεδο της Α' φάσης. Σημειώνεται πως το δάπεδο της Α' φάσης κατασκευάζεται στη στάθμη +0,00 ενώ η στάθμη του φυσικού εδάφους προσομοιώνεται στη στάθμη +392,00.

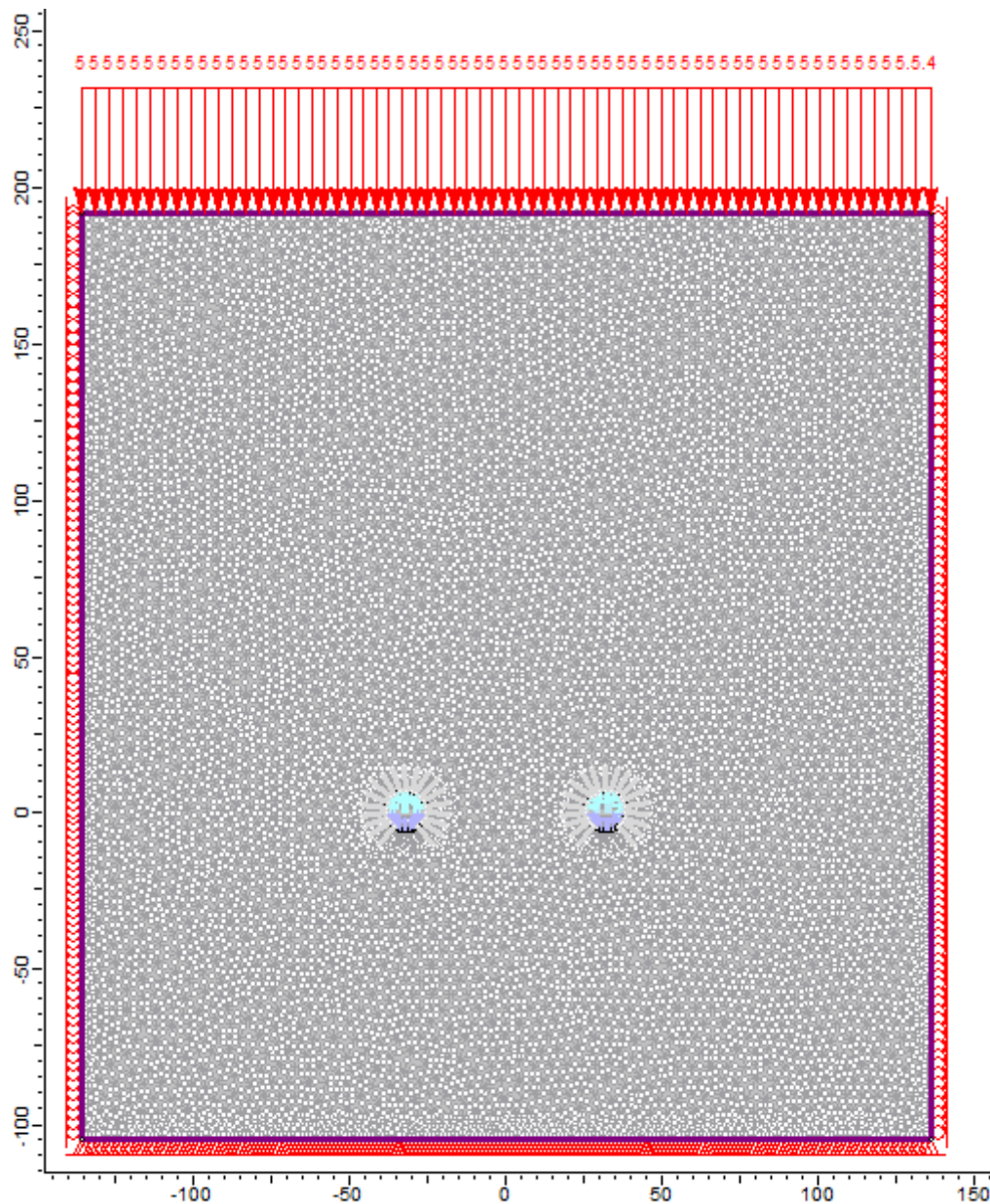
Το τασικό πεδίο προσομοιώνεται βάσει γεωστατικών δυνάμεων (field stress type Gravity). Ο συντελεστής ουδετέρων ωθήσεων K_0 λήφθηκε ίσος με 0,5 ενώ το ειδικό βάρος γ των εδαφικών σχηματισμών ίσο με 0,027 MN/m³. Το προσομοίωμα που επιλέχθηκε για την επίλυση είναι το Mohr-Coulomb (M-C).

Επιπλέον, και οι δύο διατομές στις χιλιομετρικές θέσεις που επιλέχθηκε να πραγματοποιηθούν ανάστροφες αναλύσεις εντάσσονται στην κατηγορία διάνοιξης και υποστήριξης A-7A-8. Παρατίθεται σχέδιο με τη γεωμετρία της διατομής καθώς και λεπτομέρειες υποστήριξης οι οποίες πρόκειται να προσομοιωθούν σε επόμενα βήματα.



Σχήμα 5.1: Γεωμετρία διατομής κατηγορίας A-7A-8 [20]

Παρατηρούμε ότι η γεωμετρία της διατομής προσεγγίζει κύκλο με μία μέση διάμετρο περίπου 12,7m. Ακόμη η αξονική απόσταση των δύο σηράγγων στη συγκεκριμένη θέση ανάλυσης είναι 66,45m. Βάσει πλέον της γνωστής γεωμετρίας, τοποθετούνται τα όρια του μοντέλου έχοντας υπόψη πως τα πλευρικά όρια αλλά και το κάτω όριο θα πρέπει να απέχουν επαρκή απόσταση από τις σήραγγες ώστε να μην επηρεάζονται από τη διαδικασία διάνοιξης-κατασκευής αλλά και να προσομοιώνουν σωστά τις κινήσεις του βραχώδους σχηματισμού.



Σχήμα 5.2: Γεωλογικό προσομοίωμα

Ειδικότερα, το άνω όριο όπως περιγράφηκε καθορίζεται από το ύψος των υπερκειμένων εδαφών. Λόγω του μεγάλου ύψους των υπερκειμένων το ανώτερο τμήμα του εδαφικού σχηματισμού πάχους 200m προσομοιώθηκε με κατανομημένο φορτίο ίσο με 5,4MN/m² Ακόμη στο άνω σύνορο δεν τίθενται περιορισμοί στις μετακινήσεις κατά x και ψ.

Το αριστερό σύνορο απέχει απόσταση μεγαλύτερη του 12D από την αριστερή σήραγγα, όπου D η ισοδύναμη διάμετρος της σήραγγας. Επιπλέον μπορεί να μετακινηθεί μόνο κατά την κατακόρυφη διεύθυνση και προσομοιώνεται με κυλίσσεις .

Η ίδια διαδικασία πραγματοποιείται και για το δεξιό σύνορο. Απέχει απόσταση 12D από τη δεξιά σήραγγα και μπορεί να μετακινηθεί μόνο κατά τη κατακόρυφη διεύθυνση.

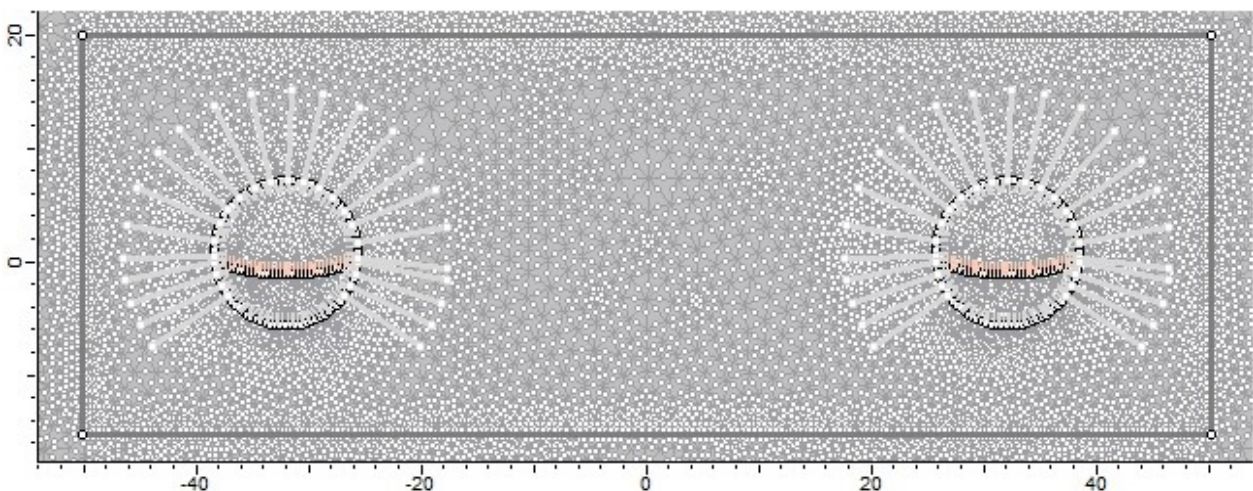
Το κάτω σύνορο απέχει από τις σήραγγες απόσταση μεγαλύτερη από 8D και περιορίζεται με αρθρώσεις που απαγορεύουν κινήσεις κατά την οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση.

5.2.2. Προσομοίωση των σταδίων διάνοιξης της σήραγγας.

Σε αυτό το στάδιο προσομοιώνουμε τη διαδικασία διάνοιξης των διατομών που ακολουθήθηκε κατά τη κατασκευή της σήραγγας Καλλιδρόμου. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενες παραγράφους η προώθηση του μετώπου και η κατασκευή υποστήριξης στις διανοιγόμενες διατομές πραγματοποιήθηκε βάσει της μεθόδου NATM. Τα στάδια που πραγματοποιήθηκαν κατά τη κατασκευή, και προσομοιώθηκαν στο περιβάλλον εργασίας του λογισμικού Phase2, ορίζονται από χρονικές παραμέτρους αλλά και απαιτήσεις για συγκεκριμένα βήματα εκσκαφής λόγω των κακών γεωλογικών συνθηκών που επικρατούσαν στην υπό μελέτη περιοχή.

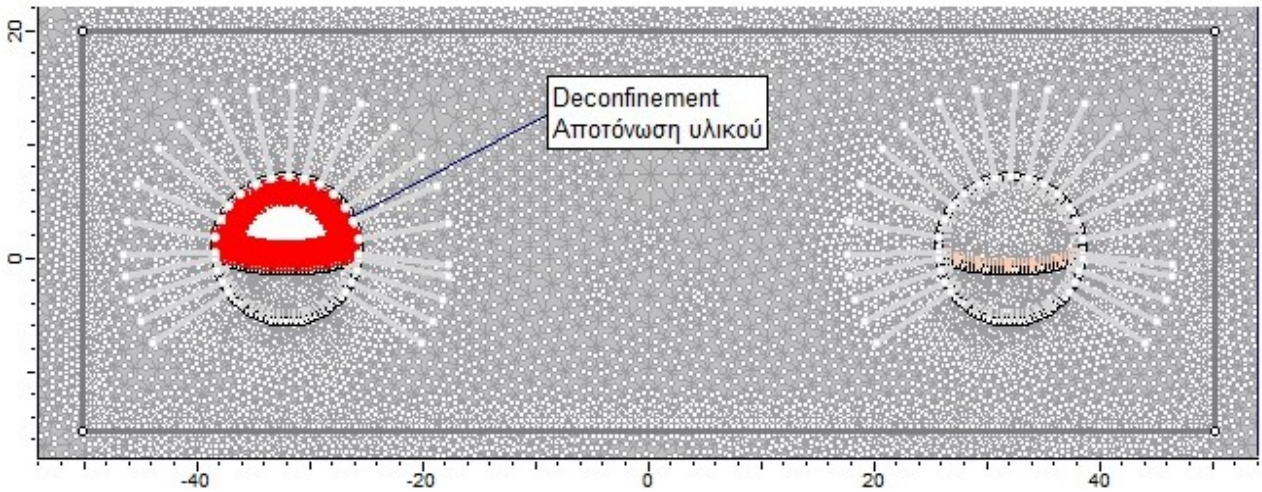
Παρακάτω παρουσιάζονται τα στάδια κατασκευής όπως προσομοιώθηκαν στο περιβάλλον εργασίας του Phase2.

1^ο στάδιο: Γεωστατικό πεδίο. Στο στάδιο αυτό προσομοιώνονται οι εντατικές καταστάσεις των γεωυλικών στο πεδίο βάσει των μηχανικών τους παραμέτρων.



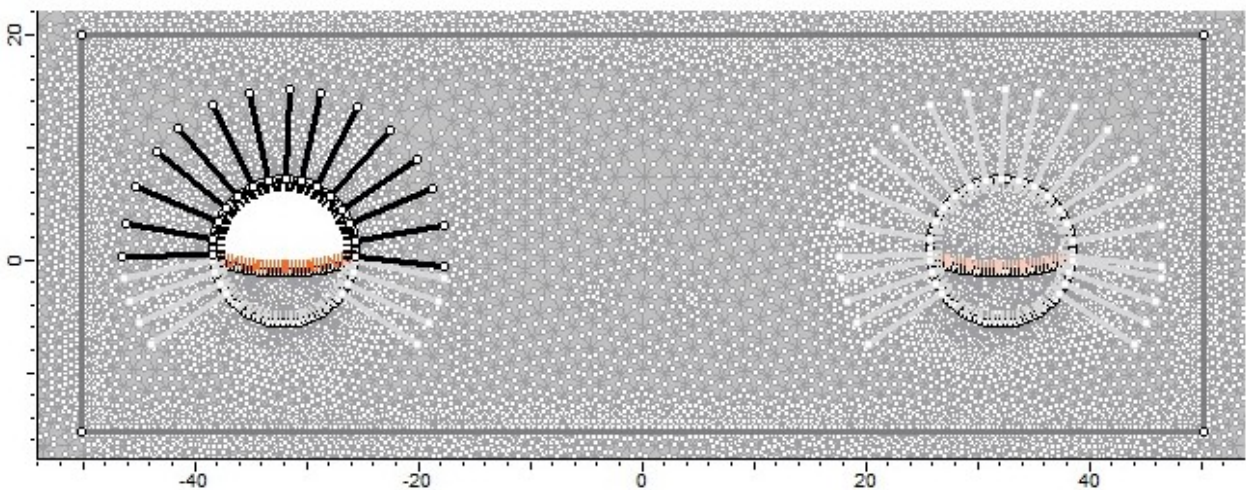
Σχήμα 5.3: 1^ο στάδιο: Γεωστατικό Πεδίο

2^ο στάδιο: Αποτόνωση βραχομάζας Α' φάσης αριστερού κλάδου. Το στάδιο αυτό αναφέρεται στη μείωση (αποτόνωση) των ιδιοτήτων της βραχομάζας στην περιοχή όπου πρόκειται να εκσκαφθεί η Α' φάση της αριστερής σήραγγας. Προσομοιώνονται οι μεταβολές του παραμορφωσιακού και εντατικού πεδίου που συντελούνται στην περιοχή της αριστερής σήραγγας λόγω της αποτόνωσης που συντελείται μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής στον πυρήνα προώθησης. Στο συγκεκριμένο στάδιο θεωρείται ότι το μέτωπο της σήραγγας βρίσκεται στη θέση όπου γίνεται η εκσκαφή.



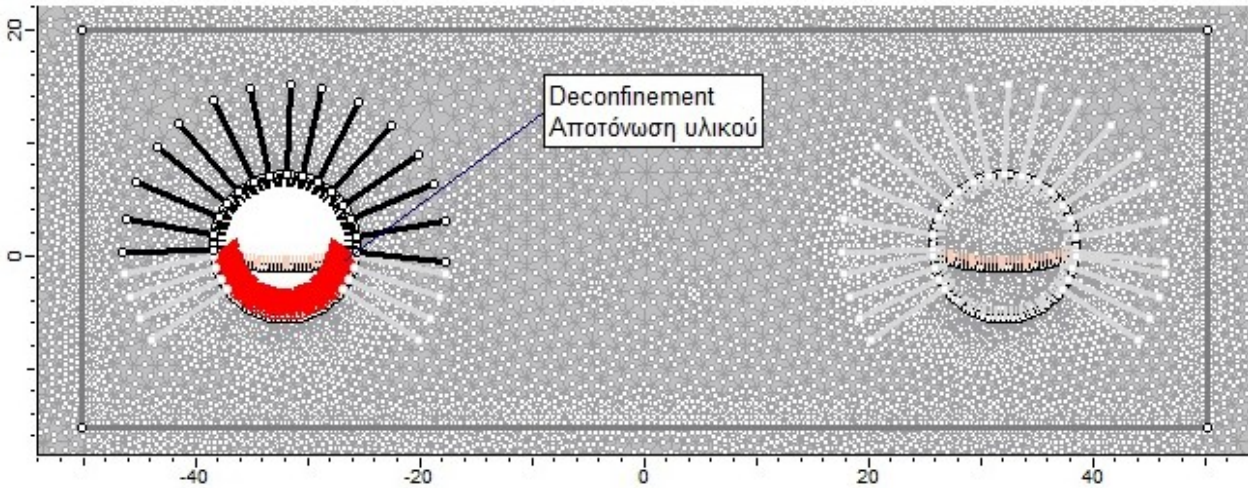
Σχήμα 5.4: 2^ο στάδιο: Αποτόνωση βραχομάζας Α' φάσης αριστερού κλάδου

3^ο στάδιο: Εκσκαφή και Υποστήριξη της Α' φάσης του Αριστερού κλάδου. Σε αυτό το στάδιο το μέτωπο της σήραγγας έχει απομακρυνθεί από το υπό μελέτη εδαφικό προφίλ. Έχει πραγματοποιηθεί η εκσκαφή του θόλου και έχουν τοποθετηθεί όλα τα μέτρα υποστήριξης της Α' φάσης.



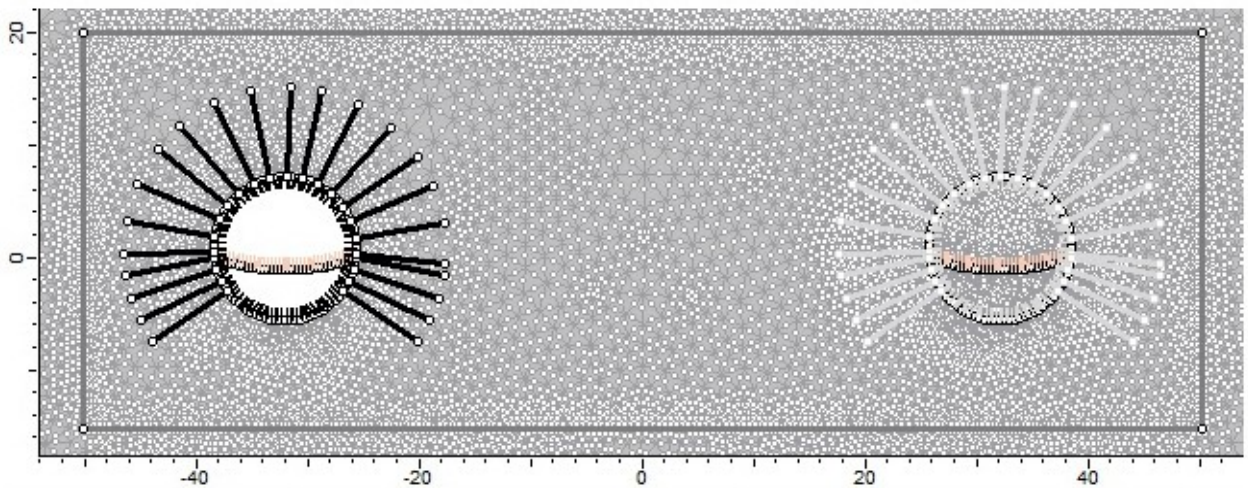
Σχήμα 5.5: 3^ο στάδιο: Εκσκαφή και Υποστήριξη της Α' φάσης του Αριστερού κλάδου

4^ο στάδιο: Αποτόνωση βραχομάζας της Β' φάσης του αριστερού κλάδου. Το στάδιο αυτό αναφέρεται στη μείωση (αποτόνωση) των ιδιοτήτων της βραχομάζας στην περιοχή όπου πρόκειται να εκσκαφθεί η Β' φάση της αριστερής σήραγγας. Προσομοιώνονται οι μεταβολές του παραμορφωσιακού και εντατικού πεδίου που συντελούνται στην περιοχή της αριστερής σήραγγας λόγω της αποτόνωσης που συντελείται μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής στον πυρήνα προώθησης. Στο συγκεκριμένο στάδιο θεωρείται ότι το μέτωπο της σήραγγας βρίσκεται στη θέση όπου γίνεται η εκσκαφή (Β' φάση).



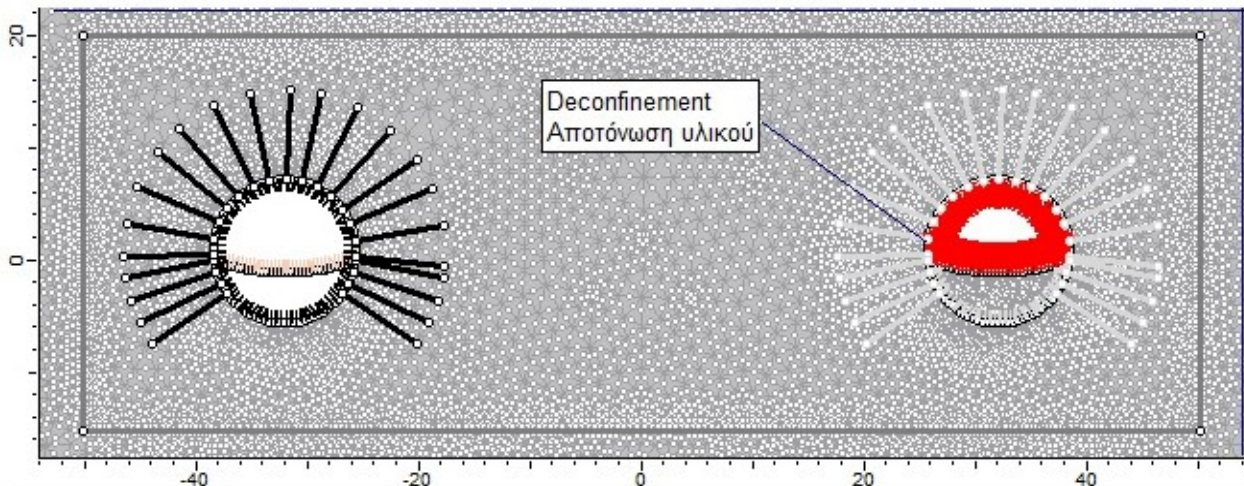
Σχήμα 5.6: 4^ο στάδιο: Αποτόνωση βραχομάζας της Β' φάσης του αριστερού κλάδου

5^ο στάδιο: Εκσκαφή και υποστήριξη της Β' φάσης του Αριστερού κλάδου. Σε αυτό το στάδιο το μέτωπο της σήραγγας της Β' φάσης έχει απομακρυνθεί από το υπό μελέτη εδαφικό προφίλ. Έχει πραγματοποιηθεί η εκσκαφή των παρειών και του πυθμένα και έχουν τοποθετηθεί όλα τα μέτρα υποστήριξης της Β' φάσης. Οι συγκλίσεις στο συγκεκριμένο στάδιο της αριστερής σήραγγας έχουν ολοκληρωθεί και η διατομή ισορροπεί.



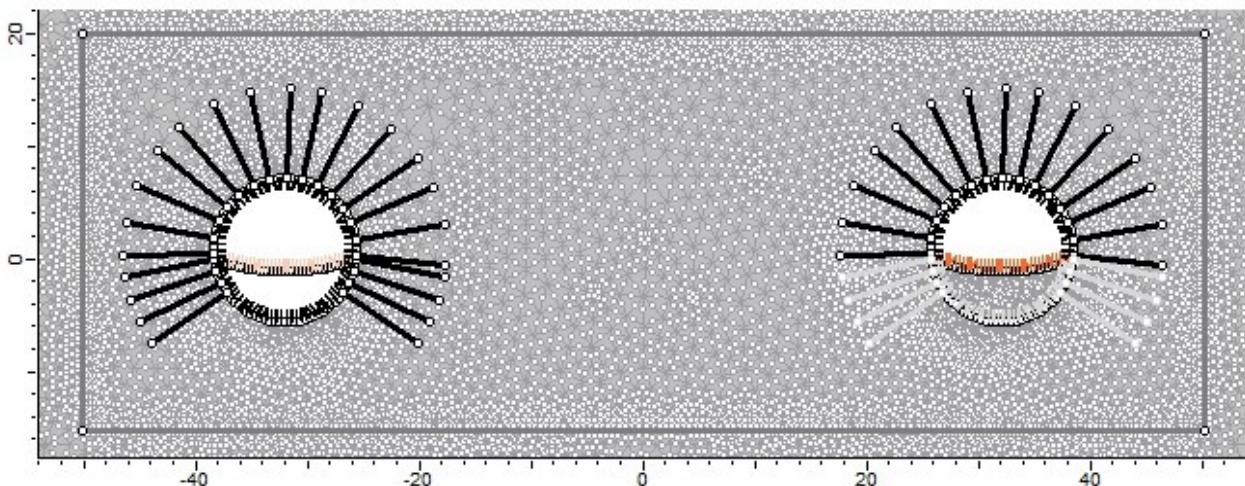
Σχήμα 5.7: 5^ο στάδιο: Εκσκαφή και Υποστήριξη της Β' φάσης του Αριστερού κλάδου

6^ο στάδιο: Αποτόνωση βραχομάζας Α' φάσης δεξιού κλάδου. Το στάδιο αυτό αναφέρεται στη μείωση (αποτόνωση) των ιδιοτήτων της βραχομάζας στην περιοχή όπου πρόκειται να εκσκαφθεί η Α' φάση της δεξιάς σήραγγας. Προσομοιώνονται οι μεταβολές του παραμορφωσιακού και εντατικού πεδίου που συντελούνται στην περιοχή της δεξιάς σήραγγας λόγω της αποτόνωσης που συντελείται μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής στον πυρήνα προώθησης. Στο συγκεκριμένο στάδιο θεωρείται ότι το μέτωπο της σήραγγας βρίσκεται στη θέση όπου γίνεται η εκσκαφή.



Σχήμα 5.8: 6^ο στάδιο: Αποτόνωση βραχομάζας Α' φάσης δεξιού κλάδου

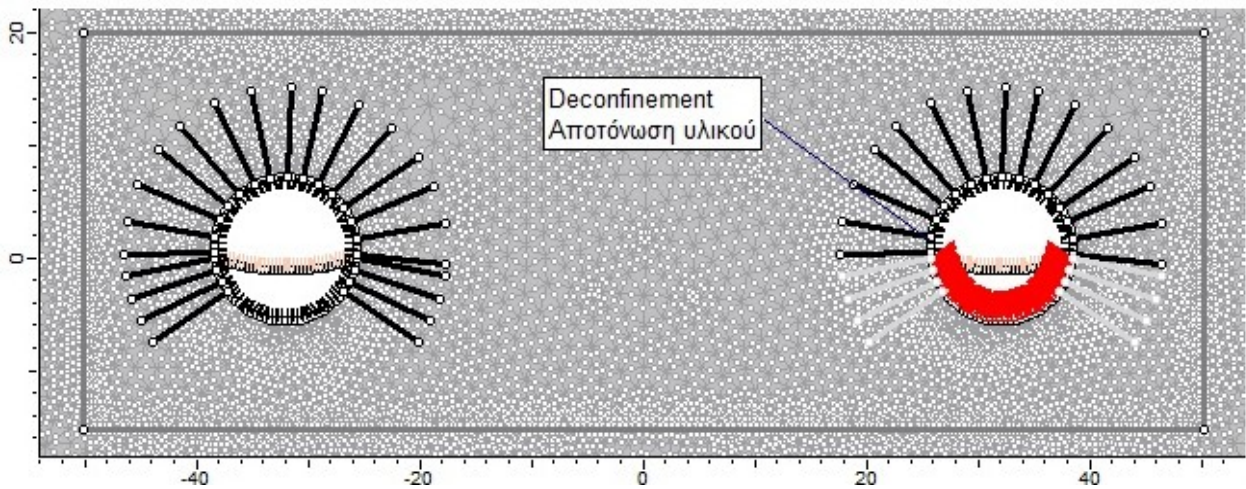
7^ο στάδιο: Εκσκαφή και Υποστήριξη της Α' φάσης του Δεξιού κλάδου. Σε αυτό το στάδιο το μέτωπο της σήραγγας έχει απομακρυνθεί από το υπό μελέτη εδαφικό προφίλ. Έχει πραγματοποιηθεί η εκσκαφή του θόλου και και έχουν τοποθετηθεί όλα τα μέτρα υποστήριξης της Α' φάσης.



Σχήμα 5.9: 7^ο στάδιο: Εκσκαφή και Υποστήριξη της Α' φάσης του Δεξιού κλάδου

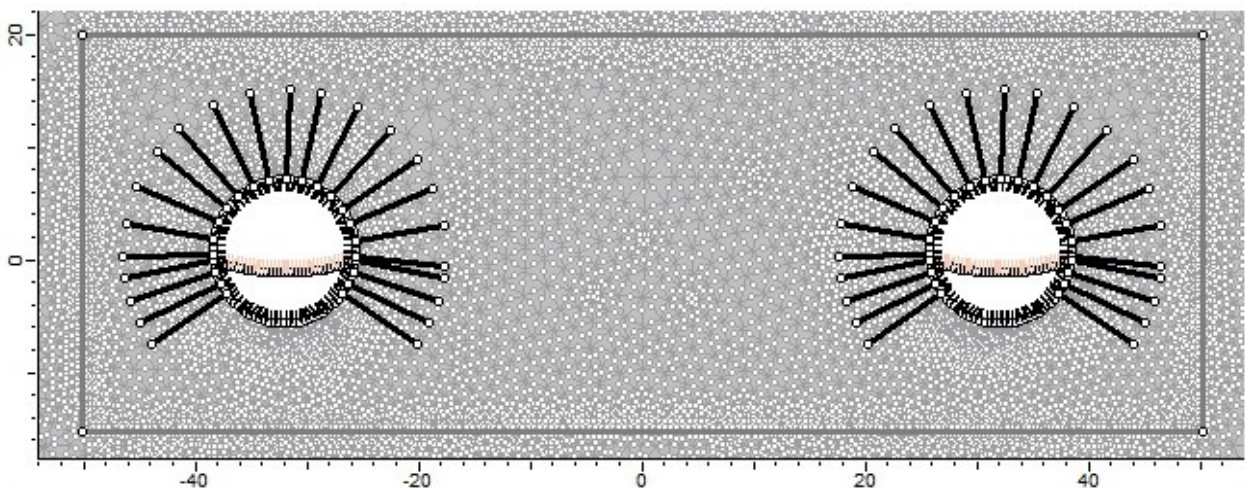
8^ο στάδιο: Αποτόνωση βραχομάζας της Β' φάσης του δεξιού κλάδου. Το στάδιο αυτό αναφέρεται στη μείωση (αποτόνωση) των ιδιοτήτων της βραχομάζας στην περιοχή όπου πρόκειται να εκσκαφθεί η Β' φάση της δεξιάς σήραγγας. Προσομοιώνονται οι μεταβολές του παραμορφωσιακού και εντατικού πεδίου που συντελούνται στην περιοχή της δεξιάς σήραγγας λόγω της αποτόνωσης που συντελείται μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής

στον πυρήνα προώθησης. Στο συγκεκριμένο στάδιο θεωρείται ότι το μέτωπο της σήραγγας βρίσκεται στη θέση όπου γίνεται η εκσκαφή (B' φάση).



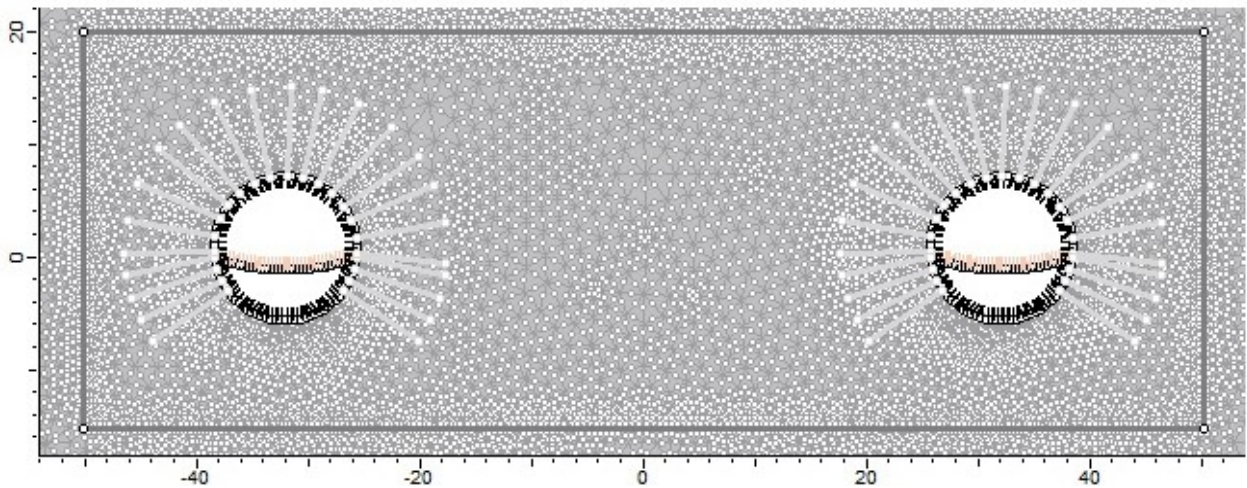
Σχήμα 5.10: 8^ο στάδιο: Αποτόνωση της βραχομάζας της B' φάσης του δεξιού κλάδου

9^ο στάδιο: Εκσκαφή και υποστήριξη της B' φάσης του δεξιού κλάδου. Σε αυτό το στάδιο το μέτωπο της σήραγγας της B' φάσης έχει απομακρυνθεί από το υπό μελέτη εδαφικό προφίλ. Έχει πραγματοποιηθεί η εκσκαφή των παρειών και του πυθμένα και έχουν τοποθετηθεί όλα τα μέτρα υποστήριξης της B' φάσης. Οι συγκλίσεις στο συγκεκριμένο στάδιο της δεξιάς σήραγγας αλλά και της αριστερής λόγω αλληλεπίδρασης έχουν ολοκληρωθεί.



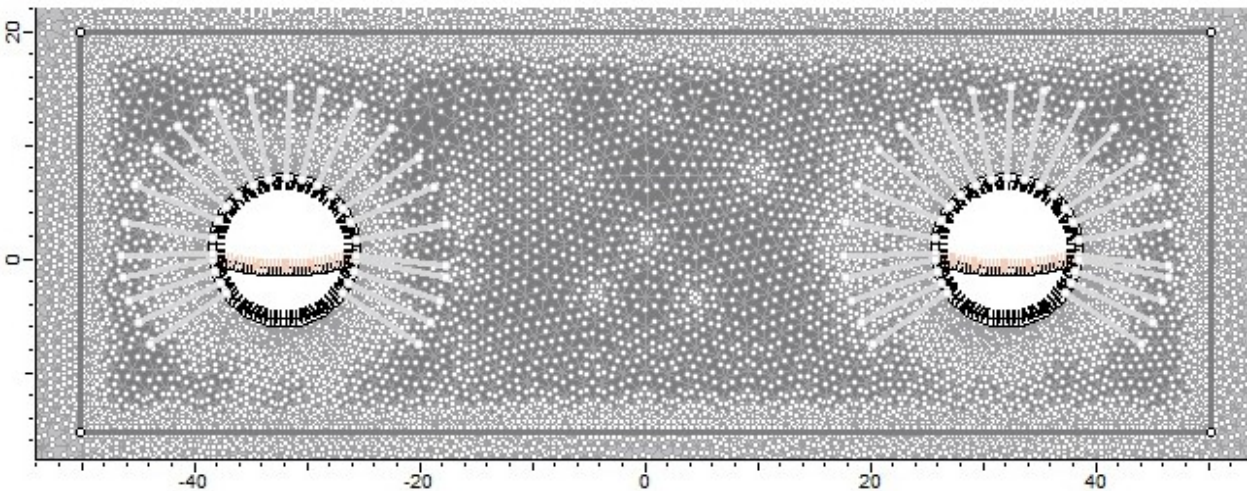
Σχήμα 5.11: 9^ο στάδιο: Εκσκαφή και υποστήριξη της B' φάσης του δεξιού κλάδου

10^ο στάδιο: Τοποθέτηση τελικής επένδυσης. Σε αυτό το στάδιο πραγματοποιείται η προσομοίωση της τελικής επένδυσης και για τους δύο κλάδους. Γίνεται η παραδοχή απενεργοποίησης των μέτρων προσωρινής (άμεσης) υποστήριξης λόγω απαξίωσής τους (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, πλαίσια και αγκύρια).



Σχήμα 5.12: 10^ο στάδιο: Τοποθέτηση τελικής υποστήριξης και στους δύο κλάδους.

11^ο στάδιο: Προσομοίωση του φαινομένου του ερπυσμού. Σε αυτό το στάδιο προσομοιώνονται οι παραμορφώσεις, που σημειώνονται στις υπό μελέτη διατομές της σήραγγας Καλλιδρόμου, λόγω ερπυστικών φαινομένων. Για την προσομοίωση του φαινομένου του ερπυσμού εισάγεται ζώνη απομειωμένου μέτρου ελαστικότητας E_{cr} περιμετρικά των σηράγγων. Καθώς το μέτωπο της σήραγγας έχει απομακρυνθεί, θεωρείται ότι επικρατούν συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης.

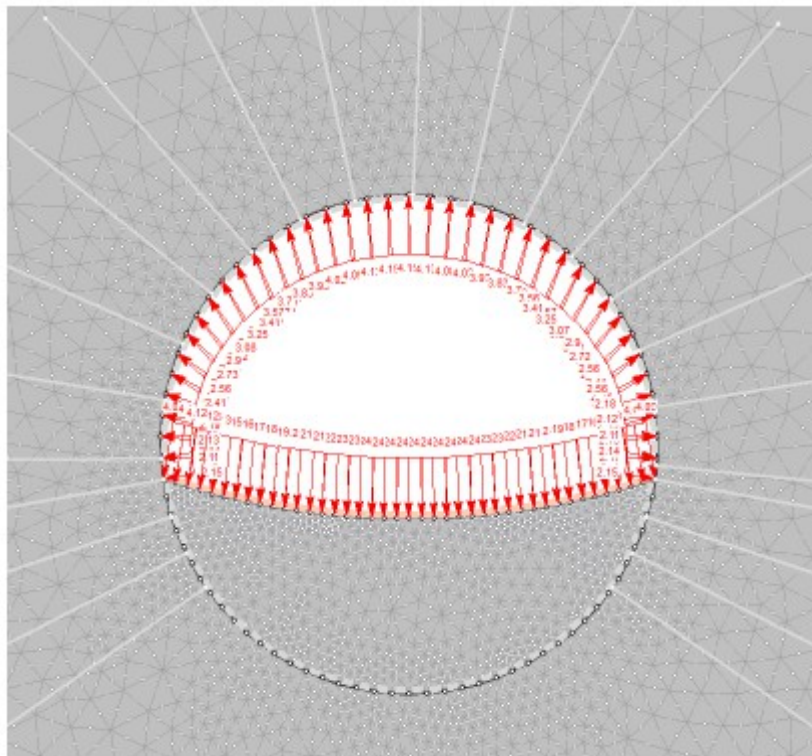


Σχήμα 5.13: 11^ο στάδιο: Προσομοίωση ερπυστικών παραμορφώσεων

5.2.3. Γεωυλικό περιβάλλοντος διάνοιξης

Το περιβάλλον του προγράμματος που χρησιμοποιείται για τη προσομοίωση της διάνοιξης και υποστήριξης της σήραγγας Καλλιδρόμου προσομοιώνει εντατικές καταστάσεις σε 2 διαστάσεις. Η αποτόνωση της βραχομάζας εμπρός από το μέτωπο εκσκαφής κατά τη διάνοιξη μιας σήραγγας μπορεί να προσομοιωθεί με μείωση του μέτρου ελαστικότητας E της εκάστοτε βραχομάζας. Το επιλεγόμενο απομειωμένο μέτρο ελαστικότητας σχετίζεται άμεσα με τις μηχανικές παραμέτρους του σχηματισμού αλλά και το συντελεστή αποτόνωσης λ . Ο συντελεστής αποτόνωσης λ μπορεί να προκύψει μέσω των καμπύλων Panet και σχετίζεται με τις παραμέτρους του υλικού τη γεωμετρία του προσομοιώματος και την επιλεχθείσα απόσταση των μέτρων άμεσης υποστήριξης από το μέτωπο.

Στο Phase2 version 8.0 δίνεται η δυνατότητα προσομοίωσης της αποτόνωσης της βραχομάζας που περικλείεται από το περιτύπωμα της σήραγγας, που πρόκειται να εγκατασταθεί, μέσω της τοποθέτησης κατανεμημένου φορτίου στα τοιχώματα. Το συγκεκριμένο κατανεμημένο φορτίο λαμβάνει τιμές σε κάθε θέση ίσες με αυτές του τασικού πεδίου. Οι τιμές του κατανεμημένου φορτίου μπορούν να απομειωθούν σε σχέση με αυτές του τασικού πεδίου μέσω της επιλογής stage factor. Η επιλεχθείσα τιμή stage factor είναι ίση με $1-\lambda$. Με αυτό τον τρόπο προσομοιώνεται η αποτόνωση στα τοιχώματα της σήραγγας.



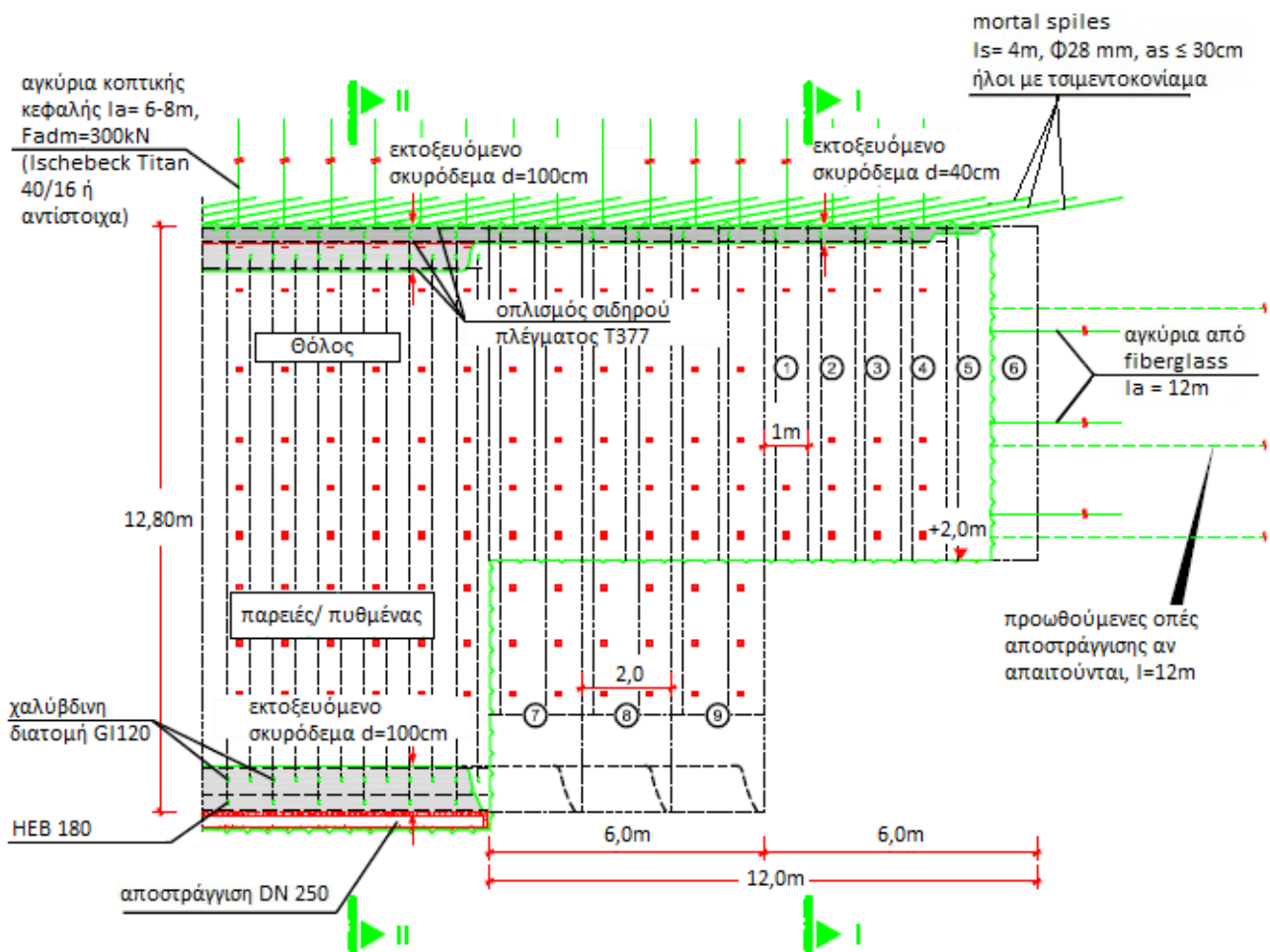
Σχήμα 5.14: Αποτόνωση του περιβάλλοντος γεωυλικού με χρήση κατανεμημένου φορτίου κατά την Α' φάση εκσκαφής.

5.2.4. Μέτρα υποστήριξης

Στη παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται τα μέτρα υποστήριξης που χρησιμοποιήθηκαν στις υπό μελέτη διατομές της σήραγγας Καλλιδρόμου αλλά και ο τρόπος προσομοίωσης τους στο περιβάλλον του προγράμματος Phase2.

Τα σχέδια διάνοιξης και υποστήριξης προβλέπουν, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, διάνοιξη και υποστήριξη σε 2 φάσεις. Η Α' φάση προβλέπει διάνοιξη και υποστήριξη του θόλου. Η Β' φάση προβλέπει διάνοιξη και υποστήριξη των τοιχωμάτων και του πυθμένα της σήραγγας. Η εκσκαφή της σήραγγας προβλέπεται να γίνει με σκαπτική μηχανή εξοπλισμένη με σμίλη ή εναλλακτικά ανατίναξη με χρήση εκρηκτικών.

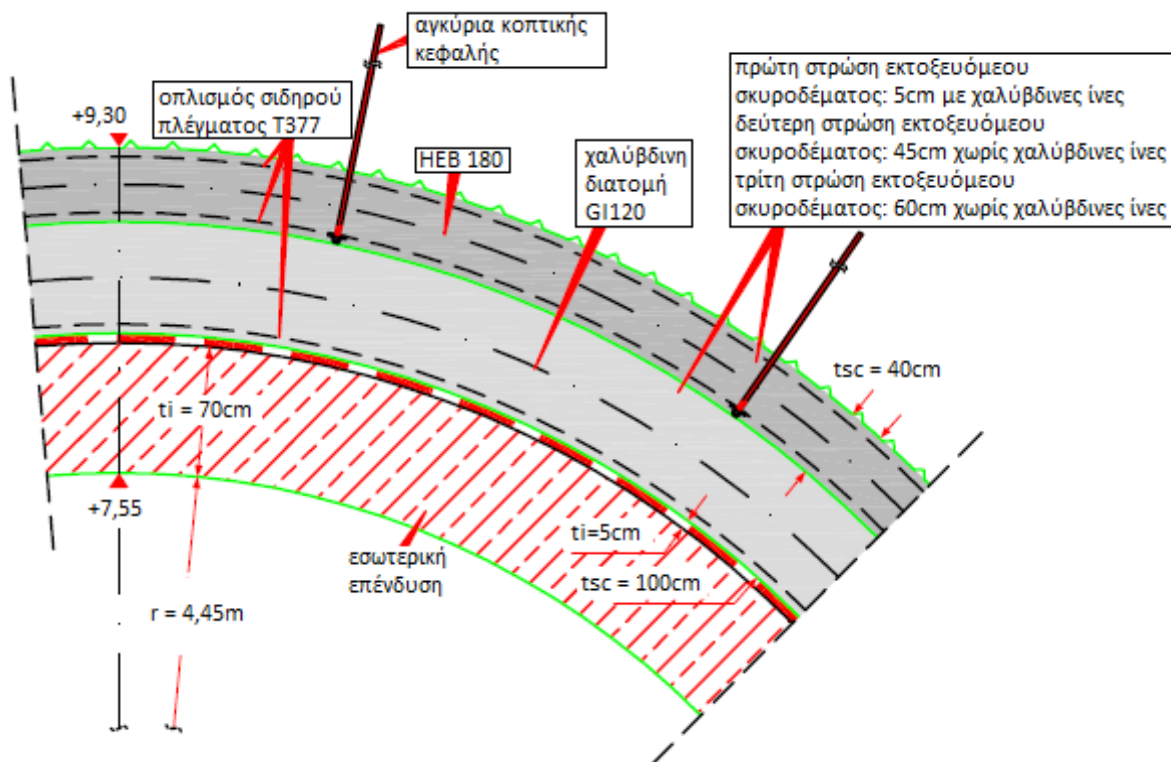
Αναφορικά με το μήκος εκσκαφής χωρίς υποστήριξη, αυτό ορίζεται σε 1m στην Α' φάση κατά τη διάνοιξη του θόλου, ενώ στη Β' φάση κατά τη διάνοιξη των παρειών και του πυθμένα προβλέπεται σε 2 m. Λεπτομέρειες σχετικά με τα τηρούμενα βήματα εκσκαφής μεταξύ των δύο φάσεων παρουσιάζονται στις επόμενες εικόνες.



Σχήμα 5.15: Διατομή κατηγορίας A-7A-8 - Διαμήκης τομή [20]

Η υποστήριξη του προσωρινού μετώπου προβλέπει εγκατάσταση υαλόκαρφων (αγκύρια από fiberglass) με μήκος 12m, ελάχιστη φέρουσας ικανότητας F_{adm} 300kN, τοποθέτηση ανά 6m προώθησης και στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος 7cm. Επιπλέον πραγματοποιείται προ-στήριξη του μετώπου εκσκαφής της σήραγγας με χρήση ήλων με τσιμεντοκονίαμα.

Το συνολικό πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος που χρησιμοποιείται για την υποστήριξη των συγκεκριμένων διατομών είναι 100cm και κατασκευάζεται σε 2 φάσεις. Κατά την Α' φάση εγκαθίσταται εκτοξευόμενο σκυρόδεμα συνολικού πάχους 40cm σε 2 στρώσεις των 5cm και 35cm αντίστοιχα. Η Β' φάση προβλέπει το τελικό πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος να είναι 100cm. Επομένως κατά τη Β' φάση στο θόλο εγκαθίσταται στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος 60cm ενώ στις παρειές και στον πυθμένα εγκαθίσταται εκτοξευόμενο σκυρόδεμα σε 3 στρώσεις των 5cm, 35cm και 60cm αντίστοιχα. Στο μανδύα εκτοξευόμενου σκυροδέματος έχουν τοποθετεί 3 οπλισμοί σιδήρου πλέγματος T377 στις στρώσεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος που παρουσιάζονται στη σχετική λεπτομέρεια.



Σχήμα 5.18: Λεπτομέρεια υποστήριξης και εσωτερικής επένδυσης [20]

Η μελέτη υποστήριξης της κατηγορίας A-7A-8 προβλέπει επιπλέον τη χρήση αυτό-διατρυόμενων αγκυριών. Το μήκος των αγκυριών ποικίλει μεταξύ 6 με 8m ενώ λεπτομέρειες εγκατάστασης παρέχονται στις σχετικές εικόνες.

Στα μέτρα υποστήριξης της προαναφερθείσας διατομής προβλέπεται η χρήση χαλύβδινων διατομών υποστήριξης. Στο θόλο κατά την Α' φάση εγκαθίσταται στην εξωτερική στρώση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος χαλύβδινη διατομή HEB180 ανά 1m κατά μήκος της σήραγγας ενώ κατά τη Β' φάση υποστήριξης στην εσωτερική στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος εγκαθίστανται 2 πλαίσια δικτυωτών δοκών Lattice girders (130/26 D26) ανά 1m κατά μήκος της σήραγγας. Η χαλύβδινη διατομή HEB180 καθώς και οι δικτυωτές δοκοί Lattice girders τοποθετούνται σε όλη τη διατομή.

Ακολουθεί μία σύντομη ανάλυση του τρόπου που προσομοιώθηκαν τα προαναφερθέντα μετρά υποστήριξης στο περιβάλλον εργασίας του προγράμματος Phase2.

Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα τοποθετείται περιμετρικά της διατομής κατά την υποστήριξη των Α' και Β' φάσεων. Έχει επιλεγεί ως μέτρο ελαστικότητας 20.000MPa και λόγος Poisson $\nu=0,2$. Η τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πραγματοποιείται σε στρώσεις-φάσεις (Α' και Β' φάση αντιστήριξης) και προσομοιώνεται στο πρόγραμμα με χρήση composite liners. Με την επιλογή composite liners παρέχεται η δυνατότητα προσομοίωσης διαφορετικών στρώσεων εκτοξευόμενου σκυροδέματος οι οποίες μπορούν να περιέχουν χαλύβδινα πλαίσια και να εγκαθίστανται σε διαφορετικά στάδια υποστήριξης.

Αγκύρια κοπτικής κεφαλής

Για την προσομοίωση των αυτό-διατρυώμενων αγκυρίων εισάγεται η γεωμετρία τους, η ποιότητα του χάλυβα που χρησιμοποιείται και η φέρουσα ικανότητά τους. Λεπτομέρειες σχετικά με τα χαρακτηριστικά των αγκυρίων έχουν παρουσιαστεί σε προηγούμενη παράγραφο.

Χαλύβδινα πλαίσια

Στο Phase2 υπάρχει βιβλιοθήκη και παρέχεται η δυνατότητα στο χρήστη άμεσης επιλογής των μεταλλικών χαλύβδινων πλαισίων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την υποστήριξη της διατομής. Σημειώνεται πως το πρόγραμμα δέχεται ως παραμέτρους τα μηχανικά χαρακτηριστικά του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και του χαλύβδινου πλαισίου υπολογίζοντας μία νέα διατομή η οποία φέρει ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας E_{eq} και ισοδύναμο πάχος t_{eq} [5]. Η κατανομή των φορτίων πραγματοποιείται στη νέα διατομή.

Ήλοι με τσιμεντοκονίαμα (mortar spiles) υαλόκαρφα από fiberglass

Σημειώνεται πως οι ήλοι με τσιμεντοκονίαμα και τα υαλόκαρφα επηρεάζουν το συντελεστή αποτόνωσης λ και η εισαγωγή τους στο πρόγραμμα εργασίας του Phase2 είναι έμμεση καθώς η ανάλυση μας γίνεται σε 2 διαστάσεις. Στις παραμετρικές αναλύσεις ο συντελεστής αποτόνωσης αποτελεί δεδομένο εισαγωγής και προσομοιώνεται μέσω της εσωτερικής ιδεατής πίεσης: $p_i = (1-\lambda)*p$.

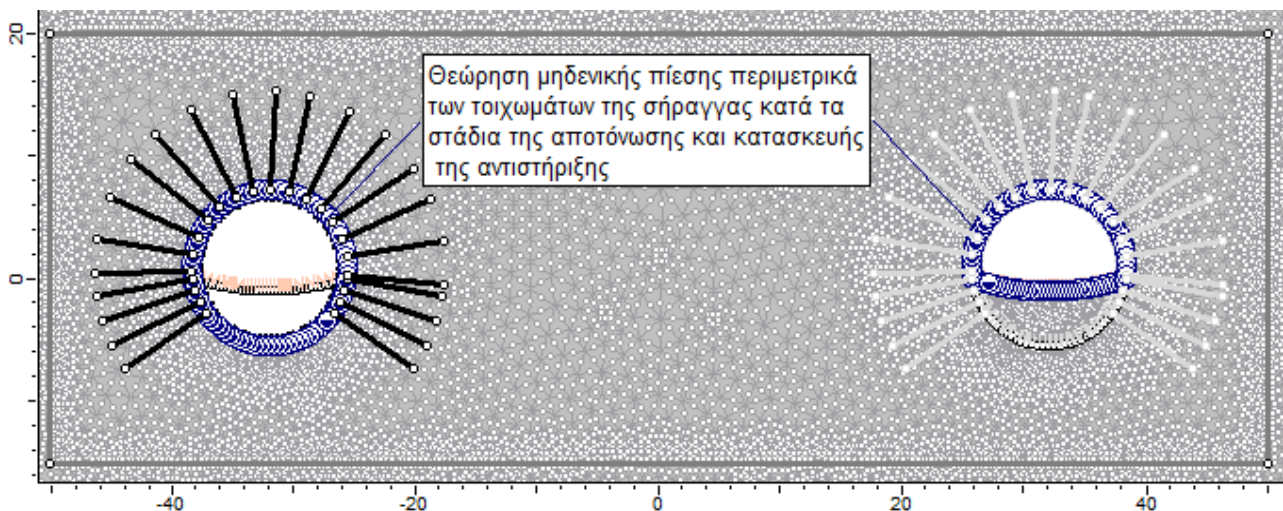
5.2.5. Ανάλυση με ύπαρξη Υδροφόρου Ορίζοντα (Υ.Ο)

Σε επιλεγμένες περιπτώσεις πραγματοποιήθηκε ανάλυση με ύπαρξη υδροφόρου ορίζοντα. Η επίλυση του υδραυλικού προβλήματος έγινε με θεώρηση των κατάλληλων, υδραυλικών, συνοριακών συνθηκών στα σύνορα του μοντέλου και στην εκσκαφή, και υπολογισμό του καταβιβασμού της στάθμης του Υ.Ο. λόγω της διάνοιξης της σήραγγας.

Ο υδροφόρος ορίζοντας βάσει της τεχνικής μελέτης [18] βρίσκεται 185m από τη στέψη των σηράγγων.

Σημειώνεται πως, προβλέπεται ελαχιστοποίηση της πίεσης του νερού μέσω επιπρόσθετων οπών αποστράγγισης στο μανδύα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Το αποστραγγιζόμενο νερό μεταφέρεται στις εισόδους της σήραγγας. Επιπλέον, το διηθούμενο νερό στην επιφάνεια εκσκαφής πρέπει να αποστραγγίζεται από με ειδικούς χυτούς και πλαστικούς αγωγούς κάτω από στον πυθμένα.

Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στο πρόγραμμα ώστε να είναι δυνατή η ρεαλιστική προσομοίωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα και της πίεσης των πόρων περιλαμβάνουν την απαίτηση ότι η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα στα πλευρικά όρια παραμένει στα 192m άνω του δαπέδου της Α' φάσης εκσκαφής. Ακόμη, η περατότητα του γεωυλικού ορίστηκε ίση με 10^{-7} m/s, τιμή που επιλέχθηκε στη τεχνικογεωλογική μελέτη. Επιπλέον, έγινε η θεώρηση μηδενικής πίεσης πόρων περιμετρικά των τοιχωμάτων της σήραγγας κατά τα στάδια της αποτόνωσης αλλά και εγκατάστασης των μέτρων υποστήριξης.



Σχήμα 5.19: Ανάλυση με ύπαρξη υδροφόρου ορίζοντα - Ελαχιστοποίηση πίεσης στα τοιχώματα της σήραγγας

5.2.6. Ερπυσμός

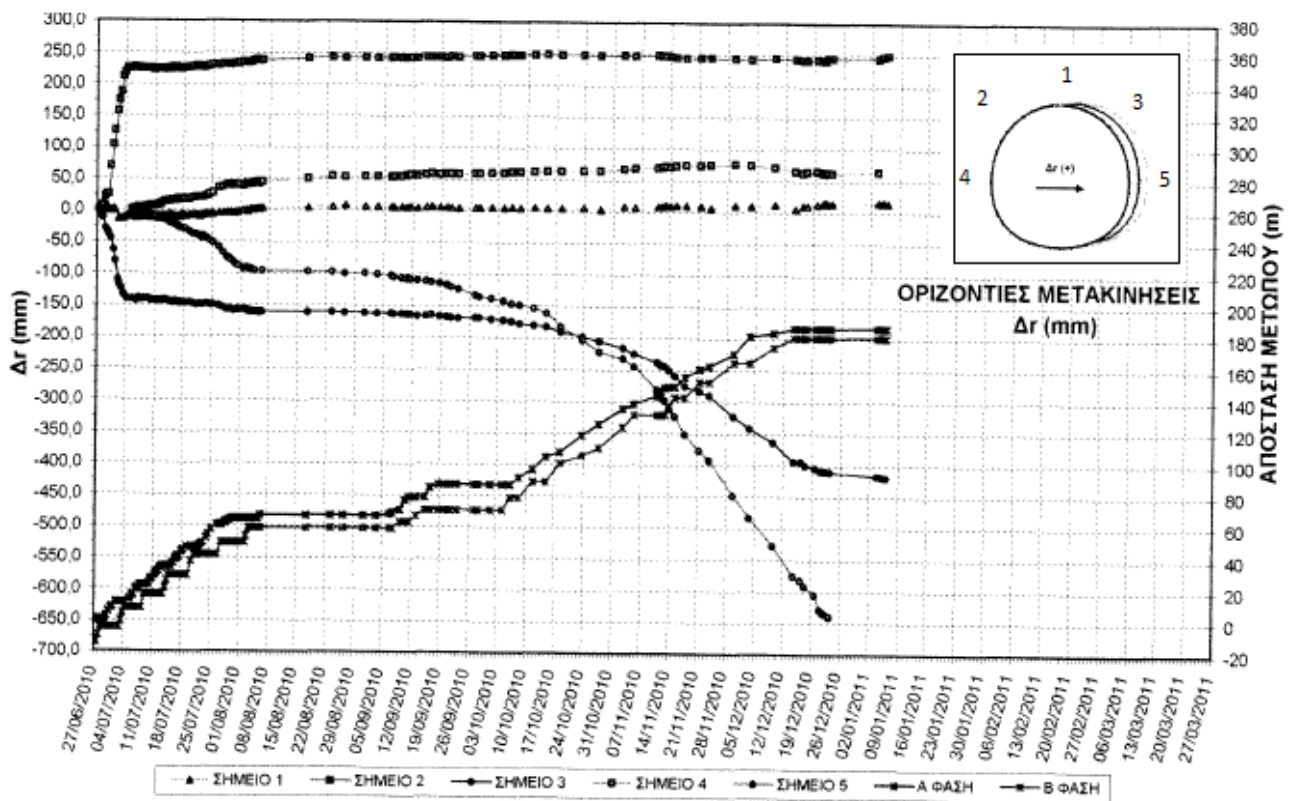
Για όλες τις προσομοιώσεις, πραγματοποιήθηκε ανάλυση με παρουσία του φαινομένου ερπυσμού. Για την ανάλυση προσομοιώθηκε μία περιοχή περιμετρικά των δύο σηράγγων, σε απόσταση μίας διαμέτρου από τα τοιχώματα, με απομειωμένο μέτρο ελαστικότητας. Η προσομοίωση του φαινομένου του ερπυσμού πραγματοποιείται κατά το στάδιο 11, όπως περιγράφηκε κατά την παράγραφο 5.2.2.

5.3. Καταγεγραμμένες συγκλίσεις διατομών

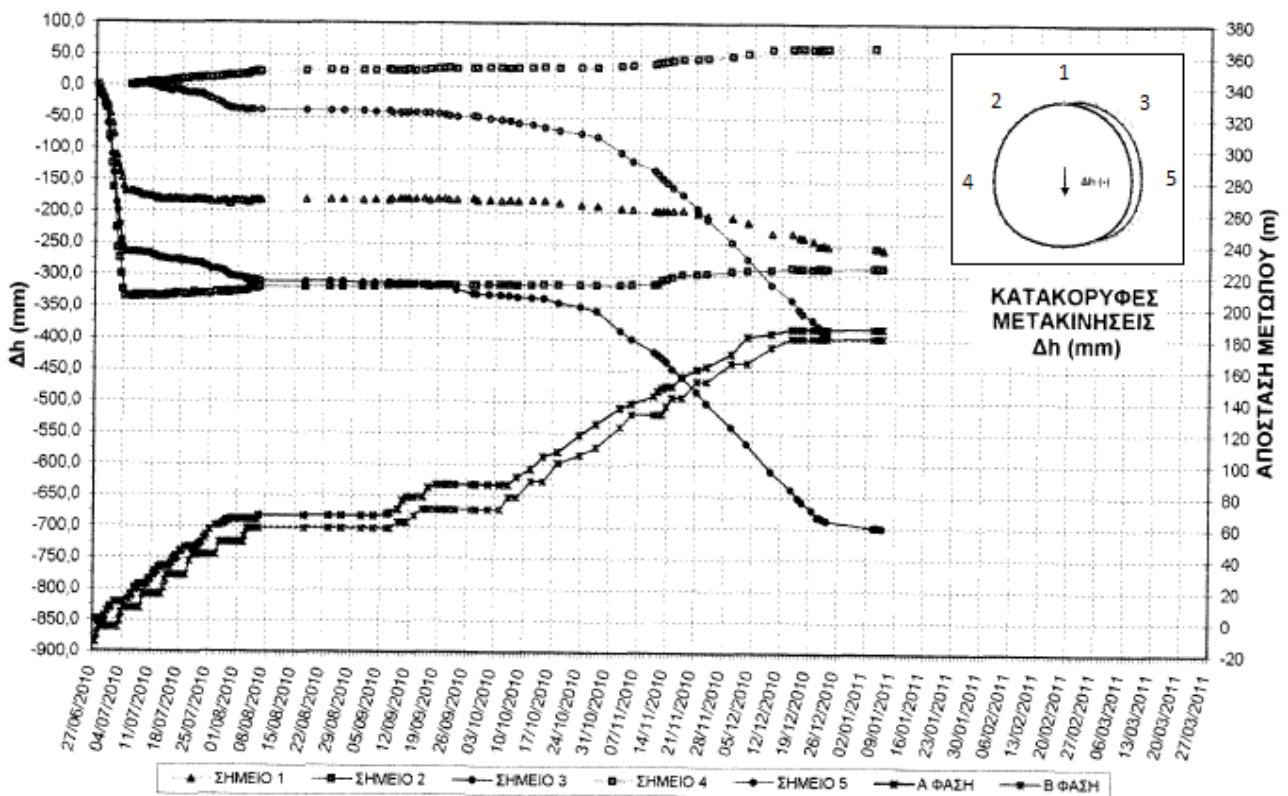
Στη συγκεκριμένη παράγραφο, παρουσιάζονται στοιχεία από τις συγκλίσεις που παρουσίασαν οι διατομές, του υπό μελέτη προφίλ, κατά τη κατασκευή τους στη σήραγγα Καλλιδρόμου. Η ύπαρξη πραγματικών μετακινήσεων αποτελεί ένα πολύ σημαντικό βήμα για τη σωστή προσομοίωση μέσω ανάστροφων αναλύσεων της διαδικασίας διάνοιξης και υποστήριξης των υπό μελέτη διατομών. Σε επόμενες παραμέτρους πρόκειται να παρατεθούν και να εξετασθούν τα αποτελέσματα των συγκλίσεων όπως ελήφθησαν από την ΕΡΓΟΣΕ σε σχέση με τις συγκλίσεις που υπολογίσθηκαν με το πρόγραμμα Phase2.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το υπό εξέταση εδαφικό προφίλ ανήκει στο νότιο τμήμα της σήραγγας Καλλιδρόμου, στο σχηματισμό του σχιστώδη σερπεντινίτη και συγκεκριμένα μεταξύ των χιλιομετρικών θέσεων 9+021,55 μέχρι 9+111,55 του νότιου αριστερού κλάδου.

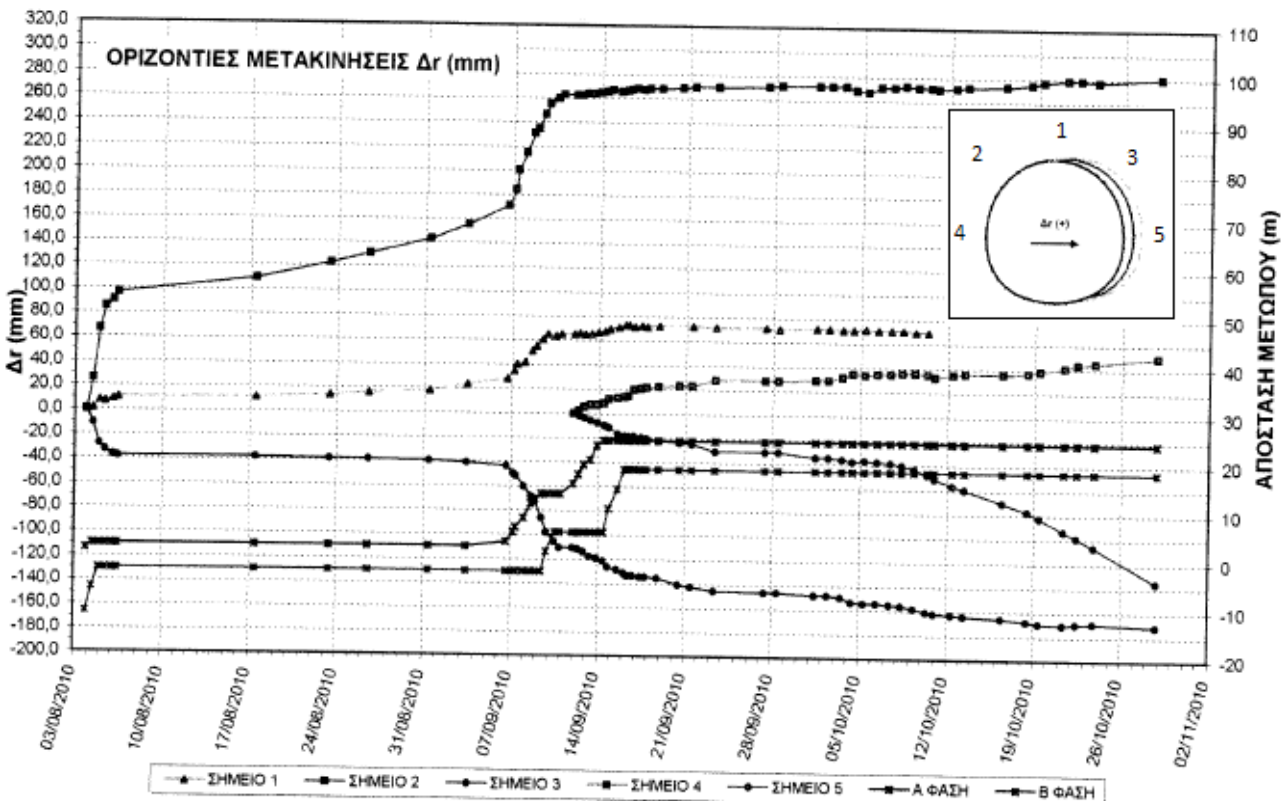
Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των συγκλίσεων για τον αριστερό κλάδο στη Χ.Θ. 9+064,35 και για το δεξιό κλάδο στις Χ.Θ. 9+063,40 και 9+080,05. Σημειώνεται η ανακατασκευή των συγκεκριμένων διατομών λόγω των συγκλίσεων που παρουσίασαν.



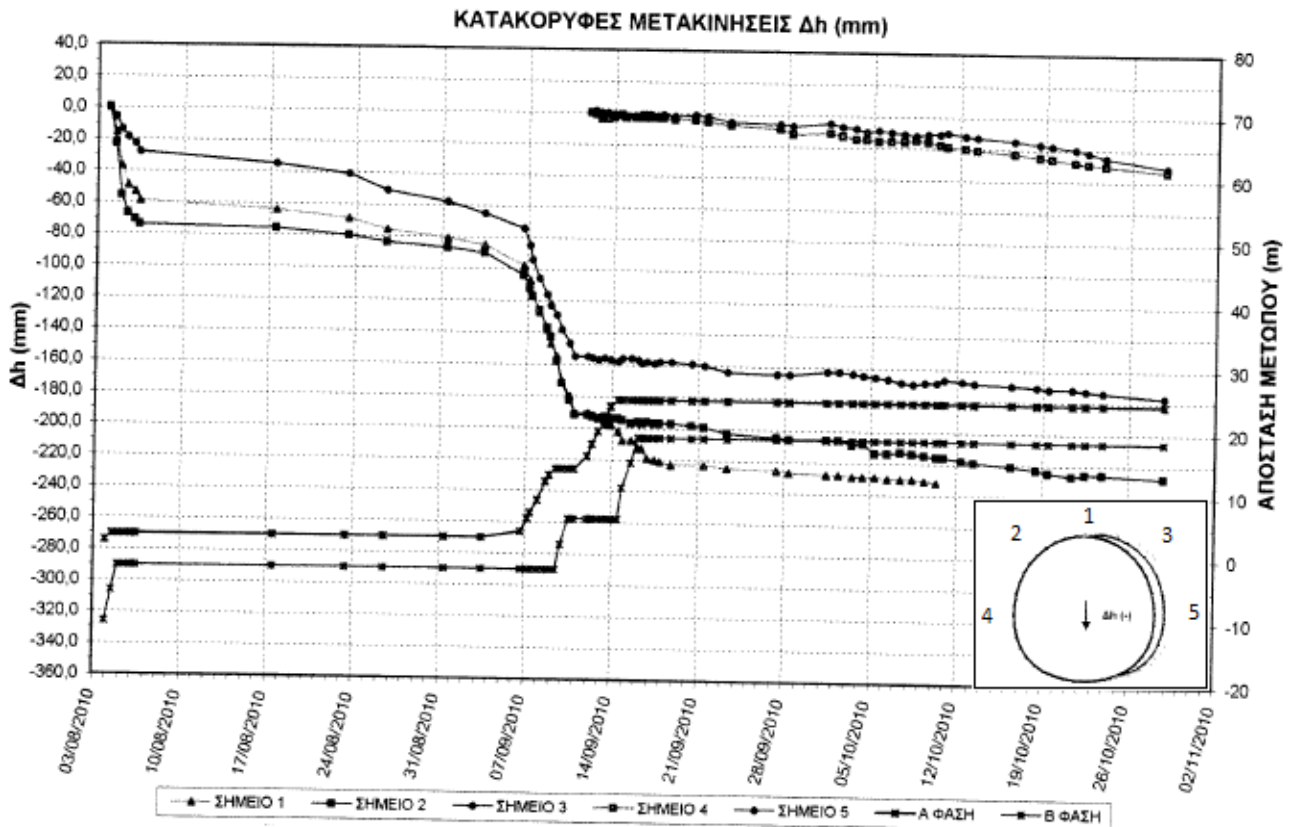
Σχήμα 5.20: Οριζόντιες μετακινήσεις στη Χ.Θ 9+064,35 του αριστερού κλάδου των νοτίων μετώπων κατά το χρονικό διάστημα 27/06/2010 με 27/03/2011. Η άνω δεξιά παρειά της σήραγγας (σημείο 2) μετακινήθηκε προς το εσωτερικό κατά 420mm ενώ η άνω αριστερή (σημείο 3) κατά 249mm [22]



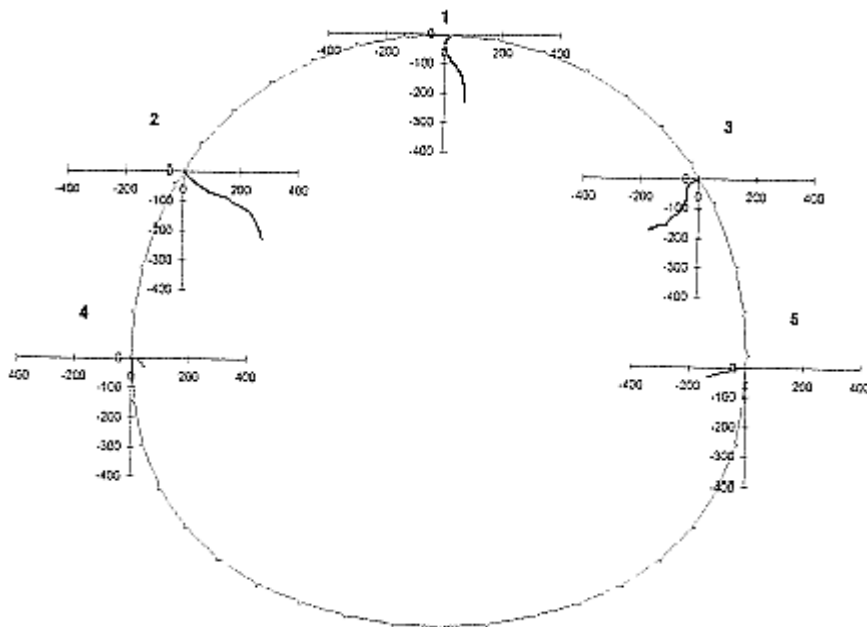
Σχήμα 5.21: Κατακόρυφες μετακινήσεις στη Χ.Θ 9+064,35 του αριστερού κλάδου των νοτίων μετώπων κατά το χρονικό διάστημα 27/06/2010 με 27/03/2011. Η άνω δεξιά παρειά της σήραγγας βυθίστηκε κατά 287mm, η άνω αριστερή βυθίστηκε κατά 700mm και η στέψη βυθίστηκε κατά 258mm [22]



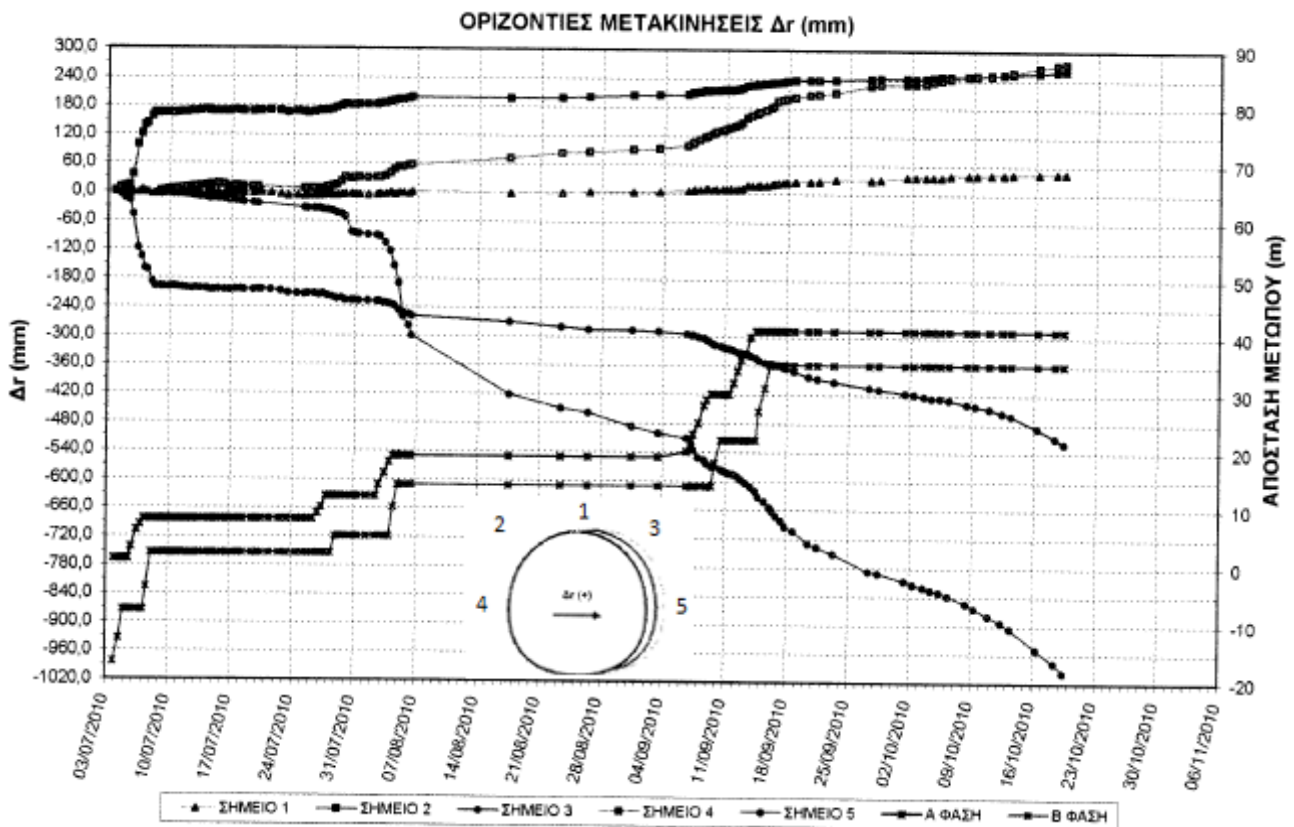
Σχήμα 5.22: Οριζόντιες μετακινήσεις στη Χ.Θ 9+080,05 του δεξιού κλάδου των νοτίων μετώπων κατά το χρονικό διάστημα 03/08/2010 με 2/11/2010. Η άνω δεξιά παρειά της σήραγγας μετακινήθηκε προς το εσωτερικό κατά 171mm ενώ η άνω αριστερή κατά 280mm [22]



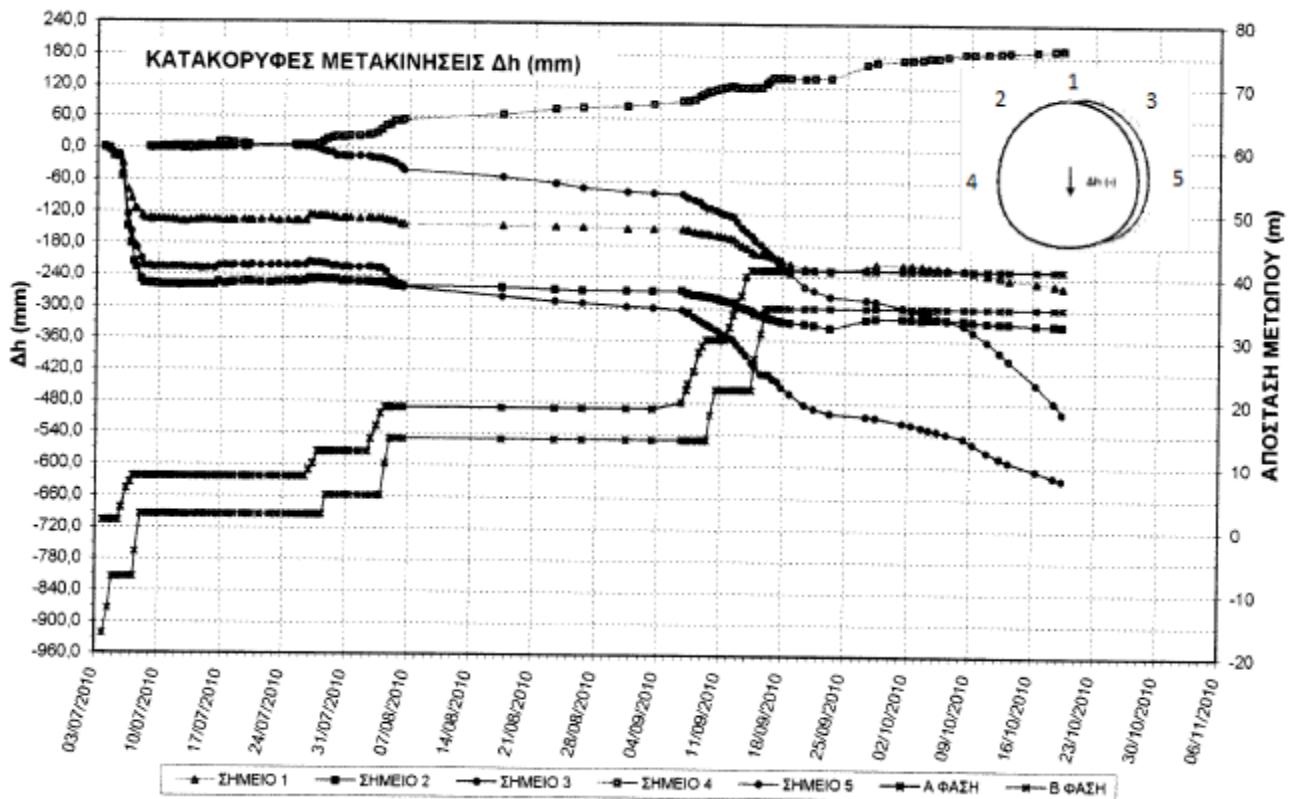
Σχήμα 5.23: Κατακόρυφες μετακινήσεις στη Χ.Θ 9+080,05 του δεξιού κλάδου των νοτίων μετώπων κατά το χρονικό διάστημα 03/08/2010 με 2/11/2010. Η άνω δεξιά παρειά της σήραγγας βυθίστηκε κατά 177mm, η άνω αριστερή βυθίστηκε κατά 228mm και η στέψη βυθίστηκε κατά 232mm [22]



Σχήμα 5.24: Συνολικές μετακινήσεις στη Χ.Θ. 9+080,5 του δεξιού κλάδου των νοτίων μετώπων κατά το χρονικό διάστημα 03/08/2010 με 2/11/2010. Η συνολική μετακίνηση της αριστερής παρειάς (σημείο 2) ξεπερνάει τα 360mm [22]



Σχήμα 5.25: Οριζόντιες μετακινήσεις στη Χ.Θ 9+063,10 του δεξιού κλάδου των νοτίων μετώπων κατά το χρονικό διάστημα 03/07/2010 με 19/10/2010. Η κάτω δεξιά παρειά της σήραγγας μετακινήθηκε προς το εσωτερικό κατά 997mm [22]



Σχήμα 5.26: Κατακόρυφες μετακινήσεις στη Χ.Θ 9+063,40 του δεξιού κλάδου των νοτίων μετώπων κατά το χρονικό διάστημα 03/07/2010 με 19/10/2010. Η άνω δεξιά παρειά της σήραγγας βυθίστηκε κατά 177mm, η άνω αριστερή βυθίστηκε κατά 623mm και η στέψη βυθίστηκε κατά 257mm [22]

5.4. Παράμετροι και παραδοχές σχεδιασμού

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται επιλεγμένα προσομοιώματα - προφίλ βραχομάζας βάσει των οποίων πραγματοποιούνται οι παραμετρικές αναλύσεις. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η γεωμετρία του μοντέλου, το γενικό προφίλ αντιπροσωπεύει το νότιο μέτωπο της σήραγγας Καλλιδρόμου στο σχηματισμό του σχιστώδη σερπεντινίτη. Λεπτομέρειες σχετικά με τη γεωμετρία του μοντέλου, τα στάδια αλλά και τον τρόπο προσομοίωσης έχουν παρουσιαστεί στην παράγραφο 5.2.

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν καθώς και οι επιμέρους τους τιμές σχεδιασμού όπως εισήχθησαν στο περιβάλλον του προγράμματος Phase2. Οι γεωτεχνικές παράμετροι που μεταβλήθηκαν για τις παραμετρικές αναλύσεις είναι το μέτρο ελαστικότητας (E), η συνοχή υλικού (c), το απομειωμένο μέτρο ελαστικότητας για την προσομοίωση ερπυστικών φαινομένων (E_{cr}) και ο συντελεστής αποτόνωσης λ του εδαφικού υλικού κατά τα στάδια εκσκαφής της σήραγγας. Οι αναλύσεις 002PP, 005PP, 008PP και 019PP έχουν πραγματοποιηθεί με ύπαρξη υδροφόρου ορίζοντα. Άλλες παράμετροι οι οποίες εμφανίζονται στον κάτωθι πίνακα και δεν μεταβάλλονται είναι ο λόγος Poisson (ν), η γωνία τριβής υλικού (ϕ) και η γωνία διασταλτικότητας (ψ).

(a/a)	E	ν	c	ϕ	ψ	E_{cr}	λ
	(MPa)		(kPa)	(deg)	(deg)	(MPa)	
001	400	0,25	100	24	0	200	0,6
002	400	0,25	200	24	0	200	0,6
003	400	0,25	300	24	0	200	0,6
004	600	0,25	100	24	0	300	0,6
005	600	0,25	200	24	0	300	0,6
006	600	0,25	300	24	0	300	0,6
007	800	0,25	100	24	0	400	0,6
008	800	0,25	200	24	0	400	0,6
009	800	0,25	300	24	0	400	0,6
010	400	0,25	100	24	0	200	0,7
011	400	0,25	200	24	0	200	0,7
012	400	0,25	300	24	0	200	0,7
013	600	0,25	100	24	0	300	0,7
014	600	0,25	200	24	0	300	0,7
015	600	0,25	300	24	0	300	0,7
016	800	0,25	100	24	0	400	0,7
017	800	0,25	200	24	0	400	0,7
018	800	0,25	300	24	0	400	0,7
019	1000	0,25	200	24	0	900	0,6
002 PP	400	0,25	200	24	0	200	0,6
005 PP	600	0,25	200	24	0	300	0,6
008 PP	800	0,25	200	24	0	400	0,6
019 PP	1000	0,25	200	24	0	900	0,6

Πίνακας 5.1: Προσομοιώσεις και γεωτεχνικές παράμετροι που επιλέχθηκαν

5.5. Αποτελέσματα ανάστροφων αναλύσεων

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των ανάστροφων αναλύσεων ανά περιπτώσεις, προσομοιώματα, όπως πραγματοποιήθηκαν με το λογισμικό Phase2. Παρατίθενται οι συγκλίσεις που υπολογίστηκαν σε κάθε προσομοίωμα ενώ στην περίπτωση 019pp παρατίθενται επιπλέον αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων.

5.5.1. Προσομοίωση 001

Η προσομοίωση του υπό μελέτη εδαφικού προφίλ, στο νότιο μέτωπο της σήραγγας Καλλιδρόμου στο σχηματισμό του σχιστώδη σερπεντινίτη (se.s), πραγματοποιήθηκε βάσει των τιμών: $E= 400 \text{ MPa}$, $\nu= 0,25$, $c= 100 \text{ kPa}$, $\varphi= 24 \text{ deg}$, $\psi= 0 \text{ deg}$, $E_{cr}= 200 \text{ MPa}$, $\lambda=0,6$.

Λεπτομέρειες σχετικά με τη γεωμετρία της διατομής των σηράγγων και τη γενικότερη γεωμετρία του εδαφικού προφίλ έχουν δοθεί στη παράγραφο 5.2.

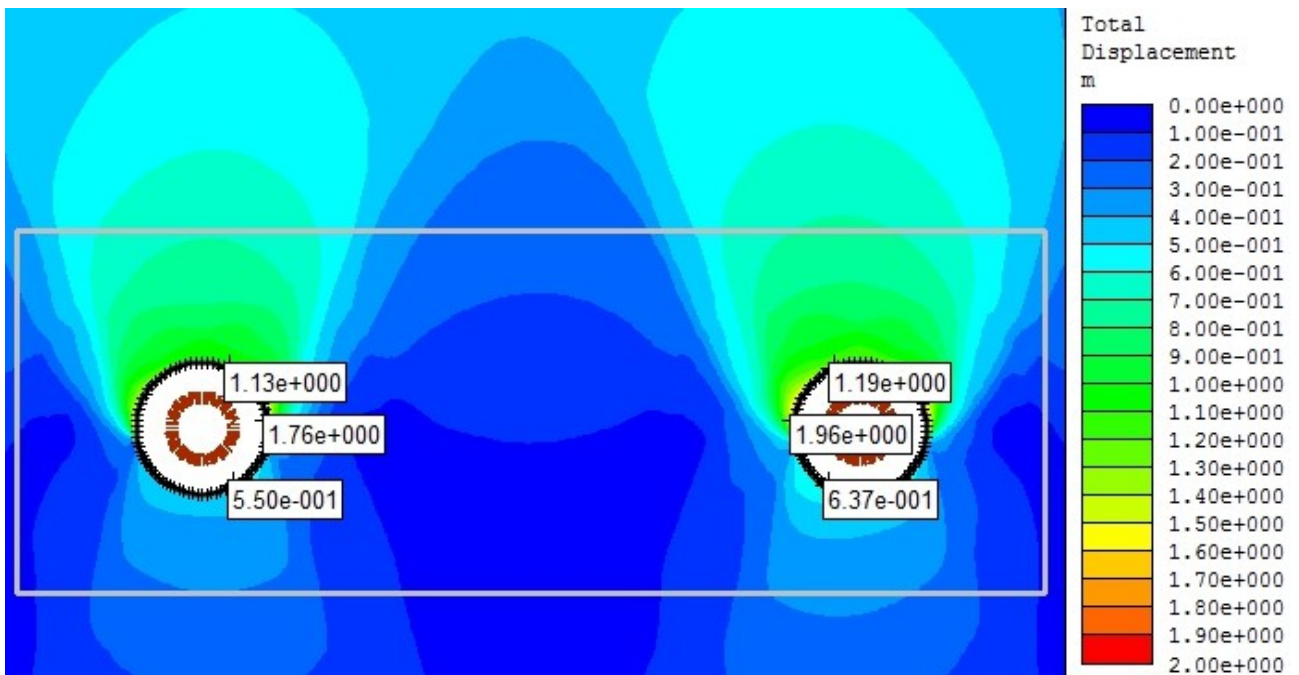
Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των συγκλίσεων του αριστερού και του δεξιού κλάδου της σήραγγας Καλλιδρόμου όπως υπολογίστηκαν σε συγκεκριμένα στάδια. Τα σημεία τα οποία έχουν επιλεγεί για μέτρηση των συγκλίσεων εντοπίζονται στο θόλο της διατομής, στην παρειά και στον πυθμένα.

Αναφέρεται πως οι μετατοπίσεις των εδαφικών στοιχείων στο γεωστατικό στάδιο 1 είναι μηδενικές γεγονός που ανταποκρίνεται στη πραγματικότητα. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι υπολογισμένες συγκλίσεις του δεξιού και αριστερού κλάδου κατά τα στάδια αποτόνωσης (συγκλίσεις κατά την Α' φάση εκσκαφής για θόλο και παρειά και συγκλίσεις κατά τη Β' φάση εκσκαφής για τον πυθμένα), τοποθέτησης άμεσης υποστήριξης έπειτα από τη Β' φάση εκσκαφής, τοποθέτησης της τελικής επένδυσης και προσομοίωσης του φαινομένου ερπυσμού.

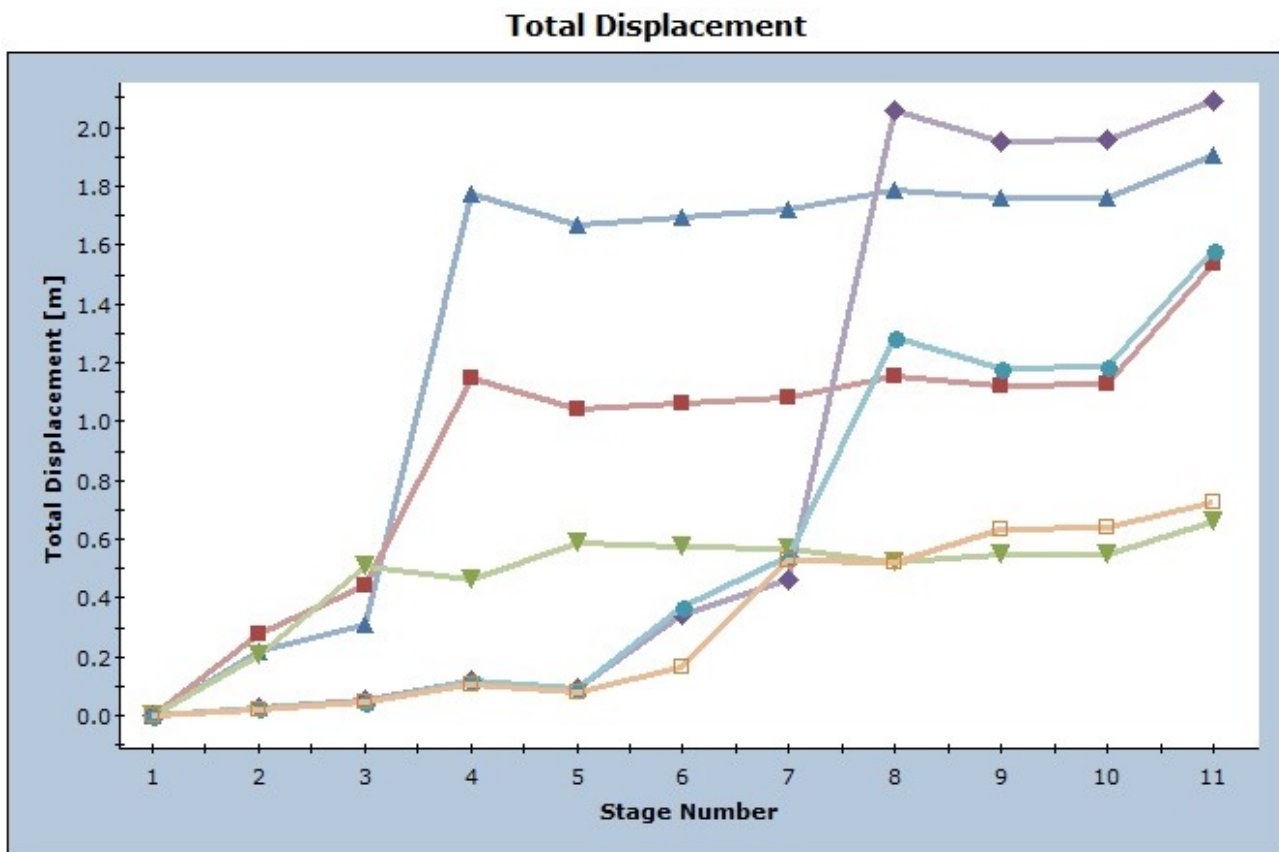
Σταδιο Προσομοίωσης – Stage	Αριστερή σήραγγα	Δεξιά σήραγγα	Αριστερή σήραγγα συγκλίσεις (m)			Δεξιά σήραγγα συγκλίσεις (m)		
			θόλος	παρειά	πυθμένας	θόλος	παρειά	πυθμένας
			u_{crown}	u_{side}	u_{bottom}	u_{crown}	u_{side}	u_{bottom}
Γεωστατικό πεδίο	1	1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Αποτόνωση	2	6	0,282	0,252	-	0,372	0,384	-
Αποτόνωση	4	8	-	-	0,462	-	-	0,520
Άμεση Υποστήριξη	5	9	1,040	1,670	0,588	1,180	1,960	0,633
Τελική επένδυση	10	10	1,130	1,760	0,550	1,190	1,960	0,637
Ερπυσμός	11	11	1,540	1,910	0,657	1,580	2,090	0,727

Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα συγκλίσεων για την προσομοίωση 001

Παρατηρούμε ότι για τις επιλεγμένες γεωτεχνικές παραμέτρους οι συγκλίσεις στο θόλο του αριστερού και δεξιού κλάδου υπολογίστηκαν 1,13m και 1,19m αντίστοιχα στο στάδιο 10 της τελικής επένδυσης. Κατά το στάδιο αυτό, οι τελικές μετακινήσεις (συγκλίσεις) που υπολογίστηκαν στις παρειά του αριστερού και δεξιού κλάδου είναι ίσες με 1,76m και 1,96m αντίστοιχα. Στο δάπεδο του πυθμένα, επιπλέον, υπολογίστηκαν οι συγκλίσεις του αριστερού και δεξιού κλάδου ίσες με 0,550m και 0,637m αντίστοιχα. Παρουσιάζονται παρακάτω γραφικά οι τιμές των τελικών συγκλίσεων περιμετρικά των σηράγγων στο στάδιο 10 της τελικής επένδυσης. Επιπλέον για αυτά τα έξι αντιπροσωπευτικά σημεία, δίδεται διάγραμμα εξέλιξης των συγκλίσεων ανά στάδιο προσομοίωσης.



Σχήμα 5.27: Συνολικές μετακινήσεις (συγκλίσεις) κατά το στάδιο 10 περιμετρικά των σηράγγων (προσομοίωση 001)



Σχήμα 5.28: Εξέλιξη συνολικών μετακινήσεων (συγκλίσεις) ανά στάδιο προσομοίωσης σε έξι χαρακτηριστικά σημεία των δύο κλάδων (προσομοίωση 001)

5.5.2. Προσομοίωση 002

Η προσομοίωση του υπό μελέτη εδαφικού προφίλ, στο νότιο μέτωπο της σήραγγας Καλλιδρόμου στο σχηματισμό του σχιστώδη σερπεντινίτη (se.s), πραγματοποιήθηκε βάσει των τιμών: $E= 400 \text{ MPa}$, $\nu= 0,25$, $c= 200 \text{ kPa}$, $\varphi= 24 \text{ deg}$, $\psi= 0 \text{ deg}$, $E_{cr}= 200 \text{ MPa}$, $\lambda=0,6$.

Λεπτομέρειες σχετικά με τη γεωμετρία της διατομής των σηράγγων και τη γενικότερη γεωμετρία του εδαφικού προφίλ έχουν δοθεί στη παράγραφο 5.2.

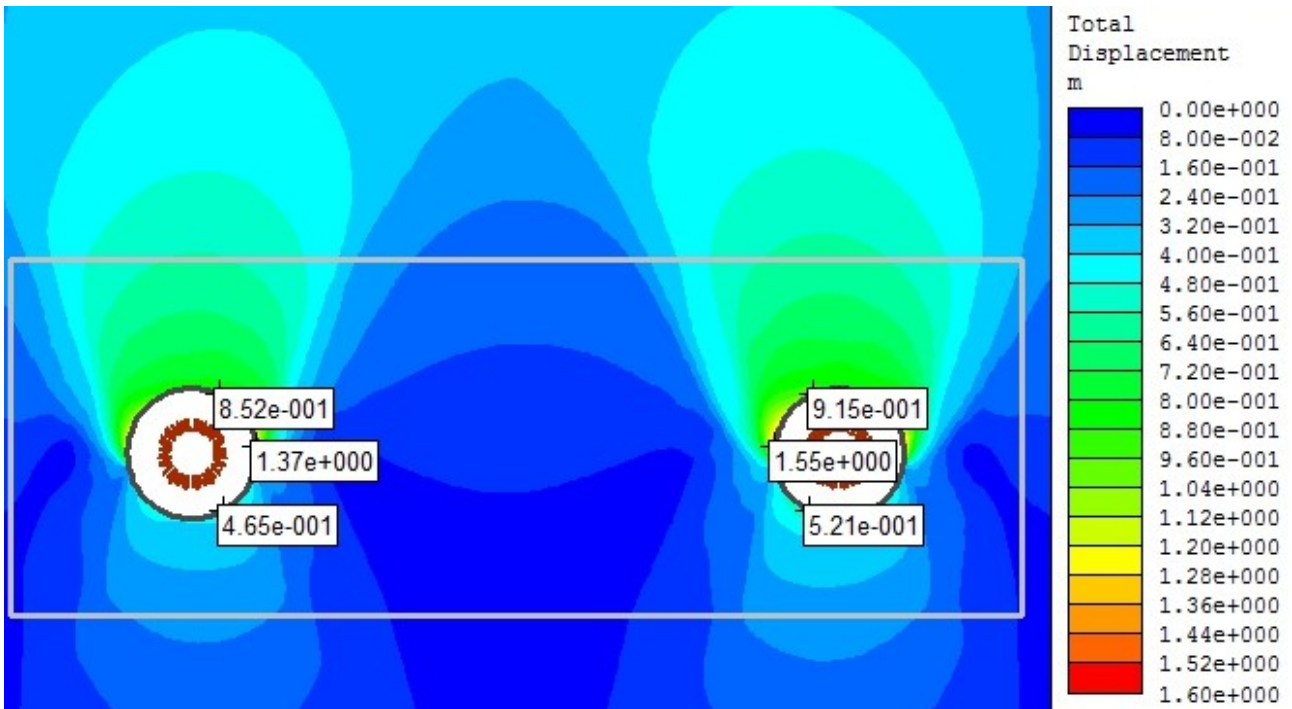
Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των συγκλίσεων του αριστερού και του δεξιού κλάδου της σήραγγας Καλλιδρόμου όπως υπολογίσθηκαν σε συγκεκριμένα στάδια. Τα σημεία τα οποία έχουν επιλεχθεί για μέτρηση των συγκλίσεων εντοπίζονται στο θόλο της διατομής, στην παρειά και στον πυθμένα.

Αναφέρεται πως οι μετατοπίσεις των εδαφικών στοιχείων στο γεωστατικό στάδιο 1 είναι μηδενικές γεγονός που ανταποκρίνεται στη πραγματικότητα. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι υπολογισμένες συγκλίσεις του δεξιού και αριστερού κλάδου κατά τα στάδια αποτόνωσης (συγκλίσεις κατά την Α' φάση εκσκαφής για θόλο και παρειές και συγκλίσεις κατά τη Β' φάση εκσκαφής για τον πυθμένα), τοποθέτησης άμεσης υποστήριξης έπειτα από τη Β' φάση εκσκαφής, τοποθέτησης της τελικής επένδυσης και προσομοίωσης του φαινομένου ερπυσμού.

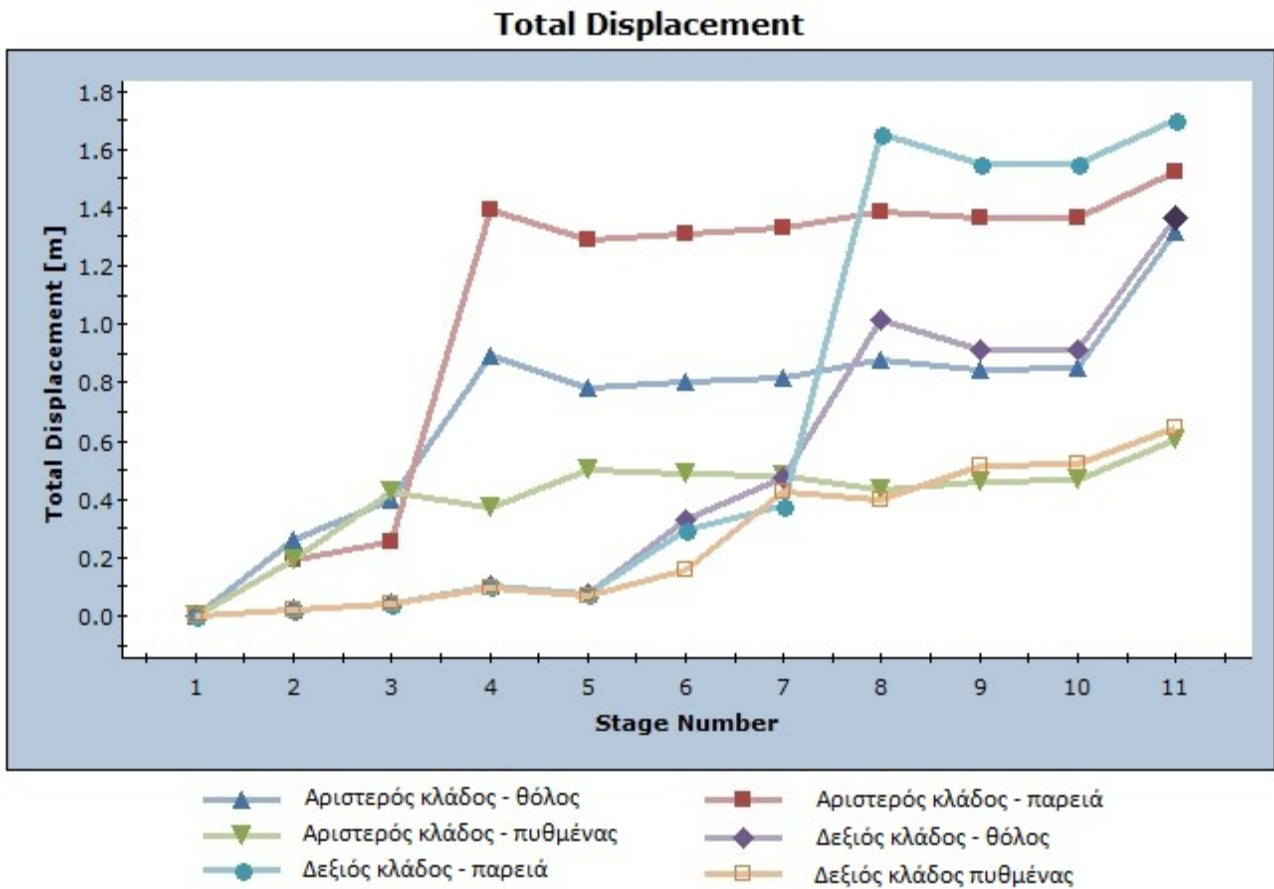
Σταδιο Προσομοίωσης – Stage	Αριστερή σήραγγα	Δεξιά σήραγγα	Αριστερή σήραγγα συγκλίσεις (m)			Δεξιά σήραγγα συγκλίσεις (m)		
			θόλος	παρειά	πυθμένας	θόλος	παρειά	πυθμένας
			u_{crown}	u_{side}	u_{bottom}	u_{crown}	u_{side}	u_{bottom}
Γεωστατικό πεδίο	1	1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Αποτόνωση	2	6	0,259	0,228	-	0,332	0,330	-
Αποτόνωση	4	8	-	-	0,372	-	-	0,398
Άμεση Υποστήριξη	5	9	0,783	1,290	0,501	0,912	1,550	0,517
Τελική επένδυση	10	10	0,852	1,370	0,465	0,915	1,550	0,521
Ερπυσμός	11	11	1,320	1,550	0,606	1,360	1,710	0,646

Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα συγκλίσεων για την προσομοίωση 002

Παρατηρούμε ότι για τις επιλεγμένες γεωτεχνικές παραμέτρους οι συγκλίσεις στο θόλο του αριστερού και δεξιού κλάδου υπολογίσθηκαν 0,852m και 0,915m αντίστοιχα στο στάδιο 10 της τελικής επένδυσης. Κατά το στάδιο αυτό, οι τελικές μετακινήσεις (συγκλίσεις) που υπολογίσθηκαν στις παρειές του αριστερού και δεξιού κλάδου είναι ίσες με 1,370m και 1,550m αντίστοιχα. Στο δάπεδο του πυθμένα, επιπλέον, υπολογίσθηκαν οι συγκλίσεις του αριστερού και δεξιού κλάδου ίσες με 0,465m και 0,521m αντίστοιχα. Παρουσιάζονται παρακάτω γραφικά, στο υπό μελέτη εδαφικό προφίλ, οι τιμές των τελικών συγκλίσεων περιμετρικά των σηράγγων στο στάδιο 10 της τελικής επένδυσης. Επιπλέον για αυτά τα έξι αντιπροσωπευτικά σημεία, δίδεται διάγραμμα εξέλιξης των συγκλίσεων (τελικών μετακινήσεων) ανά στάδιο προσομοίωσης.



Σχήμα 5.29: Συνολικές μετακινήσεις (συγκλίσεις) κατά το στάδιο 10 περιμετρικά των σηράγγων (προσομοίωση 002)



Σχήμα 5.30: Εξέλιξη συνολικών μετακινήσεων (συγκλίσεις) ανά στάδιο προσομοίωσης σε έξι χαρακτηριστικά σημεία των δύο κλάδων (προσομοίωση 002)

5.5.3. Προσομοίωση 003

Η προσομοίωση του υπό μελέτη εδαφικού προφίλ, στο νότιο μέτωπο της σήραγγας Καλλιδρόμου στο σχηματισμό του σχιστώδη σερπεντινίτη (se.s), πραγματοποιήθηκε βάσει των τιμών: $E = 400 \text{ MPa}$, $\nu = 0,25$, $c = 300 \text{ kPa}$, $\varphi = 24 \text{ deg}$, $\psi = 0 \text{ deg}$, $E_{cr} = 200 \text{ MPa}$, $\lambda = 0,6$.

Λεπτομέρειες σχετικά με τη γεωμετρία της διατομής των σηράγγων και τη γενικότερη γεωμετρία του εδαφικού προφίλ έχουν δοθεί στη παράγραφο 5.2.

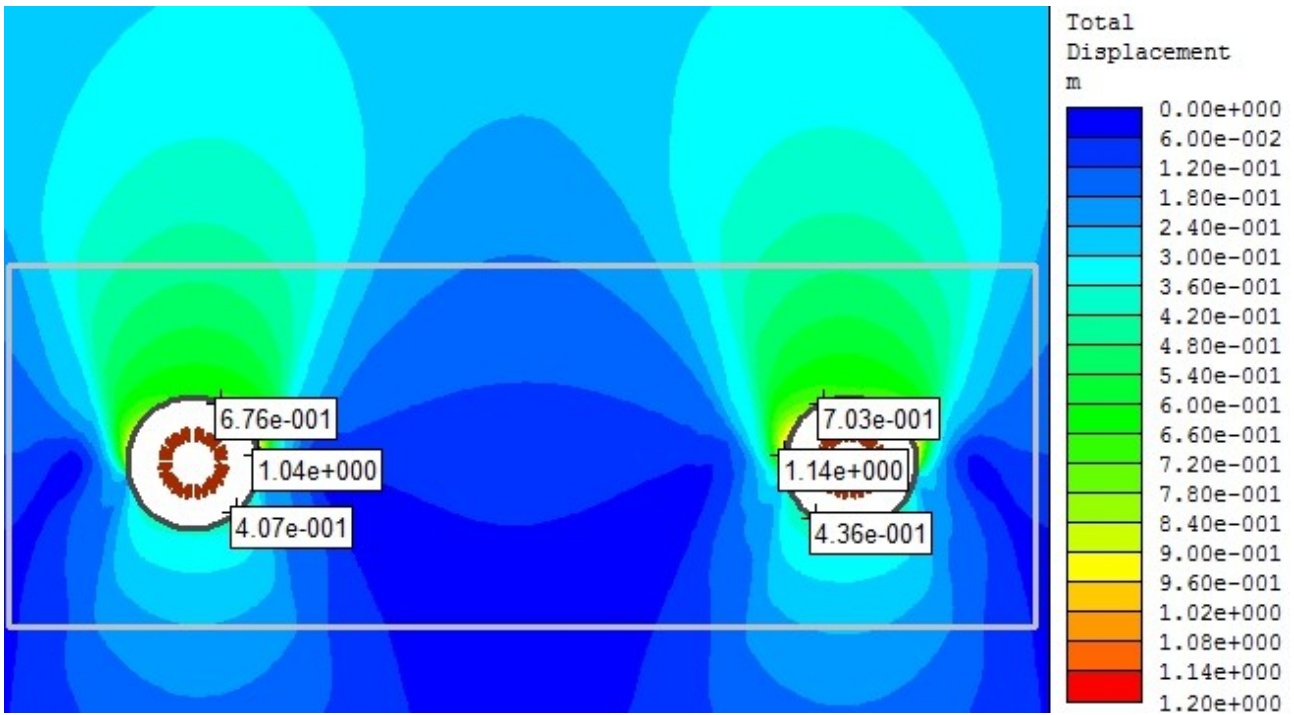
Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των συγκλίσεων του αριστερού και του δεξιού κλάδου της σήραγγας Καλλιδρόμου όπως υπολογίσθηκαν σε συγκεκριμένα στάδια. Τα σημεία τα οποία έχουν επιλεγεί για μέτρηση των συγκλίσεων εντοπίζονται στο θόλο της διατομής, στην παρειά και στον πυθμένα.

Αναφέρεται πως οι μετατοπίσεις των εδαφικών στοιχείων στο γεωστατικό στάδιο 1 είναι μηδενικές γεγονός που ανταποκρίνεται στη πραγματικότητα. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι υπολογισμένες συγκλίσεις του δεξιού και αριστερού κλάδου κατά τα στάδια αποτόνωσης (συγκλίσεις κατά την Α' φάση εκσκαφής για θόλο και παρειές και συγκλίσεις κατά τη Β' φάση εκσκαφής για τον πυθμένα), τοποθέτησης άμεσης υποστήριξης έπειτα από τη Β' φάση εκσκαφής, τοποθέτησης της τελικής επένδυσης και προσομοίωσης του φαινομένου ερπυσμού.

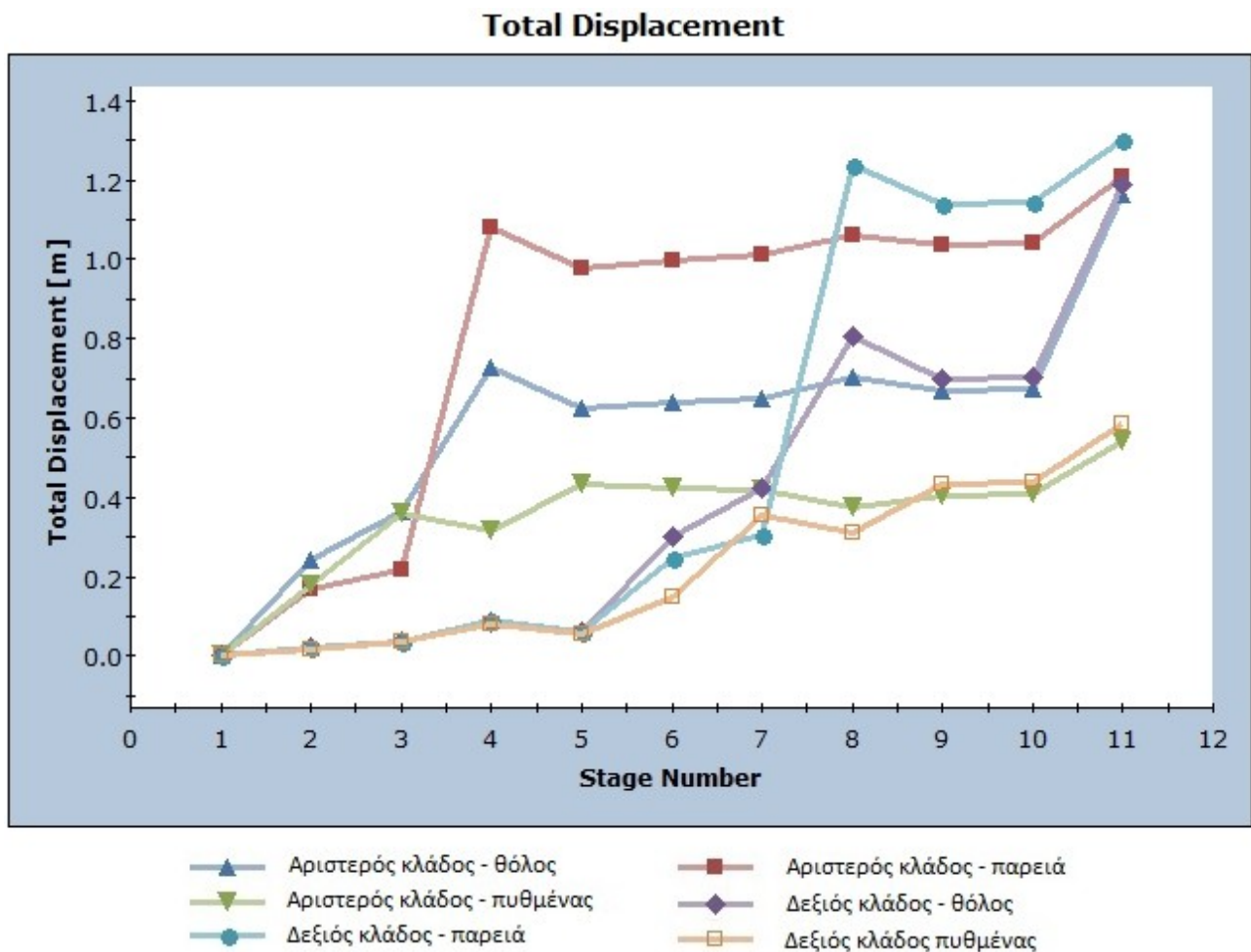
Σταδιο Προσομοίωσης - Stage	Αριστερή σήραγγα	Δεξιά σήραγγα	Αριστερή σήραγγα συγκλίσεις (m)			Δεξιά σήραγγα συγκλίσεις (m)		
			θόλος	παρειά	πυθμένας	θόλος	παρειά	πυθμένας
			u_{crown}	u_{side}	u_{bottom}	u_{crown}	u_{side}	u_{bottom}
Γεωστατικό πεδίο	1	1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Αποτόνωση	2	6	0,251	0,209	-	0,305	0,285	-
Αποτόνωση	4	8	-	-	0,307	-	-	0,312
Άμεση Υποστήριξη	5	9	0,623	0,979	0,438	0,700	1,140	0,432
Τελική επένδυση	10	10	0,676	1,040	0,407	0,703	1,140	0,436
Ερπυσμός	11	11	1,170	1,260	0,575	1,190	1,330	0,587

Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα συγκλίσεων για την προσομοίωση 003

Παρατηρούμε ότι για τις επιλεγμένες γεωτεχνικές παραμέτρους οι συγκλίσεις στο θόλο του αριστερού και δεξιού κλάδου υπολογίσθηκαν 0,676m και 0,703m αντίστοιχα στο στάδιο 10 της τελικής επένδυσης. Κατά το στάδιο αυτό, οι τελικές μετακινήσεις (συγκλίσεις) που υπολογίσθηκαν στις παρειές του αριστερού και δεξιού κλάδου είναι ίσες με 1,040m και 1,140m αντίστοιχα. Στο δάπεδο του πυθμένα, επιπλέον, υπολογίσθηκαν οι συγκλίσεις του αριστερού και δεξιού κλάδου ίσες με 0,407m και 0,436m αντίστοιχα. Παρουσιάζονται παρακάτω γραφικά, στο υπό μελέτη εδαφικό προφίλ, οι τιμές των τελικών συγκλίσεων περιμετρικά των σηράγγων στο στάδιο 10 της τελικής επένδυσης. Επιπλέον για αυτά τα έξι αντιπροσωπευτικά σημεία, δίδεται διάγραμμα εξέλιξης των συγκλίσεων (τελικών μετακινήσεων) ανά στάδιο προσομοίωσης.



Σχήμα 5.31: Συνολικές μετακινήσεις (συγκλίσεις) κατά το στάδιο 10 περιμετρικά των σηράγγων (προσομοίωση 003)



Σχήμα 5.32: Εξέλιξη συνολικών μετακινήσεων (συγκλίσεις) ανά στάδιο προσομοίωσης σε έξι χαρακτηριστικά σημεία των δύο κλάδων (προσομοίωση 003)

5.5.4. Προσομοίωση 004

Η προσομοίωση του υπό μελέτη εδαφικού προφίλ, στο νότιο μέτωπο της σήραγγας Καλλιδρόμου στο σχηματισμό του σχιστώδη σερπεντινίτη (se.s), πραγματοποιήθηκε βάσει των τιμών: $E= 600 \text{ MPa}$, $\nu= 0,25$, $c= 100 \text{ kPa}$, $\varphi= 24 \text{ deg}$, $\psi= 0 \text{ deg}$, $E_{cr}= 400 \text{ MPa}$, $\lambda=0,6$.

Λεπτομέρειες σχετικά με τη γεωμετρία της διατομής των σηράγγων και τη γενικότερη γεωμετρία του εδαφικού προφίλ έχουν δοθεί στη παράγραφο 5.2.

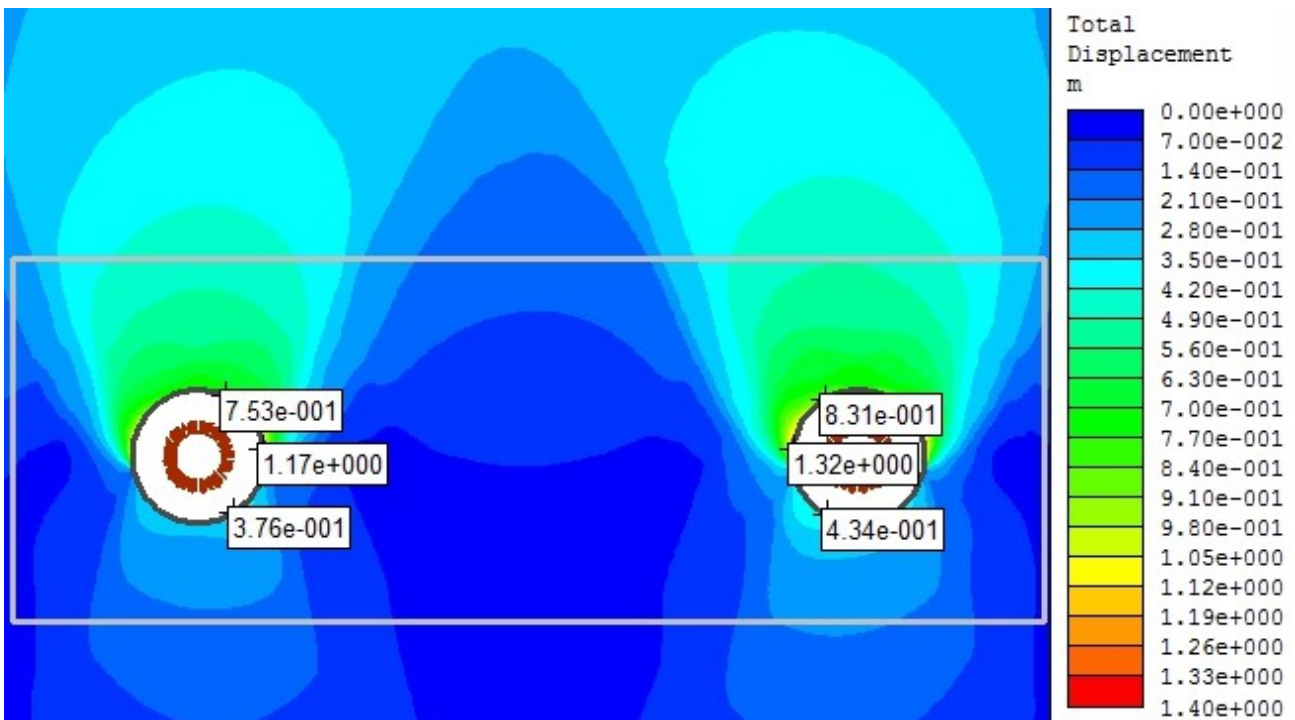
Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των συγκλίσεων του αριστερού και του δεξιού κλάδου της σήραγγας Καλλιδρόμου όπως υπολογίστηκαν σε συγκεκριμένα στάδια. Τα σημεία τα οποία έχουν επιλεγεί για μέτρηση των συγκλίσεων εντοπίζονται στο θόλο της διατομής, στην παρειά και στον πυθμένα.

Αναφέρεται πως οι μετατοπίσεις των εδαφικών στοιχείων στο γεωστατικό στάδιο 1 είναι μηδενικές γεγονός που ανταποκρίνεται στη πραγματικότητα. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι υπολογισμένες συγκλίσεις του δεξιού και αριστερού κλάδου κατά τα στάδια αποτόνωσης (συγκλίσεις κατά την Α' φάση εκσκαφής για θόλο και παρειές και συγκλίσεις κατά τη Β' φάση εκσκαφής για τον πυθμένα), τοποθέτησης άμεσης υποστήριξης έπειτα από τη Β' φάση εκσκαφής, τοποθέτησης της τελικής επένδυσης και προσομοίωσης του φαινομένου ερπυσμού.

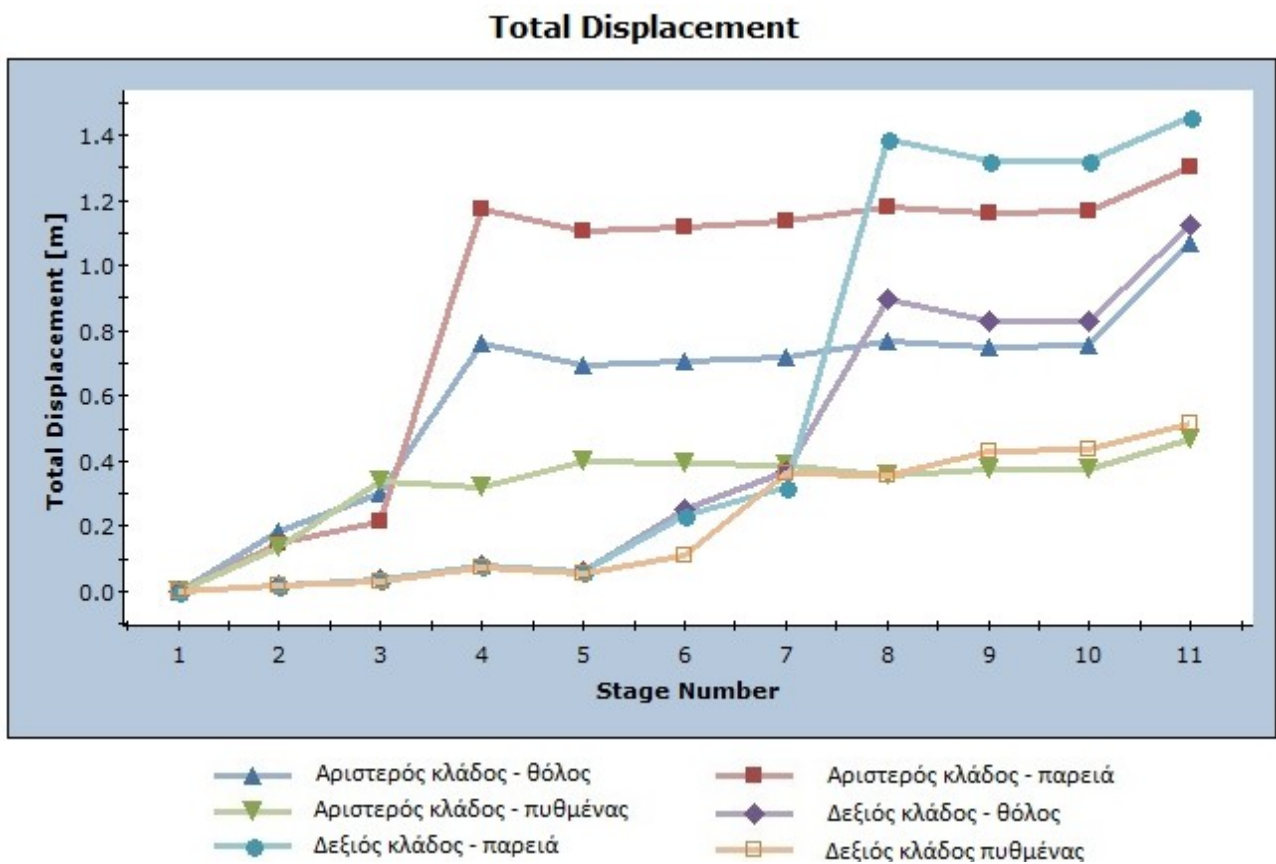
Σταδιο Προσομοίωσης – Stage	Αριστερή σήραγγα	Δεξιά σήραγγα	Αριστερή σήραγγα συγκλίσεις (m)			Δεξιά σήραγγα συγκλίσεις (m)		
			θόλος	παρειά	πυθμένας	θόλος	παρειά	πυθμένας
			u_{crown}	u_{side}	u_{bottom}	u_{crown}	u_{side}	u_{bottom}
Γεωστατικό πεδίο	1	1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Αποτόνωση	2	6	0,188	0,168	-	0,250	0,257	-
Αποτόνωση	4	8	-	-	0,317	-	-	0,354
Άμεση Υποστήριξη	5	9	0,696	1,100	0,399	0,828	1,320	0,432
Τελική επένδυση	10	10	0,753	1,170	0,376	0,831	1,320	0,434
Ερπυσμός	11	11	1,070	1,310	0,469	1,120	1,460	0,514

Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα συγκλίσεων για την προσομοίωση 004

Παρατηρούμε ότι για τις επιλεγμένες γεωτεχνικές παραμέτρους οι συγκλίσεις στο θόλο του αριστερού και δεξιού κλάδου υπολογίστηκαν 0,753m και 0,831m αντίστοιχα στο στάδιο 10 της τελικής επένδυσης. Κατά το στάδιο αυτό, οι τελικές μετακινήσεις (συγκλίσεις) που υπολογίστηκαν στις παρειές του αριστερού και δεξιού κλάδου είναι ίσες με 1,170m και 1,320m αντίστοιχα. Στο δάπεδο του πυθμένα, επιπλέον, υπολογίστηκαν οι συγκλίσεις του αριστερού και δεξιού κλάδου ίσες με 0,376m και 0,434m αντίστοιχα. Παρουσιάζονται παρακάτω γραφικά, στο υπό μελέτη εδαφικό προφίλ, οι τιμές των τελικών συγκλίσεων περιμετρικά των σηράγγων στο στάδιο 10 της τελικής επένδυσης. Επιπλέον για αυτά τα έξι αντιπροσωπευτικά σημεία, δίδεται διάγραμμα εξέλιξης των συγκλίσεων (τελικών μετακινήσεων) ανά στάδιο προσομοίωσης.



Σχήμα 5.33: Συνολικές μετακινήσεις (συγκλίσεις) κατά το στάδιο 10 περιμετρικά των σηράγγων (προσομοίωση 004)



Σχήμα 5.34: Εξέλιξη συνολικών μετακινήσεων (συγκλίσεις) ανά στάδιο προσομοίωσης σε έξι χαρακτηριστικά σημεία των δύο κλάδων (προσομοίωση 004)

5.5.5. Προσομοίωση 005

Η προσομοίωση του υπό μελέτη εδαφικού προφίλ, στο νότιο μέτωπο της σήραγγας Καλλιδρόμου στο σχηματισμό του σχιστώδη σερπεντινίτη (se.s), πραγματοποιήθηκε βάσει των τιμών: $E= 600 \text{ MPa}$, $\nu= 0,25$, $c= 200 \text{ kPa}$, $\varphi= 24 \text{ deg}$, $\psi= 0 \text{ deg}$, $E_{cr}= 400 \text{ MPa}$, $\lambda=0,6$.

Λεπτομέρειες σχετικά με τη γεωμετρία της διατομής των σηράγγων και τη γενικότερη γεωμετρία του εδαφικού προφίλ έχουν δοθεί στη παράγραφο 5.2.

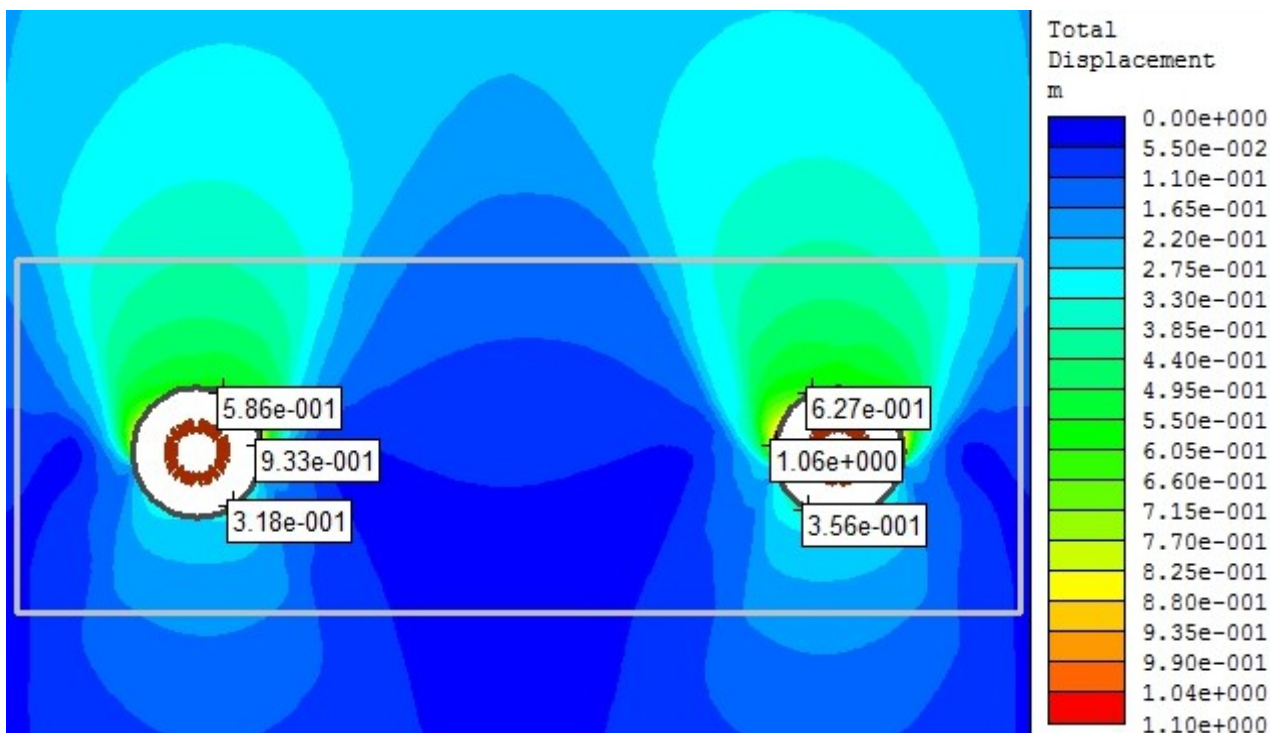
Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των συγκλίσεων του αριστερού και του δεξιού κλάδου της σήραγγας Καλλιδρόμου όπως υπολογίστηκαν σε συγκεκριμένα στάδια. Τα σημεία τα οποία έχουν επιλεγεί για μέτρηση των συγκλίσεων εντοπίζονται στο θόλο της διατομής, στην παρειά και στον πυθμένα.

Αναφέρεται πως οι μετατοπίσεις των εδαφικών στοιχείων στο γεωστατικό στάδιο 1 είναι μηδενικές γεγονός που ανταποκρίνεται στη πραγματικότητα. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι υπολογισμένες συγκλίσεις του δεξιού και αριστερού κλάδου κατά τα στάδια αποτόνωσης (συγκλίσεις κατά την Α' φάση εκσκαφής για θόλο και παρειά και συγκλίσεις κατά τη Β' φάση εκσκαφής για τον πυθμένα), τοποθέτησης άμεσης υποστήριξης έπειτα από τη Β' φάση εκσκαφής, τοποθέτησης της τελικής επένδυσης και προσομοίωσης του φαινομένου ερπυσμού.

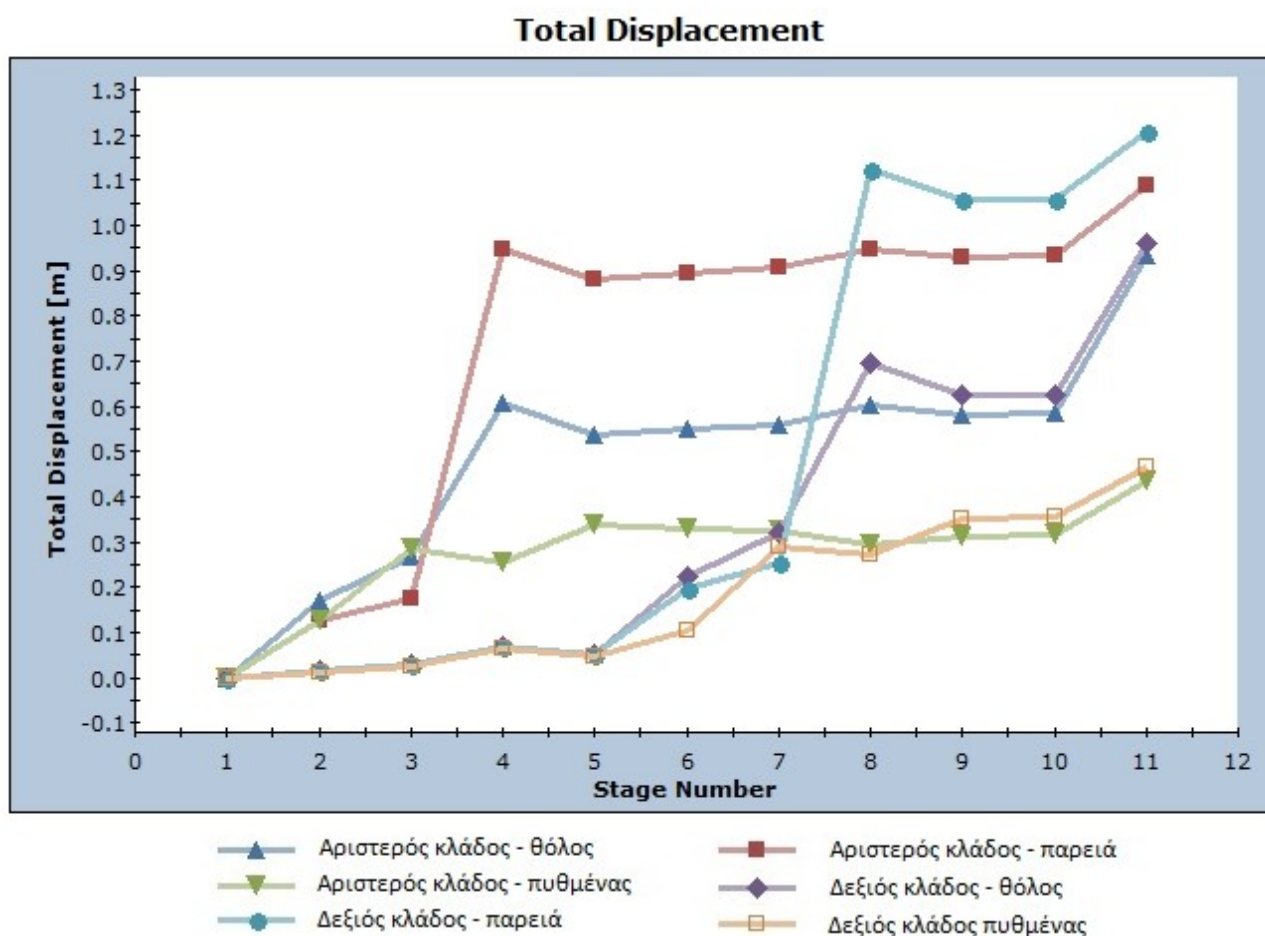
Σταδιο Προσομοίωσης - Stage	Αριστερή σήραγγα	Δεξιά σήραγγα	Αριστερή σήραγγα συγκλίσεις (m)			Δεξιά σήραγγα συγκλίσεις (m)		
			θόλος	παρειά	πυθμένας	θόλος	παρειά	πυθμένας
			u_{crown}	u_{side}	u_{bottom}	u_{crown}	u_{side}	u_{bottom}
Γεωστατικό πεδίο	1	1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Αποτόνωση	2	6	0,176	0,151	-	0,224	0,213	-
Αποτόνωση	4	8	-	-	0,255	-	-	0,272
Άμεση Υποστήριξη	5	9	0,538	0,879	0,339	0,624	1,060	0,352
Τελική επένδυση	10	10	0,586	0,933	0,318	0,627	1,060	0,356
Ερπυσμός	11	11	0,936	1,110	0,441	0,962	1,210	0,466

Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα συγκλίσεων για την προσομοίωση 005

Παρατηρούμε ότι για τις επιλεγμένες γεωτεχνικές παραμέτρους οι συγκλίσεις στο θόλο του αριστερού και δεξιού κλάδου υπολογίστηκαν 0,586m και 0,627m αντίστοιχα στο στάδιο 10 της τελικής επένδυσης. Κατά το στάδιο αυτό, οι τελικές μετακινήσεις (συγκλίσεις) που υπολογίστηκαν στις παρειάς του αριστερού και δεξιού κλάδου είναι ίσες με 0,933m και 1,060m αντίστοιχα. Στο δάπεδο του πυθμένα, επιπλέον, υπολογίστηκαν οι συγκλίσεις του αριστερού και δεξιού κλάδου ίσες με 0,318m και 0,356m αντίστοιχα. Παρουσιάζονται παρακάτω γραφικά, στο υπό μελέτη εδαφικό προφίλ, οι τιμές των τελικών συγκλίσεων περιμετρικά των σηράγγων στο στάδιο 10 της τελικής επένδυσης. Επιπλέον για αυτά τα έξι αντιπροσωπευτικά σημεία, δίδεται διάγραμμα εξέλιξης των συγκλίσεων (τελικών μετακινήσεων) ανά στάδιο προσομοίωσης.



Σχήμα 5.35: Συνολικές μετακινήσεις (συγκλίσεις) κατά το στάδιο 10 περιμετρικά των σηράγγων (προσομοίωση 005)



Σχήμα 5.36: Εξέλιξη συνολικών μετακινήσεων (συγκλίσεις) ανά στάδιο προσομοίωσης σε έξι χαρακτηριστικά σημεία των δύο κλάδων (προσομοίωση 005)

5.5.6. Προσομοίωση 006

Η προσομοίωση του υπό μελέτη εδαφικού προφίλ, στο νότιο μέτωπο της σήραγγας Καλλιδρόμου στο σχηματισμό του σχιστώδη σερπεντινίτη (se.s), πραγματοποιήθηκε βάσει των τιμών: $E= 600 \text{ MPa}$, $\nu= 0,25$, $c= 300 \text{ kPa}$, $\varphi= 24 \text{ deg}$, $\psi= 0 \text{ deg}$, $E_{cr}= 400 \text{ MPa}$, $\lambda=0,6$.

Λεπτομέρειες σχετικά με τη γεωμετρία της διατομής των σηράγγων και τη γενικότερη γεωμετρία του εδαφικού προφίλ έχουν δοθεί στη παράγραφο 5.2.

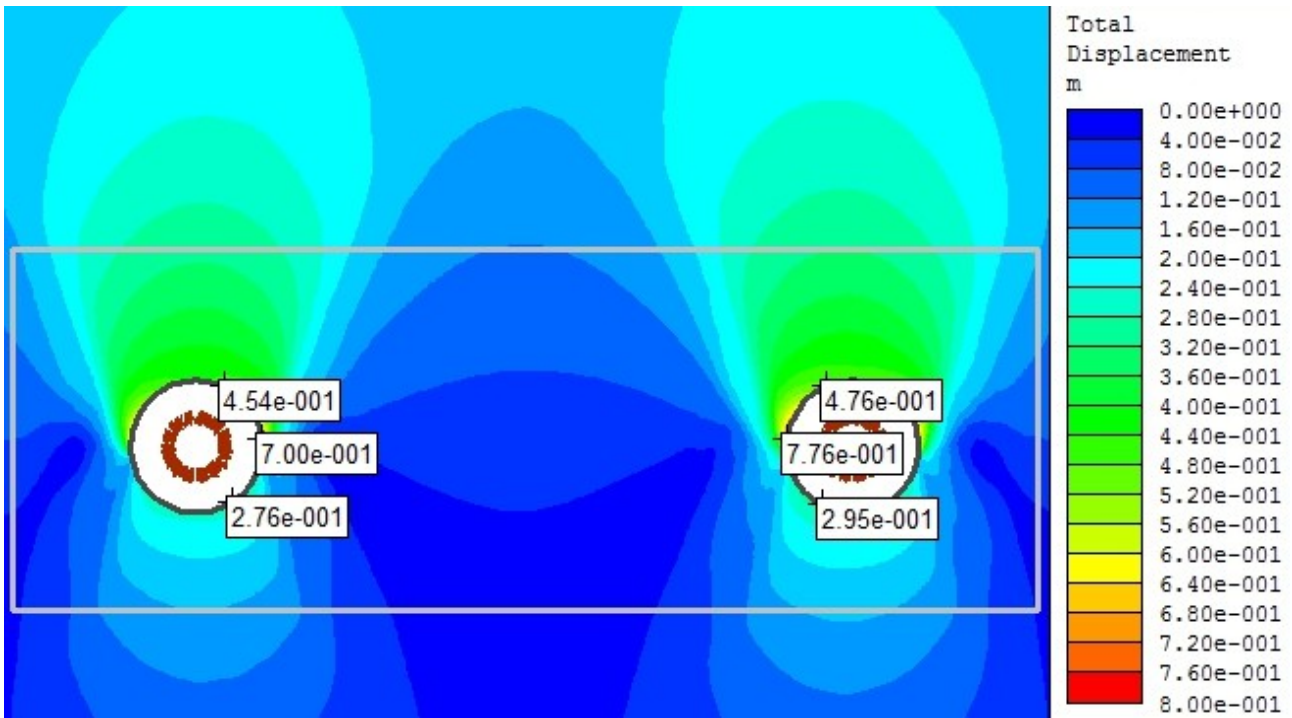
Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των συγκλίσεων του αριστερού και του δεξιού κλάδου της σήραγγας Καλλιδρόμου όπως υπολογίσθηκαν σε συγκεκριμένα στάδια. Τα σημεία τα οποία έχουν επιλεγεί για μέτρηση των συγκλίσεων εντοπίζονται στο θόλο της διατομής, στην παρειά και στον πυθμένα.

Αναφέρεται πως οι μετατοπίσεις των εδαφικών στοιχείων στο γεωστατικό στάδιο 1 είναι μηδενικές γεγονός που ανταποκρίνεται στη πραγματικότητα. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι υπολογισμένες συγκλίσεις του δεξιού και αριστερού κλάδου κατά τα στάδια αποτόνωσης (συγκλίσεις κατά την Α' φάση εκσκαφής για θόλο και παρειές και συγκλίσεις κατά τη Β' φάση εκσκαφής για τον πυθμένα), τοποθέτησης άμεσης υποστήριξης έπειτα από τη Β' φάση εκσκαφής, τοποθέτησης της τελικής επένδυσης και προσομοίωσης του φαινομένου ερπυσμού.

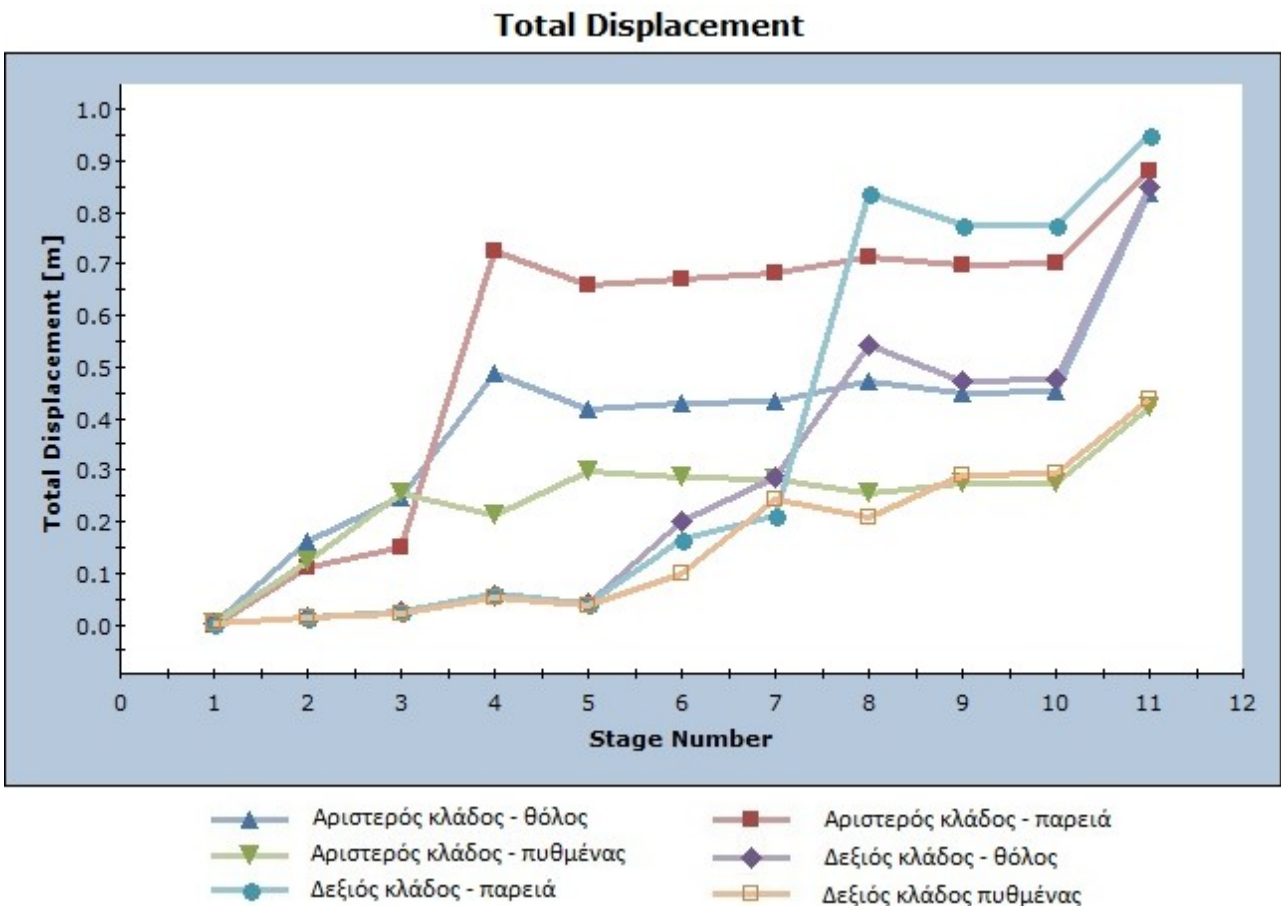
Σταδιο Προσομοίωσης – Stage	Αριστερή σήραγγα	Δεξιά σήραγγα	Αριστερή σήραγγα συγκλίσεις (m)			Δεξιά σήραγγα συγκλίσεις (m)		
			θόλος	παρειά	πυθμένας	θόλος	παρειά	πυθμένας
			u_{crown}	u_{side}	u_{bottom}	u_{crown}	u_{side}	u_{bottom}
Γεωστατικό πεδίο	1	1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Αποτόνωση	2	6	0,163	0,135	-	0,204	0,193	-
Αποτόνωση	4	8	-	-	0,210	-	-	0,208
Άμεση Υποστήριξη	5	9	0,417	0,657	0,296	0,472	0,774	0,293
Τελική επένδυση	10	10	0,454	0,700	0,276	0,476	0,776	0,295
Ερπυσμός	11	11	0,837	0,910	0,425	0,850	0,967	0,437

Πίνακας 5.7: Αποτελέσματα συγκλίσεων για την προσομοίωση 006

Παρατηρούμε ότι για τις επιλεγμένες γεωτεχνικές παραμέτρους οι συγκλίσεις στο θόλο του αριστερού και δεξιού κλάδου υπολογίσθηκαν 0,454m και 0,476m αντίστοιχα στο στάδιο 10 της τελικής επένδυσης. Κατά το στάδιο αυτό, οι τελικές μετακινήσεις (συγκλίσεις) που υπολογίσθηκαν στις παρειές του αριστερού και δεξιού κλάδου είναι ίσες με 0,700m και 0,776m αντίστοιχα. Στο δάπεδο του πυθμένα, επιπλέον, υπολογίσθηκαν οι συγκλίσεις του αριστερού και δεξιού κλάδου ίσες με 0,276m και 0,295m αντίστοιχα. Παρουσιάζονται παρακάτω γραφικά, στο υπό μελέτη εδαφικό προφίλ, οι τιμές των τελικών συγκλίσεων περιμετρικά των σηράγγων στο στάδιο 10 της τελικής επένδυσης. Επιπλέον για αυτά τα έξι αντιπροσωπευτικά σημεία, δίδεται διάγραμμα εξέλιξης των συγκλίσεων (τελικών μετακινήσεων) ανά στάδιο προσομοίωσης.



Σχήμα 5.37: Συνολικές μετακινήσεις (συγκλίσεις) κατά το στάδιο 10 περιμετρικά των σηράγγων (προσομοίωση 006)



Σχήμα 5.38: Εξέλιξη συνολικών μετακινήσεων (συγκλίσεις) ανά στάδιο προσομοίωσης σε έξι χαρακτηριστικά σημεία των δύο κλάδων (προσομοίωση 006)

5.5.7. Προσομοίωση 007

Η προσομοίωση του υπό μελέτη εδαφικού προφίλ, στο νότιο μέτωπο της σήραγγας Καλλιδρόμου στο σχηματισμό του σχιστώδη σερπεντινίτη (se.s), πραγματοποιήθηκε βάσει των τιμών: $E= 800 \text{ MPa}$, $\nu= 0,25$, $c= 100 \text{ kPa}$, $\varphi= 24 \text{ deg}$, $\psi= 0 \text{ deg}$, $E_{cr}= 400 \text{ MPa}$, $\lambda=0,6$.

Λεπτομέρειες σχετικά με τη γεωμετρία της διατομής των σηράγγων και τη γενικότερη γεωμετρία του εδαφικού προφίλ έχουν δοθεί στη παράγραφο 5.2.

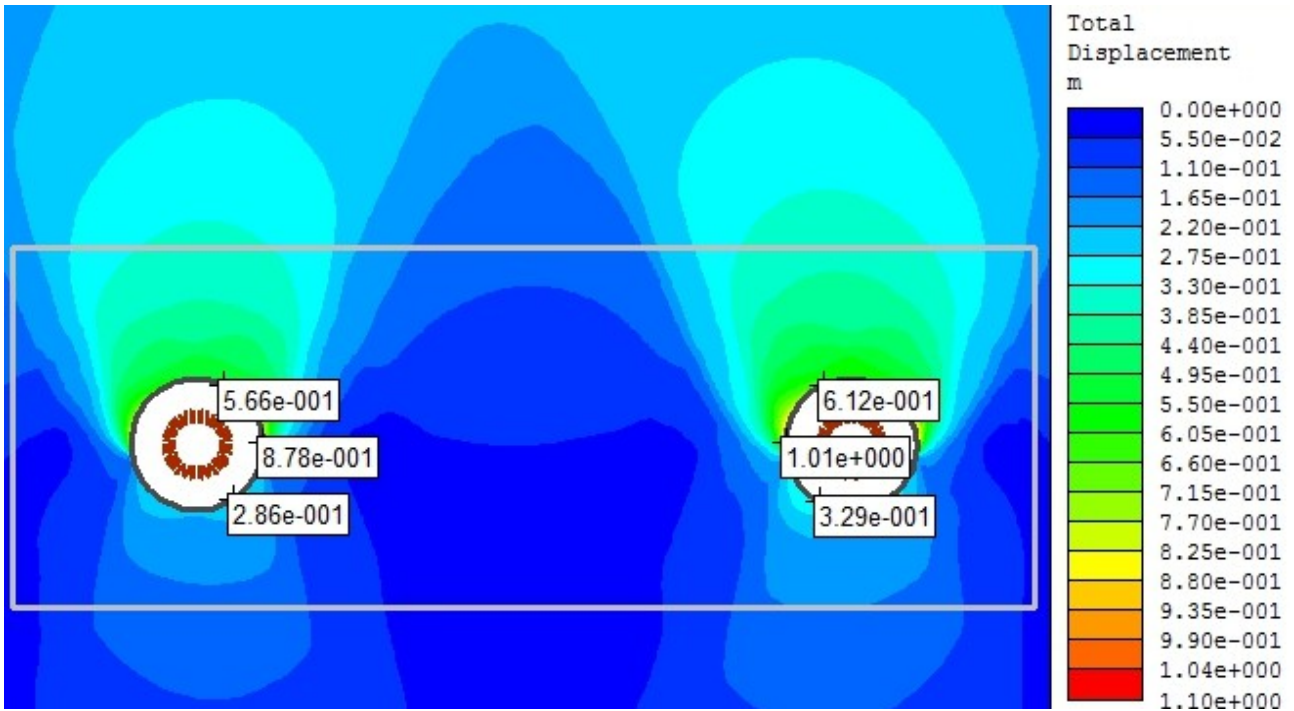
Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των συγκλίσεων του αριστερού και του δεξιού κλάδου της σήραγγας Καλλιδρόμου όπως υπολογίσθηκαν σε συγκεκριμένα στάδια. Τα σημεία τα οποία έχουν επιλεγεί για μέτρηση των συγκλίσεων εντοπίζονται στο θόλο της διατομής, στην παρειά και στον πυθμένα.

Αναφέρεται πως οι μετατοπίσεις των εδαφικών στοιχείων στο γεωστατικό στάδιο 1 είναι μηδενικές γεγονός που ανταποκρίνεται στη πραγματικότητα. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι υπολογισμένες συγκλίσεις του δεξιού και αριστερού κλάδου κατά τα στάδια αποτόνωσης (συγκλίσεις κατά την Α' φάση εκσκαφής για θόλο και παρειές και συγκλίσεις κατά τη Β' φάση εκσκαφής για τον πυθμένα), τοποθέτησης άμεσης υποστήριξης έπειτα από τη Β' φάση εκσκαφής, τοποθέτησης της τελικής επένδυσης και προσομοίωσης του φαινομένου ερπυσμού.

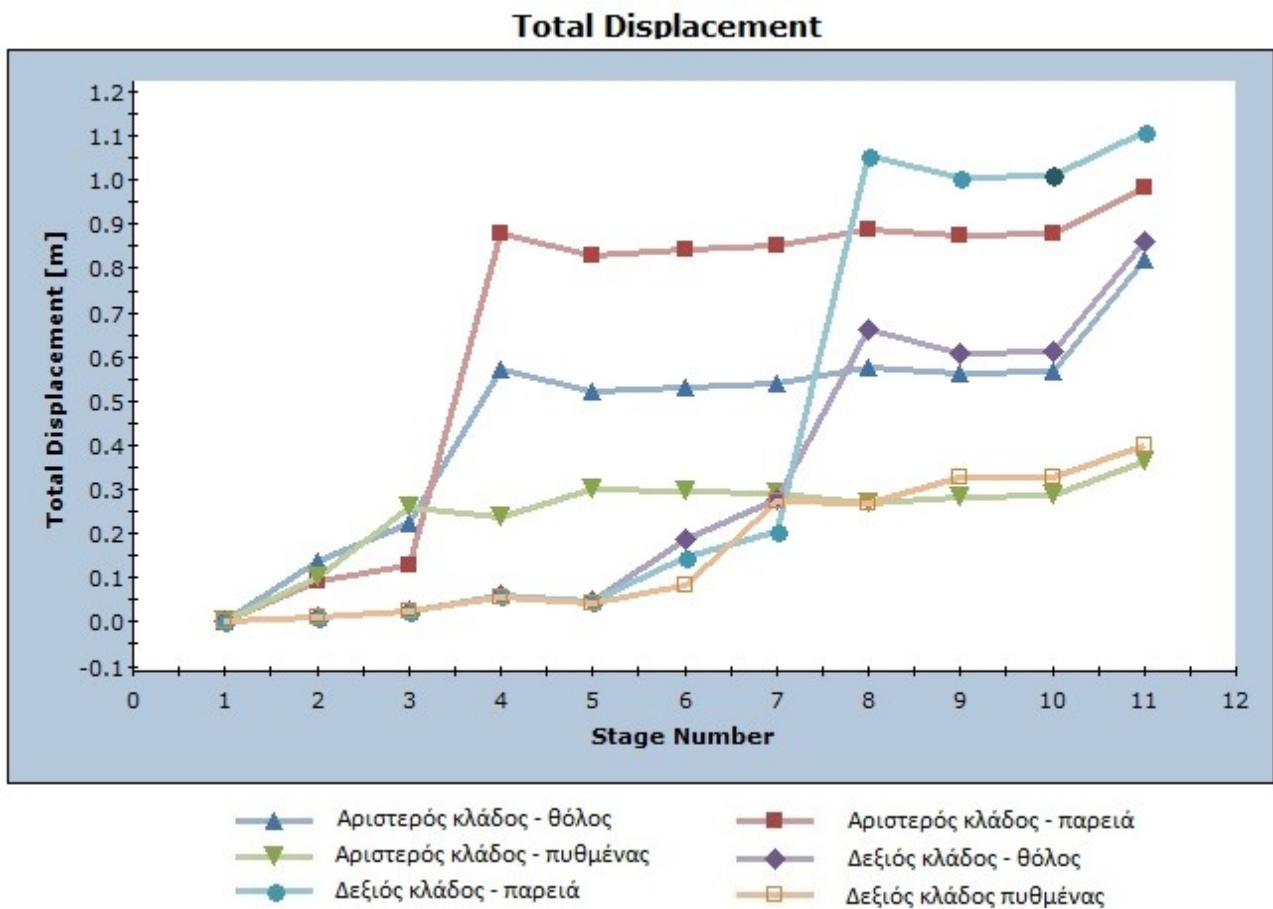
Σταδιο Προσομοίωσης – Stage	Αριστερή σήραγγα	Δεξιά σήραγγα	Αριστερή σήραγγα συγκλίσεις (m)			Δεξιά σήραγγα συγκλίσεις (m)		
			θόλος	παρειά	πυθμένας	θόλος	παρειά	πυθμένας
			u_{crown}	u_{side}	u_{bottom}	u_{crown}	u_{side}	u_{bottom}
Γεωστατικό πεδίο	1	1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Αποτόνωση	2	6	0,141	0,125	-	0,186	0,192	-
Αποτόνωση	4	8	-	-	0,239	-	-	0,271
Άμεση Υποστήριξη	5	9	0,52	0,828	0,301	0,609	1,01	0,327
Τελική επένδυση	10	10	0,566	0,878	0,286	0,612	1,010	0,329
Ερπυσμός	11	11	0,821	1,020	0,367	0,860	1,130	0,402

Πίνακας 5.8: Αποτελέσματα συγκλίσεων για την προσομοίωση 007

Παρατηρούμε ότι για τις επιλεγμένες γεωτεχνικές παραμέτρους οι συγκλίσεις στο θόλο του αριστερού και δεξιού κλάδου υπολογίσθηκαν 0,566m και 0,612m αντίστοιχα στο στάδιο 10 της τελικής επένδυσης. Κατά το στάδιο αυτό, οι τελικές μετακινήσεις (συγκλίσεις) που υπολογίσθηκαν στις παρειές του αριστερού και δεξιού κλάδου είναι ίσες με 0,878m και 1,010m αντίστοιχα. Στο δάπεδο του πυθμένα, επιπλέον, υπολογίσθηκαν οι συγκλίσεις του αριστερού και δεξιού κλάδου ίσες με 0,286m και 0,329m αντίστοιχα. Παρουσιάζονται παρακάτω γραφικά, στο υπό μελέτη εδαφικό προφίλ, οι τιμές των τελικών συγκλίσεων περιμετρικά των σηράγγων στο στάδιο 10 της τελικής επένδυσης. Επιπλέον για αυτά τα έξι αντιπροσωπευτικά σημεία, δίδεται διάγραμμα εξέλιξης των συγκλίσεων (τελικών μετακινήσεων) ανά στάδιο προσομοίωσης.



Σχήμα 5.39: Συνολικές μετακινήσεις (συγκλίσεις) κατά το στάδιο 10 περιμετρικά των σηράγγων (προσομοίωση 007)



Σχήμα 5.40: Εξέλιξη συνολικών μετακινήσεων (συγκλίσεις) ανά στάδιο προσομοίωσης σε έξι χαρακτηριστικά σημεία των δύο κλάδων (προσομοίωση 007)

5.5.8. Προσομοίωση 008

Η προσομοίωση του υπό μελέτη εδαφικού προφίλ, στο νότιο μέτωπο της σήραγγας Καλλιδρόμου στο σχηματισμό του σχιστώδη σερπεντινίτη (se.s), πραγματοποιήθηκε βάσει των τιμών: $E = 800 \text{ MPa}$, $\nu = 0,25$, $c = 200 \text{ kPa}$, $\varphi = 24 \text{ deg}$, $\psi = 0 \text{ deg}$, $E_{cr} = 400 \text{ MPa}$, $\lambda = 0,6$.

Λεπτομέρειες σχετικά με τη γεωμετρία της διατομής των σηράγγων και τη γενικότερη γεωμετρία του εδαφικού προφίλ έχουν δοθεί στη παράγραφο 5.2.

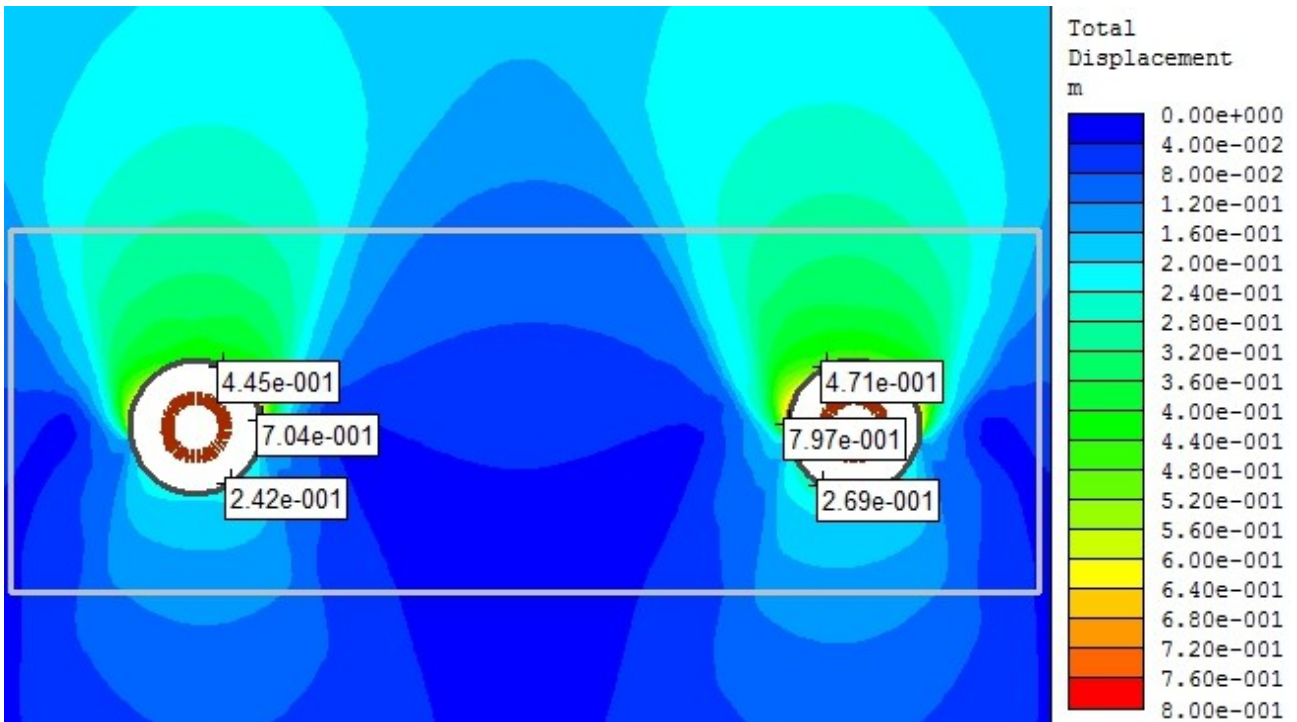
Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των συγκλίσεων του αριστερού και του δεξιού κλάδου της σήραγγας Καλλιδρόμου όπως υπολογίσθηκαν σε συγκεκριμένα στάδια. Τα σημεία τα οποία έχουν επιλεγεί για μέτρηση των συγκλίσεων εντοπίζονται στο θόλο της διατομής, στην παρειά και στον πυθμένα.

Αναφέρεται πως οι μετατοπίσεις των εδαφικών στοιχείων στο γεωστατικό στάδιο 1 είναι μηδενικές γεγονός που ανταποκρίνεται στη πραγματικότητα. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι υπολογισμένες συγκλίσεις του δεξιού και αριστερού κλάδου κατά τα στάδια αποτόνωσης (συγκλίσεις κατά την Α' φάση εκσκαφής για θόλο και παρειές και συγκλίσεις κατά τη Β' φάση εκσκαφής για τον πυθμένα), τοποθέτησης άμεσης υποστήριξης έπειτα από τη Β' φάση εκσκαφής, τοποθέτησης της τελικής επένδυσης και προσομοίωσης του φαινομένου ερπυσμού.

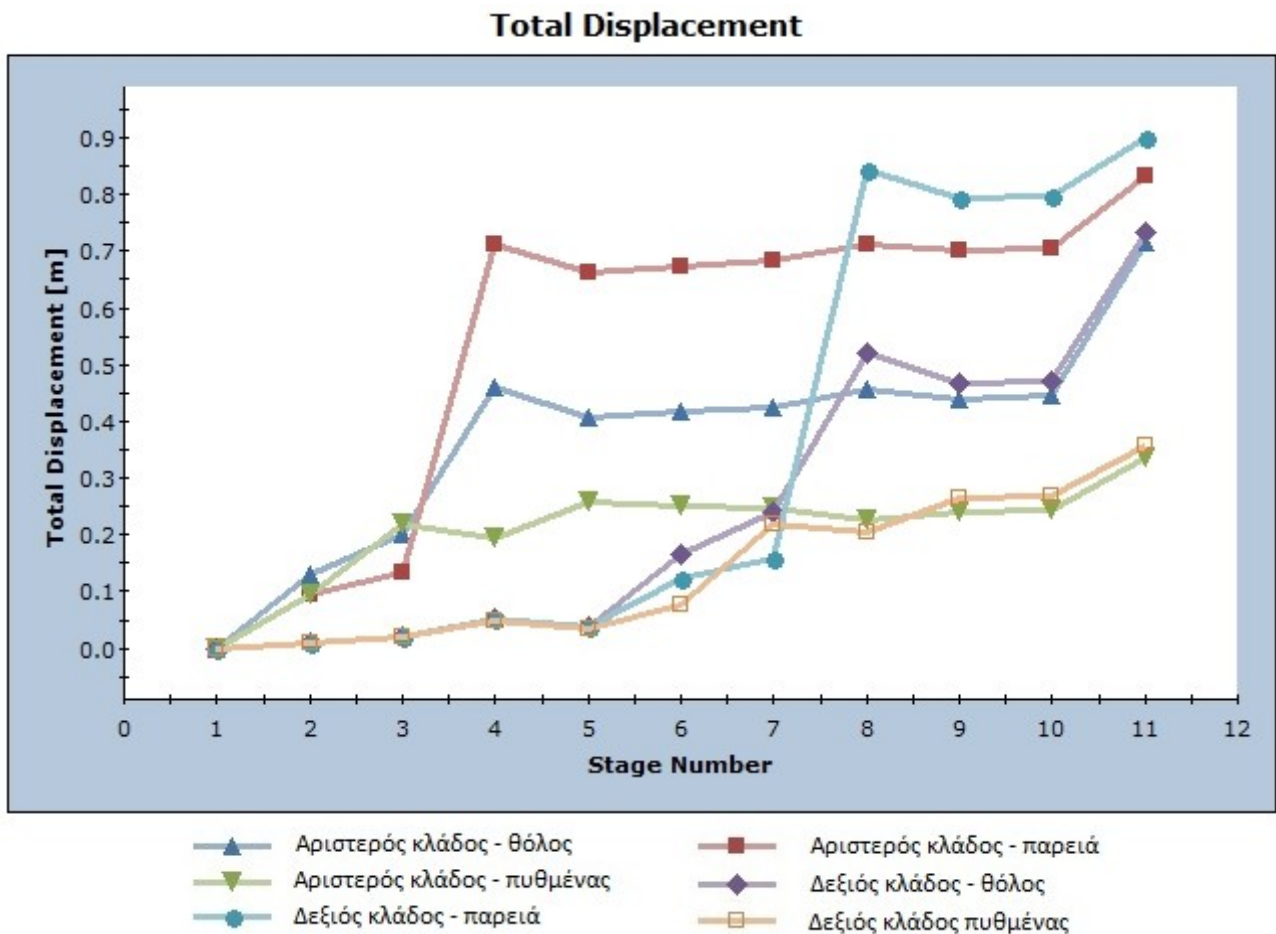
Σταδιο Προσομοίωσης – Stage	Αριστερή σήραγγα	Δεξιά σήραγγα	Αριστερή σήραγγα συγκλίσεις (m)			Δεξιά σήραγγα συγκλίσεις (m)		
			θόλος	παρειά	πυθμένας	θόλος	παρειά	πυθμένας
			u_{crown}	u_{side}	u_{bottom}	u_{crown}	u_{side}	u_{bottom}
Γεωστατικό πεδίο	1	1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Αποτόνωση	2	6	0,132	0,114	-	0,167	0,166	-
Αποτόνωση	4	8	-	-	0,191	-	-	0,205
Άμεση Υποστήριξη	5	9	0,407	0,663	0,258	0,468	0,794	0,267
Τελική επένδυση	10	10	0,445	0,704	0,242	0,471	0,797	0,269
Ερπυσμός	11	11	0,716	0,853	0,399	0,732	0,925	0,358

Πίνακας 5.9: Αποτελέσματα συγκλίσεων για την προσομοίωση 008

Παρατηρούμε ότι για τις επιλεγμένες γεωτεχνικές παραμέτρους οι συγκλίσεις στο θόλο του αριστερού και δεξιού κλάδου υπολογίσθηκαν 0,445m και 0,471m αντίστοιχα στο στάδιο 10 της τελικής επένδυσης. Κατά το στάδιο αυτό, οι τελικές μετακινήσεις (συγκλίσεις) που υπολογίσθηκαν στις παρειές του αριστερού και δεξιού κλάδου είναι ίσες με 0,704m και 0,797m αντίστοιχα. Στο δάπεδο του πυθμένα, επιπλέον, υπολογίσθηκαν οι συγκλίσεις του αριστερού και δεξιού κλάδου ίσες με 0,242m και 0,269m αντίστοιχα. Παρουσιάζονται παρακάτω γραφικά, στο υπό μελέτη εδαφικό προφίλ, οι τιμές των τελικών συγκλίσεων περιμετρικά των σηράγγων στο στάδιο 10 της τελικής επένδυσης. Επιπλέον για αυτά τα έξι αντιπροσωπευτικά σημεία, δίδεται διάγραμμα εξέλιξης των συγκλίσεων (τελικών μετακινήσεων) ανά στάδιο προσομοίωσης.



Σχήμα 5.41: Συνολικές μετακινήσεις (συγκλίσεις) κατά το στάδιο 10 περιμετρικά των σηράγγων (προσομοίωση 008)



Σχήμα 5.42: Εξέλιξη συνολικών μετακινήσεων (συγκλίσεις) ανά στάδιο προσομοίωσης σε έξι χαρακτηριστικά σημεία των δύο κλάδων (προσομοίωση 008)

5.5.9. Προσομοίωση 009

Η προσομοίωση του υπό μελέτη εδαφικού προφίλ, στο νότιο μέτωπο της σήραγγας Καλλιδρόμου στο σχηματισμό του σχιστώδη σερπεντινίτη (se.s), πραγματοποιήθηκε βάσει των τιμών: $E= 800 \text{ MPa}$, $\nu= 0,25$, $c= 300 \text{ kPa}$, $\varphi= 24 \text{ deg}$, $\psi= 0 \text{ deg}$, $E_{cr}= 400 \text{ MPa}$, $\lambda=0,6$.

Λεπτομέρειες σχετικά με τη γεωμετρία της διατομής των σηράγγων και τη γενικότερη γεωμετρία του εδαφικού προφίλ έχουν δοθεί στη παράγραφο 5.2.

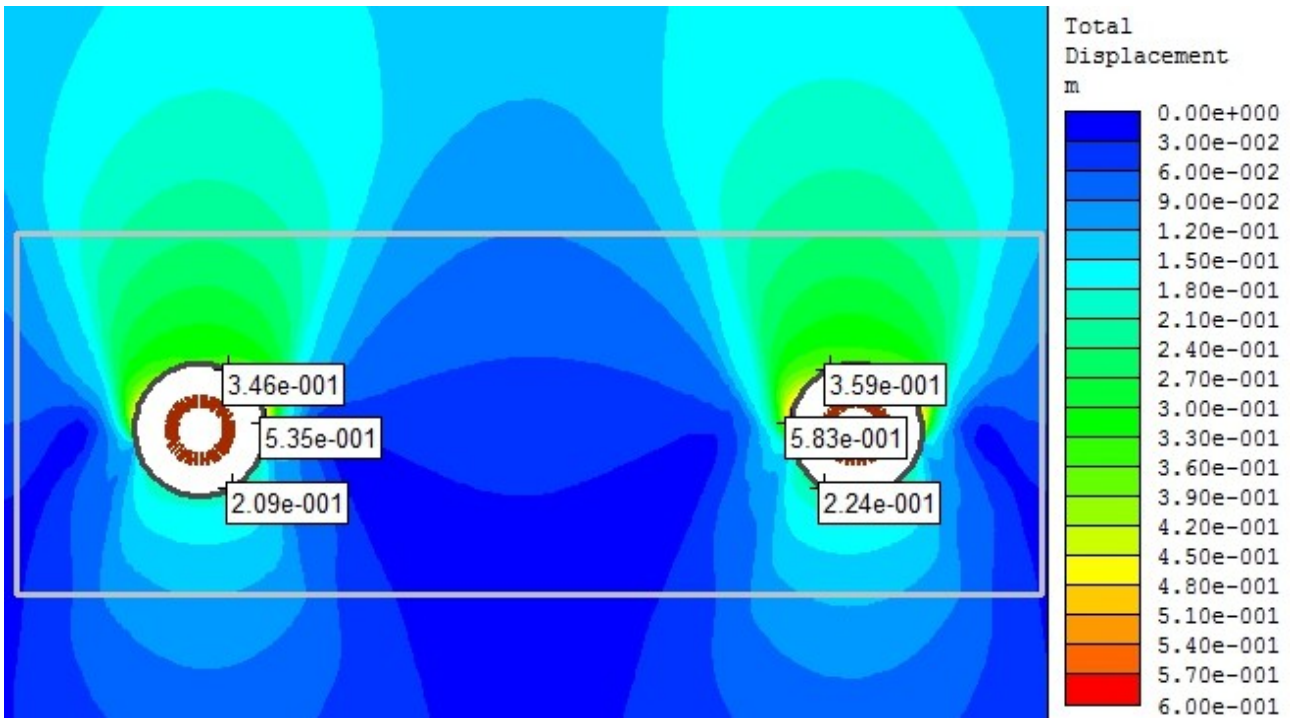
Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των συγκλίσεων του αριστερού και του δεξιού κλάδου της σήραγγας Καλλιδρόμου όπως υπολογίστηκαν σε συγκεκριμένα στάδια. Τα σημεία τα οποία έχουν επιλεγεί για μέτρηση των συγκλίσεων εντοπίζονται στο θόλο της διατομής, στην παρειά και στον πυθμένα.

Αναφέρεται πως οι μετατοπίσεις των εδαφικών στοιχείων στο γεωστατικό στάδιο 1 είναι μηδενικές γεγονός που ανταποκρίνεται στη πραγματικότητα. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι υπολογισμένες συγκλίσεις του δεξιού και αριστερού κλάδου κατά τα στάδια αποτόνωσης (συγκλίσεις κατά την Α' φάση εκσκαφής για θόλο και παρειές και συγκλίσεις κατά τη Β' φάση εκσκαφής για τον πυθμένα), τοποθέτησης άμεσης υποστήριξης έπειτα από τη Β' φάση εκσκαφής, τοποθέτησης της τελικής επένδυσης και προσομοίωσης του φαινομένου ερπυσμού.

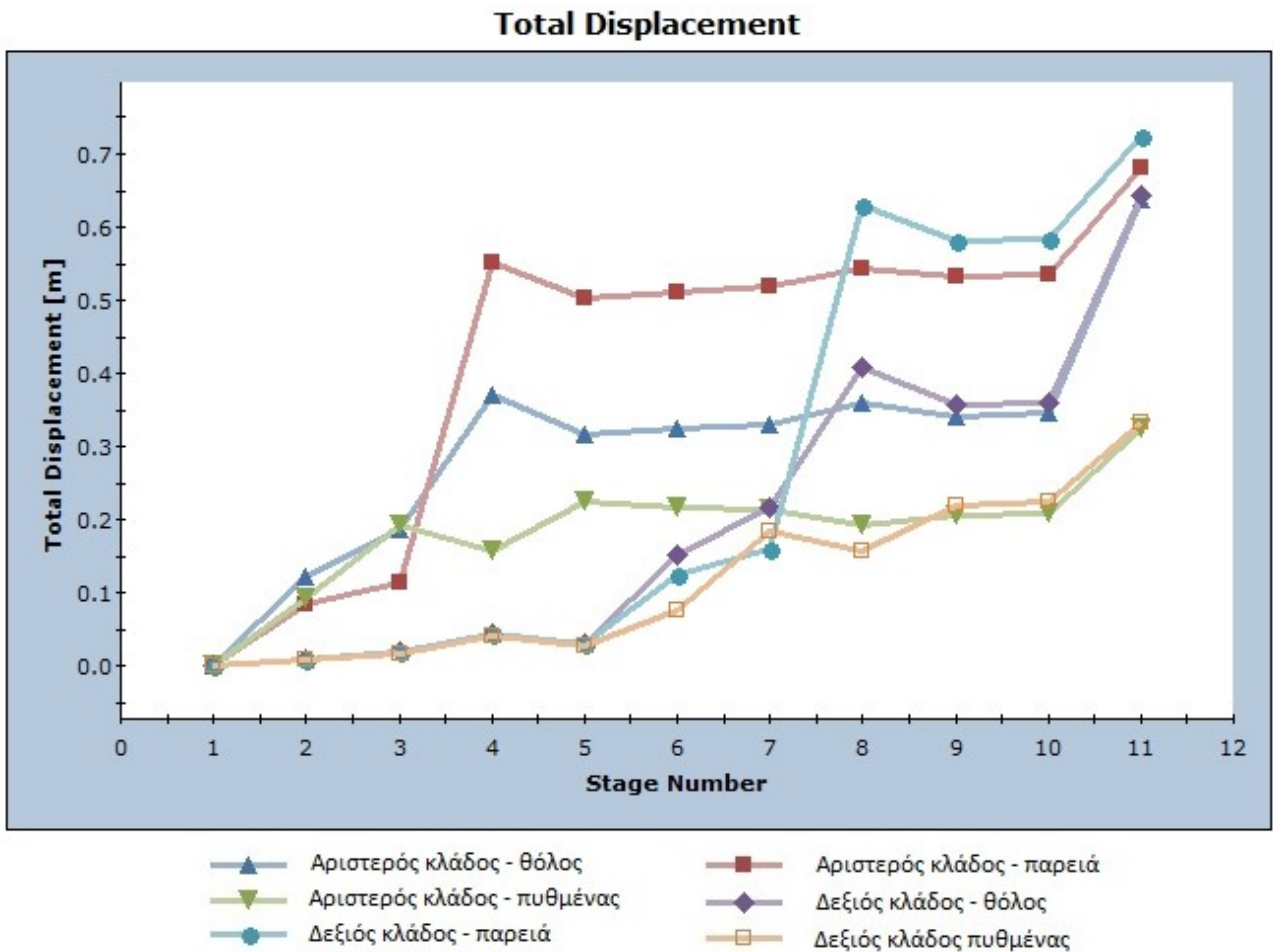
Σταδιο Προσομοίωσης – Stage	Αριστερή σήραγγα	Δεξιά σήραγγα	Αριστερή σήραγγα συγκλίσεις (m)			Δεξιά σήραγγα συγκλίσεις (m)		
			θόλος	παρειά	πυθμένας	θόλος	παρειά	πυθμένας
			u_{crown}	u_{side}	u_{bottom}	u_{crown}	u_{side}	u_{bottom}
Γεωστατικό πεδίο	1	1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Αποτόνωση	2	6	0,125	0,105	-	0,153	0,145	-
Αποτόνωση	4	8	-	-	0,159	-	-	0,157
Άμεση Υποστήριξη	5	9	0,317	0,502	0,224	0,356	0,581	0,220
Τελική επένδυση	10	10	0,346	0,535	0,209	0,359	0,583	0,224
Ερπυσμός	11	11	0,639	0,710	0,326	0,642	0,746	0,334

Πίνακας 5.10: Αποτελέσματα συγκλίσεων για την προσομοίωση 009

Παρατηρούμε ότι για τις επιλεγμένες γεωτεχνικές παραμέτρους οι συγκλίσεις στο θόλο του αριστερού και δεξιού κλάδου υπολογίστηκαν 0,346m και 0,359m αντίστοιχα στο στάδιο 10 της τελικής επένδυσης. Κατά το στάδιο αυτό, οι τελικές μετακινήσεις (συγκλίσεις) που υπολογίστηκαν στις παρειές του αριστερού και δεξιού κλάδου είναι ίσες με 0,535m και 0,583m αντίστοιχα. Στο δάπεδο του πυθμένα, επιπλέον, υπολογίστηκαν οι συγκλίσεις του αριστερού και δεξιού κλάδου ίσες με 0,209m και 0,224m αντίστοιχα. Παρουσιάζονται παρακάτω γραφικά, στο υπό μελέτη εδαφικό προφίλ, οι τιμές των τελικών συγκλίσεων περιμετρικά των σηράγγων στο στάδιο 10 της τελικής επένδυσης. Επιπλέον για αυτά τα έξι αντιπροσωπευτικά σημεία, δίδεται διάγραμμα εξέλιξης των συγκλίσεων (τελικών μετακινήσεων) ανά στάδιο προσομοίωσης.



Σχήμα 5.43: Συνολικές μετακινήσεις (συγκλίσεις) κατά το στάδιο 10 περιμετρικά των σηράγγων (προσομοίωση 009)



Σχήμα 5.44: Εξέλιξη συνολικών μετακινήσεων (συγκλίσεις) ανά στάδιο προσομοίωσης σε έξι χαρακτηριστικά σημεία των δύο κλάδων (προσομοίωση 009)

5.5.10. Προσομοιώσεις 010 με 018

Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών 010 με 018. Οι γεωτεχνικές παράμετροι των παρακάτω δοκιμών αντιστοιχούν σε αυτές των 001 με 009, με τη διαφορά ότι οι δοκιμές 010 με 018 έχουν προσομοιωθεί για συντελεστή αποτόνωσης $\lambda=0,7$. Δίνονται οι υπολογισμένες συγκλίσεις και των δύο κλάδων κατά τα στάδια αποτόνωσης της σήραγγας, τελικής επένδυσης και ερπυσμού. Σε όλες τις δοκιμές οι εδαφικές μετακινήσεις στο γεωστατικό στάδιο φόρτισης 1 ήταν μηδενικές. Στο στάδιο της αποτόνωσης, δίνονται οι υπολογισμένες συγκλίσεις για τον θόλο και την παρειά της αριστερής σήραγγας κατά το στάδιο 2 και για τον πυθμένα κατά το στάδιο 4. Όμοια και για τον δεξιό κλάδο οι συγκλίσεις λόγω αποτόνωσης του θόλου και της παρειάς υπολογίσθηκαν στο στάδιο 6 ενώ του πυθμένα στο στάδιο 8.

α/α	Στάδιο Προσομοίωσης – Stage	Αριστερή σήραγγα	Δεξιά σήραγγα	Αριστερή σήραγγα συγκλίσεις (m)			Δεξιά σήραγγα συγκλίσεις (m)		
				θόλος	παρειά	πυθμένας	θόλος	παρειά	πυθμένας
				u_{crown}	u_{side}	u_{bottom}	u_{crown}	u_{side}	u_{bottom}
010	Αποτόνωση	2 & 4	6 & 8	0,382	0,393	0,521	0,500	0,565	0,579
	Τελική επένδυση	10	10	1,240	1,930	0,567	1,340	2,210	0,667
	Ερπυσμός	11	11	1,610	2,050	0,656	1,690	2,310	0,734
011	Αποτόνωση	2 & 4	6 & 8	0,353	0,348	0,435	0,442	0,476	0,456
	Τελική επένδυση	10	10	0,979	1,540	0,487	1,050	1,750	0,553
	Ερπυσμός	11	11	1,410	1,700	0,617	1,470	1,880	0,664
012	Αποτόνωση	2 & 4	6 & 8	0,329	0,313	0,372	0,397	0,410	0,370
	Τελική επένδυση	10	10	0,741	1,140	0,432	0,785	1,300	0,469
	Ερπυσμός	11	11	1,210	1,330	0,586	1,240	1,450	0,612
013	Αποτόνωση	2 & 4	6 & 8	0,254	0,145	0,329	0,326	0,378	0,328
	Τελική επένδυση	10	10	0,838	1,020	0,348	0,912	1,150	0,400
	Ερπυσμός	11	11	1,120	1,200	0,438	1,180	1,320	0,484
014	Αποτόνωση	2 & 4	6 & 8	0,235	0,229	0,295	0,295	0,318	0,310
	Τελική επένδυση	10	10	0,658	1,030	0,333	0,716	1,180	0,378
	Ερπυσμός	11	11	0,975	1,170	0,432	1,020	1,300	0,468
015	Αποτόνωση	2 & 4	6 & 8	0,219	0,208	0,250	0,265	0,274	0,250
	Τελική επένδυση	10	10	0,497	0,762	0,292	0,526	0,867	0,320
	Ερπυσμός	11	11	0,856	0,951	0,428	0,875	1,030	0,442
016	Αποτόνωση	2 & 4	6 & 8	0,190	0,195	0,267	0,252	0,285	0,297
	Τελική επένδυση	10	10	0,631	0,990	0,295	0,694	1,150	0,345
	Ερπυσμός	11	11	0,863	1,090	0,365	0,912	1,230	0,400
017	Αποτόνωση	2 & 4	6 & 8	0,176	0,173	0,224	0,222	0,239	0,234
	Τελική επένδυση	10	10	0,502	0,784	0,253	0,534	0,879	0,285
	Ερπυσμός	11	11	0,737	0,900	0,331	0,757	0,977	0,354
018	Αποτόνωση	2 & 4	6 & 8	0,209	0,163	0,190	0,243	0,233	0,189
	Τελική επένδυση	10	10	0,373	0,571	0,223	0,396	0,652	0,241
	Ερπυσμός	11	11	0,657	0,738	0,332	0,668	0,793	0,342

Πίνακας 5.11: Αποτελέσματα συγκλίσεων για τις προσομοιώσεις 010 με 018

5.5.11. Προσομοίωση 019

Η προσομοίωση του υπό μελέτη εδαφικού προφίλ, στο νότιο μέτωπο της σήραγγας Καλλιδρόμου στο σχηματισμό του σχιστώδη σερπεντινίτη (se.s), πραγματοποιήθηκε βάσει των τιμών: $E= 1000 \text{ MPa}$, $\nu= 0,25$, $c= 200 \text{ kPa}$, $\phi= 24 \text{ deg}$, $\psi= 0 \text{ deg}$, $E_{cr}= 900 \text{ MPa}$, $\lambda=0,6$. Καθώς αναλύονται σε επόμενη παράγραφο με λεπτομέρεια τα αποτελέσματα της προσομοίωσης 019pp (Προσομοίωση 019 με ύπαρξη υδροφόρου ορίζοντα), παρατίθενται μόνο τα αποτελέσματα των υπολογισμένων συγκλίσεων.

Στάδιο Προσομοίωσης – Stage	Αριστερή σήραγγα	Δεξιά σήραγγα	Αριστερή σήραγγα συγκλίσεις (m)			Δεξιά σήραγγα συγκλίσεις (m)		
			θόλος	παραιά	πυθμένας	θόλος	παραιά	πυθμένας
			u_{crown}	u_{side}	u_{bottom}	u_{crown}	u_{side}	u_{bottom}
Γεωστατικό πεδίο	1	1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Αποτόνωση	2	6	0,103	0,089	-	0,134	0,133	-
Αποτόνωση	4	8	-	-	0,154	-	-	0,165
Άμεση Υποστήριξη	5	9	0,329	0,533	0,207	0,376	0,634	0,214
Τελική επένδυση	10	10	0,360	0,566	0,195	0,378	0,636	0,217
Ερπυσμός	11	11	0,494	0,649	0,274	0,505	0,711	0,290

Πίνακας 5.12: Αποτελέσματα συγκλίσεων για την προσομοίωση 019

5.5.12. Προσομοιώσεις 002pp, 005pp & 008pp (παρουσία υδροφόρου ορίζοντα)

Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών 002pp, 005pp και 008pp. Πρόκειται για τις δοκιμές 002, 005 και 008 με τη διαφορά ότι η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε με ύπαρξη υδροφόρου ορίζοντα. Σε όλες τις δοκιμές οι εδαφικές μετακινήσεις στο γεωστατικό στάδιο φόρτισης 1 ήταν μηδενικές. Στο στάδιο της αποτόνωσης, δίνονται οι υπολογισμένες συγκλίσεις για τον θόλο και την παραιά της αριστερής σήραγγας κατά το στάδιο 2 και για τον πυθμένα κατά το στάδιο 4. Όμοια και για τον δεξιό κλάδο οι συγκλίσεις λόγω αποτόνωσης του θόλου και της παραιάς υπολογίσθηκαν στο στάδιο 6 ενώ του πυθμένα στο στάδιο 8.

a/a	Στάδιο Προσομοίωσης – Stage	Αριστερή σήραγγα	Δεξιά σήραγγα	Αριστερή σήραγγα συγκλίσεις (m)			Δεξιά σήραγγα συγκλίσεις (m)		
				θόλος	παραιά	πυθμένας	θόλος	παραιά	πυθμένας
				u_{crown}	u_{side}	u_{bottom}	u_{crown}	u_{side}	u_{bottom}
002pp	Αποτόνωση	2 & 4	6 & 8	0,236	0,240	0,492	0,321	0,318	0,492
	Τελική επένδυση	10	10	1,070	1,710	0,572	1,070	1,800	0,608
	Ερπυσμός	11	11	1,480	1,890	0,694	1,470	1,960	0,726
005pp	Αποτόνωση	2 & 4	6 & 8	0,158	0,157	0,334	0,214	0,213	0,335
	Τελική επένδυση	10	10	0,710	1,160	0,385	0,708	1,180	0,413
	Ερπυσμός	11	11	1,040	1,350	0,502	1,030	1,360	0,524
008pp	Αποτόνωση	2 & 4	6 & 8	0,168	0,148	0,188	0,243	0,217	0,171
	Τελική επένδυση	10	10	0,631	0,908	0,206	0,613	0,926	0,226
	Ερπυσμός	11	11	0,877	1,040	0,290	0,854	1,060	0,311

Πίνακας 5.13: Αποτελέσματα συγκλίσεων για τις προσομοιώσεις 002pp, 005pp και 008pp

5.5.13. Εκτενής παρουσίαση Προσομοίωσης 019 PP

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται με λεπτομέρεια τα αποτελέσματα της προσομοίωσης 019pp. Η προσομοίωση του υπό μελέτη εδαφικού προφίλ, στο νότιο μέτωπο της σήραγγας Καλλιδρόμου στο σχηματισμό του σχιστώδη σερπεντινίτη (se.s), πραγματοποιήθηκε βάσει των τιμών: $E= 1000 \text{ MPa}$, $\nu= 0,25$, $c= 200 \text{ kra}$, $\varphi= 24 \text{ deg}$, $\psi= 0 \text{ deg}$, $E_{cr}= 900 \text{ MPa}$, $\lambda=0,6$. Επιπλέον, έχει προσομοιωθεί η ύπαρξη υδροφόρου ορίζοντα και ο καταβιβασμός του λόγω της εκσκαφής των δύο κλάδων της σήραγγας Καλλιδρόμου.

Λεπτομέρειες σχετικά με τη γεωμετρία της διατομής των σηράγγων και τη γενικότερη γεωμετρία του εδαφικού προφίλ έχουν δοθεί στη παράγραφο 5.2.

5.5.13.1. Υπολογισμένες Συγκλίσεις

Παρατίθενται τα αποτελέσματα των συγκλίσεων του αριστερού και του δεξιού κλάδου της σήραγγας Καλλιδρόμου για όλα τα στάδια προσομοίωσης. Τα σημεία τα οποία έχουν επιλεγεί για τον υπολογισμό των συγκλίσεων εντοπίζονται στο θόλο της διατομής, στην παρειά και στον πυθμένα.

Στάδιο Προσομοίωσης – Stage		Αριστερή σήραγγα συγκλίσεις (m)			Δεξιά σήραγγα συγκλίσεις (m)		
		θόλος	παρειά	πυθμένας	θόλος	παρειά	πυθμένας
		u_{crown}	u_{side}	u_{bottom}	u_{crown}	u_{side}	u_{bottom}
1	Γεωστατικό πεδίο	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	Αποτόνωση Α' φάσης αριστερού κλάδου	0,095	0,074	0,069	0,007	0,007	0,006
3	Α' φάση υποστήριξης αριστερού κλάδου	0,159	0,113	0,220	0,014	0,014	0,013
4	Αποτόνωση Β' φάσης αριστερού κλάδου	0,445	0,719	0,207	0,040	0,040	0,036
5	Β' φάση υποστήριξης αριστερού κλάδου	0,403	0,679	0,254	0,028	0,027	0,024
6	Αποτόνωση Α' φάσης δεξιού κλάδου	0,409	0,686	0,250	0,129	0,100	0,053
7	Α' φάση υποστήριξης δεξιού κλάδου	0,416	0,693	0,246	0,192	0,149	0,214
8	Αποτόνωση Β' φάσης δεξιού κλάδου	0,443	0,714	0,228	0,471	0,754	0,207
9	Β' φάση υποστήριξης δεξιού κλάδου	0,429	0,704	0,238	0,429	0,715	0,252
10	Τελική επένδυση	0,434	0,707	0,242	0,431	0,717	0,255
11	Ερπυσμός	0,718	1,026	0,477	0,719	1,042	0,494
	Καθαρές συγκλίσεις (Ερπυσμός - Αποτόνωση)	0,623	0,952	0,270	0,590	0,942	0,287

Πίνακας 5.14: Αποτελέσματα συγκλίσεων για την προσομοίωση 019pp

Οι εδαφικές μετακινήσεις στο στάδιο 1 όπου πραγματοποιείται η γεωστατική φόρτιση είναι μηδενικές, γεγονός που ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα.

Κατά το στάδιο 2 όπου πραγματοποιείται η Α' φάση εκσκαφής του αριστερού κλάδου, σημειώνονται συγκλίσεις στο θόλο και στην παρειά ίσες με 0,095m και 0,074m αντίστοιχα.

Τονίζεται πως οι μετακινήσεις που παρουσιάζονται στον πυθμένα του αριστερού κλάδου (στα στάδια 2 & 3) και επιπλέον στο θόλο, στη παρειά και στο πυθμένα του δεξιού κλάδου (στα στάδια 3, 4, και 5 για τον θόλο και την παρειά, και 3, 4, 5, 6, και 7 για τον πυθμένα) αντιστοιχούν σε εδαφικά στοιχεία στο περιτύπωμα της σήραγγας που πρόκειται να εκσκαφτεί. Πρόκειται για εδαφικές μετακινήσεις - προσυγκλίσεις μιας και το μέτωπο της σήραγγας δεν έχει φθάσει ακόμη, δεν λαμβάνονται υπόψιν και πρόκειται να αφαιρεθούν από τις τελικές συγκλίσεις σε επόμενη παράγραφο.

Κατά το στάδιο 3 τοποθετείται η άμεση υποστήριξη της Α' φάσης εκσκαφής στον αριστερό κλάδο. Παρατηρούμε την αύξηση των συγκλίσεων στο θόλο και στις παρειές.

Στο στάδιο 4 πραγματοποιείται η Β' φάση εκσκαφής του αριστερού κλάδου. Οι συγκλίσεις στο μανδύα του εκτοξευμένου σκυροδέματος, στο θόλο και τις παρειές, αυξάνονται.

Κατά το στάδιο 5 ολοκληρώνεται η τοποθέτηση της άμεσης υποστήριξης του αριστερού κλάδου. Οι συγκλίσεις που παρουσιάζονται στο θόλο, στην παρειά και στον πυθμένα της διατομής είναι ίσες με 0,403m, 0,679m και 0,254m αντίστοιχα.

Κατά το στάδιο 6 πραγματοποιείται η Α' φάση εκσκαφής του δεξιού κλάδου στο θόλο της σήραγγας. Οι μετακινήσεις των εδαφικών σημείων είναι ίσες με 0,129m και 0,100m στο θόλο και την παρειά.

Ακολουθεί το στάδιο 7 με κατασκευή της Α' φάσης υποστήριξης όπου σημειώνονται συγκλίσεις στο μανδύα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Κατά το στάδιο 8 πραγματοποιείται η Β' φάση εκσκαφής του δεξιού κλάδου. Οι συγκλίσεις στο μανδύα του εκτοξευμένου σκυροδέματος, στο θόλο και τις παρειές, αυξάνονται.

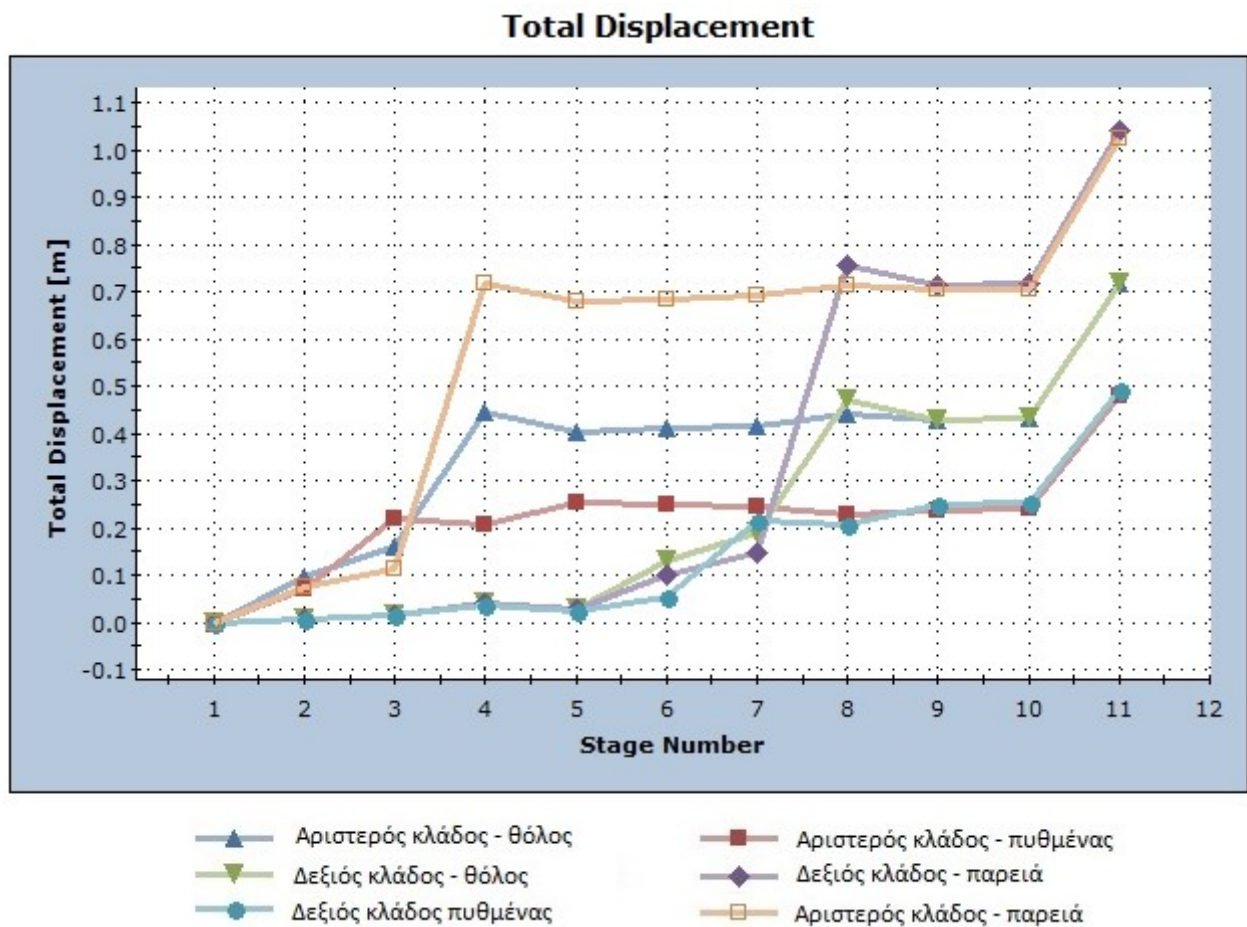
Στο στάδιο 9 τοποθετείται η τελική άμεση υποστήριξη του δεξιού κλάδου και έχουν σημειωθεί οι συγκλίσεις στο θόλο, την παρειά και τον πυθμένα 0,429m, 0,715m και 0,252m αντίστοιχα.

Στο στάδιο 10 έχει ολοκληρωθεί η τοποθέτηση τελικής επένδυσης, οι συγκλίσεις σε αυτό το στάδιο που σημειώνονται είναι πολύ μικρές. Οι διατομές των δύο κλάδων έχουν ισορροπήσει στο στάδιο 9.

Τέλος στο στάδιο 11 προσομοιώνεται το φαινόμενο του ερπυσμού. Έχει επιλεχθεί προσομοίωση του ερπυστικού φαινομένου με μείωση του μέτρου ελαστικότητας από 1000MPa σε 900MPa. Παρατηρούμε μεγάλη αύξηση των συγκλίσεων των δύο διατομών. Οι συγκλίσεις στο θόλο, την παρειά και τον πυθμένα και των δύο κλάδων είναι της τάξης των 0,7m, 1,0m και 0,5m αντίστοιχα.

Οι καθαρές συγκλίσεις των διατομών, αφαιρούμενων των συγκλίσεων που πραγματοποιήθηκαν στα στάδια της αποτόνωσης πριν την εγκατάσταση μανδύα εκτοξευόμενου σκυροδέματος, πρόκειται να αξιοποιηθούν σε επόμενο κεφάλαιο όπου πρόκειται να πραγματοποιηθεί σύγκριση των υπολογισμένων συγκλίσεων με αυτές που κατεγράφησαν στη σήραγγα του Καλλιδρόμου.

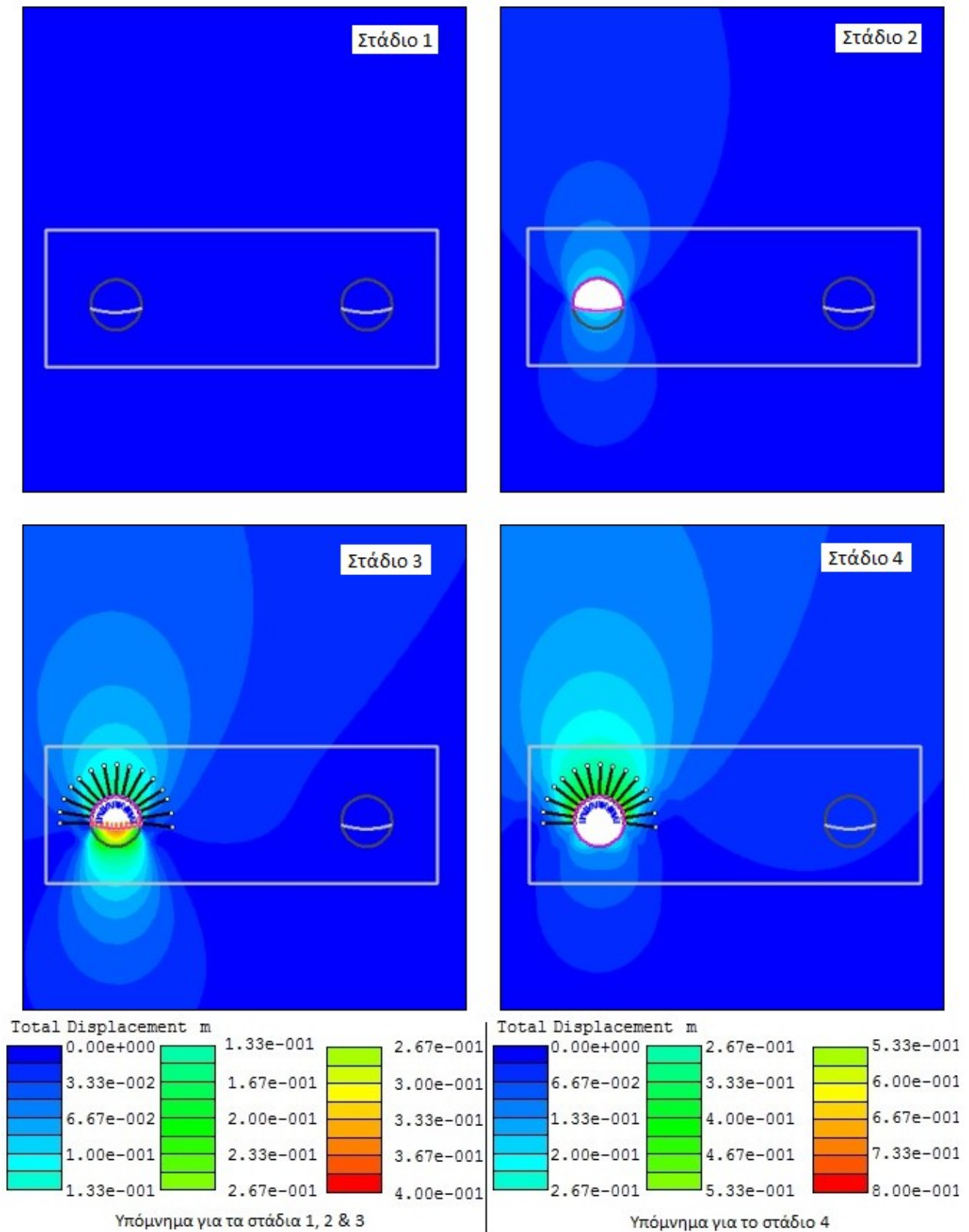
Παρουσιάζεται το διάγραμμα εξέλιξης των συγκλίσεων των παραπάνω 6 σημείων ανά στάδιο προσομοίωσης.



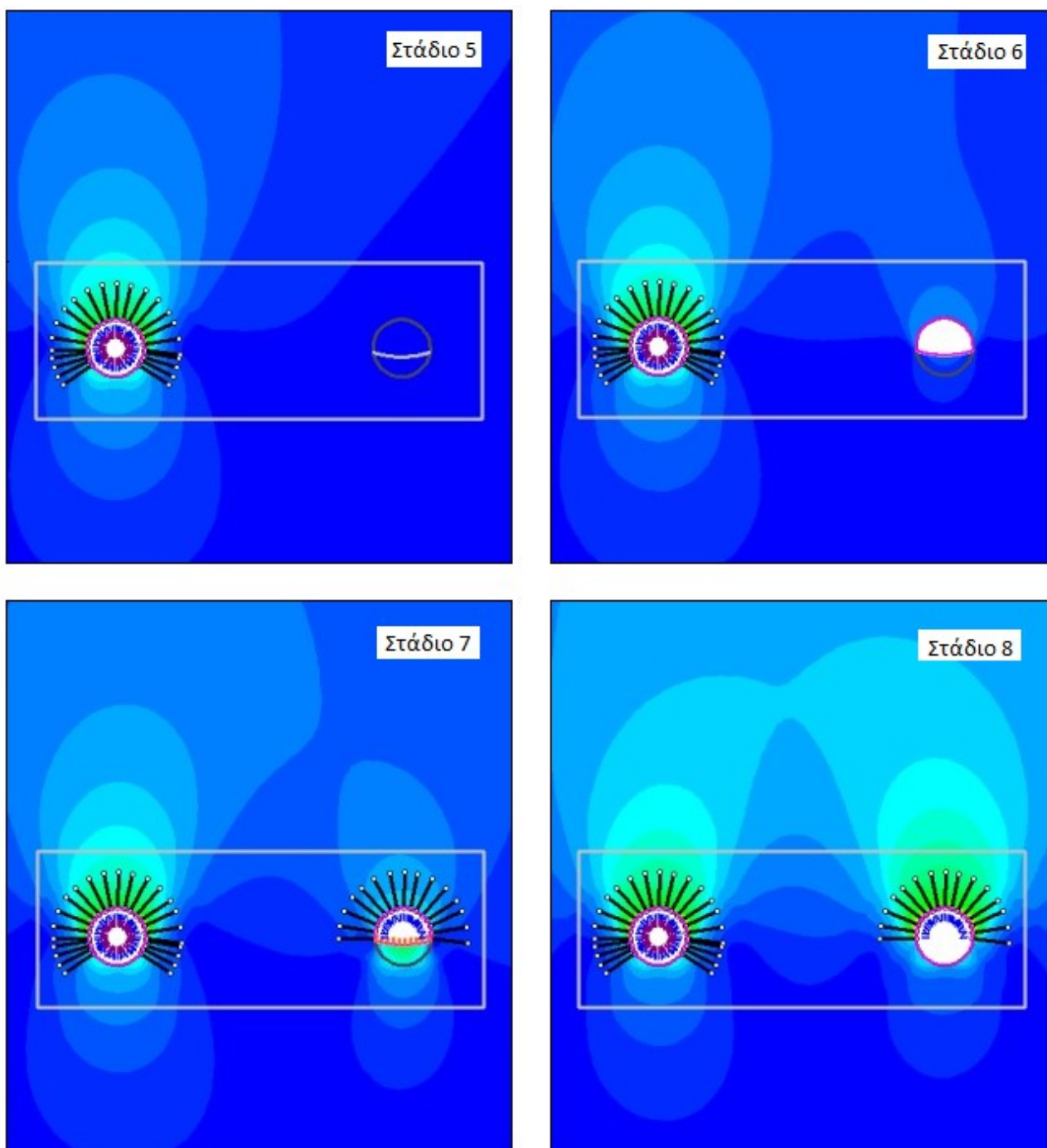
Σχήμα 5.45: Εξέλιξη συνολικών μετακινήσεων (συγκλίσεις) ανά στάδιο προσομοίωσης σε έξι χαρακτηριστικά σημεία των δύο κλάδων (προσομοίωση 019pp)

Το εδαφικό προφίλ έχει προσομοιωθεί με ενιαίο υλικό σχιστώδη σερπεντινίτη. Παρατηρούμε ότι οι εδαφικές μετακινήσεις των δύο κλάδων ανά τμήμα (θόλος, παρειά, πυθμένας) είναι τις ίδιες τάξης. Παρατηρούμε την εξέλιξη των 3 εδαφικών στοιχείων στον αριστερό κλάδο κατά τα στάδια προσομοίωσης, το μεγαλύτερο μέρος των συγκλίσεων τους, χωρίς να λαμβάνεται υπόψιν ο ερπυσμός, το λαμβάνουν στη Β' φάση εκσκαφής (στάδιο 4). Αντίστοιχα τα 3 εδαφικά στοιχεία του δεξιού κλάδου λαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος των συγκλίσεων τους, χωρίς να λαμβάνεται υπόψιν ο ερπυσμός, στη Β' φάση εκσκαφής της σήραγγας (στάδιο 8). Μικρές συγκλίσεις του αριστερού κλάδου συνεχίζονται κατά τη διάρκεια εκσκαφής του δεξιού κλάδου. Αυτό οφείλεται στο φαινόμενο της αλληλεπίδρασης των 2 σηράγγων, το οποίο σε αυτή τη προσομοίωση δεν είναι καθόλου ισχυρό σε σχέση με προηγούμενες προσομοιώσεις (λόγω εδαφικού υλικού άλλα και απόστασης των 2 σηράγγων).

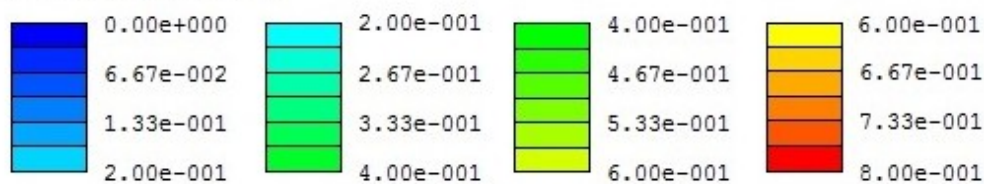
Παρουσιάζεται η εξέλιξη των εδαφικών μετακινήσεων (συγκλίσεων) όπως υπολογίστηκαν στο περιβάλλον του προγράμματος Phase2.



Σχήμα 5.46: Εξέλιξη εδαφικών μετακινήσεων ανά στάδιο προσομοίωσης (στάδια 1 με 4)

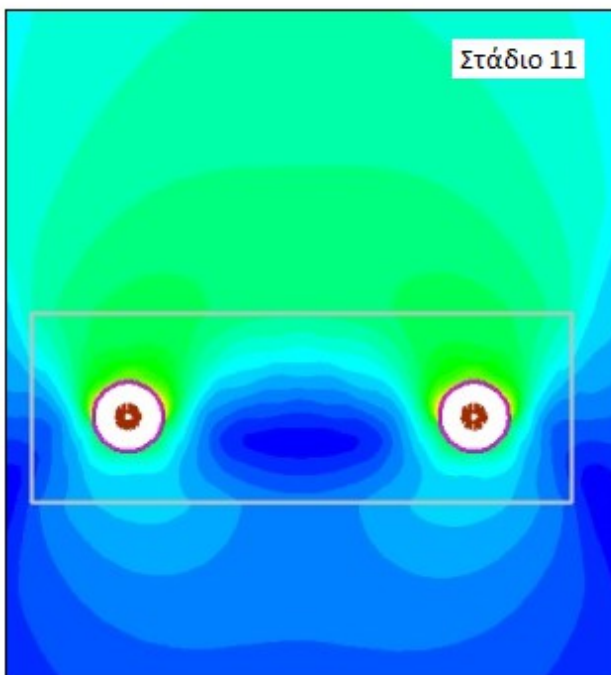
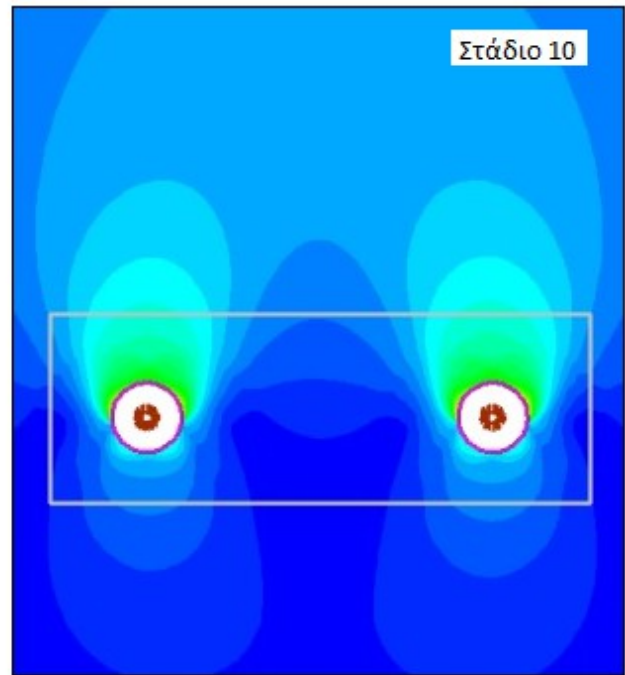
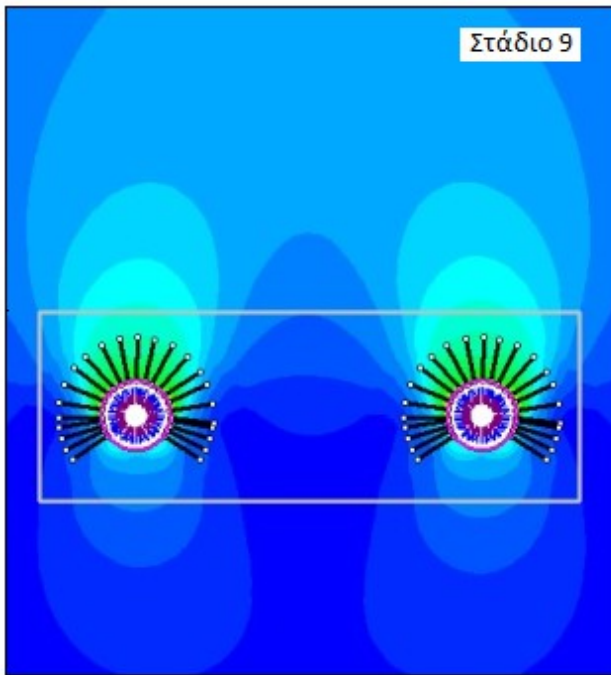


Total Displacement m



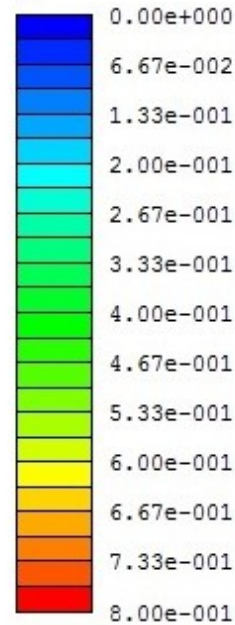
Υπόμνημα για τα στάδια 5, 6, 7 & 8

Σχήμα 5.47: Εξέλιξη εδαφικών μετακινήσεων ανά στάδιο προσομοίωσης (στάδια 5 με 8)



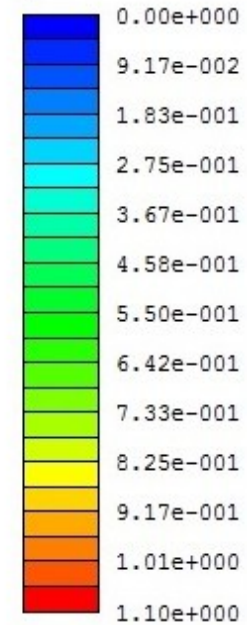
Υπόμνημα για τα
στάδια 9 & 10

Total
Displacement
m



Υπόμνημα για το
στάδιο 11

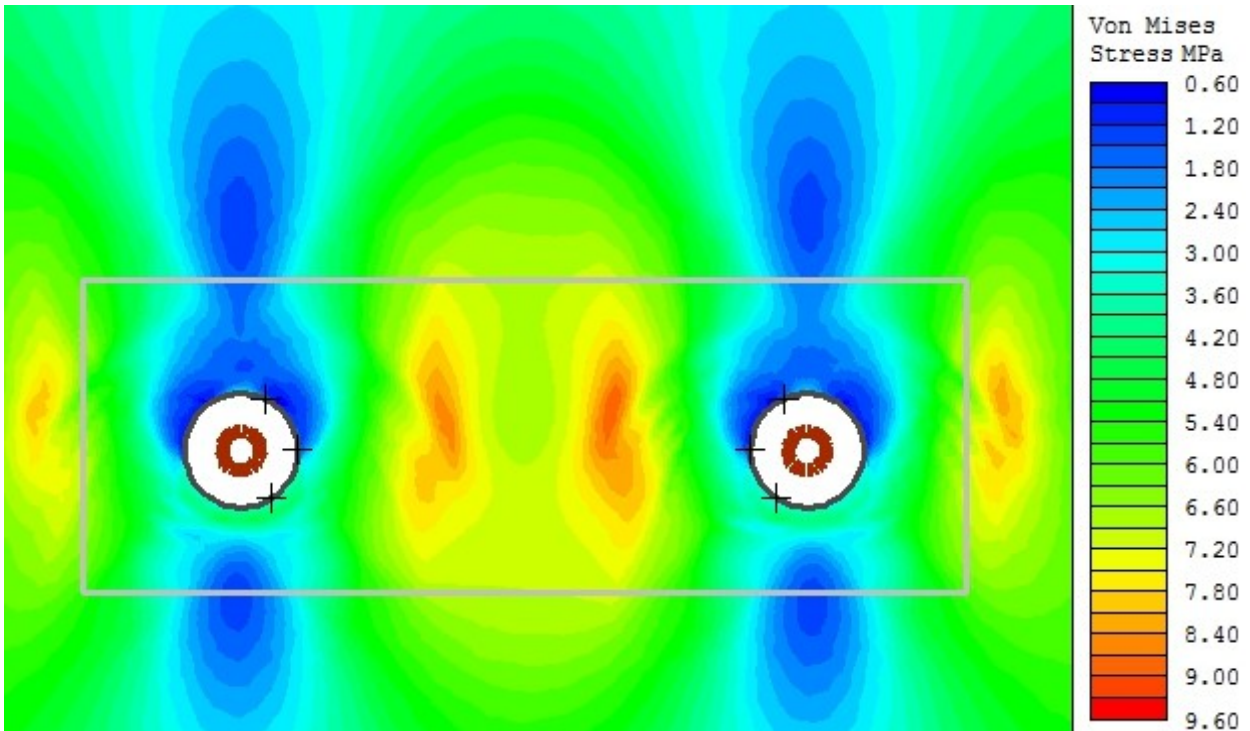
Total
Displacement
m



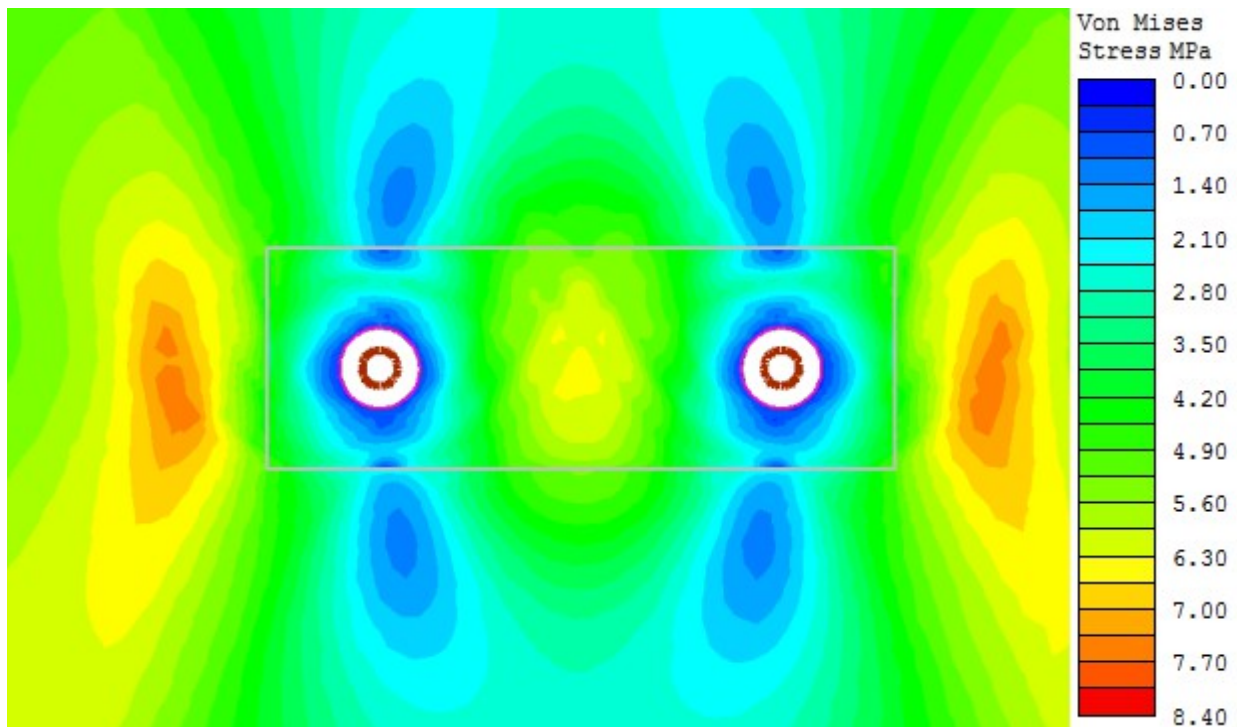
Σχήμα 5.48: Εξέλιξη εδαφικών μετακινήσεων ανά στάδιο προσομοίωσης (στάδια 9 με 11)

5.5.13.2. Τάσεις von Mises

Στην παρακάτω εικόνα δίνονται οι τάσεις von Mises για τη συγκεκριμένη προσομοίωση (στάδιο 10). Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως ο συντελεστής ωθήσεων K είναι ίσος με 0,5. Παρατηρούμε ότι το μέγιστο των τάσεων von Mises εμφανίζεται δεξιά και αριστερά των παρειών της σήραγγας. Οι ελάχιστες τιμές των τάσεων von Mises εμφανίζονται στη στέψη και στον πυθμένα της σήραγγας.



Σχήμα 5.49: Τάσεις von Mises κατά το στάδιο 10 (προσομοίωση 019pp)

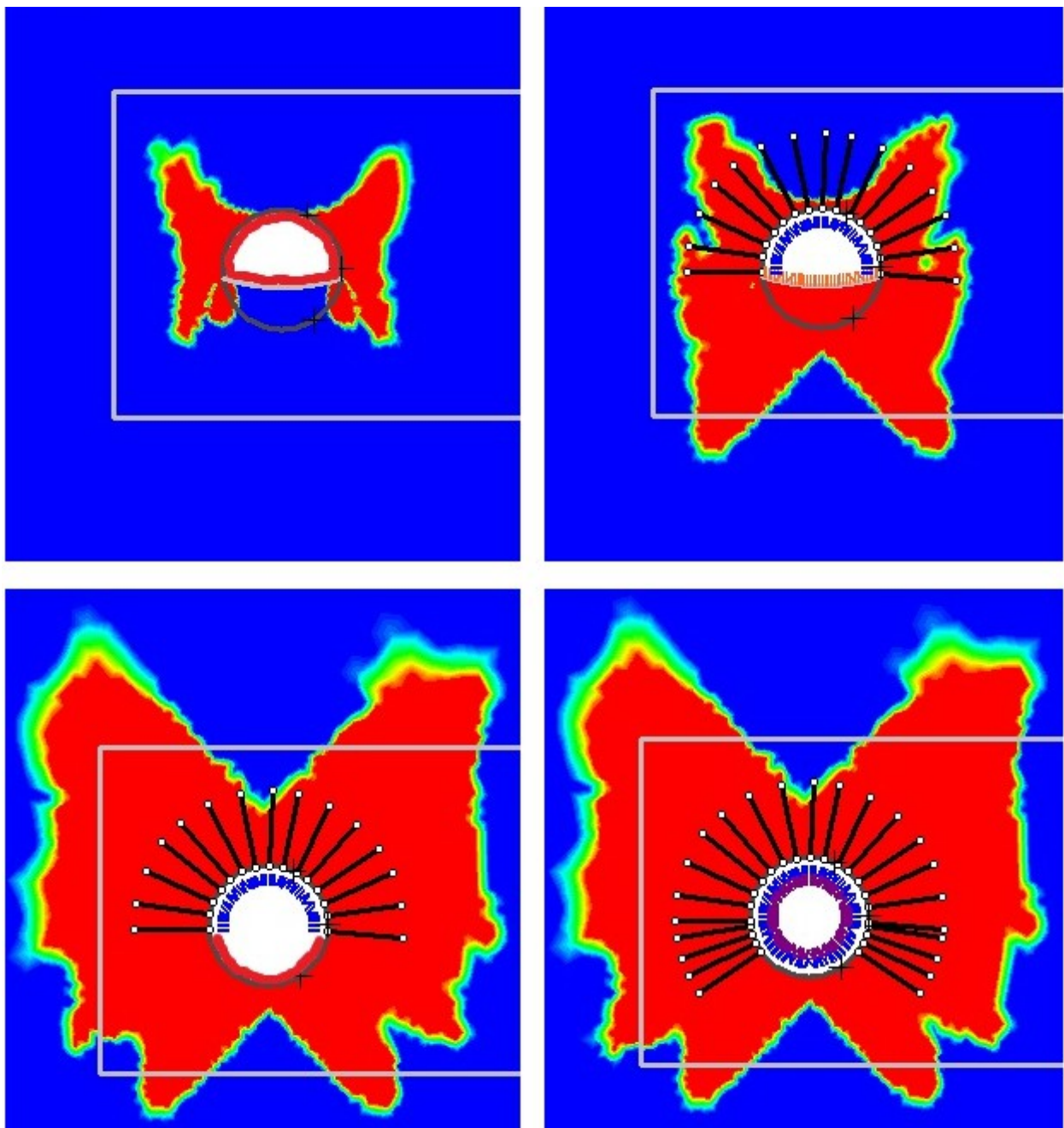


Σχήμα 5.50: Τάσεις von Mises κατά το στάδιο 11 (προσομοίωση 019pp)

Επιπλέον, οι τάσεις von Mises λαμβάνουν το μέγιστο των τιμών τους σε κάποια απόσταση από τη διατομή της σήραγγας της τάξης των 15m. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ζώνη περιμετρικά της σήραγγας έχει πλαστικοποιηθεί.

5.5.13.3. Ζώνη πλαστικοποίησης

Δίνονται οι πλαστικές παραμορφώσεις που έχουν αναπτυχθεί περιμετρικά της αριστερής σήραγγας κατά τα στάδια προσομοίωσης της εκσκαφής και υποστήριξης. Η πλαστική ζώνη αναπτύσσεται στις παρειές της σήραγγας και εξελίσσεται (αυξάνεται) κατά τα στάδια προσομοίωσης. Παρατηρούμε ότι στο θόλο και στον πυθμένα η πλαστική ζώνη είναι πολύ περιορισμένη σε σχέση με τις παρειές. Αυτό οφείλεται, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, στην επιλογή συντελεστή ωθήσεων $K=0,5$, όπου οι μέγιστες τιμές τάσης von Mises εμφανίζονται στις παρειές.

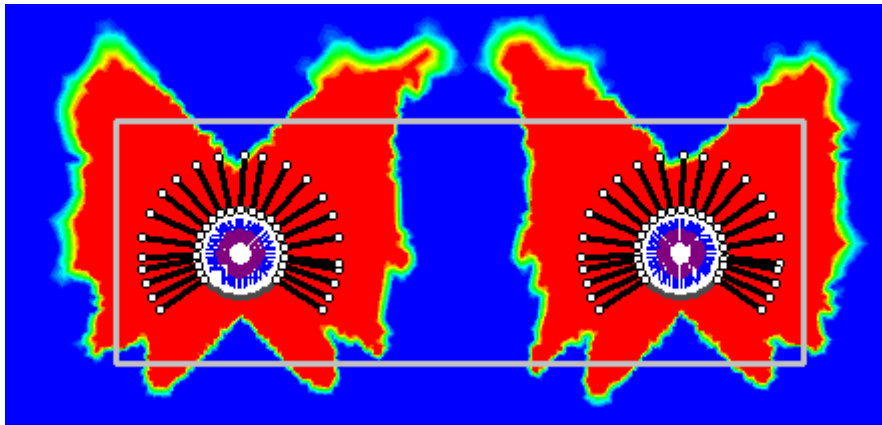


Σχήμα 5.51: Ζώνη πλαστικοποίησης κατά το στάδια 2, 3, 4 και 5 (προσομοίωση 019pp)

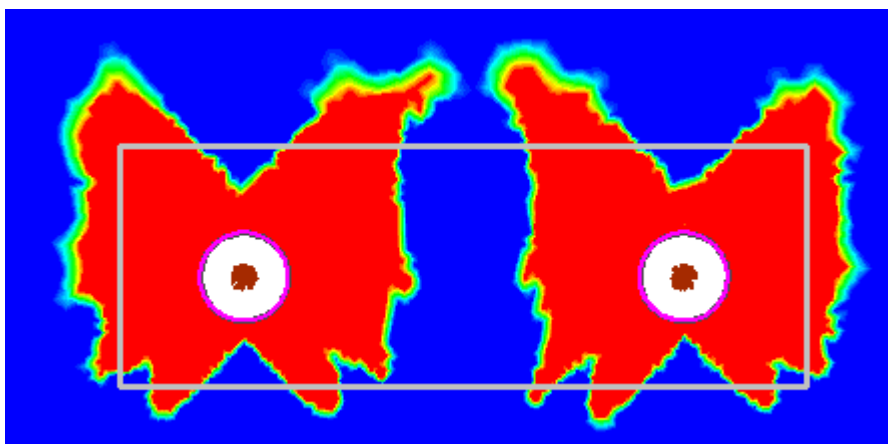
Παρατηρούμε ότι η πλαστική ζώνη στη δεξιά σήραγγα αποκτά το μεγαλύτερο μέρος της έκτασής της, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το φαινόμενο του ερπυσμού, κατά τα στάδια 4 και 5 (αποτόνωση Β' φάσης και τοποθέτηση τελικών μέτρων άμεσης υποστήριξης). Είναι εμφανής η απουσία σημαντικής αλληλεπίδρασης μεταξύ των σηράγγων.

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται εποπτικά η ανάπτυξη της πλαστικής ζώνης περιμετρικά των δύο σηράγγων στα στάδια 9 (τοποθέτηση άμεσης υποστήριξης και στις δύο σήραγγες), 10 (τελική επένδυση και στις δύο σήραγγες).

Παρατηρούμε την απουσία ισχυρής αλληλεπίδρασης των δύο σηράγγων μέχρι και το στάδιο προσομοίωσης 10.



Σχήμα 5.52: Ζώνη πλαστικοποίησης κατά το στάδιο 10 (προσομοίωση 019pp)



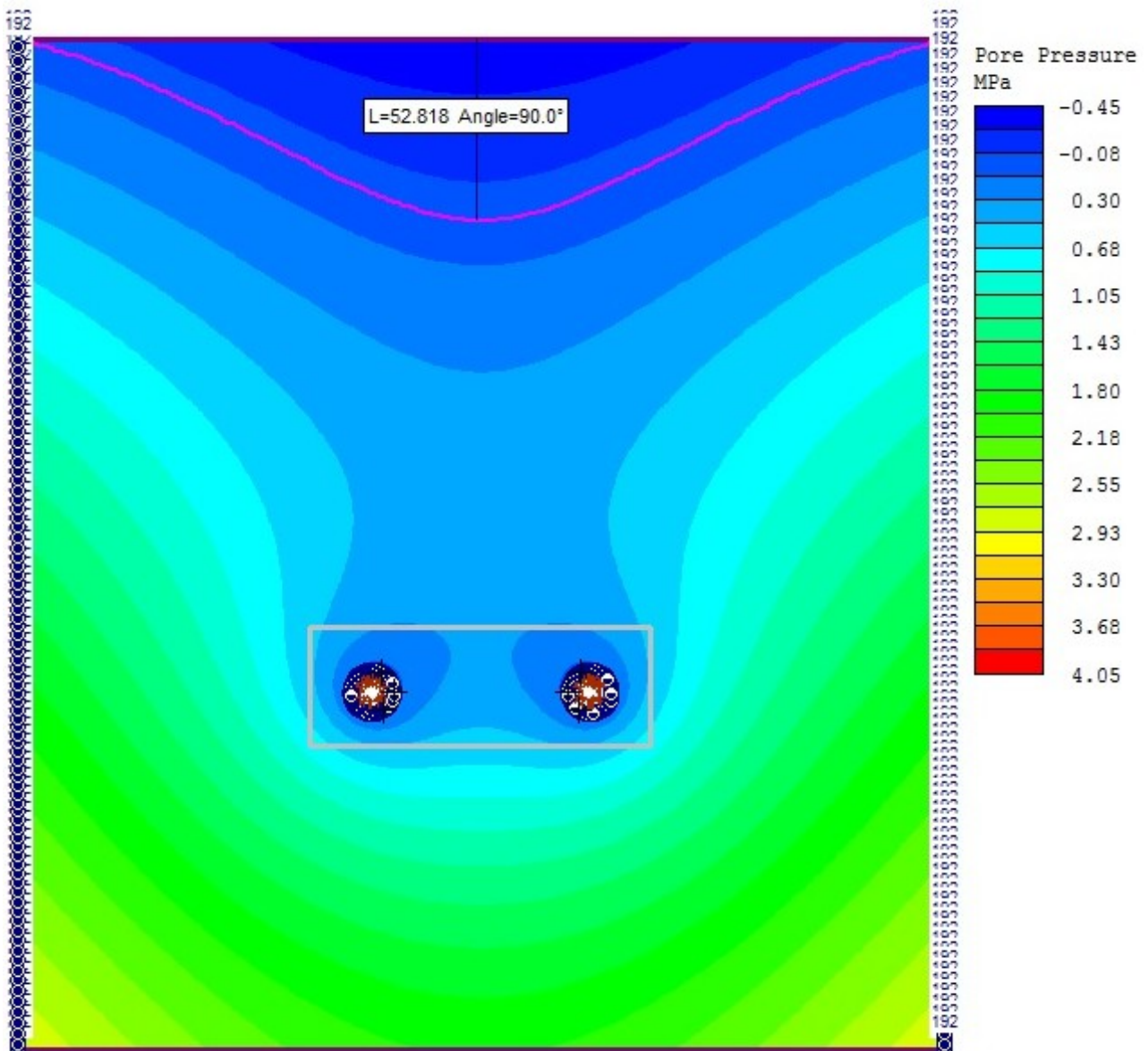
Σχήμα 5.53: Ζώνη πλαστικοποίησης κατά το στάδιο 11 (προσομοίωση 019pp)

5.5.13.4. Επίδραση του υδροφόρου ορίζοντα

Στην προσομοίωση 019pp έχει ληφθεί υπόψη η ύπαρξη υδροφόρου ορίζοντα. Τα άκρα του εδαφικού προφίλ διατηρούν τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα στα 192m πάνω από το προσωρινό δάπεδο της Α' φάσης των δύο σηράγγων. Επιπλέον περιμετρικά των εκσκαφών αλλά και των τοικωμάτων της σήραγγας δίδεται ως συνθήκη η πίεση να είναι μηδενική.

Λεπτομέρειες του τρόπου προσομοίωσης του εδαφικού προφίλ με ύπαρξη υδροφόρου ορίζοντα έχουν δοθεί στην παράγραφο 5.2.5.

Λόγω της εκσκαφής των δύο σηράγγων η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα, στο υπό μελέτη εδαφικό προφίλ, ταπεινώνεται κατά 52,8m



Σχήμα 5.54: Πιέσεις πόρων κατά το στάδιο 11 (προσομοίωση 019pp)

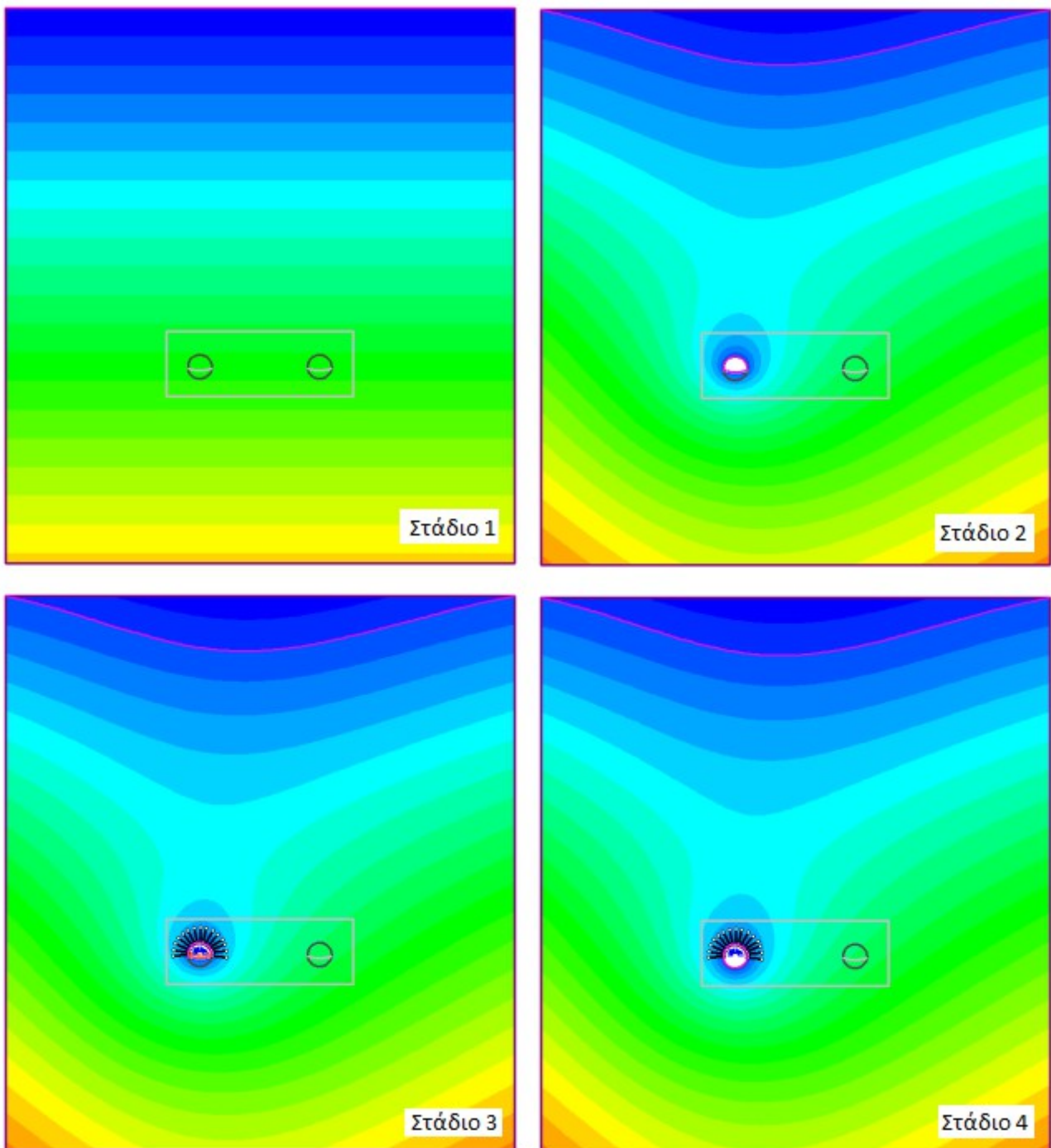
Παρατίθεται πίνακας με τις εδαφικές μετακινήσεις στα έξι σημεία μέτρησης όπως περιγράφηκε στη παράγραφο 5.5.13 για τις περιπτώσεις 019 και 019pp (παρουσία υδροφόρου ορίζοντα).

Προσομοίωση 019								
Στάδιο Προσομοίωσης – Stage	Αριστερή σήραγγα	Δεξιά σήραγγα	Αριστερή σήραγγα συγκλίσεις (m)			Δεξιά σήραγγα συγκλίσεις (m)		
			θόλος	παρειά	πυθμένας	θόλος	παρειά	πυθμένας
			u_{crown}	u_{side}	u_{bottom}	u_{crown}	u_{side}	u_{bottom}
Γεωστατικό πεδίο	1	1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Αποτόνωση	2	6	0,103	0,089	-	0,134	0,133	-
Αποτόνωση	4	8	-	-	0,154	-	-	0,165
Άμεση Υποστήριξη	5	9	0,329	0,533	0,207	0,376	0,634	0,214
Τελική επένδυση	10	10	0,360	0,566	0,195	0,378	0,636	0,217
Ερπυσμός	11	11	0,494	0,649	0,274	0,505	0,711	0,290
Τελικές συγκλίσεις (Ερπυσμός – Αποτόνωση)			0,391	0,560	0,120	0,371	0,578	0,125
Προσομοίωση 019pp								
Στάδιο Προσομοίωσης – Stage	Αριστερή σήραγγα	Δεξιά σήραγγα	Αριστερή σήραγγα συγκλίσεις (m)			Δεξιά σήραγγα συγκλίσεις (m)		
			θόλος	παρειά	πυθμένας	θόλος	παρειά	πυθμένας
			u_{crown}	u_{side}	u_{bottom}	u_{crown}	u_{side}	u_{bottom}
Γεωστατικό πεδίο	1	1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Αποτόνωση	2	6	0,095	0,074	-	0,129	0,100	-
Αποτόνωση	4	8	-	-	0,207	-	-	0,207
Άμεση Υποστήριξη	5	9	0,403	0,679	0,254	0,429	0,715	0,252
Τελική επένδυση	10	10	0,434	0,707	0,242	0,431	0,717	0,255
Ερπυσμός	11	11	0,718	1,026	0,477	0,719	1,042	0,494
Τελικές συγκλίσεις (Ερπυσμός – Αποτόνωση)			0,623	0,952	0,270	0,590	0,942	0,287

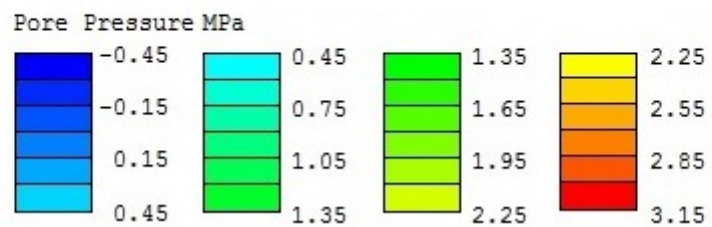
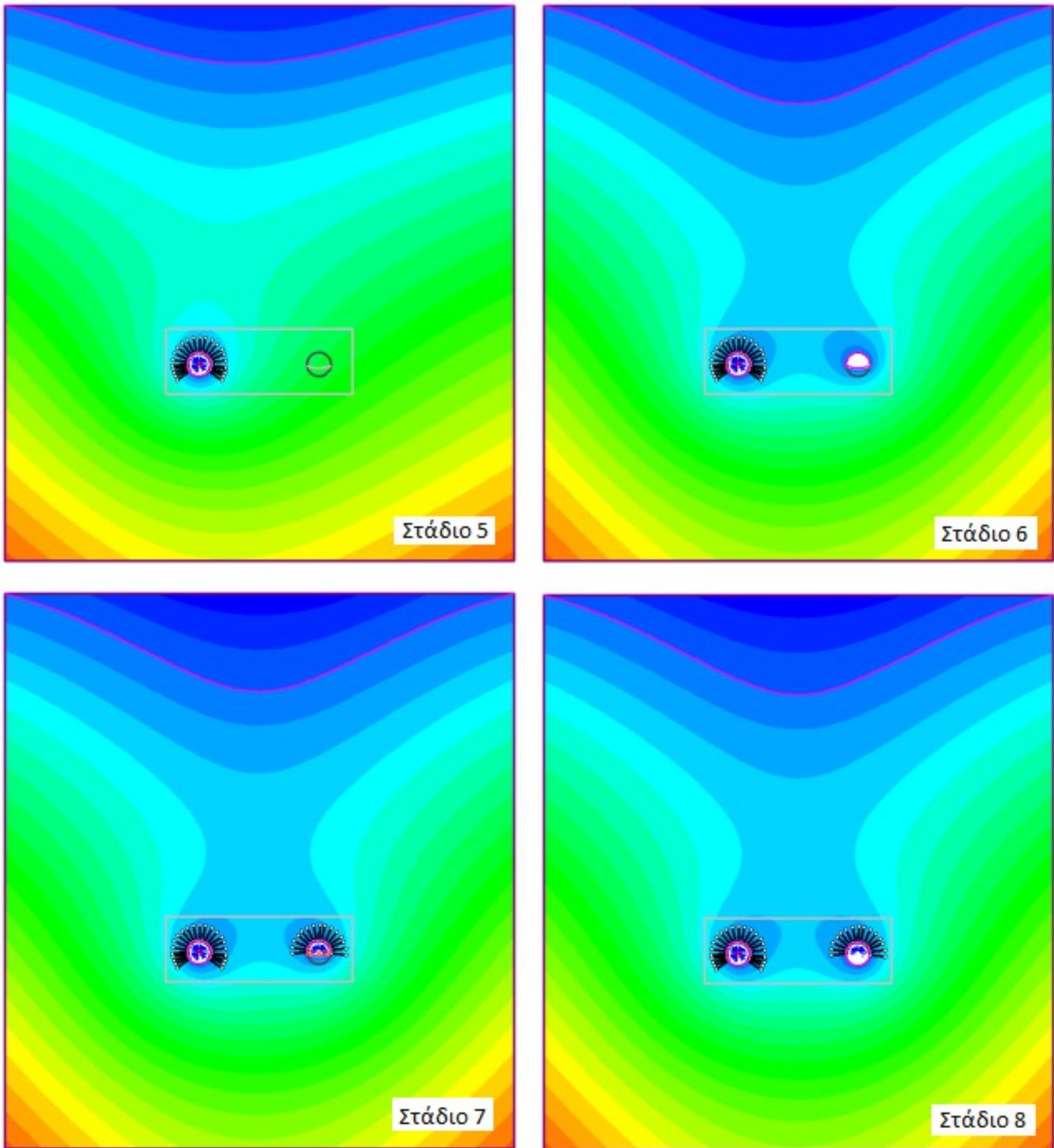
Πίνακας 5.15 Αποτελέσματα εδαφικών μετακινήσεων για την προσομοίωση 019 και 019pp

Αρχικά αφαιρούμε τις εδαφικές μετακινήσεις (συγκλίσεις) οι οποίες πραγματοποιήθηκαν μέχρι και τα στάδια της αποτόνωσης. Πρόκειται για εδαφικές μετακινήσεις οι οποίες δεν προσμετρούνται στη σύγκλιση του μανδύα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Ε.Σ) καθώς πραγματοποιήθηκαν πριν την εγκατάσταση του. Η προσθήκη υδροφόρου ορίζοντα στο υπό μελέτη εδαφικό προφίλ δυσχαιρένει τις συγκλίσεις στο μανδύα του Ε.Σ. κατά 0,23m στο θόλο, 0,39m στις παρειές και 0,16m στο πυθμένα.

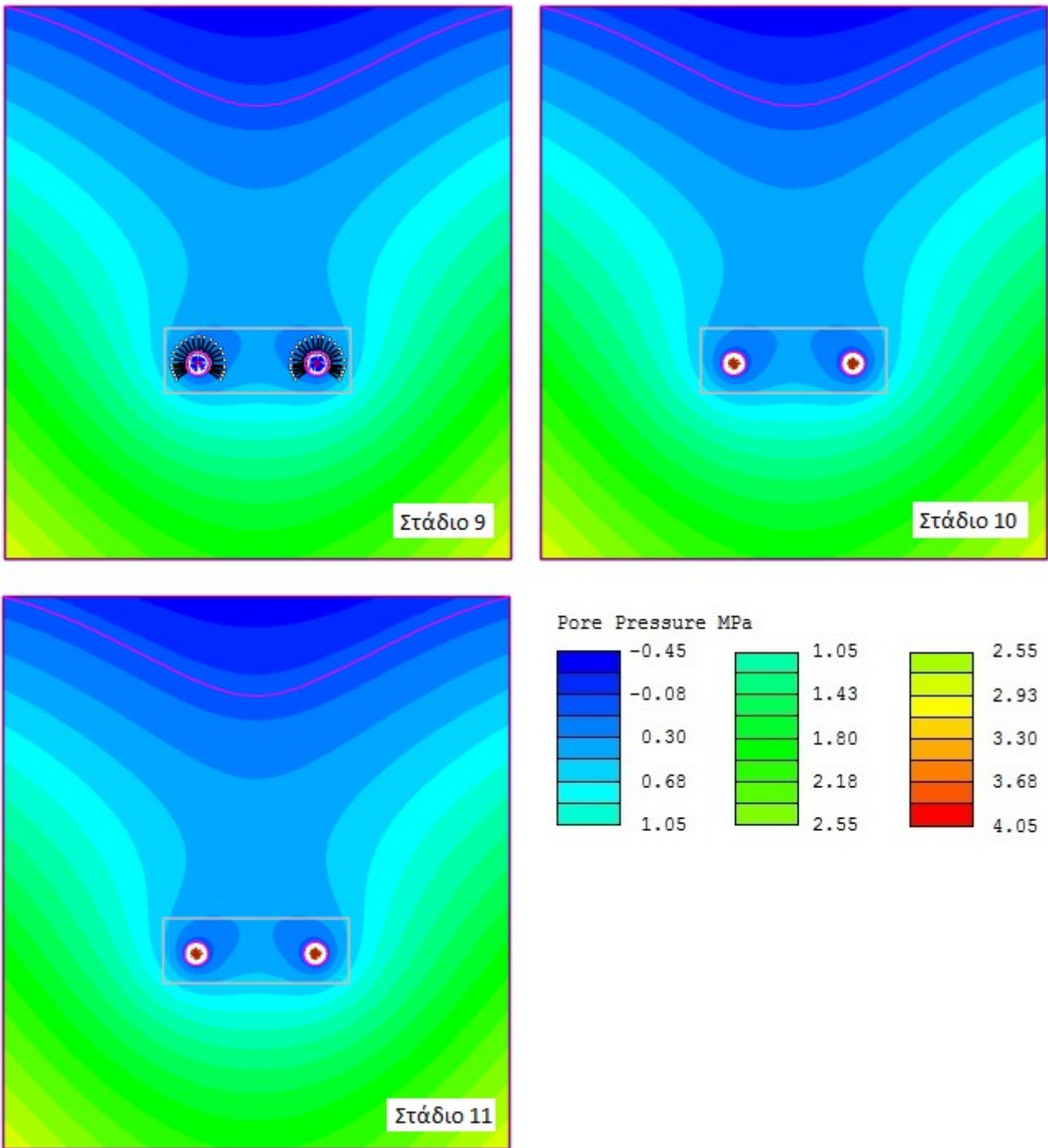
Στη συνέχεια παρουσιάζεται η εξέλιξη της πίεσης πόρων καθ' όλα τα στάδια προσομοίωσης στο υπό μελέτη εδαφικό προφίλ



Σχήμα 5.55: Εξέλιξη πιέσεων πόρων για τα στάδια 1 με 4 (προσομοίωση 019pp)

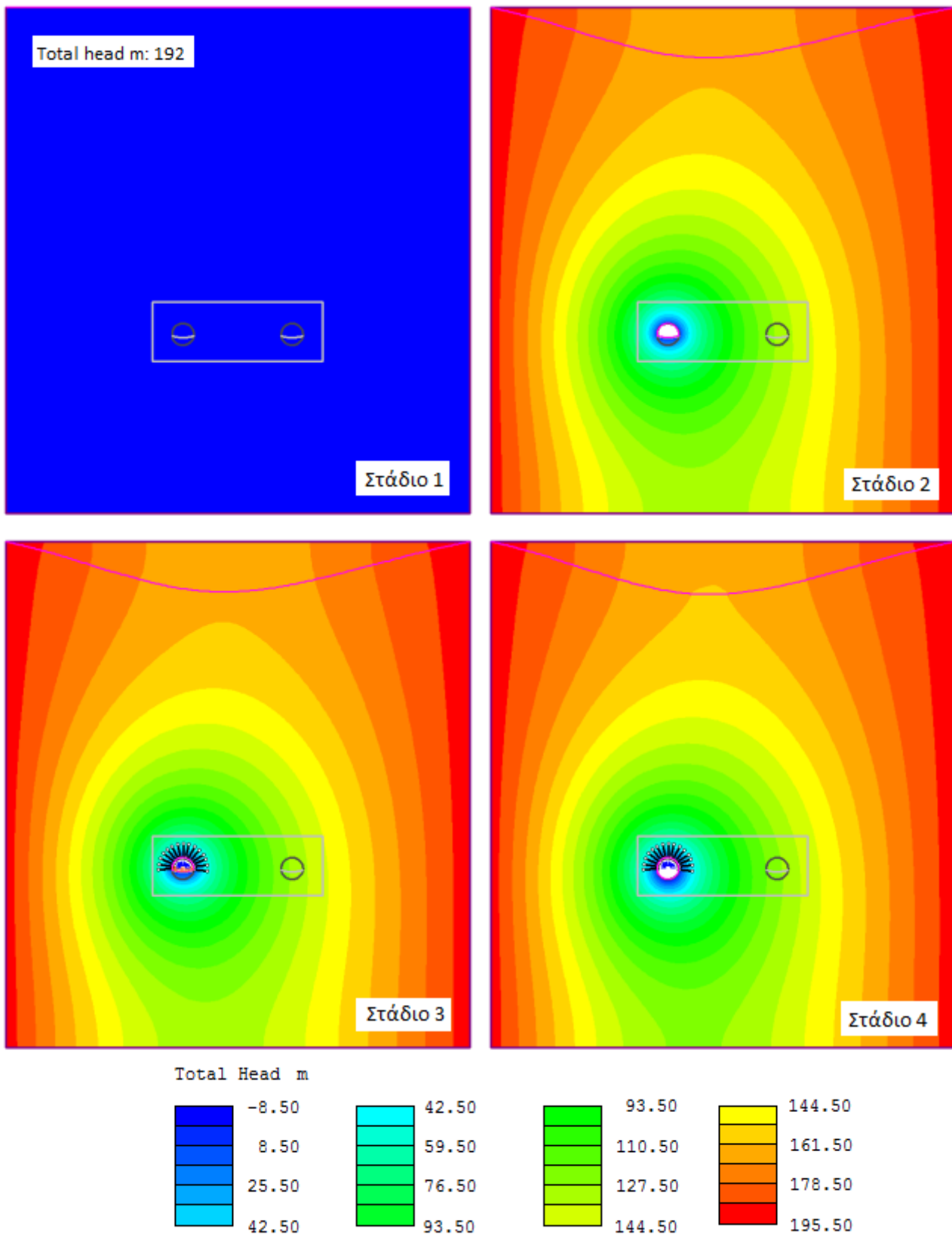


Σχήμα 5.56: Εξέλιξη πιέσεων πόρων για τα στάδια 5 με 8 (προσομοίωση 019pp)



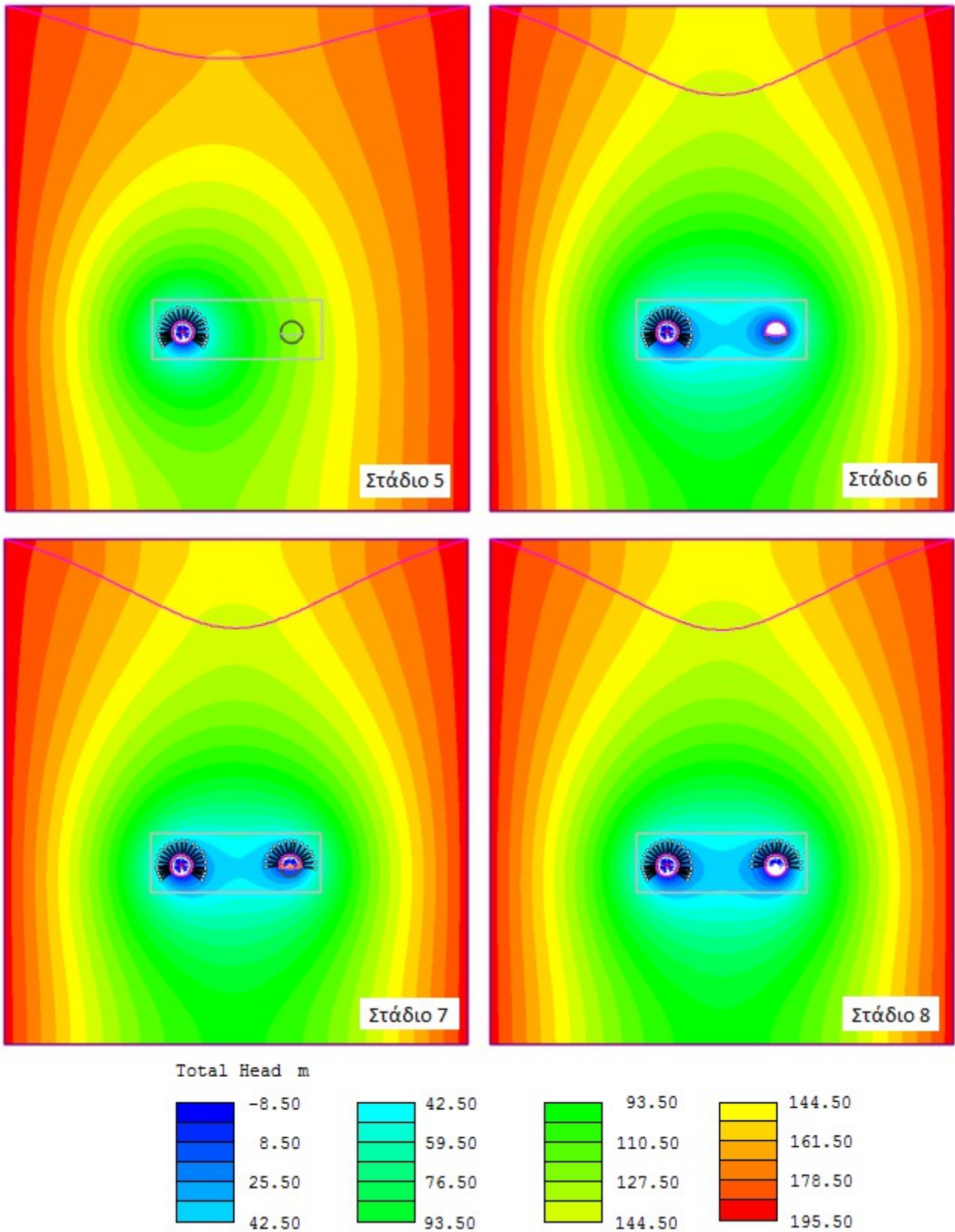
Σχήμα 5.57: Εξέλιξη πιέσεων πόρων για τα στάδια 9 με 11 (προσομοίωση 019pp)

Παρουσιάζεται το ολικό ύψος (Total head) των εδαφικών στοιχείων καθ' όλα τα στάδια προσομοίωσης στο υπό μελέτη εδαφικό προφίλ.

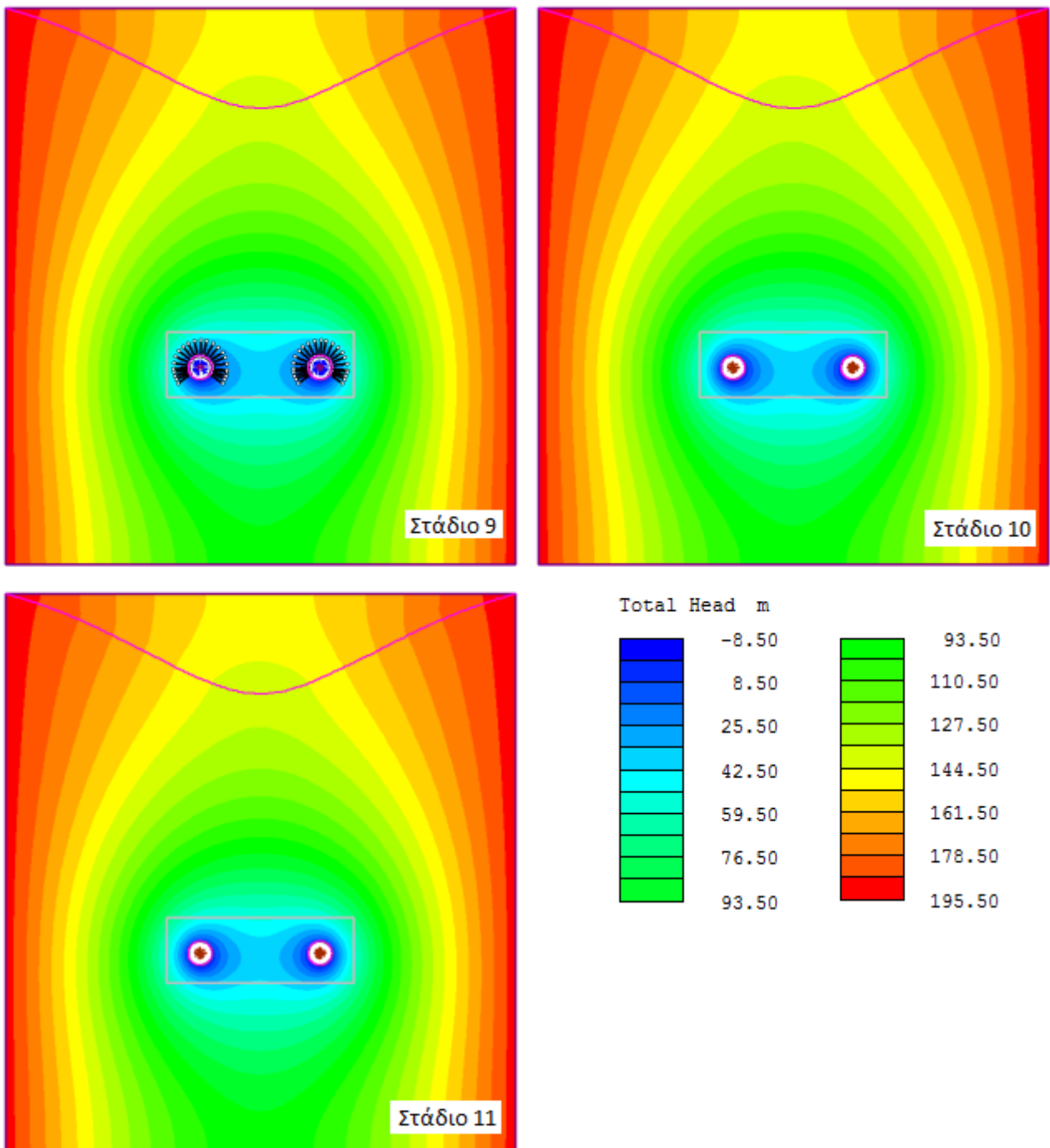


Υπόμνημα για τα στάδια 2, 3 και 4

Σχήμα 5.58: Ολικό ύψος εδαφικών στοιχείων για τα στάδια 1 με 4 (προσομοίωση 019pp)



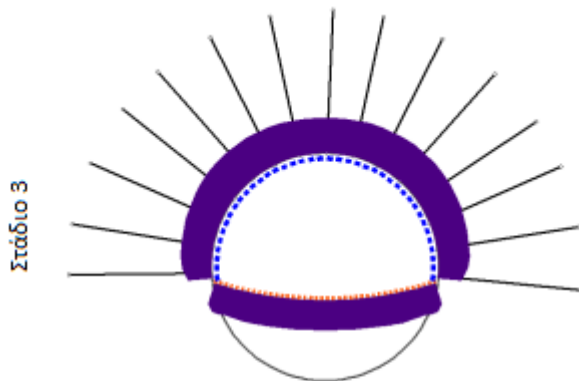
Σχήμα 5.59: Ολικό ύψος εδαφικών στοιχείων για τα στάδια 5 με 8 (προσομοίωση 019pp)



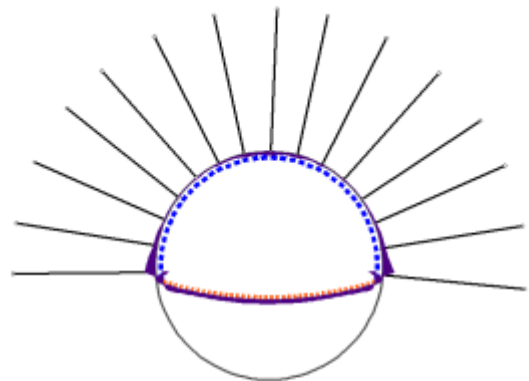
Σχήμα 5.60: Ολικό ύψος εδαφικών στοιχείων για τα στάδια 9 με 11 (προσομοίωση 019pp)

5.5.13.5. Φορτίσεις στο μανδύα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος

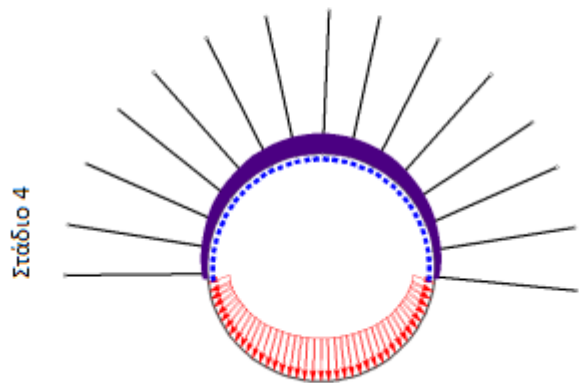
Παρουσιάζεται η κατανομή της αξονικής δύναμης N και της καμπτικής ροπής M περιμετρικά του μανδύα εκτοξευόμενου σκυροδέματος άμεσης υποστήριξης της αριστερής σήραγγας για τα στάδια προσομοίωσης 3,4 και 5.



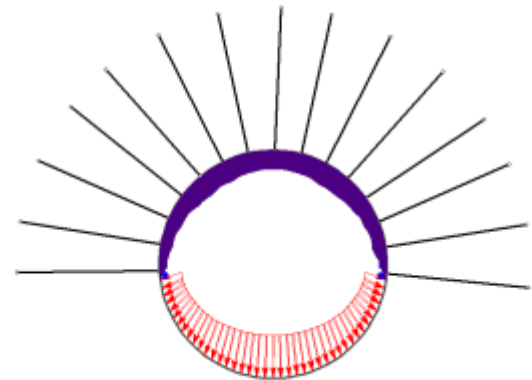
Μέγιστη αξονική δύναμη: 15,56MN
Ελάχιστη αξονική δύναμη: 8,99MN



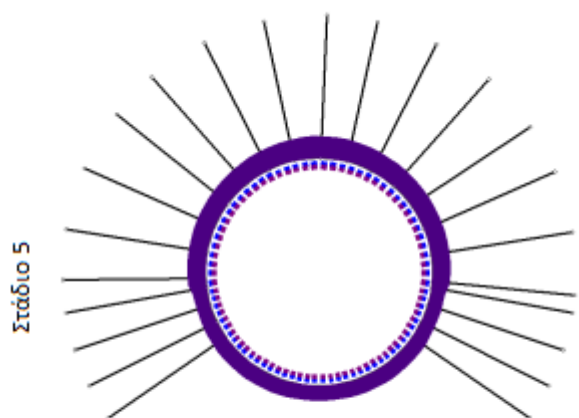
Μέγιστη καμπτική ροπή: 0,29MNm
Ελάχιστη καμπτική ροπή: -0,43MNm



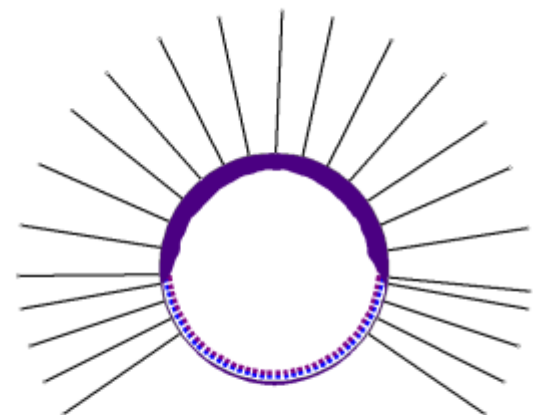
Μέγιστη αξονική δύναμη: 8,22MN
Ελάχιστη αξονική δύναμη: 1,63MN



Μέγιστη καμπτική ροπή: -0,03MNm
Ελάχιστη καμπτική ροπή: -0,52MNm



Μέγιστη αξονική δύναμη: 9,05MN
Ελάχιστη αξονική δύναμη: 5,70MN

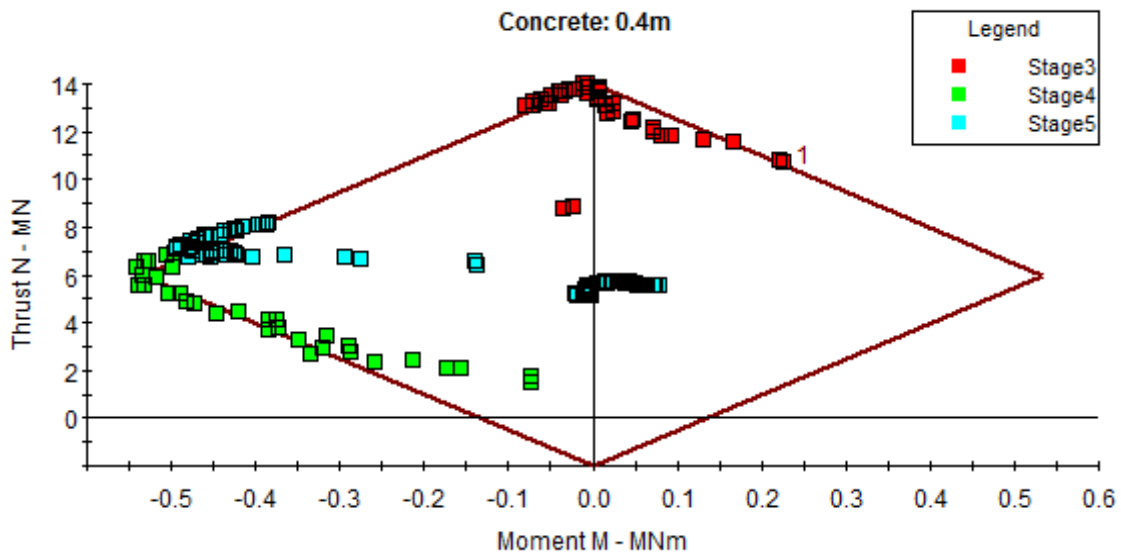


Μέγιστη καμπτική ροπή: 0,08MNm
Ελάχιστη καμπτική ροπή: -0,52MNm

Σχήμα 5.61: Κατανομή αξονικής δύναμης N και καμπτικής ροπής M περιμετρικά του μανδύα Ε.Σ. της αριστερής διατομής

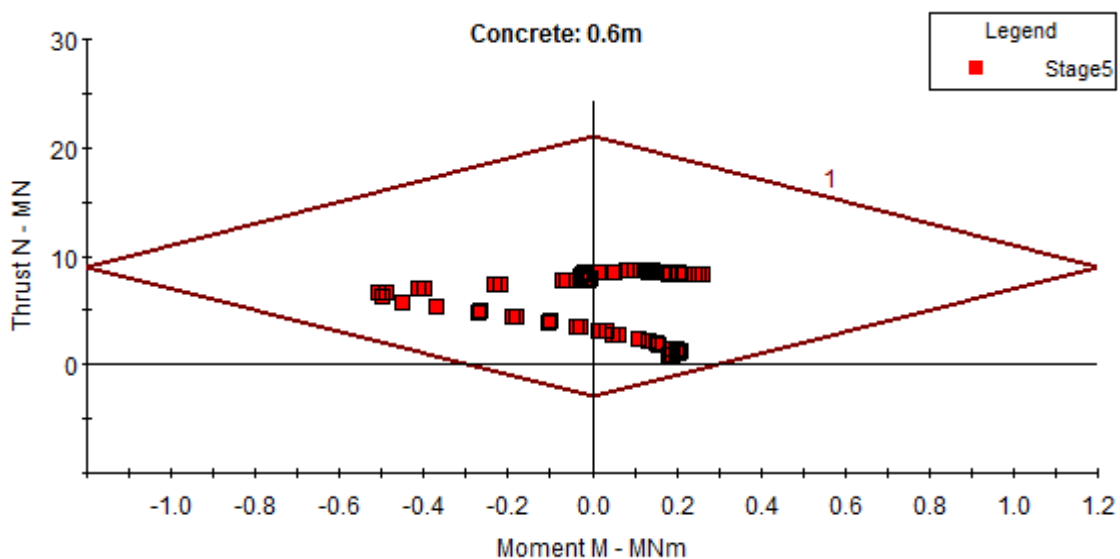
Καθώς η αλληλεπίδραση μεταξύ των σηράγγων κατά τη κατασκευή προσωρινής υποστήριξης, αλλά και τελικής επένδυσης είναι ασθενής, παραλείπονται οι αντίστοιχες εικόνες για τον δεξιό κλάδο της σήραγγας Καλλιδρόμου. Η κατανομή της αξονικής δύναμης και της καμπτικής ροπής περιμετρικά του μανδύα εκτοξευόμενου σκυροδέματος άμεσης υποστήριξης της δεξιάς σήραγγας στα στάδια 6,8 και 9 παρουσιάζουν ίδιας τάξης φορτίσεις με αυτές της αριστερής.

Δίδεται το διάγραμμα αλληλεπίδρασης (Δ.Α.) αξονικής δύναμης N και καμπτικής ροπής M της εξωτερικής επένδυσης της άμεσης υποστήριξης. Πρόκειται για μανδύα εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Ε.Σ.) 40cm ο οποίος εγκαθίσταται στην αριστερή σήραγγα κατά την Α' φάση στο 3ο στάδιο προσομοίωσης.



Σχήμα 5.62: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης αξονικής δύναμης και καμπτικής ροπής για τον εξωτερικό μανδύα Ε.Σ. πάχους 40cm στον αριστερό κλάδο (στάδια 3 με 5)

Παρουσιάζεται επιπλέον το Δ.Α. αξονικής δύναμης N και καμπτικής ροπής M της εσωτερικής επένδυσης της άμεσης υποστήριξης. Πρόκειται για μανδύα Ε.Σ. 60cm που εγκαθίσταται στην αριστερή σήραγγα κατά την Α' φάση στο 3ο στάδιο προσομοίωσης.

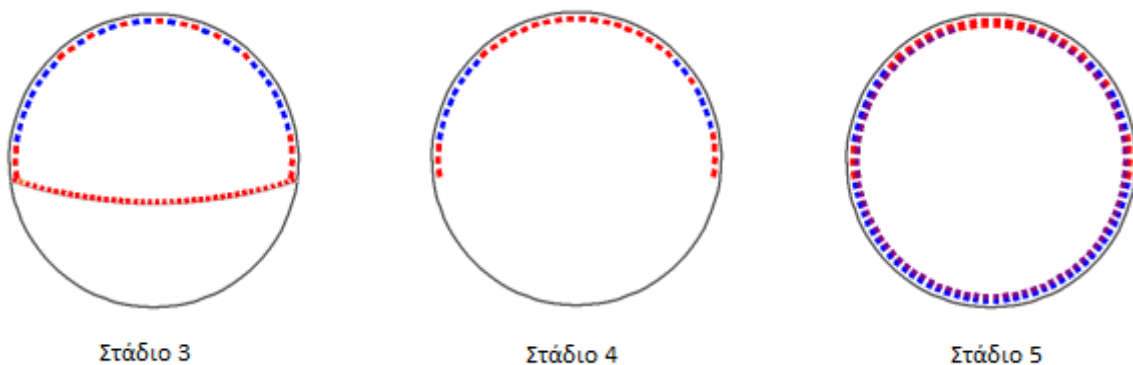


Σχήμα 5.63: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης αξονικής δύναμης και καμπτικής ροπής για τον εσωτερικό μανδύα Ε.Σ. πάχους 60cm στον αριστερό κλάδο (στάδιο 5)

Και για τα δύο παραπάνω διαγράμματα, η γραμμή με αριθμό 1 δίνει τους πιθανούς συνδυασμούς αξονικής δύναμης και καμπτικής ροπής για τους οποίους ο συντελεστής ασφαλείας για ένα στοιχείο του Ε.Σ είναι ίσος με 1. Η περιοχή (μορφή ρόμβου) που οριοθετείται από τη γραμμή 1 αποτελεί τους πιθανούς συνδυασμούς για τους οποίους ένα στοιχείο του Ε.Σ έχει συντελεστή ασφαλείας μεγαλύτερο από 1. Αντίστοιχα σημεία εκτός της παραπάνω περιοχής έχουν αστοχήσει.

Κατά το στάδιο 3 (αποτόνωση Α' φάσης) διαρρέουν οι παρειές της διατομής. Τα στοιχεία των παρειών δέχονται υψηλές αξονικές δυνάμεις και αστοχούν (πλαστικοποιούνται). Αυτό οφείλεται στον συντελεστή $K = 0,5$, ο οποίος επηρεάζει τη μορφή της πλαστικής ζώνης η οποία αναπτύσσεται κατά το μεγαλύτερο μέρος της στις παρειές (μορφή πεταλούδας). Στο στάδιο 4 παρατηρούμε την ύπαρξη σημείων που δεν παραλαμβάνουν μεγάλα μεγέθη τιμών N και M (έχουν πλαστικοποιηθεί) και επιπλέον διαρρέουν τα στοιχεία του θόλου. Η αστάθεια που δημιουργείται λόγω της εκσκαφής του πυθμένα δίνει πολύ μεγάλες τιμές ροπής. Στο στάδιο 5 προστίθεται επιπλέον ο εσωτερικός μανδύας Ε.Σ. (πάχους 60cm) στο θόλο. Στον πυθμένα προστίθεται μανδύας 2 στρώσεων (εσωτερικός και εξωτερικός μανδύας συνολικού πάχους 1m). Παρουσιάζεται ανακατανομή των φορτίσεων. Τέλος, από το διάγραμμα αλληλεπίδρασης για τον εσωτερικό μανδύα Ε.Σ., παρατηρούμε ότι τα σημεία στον εσωτερικό μανδύα δεν έχουν αστοχήσει (πλαστικοποιηθεί).

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται γραφικά τα στοιχεία του μανδύα Ε.Σ άμεσης υποστήριξης της αριστερής σήραγγας που πλαστικοποιούνται κατά τα στάδια 3, 4 και 5.



Σχήμα 5.64: Σημεία που έχουν πλαστικοποιηθεί στον μανδύας άμεσης υποστήριξης Ε.Σ. στην αριστερή σήραγγα

5.6. Επεξεργασία αποτελεσμάτων από τις ανάστροφες αναλύσεις

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τις ανάστροφες αναλύσεις και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων τους.

- Μεταβολή των συγκλίσεων για αύξηση της συνοχής c με σταθερό μέτρο ελαστικότητας E

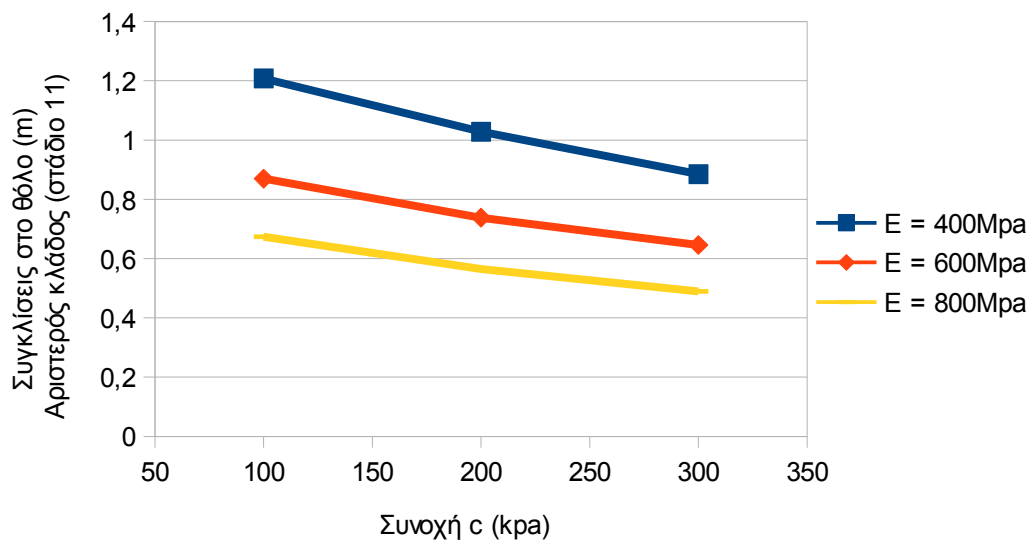
Για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη μεταβολή των συγκλίσεων σε σχέση με τη συνοχή (c) έχουν καταστρωθεί 3 διαγράμματα. Το κάθε διάγραμμα απεικονίζει τη μεταβολή των συγκλίσεων σε συγκεκριμένο σταθμό μέτρησης της διατομής της αριστερής σήραγγας (θόλος, παρειά, πυθμένας) για το τελευταίο στάδιο προσομοίωσης του ερπυστικού φαινομένου σε σχέση με τη συνοχή του υλικού υπό σταθερό μέτρο ελαστικότητας. Σημειώνεται πως, οι συγκλίσεις που παρουσιάζονται στο στάδιο 11 είναι καθαρές, δηλαδή, έχουν αφαιρεθεί τυχόν εδαφικές μετακινήσεις κατά τα στάδια της εκσκαφής - αποτόνωσης υλικού. Με αυτόν το τρόπο υπολογίζουμε τη συμπεριφορά - συγκλίσεις που θα έχουν τα τοιχώματα της σήραγγας, καθώς η αρχή μέτρησης των συγκλίσεων στη διατομή ξεκινάει με την εγκατάσταση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και των στόχων μέτρησης.

Παρατηρούμε ότι αύξηση της συνοχής c με σταθερό μέτρο ελαστικότητας E επιφέρει μείωση των συγκλίσεων στο θόλο και στις παρειές. Ο πυθμένας με την αύξηση της συνοχής του υλικού παρουσιάζει μεγαλύτερη ανύψωση της τάξης των 5cm με 7cm. Σχετικά με τις μετακινήσεις στο θόλο και τις παρειές, όσο μικρότερο είναι το μέτρο ελαστικότητας τόσο μεγαλύτερη είναι η βελτίωση των αποτελεσμάτων των συγκλίσεων. Στον θόλο για μέτρο ελαστικότητας $E = 400\text{MPa}$ και αύξηση της συνοχής c κατά 200kpa, υπολογίζεται μείωση των συγκλίσεων κατά 0,32 cm ενώ στην ίδια περίπτωση με $E = 800\text{MPa}$ η μείωση των συγκλίσεων είναι 0,19cm. Αντίστοιχα, στην αριστερή παρειά για μέτρο ελαστικότητας $E = 400\text{MPa}$ και αύξηση της συνοχής c κατά 200kpa, υπολογίζεται μείωση των συγκλίσεων κατά 0,66 cm ενώ στην ίδια περίπτωση με $E = 800\text{MPa}$ η μείωση των συγκλίσεων είναι 0,34cm.

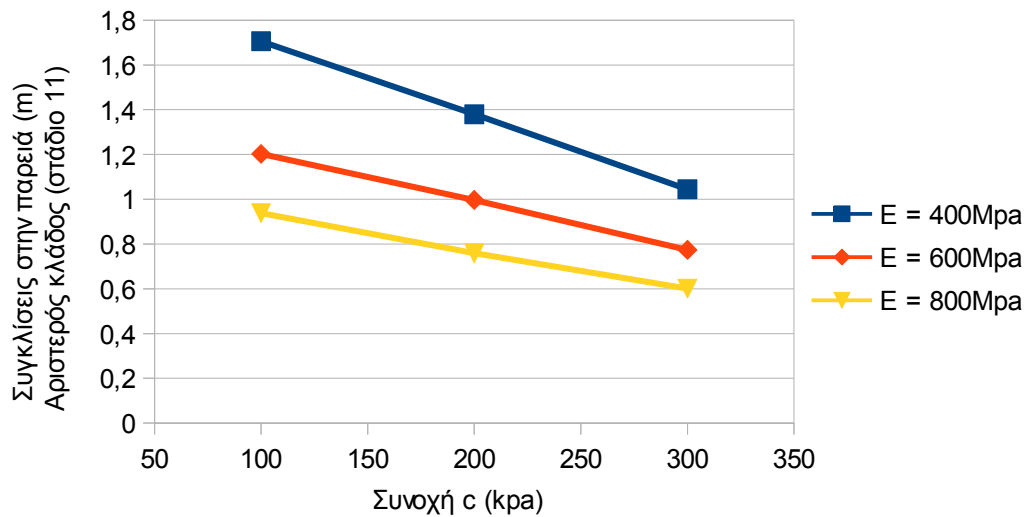
Παρατίθεται πίνακας με τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την παραπάνω ανάλυση καθώς και τα 3 σχετικά διαγράμματα. Σημειώνεται πως τα παρακάτω διαγράμματα έχουν σταθερές τις παραμέτρους $\nu=0,25$, $\varphi = 24 \text{ deg}$, $\psi = 0 \text{ deg}$, $\lambda = 0,6$

Συγκλίσεις στη διατομή της αριστερής σήραγγας για E = 400Μpa				
Προσομοίωση	c (kpa)	Καθαρές Συγκλίσεις – στάδιο 11 (m)		
		Θόλος	Παρειά	Πυθμένας
001	100	1,208	1,706	0,207
002	200	1,028	1,38	0,248
003	300	0,885	1,045	0,275
Διαφορά (c=100kpa – c=300kpa)		-0,323	-0,661	0,068
Συγκλίσεις στη διατομή της αριστερής σήραγγας για E = 600Μpa				
Προσομοίωση	c (kpa)	Καθαρές Συγκλίσεις – στάδιο 11 (m)		
		Θόλος	Παρειά	Πυθμένας
004	100	0,87	1,203	0,16
005	200	0,738	0,997	0,194
006	300	0,646	0,774	0,229
Διαφορά (c=100kpa – c=300kpa)		-0,224	-0,429	0,069
Συγκλίσεις στη διατομή της αριστερής σήραγγας για E = 600Μpa				
Προσομοίωση	c (kpa)	Καθαρές Συγκλίσεις – στάδιο 11 (m)		
		Θόλος	Παρειά	Πυθμένας
007	100	0,674	0,938	0,131
008	200	0,565	0,759	0,153
009	300	0,489	0,601	0,177
Διαφορά (c=100kpa – c=300kpa)		-0,185	-0,337	0,046

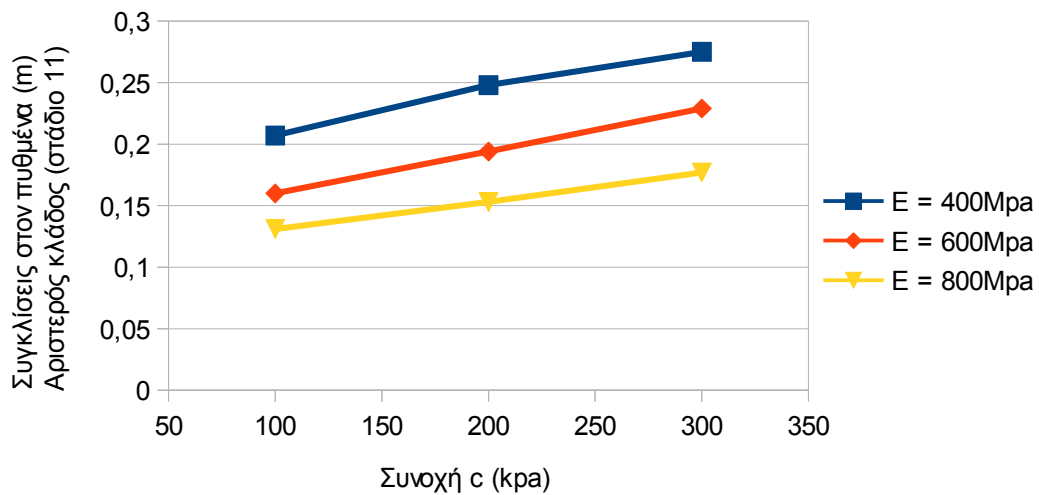
Πίνακας 5.16 Μεταβολή των συγκλίσεων σε 3 σημεία της αριστερής σήραγγας για σταθερό μέτρο ελαστικότητας E



Σχήμα 5.65: Διάγραμμα συγκλίσεων στο θόλο της αριστερής σήραγγας κατά το στάδιο 11 για διάφορες τιμές του c με σταθερό E



Σχήμα 5.66: Διάγραμμα συγκλίσεων στην παρειά της αριστερής σήραγγας κατά το στάδιο 11 για διάφορες τιμές του c με σταθερό E



Σχήμα 5.67: Διάγραμμα συγκλίσεων στον πυθμένα της αριστερής σήραγγας κατά το στάδιο 11 για διάφορες τιμές του c με σταθερό E

- Μεταβολή των συγκλίσεων για αύξηση του μέτρου ελαστικότητας E με σταθερή τη συνοχή c

Για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη μεταβολή των συγκλίσεων σε σχέση με το μέτρο ελαστικότητας E έχουν καταστρωθεί 3 διαγράμματα. Το κάθε διάγραμμα απεικονίζει τη μεταβολή των συγκλίσεων σε συγκεκριμένο σταθμό μέτρησης της διατομής της αριστερής σήραγγας (θόλος, παρειά, πυθμένας) για το τελευταίο στάδιο προσομοίωσης του ερπυστικού φαινομένου σε σχέση με το μέτρο ελαστικότητας υπό σταθερή συνοχή υλικού. Σημειώνεται πως, οι συγκλίσεις που παρουσιάζονται στο στάδιο 11 είναι καθαρές, δηλαδή, έχουν αφαιρεθεί τυχόν εδαφικές μετακινήσεις κατά τα στάδια της εκσκαφής - αποτόνωσης υλικού. Με αυτόν το τρόπο υπολογίζουμε τη συμπεριφορά - συγκλίσεις που θα έχουν τα τοιχώματα της σήραγγας, καθώς η αρχή μέτρησης των συγκλίσεων στη διατομή ξεκινάει με την εγκατάσταση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και των στόχων μέτρησης.

Παρατηρούμε ότι αύξηση του μέτρου ελαστικότητας E με σταθερή συνοχή c επιφέρει μείωση των συγκλίσεων στο θόλο, τις παρειές. Ο πυθμένας με την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας E δεν παρουσιάζει κάποια σημαντική μεταβολή στις συγκλίσεις. Σχετικά με τις μετακινήσεις στο θόλο και τις παρειές, όσο μικρότερη είναι η συνοχή τόσο μεγαλύτερη είναι η βελτίωση των αποτελεσμάτων των συγκλίσεων. Στον θόλο για συνοχή $c = 100\text{kPa}$ και αύξηση του μέτρου ελαστικότητας κατά 400MPa , υπολογίζεται μείωση των συγκλίσεων κατά $0,53\text{cm}$ ενώ στην ίδια περίπτωση με $c = 300\text{kPa}$ η μείωση των συγκλίσεων είναι $0,40\text{cm}$. Αντίστοιχα, στην αριστερή παρειά για συνοχή $c = 100\text{kPa}$ και αύξηση του μέτρου ελαστικότητας κατά 400MPa , υπολογίζεται μείωση των συγκλίσεων κατά $0,77\text{cm}$ ενώ στην ίδια περίπτωση με $c = 300\text{kPa}$ η μείωση των συγκλίσεων είναι $0,44\text{cm}$.

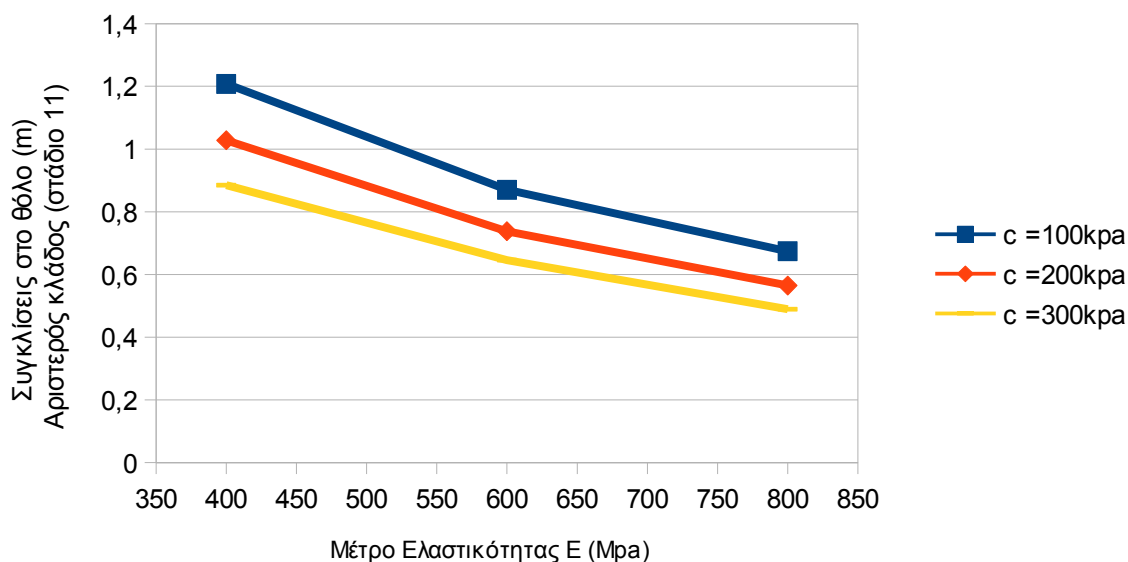
Παρατίθεται πίνακας με τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την παραπάνω ανάλυση καθώς και τα 3 σχετικά διαγράμματα. Σημειώνεται πως τα παρακάτω διαγράμματα έχουν σταθερές τις παραμέτρους $\nu=0,25$, $\varphi = 24 \text{ deg}$, $\psi = 0 \text{ deg}$, $\lambda = 0,6$

Συγκλίσεις στη διατομή της αριστερής σήραγγας για $c = 100\text{kPa}$				
Προσομοίωση	E (MPa)	Καθαρές Συγκλίσεις – στάδιο 11 (m)		
		Θόλος	Παρεία	Πυθμένας
001	400	1,208	1,706	0,207
004	600	0,87	1,203	0,16
007	800	0,674	0,938	0,131
Διαφορά (E=800MPa – E=400MPa)		-0,534	-0,768	-0,076

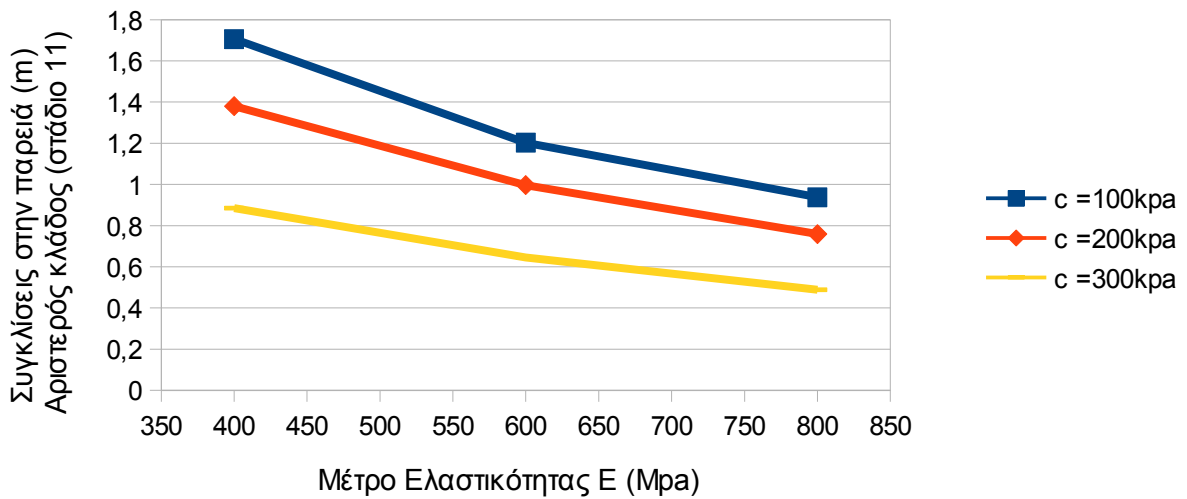
Συγκλίσεις στη διατομή της αριστερής σήραγγας για $c = 200\text{kPa}$				
Προσομοίωση	E (MPa)	Καθαρές Συγκλίσεις – στάδιο 11 (m)		
		Θόλος	Παρεία	Πυθμένας
002	400	1,028	1,38	0,248
005	600	0,738	0,997	0,194
008	800	0,565	0,759	0,153
Διαφορά (E=800MPa – E=400MPa)		-0,463	-0,621	-0,095

Συγκλίσεις στη διατομή της αριστερής σήραγγας για $c = 300\text{kPa}$				
Προσομοίωση	E (MPa)	Καθαρές Συγκλίσεις – στάδιο 11 (m)		
		Θόλος	Παρεία	Πυθμένας
003	400	0,885	1,045	0,275
005	600	0,646	0,774	0,229
009	800	0,489	0,601	0,177
Διαφορά (E=800MPa – E=400MPa)		-0,396	-0,444	-0,098

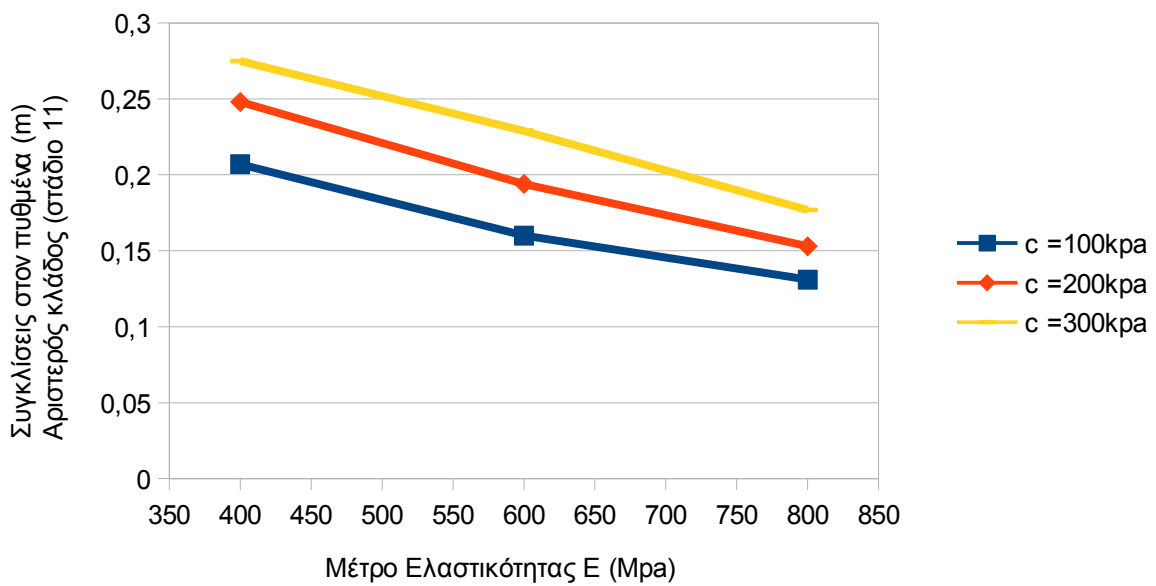
Πίνακας 5.17 Μεταβολή των συγκλίσεων σε 3 σημεία της αριστερής σήραγγας για σταθερή συνοχή c



Σχήμα 5.68: Διάγραμμα συγκλίσεων στο θόλο της αριστερής σήραγγας κατά το στάδιο 11 για διάφορες τιμές του E με σταθερό c



Σχήμα 5.69: Διάγραμμα συγκλίσεων στην παρειά της αριστερής σήραγγας κατά το στάδιο 11 για διάφορες τιμές του E με σταθερό c



Σχήμα 5.70: Διάγραμμα συγκλίσεων στον πυθμένα της αριστερής σήραγγας κατά το στάδιο 11 για διάφορες τιμές του E με σταθερό c

- Μεταβολή των συγκλίσεων για αύξηση του συντελεστή αποτόνωσης.

Οι προσομοιώσεις 001 μέχρι 009 έχουν πραγματοποιηθεί με συντελεστή αποτόνωσης $\lambda = 0,6$. Έχουν πραγματοποιηθεί 9 επιπλέον προσομοιώσεις, οι 010 μέχρι 018, με τα ίδια βραχομηχανικά χαρακτηριστικά των προσομοιώσεων 001 μέχρι 009 εκτός από το συντελεστή αποτόνωσης ο οποίος έχει λάβει την τιμή $\lambda = 0,7$. Αρχικά συγκρίνουμε τις συγκλίσεις που πραγματοποιήθηκαν στη σήραγγα στο θόλο και τις παρειές κατά τη φάση εκσκαφής Α' (στάδιο 6) και στον πυθμένα κατά τη φάση εκσκαφής Β' (στάδιο 8) για μεταβολή του λ από 0,6 σε 0,7. Παρατηρούμε ότι συγκλίσεις που πραγματοποιήθηκαν στο θόλο στην παρειά και στον πυθμένα της αριστερής σήραγγας είναι μεγαλύτερες για συντελεστή αποτόνωσης $\lambda = 0,7$. Το παραπάνω συμπέρασμα είναι αναμενόμενο λόγω της επιλογής μεγαλύτερου συντελεστή αποτόνωσης, πρακτικά η σήραγγα μένει περισσότερο χρόνο ανυποστήρικτη.

Συγκλίσεις στη διατομή της αριστερής σήραγγας για διάφορες τιμές του λ (Στάδιο Αποτόνωσης)						
Προσομοίωση	E (Mpa)	c (kpa)	λ	Συγκλίσεις (Στάδιο 6 & 8)		
				Θόλος	Παρειά	Πυθμένας
001	400	100	0,6	0,372	0,384	0,520
002	400	200	0,6	0,332	0,330	0,398
003	400	300	0,6	0,305	0,285	0,312
004	600	100	0,6	0,250	0,257	0,354
005	600	200	0,6	0,224	0,213	0,272
006	600	300	0,6	0,204	0,193	0,208
007	800	100	0,6	0,186	0,192	0,271
008	800	200	0,6	0,167	0,166	0,205
009	800	300	0,6	0,153	0,145	0,157
010	400	100	0,7	0,500	0,565	0,579
011	400	200	0,7	0,442	0,476	0,456
012	400	300	0,7	0,397	0,410	0,370
013	600	100	0,7	0,326	0,378	0,328
014	600	200	0,7	0,295	0,318	0,310
015	600	300	0,7	0,265	0,274	0,250
016	800	100	0,7	0,252	0,285	0,297
017	800	200	0,7	0,222	0,239	0,234
018	800	300	0,7	0,243	0,233	0,189
Μεταβολή των συγκλίσεων (m)						
Διαφορά Προσομοιώσεων				Θόλος	Παρειά	Πυθμένας
010 – 001				0,128	0,181	0,059
011 – 002				0,110	0,146	0,058
012 – 003				0,092	0,125	0,058
013 – 004				0,076	0,121	-0,026
014 – 005				0,071	0,105	0,038
015 – 006				0,061	0,081	0,042
016 – 007				0,066	0,093	0,026
017 – 008				0,055	0,073	0,029
018 – 009				0,090	0,088	0,032

Πίνακας 5.18 Μεταβολή συγκλίσεων στην αριστερή σήραγγα (αποτόνωση) για $\lambda=0,6$ & $0,7$

Συγκρίνονται οι καθαρές συγκλίσεις που πραγματοποιήθηκαν στην αριστερή σήραγγα για συντελεστές αποτόνωσης $\lambda = 0,6$ και $\lambda = 0,7$. Ως καθαρές θεωρούνται οι συγκλίσεις που πραγματοποιούνται στη σήραγγα έπειτα από την εγκατάσταση του μανδύα εκτοξευόμενο σκυροδέματος και των στόχων - σταθμών μετρήσεων. Για την σύγκριση αυτή αφαιρούνται οι συγκλίσεις που υπολογίστηκαν κατά το στάδιο της αποτόνωσης από τις συγκλίσεις που υπολογίστηκαν στο 11ο στάδιο προσομοίωσης του ερπυσμού.

Παρατηρούμε ότι οι περισσότερες συγκλίσεις που υπολογίστηκαν με συντελεστή αποτόνωσης $\lambda = 0,7$ είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες που υπολογίστηκαν με συντελεστή αποτόνωσης $\lambda = 0,6$. Το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο καθώς, μεγαλύτερη αποτόνωση, στο υλικό όπου πραγματοποιείται η διάνοιξη, φέρει μικρότερες τάσεις στα τοιχώματα της σήραγγας, ο φέρων οργανισμός φορτίζεται λιγότερο και επομένως οι συγκλίσεις είναι μικρότερες.

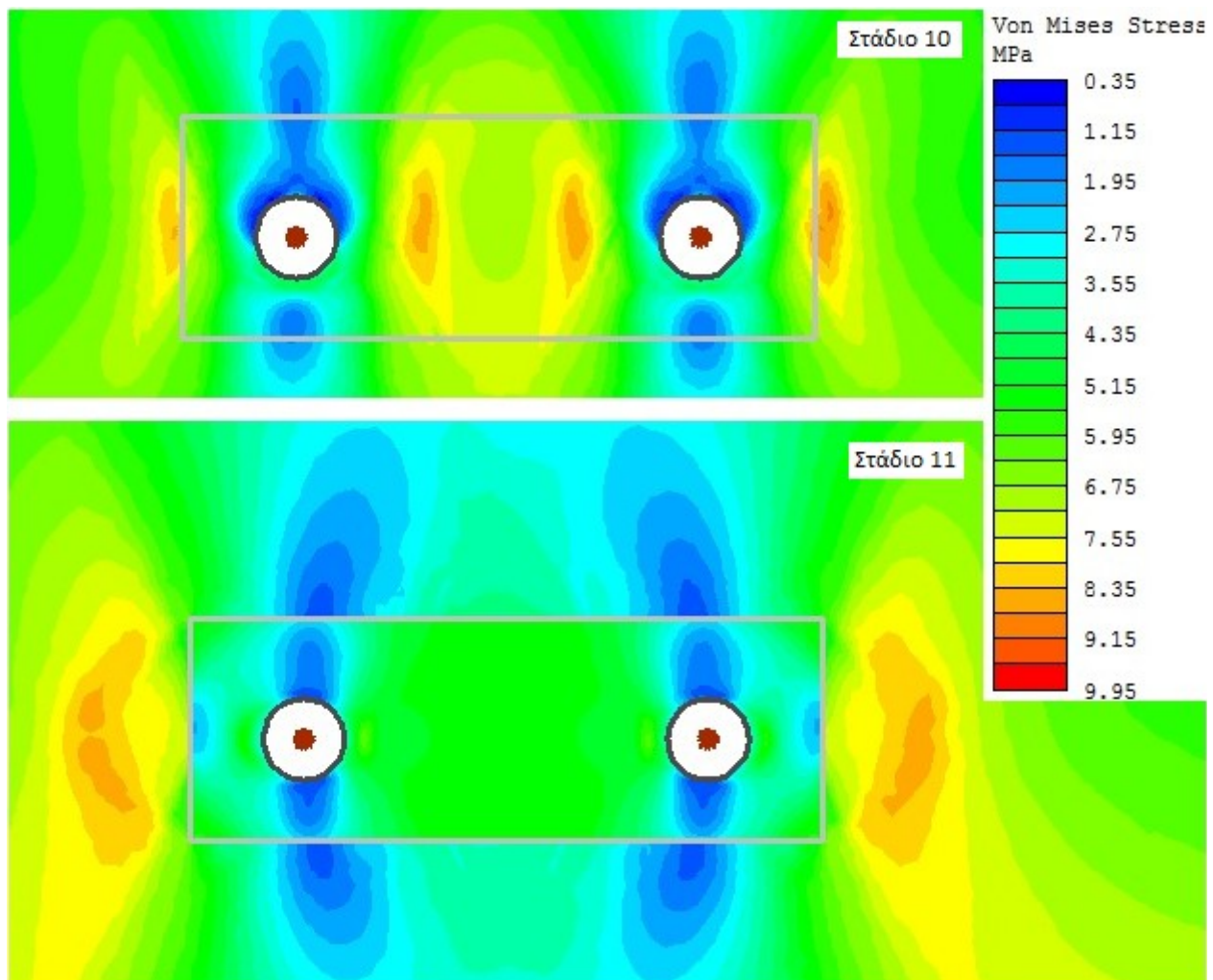
Συγκλίσεις στη διατομή της αριστερής σήραγγας για διάφορες τιμές του λ						
Προσομοίωση	E (Mpa)	c (kpa)	λ	Καθαρές Συγκλίσεις – στάδιο 11 (m)		
				Θόλος	Παρειά	Πυθμένας
001	400	100	0,6	1,208	1,706	0,207
002	400	200	0,6	1,028	1,380	0,248
003	400	300	0,6	0,885	1,045	0,275
004	600	100	0,6	0,870	1,203	0,160
005	600	200	0,6	0,738	0,997	0,194
006	600	300	0,6	0,646	0,774	0,229
007	800	100	0,6	0,674	0,938	0,131
008	800	200	0,6	0,565	0,759	0,153
009	800	300	0,6	0,489	0,601	0,177
010	400	100	0,7	1,190	1,745	0,155
011	400	200	0,7	1,028	1,404	0,208
012	400	300	0,7	0,843	1,040	0,242
013	600	100	0,7	0,854	0,942	0,156
014	600	200	0,7	0,725	0,982	0,158
015	600	300	0,7	0,610	0,756	0,192
016	800	100	0,7	0,660	0,945	0,108
017	800	200	0,7	0,535	0,738	0,120
018	800	300	0,7	0,425	0,560	0,153
Μεταβολή των συγκλίσεων (m)						
Διαφορά Προσομοιώσεων				Θόλος	Παρειά	Πυθμένας
010 – 001				-0,018	0,039	-0,052
011 – 002				0,000	0,024	-0,040
012 – 003				-0,042	-0,005	-0,033
013 – 004				-0,016	-0,261	-0,004
014 – 005				-0,013	-0,015	-0,036
015 – 006				-0,036	-0,018	-0,037
016 – 007				-0,014	0,007	-0,023
017 – 008				-0,030	-0,021	-0,033
018 – 009				-0,064	-0,041	-0,024

Πίνακας 5.19 Μεταβολή συγκλίσεων στην αριστερή σήραγγα (στάδιο 11) για $\lambda = 0,6$ και $0,7$

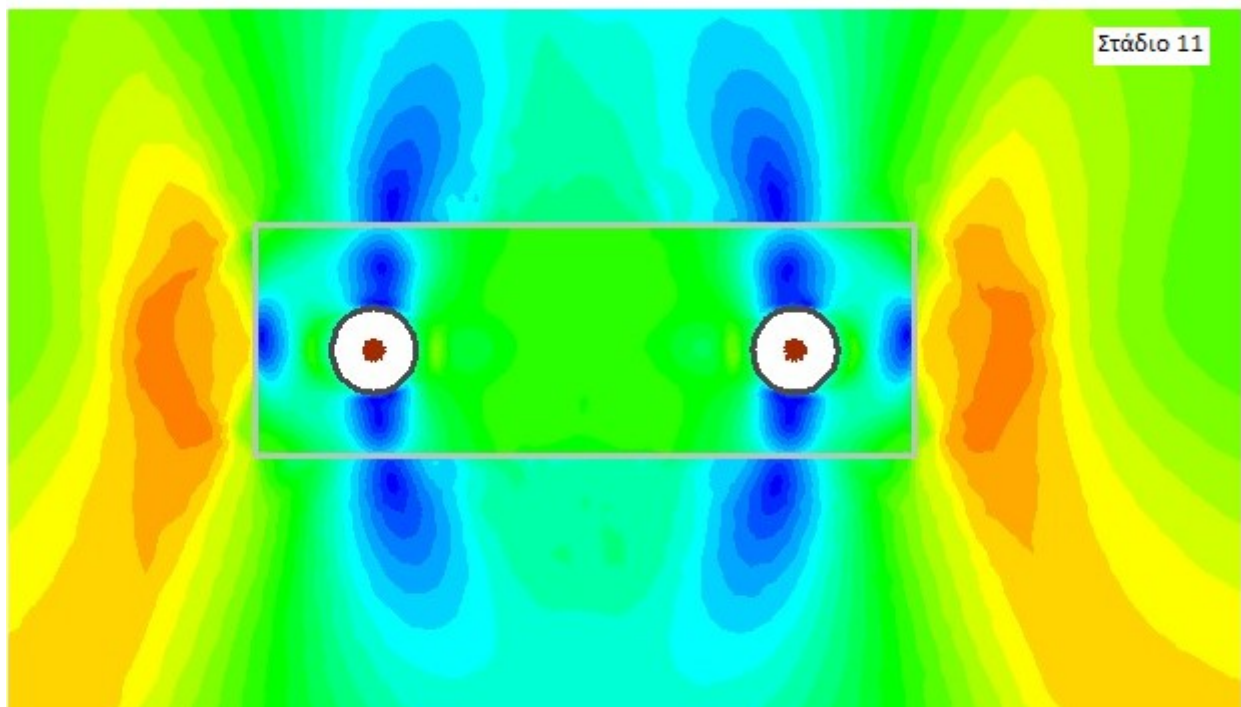
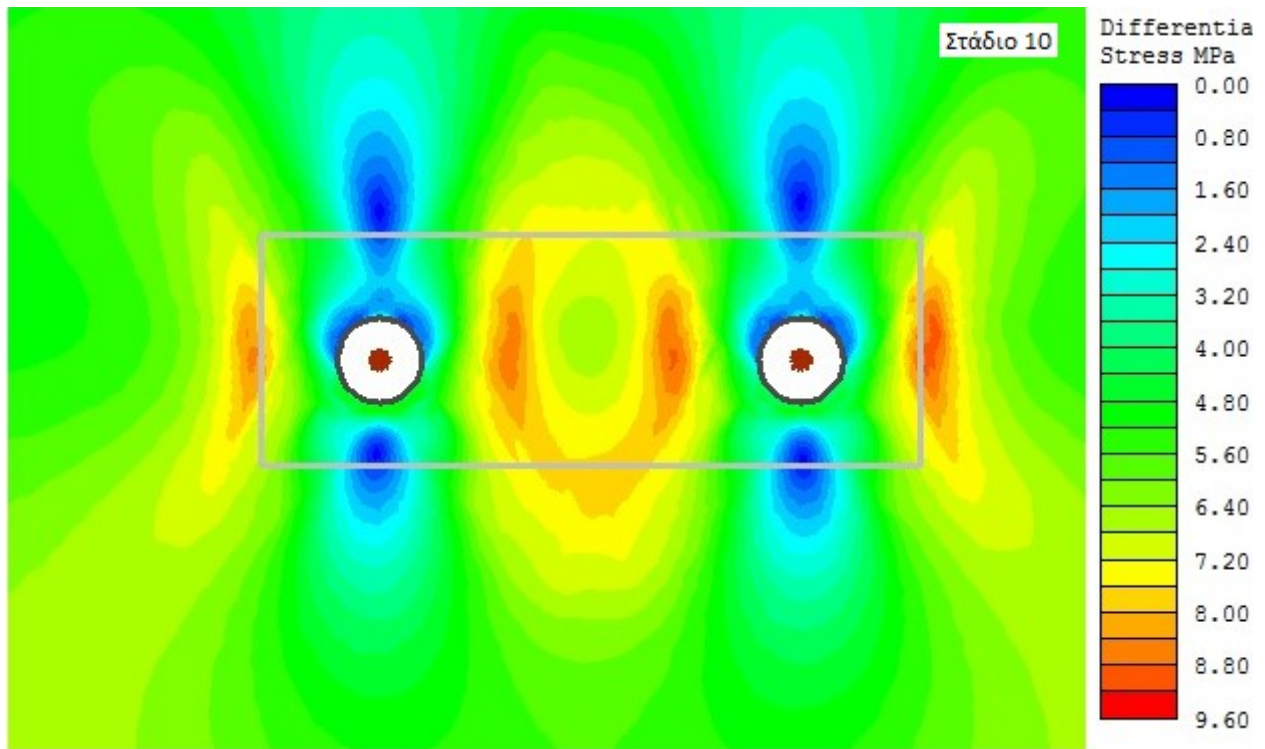
- Τάσεις Mises & Διεκτροπική τάση

Οι προσομοιώσεις έχουν πραγματοποιηθεί με συντελεστή ωθήσεων $K = 0,5$. Στην παράγραφο 5.5.13.2 παρουσιάστηκαν οι τάσεις von Mises για τη προσομοίωση 019pp. Οι τάσεις von Mises, αλλά και η διεκτροπική τάση επιπρόσθετα, λαμβάνουν τις μέγιστες τιμές τους στις παρειές της διατομής της σήραγγας και τις ελάχιστες τιμές τους στον θόλο και στον πυθμένα της διατομής. Το συμπέρασμα αυτό γενικεύεται για όλες τις περιπτώσεις των προσομοιώσεων.

Το μέγιστο των τιμών των τάσεων von Mises και των διεκτροπικών αναπτύσσονται σταδιακά και σε κάποια απόσταση από τις παρειές της σήραγγας. Λόγω της ποιότητας της βραχομάζας αλλά και του μεγάλου ύψους υπερκειμένων εδαφών, στην περιοχή γύρω από τη σήραγγα αναπτύσσεται πλαστική ζώνη, καθώς δεν μπορούν να παραληφθούν οι αναπτυσσόμενες τάσεις από τη βραχώμαζα λόγω της εκσκαφής. Επομένως, τα μέγιστα των τάσεων von Mises και της διεκτροπικής τάσης εμφανίζονται στο όριο της πλαστικής ζώνης. Επιπλέον, παρατηρούμε πως όσο χειρότερης ποιότητας είναι η βραχώμαζα, οι μέγιστες τιμές των τάσεων Mises (και της διεκτροπικής) αναπτύσσονται πιο μακριά από τη σήραγγα. Αυτό οφείλεται, όπως αναφέρθηκε παραπάνω στο ότι οι τάσεις αυτές αναπτύσσονται στο όριο της πλαστικής ζώνης και κακής ποιότητας βραχώμαζα παρουσιάζει μεγαλύτερο εύρος πλαστικής ζώνης.



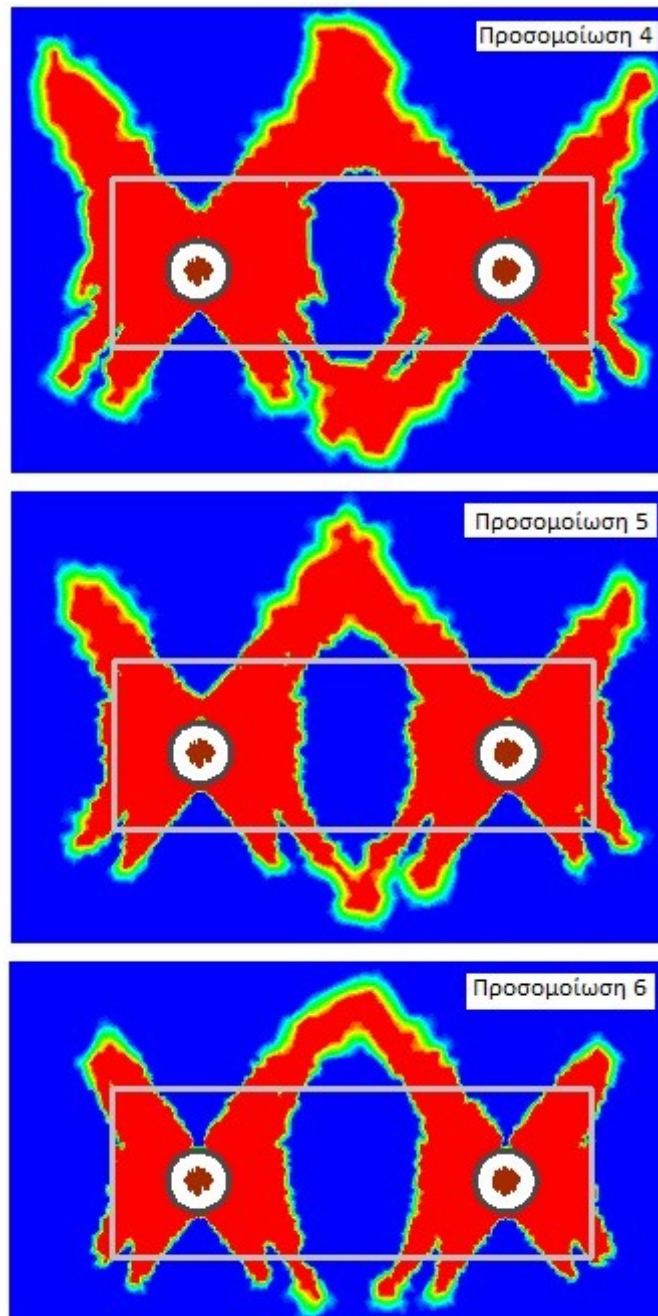
Σχήμα 5.71: Τάσεις Von Mises για την προσομοίωση 008 (στάδιο 10 και 11)



Σχήμα 5.72: Διεκτροπική τάση για την προσομοίωση 008 (στάδιο 10 και 11)

- Ζώνη πλαστικοποίησης

Στο υπό μελέτη εδαφικό προφίλ παρουσιάζεται ζώνη πλαστικοποίησης περιμετρικά των σηράγγων. Η ζώνη πλαστικοποίησης αναπτύσσεται κατά τα στάδια προσομοίωσης. Παρουσιάζει μεγάλη έκταση στις παρειές ενώ στον θόλο και τον πυθμένα της σήραγγας είναι περιορισμένη. Όσο χειρότερης ποιότητας είναι η βραχώμαζα που προσομοιώνεται, το εύρος της ζώνης πλαστικοποίησης αυξάνεται. Η οπτική επισκόπηση της ζώνης πλαστικοποίησης δίνει επιπλέον άμεσες πληροφορίες για το αν υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των σηράγγων ή όχι. Η μορφή της ζώνης πλαστικοποίησης (πεταλούδα) οφείλεται στον συντελεστή ωθήσεων $K = 0,5$. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η ζώνη πλαστικοποίησης που σχηματίζεται περιμετρικά των σηράγγων κατά το στάδιο 10 για τις προσομοιώσεις 4 ($c = 100\text{kPa}$), 5 ($c = 200\text{kPa}$) και 6 ($c = 300\text{kPa}$).



Σχήμα 5.73: Ζώνη πλαστικοποίησης περιμετρικά των σηράγγων κατά το στάδιο 10 για τις προσομοιώσεις 4,5 και 6

- Επίδραση του υδροφόρου ορίζοντα στις συγκλίσεις

Η προσομοίωση υδροφόρου ορίζοντα αυξάνει τις συγκλίσεις στη διατομή των σήραγγων οι οποίες πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν. Παρουσιάζεται πίνακας με τη διαφορά των τελικών καθαρών συγκλίσεων στο στάδιο 11 της αριστερής σήραγγας που υπολογίστηκαν για τις περιπτώσεις 008, 008pp, 019 και 019pp (προσομοιώσεις pp με ύπαρξη υδροφόρου ορίζοντα). Η περατότητα του σχιστώδη σερπεντινίτη λήφθηκε ίση με $k = 10^{-7}$ m/s.

Συγκλίσεις στη διατομή της αριστερής σήραγγας						
Προσομοίωση	E (MPa)	c (kPa)	λ	Καθαρές Συγκλίσεις – στάδιο 11 (m)		
				Θόλος	Παρεία	Πυθμένας
008	800	200	0,6	0,565	0,759	0,153
'008pp	800	200	0,6	0,611	0,843	0,14
Διαφορά (008pp – 008)				0,046	0,084	-0,013
019	1000	200	0,6	0,371	0,578	0,125
'019pp	1000	200	0,6	0,59	0,942	0,287
Διαφορά (019pp – 019)				0,219	0,364	0,162

Πίνακας 5.20: Επίδραση του Υδροφόρου ορίζοντα στις συγκλίσεις

Παρατηρούμε ότι η προσομοίωση υδροφόρου ορίζοντα δίνει μεγαλύτερες συγκλίσεις στην διατομή της αριστερής σήραγγας. Ο πυθμένας της περίπτωσης 008pp παρουσιάζει σύγκλιση ίδιας τάξης με τη περίπτωση 008. Στην περίπτωση 019pp η ύπαρξη υδροφόρου ορίζοντα αυξάνει τις υπολογισμένες συγκλίσεις. Ο θόλος παρουσιάζει αύξηση των συγκλίσεων κατά 0,22m, η παρεία κατά 0,36m και ο πυθμένας κατά 0,16m.

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα - Προτάσεις

6.1. Συμπεράσματα

Η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας παρέχει τη δυνατότητα για την εξαγωγή σημαντικών αποτελεσμάτων. Μέσω της μελέτης της σήραγγας του Καλλιδρόμου και της δημιουργίας γεωλογικών μοντέλων στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Phase2, προέκυψαν νέα στοιχεία σχετικά με τη συμπεριφορά του σχιστώδη σερπεντινίτη (se.s) και τίθενται θέματα με ιδιαίτερο ενδιαφέρον προς διερεύνηση.

- Επιλογή κατάλληλου μοντέλου προσομοίωσης

Το πρώτο συμπέρασμα το οποίο εξάγεται και αποτέλεσε κύριο στόχο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η προσέγγιση γεωτεχνικών παραμέτρων στην περιοχή του σχιστώδη σερπεντινίτη στο νότιο τμήμα.

Στην παράγραφο 5.3 παρουσιάστηκαν ενδεικτικές συγκλίσεις όπως μετρήθηκαν στη σήραγγα Καλλιδρόμου. Οι παραπάνω συγκλίσεις μπορούν να επεκταθούν για το τμήμα μεταξύ των Χ.Θ. 9+021,55 και 9+111,55 του αριστερού κλάδου καθώς έχουν ληφθεί και παρουσιασθεί οι δυσμενέστερες αυτής της περιοχής. Μέσω της προσομοίωσης του υπό μελέτη εδαφικού προφίλ στο Phase2 διερευνώνται ποιες εδαφικές παράμετροι είναι πλησιέστερες στις προαναφερθείσες μετρούμενες, πραγματικές, συγκλίσεις. Η βραχώμαζα στην πραγματικότητα παρουσιάζει ανισοτροπία και μεταβολές στη ποιότητα του υλικού οι οποίες δεν έχουν ληφθεί υπόψιν. Επιπλέον, λόγω της ανομοιομορφίας που παρουσιάζουν οι μετρούμενες συγκλίσεις και της δυσκολίας προσομοίωσης τους στο περιβάλλον του προγράμματος Phase2, έχει επιλεγθεί η προσέγγιση της μέτρησης 997mm στην παρειά του δεξιού κλάδου των νοτίων μετώπων στη Χ.Θ. 9+063,10 μέσω παραμετρικών αναλύσεων.

Το μοντέλο που επιλέχθηκε και υπολογίζει την σύγκλιση της παρειάς πιο κοντά στην μετρηθείσα είναι το 019pp με παραμέτρους $E= 1000 \text{ MPa}$, $\nu= 0,25$, $c= 200 \text{ kPa}$, $\varphi= 24 \text{ deg}$, $\psi= 0 \text{ deg}$, $E_{cr}= 900 \text{ MPa}$, $\lambda=0,6$.

Έχουν παρουσιασθεί συνολικά 23 μοντέλα. Για την προσέγγιση των συγκλίσεων έχει θεωρηθεί μία πολύ πτωχής ποιότητας βραχώμαζα και αυξάνονται τα βραχομηχανικά χαρακτηριστικά της έως ότου προσεγγίσουμε την ζητούμενη μέτρηση. Η εξαγωγή επομένως κάποιων χαρακτηριστικών τιμών της βραχομάζας μέσω ανάστροφων αναλύσεων, με προσέγγιση από το κάτω όριο, δίνει πιο ασφαλή αποτελέσματα. Τέλος, οι συγκλίσεις που υπολογίσθηκαν στα υπόλοιπα σημεία στόχους είναι δυσμενέστερες από τις πραγματικές γεγονός που επιβεβαιώνει την συντηρητική εξαγωγή αποτελεσμάτων.

Ακολουθούν κάποια επιπλέον συμπεράσματα που προέκυψαν κατά τη διάρκεια επεξεργασίας των αποτελεσμάτων:

- Προσομοίωση ερπυσμού

Το φαινόμενο του ερπυσμού, στο υπό μελέτη εδαφικό προφίλ με χρήση του καταστατικού μοντέλου Mohr - Coulomb, προσομοιώθηκε με την εισαγωγή ζώνης απομειωμένου μέτρου ελαστικότητας E . Η ζώνη αυτή, αποτελεί έναν ισοδύναμο τρόπο προσομοίωσης του φαινομένου του ερπυσμού και τοποθετείται περιμετρικά των σηράγγων κατά το στάδιο 11. Κατά την προσομοίωση του ερπυσμού, θεωρείται ότι η επίδραση προκύπτει πίσω από το μέτωπο εκσκαφής, έχει ολοκληρωθεί η ισορροπία στη διατομή και επικρατούν συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης και όχι τριαξονικές.

- Μεταβολή συγκλίσεων σε σχέση με την συνοχή c

Από τη επεξεργασία των αποτελεσμάτων προέκυψε πως αύξηση της συνοχής c με σταθερό μέτρο ελαστικότητας E επιφέρει μείωση των συγκλίσεων στο υπό μελέτη εδαφικό προφίλ. Όπως είναι αναμενόμενο, γιατί ενισχύεται η αντοχή του υλικού.

- Μεταβολή των συγκλίσεων σε σχέση με το μέτρο ελαστικότητας E

Από τη επεξεργασία των αποτελεσμάτων προέκυψε πως αύξηση του μέτρου ελαστικότητας E με σταθερή συνοχή c επιφέρει μείωση των συγκλίσεων στο υπό μελέτη εδαφικό προφίλ. Όπως είναι αναμενόμενο, γιατί ενισχύεται η αντοχή του υλικού.

- Μεταβολή του συντελεστή αποτόνωσης

Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων προέκυψε πως αύξηση του συντελεστή αποτόνωσης από $\lambda = 0,6$ σε $\lambda = 0,7$. Επιφέρει μείωση των τελικών υπολογισμένων συγκλίσεων στο μανδύα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

- Ζώνη πλαστικοποίησης

Κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων, στο υπό μελέτη εδαφικό προφίλ, αναπτύχθηκε ζώνη πλαστικοποίησης περιμετρικά των σηράγγων. Η πλαστική ζώνη αναπτύσσεται στις παρειές της σήραγγας και εξελίσσεται (αυξάνεται) κατά τα στάδια προσομοίωσης. Παρατηρούμε ότι στο θόλο και στον πυθμένα η πλαστική ζώνη είναι πολύ περιορισμένη σε σχέση με τις παρειές. Η μορφή της ζώνης πλαστικοποίησης (μορφή πεταλούδας) οφείλεται στον συντελεστή ωθήσεων $K = 0,5$.

6.2. Προτάσεις

Η εξαγωγή των παραπάνω συμπερασμάτων συμπληρώνει τις ήδη υπάρχουσες μελέτες, δίνει νέα στοιχεία, σχετικά με τη συμπεριφορά το σχιστώδη σερπεντινίτη, στην περιοχή μεταξύ των Χ.Θ. 9+021,55 και 9+111,55 του αριστερού κλάδου. Οι ανώτερες γεωτεχνικές παράμετροι, του σχιστώδη σερπεντινίτη, μετά από εμπειριστατωμένη έρευνα μπορούν να γενικευτούν-προσαρμοστούν και σε άλλες αντίστοιχες περιοχές της σήραγγας του Καλλιδρόμου.

Δίνεται η δυνατότητα, καθώς έχει προηγηθεί εκτενής περιγραφή του τρόπου προσομοίωσης του υπό μελέτη εδαφικού προφίλ, επέκτασης της παραπάνω διπλωματικής εργασίας και εξαγωγής νέων συμπερασμάτων με χρήση παραμέτρων και παραδοχών είτε ιδίων με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία είτε νέων και διαφορετικών.

Μερικές προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση, επέκταση, του εδαφικού προφίλ που μελετήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι:

- Παραμετροποίηση του συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων και διερεύνηση της συμπεριφοράς του υπό μελέτη εδαφικού προφίλ για εύρος τιμών $K = 0,5$ με $1,5$.
- Χρήση διαφορετικού κριτηρίου αστοχίας. Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιλέχθηκε για τις προσομοιώσεις το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb.
- Εύρεση του Γεωλογικού Δείκτη Αντοχής G.S.I και σύγκριση με την καταγεγραμμένη τεχνικογεωλογική συμπεριφορά που έχουν παρουσιάσει οι οφιολίθοι σε διάφορα υπόγεια έργα στην Ελλάδα.
- Περαιτέρω διερεύνηση του συντελεστή αποτόνωσης λ , και προσέγγιση του ποσοστού των συνολικών συγκλίσεων που πραγματοποιήθηκε μπροστά από το μέτωπο διάνοιξης της σήραγγας.
- Περαιτέρω μελέτη του φαινομένου του ερπυσμού με χρήση μοντέλων.
- Γενικότερη προσέγγιση της ανισοτροπίας των συγκλίσεων που παρουσιάστηκαν στη σήραγγα του Καλλιδρόμου.

Η χρήση ανάστροφων αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία αποτελεί ένα πολύ σημαντικό κομμάτι της μελέτης-έρευνας και της κατασκευής. Παρέχεται η δυνατότητα καλύτερης και αποτελεσματικότερης αντιμετώπισης δυσμενών γεωλογικών συνθηκών. Η εφαρμογή της παραπάνω μεθόδου πραγματοποιήθηκε στη σήραγγα Καλλιδρόμου αλλά και γενικότερα συμπεριλαμβάνεται σε κάθε έργο μεγάλης κλίμακας και μείζονος σημασίας.

Μέσω της κατασκευής της σήραγγας Καλλιδρόμου, εκτός της κοινωνικής προσφοράς που παρέχεται στο κοινωνικό σύνολο, αποκομίσθηκε γνώση και τεχνογνωσία για την επιτυχή αντιμετώπιση αντίστοιχων δυσμενών γεωλογικών συνθηκών σε μελλοντικά έργα και κατασκευή έργων υψηλών προδιαγραφών και ποιότητας με ύψιστη ασφάλεια.

Βιβλιογραφία

Βιβλία - Δημοσιεύσεις-Διπλωματικές Εργασίες

- [1] Carranza-Torres, C., Diederichs, M. 2009. Mechanical analysis of circular liners with particular reference to composite supports. For example, liners consisting of shotcrete and steel sets. Tunnelling and Underground Space Technology, journal homepage: www.elsevier.com/locate/tust
- [2] Diasakas, N., Amerikanos, P., Tryfonas, G., Vagioutou, E., Baltzois, V., Bloukas, S., Tagkas, T., Malandrakis, E., Poulakis, N., Kalogerogiannis, G., Tsirigotis, N. 2010. Tunnel excavation in Clayey-marly formations: The case of Kallidromo tunnel. Bulletin of the Geological Society of Greece, Proceedings of the 12th International Congress, Patras.
- [3] Hoek, E. Practical Rock Engineering. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: www.rocscience.com
- [4] Marinos, P., Hoek, E., Marinos, V. 2005. Variability of the engineering properties of rock masses quantified by the geological strength index: the case of ophiolites with special emphasis on tunneling. Springer-Verlag 2005
- [5] Rocscience Inc. Phase2 8.0 Documentation. Toronto, Ontario, Canada.
- [6] Wittke, W., Wittke-Schmitt, B., Schmitt, D. 2005. The 9km long Kallidromo tunnel of the new highspeed railway line Athens-Thessaloniki, Greece, tunnel sections in squeezing ground. Underground Space Use: Analysis of the Past and Lessons for the Future - Erdem & Solak (eds), Taylor & Francis Group, London.
- [7] Καββαδάς, Μ. 2005. Σημειώσεις σχεδιασμού υπογείων έργων. Εκδόσεις ΕΜΠ.
- [8] Κουκής, Γ., Σαμπατακάκης, Ν. 2007. Γεωλογία τεχνικών έργων. Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα.
- [9] Μαγκανάς, Κ. 2006. Τεχνικογεωλογική συμπεριφορά των οφιολίθων στη διάνοιξη σηράγγων. Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία ΔΠΜΣ «Σχεδιασμός και κατασκευή υπογείων έργων», Εθνικό Μετσόβιο πολυτεχνείο (ΕΜΠ), Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Γεωτεχνικής, Αθήνα, Ελλάδα.
- [10] Μαρίνος, Β. Γεωλογικές μελέτες τεχνικών έργων, Σήραγγες, 6^ο μάθημα. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας.

- [11] Μοσχοπούλου, Ε. 2010. Μελέτη φορτίων της τελικής επένδυσης σε βαθιές σήραγγες. Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο πολυτεχνείο (ΕΜΠ), Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Γεωτεχνικής, Αθήνα, Ελλάδα.
- [12] Πάσουλαι, Ξ. 2008. Γεωμορφολογική μελέτη τμήματος της υδρογραφικής λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού. Πτυχιακή εργασία. Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Τμήμα Γεωγραφίας, Αθήνα, Ελλάδα.
- [13] Σεράφης, Α. 2011. Εκτίμηση ακτινικών μετατοπίσεων της σήραγγας Ανθοχωρίου. Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο πολυτεχνείο (ΕΜΠ), Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Γεωτεχνικής, Αθήνα, Ελλάδα.
- [14] Χόρτης, Φ. 2010. Διερεύνηση της επίδρασης βραχυχρόνιου ερπυσμού στη διάνοιξη σηράγγων. Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο πολυτεχνείο (ΕΜΠ), Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Γεωτεχνικής, Αθήνα, Ελλάδα.
- [15] Χόρτης, Φ. 2013. Διερεύνηση της μεταβολής των φορτίων της άμεσης υποστήριξης λόγω της εφαρμογής μέτρων υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής. Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία ΔΠΜΣ «Σχεδιασμός και κατασκευή υπογείων έργων» , Εθνικό Μετσόβιο πολυτεχνείο (ΕΜΠ), Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Γεωτεχνικής, Αθήνα, Ελλάδα.
- [16] Χριστοφάς, Π. 2006. Η τεχνικογεωλογική ιδιαιτερότητα των οφιολίθων στα υπόγεια έργα. Η εφαρμογή εύκαμπτης υποστήριξης και η απομείωση των παραμορφώσεων στη σήραγγα Παναγιάς της Εγνατίας Οδού. Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία ΔΠΜΣ «Σχεδιασμός και κατασκευή υπογείων έργων» , Εθνικό Μετσόβιο πολυτεχνείο (ΕΜΠ), Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Γεωτεχνικής, Αθήνα, Ελλάδα.

Μελέτες - Έγγραφα

- [17] ΕΡΓΟΣΕ Α.Ε. 2003. Πρόσθετες γεωλογικές έρευνες και ανασύνταξη της οριστικής γεωλογικής μελέτης στο υπολειπόμενο τμήμα της σήραγγας Καλλιδρόμου για τις ανάγκες ολοκλήρωσης της οριστικής μελέτης της σήραγγας. Γεωλογική μελέτη σήραγγας Καλλιδρόμου. Μαρία Χαρά Αλεξιάδου.
- [18] ΕΡΓΟΣΕ Α.Ε. 2004. Οριστική μελέτη σήραγγας Καλλιδρόμου, Τεχνική Έκθεση Μελέτης, αριθμός τεύχους: Μ2. WBI Prof. Dr.-Ing. W. Wittke Beratende Ingenieure für Grundbau und Felsbau GmbH, ΝΑΜΑ σύμβουλοι μηχανικοί και μελετητές ΑΕ.
- [19] ΕΡΓΟΣΕ Α.Ε. 2005. Υπολειπόμενες εργασίες για την ολοκλήρωση της σήραγγας Καλλιδρόμου, των χωματουργικών και λοιπών έργων για τη νέα σιδηροδρομική γραμμή Τιθορέας - Λειανοκλαδίου, τμήμα από Σ.Σ Τιθορέας χλμ 0+000 έως χλμ 19+000, Τεχνική Περιγραφή, Αριθ. 535.

- [20] ΕΡΓΟΣΕ Α.Ε. 2009. Σχέδια τροποποιημένης μελέτης προσωρινής υποστήριξης για την περιοχή του σχιστώδη σερπεντινίτη.
- [21] ΕΡΓΟΣΕ Α.Ε. 2013. Κατασκευή Ν.Δ.Σ.Γ.Υ.Τ. Τιθορέα - Λιανοκλάδι, έργο σήραγγας Καλλιδρόμου. Διεύθυνση Κατασκευών, Έργα ΙΙ, Κλιμάκιο επίβλεψης.
- [22] ΕΡΓΟΣΕ Α.Ε. 2013. Συγκλίσεις στο νότιο μέτωπο μεταξύ των Χ.Θ. 9+021,55 με 9+111,55 (αριστερός κλάδος) και μεταξύ των Χ.Θ. 9+015,35 και 9+112,95 (δεξιός κλάδος)
- [23] Καββαδάς, Μ. 2010. Έκθεση εμπειρογνωμοσύνης για τα εφαρμοστέα μέτρα προσωρινής υποστήριξης της Σιδηροδρομικής Σήραγγας Καλλιδρόμου στην περιοχή του σχιστώδους σερπεντινίτη.
- [24] Μαρίνος, Π., Καββαδάς, Μ. 2009. Γνωμοδότηση για την αναγκαιότητα τροποποίησης της οριστικής μελέτης διάνοιξης και προσωρινής υποστήριξης της σήραγγας Καλλιδρόμου στην περιοχή του σχιστώδη σερπεντινίτη του έργου: «Υπολειπόμενες εργασίες για την ολοκλήρωση της σήραγγας Καλλιδρόμου, των χωματουργικών και λοιπών έργων για την νέα σιδηροδρομική γραμμή Τιθορέας-Λιανοκλαδίου, τμήμα από το Σ.Σ Τιθορέας (χλμ. 0+000) έως χλμ 19+000» (Α.Δ. 535).