



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ –
ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**Θάλαμοι Ενδιάμεσης Προσβολής Σηράγγων –
Τριδιάστατη Ανάλυση της Σήραγγας T1 του
Αυτοκινητοδρόμου Demir Karija – Smokvica.**

Γαβράς Απόστολος

Επιβλέπων Καθηγητής: **Σοφιανός Αλέξανδρος,**
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2015

Επιβλέπων: Σοφιανός Αλέξανδρος,

Καθηγητής

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις/...../2015

Σοφιανός Αλέξανδρος, Καθηγητής

(Υπογραφή).....

Λουπασάκης Κωνσταντίνος, Επίκ. Καθηγητής

(Υπογραφή).....

Νομικός Παύλος, Επίκ. Καθηγητής

(Υπογραφή).....

ΑΘΗΝΑ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2015

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	1
Περίληψη.....	2
Abstract.....	3
Κεφάλαιο 1 : Ιστορική Εξέλιξη Σηραγοποιείας.....	4
1. Ιστορικά Στοιχεία.....	4
1.1 Εμπόριο και Σήραγγες από το 1670 μέχρι το 1970 μ.Χ.....	5
1.1.1 Οι διώρυγες.....	5
1.1.2 Οι σιδηρόδρομοι.....	7
1.1.3 Οι πρώτες αλπικές σήραγγες.....	9
1.2 Τεχνικές διάνοιξης σε ανεξάρτητα τμήματα.....	11
1.2.1 Η Γερμανική μέθοδος της τεχνικής του πυρήνα.....	12
1.2.2 Η Βελγική τεχνική και οι παραλλαγές της.....	13
1.2.3 Η παλαιά Αυστριακή τεχνική και οι παραλλαγές της.....	13
1.3 Διάνοιξη με ασπίδα.....	15
Κεφάλαιο 2 : Θάλαμοι Ενδιάμεσης Προσβολής: Πότε και γιατί χρειάζεται η ενδιάμεση προσβολή – Αναφορά και περιγραφή κλασσικών παραδειγμάτων.....	17
1. Αναφορά – Περιγραφή κλασσικών παραδειγμάτων.....	19
1.1 Κατασκευή Μετρό Αιγάλεω.....	19
1.1.1 Διάνοιξη και προσωρινή υποστήριξη.....	21
1.1.2 Δομική διαμόρφωση της μόνιμης κατασκευής.....	24
1.1.2.1 Κατασκευή.....	25
1.2 Σήραγγα KRABBE, Αυτοκινητόδρομος, Τμήμα Τίρανα – Ελμπασάν, Αλβανία.....	30
Κεφάλαιο 3 : Αναφορά στη Μελέτη.....	32
1. Υπόγεια κατασκευαστικά έργα στον βόρειο δεξιό κλάδο (NRB).....	33
2. Μέτρα Υποστήριξης για την περιοχή διασταύρωσης της κύριας σήραγγας με την συνδετήρια σήραγγα.....	35
3. Ο θάλαμος στον βόρειο αριστερό κλάδο (NLB).....	37
3.1 Γεωτεχνικές παραδοχές στον θάλαμο ενδιάμεσης προσβολής.....	38
Κεφάλαιο 4 : Το Πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε.....	39
1. Βασικές λειτουργίες του RS3.....	39
Κεφάλαιο 5 : Παρουσίαση αποτελεσμάτων προγράμματος.....	76
Κεφάλαιο 6 : Συμπεράσματα.....	134
Βιβλιογραφικές Αναφορές.....	137

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1: Τυπική διατομή του υπόγειου σταθμού (αριστερά) και γενική διάταξη του συμπλέγματος των υπόγειων κατασκευών	20
Σχήμα 2: Τμηματική διάνοιξη και υποστήριξη της αίθουσας του σταθμού (α), (β) διάνοιξη κεντρικής στοάς (β) διάνοιξη πλευρικών τμημάτων (δ) σταδιακή αφαίρεση τοιχωμάτων (ε) ολοκλήρωση εκσκαφής άνω ημιδιατομής (στ) εκσκαφή βαθμίδας και δαπέδων ανεστραμμένου θόλου.	22
Σχήμα 3: Γεωλογικές συνθήκες στην περιοχή του σταθμού (Alexandris et al. 2007). Κατηγορίες Βραχομάζας: B: GSI=35-45, C: GSI=25-35, D: GSI=20-25, E: GSI=15-20	24
Σχήμα 4: Τρόποι σκυροδέτησης επένδυσης θαλάμων μεγάλων ανοιγμάτων. (α) Σκυροδέτηση σε τρεις φάσεις, (β) Σκυροδέτηση σε μία φάση με ενιαίο μεταλότυπο (πρακτική που θιοθετήθηκε).....	26
Σχήμα 5: Χρονική εξέλιξη των κατασκευαστικών εργασιών της μόνιμης επένδυσης	28
Σχήμα 6: Άποψη του υπόγειου θαλάμου μετά την ολοκλήρωση των σκυροδετήσεων (αριστερά) και μετά την ολοκλήρωση των αρχιτεκτονικών τελειωμάτων (δεξιά).	29

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1: Σήραγγα Union Canal	6
Εικόνα 2: Σιδηροδρομική Σήραγγα Löetschberg	8
Εικόνα 3: Σήραγγα Aurlberg	10
Εικόνα 4: Typical NATM Excavation sequence in soft ground	14
Εικόνα 5: Scale model of 1886 Greathead Shield, made in 1993	16
Εικόνα 6: Θάλαμος ενδιάμεσης προσβολής	17
Εικόνα 7: Τρισδιάστατο κέλυφος πεπερασμένων στοιχείων σε θάλαμο ενδιάμεσης προσβολής	18

Ευχαριστίες

Επιβλέπων της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας διετέλεσε ο Καθηγητής κ. Αλ. Σοφιανός, τον οποίο ευχαριστώ θερμά για την στοχευμένη καθοδήγηση, τις συμβουλές και τις παρατηρήσεις του. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την κ. Γιούτα – Μήτρα της οποίας η βοήθεια ήταν πολύτιμη.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω την εταιρεία ΟΜΙΚΡΟΝ ΚΑΠΑ ΜΕΛΕΤΗΤΙΚΗ Α.Ε. (ΟΚ) και συγκεκριμένα τον κ. Νίκο Κορωνάκη, για την πολύτιμη βοήθειά τους στην παροχή πληροφοριών και της μελέτης στην οποία βασίζεται η παρούσα Διπλωματική Εργασία.

Περίληψη

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία διαρθρώνεται σε έξι (6) κεφάλαια:

Στο πρώτο κεφάλαιο επιχειρείται μια ιστορική αναδρομή της Σηραγγοποιΐας και γίνεται αναφορά των βασικών τεχνικών που χρησιμοποιούνται για τη διάνοιξη των σηράγγων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται πότε και γιατί είναι αναγκαία η διάνοιξη μιας σήραγγας ενός ή δύο κλάδων με την χρήση των θαλάμων ενδιάμεσης προσβολής και ποια είναι τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής και γίνεται αναφορά κλασσικών παραδειγμάτων στην Ελλάδα και στο εξωτερικό όπου για την διάνοιξη χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος που μελετάμε.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των βασικών πληροφοριών της μελέτης που μας παρέιχε η μελετητική εταιρεία OK A.E. όσον αφορά την γεωλογία της περιοχής και την διαδικασία της διάνοιξης.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικές λειτουργίες του προγράμματος που χρησιμοποιήσαμε για την τριδιάστατη ανάλυση της σήραγγας που μελετάμε.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της τριδιάστατης ανάλυσης για την σήραγγα T1 που προέκυψαν από το πρόγραμμα.

Στο έκτο κεφάλαιο παρατίθενται τα συμπεράσματα στα οποία καταλήξαμε από την τριδιάστατη ανάλυση που εκτελέσαμε και επιχειρείται μια σύγκριση με τα αποτελέσματα της μελέτης που παραλάβαμε από την εταιρεία ΟΜΙΚΡΟΝ ΚΑΠΑ ΜΕΛΕΤΗΤΙΚΗ Α.Ε.

Abstract

This thesis is divided into six (6) chapters:

In the first chapter it is attempted to be given the history of tunnel construction and there are mentioned the basic techniques of tunneling.

In the second chapter it is analyzed when and why it is necessary to excavate an one or two bore tunnel using the abovementioned method and the advantages of this method are referred. It also refers classic examples of tunneling using the abovementioned method.

The third chapter presents basic information for the geology and the tunneling process included in the report given by OMIKRON KAPPA CONSULTING S.A.

The fourth chapter presents the basic features of the program used for the 3D Analysis of the tunnel under study.

The fifth chapter presents the results of the 3D Analysis for the Tunnel T1 given by the program.

The sixth chapter presents the conclusions reached by the 3D Analysis performed and attempts to compare them to the conclusions of the report given by OK CONSULTING S.A.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ I

Ιστορική Εξέλιξη Σηραγγοποιΐας

1. Ιστορικά Στοιχεία

Παραδοσιακά, σήραγγες ή στοές ονομάζονται οι οριζόντιες ή παραοριζόντιες τεχνητά σκαμμένες υπόγειες δίοδοι. Είναι δύσκολα και έντεχνα έργα που διανοίγονται σε βάθη που ποικίλουν από πολύ μικρά έως πολύ μεγάλα, πάνω ή κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα και οι διαστάσεις τους κυμαίνονται από πολύ μικρές έως πολύ μεγάλες.

Η κατασκευή υπογείων στοών έχει τις ρίζες της στα μεταλλεία της λιθικής εποχής (Whittaker and Frith,1990). Οι πρώτες υπόγειες δίοδοι διέλευσης πεζών σχετίζονταν με την πρόσβαση σε θέσεις λατρείας θεών. Τέτοιες κατασκευάσθηκαν στη Μάλτα και στην Αίγυπτο μεταξύ 3000 και 1000 π.Χ. (Whittaker and Frith,1990).

Η πρώτη υπόγεια διάβαση κάτω από ποτάμι είχε μήκος 11km και κατασκευάσθηκε κάτω από τον Ευφράτη το 2000 π.Χ., αφού πρώτα πραγματοποιήθηκε προσωρινή εκτροπή του. Σκοπός της ήταν η σύνδεση των βασιλικών ανακτόρων της Βαβυλώνας με λατρευτικό ναό. Οι υπόγειες εκμεταλλεύσεις στη Λαυρεωτική ξεκίνησαν το 2000 π.Χ. Οι αποστραγγιστικές σήραγγες της Κωπαΐδος χρονολογούνται σύμφωνα με κάποιους ερευνητές στο ΙΔ' π.Χ. αιώνα (Anon, 1970). Η κατασκευή στη Σάμο, τον 6ο αιώνα π.Χ. του μήκους ~1400m Ευπαλινείου ορύγματος για την παροχέτευση νερού στην πόλη της Σάμου (Πυθαγόρειο), αποτελεί την πρώτη διάνοιξη σήραγγας από δύο στόμια, με συνάντηση στο μέσον της διαδρομής(Σταματιάδης,1884).

Κατά τη Ρωμαϊκή περίοδο κατασκευάσθηκαν πολλές σήραγγες οδοποιΐας καθώς και κατακόμβες που χρησίμευαν ως τόποι λατρείας καθώς και για την ταφή των νεκρών. Την περίοδο αυτή αρχίζει ο διαχωρισμός μεταξύ τεχνικών και μεταλλευτικών σηράγγων. Η οδική σήραγγα που κατασκευάσθηκε στο Pausilippo κοντά στη Νάπολη το 36 π.Χ. με μήκος 1450m με πλάτος 7.5m και ύψος 9m (Sandstrom, 1963), μπορεί να συγκριθεί σε μέγεθος με σύγχρονες διανοίξεις.

Με την πτώση της Ρώμης και την έναρξη του μεσαίωνα σταματάει ουσιαστικά η εξέλιξη των συγκοινωνιακών σηράγγων. Σήραγγες

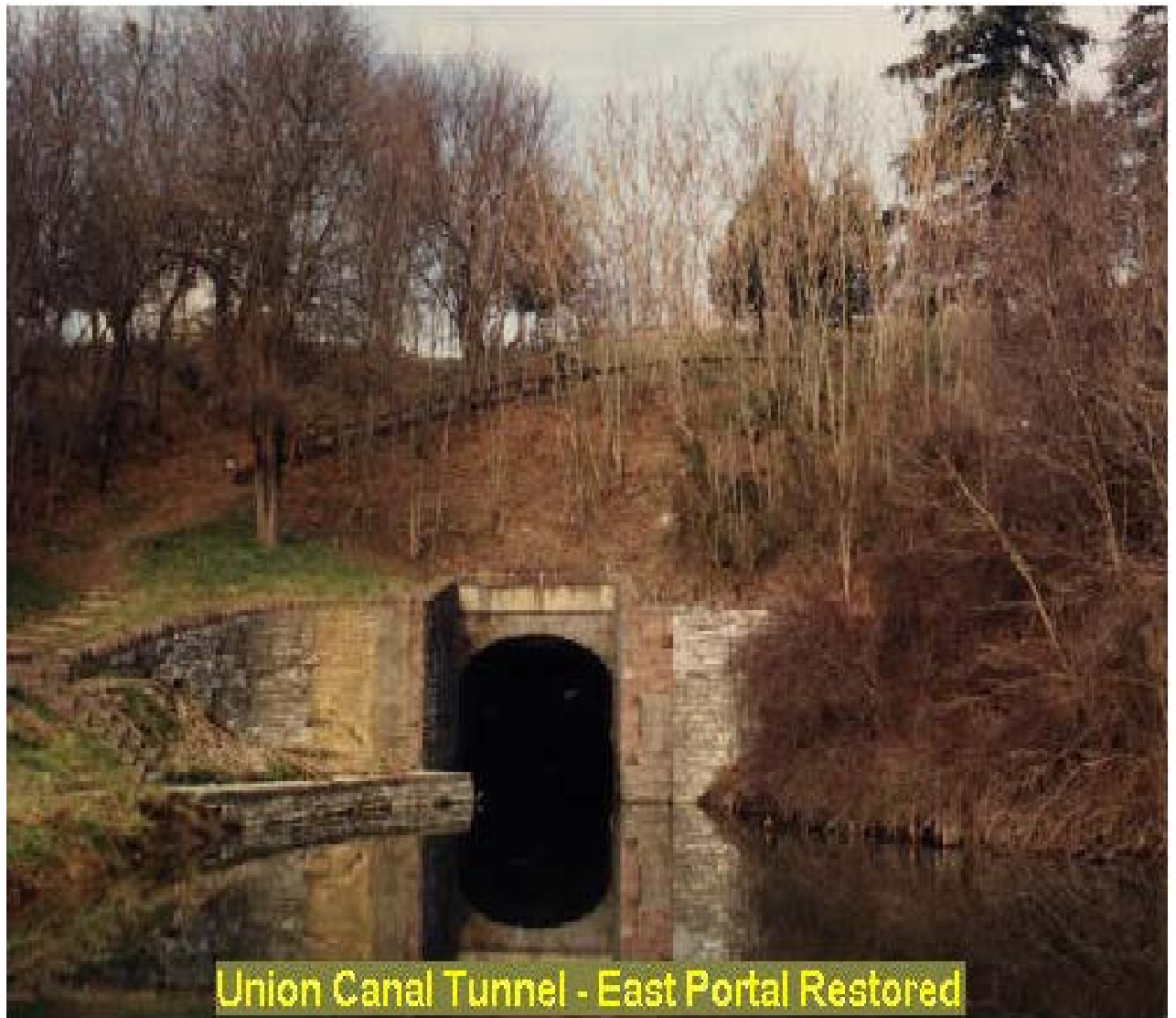
κατασκευάζονται για στρατιωτικούς σκοπούς μόνο. Προς το τέλος του μεσαίωνα αρχίζουν και πάλι να κατασκευάζονται λίγες οδικές σήραγγες.

1.1 Εμπόριο και σήραγγες από το 1670 μέχρι το 1970 μ.Χ.

1.1.1 Οι διώρυγες

Με την αναγέννηση, η ανάπτυξη της βιομηχανίας και του εμπορίου απαιτεί μέσα μεταφοράς πρώτων υλών και αγαθών. Αρχικά, οι μεταφορές γίνονταν με πλωτά μέσα στα ποτάμια, η ένωση των οποίων απαιτούσε την κατασκευή διωρύγων. Με την ανάπτυξή τους η κατασκευή τμημάτων τους σε σήραγγες γινότανε επιτακτική, καθώς οι τελευταίες μειώνανε και τις ανάγκες σε θυροφράγματα. Η διώρυγα του Languedoc, η διώρυγα των δύο θαλασσών όπως ονομαζότανε, στόχευε στο να ενώσει δύο ποταμούς και μέσω αυτών τον Ατλαντικό με τη Μεσόγειο (Sandstrom,1963). Στη θέση Malpas της διώρυγας, το 1679 επί Λουδοβίκου XIV, αντί να παρακαμφθεί ο ορεινός όγκος κατασκευάσθηκε μέσα σε τόφρους σήραγγα με μήκος 157m και διατομή 6.5x8m. Για την εξόρυξή της χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά πυρίτιδα. Η κατασκευή των διωρύγων, και των σηράγγων στις θέσεις που απαιτούνταν, συνεχίσθηκε με ταχύτατους ρυθμούς στην Ευρώπη και αργότερα στην Αμερική μέχρι και τις αρχές του 19ου αιώνα.

Ιδιαίτερα μεγάλος αριθμός από διώρυγες κατασκευάζεται κατά τον 18ο αιώνα και στην Αγγλία. Σημαντική είναι η διάνοιξη, το 1761, της σήραγγας στη διώρυγα Bridgewater μεταξύ Worsley και Manchester. Η σήραγγα στο ένα άκρο της καταλήγει σε φρέαρ και στο άλλο σε πλωτή κοιλαδογέφυρα που με τη σειρά της καταλήγει στην είσοδο μεταλλείων. Η κατασκευή της σήραγγας επέτυχε την πλήρη αποφυγή θυροφραγμάτων και ως εκ τούτου την απρόσκοπτη μεταφορά του άνθρακα με αποτέλεσμα τη μείωση της τιμής του στο μισό. Στις Ηνωμένες Πολιτείες οι δύο πρώτες σήραγγες κατασκευάσθηκαν στη διώρυγα Union της Pennsylvania (Εικ. 1) στις θέσεις Schuylkill και Lebanon το 1818 και το 1826 αντίστοιχα. Η κατασκευή των διωρύγων κατά τις δεκαετίες αυτές παρήγαγε μια νέα τάξη ανθρώπων, τους πολιτικούς μηχανικούς, που διαχωρίστηκαν από τους στρατιωτικούς μηχανικούς(Sandstrom,1963).



Εικόνα 1: Σήραγγα Union Canal

Η κατασκευή των σηράγγων στις διάφορες χώρες απαίτησε την ανάπτυξη τεχνοτροπιών. Αυτές διέφεραν με τις γεωτεχνικές συνθήκες και την τεχνική παράδοση κάθε περιοχής και η ονομασία τους πάρθηκε από τη χώρα εφαρμογής τους (Σοφινός, 2001). Έτσι αναπτύχθηκαν η αγγλική, η γερμανική, η (παλαιά) αυστριακή, η βελγική, η αμερικανική, η ιταλική κ.ά. τεχνοτροπίες. Οι μέθοδοι αυτές απαιτούσαν πολλαπλά μέτωπα εκσκαφής, προσωρινή υποστήριξη με ξυλοδεσμία και μόνιμη λίθινη στήριξη. Η γερμανική μέθοδος ή μέθοδος του πυρήνα εφαρμόστηκε για πρώτη φορά το 1803, επί Ναπολέοντος, στη Γαλλία, για την εξόρυξη της σήραγγας του Τρονκουο στη

μήκους 100km διώρυγα St.Quentin. Το πλάτος της ήταν 8m και το μήκος της 1075m και διανοίχτηκε μέσα σε αμμοχάλικα. Παραδόξως, η μέθοδος αυτή αντί για γαλλική ονομάζεται γερμανική. Η βελγική μέθοδος εφαρμόστηκε το 1828 για πρώτη φορά για την κατασκευή σήραγγας στη διώρυγα Charleroy του Βελγίου. Η σήραγγα είχε εμβαδόν διατομής 20m^2 , μήκος 1288m και εξορύχτηκε μέσα σε ασταθείς άμμους.

1.1.2 Οι σιδηρόδρομοι

Η απαίτηση ύπαρξης θυροφραγμάτων αλλά και η αδυναμία διέλευσης των διωρύγων από τις καταλληλότερες θέσεις φόρτωσης και εκφόρτωσης ώθησε στην κατασκευή των σιδηροδρόμων ως εναλλακτικών μέσων μεταφοράς. Η χάραξή τους επέτρεπε λιγότερο αυστηρούς κανόνες σχεδιασμού, αν και εξακολουθούσε να απαιτεί ελαχιστοποίηση των κλίσεων και των αποστάσεων, κάτι που καθιστούσε αναγκαία την κατασκευή γεφυρών και σηράγγων προκειμένου να επιτυγχάνεται η διέλευση στις περιοχές κοιλάδων και ορεινών όγκων. Η πρώτη σιδηροδρομική σήραγγα κατασκευάστηκε το 1826 στη Γαλλία. Εν τούτοις η σημαντικότερη ανάπτυξη των σιδηροδρόμων πραγματοποιείται στην Αγγλία, την πλουσιότερη χώρα της εποχής. Το 1830 αρχίζει η κατασκευή της σιδηροδρομικής γραμμής μεταξύ Liverpool και Manchester που απαιτεί την κατασκευή δύο σηράγγων. Έκτοτε, σιδηρόδρομοι και σήραγγες αναπτύσσονται με ταχύτατους ρυθμούς στην Αγγλία, με πιο διάσημη τη σήραγγα Box που διανοίχτηκε με μεγάλες δυσκολίες από εισρέοντα νερά, μεταξύ 1836 και 1851, μέσα σε ωόλιθους, μάργες, ιλύες και αργίλους.



Εικόνα 2: Σιδηροδρομική Σήραγγα Löetschberg

Στην ηπειρωτική Ευρώπη, τη δεκαετία του 1830 κατασκευάζονται σιδηροδρομικές σήραγγες στο Βέλγιο, στη Γαλλία και στη Γερμανία, ενώ στην Ελβετία η πρώτη σήραγγα κατασκευάσθηκε στο Hauenstein μεταξύ 1853-58. Στην Αυστρία μέχρι το 1856 έχουν κατασκευασθεί εξήντα σήραγγες και στην Ιταλία 10km σήραγγες. Τέλος, στις Ηνωμένες Πολιτείες η πρώτη σήραγγα κατασκευάστηκε στην Pennsylvania μεταξύ 1831-33, και μέχρι το 1850 είχαν κατασκευαστεί 29 σιδηροδρομικές σήραγγες.

1.1.3 Οι πρώτες αλπικές σήραγγες

Το 1850 τα εθνικά συστήματα σιδηροδρόμων βορείως των Άλπεων, δηλαδή της Γερμανίας, της Ελβετίας και εν μέρει της Αυστρίας, είχαν συνδεθεί μεταξύ τους.

Στην Ιταλία οι σιδηρόδρομοι αναπτύσσονταν επίσης παρόλη την πολιτική διαίρεση και τις επαναστατικές εξεγέρσεις. Μεταξύ των εμβρυακών αυτών βορείων και νοτίων συστημάτων εμπόδιο για τη σύνδεση ήταν οι μεγάλοι ορεινοί όγκοι των Άλπεων. Η σύνδεσή τους απαιτούσε την κατασκευή σηράγγων μήκους πάνω από 10km, που παρουσίαζαν πολλές δυσκολίες και που για τη διάνοιξή τους απαιτούνταν η εφαρμογή ιδιαίτερα σημαντικών καινοτομιών.

Η πρώτη σήραγγα που διανοίχτηκε ήταν του Frejus που έχει μήκος 12km και βρίσκεται σήμερα μεταξύ Ιταλίας και Γαλλίας. Η διάνοιξη που άρχισε το 1857 πραγματοποιήθηκε με τη βελγική μέθοδο και με τη χρήση πυρίτιδας από δύο μέτωπα και για την εκσκαφή της χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά αεροσυμπιεστής και αερόσφουρα. Η κατασκευή της σήραγγας ολοκληρώθηκε το 1871, αλλά ο κατασκευαστής της Sommeiller δεν ήταν παρών στην τελετή των εγκαινίων καθώς είχε αποθάνει μερικούς μήνες πριν από υπερκόπωση. Την ίδια εποχή στις Ηνωμένες Πολιτείες διανοίχτηκε με τη χρήση νιτρογλυκερίνης η σήραγγα Hoosac.

Αμέσως μετά, το 1872, άρχισε η διάνοιξη της σήραγγας του Gotthard στην Ελβετία (Kovari & Fectig , 2000) που έχει μήκος 15km και μέγιστο βάθος υπερκειμένων 1800m. Για την εξόρυξή της χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά δυναμίτης. Το έργο με μεγάλες δυσκολίες περατώθηκε το 1882. Η κατασκευάστρια εταιρεία όμως καταστράφηκε οικονομικά, και εκατοντάδες εργαζομένων μεταξύ των οποίων και ο ίδιος ο ανάδοχος, μηχανικός Favre, απέθαναν πριν την ολοκλήρωση του έργου.

Η σήραγγα του Arlberg μήκους 10.3km (Εικ. 3), η οποία ενώνει την Αυστρία με την Ελβετία, άρχισε να κατασκευάζεται το 1880 και περατώθηκε το 1884. Διανοίχτηκε με την παλαιά Αυστριακή μέθοδο και μεταξύ των καινοτομιών που χρησιμοποιήθηκαν ήσαν βελτιωμένες μηχανές διάτρησης και η χρήση ηλώσεων για τη στήριξη των πετρωμάτων. Αμέσως μετά, το 1898, άρχισε να κατασκευάζεται η μήκους 20km και μέγιστου βάθους υπερκειμένων 2150m

δίδυμη σήραγγα του Simplon (Kovari & Fechtig , 2000) μεταξύ Ιταλίας και Ελβετίας, που ολοκληρώθηκε το 1906. Η διάνοιξη της πραγματοποιήθηκε με την παλαιά Αυστριακή μέθοδο και κατά την κατασκευή της αντιμετωπίστηκαν θερμοκρασίες πετρώματος και πηγών νερού που έφθαναν μέχρι και 70°C και εξαιρετικά μεγάλες πιέσεις που αντιμετωπίστηκαν με την τοποθέτηση σιδηρών πλαισίων. Η σήραγγα του Löetschberg (Kovari & Fechtig , 2000) (Εικ. 2) που έχει μήκος 16km και μέγιστο ύψος υπερκειμένων 1600m είναι η τελευταία από τις πρώτες μεγάλες αλπικές σήραγγες. Κατασκευάστηκε μεταξύ 1906-13 με την παλαιά Αυστριακή μέθοδο και αντιμετώπισε ιδιαίτερα προβλήματα εισροής νερών.



Εικόνα 3: Σήραγγα Arlberg

Τη δεκαετία του 1960, η βελτιωμένη αντίληψη της μηχανικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων αλλά και οι μεγαλύτερες δυνατότητες της τότε τεχνικής, έδωσε τη δυνατότητα στους μηχανικούς να τολμήσουν να σχεδιάσουν μέτρα υποστήριξης που θα αναλάμβαναν όσο το δυνατόν μικρότερο φορτίο αποτόνωσης του πετρώματος. Για το σκοπό αυτό απαιτούνταν όμως η συνεχής παρατήρηση της μηχανικής απόκρισης του πετρώματος, η δυνατότητα άμεσης αυξομείωσης της φέρουσας ικανότητας της υποστήριξης και η τοποθέτηση εύκαμπτης υποστήριξης. Έτσι γεννήθηκε η νέα Αυστριακή μέθοδος, γνωστή σήμερα ως NATM. Η πρώτη εφαρμογή της ήταν στη μόλις 320m σιδηροδρομική σήραγγα του Schwaikheim στην Αυστρία, μέσα σε μάργες και δολομίτες. Έκτοτε, εφαρμόζεται μέχρι σήμερα σε πολύ μεγάλο ποσοστό των κατασκευαζόμενων σηράγγων.

Οι μεγάλες οδικές σήραγγες στις Άλπεις αναπτύχθηκαν πολύ αργότερα από τις μεγάλες σιδηροδρομικές. Σημαντικότερες από τις οδικές είναι του Mont Blanc και του Gotthard (Kovari and Fechtig, 2000), που και οι δύο διανοίχτηκαν ολομέτωπα. Η σήραγγα του Mont Blanc έχει μήκος 12.7km και κατασκευάσθηκε μεταξύ 1959-65, και η σήραγγα του Gotthard έχει μήκος 16.9km και κατασκευάσθηκε μεταξύ 1969-77.

1.2 Τεχνικές διάνοιξης σε ανεξάρτητα τμήματα

Η διάνοιξη των παραπάνω σηράγγων επιτυγχάνονταν αρχικά με τμηματική εκσκαφή και υποστήριξη. Οι γνωστότερα χρησιμοποιούμενες ανεξάρτητες τμηματικές εξορύξεις, μερικές από τις οποίες αναφέρθηκαν και προηγουμένως, είναι η τεχνική του πυρήνα (Γερμανική μέθοδος), η Αγγλική τεχνική, η παλαιά Αυστριακή (κλασσική) τεχνική, η Βελγική τεχνική, και η Ιταλική τεχνική. Ο τρόπος εξόρυξης των στοών εξαρτάται κυρίως από τον τύπο του εδάφους. Παρακάτω παρουσιάζονται οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες τεχνικές τμηματικής διάνοιξης σηράγγων με τη σειρά που εμφανίσθηκαν.

1.2.1 Η Γερμανική μέθοδος της τεχνικής του πυρήνα

Εφαρμόστηκε πρώτα το 1803 στο Τρονκουογ στη Γαλλία (Muller, 1984). Στη Γερμανία η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1837 για την πρώτη σήραγγα γερμανικού σιδηροδρόμου, την του Konnigsdorf στη γραμμή Koln – Aix la Chapelle, σε εξαιρετικά δύσκολες συνθήκες μέσα σε υδροφόρες άμμους. Σύντομα αντικαταστάθηκε από την Αγγλική ή την παλαιά Αυστριακή μέθοδο. Βασικές αρχές της μεθόδου είναι η αποφυγή μεγάλων χώρων εκσκαφής, η στήριξη της βραχομάζας γύρω από τις επιμέρους εκσκαφές σε ένα πυρήνα πετρώματος που παραμένει για να σκαφτεί τελευταίος, η άμεση τοποθέτηση της μόνιμης υποστήριξης (λιθοδομής) πάνω σε δομημένα τμήματα, και η εξόρυξη του κεντρικού πυρήνα σε μία φάση.

Πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η εξασφάλιση της πρόγνωσης της ποιότητας του πετρώματος στη στοά προπορείας, η επίτευξη μικρών καθιζήσεων λόγω της άμεσης στήριξης μικρών εκσκαφών πάνω στον πυρήνα, η τοποθέτηση του θόλου του άνω τμήματος σε ισχυρή μη υποχωρούσα στήριξη, και η οικονομική εξόρυξη του πυρήνα. Μειονεκτήματα της μεθόδου είναι η χαλάρωση της βραχομάζας, η εργασία μέσα σε στενούς χώρους, και το υψηλό κόστος της διάνοιξης των στοών που δεν αντισταθμίζεται από το χαμηλό κόστος της διάνοιξης του πυρήνα.

Η μέθοδος δεν μπορεί να εφαρμοσθεί από γεωμηχανική άποψη σε συνθλιβόμενα πλάστιμα πετρώματα στα οποία ο πυρήνας κάτω από την υποστήριξη υποχωρεί καθώς και σε εύθρυπτα ή κορεσμένα πετρώματα. Η μέθοδος μπορεί να εφαρμοσθεί με χρήση ειδικών μέτρων, χωρίς όμως να συνιστάται σε πετρώματα με δυνατότητα χαλάρωσης, σε πετρώματα με μη ευνοϊκή κλίση των διακλάσεων, σε δύσκαμπτα αλλά αδύναμα πετρώματα και σε ισχυρό εντατικό πεδίο.

Η μέθοδος είναι κατάλληλη για σταθερό πέτρωμα. Η μέθοδος μπορεί να είναι αποτελεσματική ακόμη και σήμερα σε μικρά βάθη και μαλακά πετρώματα ή συνεκτικά εδάφη και σε σταθερό πέτρωμα θόλων μεγάλου ανοίγματος στο άνω τμήμα υπογείων θαλάμων. Η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε τελευταία κατά την κατασκευή τμήματος της υποθαλάσσιας σήραγγας Seikan.

1.2.2 Η Βελγική τεχνική και οι παραλλαγές της

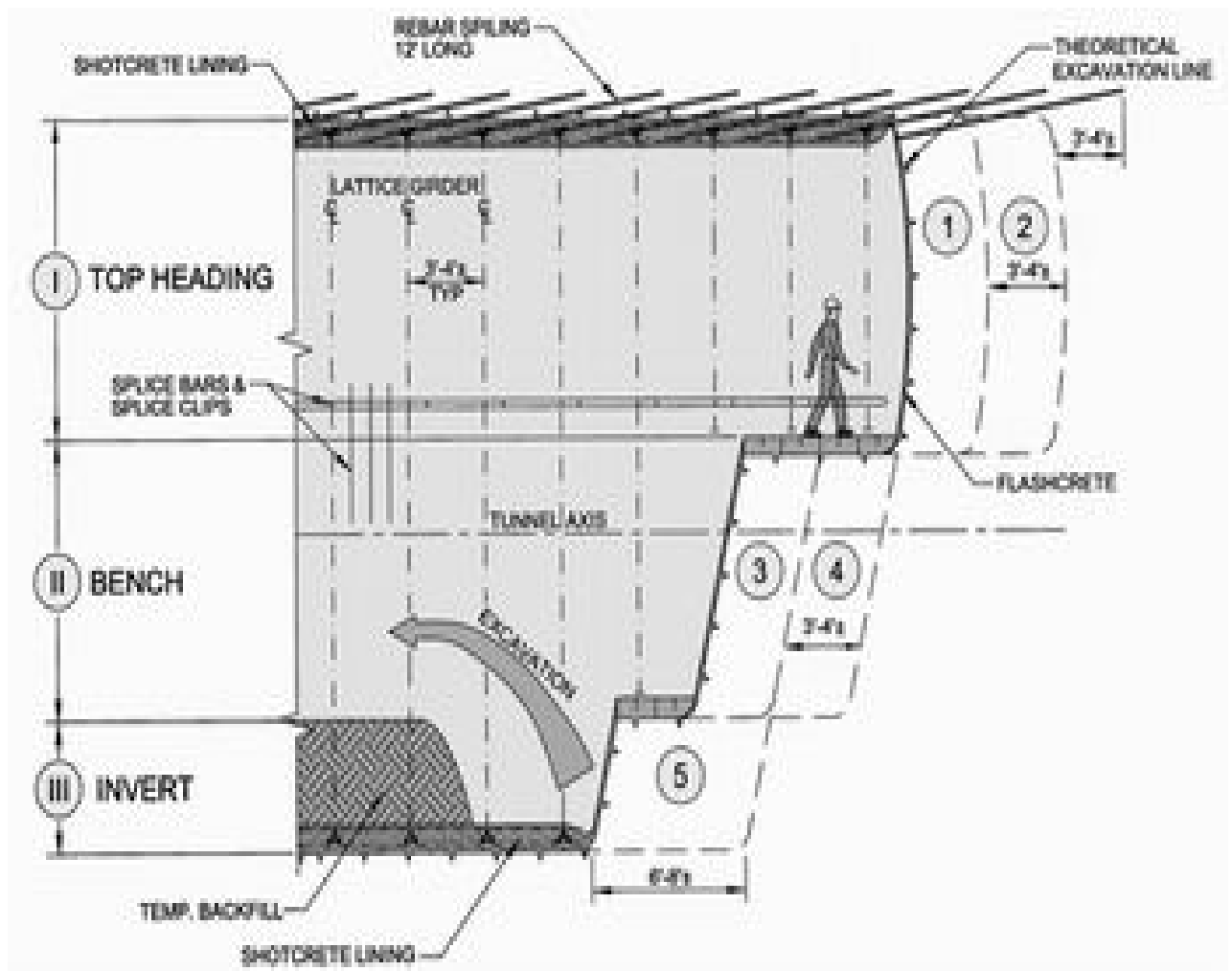
Η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1828 στη σήραγγα Kanal του Charleroy στο Βέλγιο (Maidi,2004). Χρησιμοποιήθηκε ευρέως στις κατασκευές των τουρκικών και περσικών σιδηροδρόμων του 1920-30. Με τη μέθοδο κατασκευάστηκαν από το 1872 έως το 1882 οι σήραγγες του Mont-Cenis (2.8 km) και Saint Gotthard (15 km). Βασική ιδέα της μεθόδου είναι η γρήγορη εξόρυξη του άνω τμήματος της σήραγγας και η στήριξή του όχι μόνο προσωρινά αλλά και με τη μόνιμη στήριξη (λιθοδομή ή σκυρόδεμα). Κατόπιν γίνεται περιμετρική εκσκαφή στα κάτω πλευρά της σήραγγας και κατασκευή της κάτω στήριξης πάνω στην οποία υποστηρίζεται η άνω στήριξη. Για το λόγο αυτό, ονομάστηκε μέθοδος της υποθεμελίωσης (Szechy, 1967).

Πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η οικονομία σε ξυλεία σε σχέση με την παλαιά Αυστριακή, η καλή προσαρμογή σε μεταβαλλόμενα πετρώματα, η συνεχής προχώρηση, οι μικρές υποχωρήσεις, και το γρήγορο κλείσιμο του θόλου. Μειονεκτήματα της μεθόδου είναι: η ανάγκη φόρτωσης των μπαζών από κάτω προς τα άνω, η ανάγκη εργασίας από δάπεδο σε δάπεδο με χρήση δύσχρηστων και επικίνδυνων κεκλιμένων επιπέδων, η δυσχέρεια της εργασίας σε κάθε δάπεδο αν υπάρχουν πολλά νερά, και η δυσκολία τοποθέτησης της στεγάνωσης. Επίσης, δημιουργούνται μεγάλες υποχωρήσεις στη περίπτωση δυσκολίας υποστήριξης της άνω στήριξης, και σημαντικές συνθλίψεις σε περίπτωση καθυστέρησης της κατασκευής του ανάστροφου τόξου. Η μέθοδος αντιμετωπίζει δυσκολίες κατά τη χρήση της σε πλαστικά και συνθλιβόμενα πετρώματα. Δεν χρησιμοποιείται σε κορεσμένα και εύθρυπτα πετρώματα καθώς και σε υψηλής πλαστιμότητας πετρώματα. Η χρήση της μεθόδου είναι σκόπιμη σε μεταβαλλόμενα ή σε μετρίως ευσταθή μέχρι ελαφρά συνθλιβόμενα πετρώματα.

1.2.3 Η παλαιά Αυστριακή τεχνική και οι παραλλαγές της

Με τη μέθοδο αυτή, που χρησιμοποιήθηκε πολύ στην Κεντρική Ευρώπη, αποφεύχθηκαν τα μειονεκτήματα της βελγικής μεθόδου (Δρανδάκης, -). Οι επιμέρους ανεξάρτητες διανοίξεις της μεθόδου είναι οι εξής : Αρχικά κατασκευάζεται και υποστηρίζεται η στοά της στέψης. Η εκσκαφή συνεχίζει με

τη διάνοιξη στοών, με σειρά από πάνω προς τα κάτω, που υποστηρίζονται άμεσα. Η μέθοδος έχει ατομία για μεγάλες μερικές εξορύξεις και η στήριξη γίνεται κατά το δυνατόν γρήγορα στο δάπεδο. Η τελική υποστήριξη (λιθοδομή) κατασκευάζεται μετά το τέλος της εξόρυξης από κάτω προς τα πάνω. Τέλος μια στοά προπορείας στη βάση της σήραγγας χρησιμοποιείται ως οδός μεταφοράς η οποία λειτουργεί και ως στραγγιστήριο.



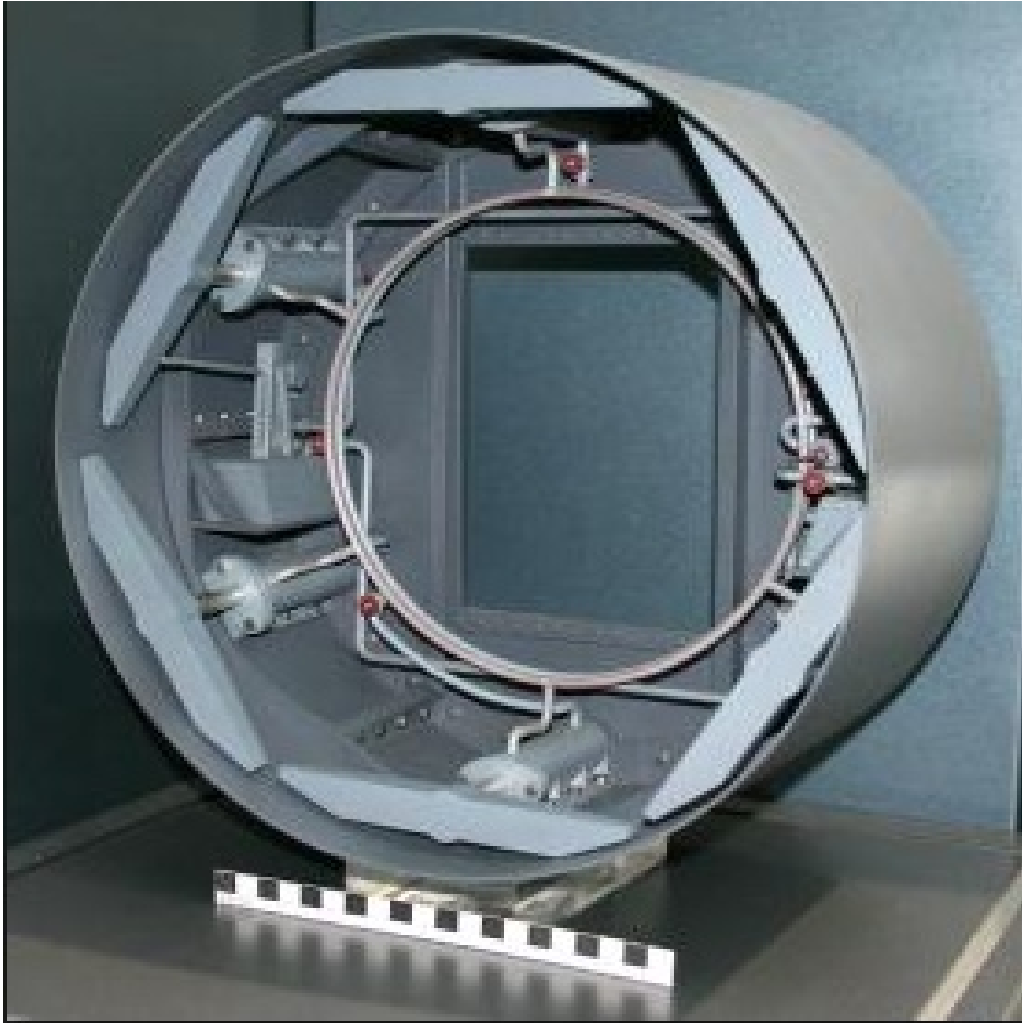
Εικόνα 4: Typical NATM Excavation sequence in soft ground

Πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η εξασφάλιση της πρόγνωσης των γεωλογικών συνθηκών από τη στοά προπορείας, η δυνατότητα κατασκευής πολλών μετώπων εξόρυξης, η μεταφορά στη βάση όλων των φορτίων των στηρίξεων μετά την κατασκευή της εγκοπής στη στέψη, ο διαχωρισμός των

χώρων εκσκαφής και κατασκευής της υποστήριξης, και η δυνατότητα προσαρμογής της μεθόδου σε μεταβαλλόμενες γεωλογικά συνθήκες. Μειονεκτήματα της μεθόδου είναι οι μεγάλες απαιτήσεις σε ξύλα, ο μικρός χώρος εργασίας, οι μεγάλες υποχωρήσεις, ο μεγάλος χρόνος στήριξης σε ξύλα, και ο μεγάλος χρόνος μέχρι το κλείσιμο του ανάστροφου τόξου. Η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμη και σήμερα σε ελαφρά θρυμματιζόμενο μέχρι συνθλιβόμενο πέτρωμα. Λιγότερο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κορεσμένα πετρώματα, ενώ δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολύ εύθραυστο και συνθλιβόμενο πέτρωμα.

1.3 Διάνοιξη με ασπίδα

Η τμηματική διάνοιξη εν τούτοις δεν κατάφερε πάντα τη σταθερότητα του εκσκαμμένου τμήματος εφόσον αυτό βρισκόταν σε μη συνεκτικό έδαφος και υπήρχε ισχυρή ροή νερού. Ιδιαίτερες τέτοιες περιπτώσεις αποτελούσαν οι διανοίξεις κάτω από πυθμένες ποταμών. Η πρώτη υποπυθμения σήραγγα, χωρίς παράκαμψη του ποταμού, άρχισε να διανοίγεται από τον Brunel το 1825 (Sandstrom , 1963), με σκοπό να κατασκευασθεί υπόγεια διάβαση κάτω από τον Τάμεση. Για τη διάνοιξη χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά ασπίδα, δηλαδή ένα ικρίωμα με πλάτος 11.4m, ύψος 6.8m, και μήκος 2.7m, που προσέφερε αντιστήριξη τόσο περιμετρικά όσο και στο μέτωπο, ενώ συγχρόνως επέτρεπε την εκσκαφή του μετώπου και το κτίσιμο της μόνιμης στήριξης πίσω της. Το εγχείρημα ήταν δύσκολο, με αποτέλεσμα κατά τη διάνοιξη να πλημμυρίσει 5 φορές. Μετά την περάτωσή της το 1842 δόθηκε για τη διέλευση πεζών και από το 1865 λειτουργεί ως σιδηροδρομική. Τη μορφή της ασπίδας, έτσι όπως την ξέρουμε σήμερα, την επινόησε ο Barlow. Αυτή χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στη δεύτερη σήραγγα κάτω από τον Τάμεση το 1869. Ο Greathead τελειοποίησε τη μέθοδο διάνοιξης με ασπίδα (Εικ. 5) με την εκμηχάνισή της και τη συγκράτηση του νερού πίσω από το μέτωπο με πιεσμένο αέρα. Την ίδια εποχή διανοίχτηκαν σήραγγες κάτω από ποτάμια ή λίμνες χωρίς τη βοήθεια ασπίδας, άλλοτε επιτυχώς, όπως στο Σικάγο ή στο Severn, και άλλοτε ανεπιτυχώς, όπως στο Cleveland.



Εικόνα 5: Scale model of 1886 Greathead Shield, made in 1993

Οι σήραγγες μετρό έχουν συνήθως πολύ μικρό ύψος υπερκειμένων, με αποτέλεσμα να μη δύναται το πέτρωμα να προσφέρει τη λειτουργία θόλου πάνω από αυτές. Επίσης, αντιμετωπίζουν συχνά την ύπαρξη νερών και την απαίτηση για ελαχιστοποίηση των καθιζήσεων. Τις αυξημένες απαιτήσεις σε αντιστήριξη δύναται να προσφέρει η ασπίδα. Κατά την πρώτη διάνοιξη σήραγγας μετρό, που άρχισε να κατασκευάζεται στο Λονδίνο το 1886, χρησιμοποιήθηκε η ασπίδα του Greathead με χρήση πιεσμένου αέρα. Έκτοτε αποτελεί μία από τις συνήθειες πρακτικές κατά τη διάνοιξη σηράγγων μετρό να χρησιμοποιείται εκμηχανισμένη ασπίδα, που αρχικά ήταν εξοπλισμένη με συστήματα αντιστάθμισης της πίεσης του νερού με πιεσμένο αέρα και αργότερα με πιο σύγχρονες μεθόδους, όπως με πίεση μπεντονίτη ή λάσπης εδάφους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ II

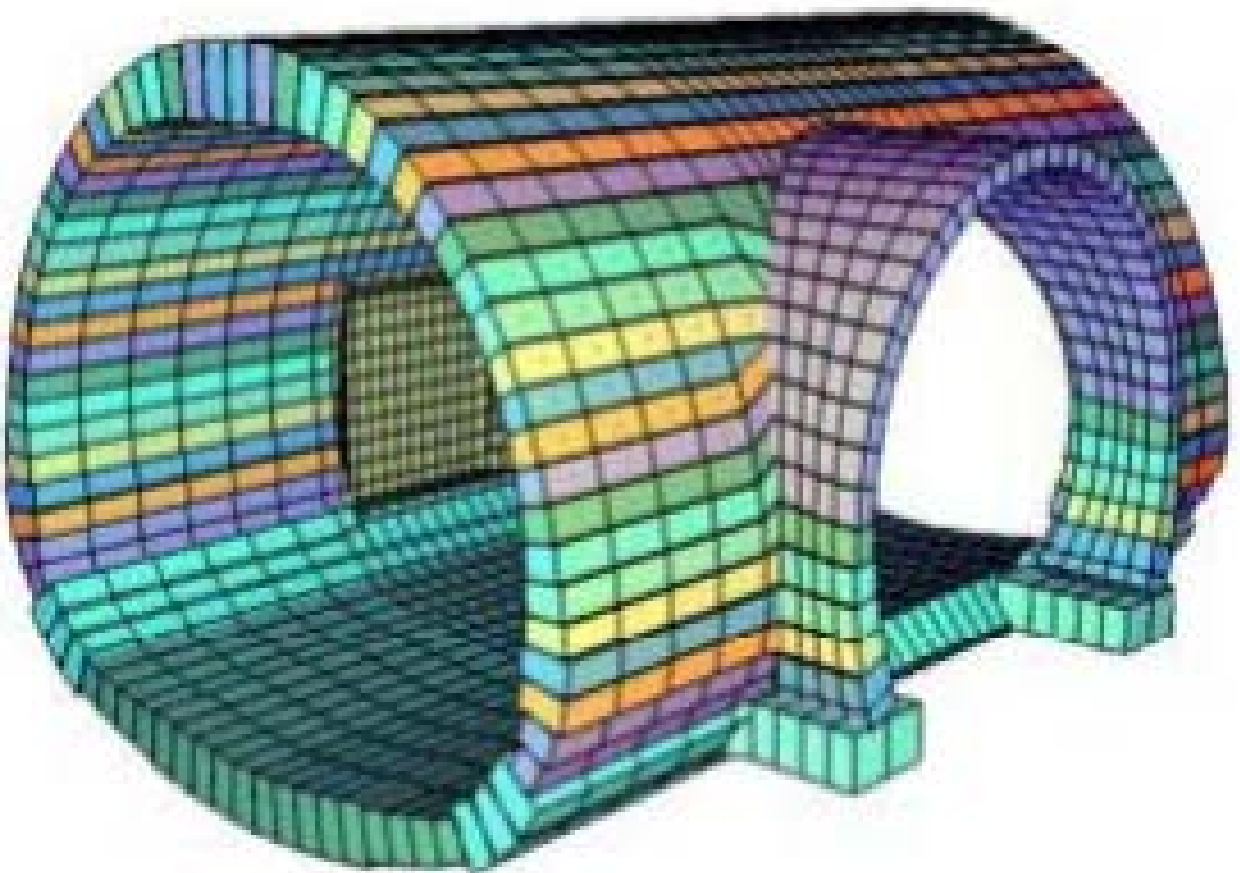
Θάλαμοι ενδιάμεσης προσβολής: Πότε και γιατί χρειάζεται η ενδιάμεση προσβολή – Αναφορά και περιγραφή κλασικών παραδειγμάτων

Οι θάλαμοι ενδιάμεσης προσβολής (Εικ. 6) χρησιμοποιούνται προκειμένου να επιτευχθεί η πιο γρήγορη εκτέλεση της διάνοιξης μιας σήραγγας. Μπορεί να εφαρμοσθεί είτε σε δίδυμες σήραγγες για να “περάσουμε” από την μία σήραγγα στην άλλη, είτε ακόμα και σε σήραγγα ενός κλάδου για την πιο σύντομη εκτέλεση των εργασιών διάνοιξης.



Εικόνα 6: Θάλαμος ενδιάμεσης προσβολής

Στην περίπτωση της δίδυμης σήραγγας, μια συνδετήρια σήραγγα κατασκευάζεται στο μέσον περίπου του ενός κλάδου και μέσω -συνήθως- ενός τμήματος διευρούμενης διατομής (“trumpet”) για την ομαλή μετάβαση συνδέει τον πρώτο (πρότερα κατασκευασμένο) κλάδο με τον δεύτερο. Στο σημείο που καταλήγει κατασκευάζεται ο θάλαμος ενδιάμεσης προσβολής (junction cavern ή chamber), από τον οποίον θα εκκινήσει ταυτόχρονα η διάνοιξη του δεύτερου κλάδου και προς τις δύο κατευθύνσεις. Η συγκεκριμένη μέθοδος εκτός από ταχύτητα εκτέλεσης εργασιών και πιο γρήγορη παράδοση ενός συγκεκριμένου έργου, προσφέρει και μια οικονομικότερη διάνοιξη καθώς μειώνεται ο χρόνος λειτουργίας των μηχανημάτων, δηλαδή μειώνονται και οι εργατοώρες. Επομένως γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η συγκεκριμένη μέθοδος, παρά την δυσκολία εφαρμογής της, είναι ιδιαίτερως συμφέρουσα.



Εικόνα 7: Τρισδιάστατο κέλυφος πεπερασμένων στοιχείων σε θάλαμο ενδιάμεσης προσβολής

Από την άλλη, στην περίπτωση που έχουμε διάνοιξη σήραγγας ενός κλάδου μπορούμε και πάλι να χρησιμοποιήσουμε τη μέθοδο διάνοιξης με κατασκευή θαλάμου ενδιάμεσης προσβολής. Με αυτόν τον τρόπο αντικαθίσταται ο συνήθης τρόπος διάνοιξης από το στόμιο εισόδου καθ' όλο το μήκος μέχρι το πέρας της σήραγγας όπως αυτή έχει σχεδιαστεί. Αντιθέτως από τις δύο πλευρές του “δωματίου” ενδιάμεσης προσβολής εκκινεί ταυτόχρονα η διάνοιξη και προς τις δύο κατευθύνσεις. Πλεονέκτημα της μεθόδου είναι, όπως και στην περίπτωση της εφαρμογής της σε δίδυμες σήραγγες που προαναφέρθηκε, ότι είναι δυνατό να τελειώσει η διάνοιξη και επομένως και η κατασκευή της σήραγγας σε πολύ μικρότερο χρονικό διάστημα από ότι αναμένεται με την χρήση του κλασσικού τρόπου διάνοιξης, καθώς και η μεγαλύτερη οικονομία της κατασκευής.

1. Αναφορά – Περιγραφή κλασσικών παραδειγμάτων

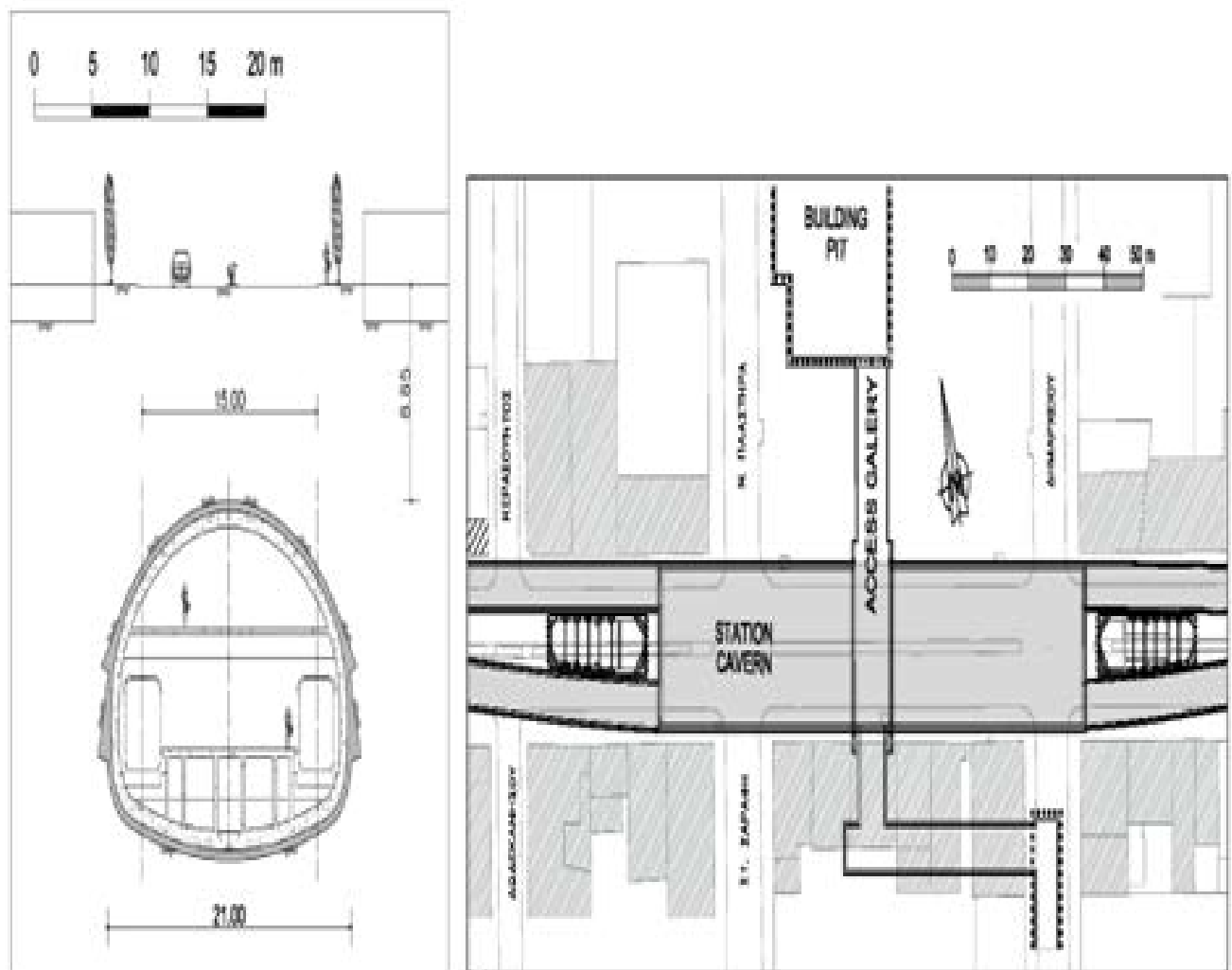
1.1 Κατασκευή Μετρό Αιγάλεω

Για την κατασκευή του σταθμού του Μετρό Αθηνών στο Αιγάλεω, στα πλαίσια της επέκτασης της γραμμής 3 του Μετρό Αθηνών, που είναι σε λειτουργία από το 2004, απαιτήθηκε η υπόγεια διάνοιξη και επένδυση με οπλισμένο σκυρόδεμα ενός θαλάμου καθαρού ανοίγματος περί τα 20m και μήκους 110 m σε μικρό υπερκείμενο που τοπικά φθάνει τα 8.5 μόλις μέτρα και στη συνέχεια η κατασκευή εντός αυτού της επένδυσης και της κτιριακής κατασκευής του σταθμού. Ο υπόγειος θάλαμος διανοίχθηκε κάτω από την Ιερά οδό στην πλατεία Εσταυρωμένου του Αιγάλεω σε μια αρκετά πυκνοδομημένη περιοχή με βαριά οδική κυκλοφορία.

Για την εξυπηρέτηση των λειτουργικών απαιτήσεων του σταθμού (κίνηση των συρμών και διακίνηση κοινού) η αποβάθρα τοποθετήθηκε στο κέντρο της υπόγειας αίθουσας, επιλογή που είχε σαν αποτέλεσμα την αύξηση της απόστασης των δύο αξόνων κίνησης των συρμών που φθάνει τα 15m. Η τοποθέτηση της αποβάθρας στο κέντρο του σταθμού οδηγεί τελικά στην ανάγκη κατασκευής ενός υπογείου θαλάμου σημαντικού πλάτους, που όπως

προαναφέρθηκε φθάνει τα 21 μέτρα (καθαρό άνοιγμα 20 m) και αποτελεί τον ευρύτερο υπόγειο θάλαμο που έχει κατασκευαστεί στα πλαίσια των έργων του Μετρό Αθηνών.

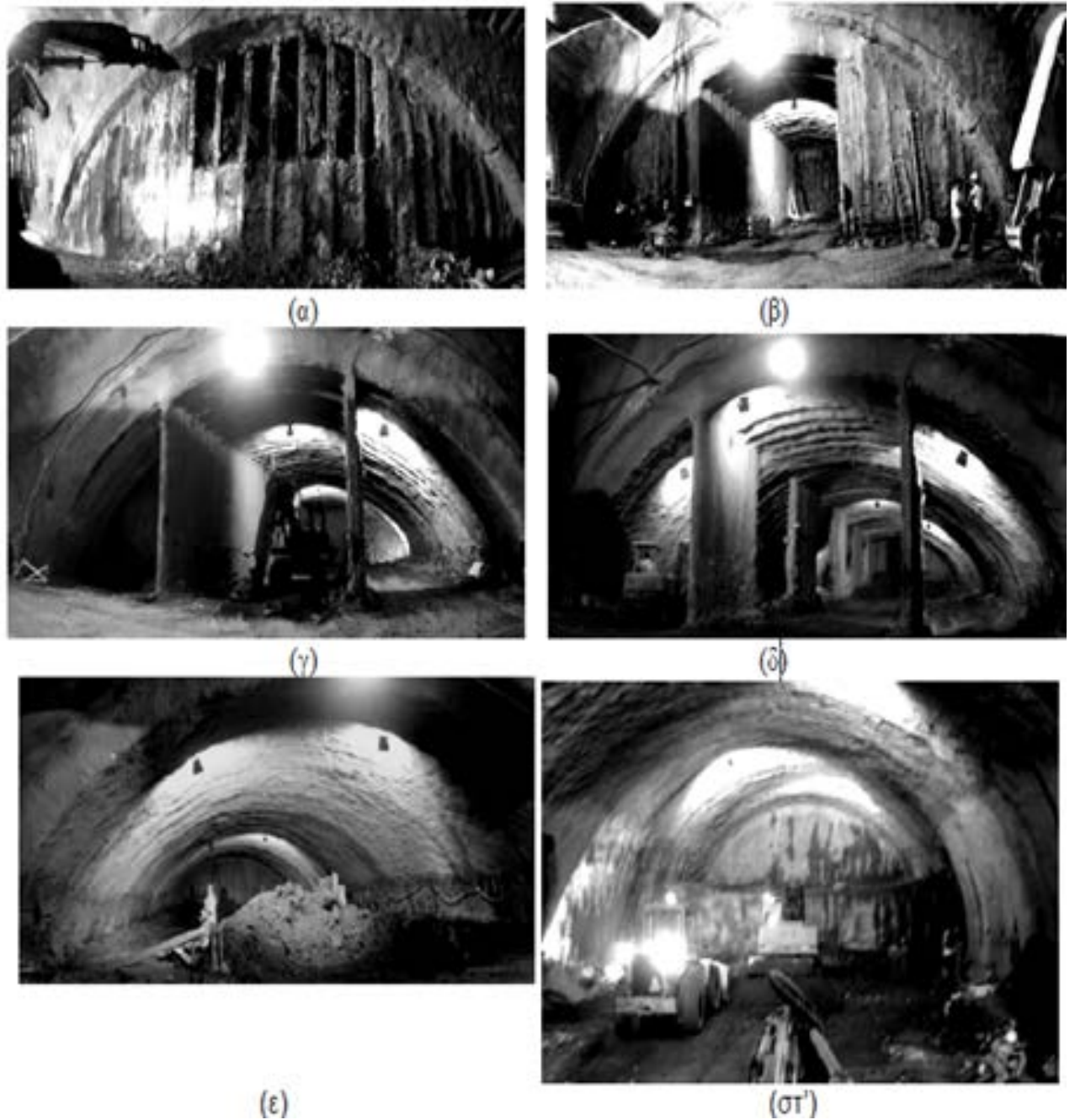
Η τυπική διατομή του θαλάμου του σταθμού καθώς και η γενική διάταξη του έργου παρουσιάζεται στο Σχήμα 1. Το σύμπλεγμα του σταθμού περιλαμβάνει εκτός από τον υπόγειο θάλαμο, ένα τμήμα που κατασκευάζεται με εκσκαφή και επανεπίχωση σε αντιστηριζόμενο όρυγμα και στεγάζει την μία είσοδο του σταθμού, το χώρο διακίνησης κοινού, κυλιόμενες κλίμακες και χώρους Η/Μ εγκαταστάσεων (ανεμιστήρες αερισμού κ.τ.λ). Τα δύο τμήματα, υπόγειο και υπαιθριόδητο συνδέονται μεταξύ τους με μια διασυνδετήρια στοά που συναντά τον υπόγειο θάλαμο στο μέσον του.



Σχήμα 1: Τυπική διατομή του υπόγειου σταθμού (αριστερά) και γενική διάταξη του συμπλέγματος των υπόγειων κατασκευών

1.1.1 Διάνοιξη και προσωρινή υποστήριξη

Η πρόσβαση στο υπόγειο τμήμα του θαλάμου έγινε από μία στοά προσπέλασης η οποία διανοίχθηκε από το αντιστηριζόμενο όρυγμα που στεγάζει το υπαίθρια κατασκευαζόμενο τμήμα της εισόδου του σταθμού. Στη θέση του υπόγειου θαλάμου διαμορφώθηκε μια διεύρυνση της στοάς προσπέλασης (θάλαμος προσβολής) από την οποία ξεκίνησε η διάνοιξη του κυρίως θαλάμου του σταθμού. Για την διάνοιξη του σταθμού επιλέχθηκε μια πολυφασική ακολουθία διάνοιξης και υποστήριξης προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι επιφανειακές καθιζήσεις και οι κίνδυνοι υπερεκσκαφών και καταπτώσεων στην περιοχή του μετώπου. Συγκεκριμένα, υιοθετήθηκε η μέθοδος της «κεντρικής στοάς» κατά την οποία η διάνοιξη ξεκινά από ένα κεντρικό τμήμα της διατομής και ακολουθούν οι διανοίξεις των πλευρικών τμημάτων (βλ. Αλεξανδρής κ.α. (2006)).

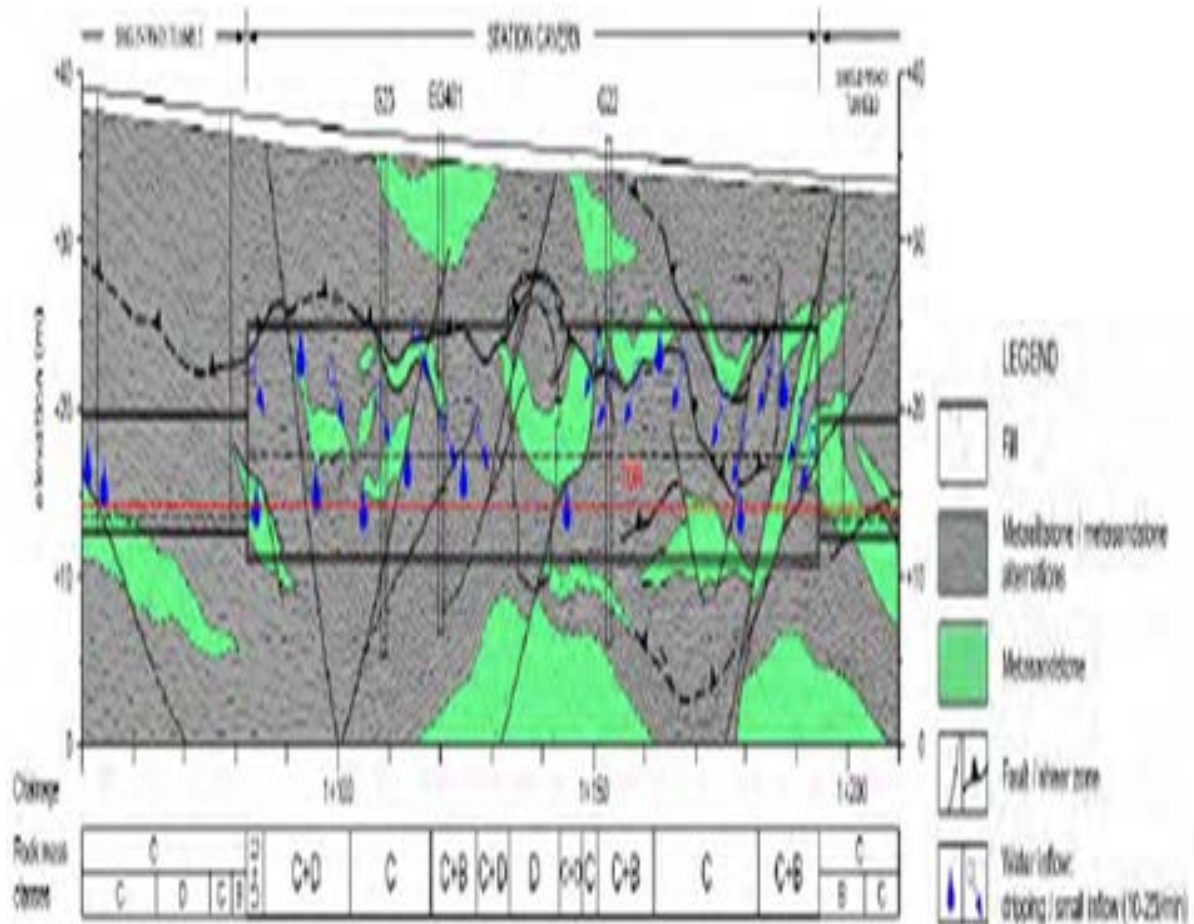


Σχήμα 2: Τμηματική διάνοιξη και υποστήριξη της αίθουσας του σταθμού (α), (β) διάνοιξη κεντρικής στοάς (β) διάνοιξη πλευρικών τμημάτων (δ) σταδιακή αφαίρεση τοιχωμάτων (ε) ολοκλήρωση εκσκαφής άνω ημιδιατομής (στ) εκσκαφή βαθμίδας και δαπέδων ανεστραμμένου θόλου.

Αναλυτικότερα, για την διαμόρφωση του θόλου του θαλάμου, αρχικά διανοίχθηκε και υποστηρίχθηκε ένα κεντρικό τμήμα με κατακόρυφα τοιχώματα (Σχήμα 2α, 2β) και ακολούθως διανοίχθηκαν τα πλευρικά τμήματα (Σχήμα 2γ), διατηρώντας τα κατακόρυφα στοιχεία ενίσχυσης της διατομής. Η αφαίρεση αυτών των στοιχείων έγινε σταδιακά με ταυτόχρονη ενίσχυση της επένδυσης

του θόλου με πρόσθετο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, για την εξασφάλιση μονολιθικών συνδέσεων μεταξύ των τμηματικών διανοίξεων του θόλου (Σχήμα 2δ, 2ε). Η διάνοιξη ολοκληρώθηκε με την εκσκαφή της βαθμίδας και του δαπέδου ανεστραμμένου θόλου (Σχήμα 2στ). Σε σχέση με άλλες εναλλακτικές μεθόδους διάνοιξης που εξετάστηκαν στην φάση του σχεδιασμού, η μέθοδος αυτή κρίθηκε ότι πλεονεκτεί σε απλότητα, παραγωγικότητα, αξιοπιστία και καλό έλεγχο των προκαλούμενων επιφανειακών καθιζήσεων. Τα θέματα διάνοιξης και προσωρινής υποστήριξης του θαλάμου έχουν παρουσιαστεί στο Alexandris et al. (2007).

Στο μεγαλύτερο τμήμα της υπόγειας διάνοιξης συναντήθηκε αθηναϊκός σχιστόλιθος που χαρακτηρίζονταν από την επικράτηση σκληρού, ελαφρά αποσαθρωμένου μετα-ψαμμίτη με ακανόνιστες ενστρώσεις μέτρια σκληρού, ελαφρά έως μέτρια αποσαθρωμένου μετα-ιλυολίθου. Οι γενικές τεχνικογεωλογικές συνθήκες χαρακτηρίστηκαν ως ευνοϊκές με μικρά προβλήματα εισροών υπογείων υδάτων και γεωμηχανικό δείκτη αντοχής που κυμάνθηκε στο εύρος $GSI=25\sim35$. Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται η τεχνικογεωλογική μηκοτομή της διάνοιξης. Η διάνοιξη ολοκληρώθηκε με έλεγχο των καθιζήσεων στην επιφάνεια που περιορίστηκαν σε λιγότερο από 25mm (μόνο σημειακά σημειώθηκαν υπερβάσεις που και αυτές δεν ξεπέρασαν τα 30mm).



Σχήμα 3: Γεωλογικές συνθήκες στην περιοχή του σταθμού (Alexandris et al. 2007). Κατηγορίες Βραχομάζας: B: GSI=35-45, C: GSI=25-35, D: GSI=20-25, E: GSI=15-20

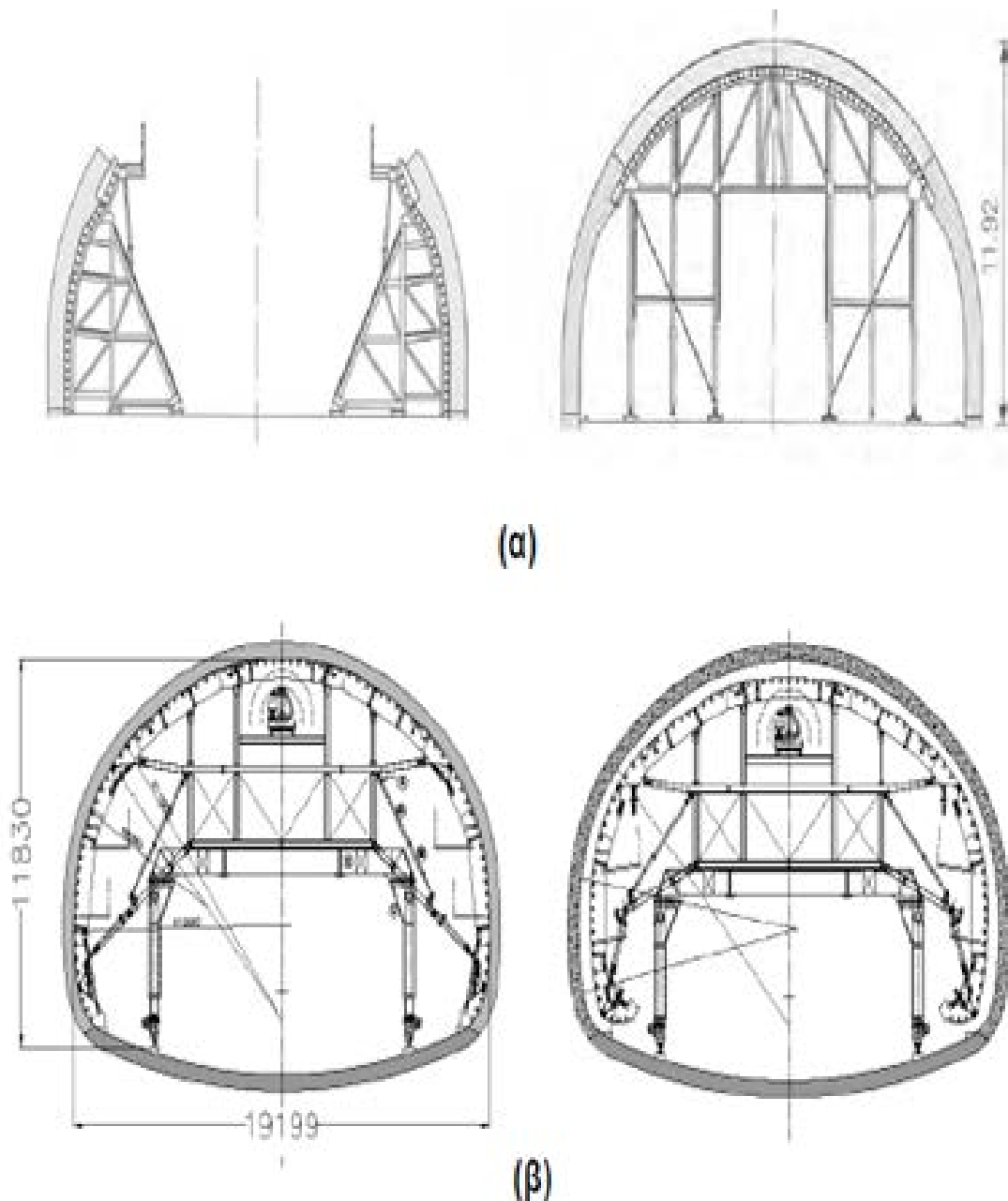
1.1.2 Δομική διαμόρφωση της μόνιμης κατασκευής

Το δομικό σύστημα του υπόγειου τμήματος του σταθμού περιλαμβάνει την περιμετρική επένδυση του υπόγειου θαλάμου που κατασκευάστηκε από οπλισμένο σκυρόδεμα πάχους 60 cm, τους τοίχους αρχής και πέρατος (headwalls) πάχους 80 cm καθώς και τις εσωτερικές κατασκευές του θαλάμου που περιλαμβάνουν την κεντρική αποβάθρα, τους φορείς των σταθερών και κυλιόμενων κλιμάκων και το κατάστρωμα ενός ενδιάμεσου επιπέδου (επίπεδο μετεπιβίβασης) από το οποίο οι επιβάτες εξέρχονται του υπόγειου θαλάμου. Η

είσοδος και η έξοδος στον υπόγειο θάλαμο του σταθμού γίνεται από μια εγκάρσια στοά (cross gallery) που κατασκευάστηκε στο μέσον του θαλάμου και εξυπηρετεί την κίνηση των επιβατών και προς τις δύο εξόδους του σταθμού (βόρεια και νότια έξοδος). Στο ανώτερο τμήμα της εγκάρσιας αυτής στοάς περιλαμβάνεται ξεχωριστό διαμέρισμα που εξυπηρετεί την διέλευση αεραγωγών και άλλων H/M διελεύσεων.

1.1.2.1 Κατασκευή

Η σκυροδέτηση του θαλάμου έγινε σε 11 σκυροδετήσεις μήκους 10 μέτρων έκαστη ($11 \times 10 = 110$ m). Σε κάθε σκυροδέτηση διαστρώνονταν κατά μέσο όρο 240 m^3 και η σκυροδέτηση του κάθε τμήματος διαρκούσε 16 ώρες. Παρά το μεγάλο βάρος του μεταλοτύπου, για να αποφευχθούν αθέλητες μετακινήσεις και παραμορφώσεις του μεταλοτύπου από ασύμμετρες φορτίσεις του νωπού σκυροδέματος, η τροφοδοσία του σκυροδέματος γινόταν συμμετρικά και στις δύο παρειές, λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι η μέγιστη υψομετρική διαφορά νωπού σκυροδέματος που επέτρεπε ο κατασκευαστής είναι μόλις 0.5 m. Η αφαίρεση του μεταλοτύπου γινόταν 8-12 ώρες από την ολοκλήρωση των της σκυροδέτησης μετά από έλεγχο δοκιμίων. Η ελάχιστη αντοχή κύβου για να επιτραπεί η αφαίρεση του μεταλοτύπου προσδιορίστηκε μετά από υπολογισμούς σε $f_c = 10 \text{ MPa}$. Τα δοκίμια συντηρούντο τις πρώτες ώρες μετά την σκυροδέτηση στην θέση του έργου, ώστε να ωριμάζουν σε παραπλήσιες συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας, αν και η κατασκευή λόγω του σημαντικού πάχους της επένδυσης ανέπτυξε στην πράξη συστηματικά υψηλότερη θερμοκρασία από τα δοκίμια.

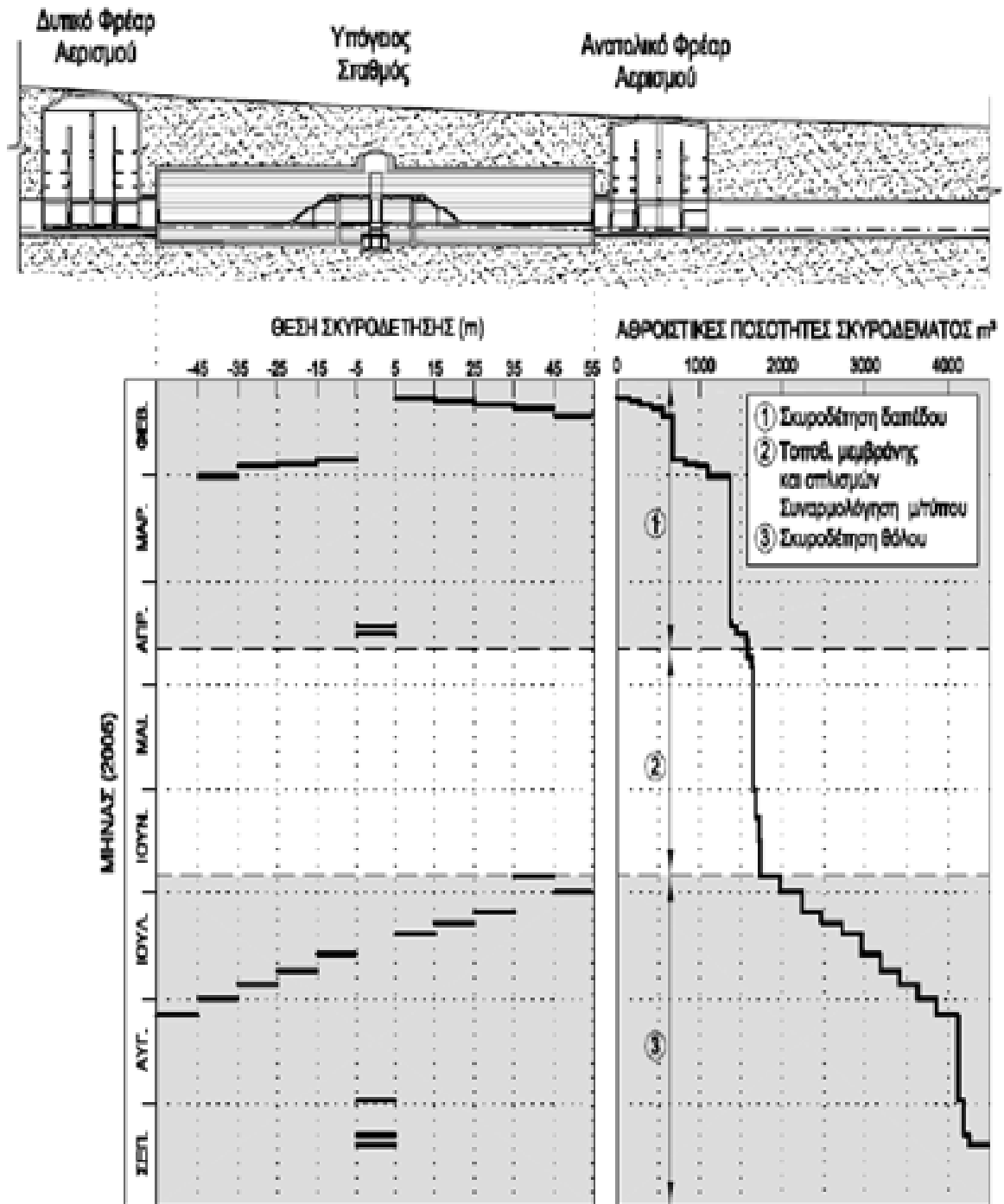


Σχήμα 4: Τρόποι σκυροδέτησης επένδυσης θαλάμων μεγάλων ανοιγμάτων. (α) Σκυροδέτηση σε τρεις φάσεις, (β) Σκυροδέτηση σε μία φάση με ενιαίο μεταλλότυπο (πρακτική που θιοθετήθηκε).

Για τον υπολογισμό της ελάχιστης απαιτούμενης θλιπτικής αντοχής για την αφαίρεση του μεταλλοτύπου, αναλύθηκε ένα ραβδωτό προσομοίωμα του θόλου το οποίο φορτίστηκε μόνο από το ίδιο βάρος και μια αύξηση θερμοκρασίας $\Delta T = +25^{\circ}\text{C}$ που αντιπροσωπεύει τη θέρμανση του φορέα από την έκλυση της θερμότητας ενυδάτωσης του τσιμέντου. Η ελάχιστη θλιπτική αντοχή του των δοκιμίων σκυροδέματος για να επιτραπεί η αφαίδωση

προέκυψε με τριπλασιασμό της μέγιστης υπολογιζόμενης θλιπτικής τάσης. Το υψηλό περιθώριο ασφαλείας, που είναι σύνηθες στην πράξη (Harrel T.R. 1989) αποβλέπει στην κάλυψη αβεβαιοτήτων σχετικά με τη φόρτιση (κυρίως θερμοκρασία) και τις συνοριακές συνθήκες (αντιδράσεις από τον βράχο), τις ελαστικές ιδιότητες του σκυροδέματος σε τόσο μικρές ηλικίες αλλά και τον μικρό αριθμό δοκιμών που ελέγχονται (1-3 συνήθως). Επίσης πρέπει να καλυφθούν οι ανομοιομορφίες τόσο στους χρόνους όσο και στις επικρατούσες θερμοκρασίες ωρίμανσης του σκυροδέματος, που διαφοροποιούνται σημαντικά μεταξύ των τοιχωμάτων του φορέα που σκυροδετούνται πρώτα και του ανώτερου τμήματος του θόλου που ακολουθεί.

Με την ολόσωμη σκυροδέτηση της επένδυσης επετεύχθη σημαντική επιτάχυνση του χρόνου ολοκλήρωσης της κατασκευής. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5, όπου παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη των εργασιών σκυροδέτηση του θαλάμου, η σκυροδέτηση της επένδυσης με τον μεταλλότυπο διήρκεσε περίπου ένα μήνα κατά την διάρκεια του οποίου σκυροδετήθηκαν συνολικά 2600 m^3 σκυροδέματος. Η συνολική ποσότητα του σκυροδέματος (συμπεριλαμβανομένων και των εσωτερικών κατασκευών) έφθασε τελικά τα 6050 m^3 ενώ το βάρος των οπλισμών συνολικά έφθασε τους 680 tn. Τέλος η επιφάνεια των μεμβρανών που τοποθετήθηκε περιμετρικά της κατασκευής κάλυψε 7100 m^2 . Ο συνολικός χρόνος για την σκυροδέτηση της επένδυσης του σταθμού, περιλαμβανομένων και των απαιτούμενων χρόνων για την τοποθέτηση των μεμβρανών των χαλύβδινων οπλισμών και της συναρμολόγησης του μεταλλοτύπου στο εσωτερικό του θαλάμου, έφθασε τους 6 μήνες. Στο Σχήμα 6α παρουσιάζεται μια γενική άποψη του θαλάμου μετά το πέρας των σκυροδετήσεων της επένδυσης. Ο θόλος του σταθμού επενδύθηκε με κεραμική ψηφίδα, για την επικόλληση της οποίας ήταν απαραίτητη η εξασφάλιση λείας επιφάνειας υποστρώματος που επετεύχθη με την χρήση του ολόσωμου μεταλλοτύπου.



Σχήμα 5: Χρονική εξέλιξη των κατασκευαστικών εργασιών της μόνιμης επένδυσης



Σχήμα 6: Άποψη του υπόγειου θαλάμου μετά την ολοκλήρωση των σκυροδετήσεων (αριστερά) και μετά την ολοκλήρωση των αρχιτεκτονικών τελειωμάτων (δεξιά).

1.2 Σήραγγα KRABBE , Αυτοκινητόδρομος , Τμήμα Τίρανα – Ελμπασάν , Αλβανία

Πρόκειται για δίδυμη σήραγγα μήκους περίπου 2,5km με διατομή 90 -120 m², για την κατασκευή της οποίας χρησιμοποιήθηκε θάλαμος ενδιάμεσης προσβολής. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την όρυξή της ήταν η NATM – μηχανικά μέσα και εκρηκτικά, ενώ η τελική επένδυση έγινε με οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30. Η γεωλογία της περιοχής αποτελείται από σχηματισμό μολάσσης αποτελούμενο από εναλλαγές ψαμμιτών και ιλυολίθων, παχυστρωματώδεις ψαμμίτες, ιλυόλιθους και αραιές ενστρώσεις κροκαλοπαγών, ενώ τα υπερκείμενα δεν ξεπερνούν τα 210m.



Όψη στομίου εισόδου (προς Τίρανα) βόρειου κλάδου σήραγγας



Υπόγειο μέτωπο σήραγγας



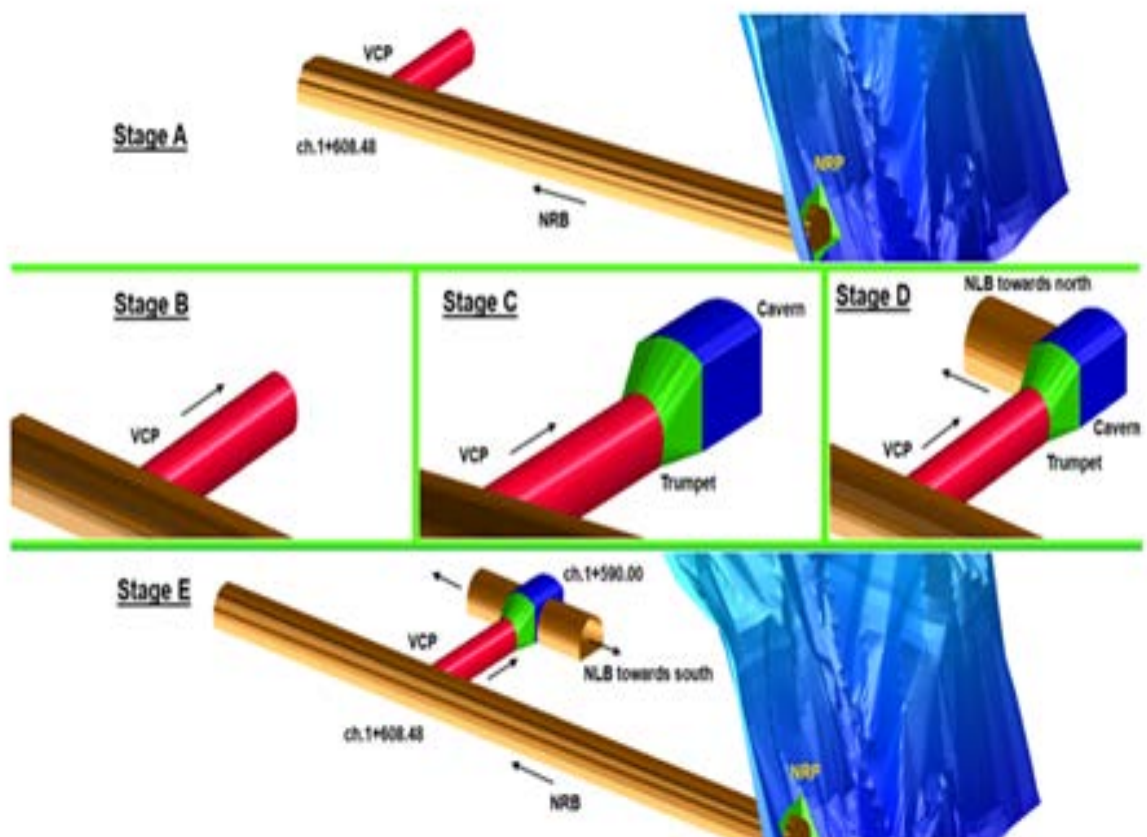
Υπόγειο τμήμα σήραγγας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ III

Αναφορά στη Μελέτη

ΟΔΙΚΗ ΣΗΡΑΓΓΑ T1 , Π.Γ.Δ.Μ.(F.Y.R.O.M.)

Η παρούσα μελέτη (WMS- Works Method Statement) αναφέρεται στα υπόγεια έργα που πρέπει να εφαρμοσθούν στο βόρειο δεξιό κλάδο (NRB) της σήραγγας T1, ώστε να φθάσουμε στον βόρειο αριστερό κλάδο της σήραγγας T1, ούτως ώστε να αρχίσουν παράλληλα και ταυτόχρονα οι εργασίες διάνοιξης προς τις δύο κατευθύνσεις για την ταχύτερη διάνοιξη του δεύτερου κλάδου της διδυμής οδικής σήραγγας T1.



Η σύνδεση του βόρειου δεξιού κλάδου (NRB) με τον βόρειο αριστερό κλάδο (NLB) θα γίνει μέσω μιας διασταυρούμενης σήραγγας που θα διευκολύνει την υπόγεια εκσκαφή. Προκειμένου να φθάσουμε το συντομότερο δυνατόν στον βόρειο αριστερό κλάδο (NLB) και για την άμεση έναρξη της υπόγειας εκσκαφής και στους δύο κλάδους, η τομή θα πρέπει να γίνει κοντά στην είσοδο του φαραγγιού στον βόρειο δεξιό κλάδο και πρέπει να εκθέτει την απαιτούμενη γεωμετρική διάταξη ώστε να επιτρέπει με ασφάλεια δυνατότητα ελιγμών και κυκλοφορίας του εξοπλισμού και των οχημάτων καθώς και την εφαρμογή ταυτόχρονων κατασκευαστικών δραστηριοτήτων.

Η υποστήριξη και οι απαιτήσεις για ενίσχυση πρέπει να αντιστοιχούν στις επί τόπου γεωτεχνικές συνθήκες εξασφαλίζοντας τη διαρθρωτική επάρκεια της ενδιάμεσης σήραγγας. Στην διασταύρωση της ενδιάμεσης σήραγγας με τον βόρειο αριστερό κλάδο, είναι αναγκαίο να σχηματιστεί μια μεταβατική περιοχή ούτως ώστε να γίνει η μετάβαση από την στενή διατομή της ενδιάμεσης σήραγγας στη μεγεθυμένη γεωμετρία της κύριας σήραγγας.

Αυτή η τεχνική λύση προβλέπει την κατασκευή ενός δωματίου συνεχώς και σταδιακά αυξανόμενης γεωμετρίας, και σε ύψος και σε πλάτος, ενώ οι διαστάσεις παραμένουν στο ελάχιστο ώστε να μειωθούν οι εκσκαφές και να αποφευχθούν τα υπερμεγέθη ανοίγματα. Ο θάλαμος στον αριστερό κλάδο παρέχει τον απαραίτητο χώρο για την διαμόρφωση αμφίδρομων εκσκαπτικών φάσεων προς το βορά και το νότο κατά τη διάρκεια του κατασκευαστικού σταδίου, ενώ επιταχύνει την κατασκευή της σήραγγας T1 και διευκολύνει την ομαλή πρόοδο των υπόγειων έργων.

1. Υπόγεια κατασκευαστικά έργα στον βόρειο δεξιό κλάδο(NRB)

Το παρόν κεφάλαιο επικεντρώνεται στα υπόγεια κατασκευαστικά έργα που θα εφαρμοσθούν στον δεξιό κλάδο της σήραγγας T1 και μέχρι την περιοχή που αυτή διασταυρώνεται με την συνδετήρια σήραγγα (Cross Passage) που ενώνει τους δύο κλάδους. Η υπόγεια εκσκαφή του δεξιού κλάδου ακολουθεί την φάση σχηματισμού και διαμόρφωσης του δεξιού στομίου σύμφωνα με την εκπονηθείσα μελέτη (WMS). Η έναρξη της υπόγειας εκσκαφής και των έργων υποστήριξης στον βόρειο δεξιό κλάδο θα αρχίσει μετά την ολοκλήρωση των

αναγκαίων έργων σταθεροποίησης πρανών και μέτρων προστασίας κατολισθήσεων στις περιοχές του νότιου δεξιού στομίου, νότιου αριστερού στομίου και βόρειου δεξιού στομίου, ταυτόχρονα με την προσωρινή προστασία του βόρειου αριστερού στομίου. Η εκκίνηση των εργασιών θα γίνει μετά την πιστοποίηση των συνθηκών ασφαλείας σε όλα τα στόμια.

- Η υπόγεια εκσκαφή στον βόρειο δεξιό κλάδο του τούνελ T1 θα αρχίσει με κατεύθυνση προς τα βόρεια, εφαρμόζοντας την ακόλουθη αλληλουχία:
- Ξεκίνημα της εκσκαφής στον βόρειο δεξιό κλάδο από την χιλιομετρική θέση 1.746,70 (CH 1+746,70 , portal cut).
- Εκτέλεση υπόγειας εκσκαφής και προκαταρκτικών έργων υποστήριξης από την χιλιομετρική θέση CH.1+746,70 ως την χιλιομετρική θέση CH.1+726,70 , εφαρμόζοντας την κατηγορία υποστήριξης SC-TU-5.
- Κατασκευή του υπόγειου τμήματος του βόρειου δεξιού κλάδου από την χιλιομετρική θέση CH.1+726,70 με κατεύθυνση προς τον Βορρά χρησιμοποιώντας την ολομέτωπη εκσκαφή και σχεδιασμό υποστήριξης (E&S) για την σήραγγα T1.

Η εκσκαφή των πρώτων τμημάτων του βόρειου δεξιού κλάδου (NRB), δηλαδή από την χιλιομετρική θέση CH.1+746,70 έως χιλιομετρική θέση CH 1+726,70 θα προχωρήσει με βήμα εκσκαφής 1.0-1.5D (όπου D = διάμετρος σήραγγας) με βαριά μηχανικά μέσα ούτως ώστε να αποφευχθεί οποιαδήποτε όχληση στην περιβάλλουσα βραχομάζα του στομίου.

Η κατασκευή της σήραγγας από την χιλιομετρική θέση CH.1+726.70 προς τα βόρεια στόμια της T1 θα πραγματοποιηθεί σε μία φάση με την εκσκαφή της συνολικής διατομής της σήραγγας (μέχρι την χιλιομετρική θέση CH.1+161.00 δεδομένου ότι οι περιοχές με χαμηλά υπερκείμενα στα στόμια εισόδου δεν περιλαμβάνονται στο ολομέτωπο σχέδιο).

Σύμφωνα με την γεωτεχνική έρευνα, εντελώς έως ελαφρά κατακερματισμένοι Ιουρασικοί ασβεστόλιθοι αναμένεται να συναντηθούν κατά τη διάρκεια της υπόγειας εκσκαφής του βόρειου δεξιού κλάδου και περίπου έως την χιλιομετρική θέση CH.1+300,00 που αντιστοιχούν κυρίως σε

βραχομάζα τύπου LIM-3.

Ο προσδιορισμός της πλέον κατάλληλης ολομέτωπης εκσκαφής και της πρωτογενούς υποστήριξης που θα εφαρμοστεί κατά τη διάρκεια της εκσκαφής της παρούσας σήραγγας εξαρτάται από την εφαρμογή των κριτηρίων που σχετίζονται με τις επί τόπου επικρατούσες γεωτεχνικές συνθήκες, από τα αντίστοιχα ύψη υπερκειμένων και από τη λήψη αποφάσεων για την κατάλληλη εκσκαφή.

Αρχικά η κατηγορία υποστήριξης εφαρμόζεται σύμφωνα με την ακόλουθη διαδικασία:

- Γεωλογική χαρτογράφηση του στομίου της σήραγγας.
- Κατάταξη GSI για το στόμιο της σήραγγας.
- Υδρολογικές συνθήκες.
- Μετρήσεις αξιολόγησης του ήδη εκσκαμμένου τμήματος και των ήδη εγκατεστημένων μέτρων υποστήριξης.
- Αξιολόγηση των μικτών συνθηκών.

Οι κατηγορίες υποστήριξης καλύπτουν της επί τόπου συμπεριφοράς της βραχομάζας που αναμένεται να συναντηθεί στο κύριο σώμα της σήραγγας. Τα αντίστοιχα κριτήρια σε συνδυασμό με την λεπτομερή γεωλογική χαρτογράφηση στο εκσκαμμένο μέτωπο της σήραγγας πρέπει να χρησιμοποιηθούν από τα εξουσιοδοτημένα εμπλεκόμενα μέρη του έργου, έτσι ώστε να λαμβάνεται μια λογική και ασφαλής απόφαση για κάθε στάδιο της εκσκαφής. Η συμπεριφορά του υπόγειου ανοίγματος, οι αναμενόμενες συνθήκες σταθερότητας και η αντίδραση της ανυποστήρικτης σήραγγας καθορίζονται όχι μόνο από τις γεωλογικές, υδρογεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες της βραχομάζας σε κάθε στάδιο της εκσκαφής, αλλά και από τις συνθήκες της βραχομάζας μπροστά και πίσω από κάθε στάδιο της εκσκαφής.

2. Μέτρα υποστήριξης για την περιοχή διασταύρωσης της κύριας σήραγγας με την συνδετήρια σήραγγα.

Η μεθοδολογία κατασκευής που θα ακολουθηθεί στην τομή του βόρειου δεξιού κλάδου με την συνδετήρια σήραγγα παρουσιάζεται παρακάτω:

A) Η εκσκαφή και η υποστήριξη της συνδετήριας σήραγγας θα ξεκινήσει αφού προηγηθούν αυτές της κύριας σήραγγας από τον άξονα της τομής και για απόσταση τουλάχιστον $2D$ (όπου D = διάμετρος σήραγγας) προς τον Βορρά.

B) Στην περιοχή της διασταύρωσης του βόρειου δεξιού κλάδου με την συνδετήρια σήραγγα, τα μέτρα εκσκαφής και υποστήριξης θα είναι σύμφωνα με την κατηγορία C. Η κατηγορία C αντιστοιχεί σε βραχομάζα τύπου LIM-3, με συνέπεια να θεωρείται καλή για την ασφάλεια των δυσμενών επί τόπου γεωτεχνικών συνθηκών που συναντώνται στην περιοχή της τομής. Μια τέτοια υπόθεση ισχύει επίσης στην περίπτωση που ζώνες ρηγμάτων συναντώνται στην περιοχή του κόμβου, πράγμα που συνεπάγεται κατακερματισμένη βραχομάζα με χαμηλές μηχανικές ιδιότητες. Η κατηγορία C θεωρείται η πιο αντιπροσωπευτική για την κύρια σήραγγα στην τομή, καθώς αντιστοιχεί σε περιβάλλον υψηλών πιέσεων (μέγιστα υπερκείμενα $>100\text{m}$), που είναι στην πραγματικότητα η περίπτωση της περιοχής διασταύρωσης (περίπου 170m υπερκείμενα).

Γ) Στην διασταύρωση της κύριας σήραγγας με την συνδετήρια σήραγγα η αρχική σκυροδέτηση θα ενδυναμωθεί με αυξημένο πάχος σκυροδέματος και πρόσθετα μέτρα υποστήριξης και πιο συγκεκριμένα:

- Σκυρόδεμα πάχους 20cm .
- Αγκύρια βράχου Swellex ή παρόμοιου τύπου, φέρουσας ικανότητας 160kN και μήκους 4m , σε κλιμακούμενο πλέγμα $1\text{m} \times 1\text{m}$ στον θόλο της διασταύρωσης.
- Πασσάλους $\varnothing 28$ B500c, μήκους 4m , σε αξονικές αποστάσεις 30cm στον θόλο της διασταύρωσης.
- Αγκύρια βράχου Swellex ή παρόμοιου τύπου, φέρουσας ικανότητας 160kN και μήκους 6m , σε πλέγμα 1m (οριζόντια) \times 1m (κάθετα) στην περιοχή κατεδάφισης.
- Δύο στρώσεις ατσάλινων πλεγμάτων Q283.

Δ) Τα πιο βαριά μέτρα υποστήριξης εφαρμόζονται στην συνδετήρια σήραγγα. Η ολομέτωπη κατηγορία υποστήριξης CPV-II θα εφαρμοστεί κατά μήκος του

άξονα της τομής από την διασταύρωση του βόρειου δεξιού κλάδου μέχρι την περιοχή που διασταυρώνεται ο θάλαμος με τον βόρειο αριστερό κλάδο της κύριας σήραγγας. Αυτή η θεώρηση οφείλεται στο γεγονός ότι στην περιοχή διασταύρωσης αναπτύσσονται γενικά υψηλές επί τόπου πιέσεις, κάτι που θεωρείται κρίσιμο για την αντοχή της βραχομάζας και την κινητοποίηση της κύρτωσης του πετρώματος. Έτσι, τα μέτρα υποστήριξης τουλάχιστον για τα πρώτα τμήματα της συνδετήριας σήραγγας (τουλάχιστον για 2D) πρέπει σε κάθε περίπτωση να ισχυροποιηθούν. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η οριζόντια απόσταση των δύο κλάδων της σήραγγας T1 είναι περίπου 40m και ότι οι περιοχές της συνδετήριας σήραγγας που πρέπει να ενδυναμωθεί με πιο «βαριά» μέτρα υποστήριξης (κατηγορία CPV-II) είναι περίπου 30m, είναι προφανές ότι το υπόλοιπο τμήμα της συνδετήριας σήραγγας που πρέπει να εκσκαφθεί και αρχικώς να ενδυναμωθεί είναι της τάξης των λίγων μέτρων, οπότε είναι πολύ περιορισμένο έτσι ώστε να αλλάξει η κατηγορία υποστήριξης σε μία πιο «ελαφριά» (λ.χ. CPV-I). Για αυτόν τον λόγο, η συνδετήρια σήραγγα θα εκσκαφθεί και θα υποστηριχθεί εξ' ολοκλήρου σύμφωνα με την κατηγορία υποστήριξης CPV-II.

3. Ο θάλαμος στον βόρειο αριστερό κλάδο(NLB)

Ο θάλαμος είναι μια προσωρινή κατασκευή για την σύνδεση του δεξιού κλάδου με τον γειτονικό αριστερό της σήραγγας T1 μέσω μιας συνδετήριας σήραγγας. Το μεγεθυμένο πλάτος του θαλάμου διευκολύνει την ομαλή πρόοδο των υπόγειων έργων και επιταχύνει την κατασκευή της σήραγγας T1, παρέχοντας αρκετό χώρο για την διαμόρφωση ενός μετώπου εκσκαφής διπλής κατεύθυνσης στον αριστερό κλάδο ταυτόχρονα προς τον Βορρά και προς το Νότο κατά τη διάρκεια του σταδίου της εκσκαφής. Ο θάλαμος κατασκευάζεται μέσω της εκσκαφής μιας συνεχούς και σταδιακά αυξανόμενης γεωμετρίας, και σε ύψος και σε πλάτος, η οποία γίνεται με σκοπό να παρέχει τον απαιτούμενο και αναγκαίο χώρο για ασφαλή κυκλοφορία του εξοπλισμού, ούτως ώστε να καταστεί δυνατή η εφαρμογή της ταυτόχρονης κατασκευής έργων.

Ο θάλαμος πρέπει να εκσκαφθεί σε περιοχή με μέγιστα υπερκείμενα 170 μέτρα.

3.1 Γεωτεχνικές παραδοχές στον θάλαμο ενδιάμεσης προσβολής

Υπάρχει ισχυρή ένδειξη ότι στην συγκεκριμένη περιοχή βρίσκεται συμπαγής ασβεστόλιθος με τιμές GSI που κυμαίνονται από 60 έως 30. Έτσι, προκειμένου να σχεδιάσουμε σύμφωνα με τις πιο δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες που αναμένονται, γίνεται η υπόθεση ότι ασβεστόλιθος τύπου LIM-3 υπάρχει και στο trumpet και στον θάλαμο (junction cavern), όπως και στα πρώτα 2D μέτρα της οροφής του βόρειου αριστερού κλάδου (NLB) και προς τις δύο κατευθύνσεις.

Στον παρακάτω Πίνακα παρουσιάζονται τα γεωμηχανικά χαρακτηριστικά του LIM-3 ασβεστόλιθου:

Geomechanical properties of the LIM-3 rockmass type

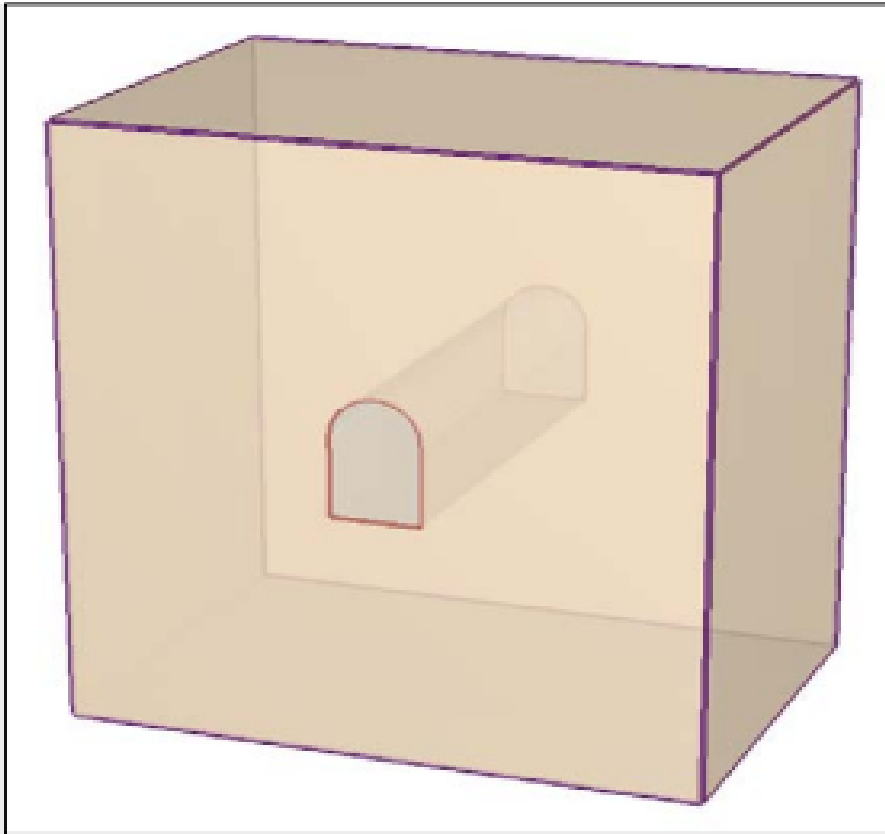
LIM-3 Rockmass Type	
Description	Fractured limestone, slightly to moderately weathered
RQD (%)	25-75
INTACT ROCK PROPERTIES	
σ_{int} (MPa)	35-55
m_{int}	10
E_{int} (Gpa)	22.7
ROCKMASS PROPERTIES	
GSI	35-60
RMR	54
σ_{rm} (MPa)	5.5
c (MPa)	1.6
φ°	30
E_{rm} (GPa)	4.5

ΚΕΦΑΛΑΙΟ IV

Το Πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε

Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι το RS3 της Rockscience, με το οποίο είναι δυνατή η τριδιάστατη ανάλυση υπογείου έργου.

1. Βασικές λειτουργίες του RS3

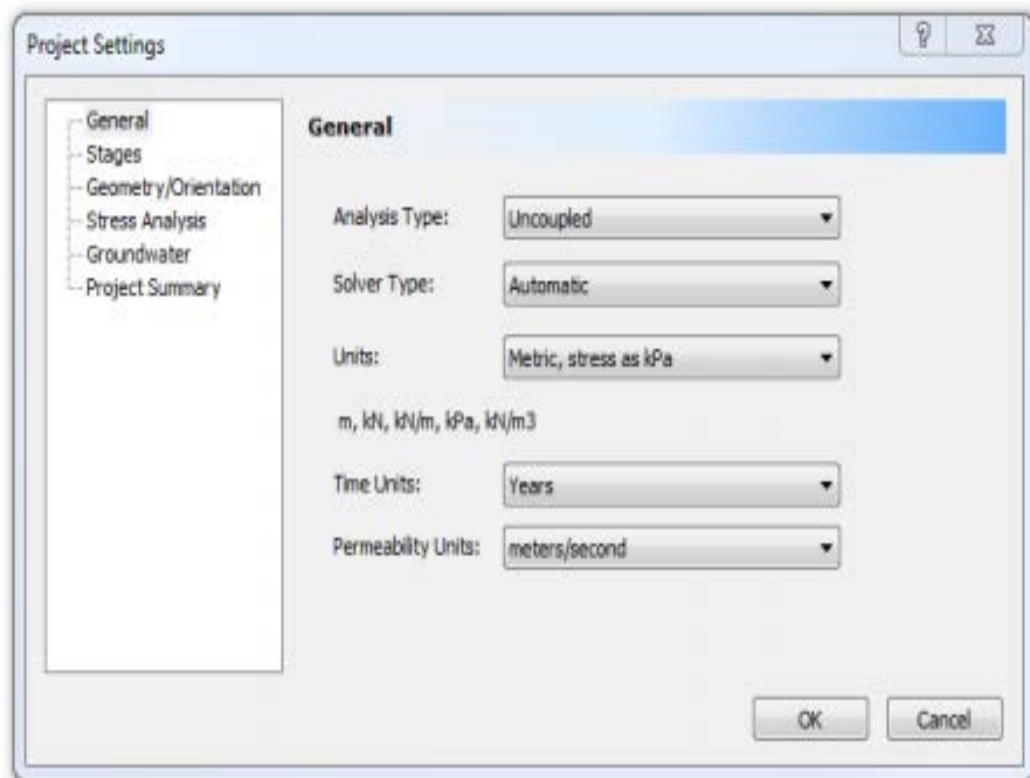


- Project Settings

Το παράθυρο Project Settings χρησιμοποιείται για να διαμορφώσει τις κύριες παραμέτρους για το μοντέλο μας.



Select: Analysis → Project Settings



Μια σημαντική λειτουργία του RS3 είναι ότι μπορεί να κάνει μια συνδυαστική ανάλυση (coupled analysis). Αυτό σημαίνει ότι το υπόγειο νερό (groundwater) και τα στερεά (solids) αλληλεπιδρούν μεταξύ τους.

Προτείνεται η επιλογή “solver type” να αφηθεί σε “Automatic” ούτως ώστε να εξασφαλίσουμε τα πιο ακριβή αποτελέσματα.

Με την καρτέλα “stages” ορίζουμε σε πόσα στάδια θα γίνει η ανάλυση.

Επιλέγουμε την καρτέλα “Geometry/Orientation”. Παρατηρούμε ότι δίνονται δύο τρόποι εκσκαφής. Η επιλογή “Tunnel mode” όπου ο άξονας z (z direction) είναι κάθετος με την διεύθυνση της βαρύτητας και η επιλογή “Foundation mode” όπου ο άξονας z (z direction) είναι παράλληλος με την διεύθυνση της βαρύτητας.

- Boundaries (όρια εκσκαφής)



Σιγουρευόμαστε ότι η καρτέλα “Geometry” έχει επιλεγεί από την γραμμή εργασιών στην κορυφή της οθόνης.

Κάτω από την καρτέλα “Geometry” θα εισάγουμε τα όρια εκσκαφής για το μοντέλο.

Select: Boundaries → Add Excavation

Στην γραμμή εντολών, στην κάτω δεξιά γωνία της οθόνης εισάγουμε ανάλογες με τις παρακάτω εντολές.

```
Enter vertex[t=table,i=circle,esc=cancel]: -5 10
Enter vertex[...]: -5 0
Enter vertex[...]: 5 0
Enter vertex[...]: 5 10
Enter vertex[...]: a
    You will automatically see the Arc Options dialog
    Select the "3 Points on Arc" option
    Set the "Number of Segments" = 20
    Select OK
Enter second arc point[u=undo,esc=cancel]: 0 15
Enter third arc point[u=undo,esc=cancel]: c
```

Μετά την εισαγωγή κάθε ζεύγους συντεταγμένων πατάμε "enter".

Πατώντας "c" το τόξο κλείνει στο πρώτο σημείο της εκσκαφής.



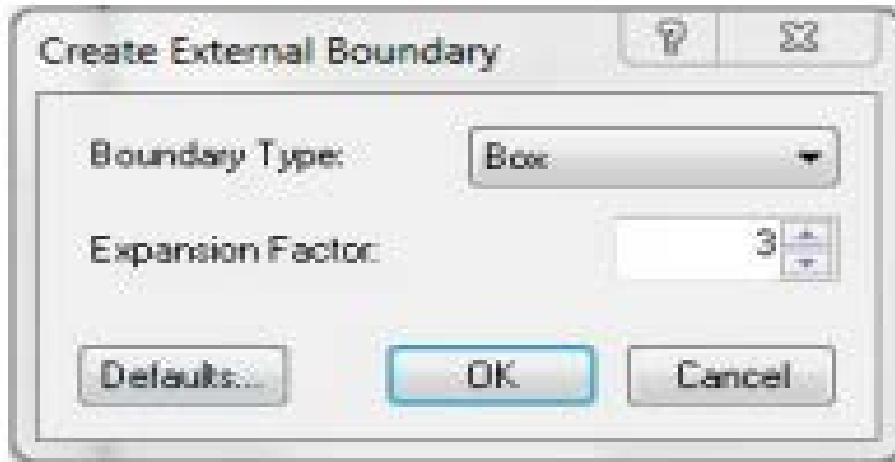
Select **Zoom All** (or press **F2**) to zoom the boundary to the center of the view.

Έπειτα εισάγουμε το εξωτερικό όριο εκσκαφής. Στο RS3 το εξωτερικό όριο εκσκαφής ρυθμίζεται είτε αυτόματα, είτε χειροκίνητα (user defined).



Select: **Boundaries** → **Add External**

Θα εμφανισθεί το παράθυρο “create external boundary”.



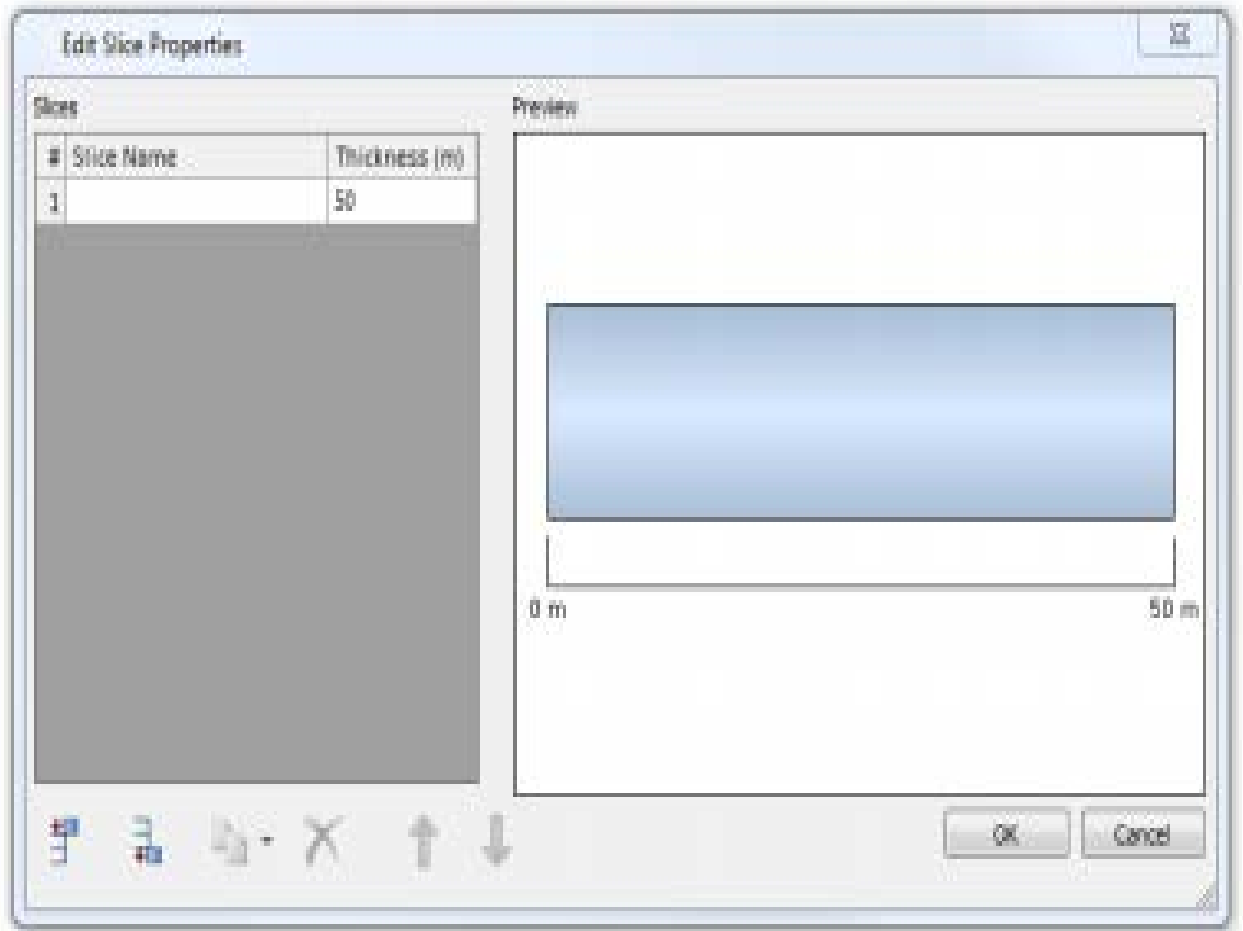
Το RS3 έχει σχεδιαστεί με τον επεξεργαστή στην αριστερή μεριά της οθόνης και την τρισδιάστατη απεικόνιση στα δεξιά. Είναι δυνατό να περιστρέψουμε την τρισδιάστατη απεικόνιση με τη χρήση του “ποντικιού” κλικάροντας και σύροντας όπως επιθυμούμε.

Το παράθυρο επεξεργασίας επιτρέπει στον χρήστη να σχεδιάσει σε δισδιάστατη χ-ψ επιφάνεια, η οποία επεκτείνεται στις θετικές τιμές του άξονα z.

Το τριδιάστατο μοντέλο μπορεί να αποτελείται από έναν αριθμό χ-ψ “φετών” (slices).

Select Slices → Edit Slices

Το παράθυρο “Edit Slice Properties” μας επιτρέπει να αλλάξουμε τον αριθμό των “φετών” (slices) και το πάχος τους.

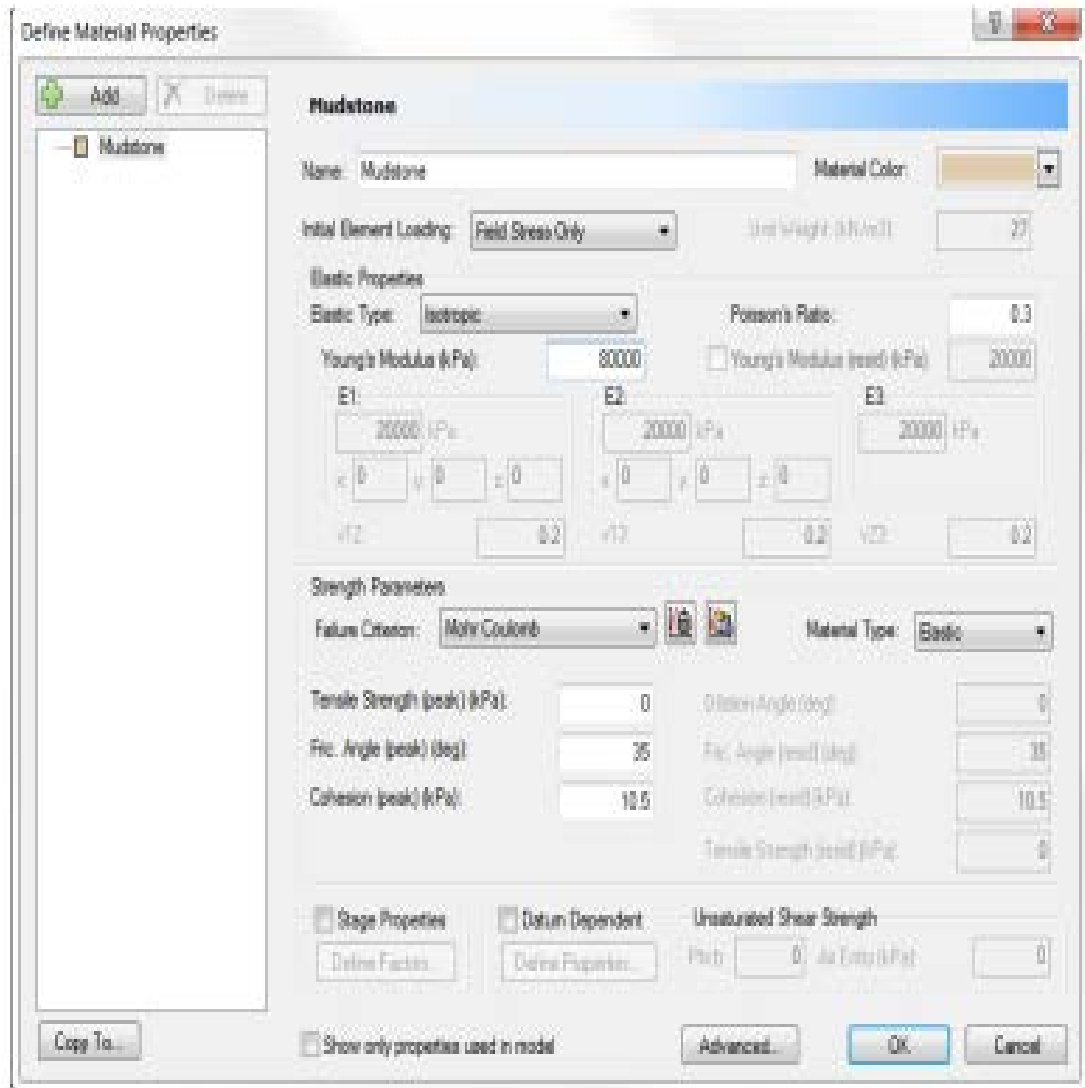


Materials & Staging

Έπειτα προχωρούμε στην καρτέλα “Materials/Staging” ούτως ώστε να προσδιορίσουμε τα υλικά και τα χαρακτηριστικά του μοντέλου μας. Η συγκεκριμένη καρτέλα μας επιτρέπει επίσης να επεξεργαστούμε οποιαδήποτε εκκαμμένη περιοχή στο μοντέλο μας.



Select: Properties → Define Materials



Μπορούμε να προσθέσουμε υλικά πατώντας το κουμπί "Add+". Εφόσον προσθέσουμε επιπλέον υλικά θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε την επιλογή "Assign" ούτως ώστε να προσαρμόσουμε τα πρόσθετα υλικά στο μοντέλο μας.

- Excavate

Μέσα στην καρτέλα Materials/Staging, συνεχίζουμε με την εκσκαφή εντός των ορίων της εκσκαφής.



Select: Properties → Assign Properties



1. Επιλέγουμε το κουμπί “Excavate” στο κάτω μέρος του παραθύρου “Assign Properties”.

2. Ένα μικρό εικονίδιο (+) θα εμφανιστεί στην άκρη του κέρσορα. Εκσκάπτουμε οπουδήποτε εντός των ορίων της εκσκαφής τοποθετώντας το εικονίδιο (+) στην περιοχή του διδιάστατου (2D) επεξεργαστή και κάνοντας αριστερό “κλικ”.

3. Η περιοχή εντός των ορίων της εκσκαφής θα εξαφανιστεί, δείχνοντας ότι η συγκεκριμένη περιοχή έχει πλέον εκσκαφεί. Παρατηρούμε ότι η αντίστοιχη περιοχή έχει εξαφανιστεί και στον τριδιάστατη (3D) απεικόνιση.

4. Πατάμε το κουμπί “X” στο πάνω δεξιά μέρος για να βγούμε από το παραθύρο (dialog) Assign, ή πατάμε δύο φορές “Escape”.



- Field Stress

Αυτή η καρτέλα μας επιτρέπει να επεξεργαστούμε τις παραμέτρους για τις τάσεις (loading) και τα όρια εκσκαφής.



Select: Loading → Field Stress

Το παράθυρο “Field Stress Properties” επιτρέπει στον χρήστη να προσδιορίσει το είδος των τάσεων που ενεργούν πάνω στο μοντέλο μας: constant field stress ή gravity stress.

Ο προσανατολισμός των τάσεων μπορεί επίσης να αλλάξει όπως επιθυμούμε.

Field Stress Properties

Field Stress Type: Constant

Sigma 1: 20 kPa Sigma 2: 10 kPa

Sigma 3: 10 kPa

Orientation

Defined By: Vector Trend/Plunge

Sigma 1: x: 0 y: -1 z: 0

Sigma 3: x: 1 y: 0 z: 0

Advanced >>

1. Επιλέγουμε το είδος τάσης
2. Ορίζουμε τις τιμές των “Sigma 1” , “Sigma 2” και “Sigma 3” (εφόσον επιλέξουμε constant field stress).
3. Επιλέγουμε τον τύπο του προσανατολισμού (orientation).
4. Πατάμε “OK”.

- Boundary Conditions

Ακόμα μέσα στην καρτέλα “Loading/Restraints” πρέπει να ορίσουμε τους περιορισμούς για το εξωτερικό όριο της εκσκαφής.

Το RS3 έχει κατασκευαστεί με την επιλογή “Auto Restrain” , το οποίο και συνήθως χρησιμοποιείται.



Select: Displacements → Auto Restrain (Underground)

- Meshing



Μετά προχωρούμε στην καρτέλα “Mesh”.

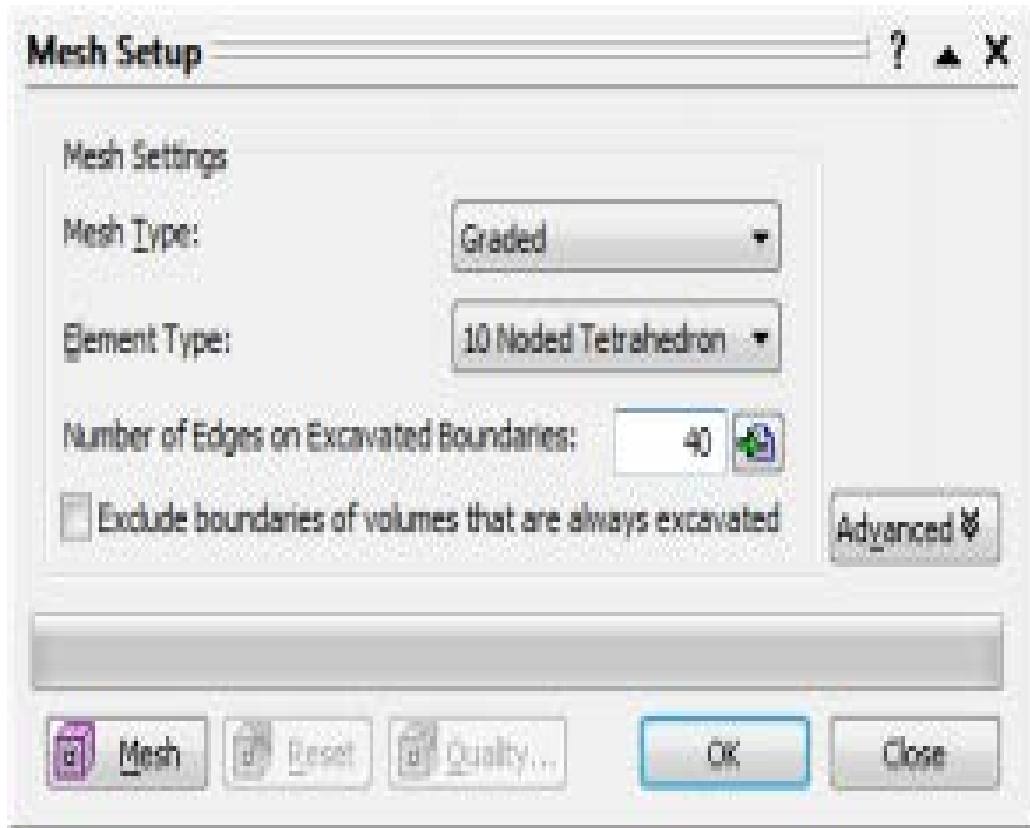
Εδώ θα προσδιορίσουμε τον τύπο πλέγματος και την πυκνότητα διακριτοποίησης του μοντέλου μας.



Select: Mesh → Mesh Setup

Το παράθυρο “Mesh Setup” εμφανίζεται. Αυτό το παράθυρο μας επιτρέπει να ρυθμίσουμε τις παραμέτρους του πλέγματος. Μπορούμε να καθορίσουμε τον τύπο πλέγματος (Mesh Type) και τον τύπο στοιχείου (Element Type), καθώς και τον αριθμό κόμβων σε όλες τις εκσκαφές (Number of Nodes on All

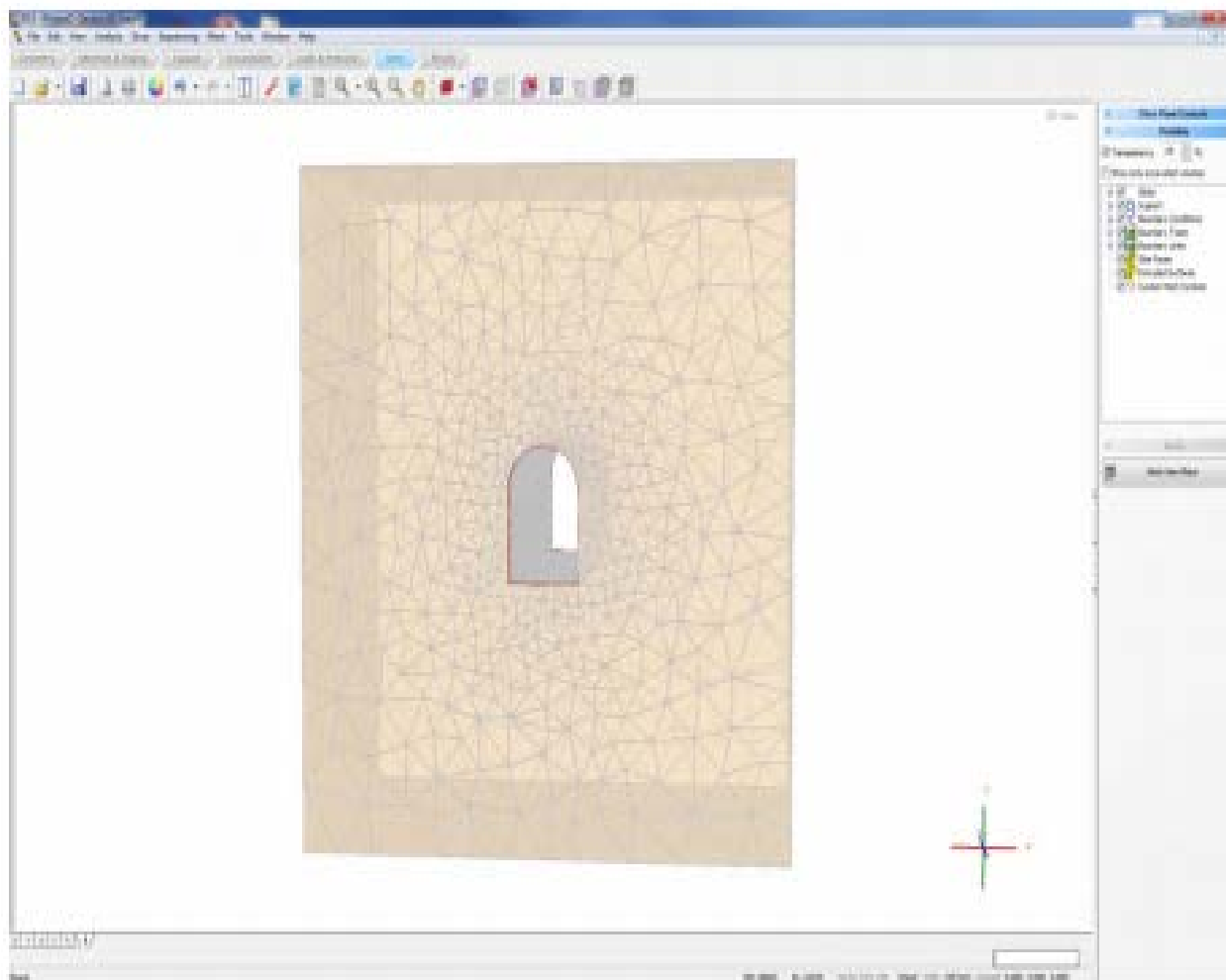
Excavations).



Όταν η μπάρα (status bar) γίνει πράσινη σημαίνει ότι το πλέγμα έχει ολοκληρωθεί. Θα χρειαστεί μόνο μερικά δευτερόλεπτα. Μετά το πέρας πατάμε “OK”.

Το πλέγμα είναι τώρα έτοιμο και η μπάρα (status bar) πρέπει να δείχνει τον συνολικό αριθμό των στοιχείων και των κόμβων στο πλέγμα.

Το μοντέλο μας πρέπει να είναι σαν αυτό παρακάτω τώρα:



- Results



Ακολουθως προχωρούμε στην καρτέλα “Results”. Σε αυτήν την καρτέλα μπορούμε να υπολογίσουμε και να αναλύσουμε τα αποτελέσματα του μοντέλου μας.



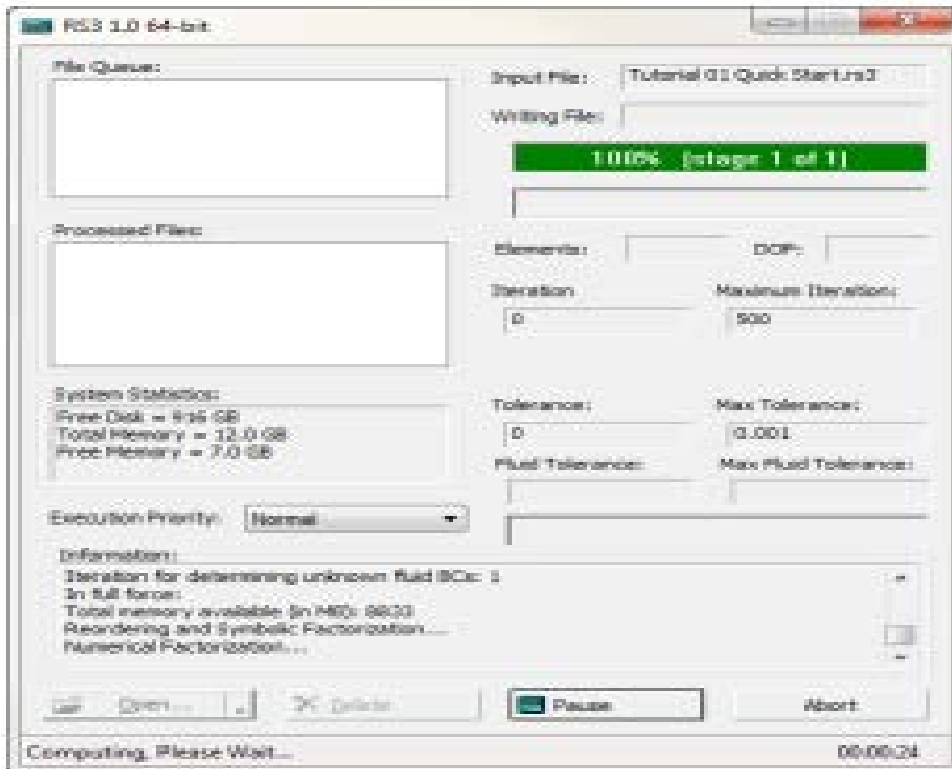
Select: File → Save

Χρησιμοποιούμε το παράθυρο “Save as” για να αποθηκεύσουμε το αρχείο μας. Μπορούμε τώρα να προχωρήσουμε στον υπολογισμό των αποτελεσμάτων.



Select: Analysis → Compute

Η υπολογιστική μηχανή του RS3 θα πραγματοποιήσει τον απαιτούμενο υπολογισμό πεπερασμένων στοιχείων. Αυτός ο υπολογισμός μπορεί να διαρκέσει έως και μερικά λεπτά. Όσο πιο σύνθετο είναι το μοντέλο μας, τόσο πιο πολύ αναμένεται να διαρκέσει ο υπολογισμός των αποτελεσμάτων.



Όταν ο υπολογισμός τελειώσει, η μηχανή υπολογισμού αυτόματα εξαφανίζεται και τα αποτελέσματα είναι αμέσως διαθέσιμα. Πρέπει να σημειωθεί ότι η επιλογή “Compute” είναι διαθέσιμη από όλες τις καρτέλες της γραμμής εργασιών.

Στην πάνω δεξιά γωνία της καρτέλας των αποτελεσμάτων (Results tab) μπορούμε να δούμε δύο μενού επιλογής (drop down menus).



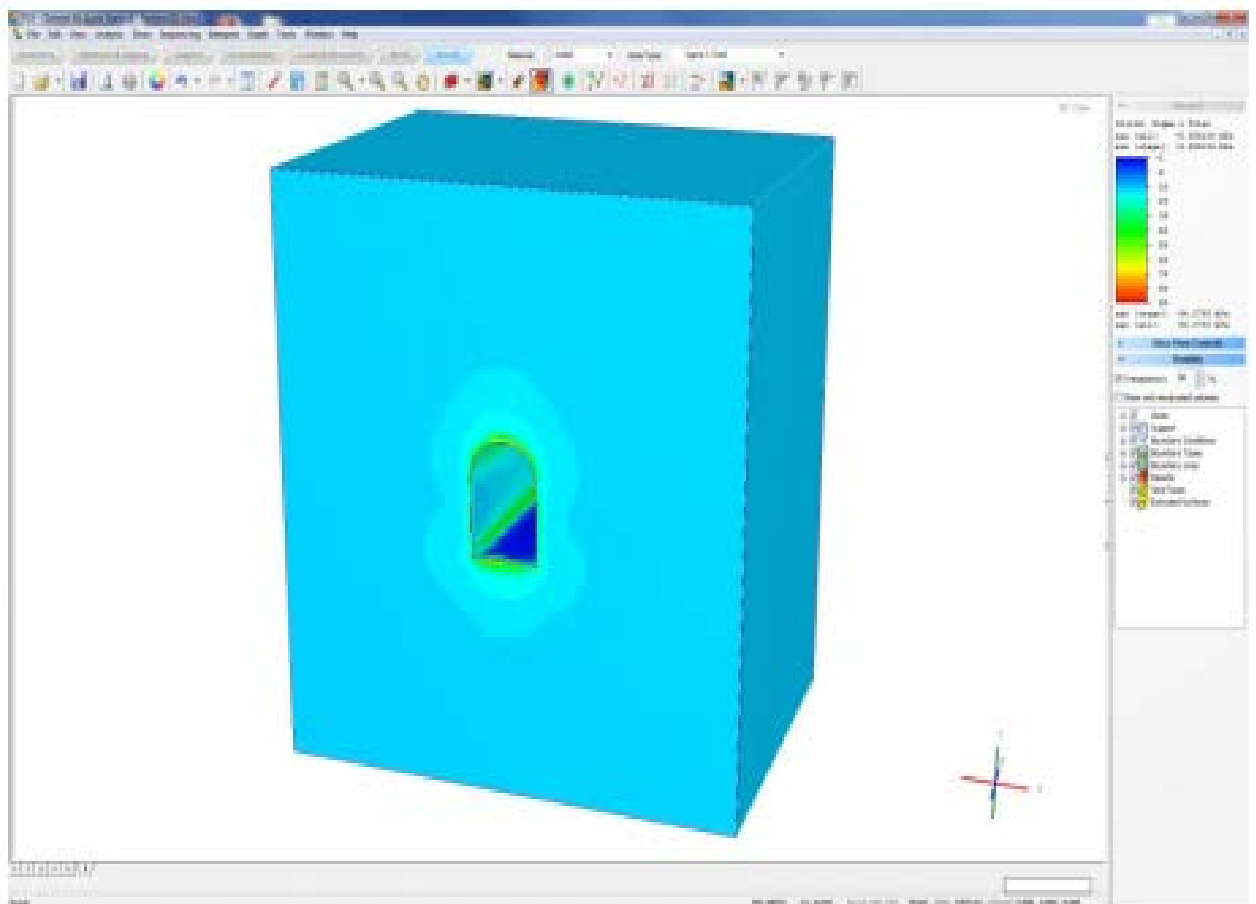
Το μενού “Material” μας επιτρέπει να δούμε τα αποτελέσματα για τα στερεά, το σκυρόδεμα, τα αγκύρια κλπ.

Θα αναλύσουμε μια σειρά από διαφορετικά “Data Type” αποτελέσματα. Αρχικά ενεργοποιούμε το εξωτερικό περίγραμμα (exterior contours) ούτως ώστε να δούμε μερικά αποτελέσματα.



Select: Interpret → Show Exterior Contour

Από το “Data Type” μενού στην πάνω δεξιά γωνία της καρτέλας “Results” του RS3 επιλέγουμε “Sigma 1 Total”. Χρησιμοποιούμε το “ποντίκι” για να περιστρέψουμε και να εξερευνήσουμε το εξωτερικό περίγραμμα (exterior contour).

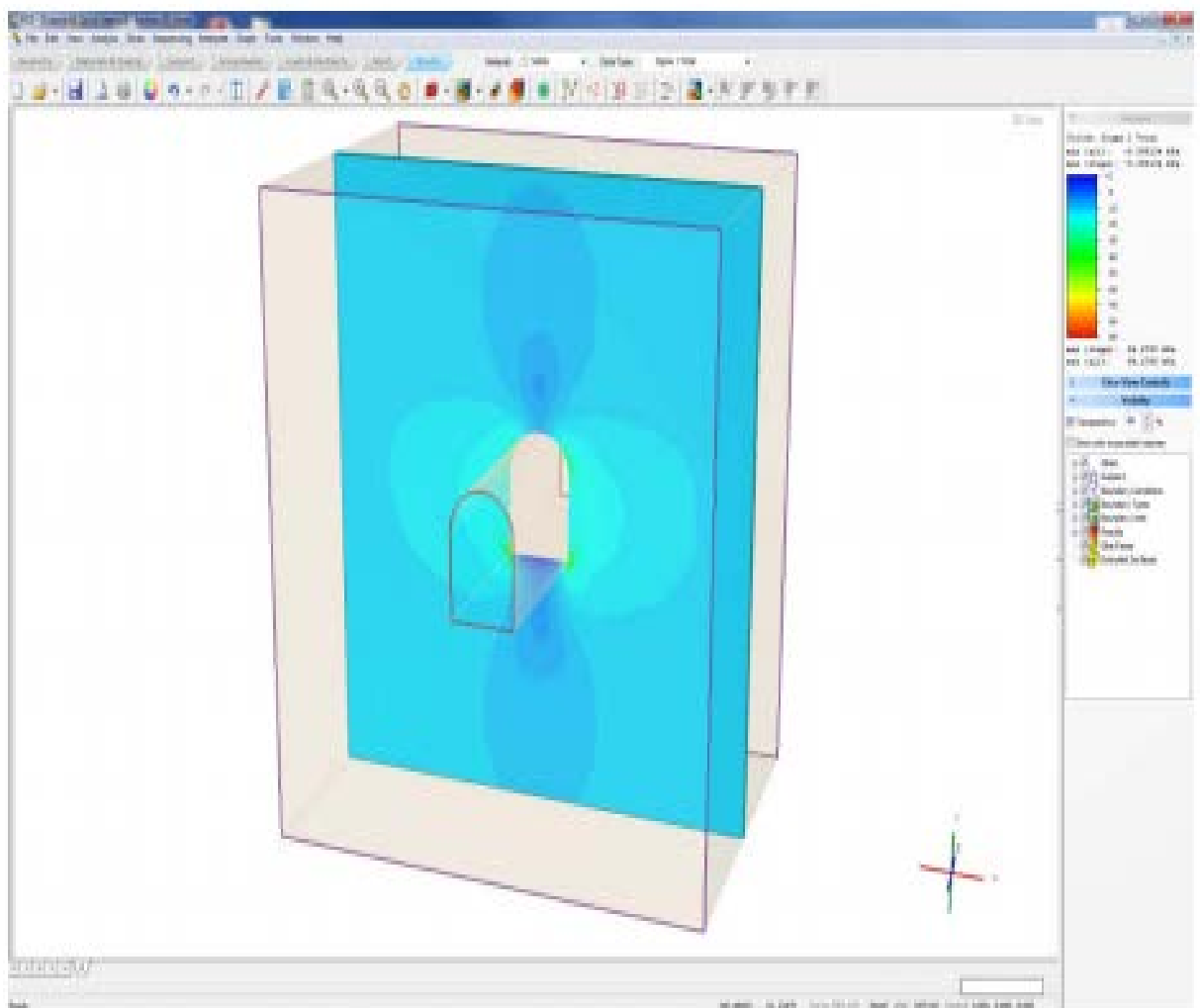


Παρατηρούμε το διάγραμμα στην δεξιά πλευρά της οθόνης αποτελεσμάτων που δείχνει συνοπτικά τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές των δεδομένων που εξετάζουμε στο παρόν στάδιο, αλλά και σε όλα τα στάδια του μοντέλου.

Απενεργοποιώντας την επιλογή του εξωτερικού περιγράμματος (exterior contour) μπορούμε να δούμε άλλους τύπους περιγράμματος.

Υπάρχει ένας αριθμός διαφορετικών τρόπων για να δούμε περιγράμματα (contours) στο RS3. Οι ακόλουθες επιλογές μας επιτρέπουν να εισάγουμε επιφάνειες περιγραμμάτων σε διαφορετικούς προσανατολισμούς.

Select: Interpret → Add Solid Contour → XY Plane



Μπορούμε να μετακινήσουμε εισαχθείσες επιφάνειες περιγραμμάτων σε γειτονική κατεύθυνση “κλικάροντας” και σύροντας γύρω από το όριο κάθε επιφάνειας.

Μια άλλη επιλογή είναι να επιλέξουμε να δούμε το περίγραμμα μόνο για το όριο εκσκαφής. Για να το επιλέξουμε αυτό ενεργοποιούμε το εσωτερικό περίγραμμα (inner contour).

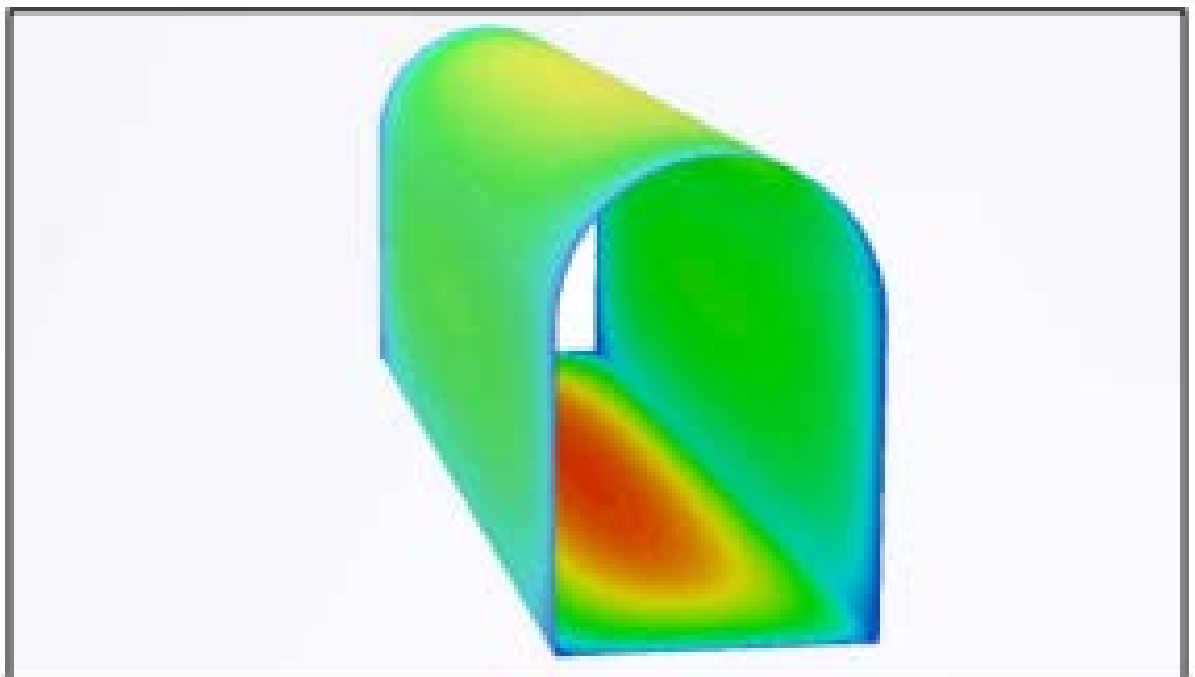


Select: Interpret → Show Excavation Contour

Μπορούμε να εξερευνήσουμε το περίγραμμα γύρω από την εκσκαφή περιστρέφοντας και μετατοπίζοντας το μοντέλο με το “ποντίκι” μας.

- Ολική Μετακίνηση (Total Displacement)

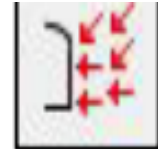
Από το “Data Type” μενού επιλέγουμε “Total Displacement”. Παρατηρούμε ότι το περίγραμμα και το διάγραμμα στα δεξιά της οθόνης αλλάζουν έτσι ώστε να παρέχουν αποτελέσματα για τον τύπο δεδομένων που έχουμε επιλέξ



- Deformation Vectors (διανύσματα παραμόρφωσης)

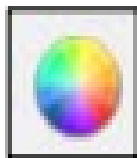
Ας απεικονίσουμε ορισμένα διανύσματα παραμόρφωσης για να καταλάβουμε τις κατευθύνσεις κατά τις οποίες η εκσκαφή θα παραμορφωθεί.

Select the following icon from the toolbar:



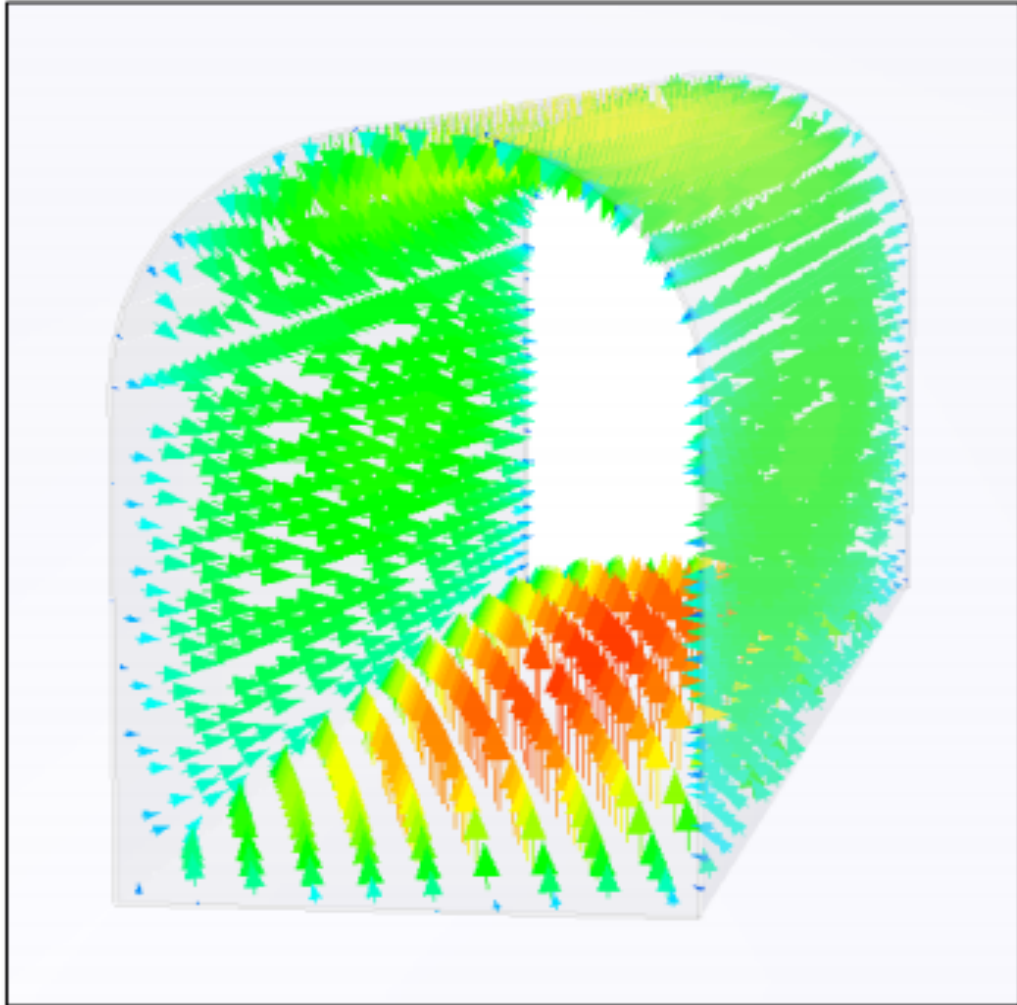
Θα παρατηρήσουμε ότι το περίγραμμα μετατρέπεται σε έναν μεγάλο αριθμό από διανύσματα. Κάθε διάνυσμα δείχνει την κατεύθυνση της παραμόρφωσης του στερεού, ενώ το χρώμα συνεχίζει να αντιστοιχεί στο διάγραμμα και την ποσότητα της μετακίνησης.

Μπορούμε να προσαρμόσουμε το μήκος και την απόσταση των διανυσμάτων από το μενού των επιλογών περιγράμματος (contour option menu).



Select: View → Display Options

1. Επιλέγουμε την καρτέλα “Mesh + Results”.
2. Ρυθμίζουμε το “Vector Spacing” και το “Max Vector Length”.



Απενεργοποιούμε τα διανύσματα παραμόρφωσης ξανα-επιλέγοντας το παραπάνω εικονίδιο.

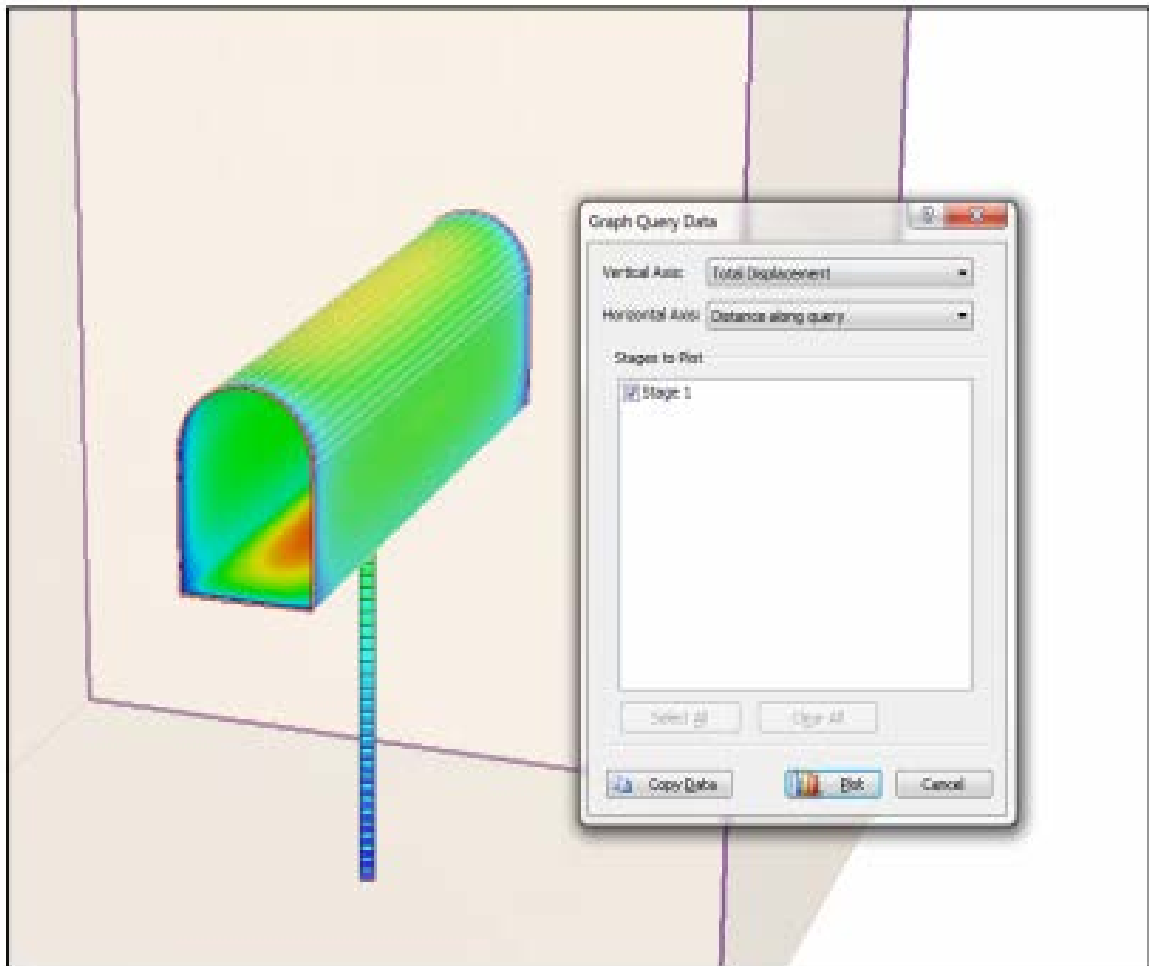
- Queries

Τώρα ας κάνουμε ένα γράφημα, ούτως ώστε να αναπαραστήσουμε αριθμητικά τις μετακινήσεις που παρατηρήθηκαν στις παραπάνω μετρήσεις περιγράμματος.

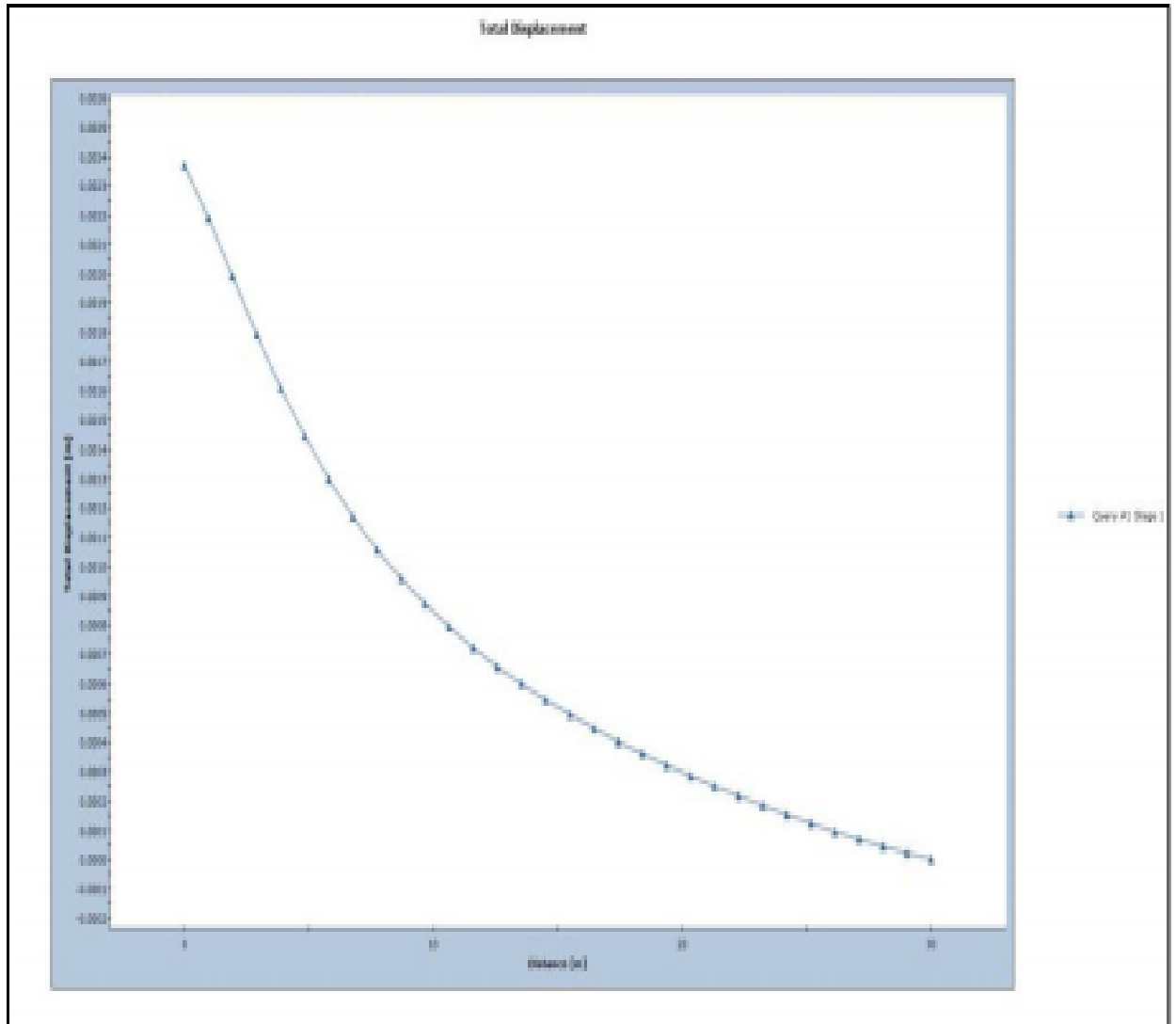


Select: Interpret → Add Line Query

Εισάγουμε τις ανάλογες εντολές στη γραμμή εντολών στο κάτω δεξιά μέρος της οθόνης και αυτό που προκύπτει έχει την ακόλουθη μορφή:



Κάνοντας δεξί κλικ στην γραμμή που εμφανίζεται (query line) και επιλέγοντας “Graph Data” εμφανίζεται το παράθυρο “Graph Query Data”. Επιλέγουμε “plot” και το γράφημα που θα εμφανιστεί στη νέα καρτέλα του RS3 θα έχει την ακόλουθη μορφή:



Η μεγαλύτερη μετακίνηση στο γράφημα αντιστοιχεί στην μέγιστη μετακίνηση στο διάγραμμα περιγράμματος (contour plot) προηγουμένως.

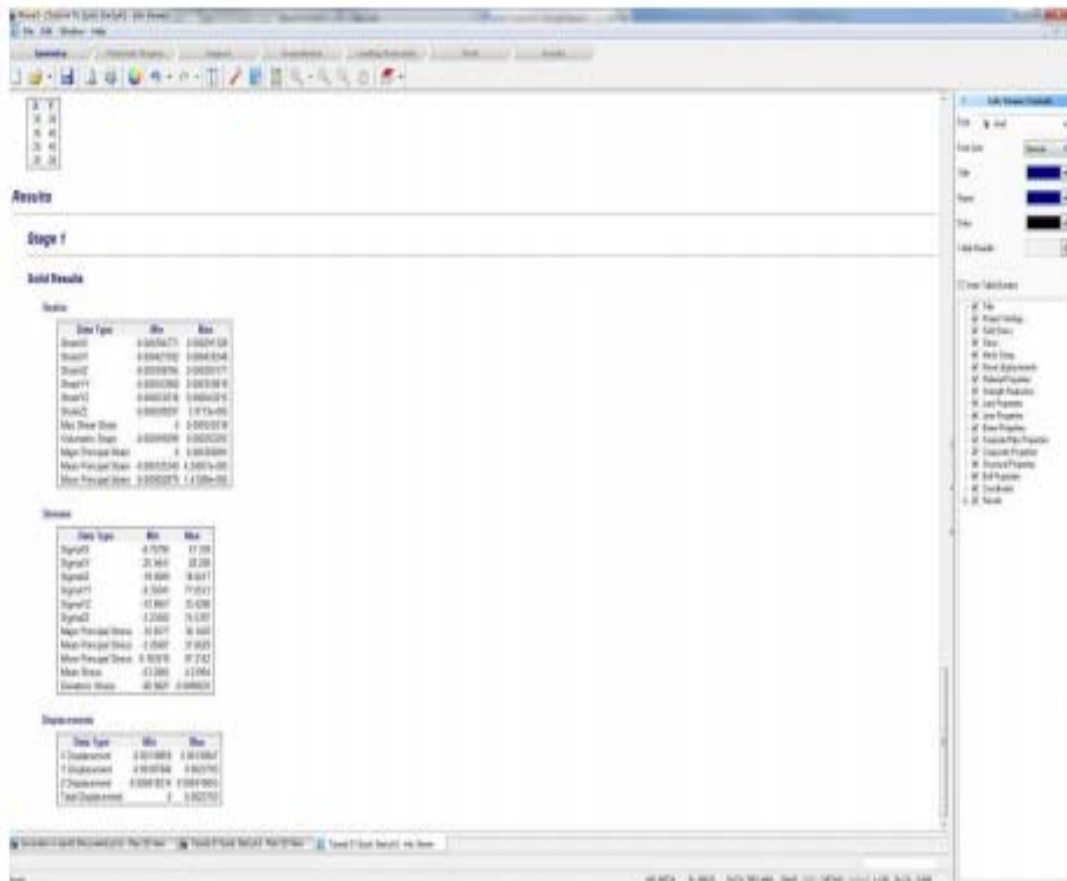
- Info Viewer

Η επιλογή “Info Viewer” στο μενού “Analysis” ή στην γραμμή εργαλείων αναπαριστά μια σύνοψη των παραμέτρων εισόδου και των αποτελεσμάτων της ανάλυσης.



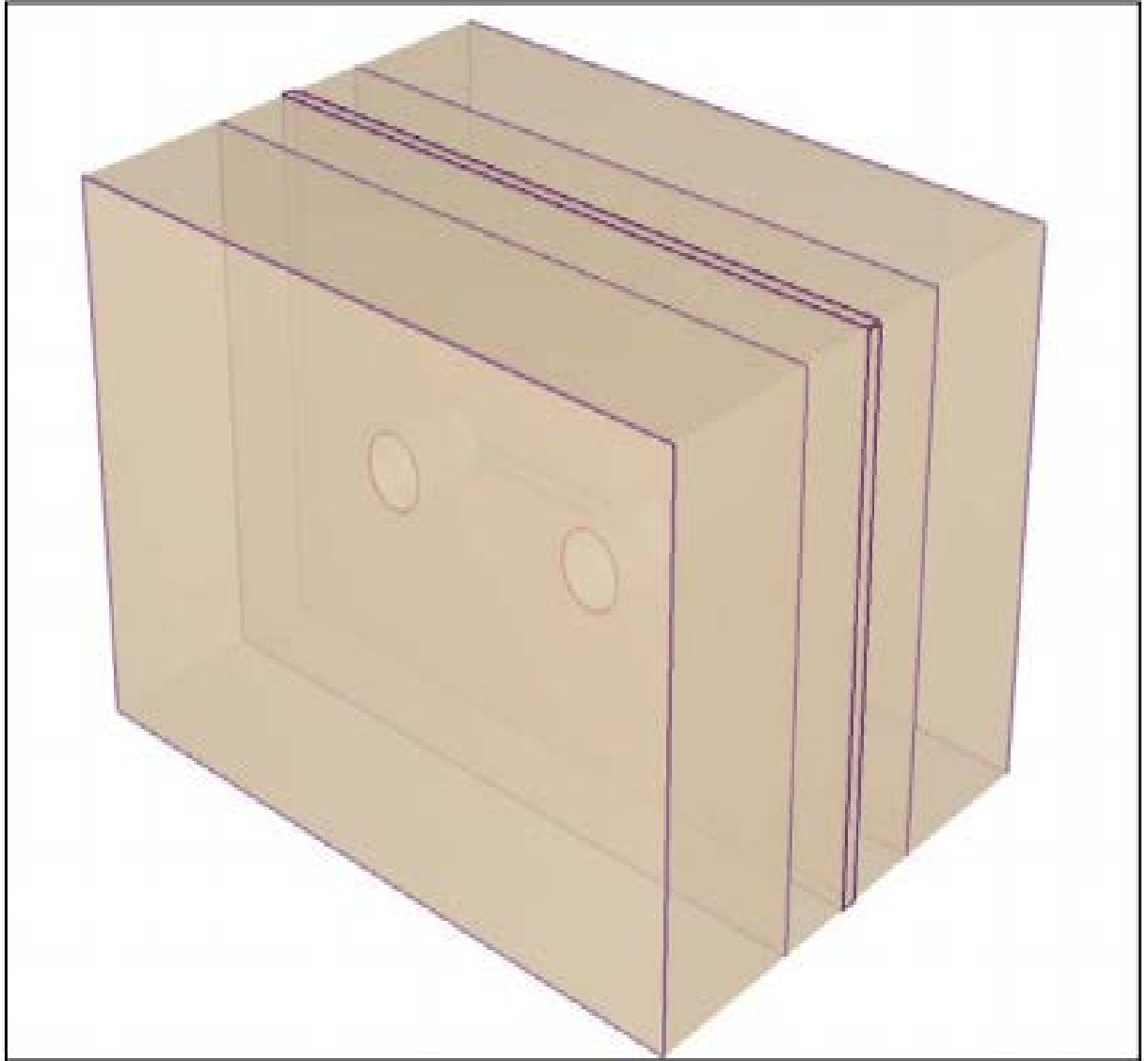
Select: Analysis → Info Viewer

Η ανάλυση αποτελεσμάτων του RS3 ανοίγει σε νέα καρτέλα.



Χρησιμοποιώντας τα κουτάκια επιλογής (checkboxes) στα δεξιά μπορούμε να επιλέξουμε τι πληροφορίες θα μας παρέχει ο δείκτης πληροφοριών (info viewer).

Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε κατά βάση η λειτουργία *Cross Tunnel Modeling*.

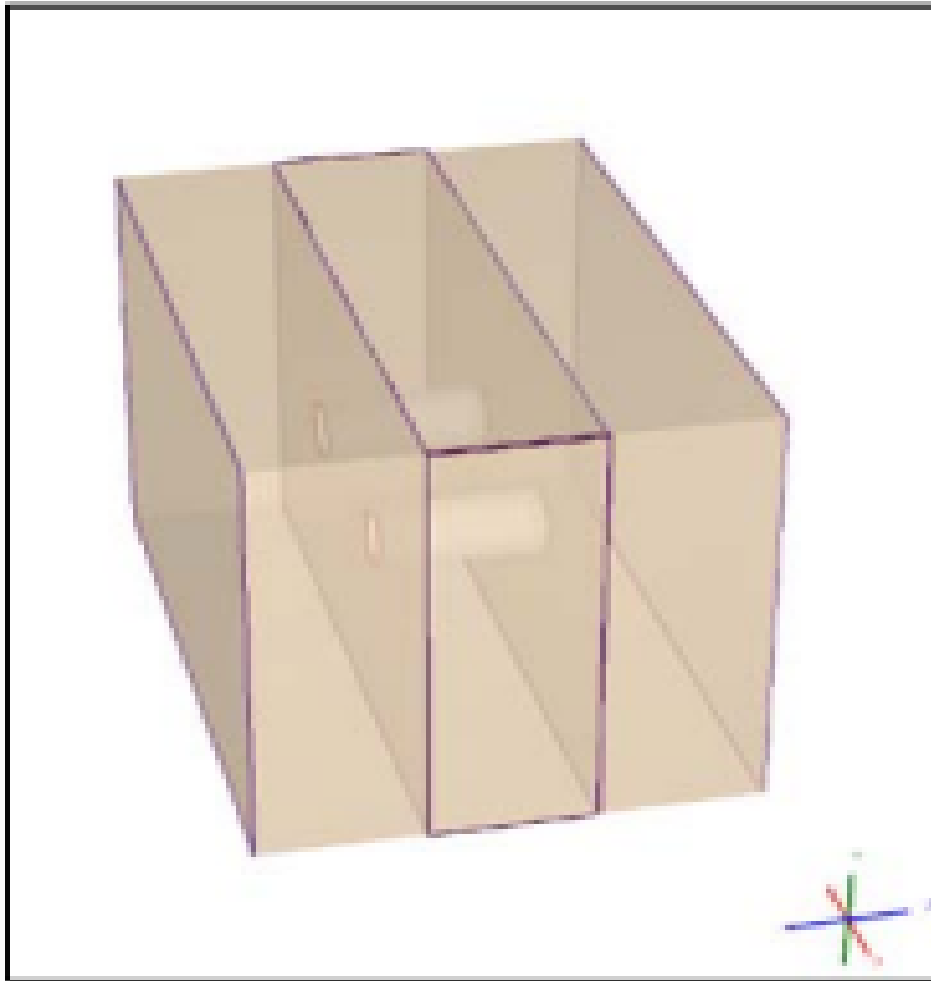


Geometry

- Boundaries

Το μοντέλο δημιουργείται σχεδιάζοντας την γεωμετρία και τα όρια υλικού (material boundaries).

Το πρόγραμμα διαθέτει ένα αρχείο δίδυμης σήραγγας.

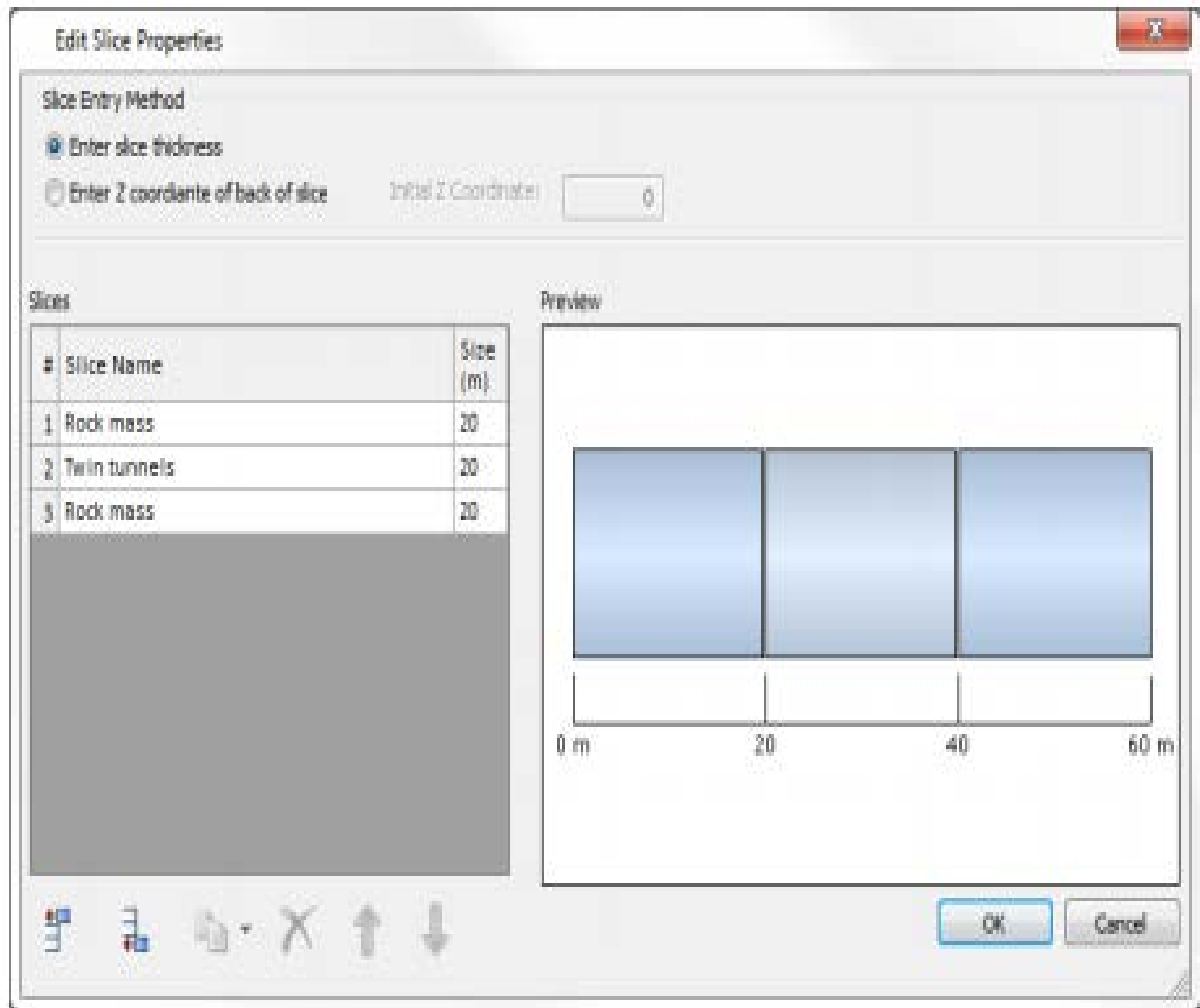


Η συνδετήρια σήραγγα μπορεί να δημιουργηθεί χρησιμοποιώντας “φέτες” (slices) και “όρια υλικού” (material boundaries).

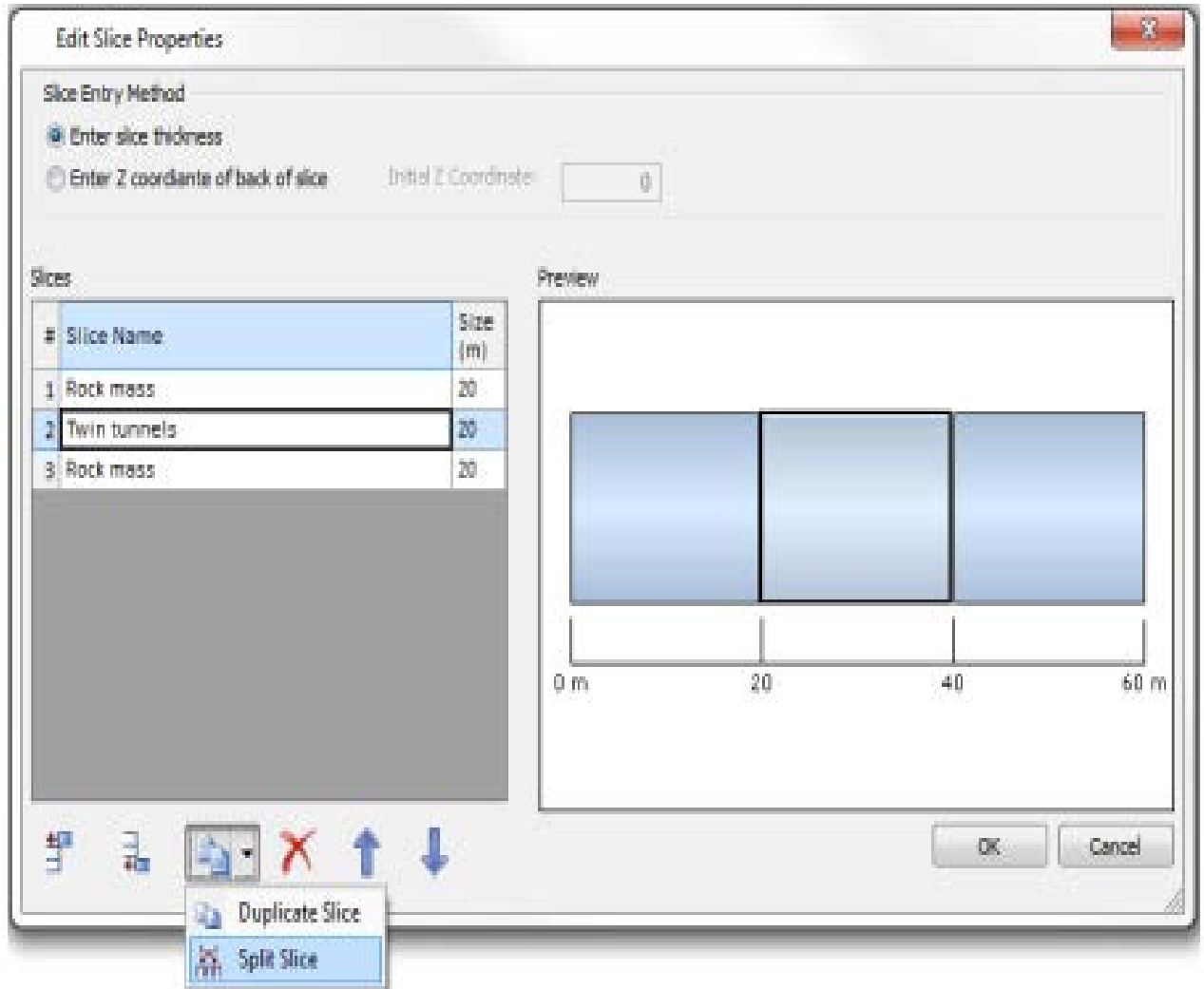
Η σήραγγα υποθέτουμε ότι έχει έναν ορθογώνιο τομέα διασταύρωσης (cross section) καθώς και σταθερό ύψος και πάχος. Η “φέτα” (slice) θα προσδιορίσει το πάχος της σήραγγας, ενώ τα όρια υλικού (material boundaries) θα προσδιορίσουν το ύψος και το μήκος. Ξεκινώντας, θα δημιουργήσουμε την “φέτα” (slice) προσδιορίζοντας το πάχος της ενδιάμεσης σήραγγας.

Select: Slice → Edit Slices

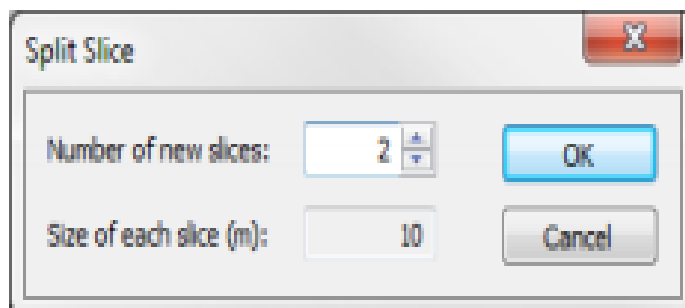
Το ακόλουθο παράθυρο θα πρέπει να εμφανιστεί:



Εάν θέλουμε να διαιρέσουμε ένα "slice", επιλέγουμε το "slice" που μας ενδιαφέρει και κάνουμε αριστερό κλικ στην επιλογή "split slice" στο κάτω μέρος του παραθύρου που έχουμε ανοίξει προηγουμένως.



Έπειτα επιλέγουμε σε πόσα “slice” θα διαιρέσουμε το επιλεγμένο “slice”, όπως βλέπουμε παρακάτω:

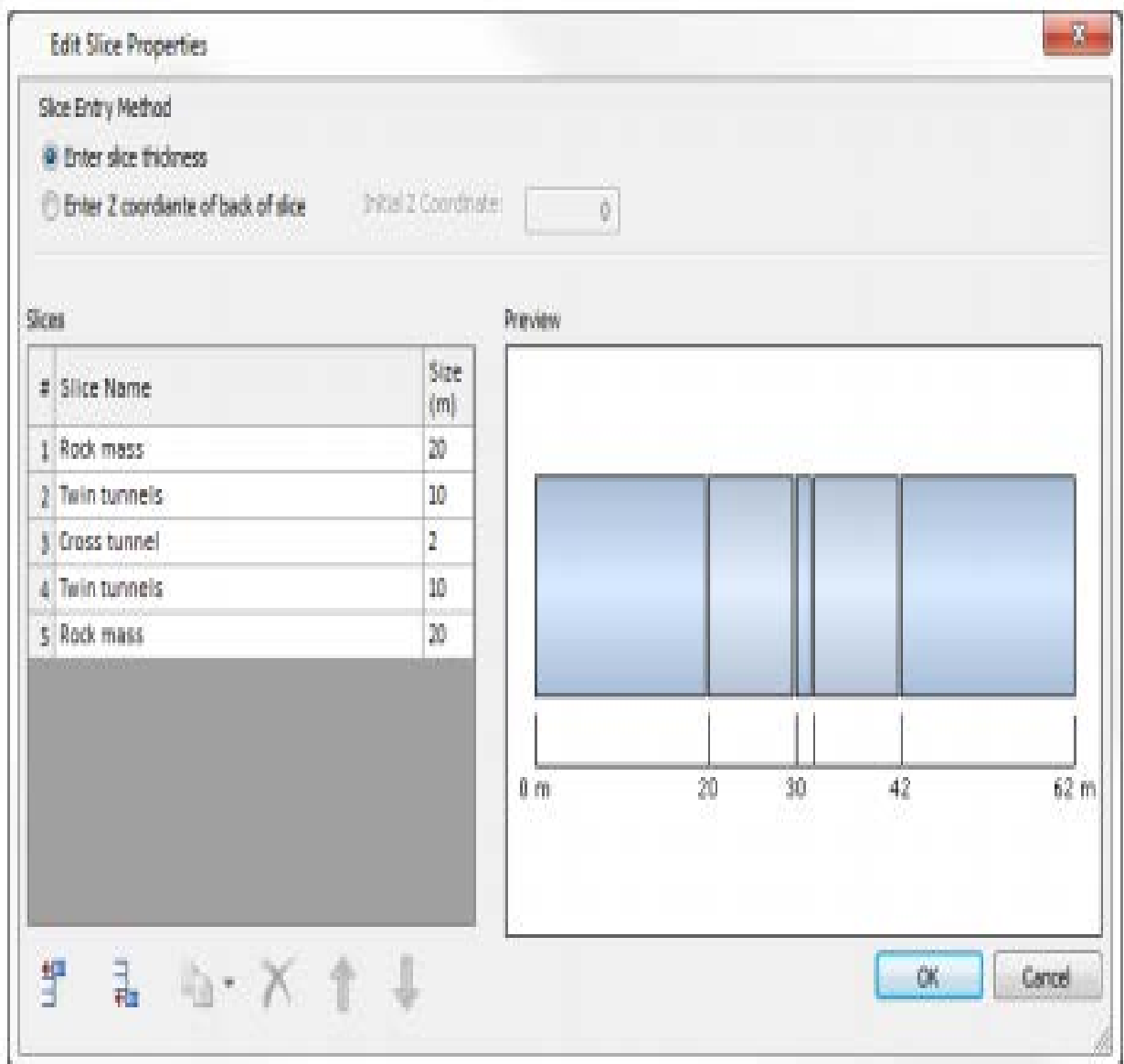


Από τις ρυθμίσεις του προγράμματος έχει προεπιληχθεί το κάθε “slice” να διαιρείται σε δύο (2). Χειροκίνητα αλλάζουμε αυτήν την προεπιλογή και διαιρούμε το κάθε “slice” σε όσα επιθυμούμε. Αυτόματα διαιρείται και το

πάχος του κάθε “slice” ανάλογα με την ποσότητα αυτών που δημιουργούνται.

Βέβαια, μπορούμε ακόμα και το πάχος του κάθε καινούργιου “slice” όπως προκύπτει από την διαίρεση που περιγράψαμε παραπάνω, να το αλλάξουμε και πάλι χειροκίνητα.

Για παράδειγμα:

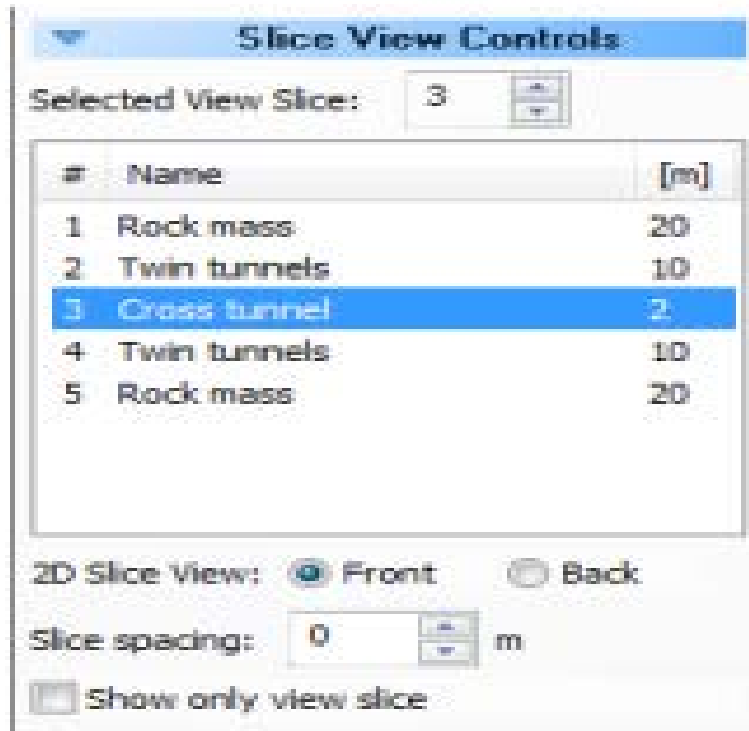


Έπειτα εισάγουμε την ενδιάμεση σήραγγα (cross tunnel) είτε σχεδιάζοντάς την χειροκίνητα, είτε εισάγοντας το “DXF file” που διαθέτει το πρόγραμμα. Στην παρούσα διπλωματική εργασία η ενδιάμεση σήραγγα εισήχθη

χειροκίνητα, με επιπλέον σχεδιασμό.

Ας δούμε πως εισάγουμε το αρχείο DXF που διαθέτει το RS3:

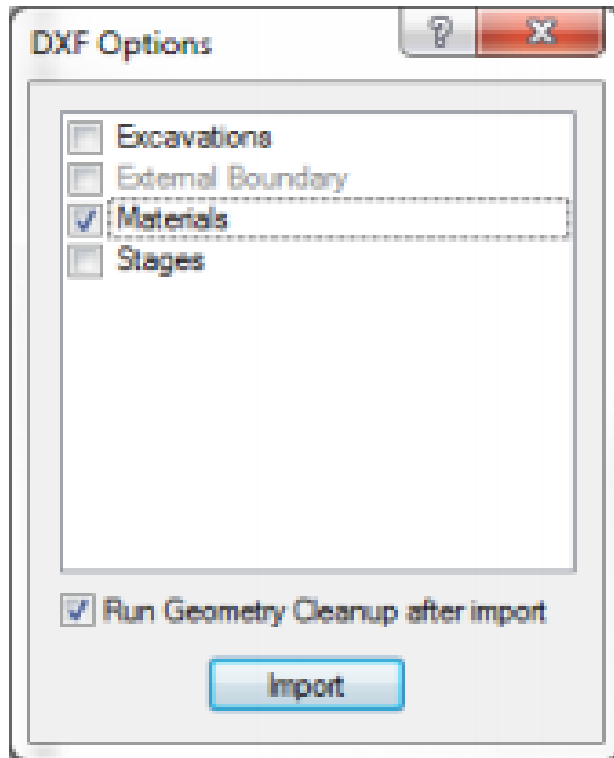
1. Επιλέγουμε το “slice” cross tunnel.



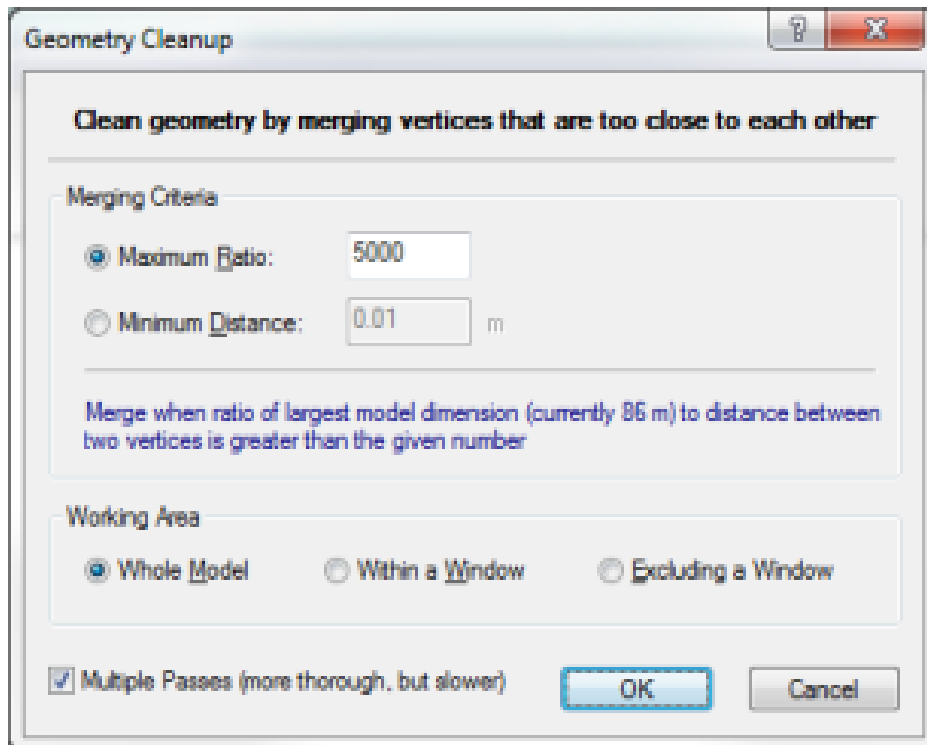
2. Εισάγουμε το αρχείο DXF.

Select: File → Import → Import DXF.

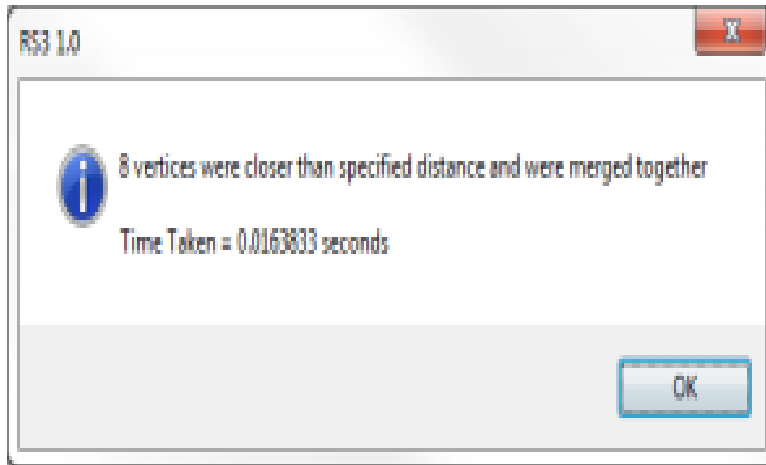
Αφού εισάγουμε το αρχείο σιγουρευόμαστε ότι το είδος των ορίων (type of boundary) που θα εισάγουμε (π.χ. Material Boundary) και το “Run Geometry Cleanup after import” είναι επιλεγμένα και έπειτα επιλέγουμε “Import”.



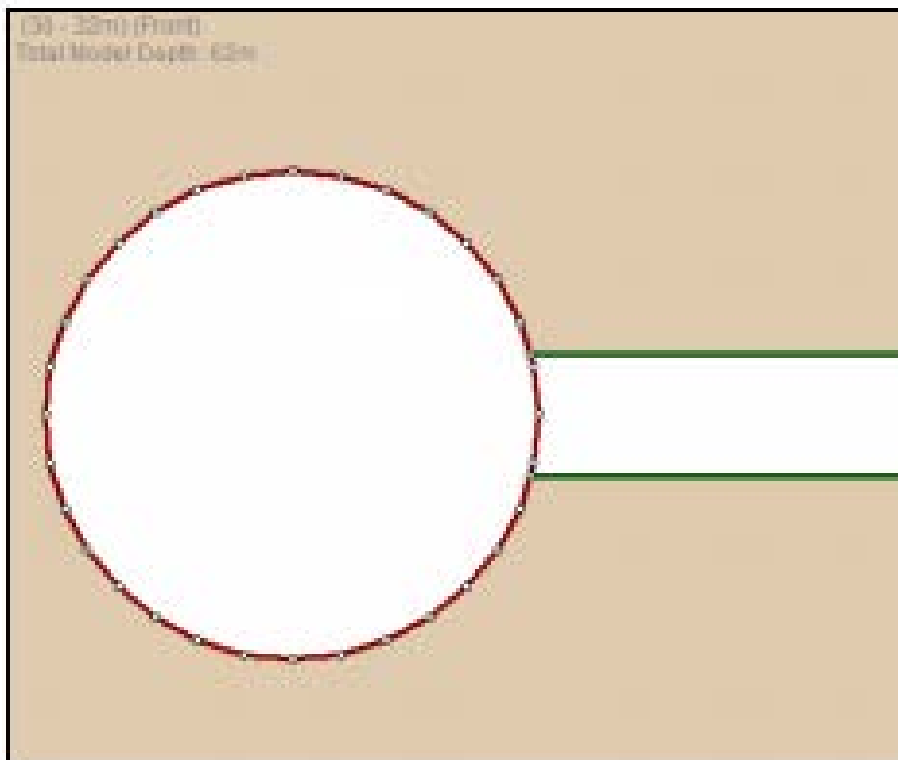
Επιλέγουμε το αρχείο “cross tunnel.dxf” και “Open” ώστε να εισάγουμε το αρχείο. Πρέπει να εμφανιστεί το ακόλουθο παράθυρο.



Θα χρησιμοποιήσουμε τις προεπιλεγμένες ρυθμίσεις. Επιλέγουμε “OK” για να προχωρήσουμε. Ένα παρόμοιο παράθυρο θα εμφανιστεί:



Επιλέγουμε “OK”. Παρατηρούμε ότι νέες “κορυφές” (vertices) έχουν δημιουργηθεί για να συνδεθεί η ενδιάμεση σήραγγα με την δίδυμη σήραγγα.

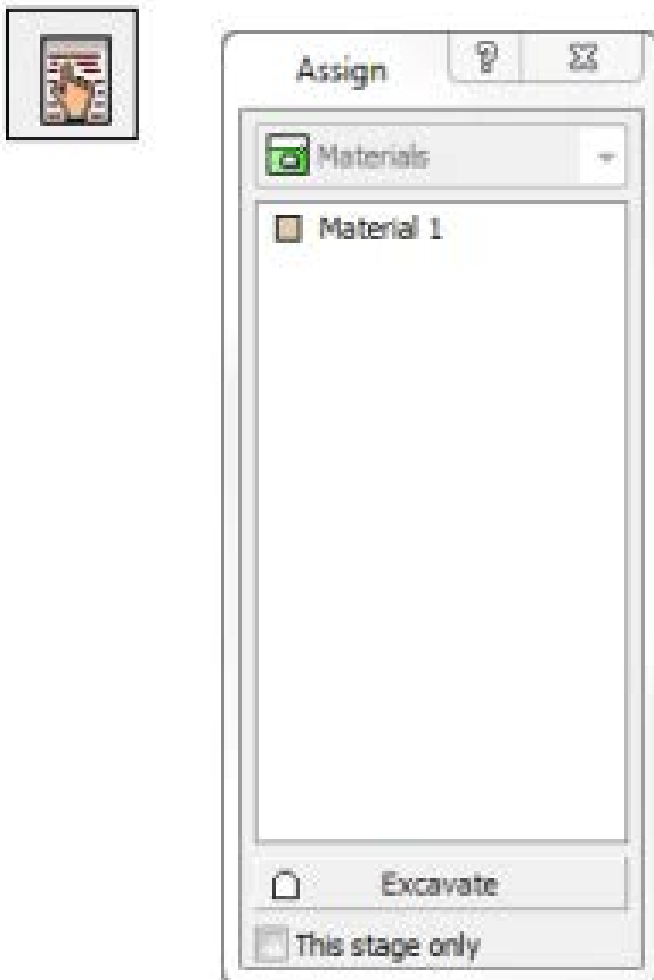


- Excavate

Μέσα στην καρτέλα Materials/Staging επιθυμούμε να εκσκάψουμε μέσα στα όρια υλικού (material boundary) της ενδιάμεσης σήραγγας (cross tunnel).

Select: Properties → Assign Properties

Εκσκάπτουμε μέσα στην περιοχή που μας ενδιαφέρει με τον τρόπο που αναφέραμε πιο πάνω προηγουμένως.



Loads & Restraints

- Field Stress

Πηγαίνουμε στην καρτέλα Loading/Restraints.



Select: Loading → Field Stress

Στην επιλογή “Field Stress” επιλέγουμε “Gravity” και χρησιμοποιούμε τις ρυθμίσεις προεπιλογής για όλα τα υπόλοιπα. Κλείνουμε το παράθυρο διαλόγου.

- Boundary Conditions (Οριακές Συνθήκες)

Ακόμη μέσα στην καρτέλα Loading/Restraints πρέπει να ρυθμίσουμε τους περιορισμούς στο εξωτερικό όριο (external boundary) του μοντέλου. Το RS3 έχει “κτιστεί” στην επιλογή “Auto Restrain” για “υπόγεια μοντέλα”.



Select: Restraints/Displacements → Auto Restrain (Surface)

Έπειτα όπως είδαμε και στις βασικές λειτουργίες του RS3 προχωράμε στην “δημιουργία πλέγματος” (mesh).

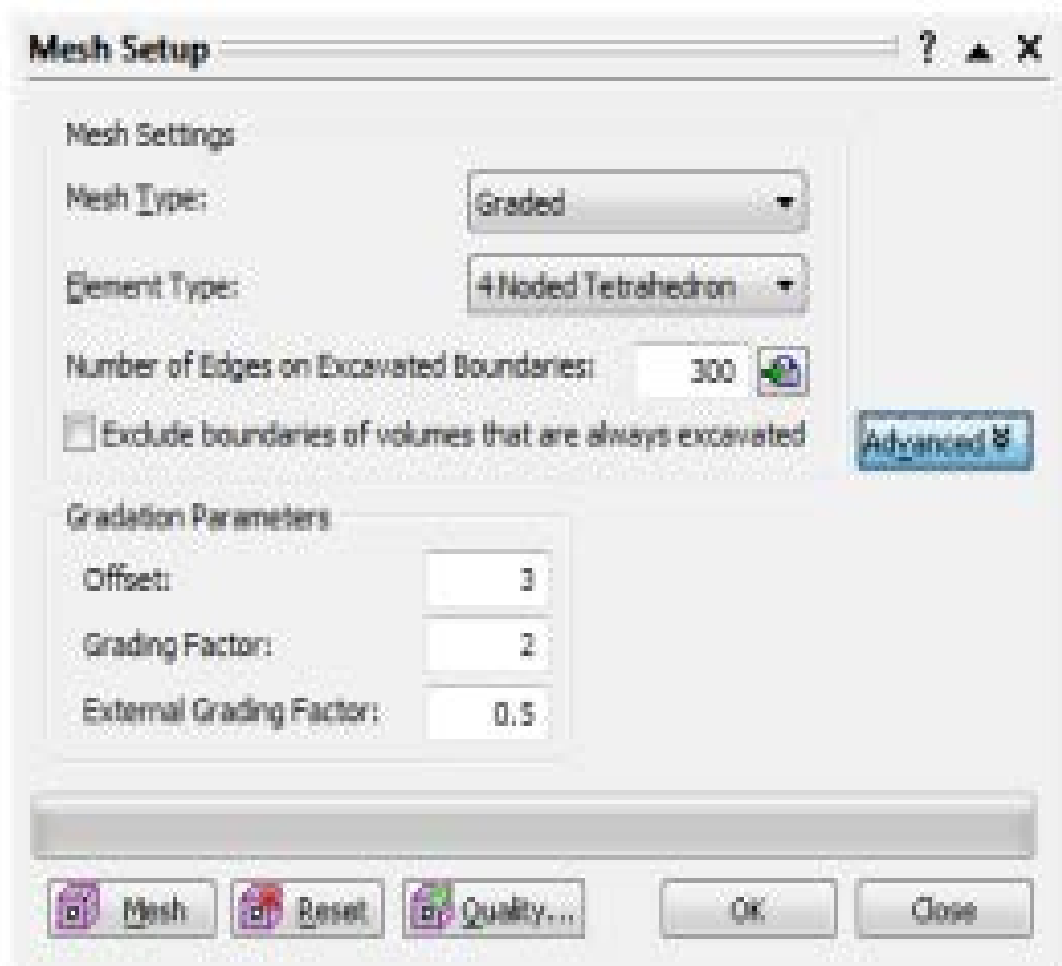
- Mesh



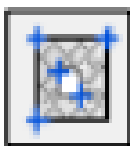
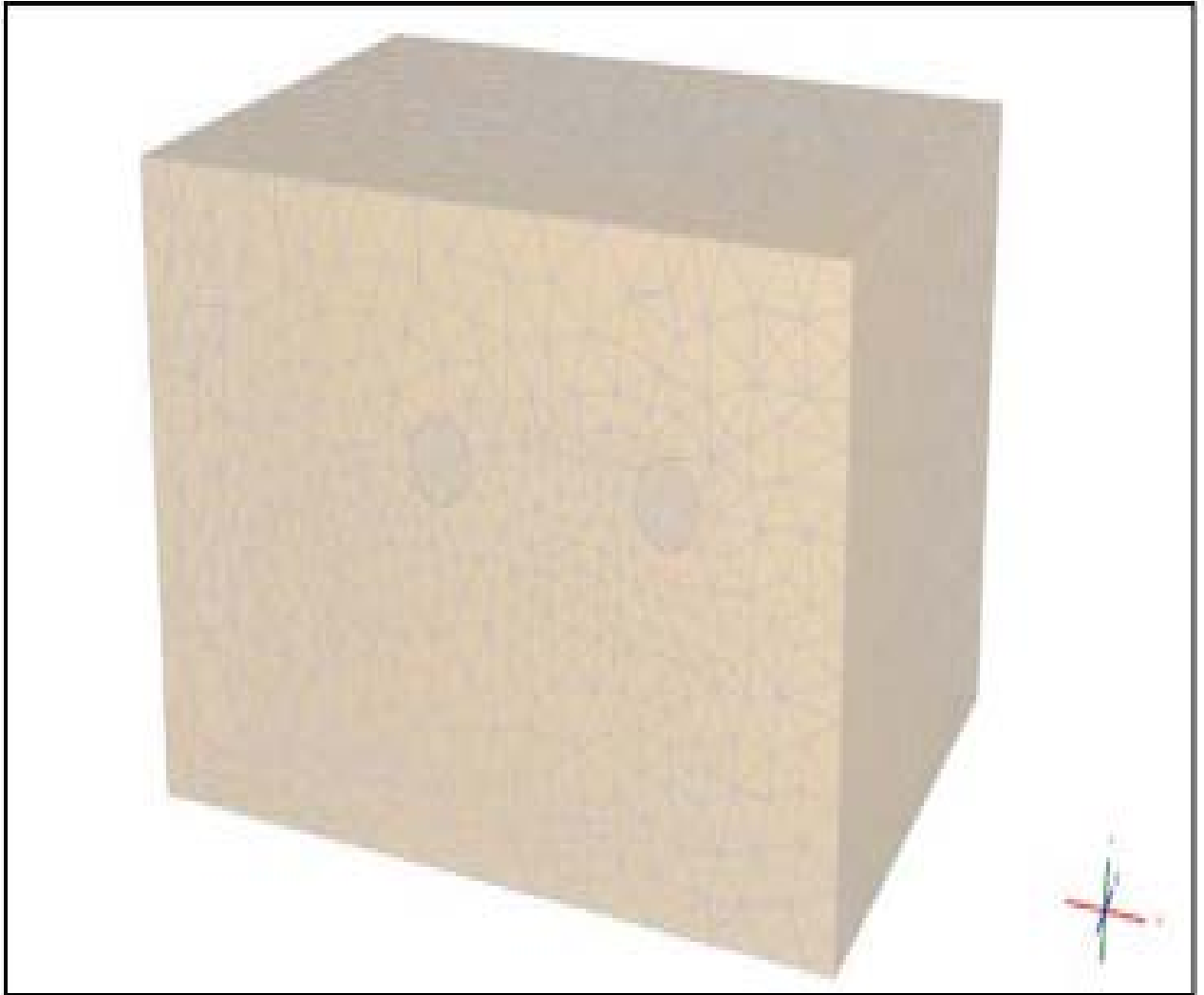
Select: Mesh → Mesh Setup

Στο παράθυρο “Mesh Setup” που εμφανίζεται ρυθμίζουμε τις επιλογές “Number of Edges on Excavation Boundaries”, “Offset”, “Grading Factor”, “External Grading Factor”.

Επιλέγουμε “Mesh” και όταν η μπάρα (status bar) γίνει πράσινη, πατάμε “OK”.



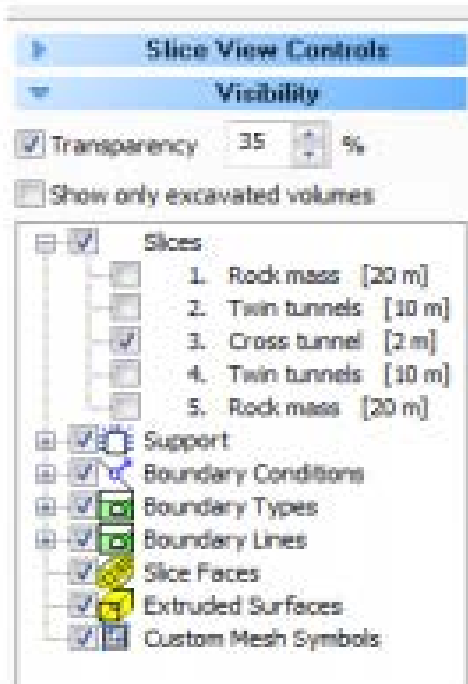
Το μοντέλο μας πρέπει να έχει την παρακάτω μορφή τώρα:



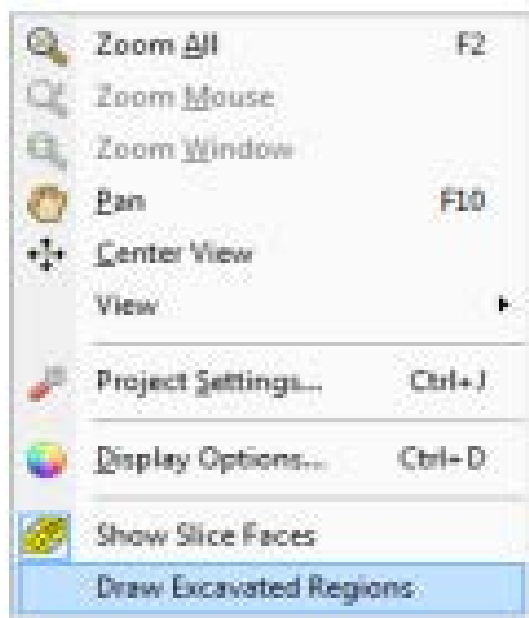
Custom Mesh Parameters:

Μπορούμε να προσαρμόσουμε τον αριθμό των στοιχείων (number of elements) σε συγκεκριμένο χώρο, επιφάνεια, ακμή ή σημείο χρησιμοποιώντας την επιλογή “Custom Mesh Parameters”.

Αρχικά θέλουμε να μπορούμε εύκολα να επιλέξουμε την ενδιάμεση σήραγγα. Προκειμένου αυτό να επιτευχθεί επιλέγουμε το “slice” Cross Tunnel στον τομέα “Slices” κάτω από τον επιλογέα “Visibility” στα δεξιά της οθόνης μας.



Από την προεπιλογή εσκαμμένες περιοχές δεν μπορούν να επιλεγθούν. Κάνουμε δεξί κλικ και επιλέγουμε “Draw Excavated Regions”.





Τέλος, όπως είδαμε και προηγουμένως στις βασικές λειτουργίες προχωρούμε στον υπολογισμό και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων.



Select: Analysis → Compute

ΚΕΦΑΛΑΙΟ V

Παρουσίαση αποτελεσμάτων προγράμματος

Με βάση τα στοιχεία που μας παρέχονται από την Μελέτη για την κατασκευή της δίδυμης Σήραγγας T1 του Αυτοκινητοδρόμου Demir Karija – Smoknica, τμήμα του Πανευρωπαϊκού Αυτοκινητοδρόμου 10 και του Εθνικού Δικτύου M-1 (E – 75) στα Σκόπια (F.Y.R.O.M.) που έγινε με την βοήθεια του προγράμματος 3DEC και την οποία μας έχει παράσχει η εταιρεία *ΟΜΙΚΡΟΝ ΚΑΠΑ ΜΕΛΕΤΗΤΙΚΗ Α.Ε. (ΟΚ)* πραγματοποιούμε ανάλογους υπολογισμούς με την βοήθεια του προγράμματος RS3 της Rockscience.

Το συγκεκριμένο πρόγραμμα δεν μας δίνει την δυνατότητα να εισάγουμε την ενδιάμεση σήραγγα (VCP), την σήραγγα διευρούμενης διατομής (“trumpet”), καθώς και τον θάλαμο ενδιάμεσης προσβολής (junction cavern ή chamber) με την πραγματική τους διατομή, αλλά μόνο με ορθογωνική.

Αυτό πιθανότατα θα οδηγήσει σε μεγαλύτερες μετακινήσεις και εμφάνιση μεγαλύτερων τάσεων στις γωνίες και στις άκρες των συγκεκριμένων κατασκευών, κάτι που θα το δούμε μετά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων όπου θα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα που λάβαμε από την προαναφερθείσα Μελέτη που έγινε με την βοήθεια του 3DEC και αυτά που λάβαμε με τη βοήθεια του RS3 στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Αρχικά ξεκινάμε ρυθμίζοντας τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών (πετρωμάτων) που συναντούμε καθ’ όλη την περιοχή της υπόγειας σήραγγας.

Define Material Properties

LIM-3

Name: LIM-3 Material Color: [Color Selection]

Initial Element Loading: Field Stress Only Unit Weight: (kN/m³): 27

Elastic Properties

Elastic Type: Isotropic Poisson's Ratio: 0.3

Young's Modulus (kPa): 4500000 Young's Modulus (resid) (kPa): 20000

E1: 20000 kPa E2: 20000 kPa E3: 20000 kPa

x: 1 y: 0 z: 0 x: 0 y: 1 z: 0

v12: 0.2 v13: 0.2 v23: 0.2

Strength Parameters

Failure Criterion: Generalized Hoek-Brown Material Type: Plastic

Intact Comp. Strength (kPa): 5500 Dilation Parameter: 0

mb Parameter (peak): 0.981333 mb Parameter (resid): 0.981333

s Parameter (peak): 0.00073 s Parameter (resid): 0.00073

a Parameter (peak): 0.51595 a Parameter (resid): 0.51595

Jointed Material Joint Options...


Stage Properties Define Factors... Datum Dependent Define Properties...

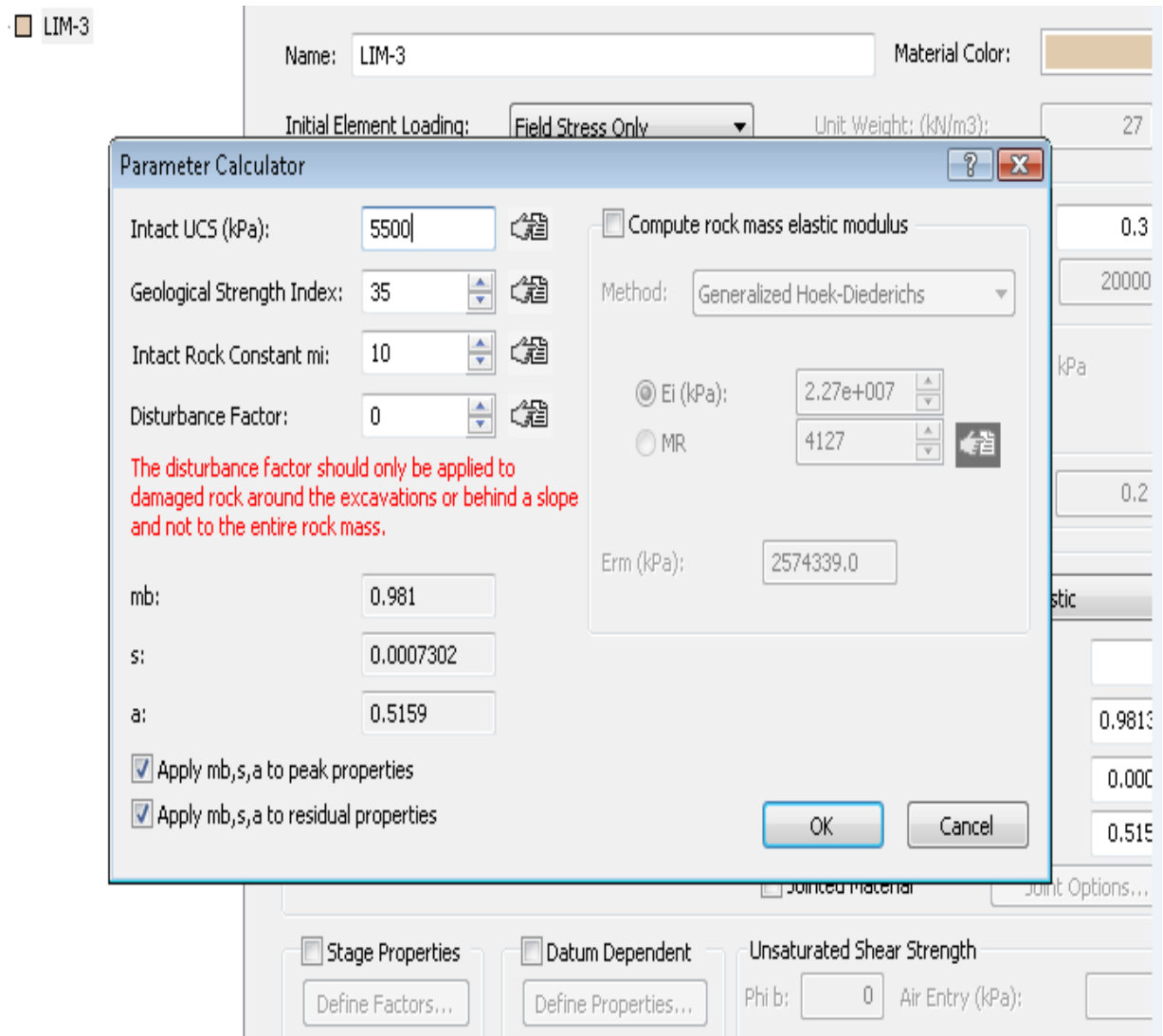
Unsaturation Shear Strength

Phi b: 0 Air Entry (kPa): 0

Copy To... Show only properties used in model OK Cancel

Το πέτρωμα (ασβεστόλιθος τύπου LIM-3) έχει μέτρο ελαστικότητας $E = 4,5\text{GPa}$ και λόγο poisson $\nu = 0,3$.

Επιλέγουμε Κριτήριο Αστοχίας (Failure Criterion) το Γενικευμένο Hoek – Brown (Generalized Hoek – Brown) και ρυθμίζουμε τις παραμέτρους του πετρώματος επιλέγοντας το εικονίδιο του “GSI calculator” .



Επιλέγουμε τη δυσμενέστερη περίπτωση με $GSI = 35$, $Intact\ UCS = 5,5MPa$ και $Intact\ Rock\ Constant\ m_i = 10$.

Χωρίζουμε την κατασκευή μας σε “slices” κατά μήκος των δύο κύριων σηράγγων (main tunnels).

Slice Entry Method: Enter slice thickness
 Enter Z coordinate of back of slice

Slices

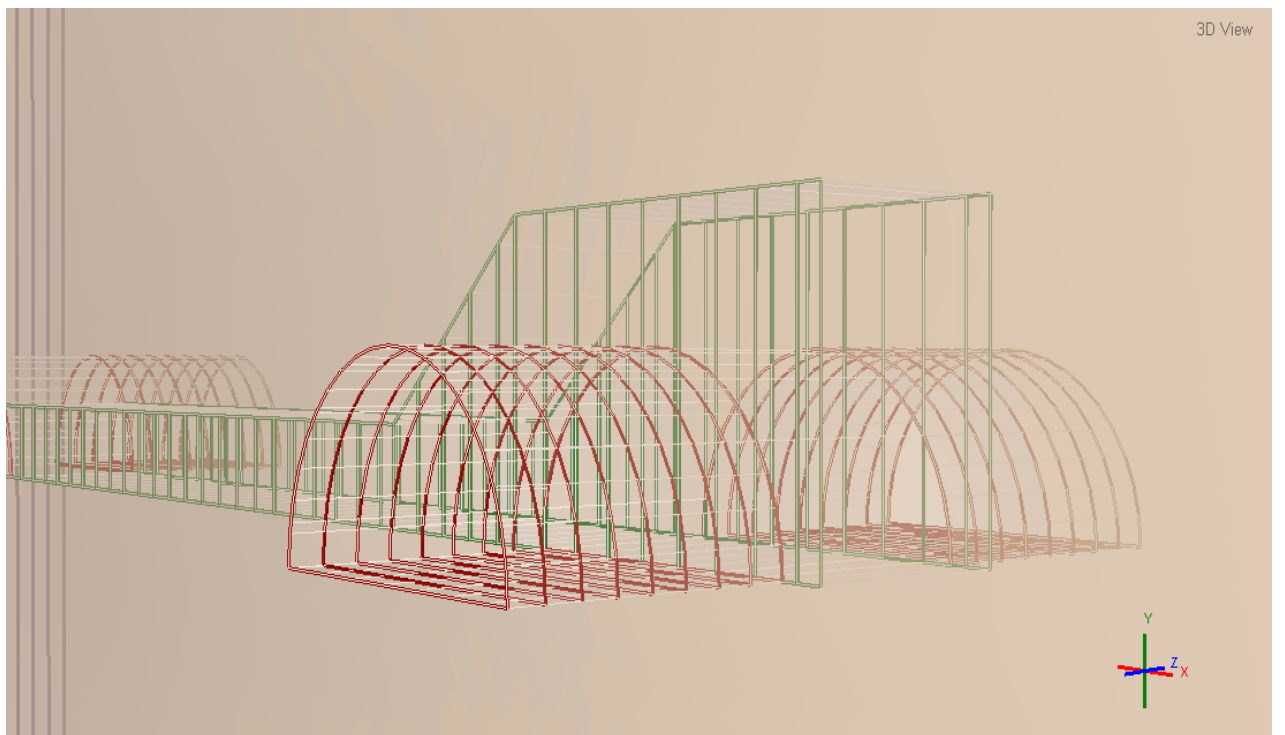
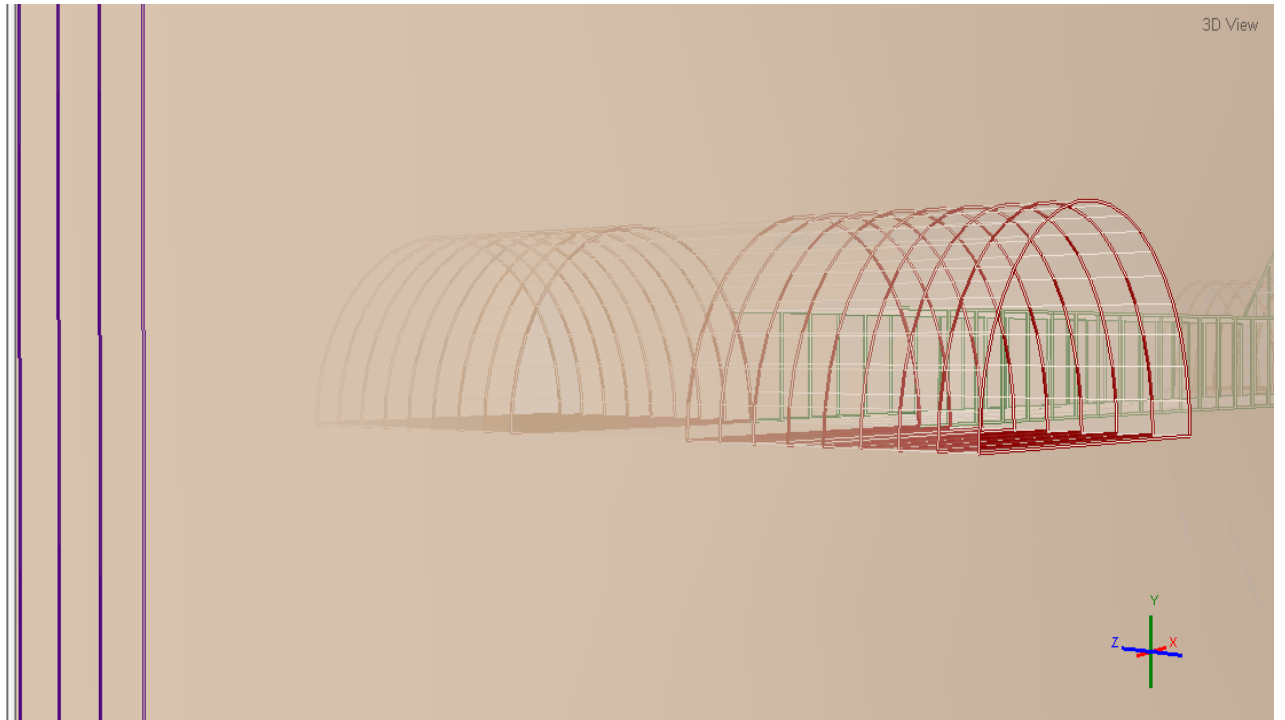
#	Slice Name	Size (m)
1	1a	1
2	1b	1
3	1c	1
4	1d	1
5	1e	1
6	1f	1
7	chamber side 1a	1
8	chamber side 1b	1
9	cross tunnel	0.993333
10	cross tunnel	0.993333
11	cross tunnel	0.993333
12	cross tunnel	0.993333
13	cross tunnel	0.993333
14	cross tunnel	0.993333
15	chamber side 2a	1
16	chamber side 2b	1
17	2a	1
18	2b	1
19	2c	1
20	2d	1
21	2e	1
22	2f	1

0 m 1 3 5 7 8.99333 11.9733 14.96 17.96 20.96 m

OK Cancel

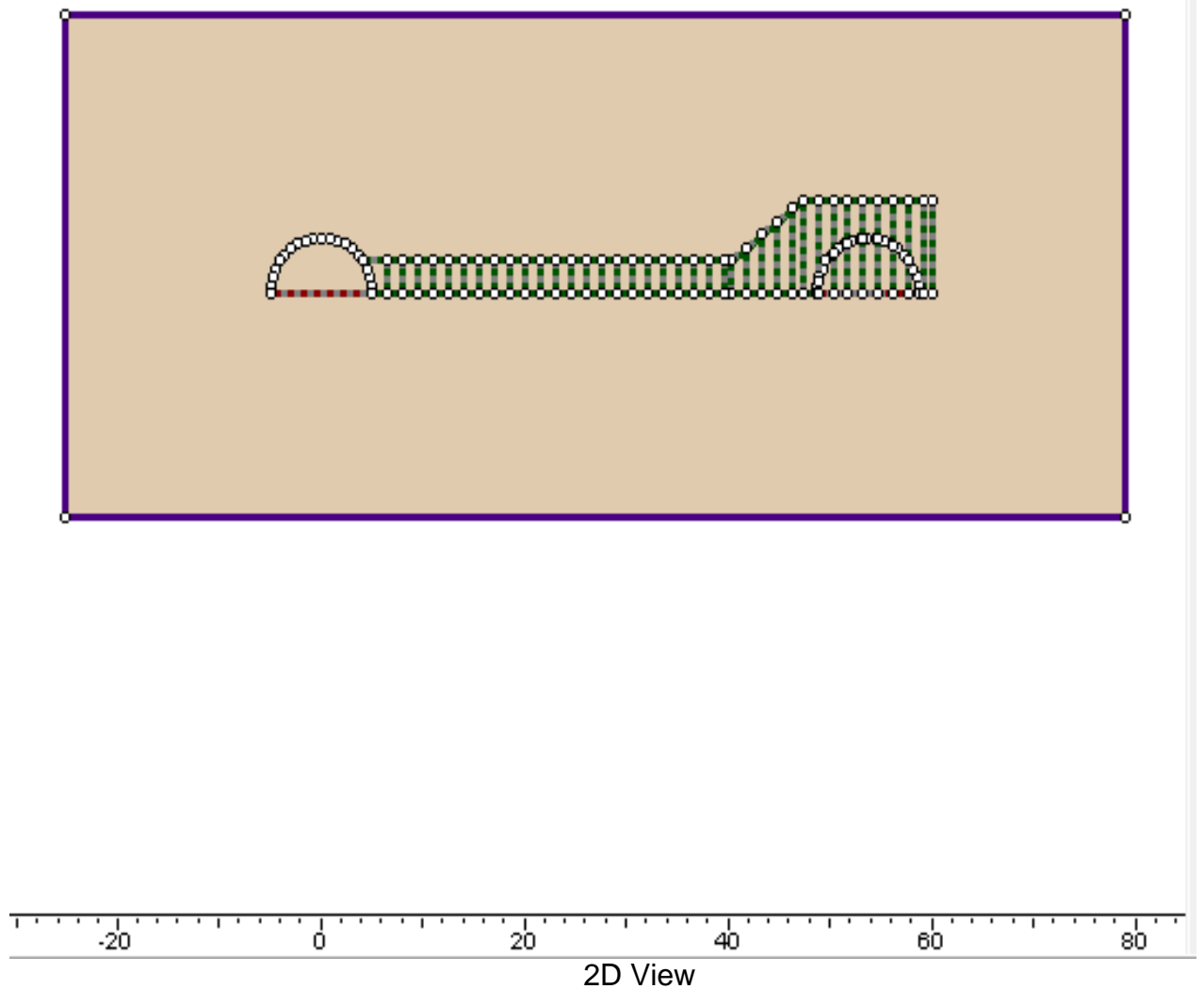
Ορίζουμε 8 “slices” σε κάθε κατεύθυνση εκατέρωθεν της ενδιάμεσης σήραγγας (cross tunnel) και χωρίζουμε την περιοχή που αντιστοιχεί στην ενδιάμεση σήραγγα σε 6 ισομήκη slices. Όλα τα slices έχουν πάχος 1m (αυτά που αντιστοιχούν στην ενδιάμεση σήραγγα 0,993333m) αφού από την Μελέτη της OK ορίζεται ότι το βήμα προχώρησης είναι 1 – 1,5m (επιλέγουμε 1m).

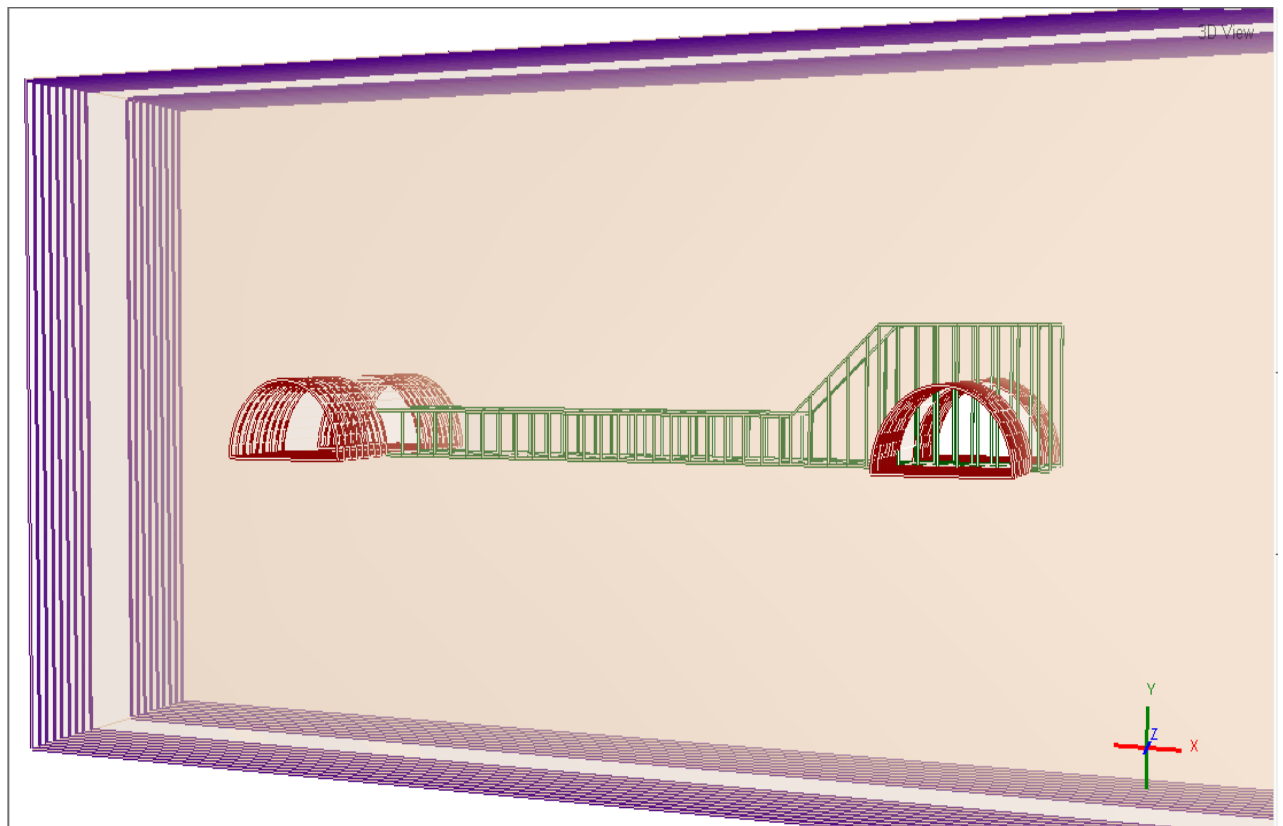
Παρακάτω βλέπουμε τα “slices” σε τριδιάστατη απεικόνιση (μετά την ενοποίηση όλων των slices της ενδιάμεσης σήραγγας, θα αναφερθεί παρακάτω ο λόγος) :



Εν συνεχεία ενοποιούμε τα (6) slices της ενδιάμεσης σήραγγας σε ένα (1) προκειμένου να εισάγουμε slices με την βοήθεια “material boundaries” και κατά μήκος της ενδιάμεσης σήραγγας, της περιοχής διευρούμενης διατομής και του θαλάμου ενδιάμεσης προσβολής.

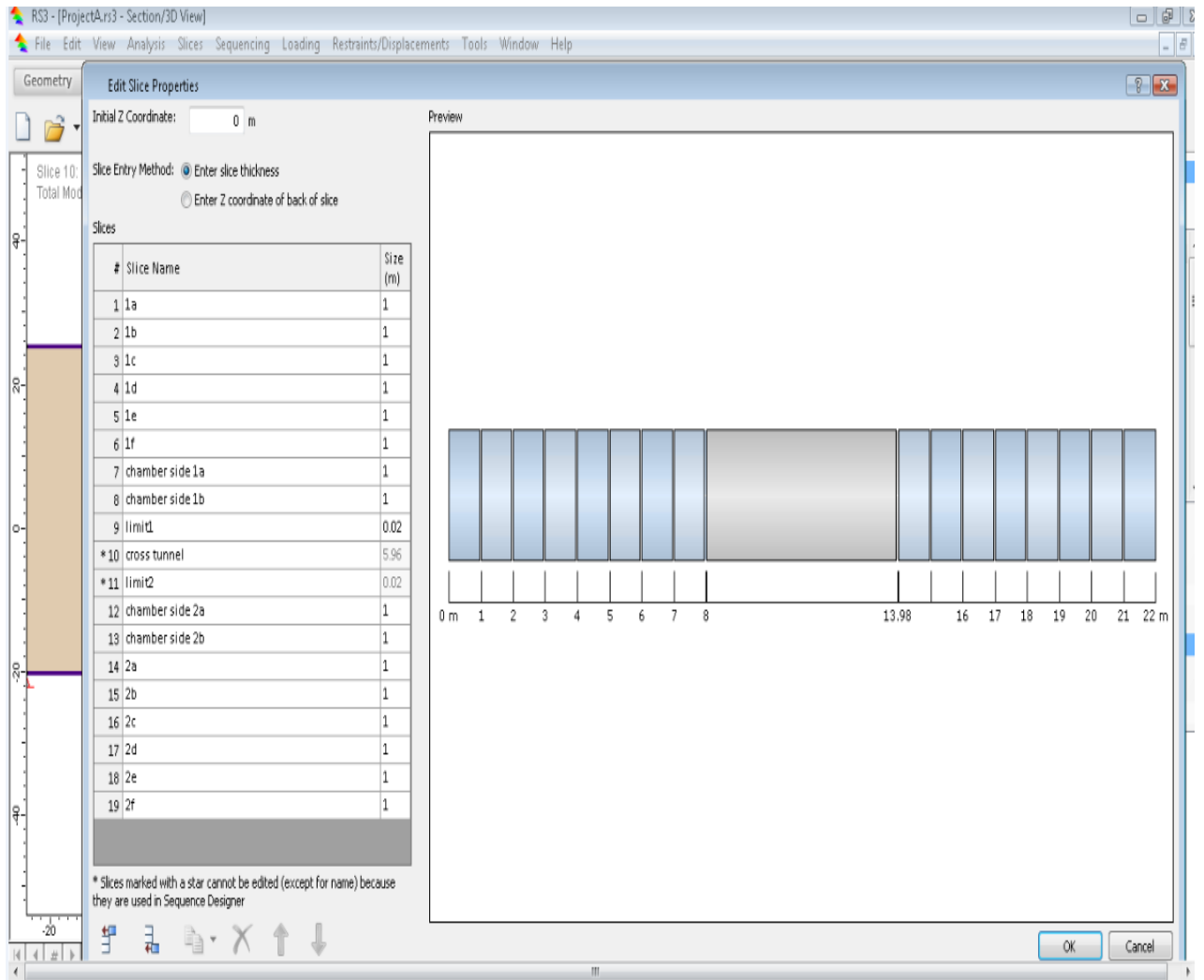
Τα slices αυτά έχουν πάχος 1,5m αφού από την Μελέτη της ΟΚ ορίζεται ότι το βήμα προχώρησης είναι 1,5 – 2,5m (επιλέγουμε 1,5m) και απεικονίζονται σε διδιάστατη και τρισδιάστατη μορφή ως εξής:





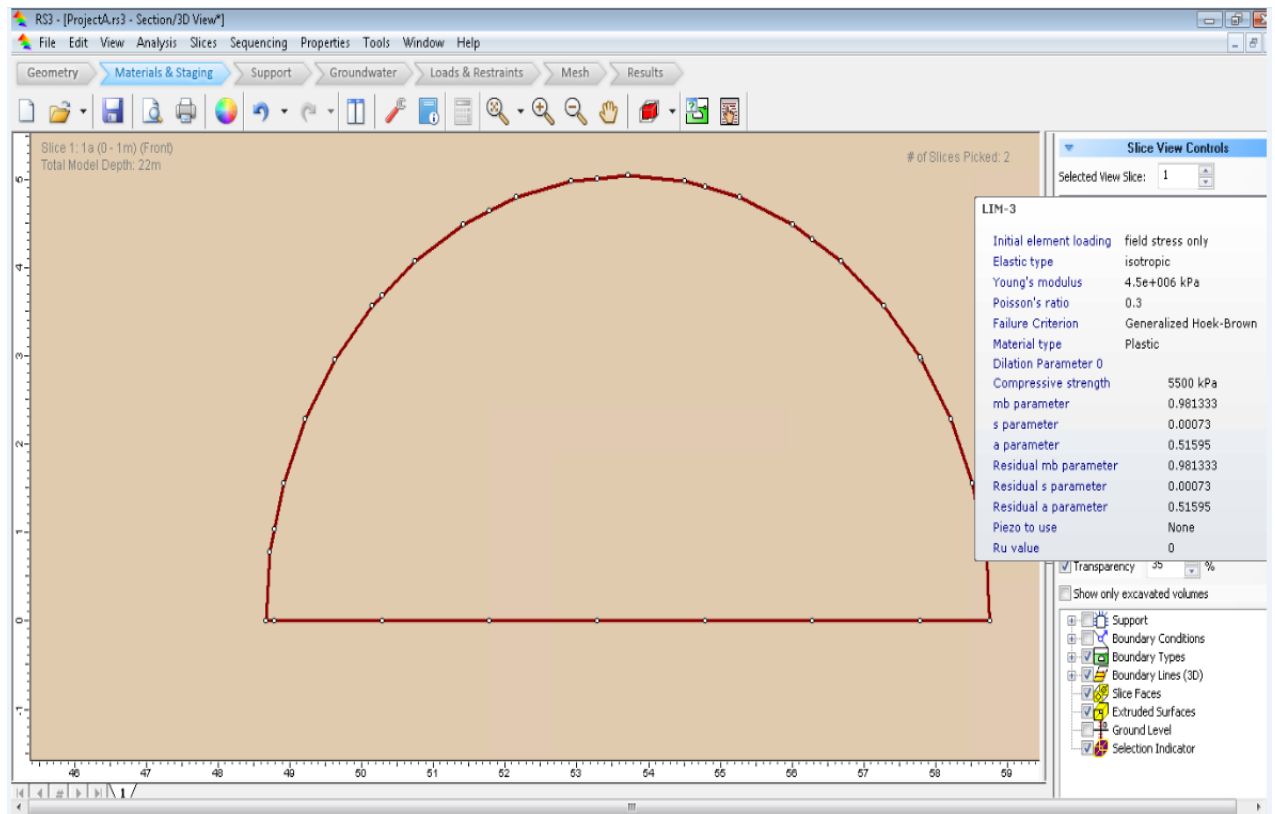
3D View

Παρακάτω βλέπουμε την νέα μορφή των “slices” (όπως προαναφέραμε) μετά την ενοποίηση αυτών που αντιστοιχούσαν στην ενδιάμεση σήραγγα καθώς και μετά την δημιουργία δύο νέων “slices” (Limit 1 και Limit 2) που μας βοηθούν στην τοποθέτηση σκυροδέματος πλευρικά της συνδετήριας σήραγγας, της περιοχής διευρούμενης διατομής και του θαλάμου.

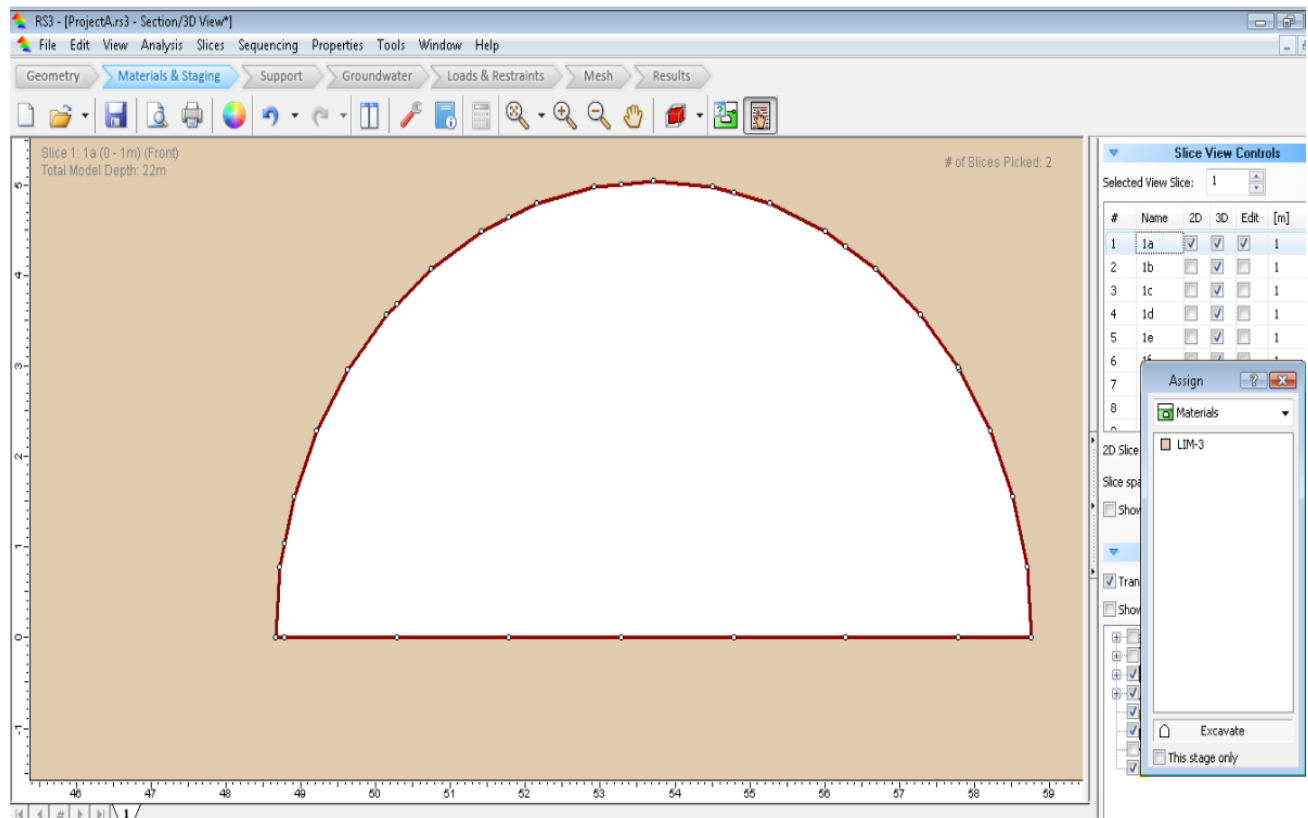


Ακολουθως θα δούμε με ποια διαδικασία, σε κάθε slice ξεχωριστά, γίνεται η εκσκαφή, τοποθετούνται τα αγκύρια (rockbolts), το σκυρόδεμα (liner) και τα πλαίσια (beams).

Αρχικά βλέπουμε το slice πριν την εκσκαφή:



Αμέσως μετά προχωράμε στην εκσκαφή του συγκεκριμένου κομματιού, επιλέγοντας το κουμπί “Excavate” και κάνοντας αριστερό κλικ οπουδήποτε μέσα στα όρια του slice.



Συνεχίζουμε ορίζοντας τις ιδιότητες των αγκυριών και τοποθετώντας τα περιμετρικά της εκσκαφής.

Define Bolt Properties

Rockbolts

Name:

Bolt Color:

Bolt Properties

Bolt Type:

Tensile Capacity (kN):

Tributary Area (mm²):

Bolt Modulus, E (kPa):

Bond Strength (kN/m):

Bond Shear Stiffness (kN/m/m):

Residual Tensile Capacity (kN):

Face Plates

Attached Face Plates

Add Pull-Out Force

Force (kN):

Constant Shear Stiffness

Stiffness (kN/m/m):

Add Bulges

Bond Length

Percent of Length:

Length (m):

Secondary Bond Length

Bolt Model

Joint Shear

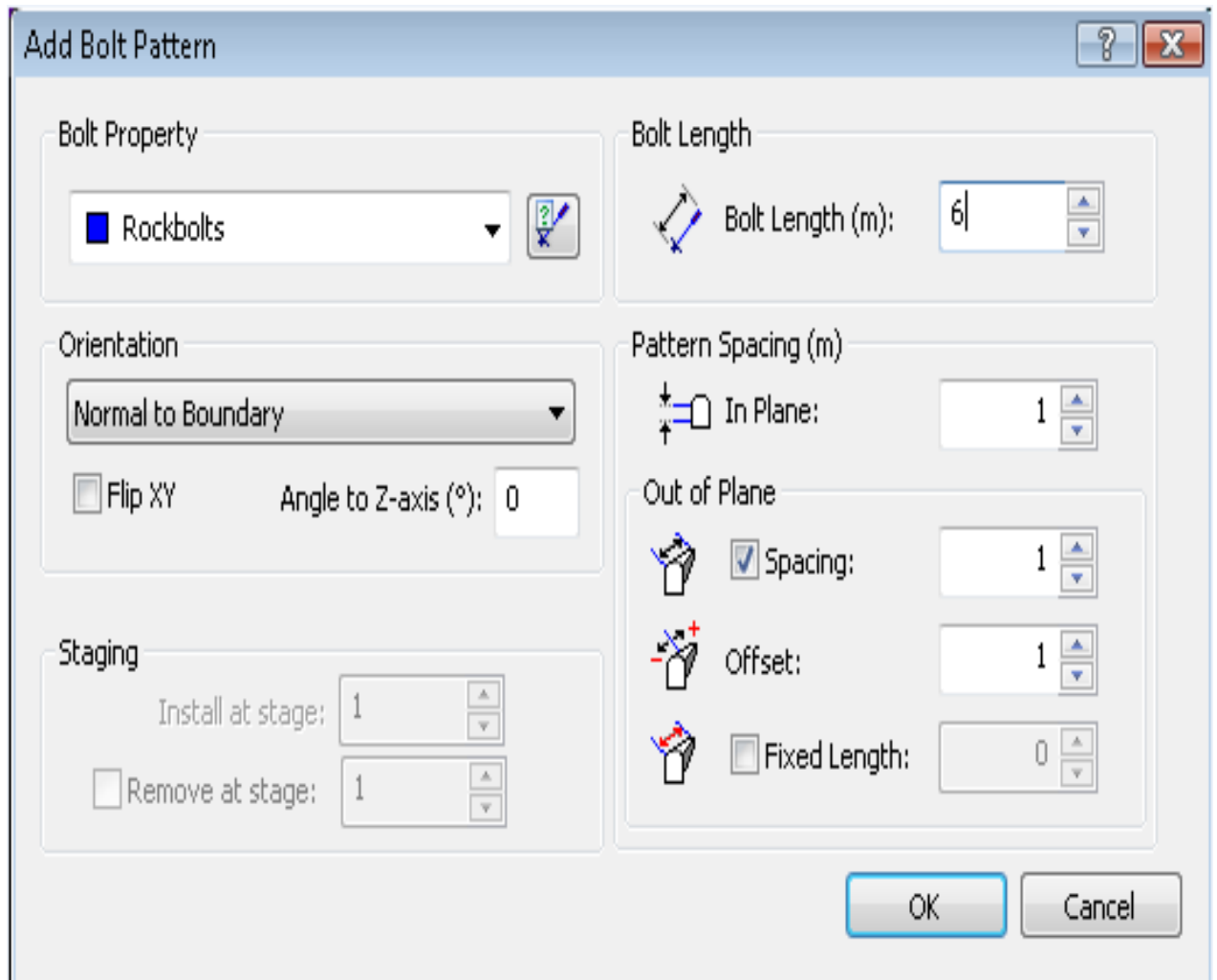
Pre-Tensioning

Pre-Tensioning Force (kN):

Constant Force in Install Stage

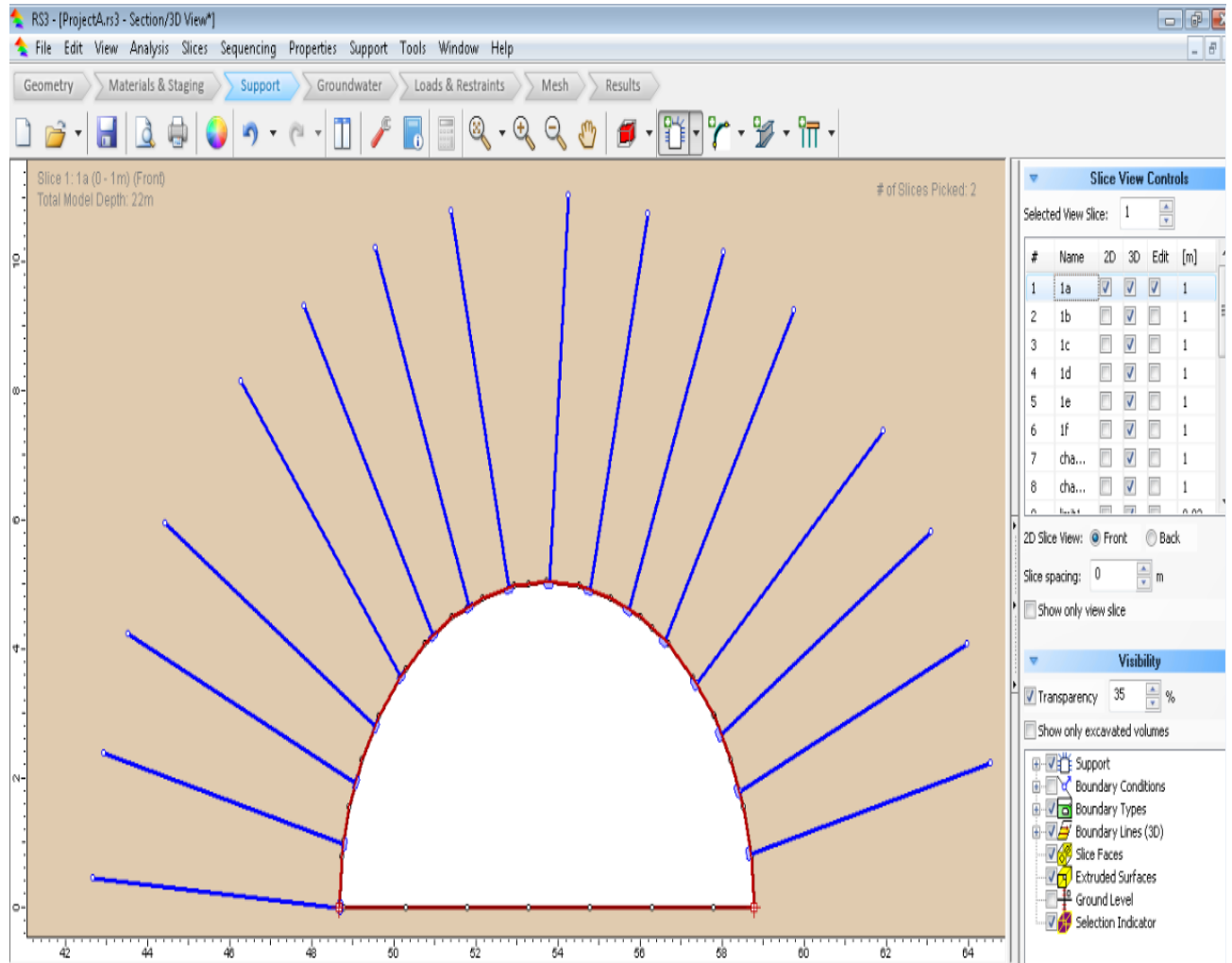
Show only properties used in model

Τα αγκύρια που χρησιμοποιούμε είναι τύπου Swellex, έχουν μήκος 6m το καθένα και φέρουσα ικανότητα (Tensile Capacity = 160kN).

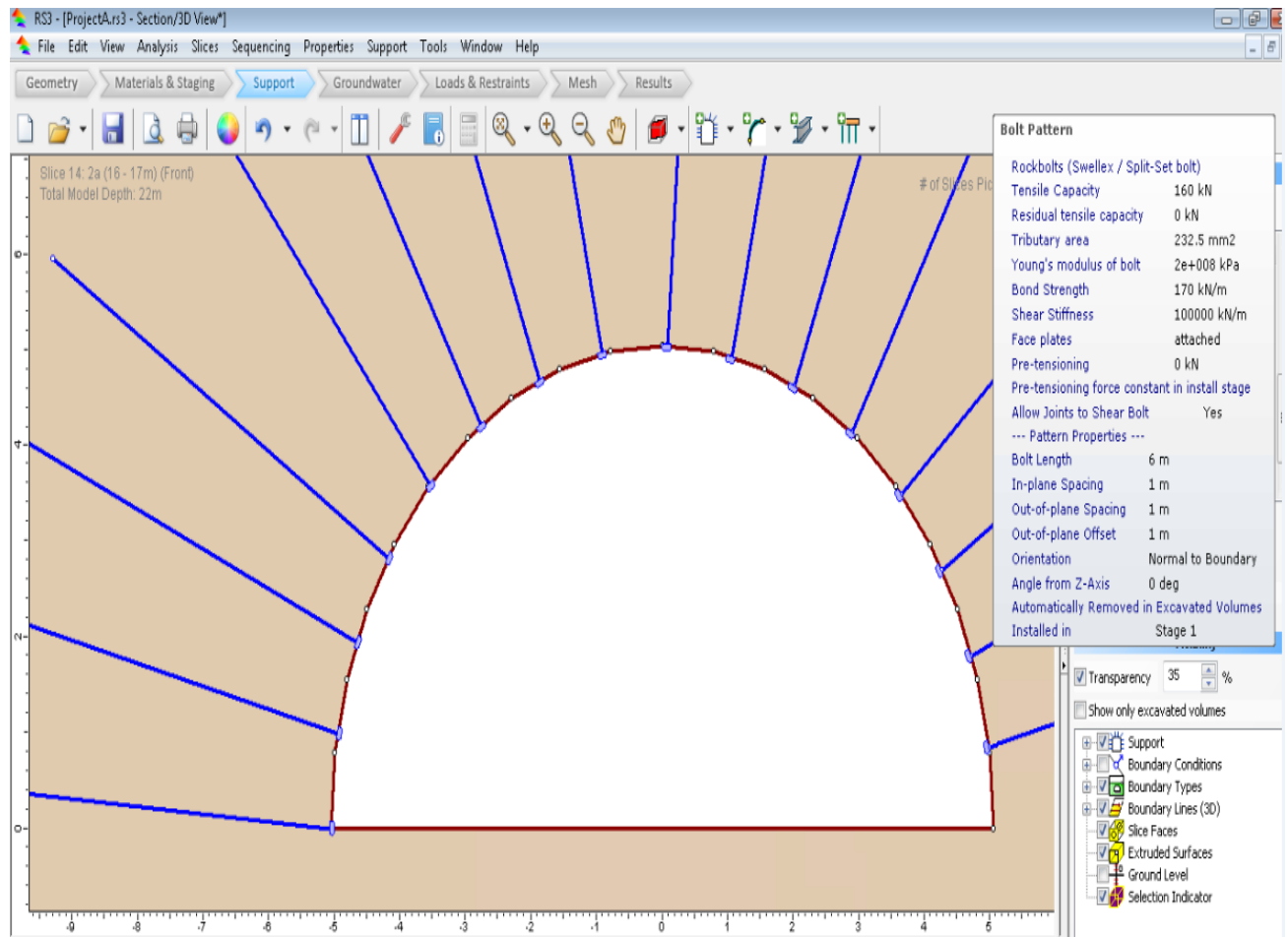


Επίσης ρυθμίζουμε το μήκος των αγκυριών, το οποίο είναι 6m.

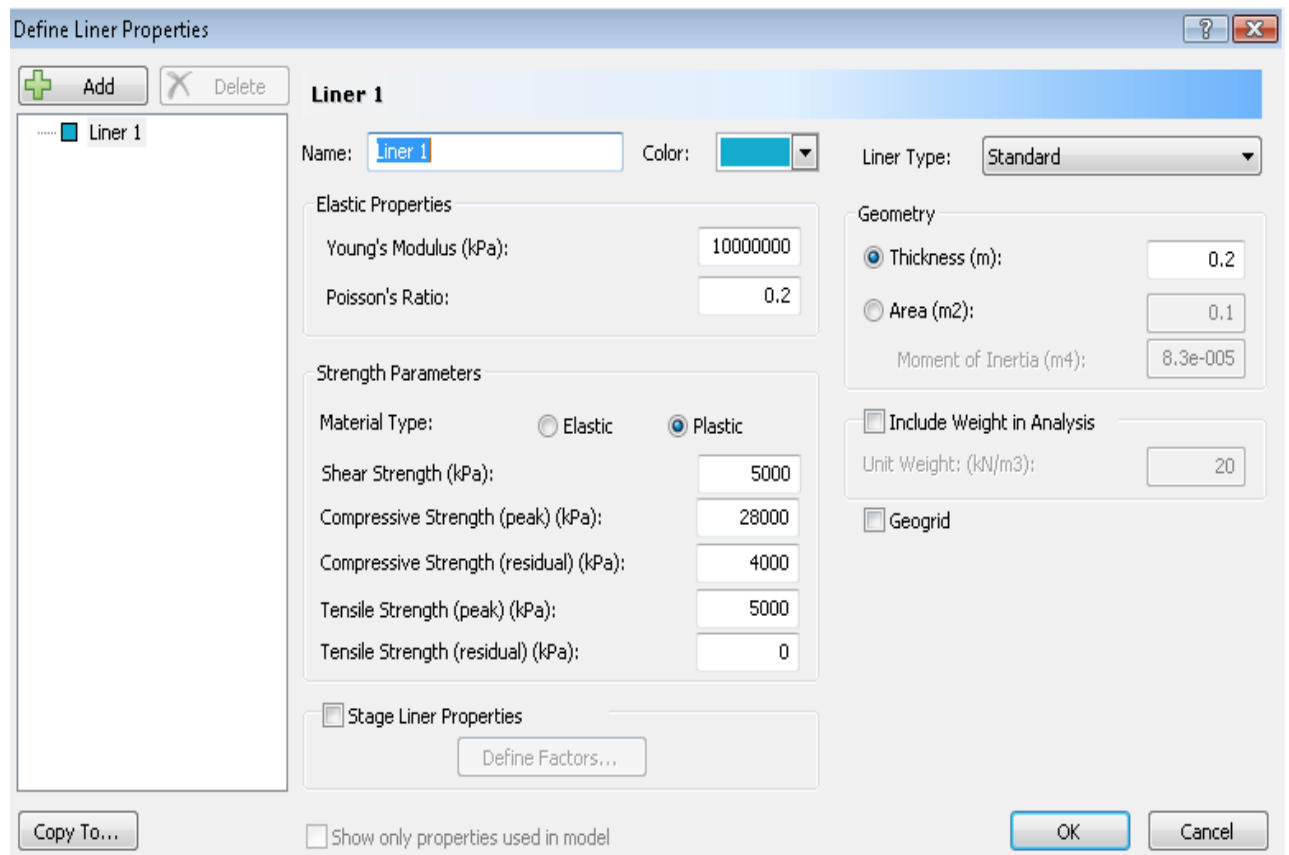
Αφού ρυθμίσαμε τις ιδιότητες των αγκυριών, τα τοποθετούμε γύρω από την εκσκαφή μας.



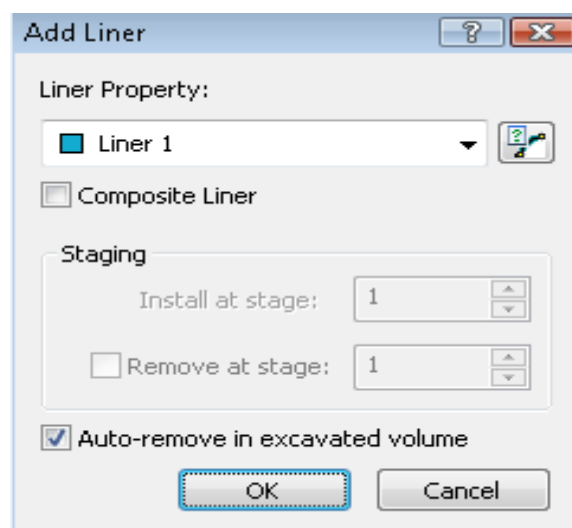
Με το πέρασ της τοποθέτησής τους, η οθόνη έχει ως εξής:



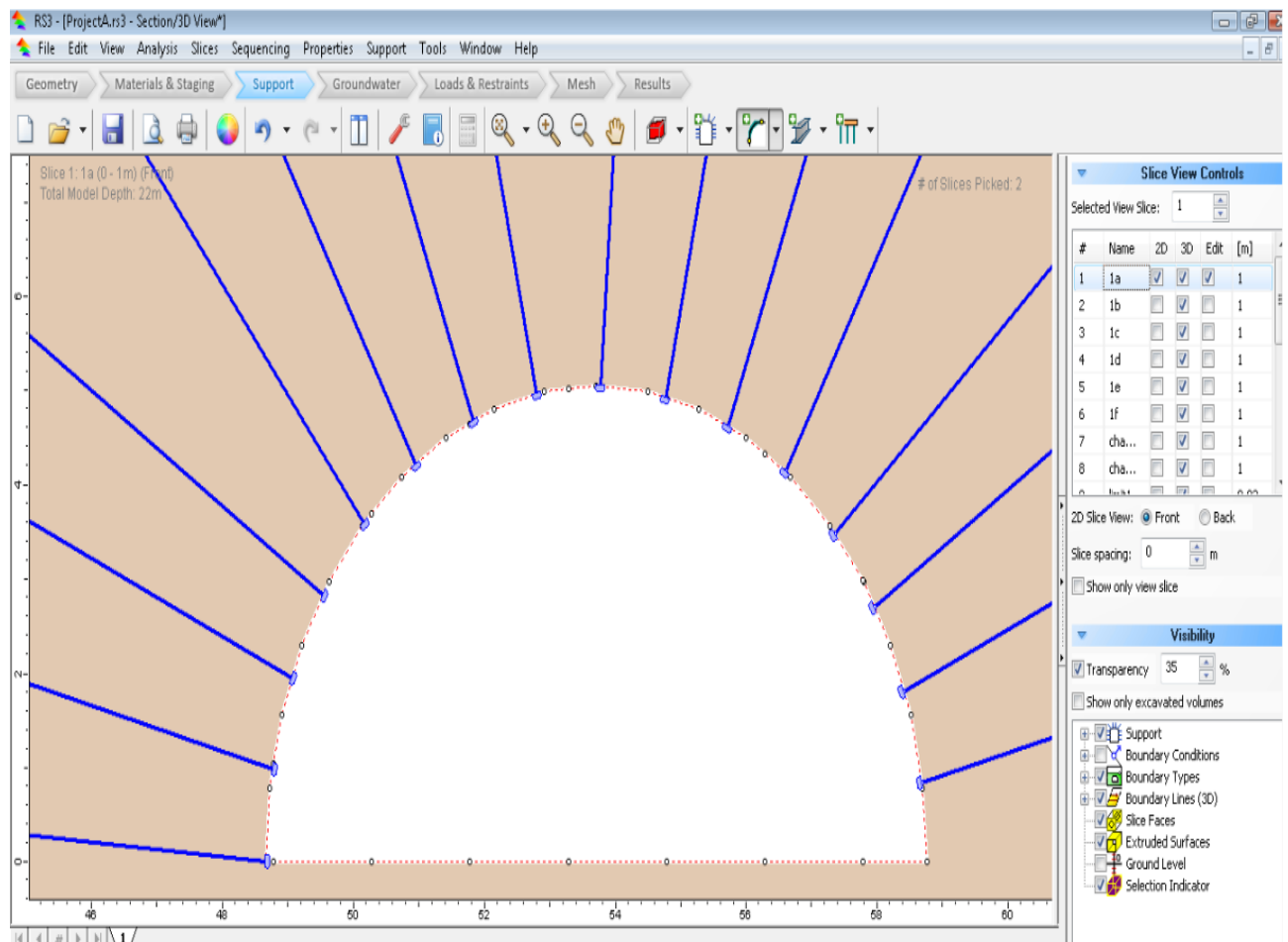
Μετά την τοποθέτηση των αγκυρίων προχωρούμε στην τοποθέτηση του σκυροδέματος, αφού προηγουμένως ρυθμίσουμε τις ιδιότητές του.



Ορίζουμε μέτρο ελαστικότητας $E = 10\text{GPa}$ (από την μελέτη έχουμε ότι το μέτρο ελαστικότητας πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ $10 - 15\text{GPa}$), τον λόγο poisson $\nu = 0,2$, Tensile Strength = 5MPa και Compressive Strength = 28MPa .



Ακολουθώντας προχωρούμε στην τοποθέτηση του σκυροδέματος περιμετρικά της εκσκαφής:

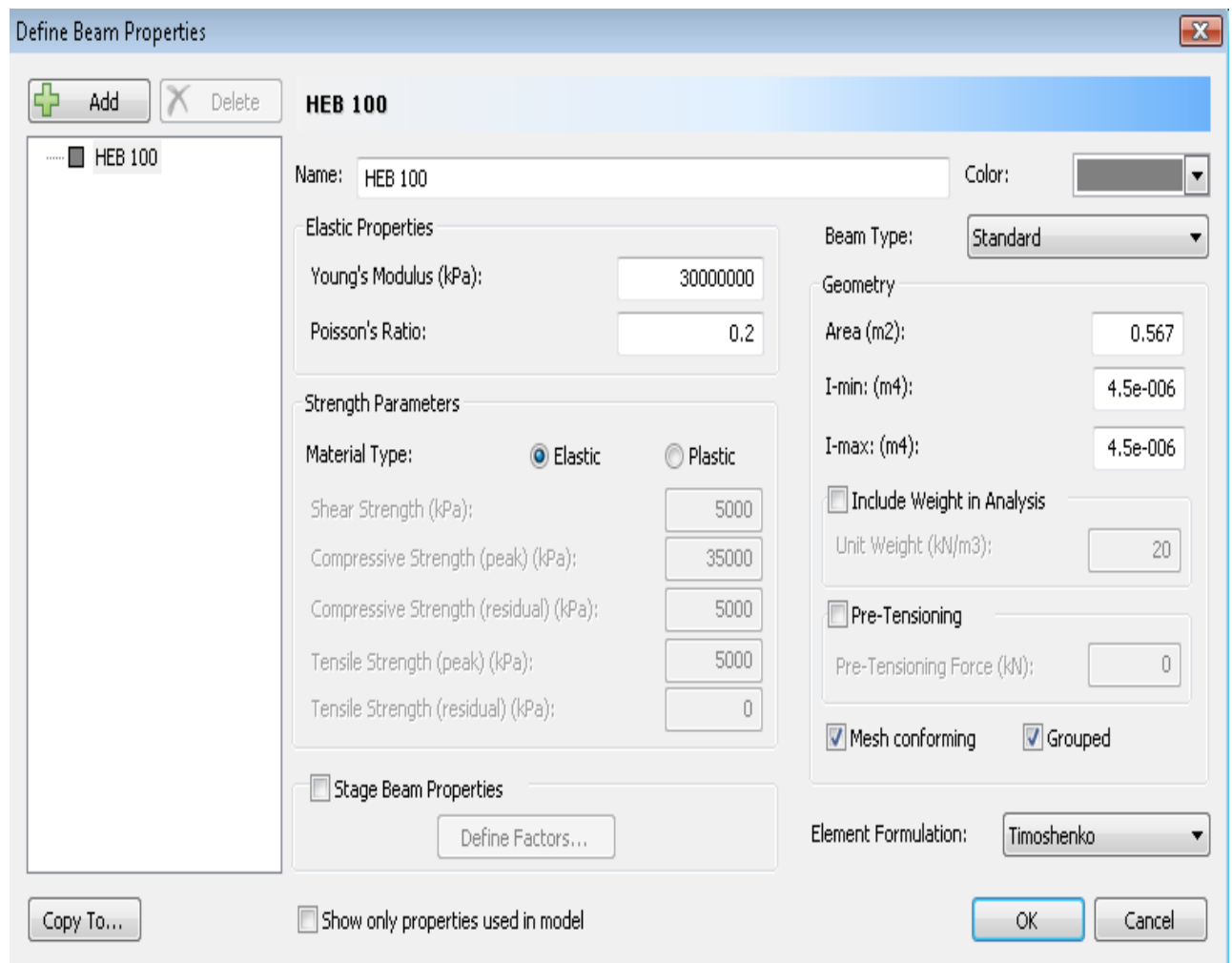


Η τοποθέτηση του σκυροδέματος υποδεικνύεται από τις διακεκομμένες γραμμές γύρω από την εκσκαφή.

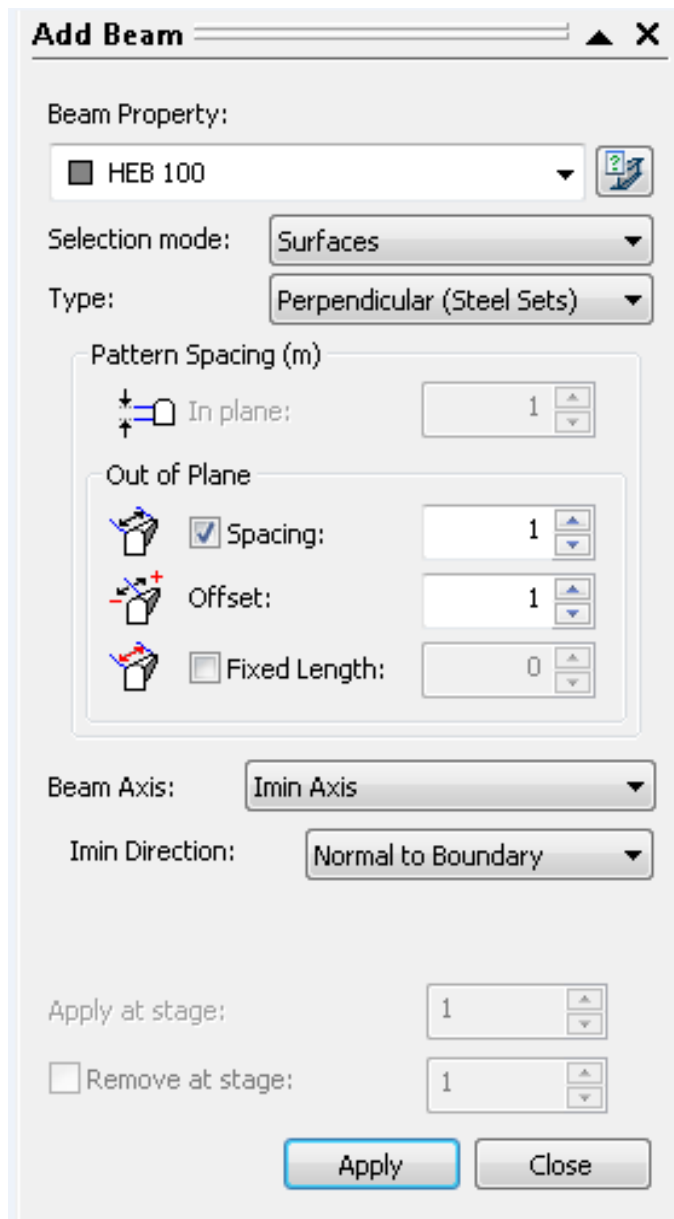


Τέλος, ορίζουμε τις ιδιότητες των πλαισίων και τα τοποθετούμε στην

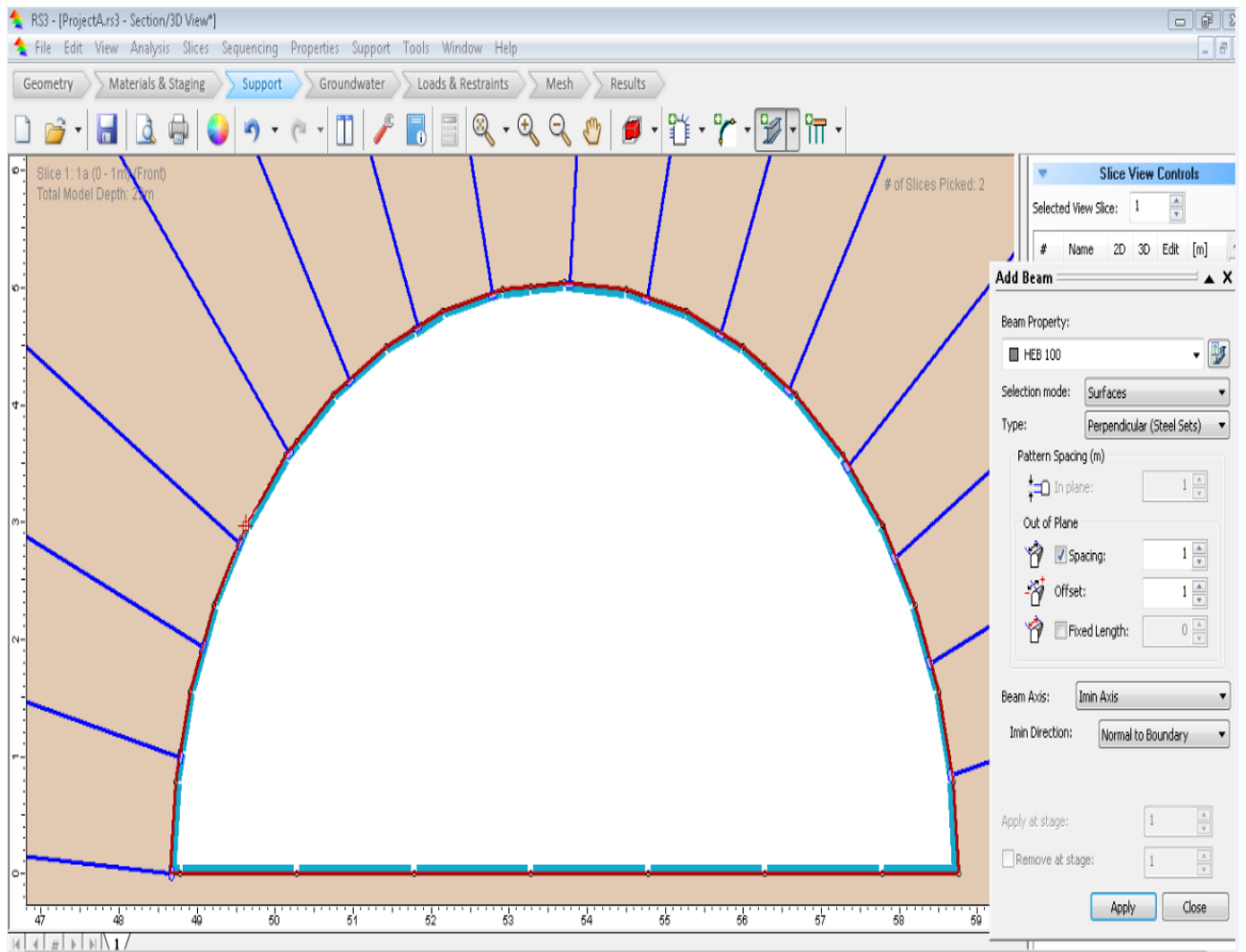
περίμετρο της εκσκαφής.



Τα πλαίσια που τοποθετούμε είναι τύπου HEB 100, με μέτρο ελαστικότητας $E = 30\text{GPa}$, λόγο poisson $\nu=0,2$, Area = $0,576\text{m}^2$ και I-min = $4,5 \cdot 10^{-6} \text{m}^4$.



Παρακάτω φαίνεται η τοποθέτηση των πλαισίων (beams), ενώ οι μπλε γραμμές απεικονίζουν το σκυρόδεμα που τοποθετήθηκε στην προηγούμενη φάση.



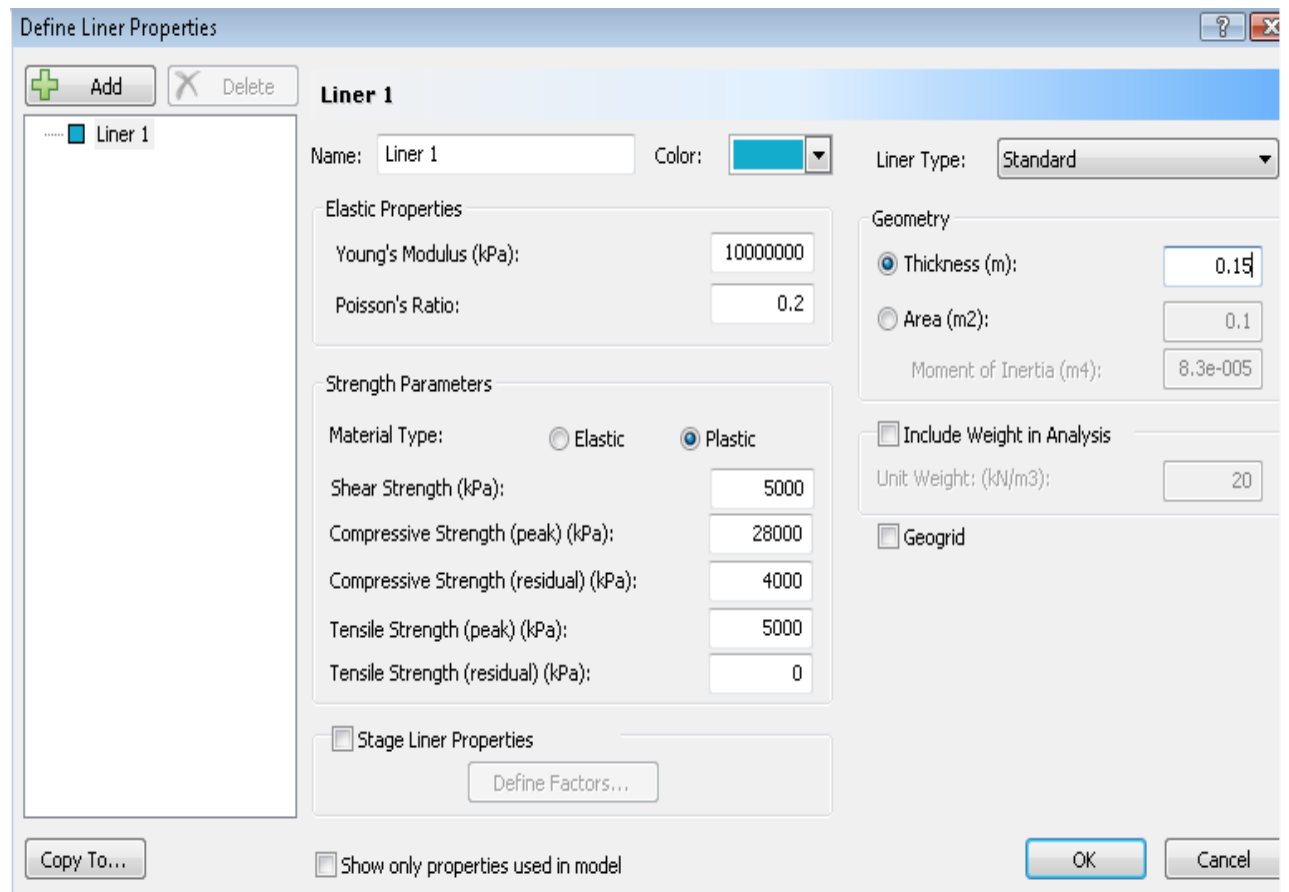
Μετά την τοποθέτηση των πλαισίων πατάμε το κουμπί “Apply”.

Αφού ακολουθήσουμε την διαδικασία που περιγράψαμε παραπάνω σε κάθε slice του πρώτου κλάδου της κύριας σήραγγας, προχωράμε στην εκσκαφή και υποστήριξη της ενδιάμεσης σήραγγας (cross tunnel), της περιοχής διευρούμενης διατομής (trumpet) και του θαλάμου ενδιάμεσης προσβολής.

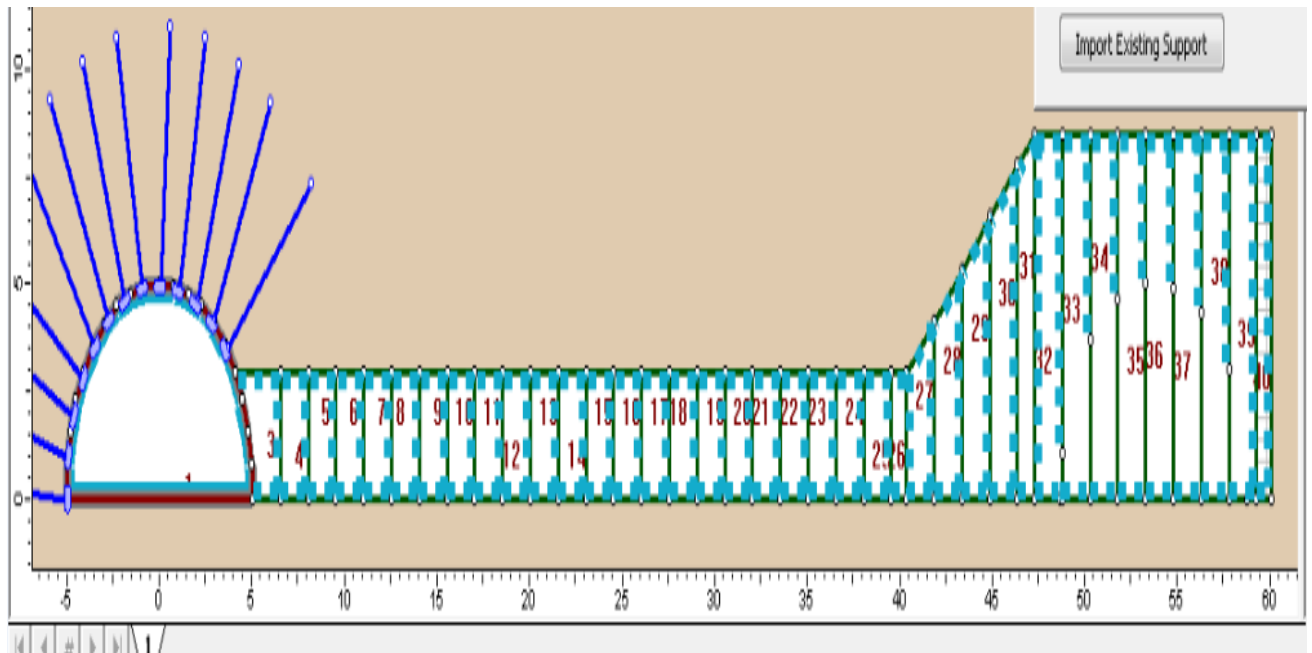
Προκειμένου να προσομοιώσουμε με επιτυχία την παραπάνω διαδικασία, χρησιμοποιούμε την λειτουργία “Sequencing” και συγκεκριμένα το εργαλείο “Sequence Designer”.

Χωρίζουμε την ολική συνδετήρια κατασκευή σε 38 “περιοχές” (regions), τα οποία αντιστοιχούν σε κάθε ένα από τα επιμέρους “slices” που είχαν δημιουργηθεί προηγουμένως μέσα στο δέκατο (10^ο) slice.

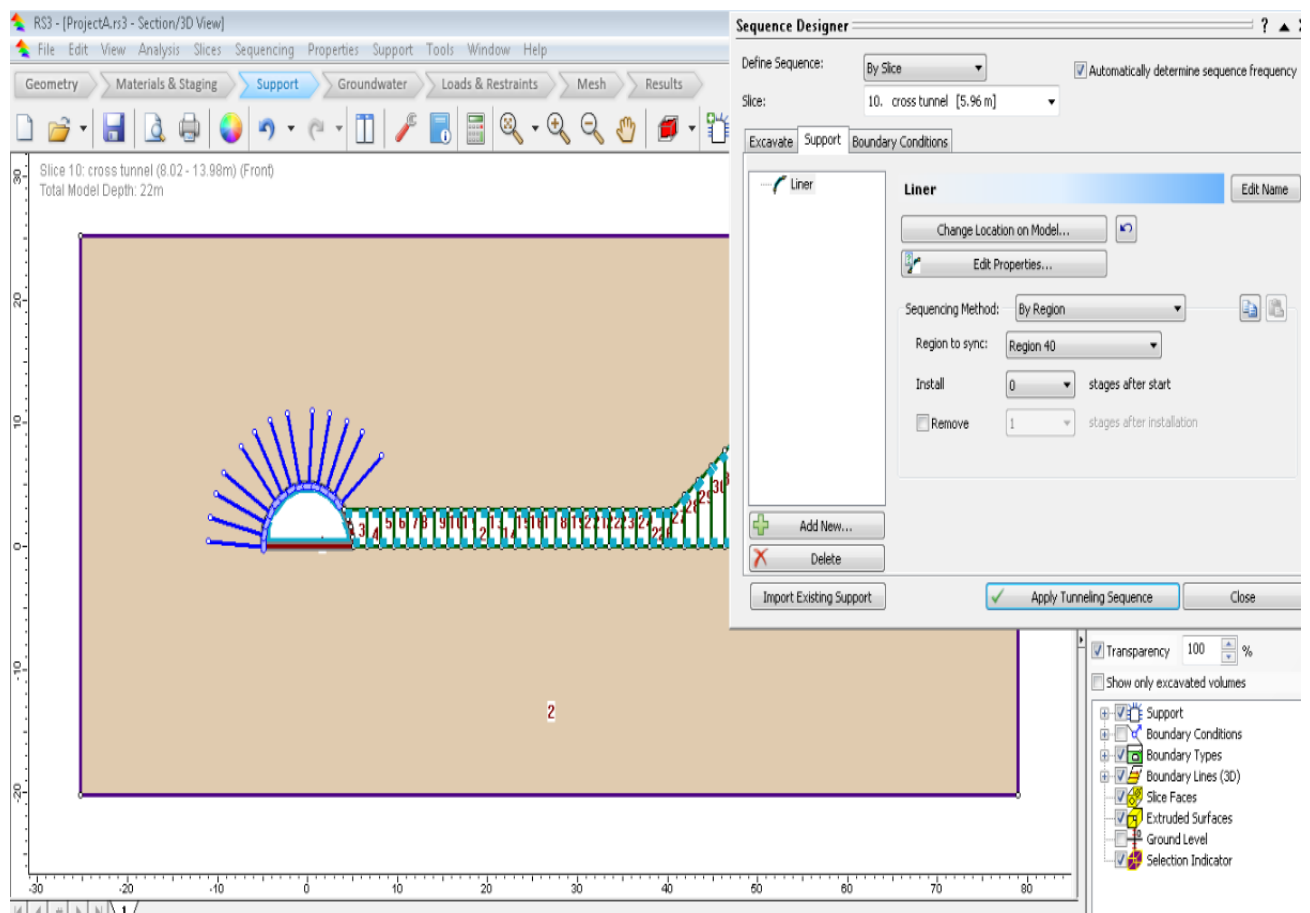
Η υποστήριξη που θα τοποθετηθεί καθ’ όλη την συνδετήρια κατασκευή που ενώνει τους δύο κλάδους της σήραγγας αποτελείται εξ ολοκλήρου από σκυρόδεμα, το οποίο διαφέρει από το σκυρόδεμα που τοποθετήθηκε στην κύρια σήραγγα στο πάχος του καθώς θα έχει πάχος 15cm έναντι 20cm που τοποθετήθηκαν στην κύρια σήραγγα.



Στην ακόλουθη εικόνα απεικονίζονται τα “regions” που αποτελούν την συνδετήρια κατασκευή.



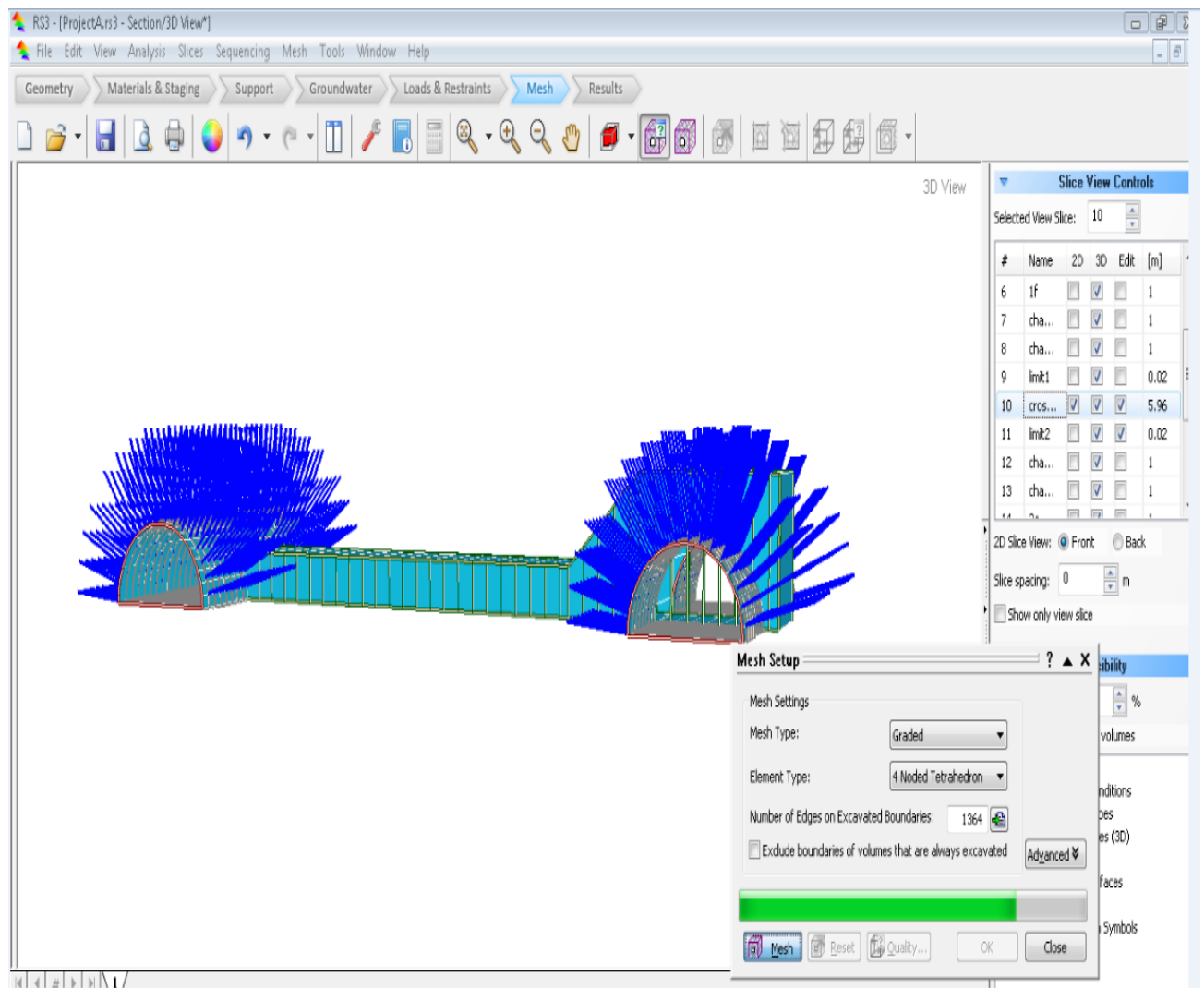
Και σε αυτήν την εικόνα φαίνεται η διαδικασία τοποθέτησης του σκυροδέματος.



Μετά την εκσκαφή και την τοποθέτηση σκυροδέματος σε όλες τις περιοχές (regions) της συνδετήριας κατασκευής, πατάμε το κουμπί “Apply Tunneling Sequence”.

Όταν ολοκληρώσουμε και την εκσκαφή και τοποθέτηση της συνδετήριας κατασκευής προχωρούμε στην διάνοιξη και του δεύτερου κλάδου της κύριας σήραγγας και προς τις δύο κατευθύνσεις ακριβώς με τον ίδιο τρόπο που εφαρμόσαμε στον πρώτο κλάδο.

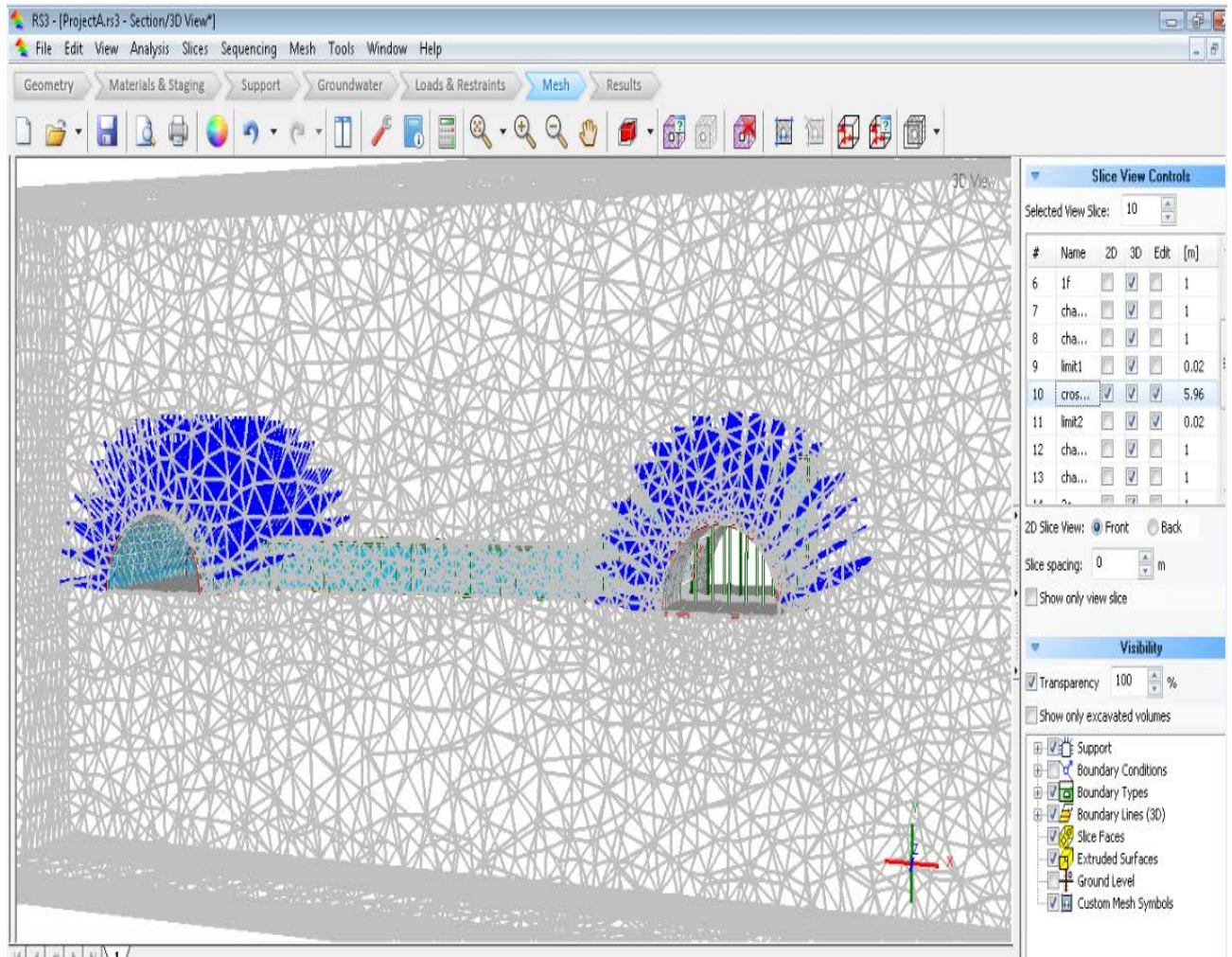
Συνεχίζουμε επιλέγοντας “Mesh” από την γραμμή εργασιών στο πάνω μέρος της οθόνης και έπειτα την επιλογή “Mesh Setup”, για να ρυθμίσουμε τις παραμέτρους του πλέγματος.



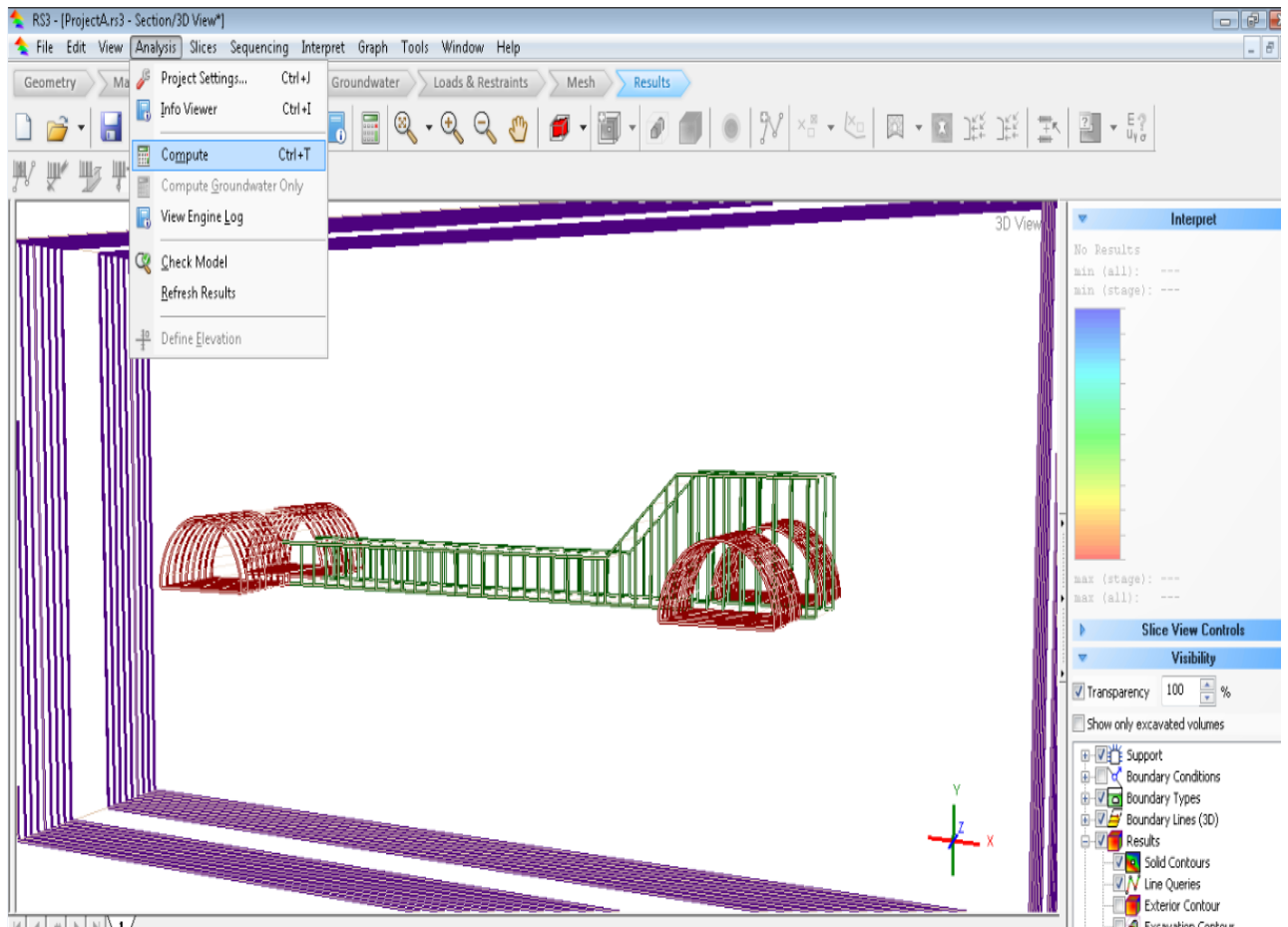
Το παραπάνω παράθυρο εμφανίζεται και αφού επιλέξουμε “Mesh Type : Graded” και “Element Type : “4 Noded Tetrahedron” πατάμε το κουμπί “Mesh”

και αφού η μπάρα (status bar) γίνει πράσινη πατάμε “OK”.

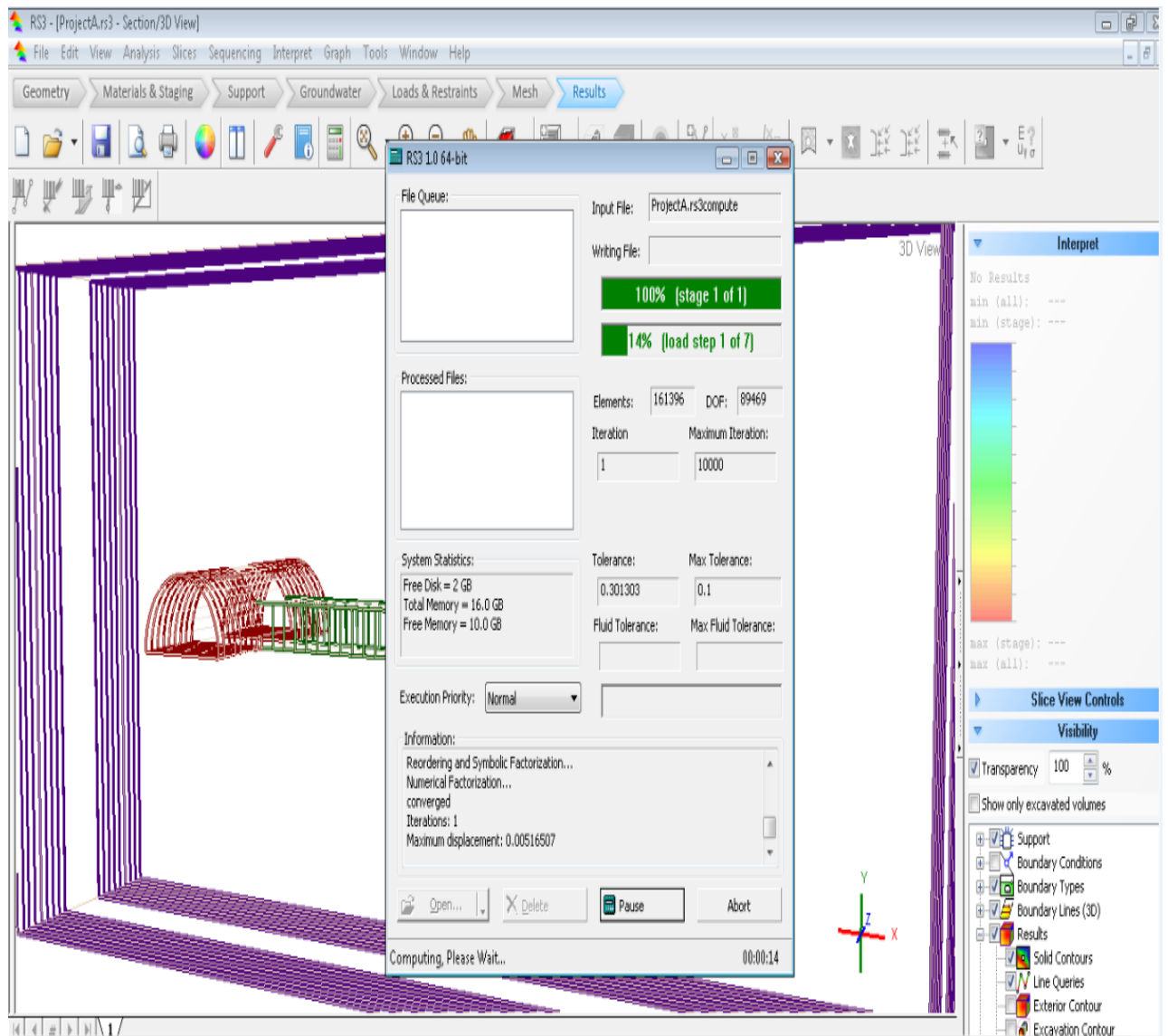
Η εικόνα που λαμβάνουμε μετά την δημιουργία πλέγματος είναι η εξής:



Μετά την δημιουργία του πλέγματος συνεχίζουμε με τον υπολογισμό των αποτελεσμάτων επιλέγοντας “Analysis → Compute”, όπως φαίνεται παρακάτω :



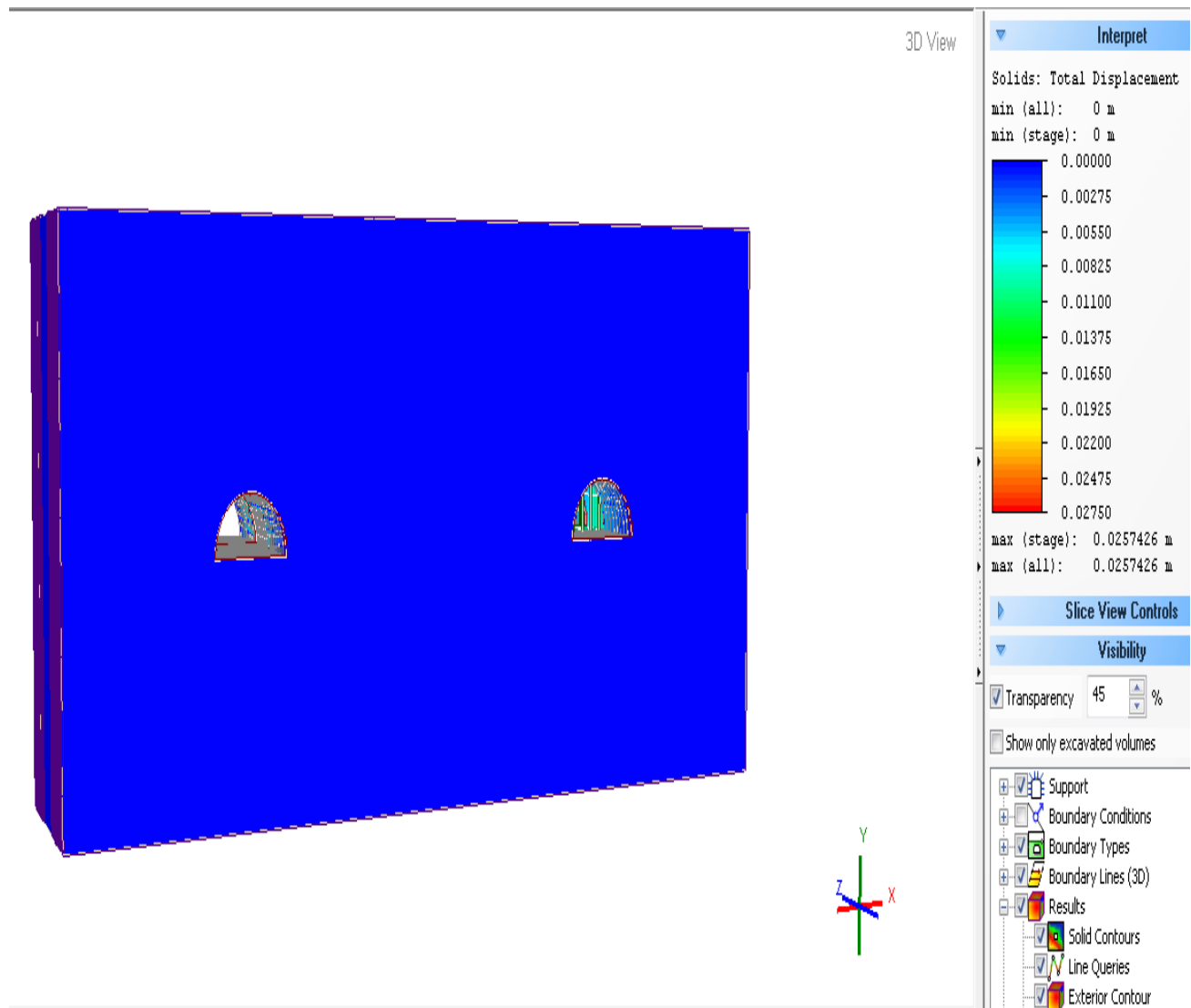
Κατά την διάρκεια του υπολογισμού το παράθυρο εργασίας του RS3 έχει την ακόλουθη μορφή:



Ακολούθως περνάμε στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

Αρχικά θα δούμε τις μετακινήσεις του πετρώματος γύρω από την εκσκαφή. Επιλέγουμε Interpret → Show Exterior Contour και στο πάνω δεξιό μέρος της οθόνης επιλέγουμε στο μενού Element: Solids και στο μενού Data Type: Solid Displacement → Total Displacement.

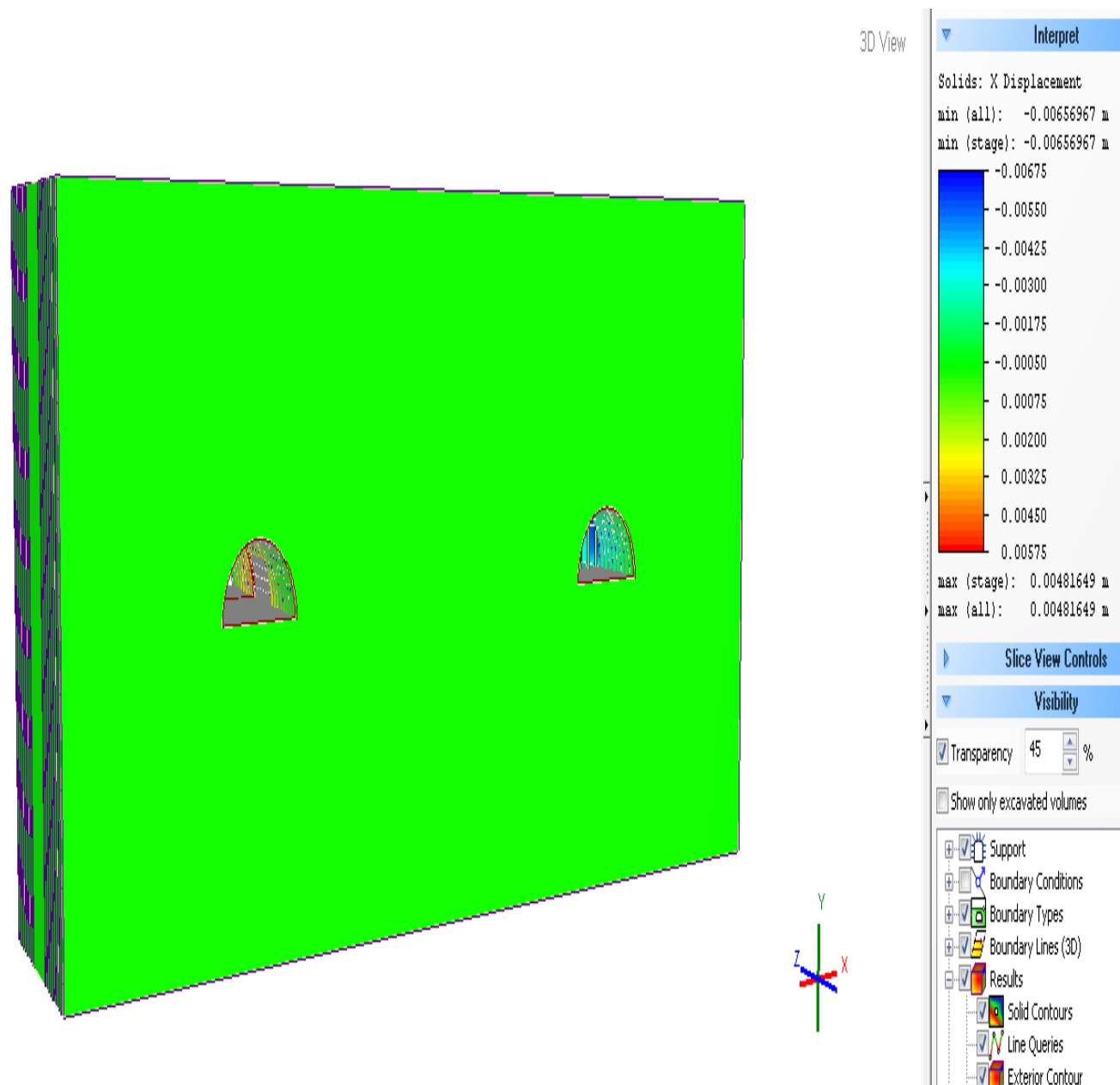
Η εικόνα που εμφανίζεται είναι η εξής:



Παρατηρούμε ότι γύρω από την εκσκαφή μας οι μετακινήσεις του περιβάλλοντος πετρώματος είναι μηδενικές.

Θα δούμε τώρα τις μετακινήσεις του πετρώματος εξωτερικά της εκσκαφής κατά τον άξονα X.

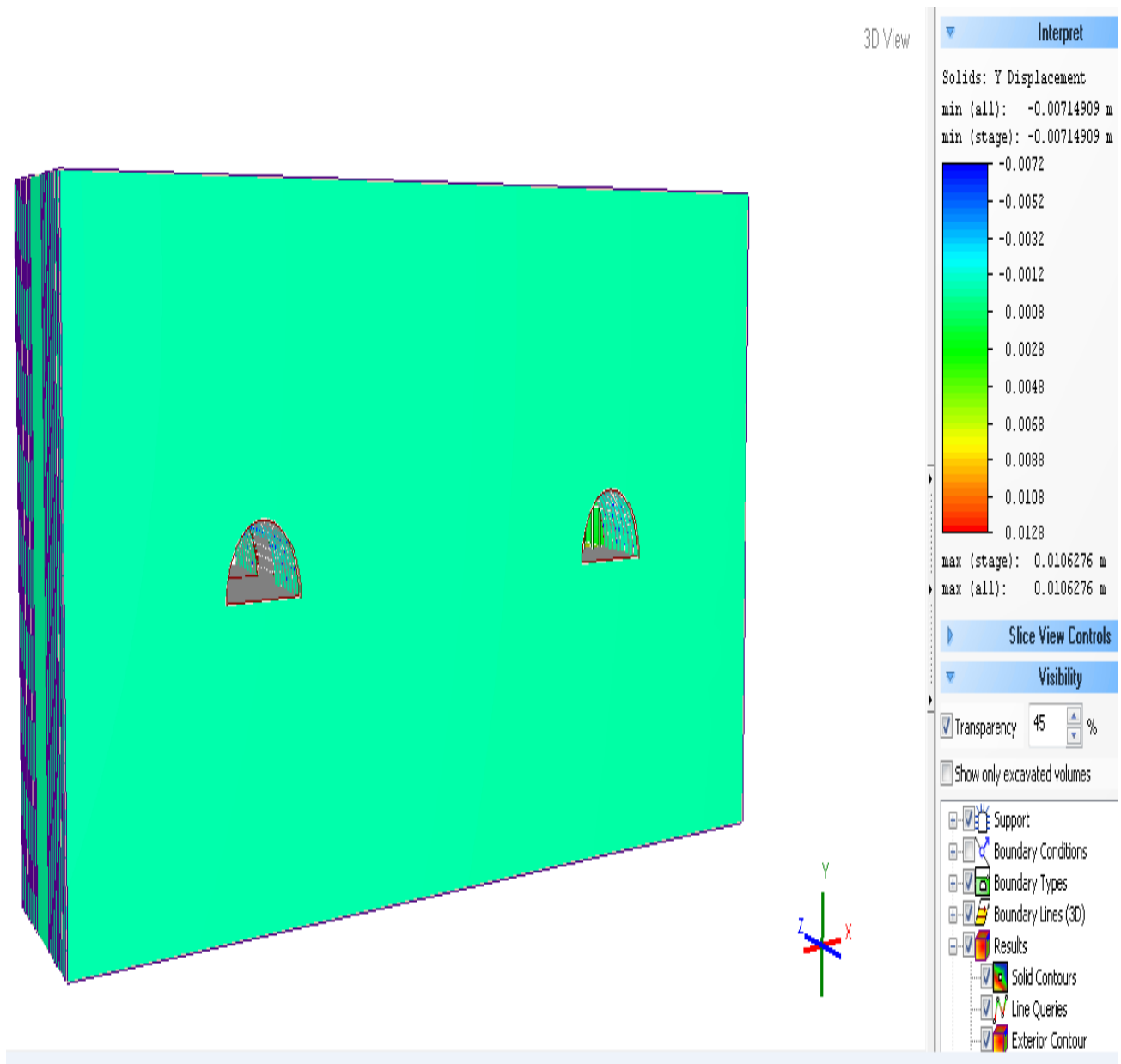
Επιλέγουμε στο μενού Element: Solids και στο μενού Data Type: Solid Displacement→ X Displacement.



Παρατηρούμε ότι οι μέγιστες μετακινήσεις του πετρώματος κατά τον άξονα X εξωτερικά της εκσκαφής είναι περίπου 4,8 χιλιοστά (4,8mm).

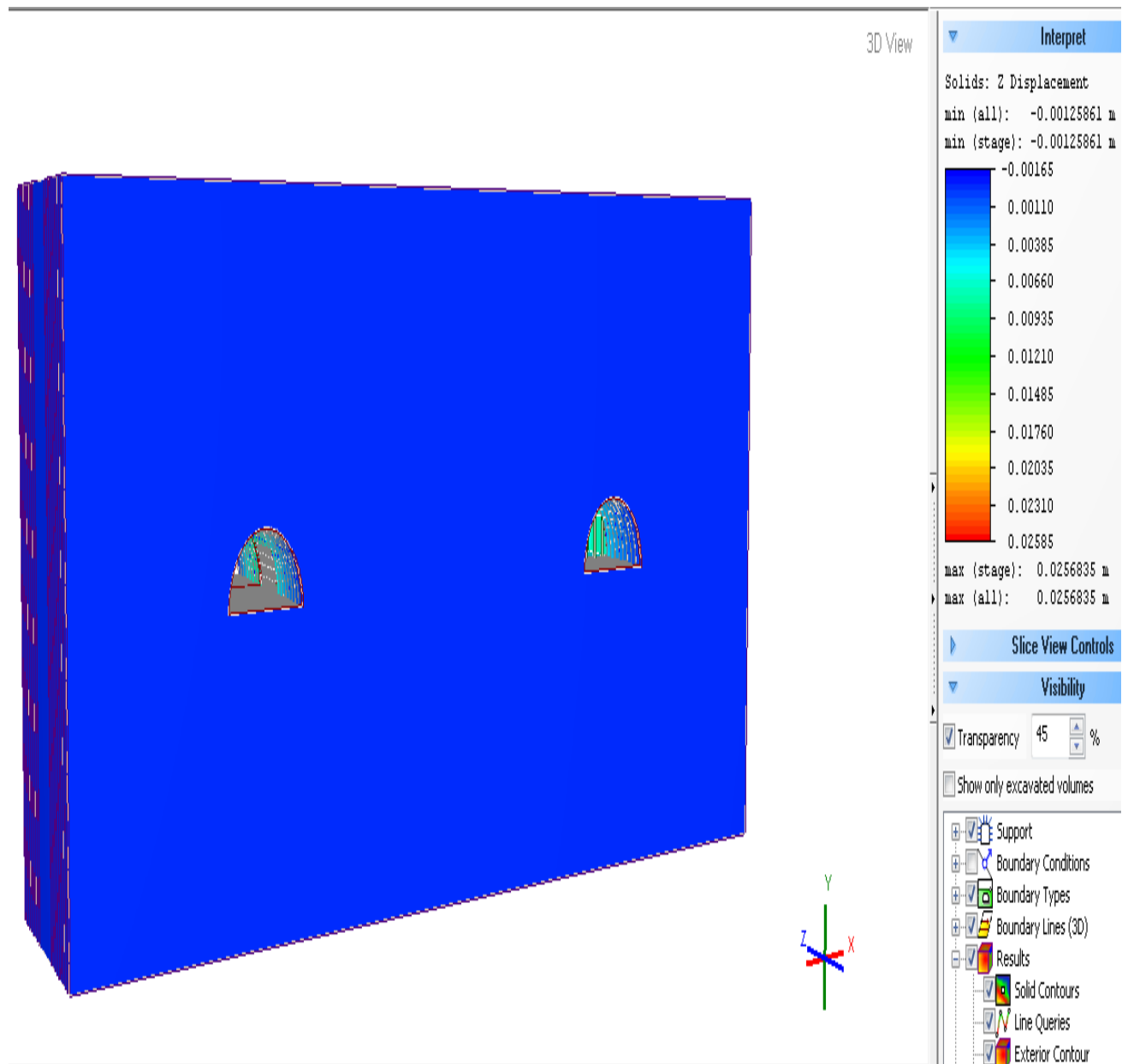
Προχωρούμε βλέποντας τις μετακινήσεις του περιβάλλοντος πετρώματος εξωτερικά της εκσκαφής κατά τον άξονα Y.

Επιλέγουμε στο μενού Element: Solids και στο μενού Data Type: Solid Displacement→ Y Displacement.



Παρατηρούμε ότι οι μέγιστες μετακινήσεις του πετρώματος κατά τον άξονα Y εξωτερικά της εκσκαφής είναι περίπου 1 εκατοστό (1cm).

Για να δούμε τις μετακινήσεις του περιβάλλοντος πετρώματος κατά τον άξονα Z επιλέγουμε από το μενού Element: Solids και από το μενού Data Type: Solid Displacement→ Z Displacement.

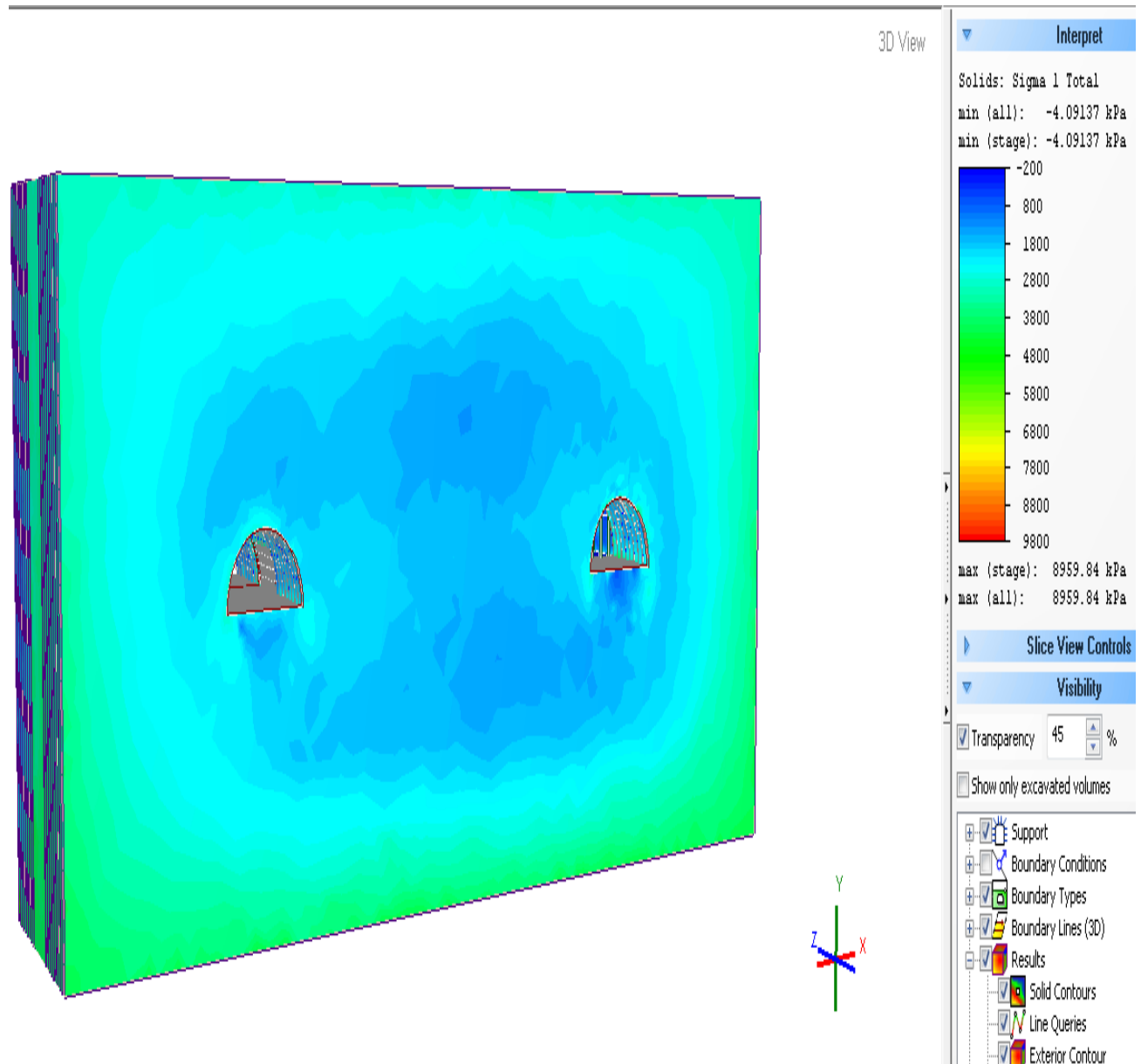


Βλέπουμε ότι οι μετακινήσεις του πετρώματος κατά τον άξονα Z εξωτερικά της εκσκαφής είναι μηδενικές.

Θα δούμε τώρα το ύψος και την κατανομή της κύριας τάσης (σ_1) έξω από την εκσκαφή μας.

Επιλέγουμε από το μενού Element: Solids και από το μενού Data Type: Solid Total Stress \rightarrow Sigma 1 Total.

Η εικόνα που λαμβάνουμε είναι η εξής:

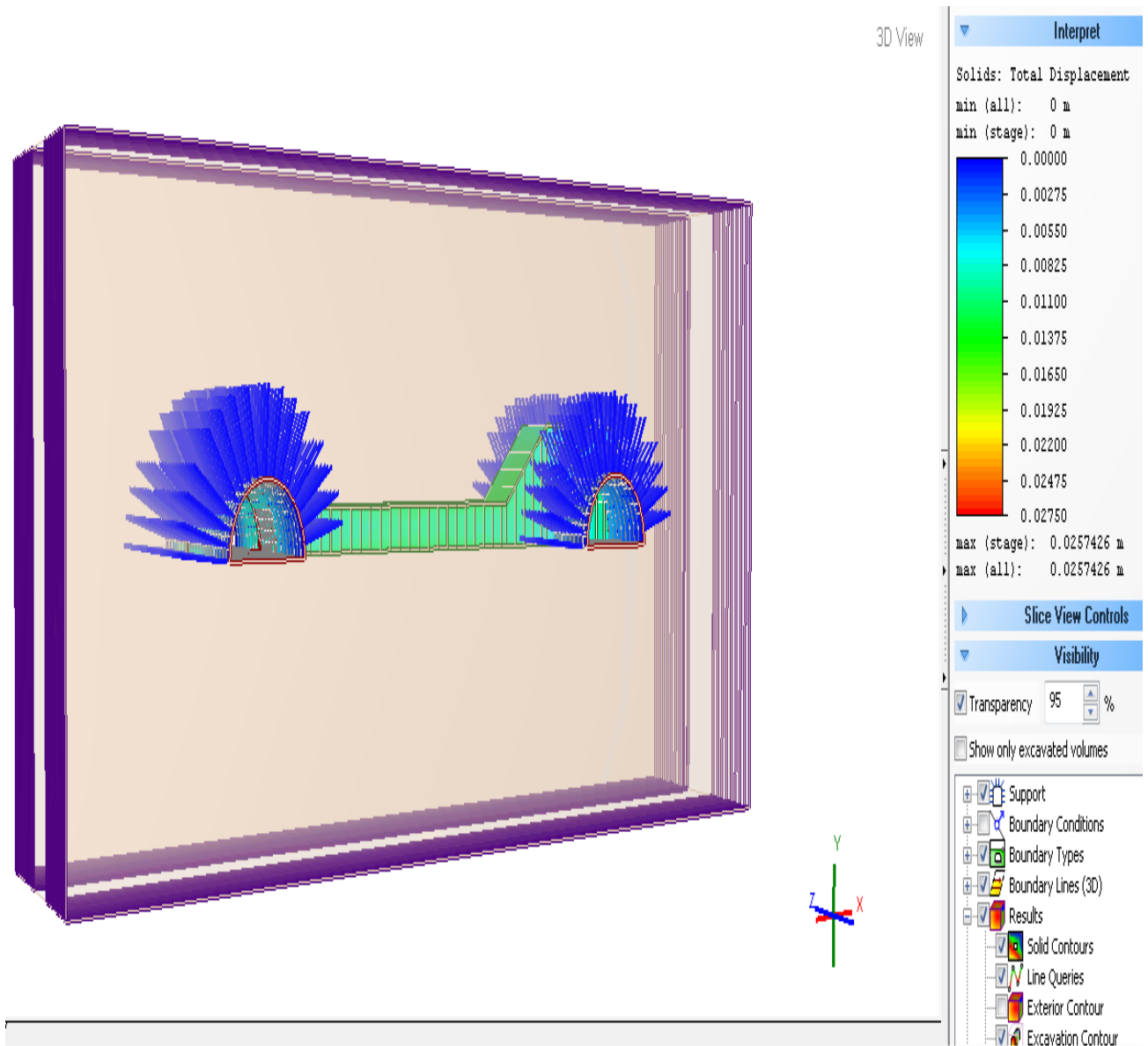


Από το διάγραμμα στα δεξιά της οθόνης φαίνεται ότι η μέγιστη τιμή της κύριας τάσης (σ_1) εξωτερικά της εκσκαφής μας είναι περίπου 3MPa.

Ενεργοποιούμε πλέον το εσωτερικό περίγραμμα της εκσκαφής. Επιλέγουμε Interpret→ Show Excavation Contour.

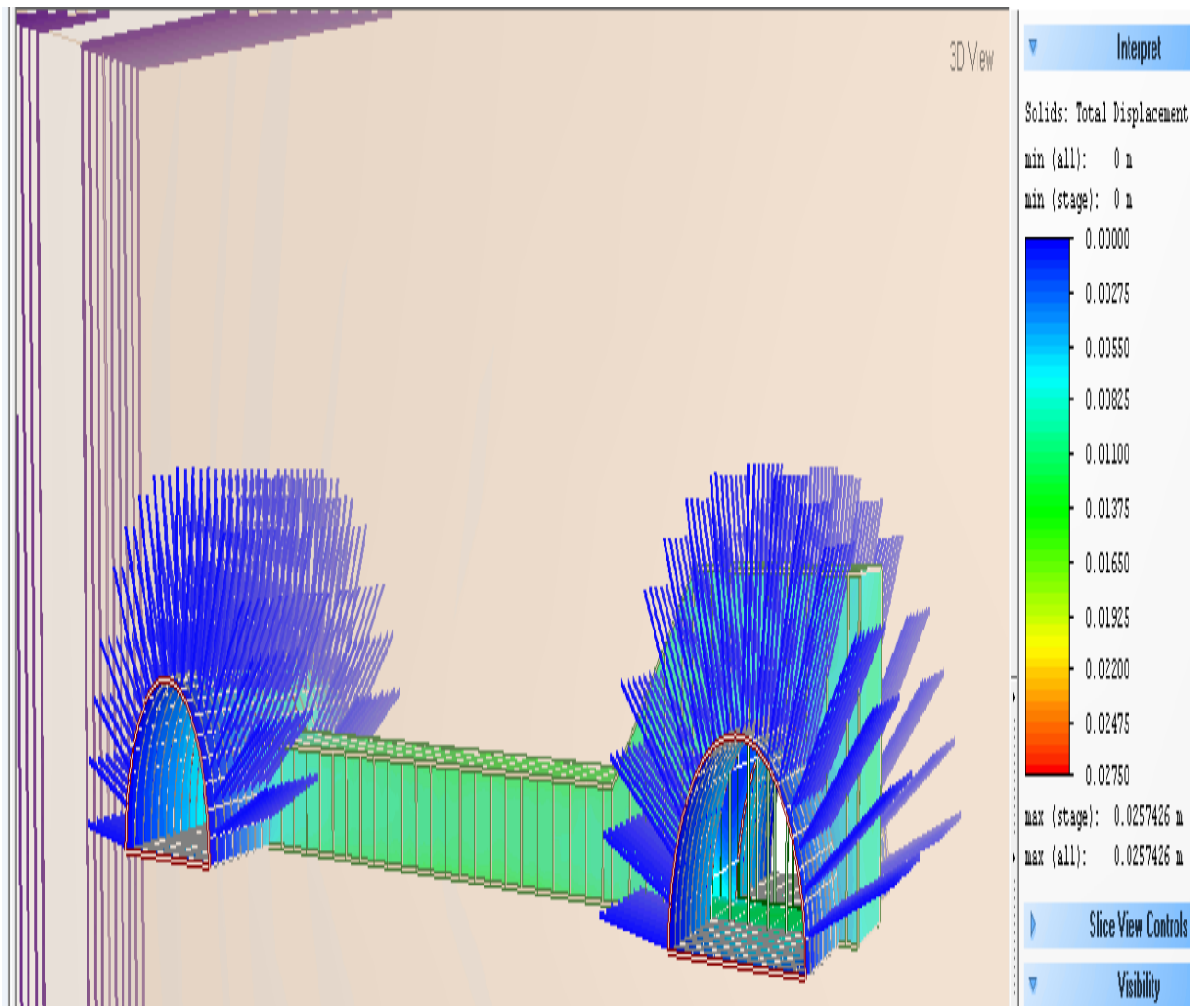
Από τα μενού στα πάνω δεξιά της οθόνης επιλέγουμε Element: Solids και Data Type: Solid Displacement→Total Displacement.

Η εικόνα που εμφανίζεται είναι η εξής:



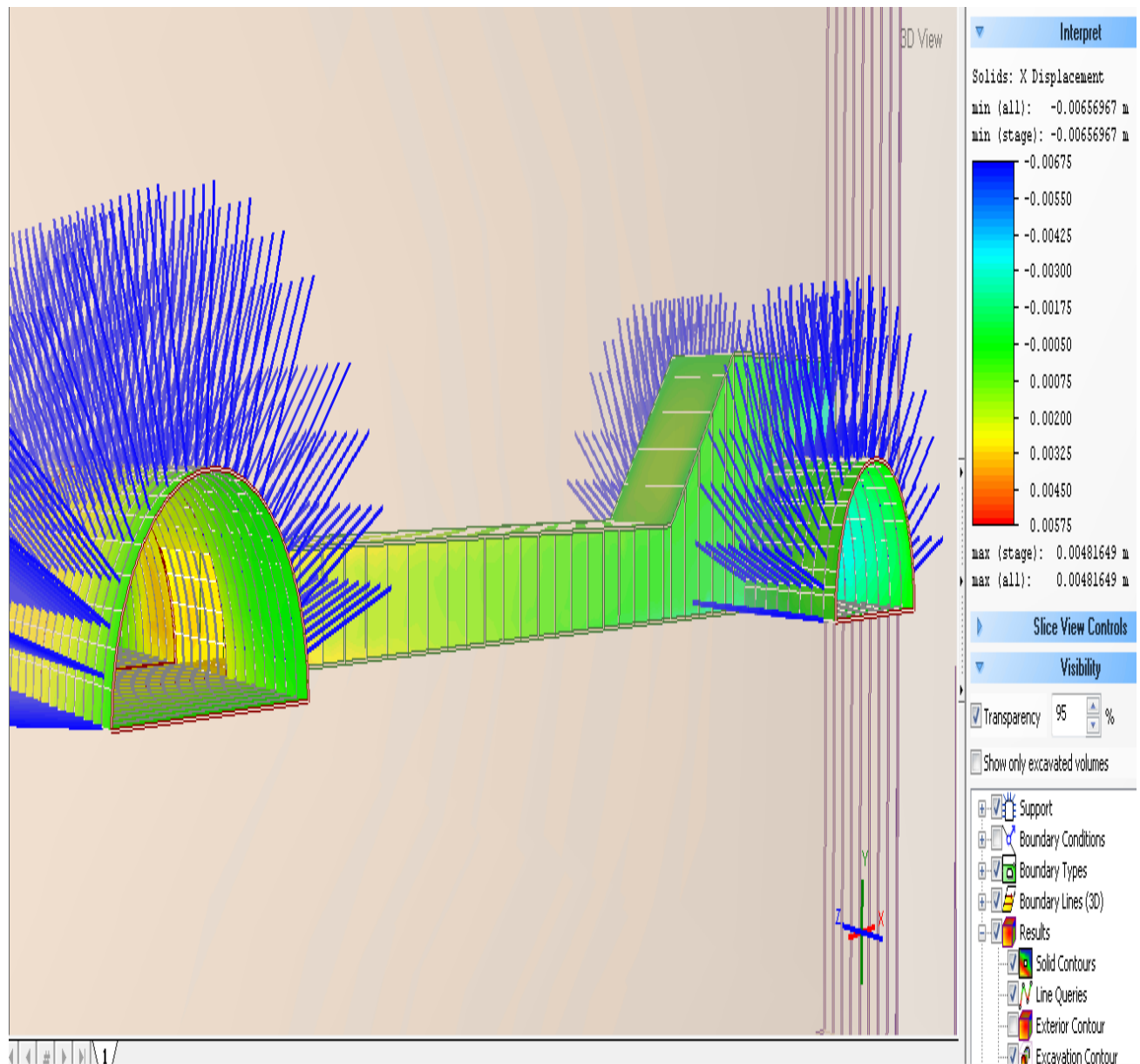
Παρατηρούμε ότι οι μετακινήσεις στην συνδετήρια σήραγγα (VCP), στην περιοχή διευρούμενης διατομής (trumpet) καθώς και στον θάλαμο ενδιάμεσης προσβολής (chamber) κυμαίνονται μεταξύ 1 έως 1,5 εκατοστών (1-1,5cm).

Οι μέγιστες μετακινήσεις ωστόσο, που αντιστοιχούν στην περιοχή της κύριας σήραγγας είναι της τάξης των 2,5 εκατοστών (2,5cm) περίπου.



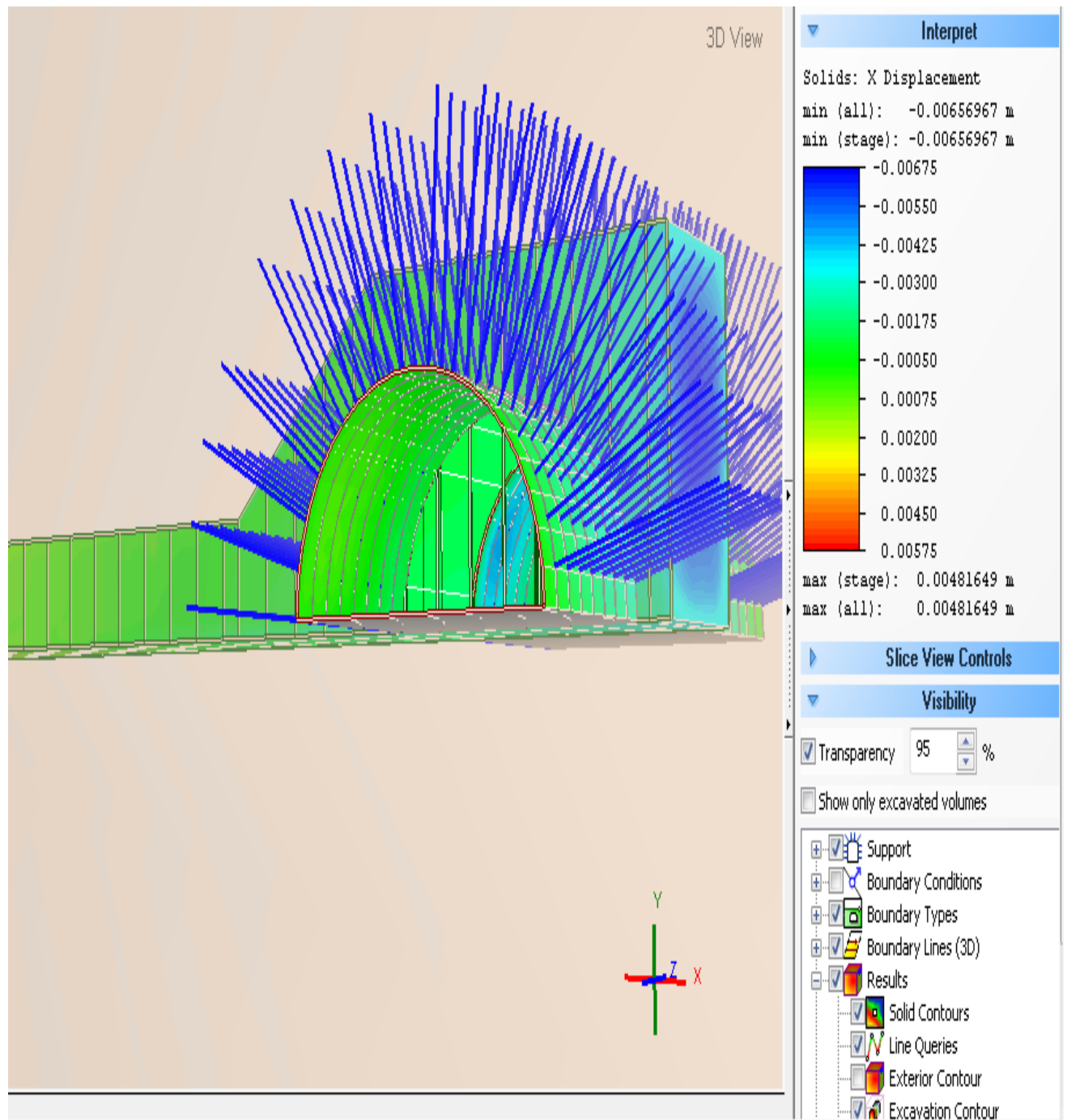
Θα δούμε τώρα τις μετακινήσεις εντός της εκσκαφής κατά τον άξονα X.
Από τα μενού στα πάνω δεξιά της οθόνης επιλέγουμε Element: Solids και
Data Type: Solid Displacement→X Displacement.

Λαμβάνουμε το εξής αποτέλεσμα:



Βλέπουμε ότι οι μετακινήσεις εντός της εκσκαφής κατά τον άξονα X παίρνουν την μέγιστη τιμή τους, περίπου 4,8 χιλιοστά (4,8mm) κοντά στην περιοχή που ο πρώτος κλάδος της κύριας σήραγγας (main tunnel) συνδέεται με την ενδιάμεση σήραγγα, καθώς και στο πρώτο τμήμα της συνδετήριας σήραγγας (cross passage).

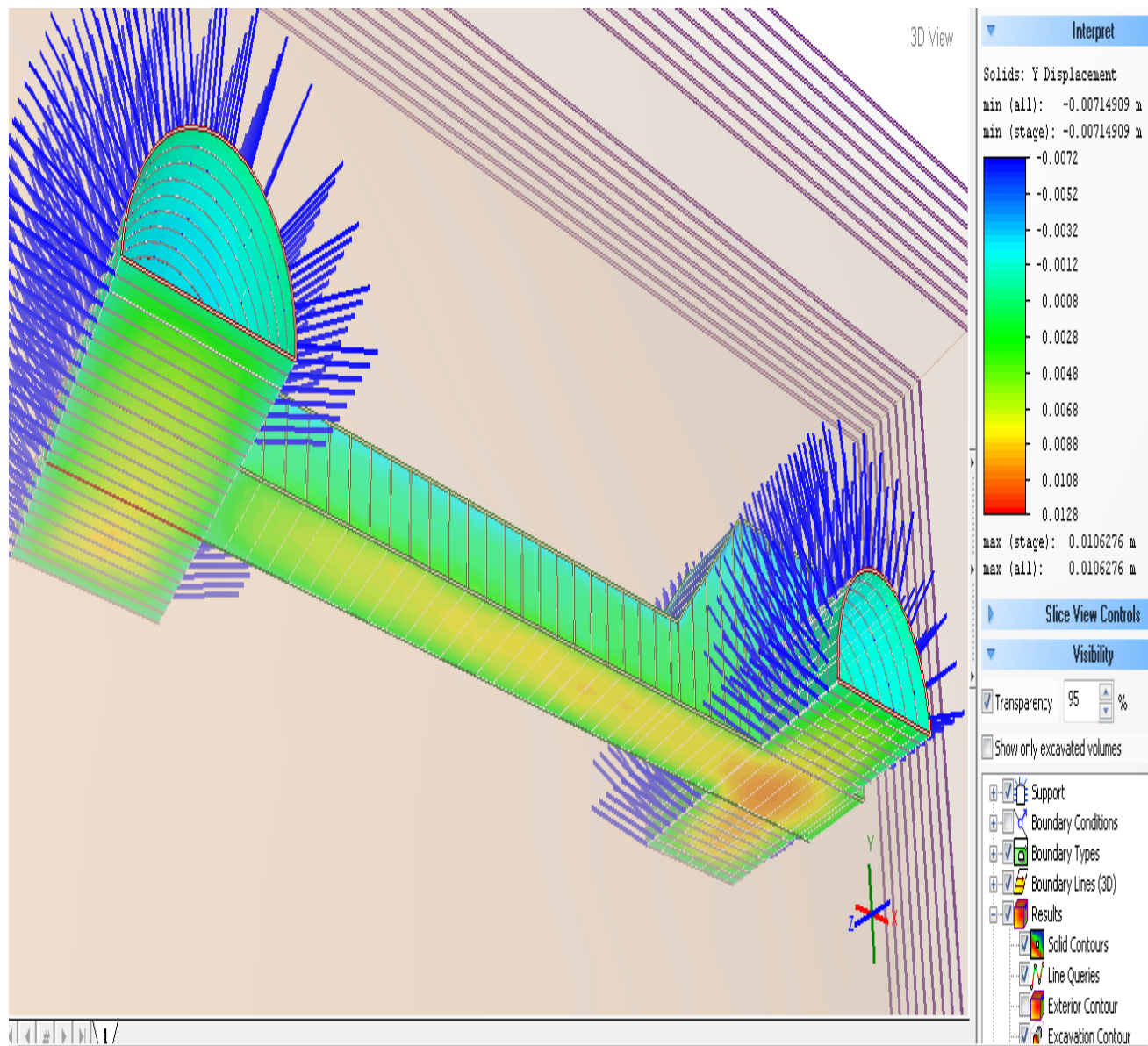
Θα δούμε τώρα τις μετακινήσεις κατά τον άξονα X στο εσωτερικό μέρος της εκσκαφής στην περιοχή που διασταυρώνεται ο θάλαμος (chamber) με τον δεύτερο κλάδο της κύριας σήραγγας.



Παρατηρούμε ότι στον θάλαμο ενδιάμεσης προσβολής έχουμε πολύ μικρές μετακινήσεις, περίπου 4 χιλιοστών (4mm). Αλλά και στον δεύτερο κλάδο της κύριας σήραγγας έχουμε πολύ μικρές μετακινήσεις κατά τον άξονα X (περίπου 5mm).

Κατόπιν επιλέγουμε από το μενού Element: Solids και από το μενού Data Type: Solid Displacement→ Y Displacement. Θα δούμε τις μετακινήσεις που συντελούνται μέσα στην εκσκαφή κατά τον άξονα Y.

Παίρνουμε το εξής αποτέλεσμα:

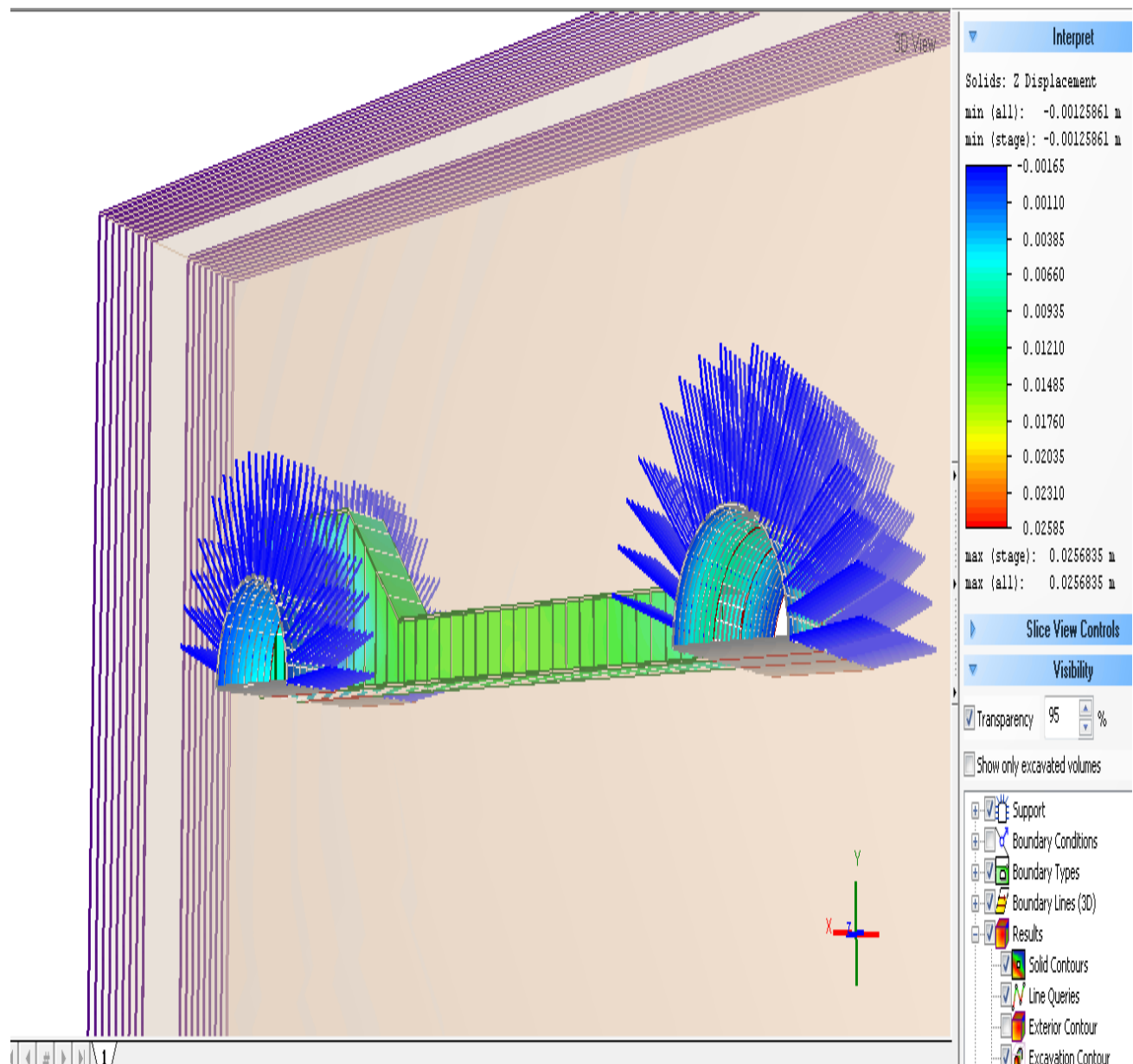


Βλέπουμε ότι η μέγιστη τιμή της μετακίνησης κατά τον άξονα Y συντελείται στο κάτω μέρος του θαλάμου (junction cavern) ενδιάμεσης προσβολής, καθώς και στο κάτω μέρος του δεύτερου κλάδου της κύριας σήραγγας, στον βόρειο αριστερό κλάδο (NLB) με κατεύθυνση προς τον Βορρά. Η τιμή της μέγιστης αυτής μετακίνησης είναι περίπου 1 εκατοστό (1cm). Επίσης στο κάτω μέρος του πρώτου κλάδου της κύριας σήραγγας και της συνδετήριας σήραγγας και της περιοχής διευρούμενης διατομής έχουμε μετακινήσεις της τάξης των 7 χιλιοστών (7mm) περίπου. Σε όλη την υπόλοιπη εκσκαφή οι μετακινήσεις είναι αμελητέες, μικρότερες των 3 χιλιοστών (3mm).

Έπειτα θα δούμε τις μετακινήσεις που έχουμε μέσα στην εκσκαφή κατά τον άξονα Z.

Επιλέγουμε από το μενού Element: Solids και από το μενού Data Type: Solid Displacement→ Z Displacement.

Θα δούμε την παρακάτω εικόνα:

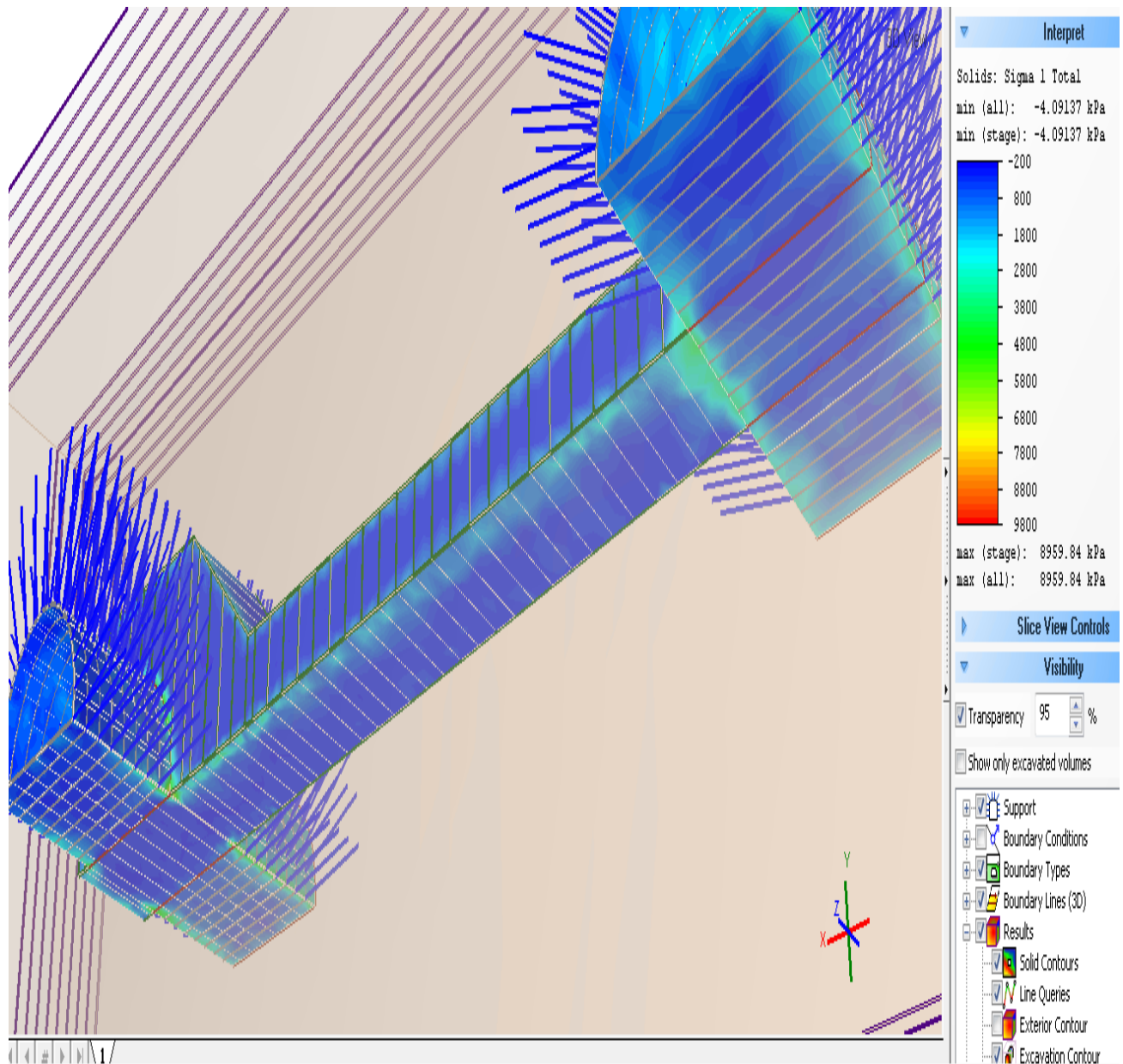


Παρατηρούμε ότι στην συνδετήρια σήραγγα οι μετακινήσεις κατά τον άξονα Z είναι περίπου 14 χιλιοστά (14mm). Στον θάλαμο ενδιάμεσης προσβολής είναι ακόμη μικρότερες, περίπου 6 χιλιοστά (6mm).

Έπειτα, έχοντας ενεργοποιημένο πλέον το εσωτερικό μέρος της εκσκαφής (Interpret→ Show Excavation Contour) θα δούμε την διακύμανση της τιμής της κύριας τάσης (σ_1) καθώς και τις περιοχές στις οποίες αυτή παίρνει την μέγιστη τιμή της.

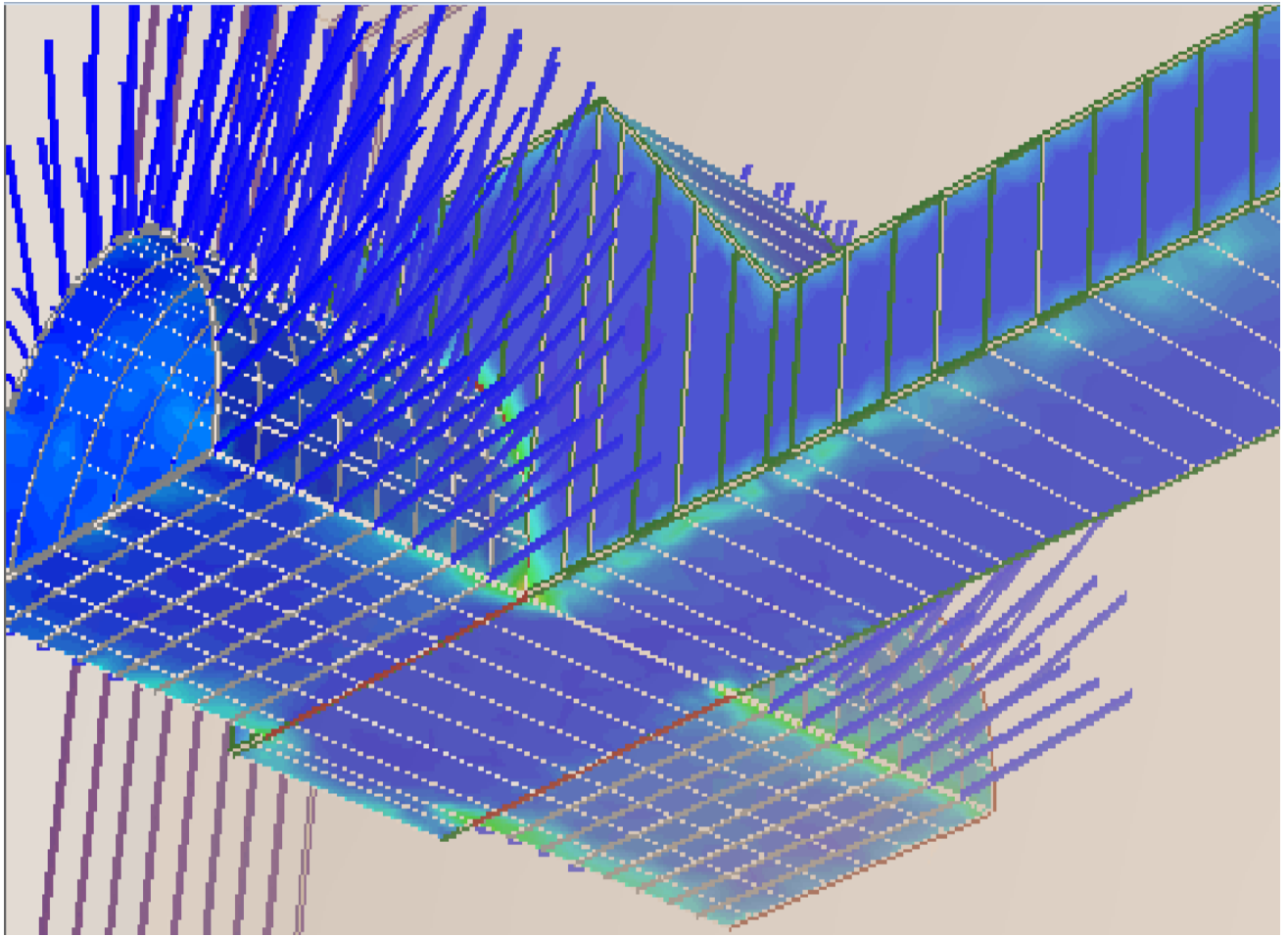
Επιλέγουμε από το μενού Element: Solids και από το μενού Data Type: Solid Total Stress→ Sigma 1 Total.

Η εικόνα που βλέπουμε είναι η παρακάτω:



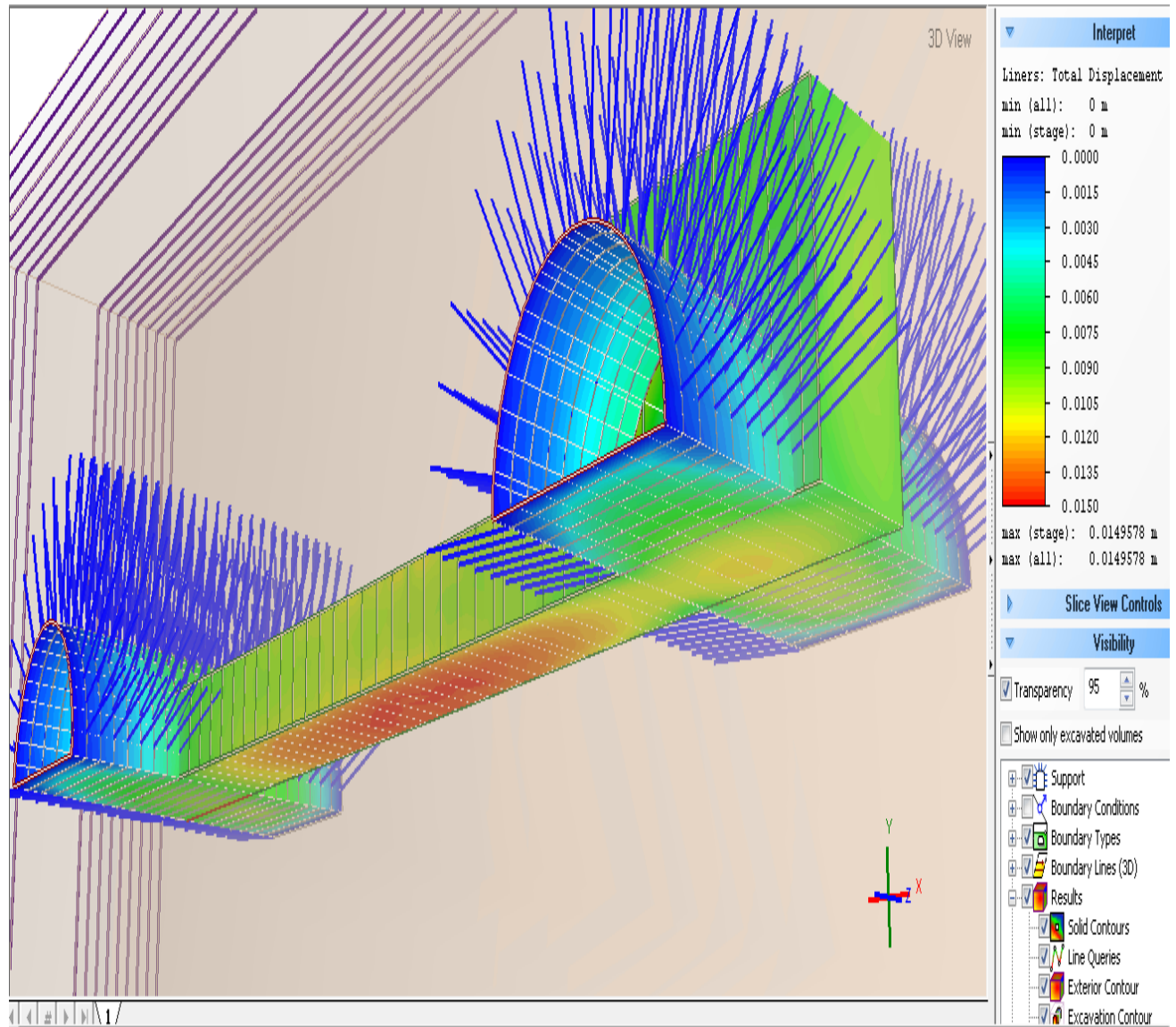
Παρατηρούμε ότι η μέγιστες τιμές της κύριας τάσης εμφανίζονται πρωτίστως στα σημεία σύνδεσης της περιοχής διευρούμενης διατομής (trumpet) με τον θάλαμο ενδιάμεσης προσβολής καθώς και στα σημεία σύνδεσης του πρώτου κλάδου της κύριας σήραγγας με την συνδετήρια σήραग्ga (VCP), αλλά και δευτερευόντως στα γωνιακά σημεία της όλης κατασκευής, κάτι απολύτως αναμενόμενο.

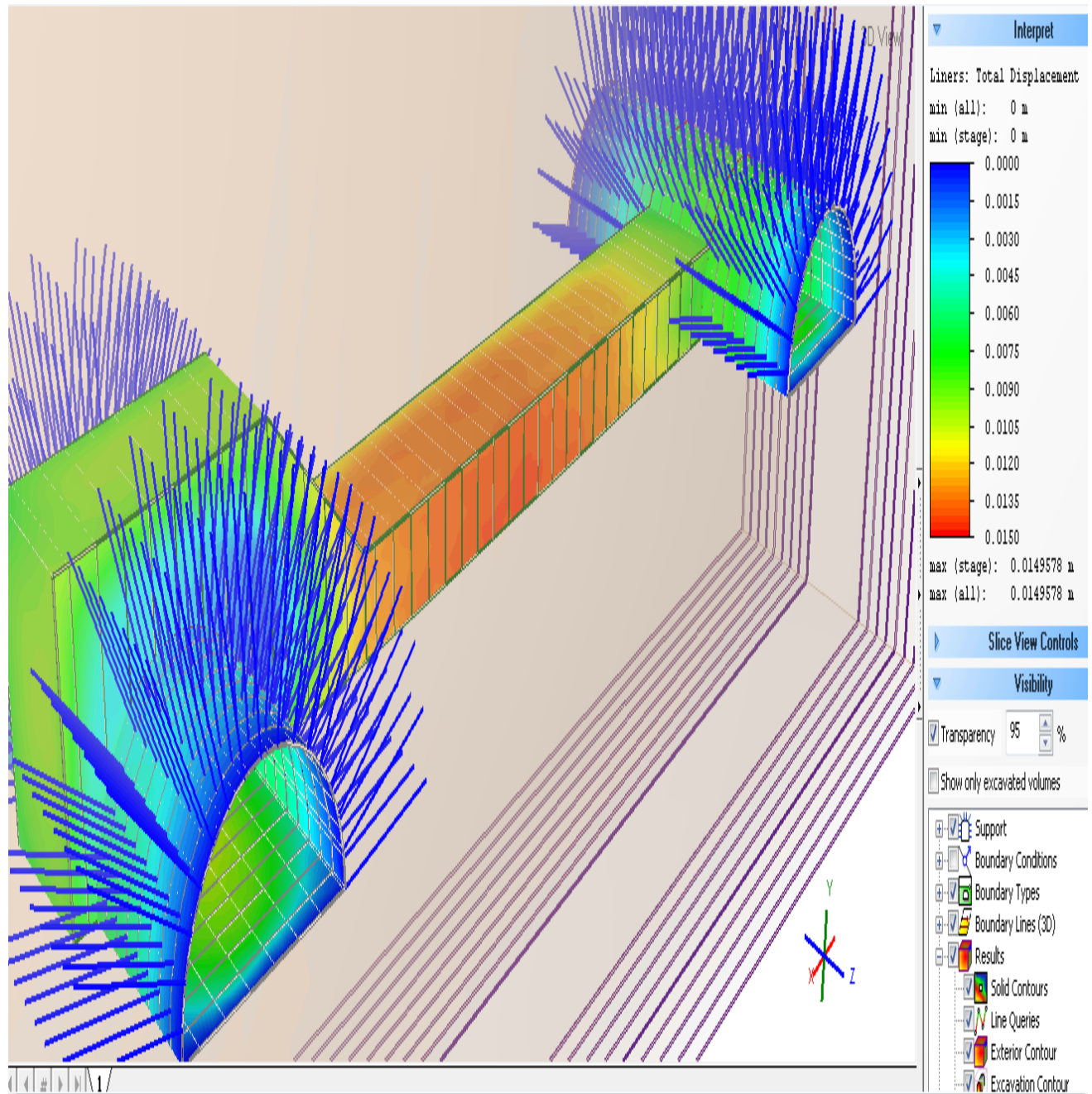
Στην υπόλοιπη κατασκευή οι τιμές της κύριας τάσης είναι σχεδόν μηδενικές. Η μέγιστη τιμή της κύριας τάσης που εμφανίζεται είναι περίπου 9MPa.



Ακολουθως, θα εξετάσουμε την αντίδραση του σκυροδέματος που έχει τοποθετηθεί στην κατασκευή.

Στο πάνω δεξιά της οθόνης μας θα επιλέξουμε από το μενού Element: Liners και από το μενού Data Type: Total Displacement.



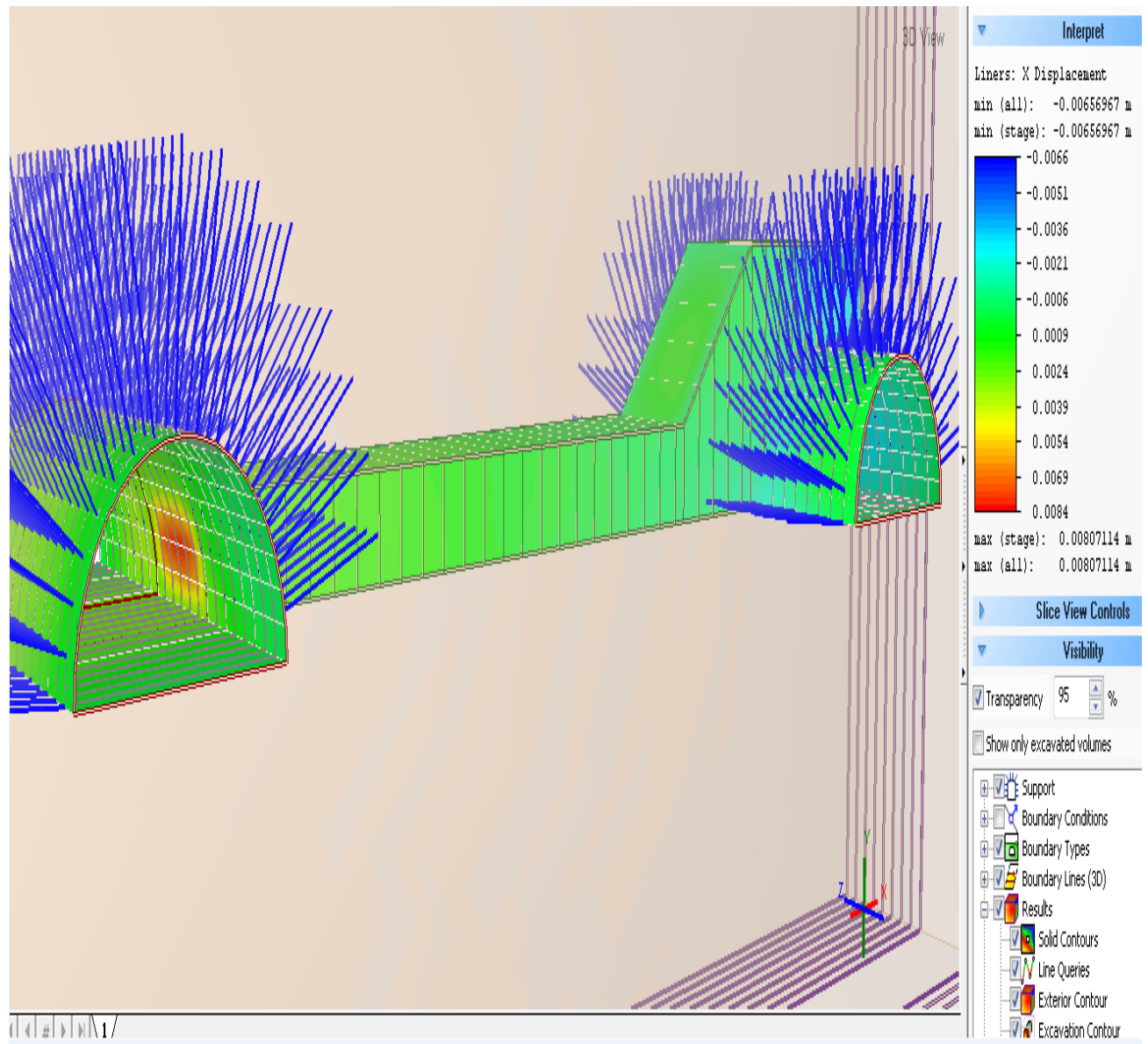


Βλέπουμε ότι η μέγιστη τιμή της μετακίνησης, που είναι 15 χιλιοστά (15mm) περίπου, βρίσκεται στο κάτω, στο πίσω και στο επάνω μέρος της συνδετήριας σήραγγας.

Στο κάτω μέρος των δύο κλάδων της κύριας σήραγγας και στην υπόλοιπη περιοχή της συνδετήριας σήραγγας οι μετακινήσεις είναι της τάξης των 10-11 χιλιοστών περίπου. Σε όλη την υπόλοιπη κατασκευή οι μετακινήσεις είναι σχεδόν μηδενικές.

Ας δούμε τώρα τις μετακινήσεις του σκυροδέματος κατά τον άξονα X. Επιλέγουμε από το μενού Element: Liners και από το μενού Data Type: X Displacement.

Λαμβάνουμε την παρακάτω εικόνα:

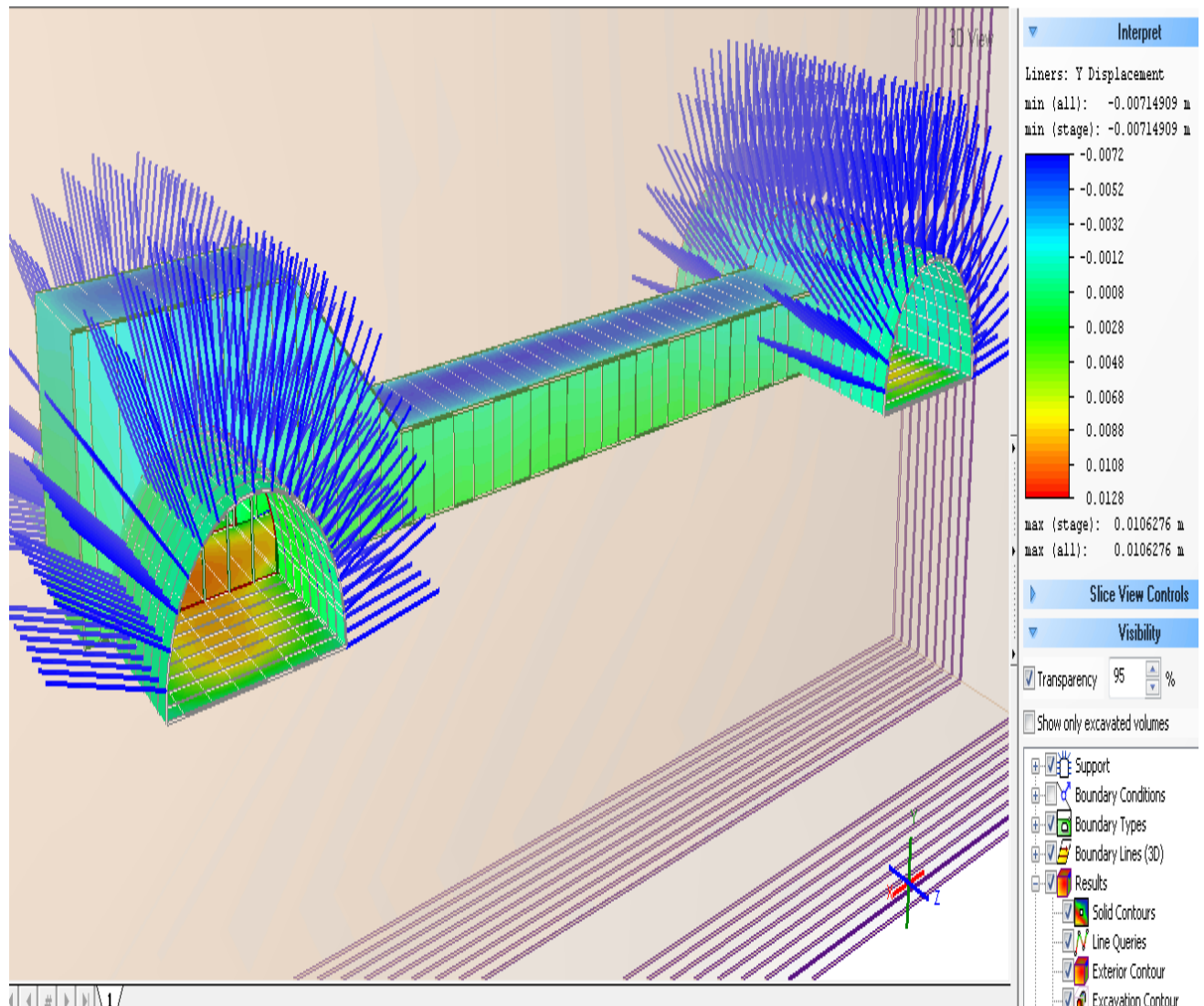


Βλέπουμε ότι η μέγιστη τιμή της μετακίνησης του σκυροδέματος κατά τον άξονα X –περίπου 8 χιλιοστά (8mm)- εντοπίζεται στο πρώτο τμήμα της συνδετήριας σήραγγας, αμέσως μετά το ξεκίνημα της από τον πρώτο κλάδο. Στην υπόλοιπη κατασκευή οι μετακινήσεις κυμαίνονται από μισό (0,5) έως 3

χιλιοστά περίπου.

Συνεχίζουμε με τα αποτελέσματα των μετακινήσεων του σκυροδέματος κατά τον άξονα Y.

Επιλέγουμε από το μενού Element: Liners και από το μενού Data Type: Y Displacement.

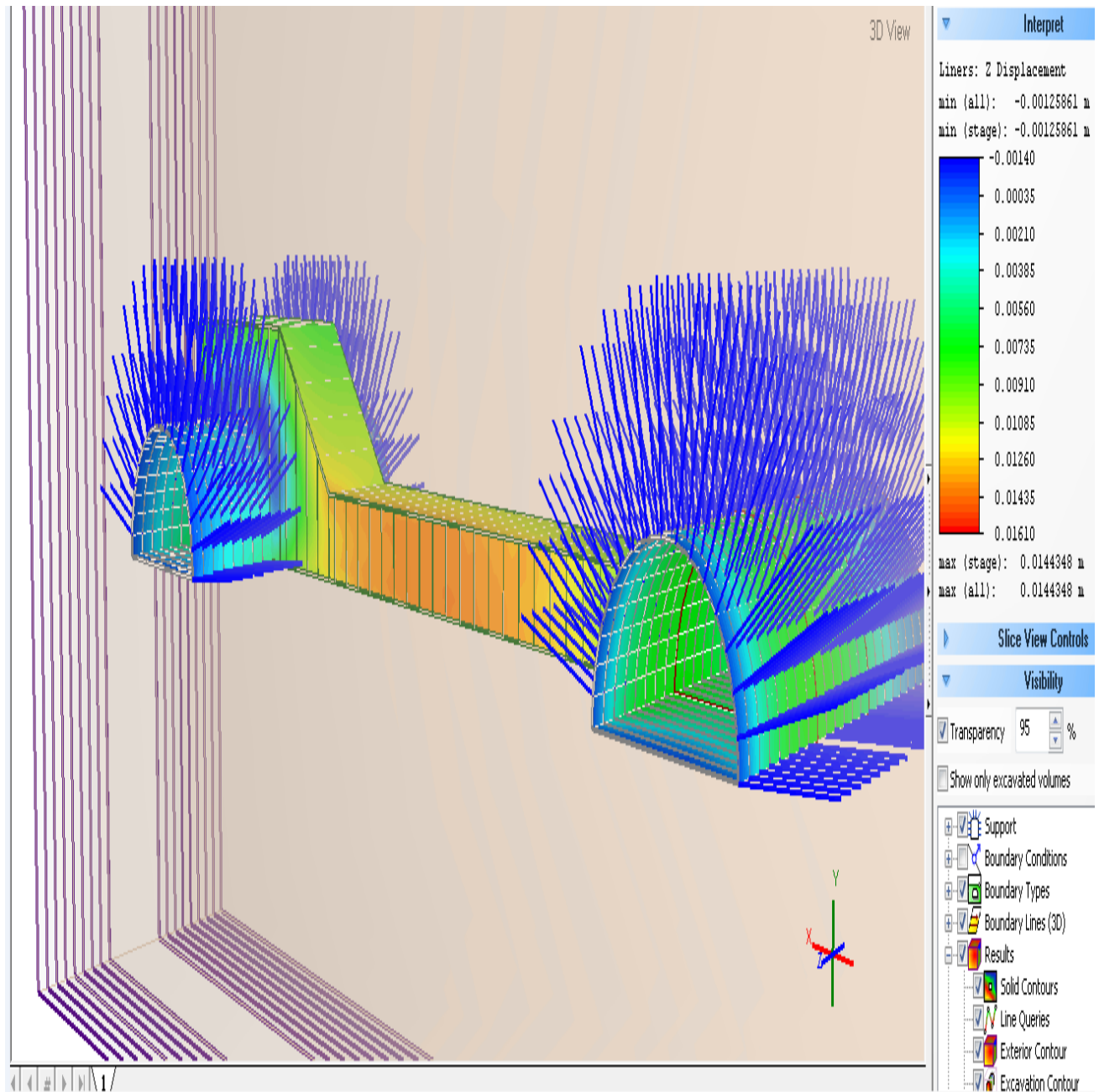


Στο δάπεδο του θαλάμου ενδιάμεσης προσβολής και της περιοχής διευρούμενης διατομής (trumpet), καθώς και στο δάπεδο του δεύτερου κλάδου της κύριας σήραγγας έχουμε τις μέγιστες μετακινήσεις, με τιμή περίπου 13 χιλιοστών (13mm).

Στο δάπεδο του πρώτου κλάδου της κύριας σήραγγας έχουμε μετακινήσεις 7 χιλιοστών (7mm) περίπου, ενώ στην υπόλοιπη κατασκευή οι

μετακινήσεις είναι αμελητέες, σχεδόν 1 χιλιοστό (1mm).

Οι μετακινήσεις κατά τον άξονα Z του σκυροδέματος που τοποθετήσαμε είναι οι παρακάτω:

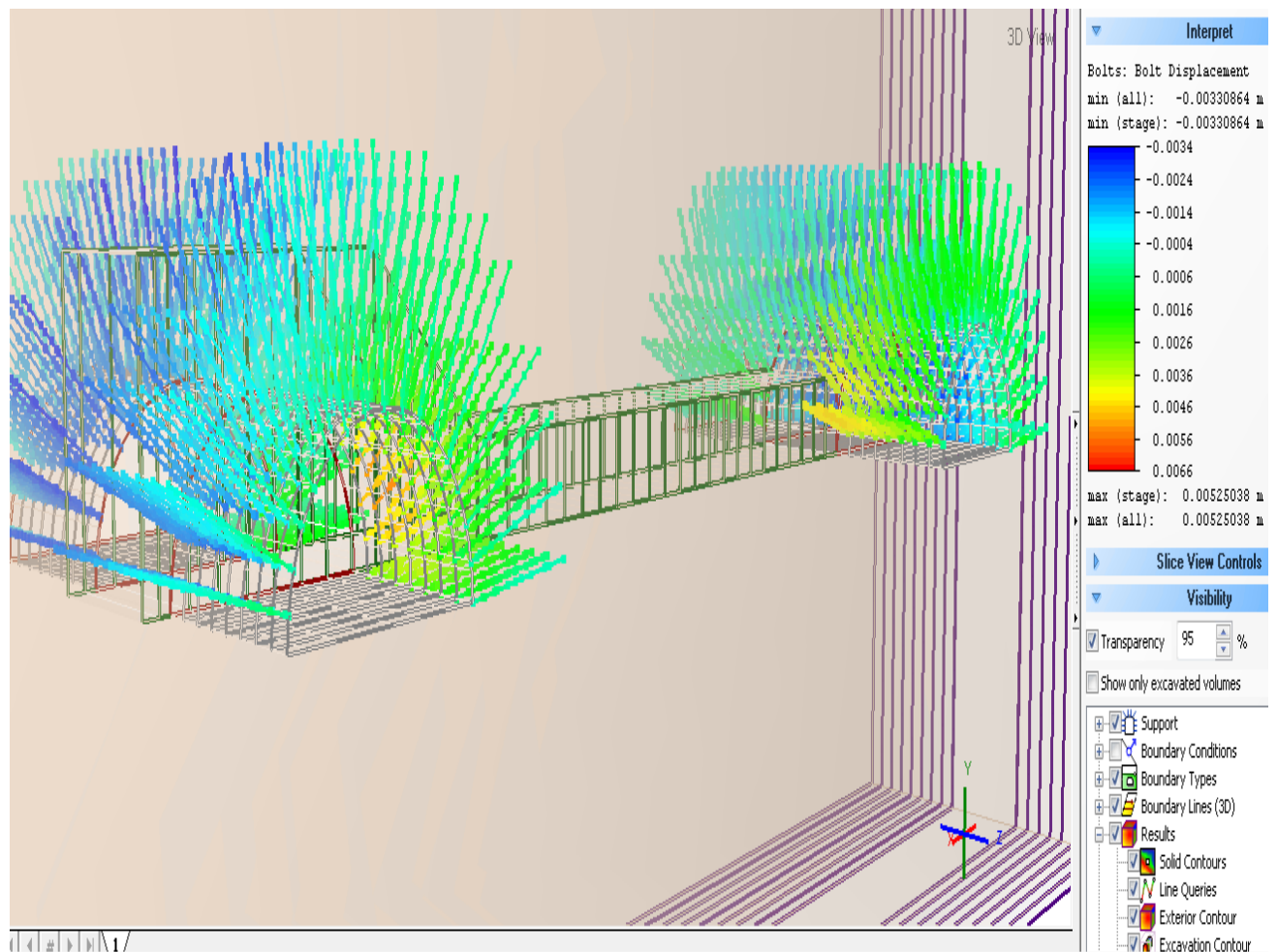


Βλέπουμε ότι η μετακίνηση παίρνει τη μέγιστη τιμή της (περίπου 1,5cm) στο μπροστινό μέρος της συνδετήριας σήραγγας (cross passage). Στις υπόλοιπες περιοχές δεν ξεπερνάει τα 7 χιλιοστά (7mm).

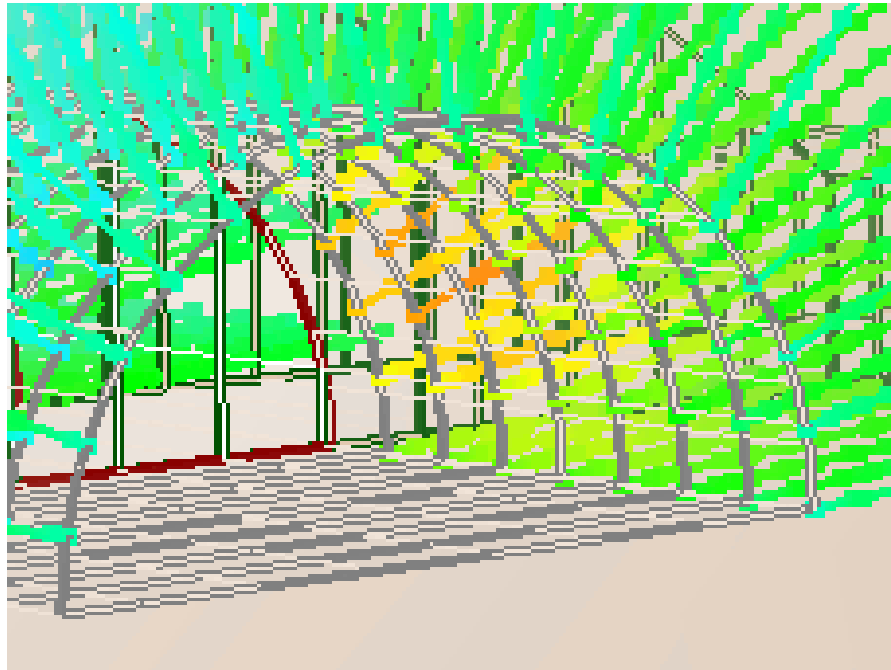
Περνάμε στην παρατήρηση των μετακινήσεων που υφίστανται τα τοποθετούμενα αγκύρια (Rockbolts).

Στο πάνω δεξιά μέρος της οθόνης επιλέγουμε στο μενού Element: Bolts και στο μενού Data Type: Bolt Displacement.

Βλέπουμε την εξής εικόνα:



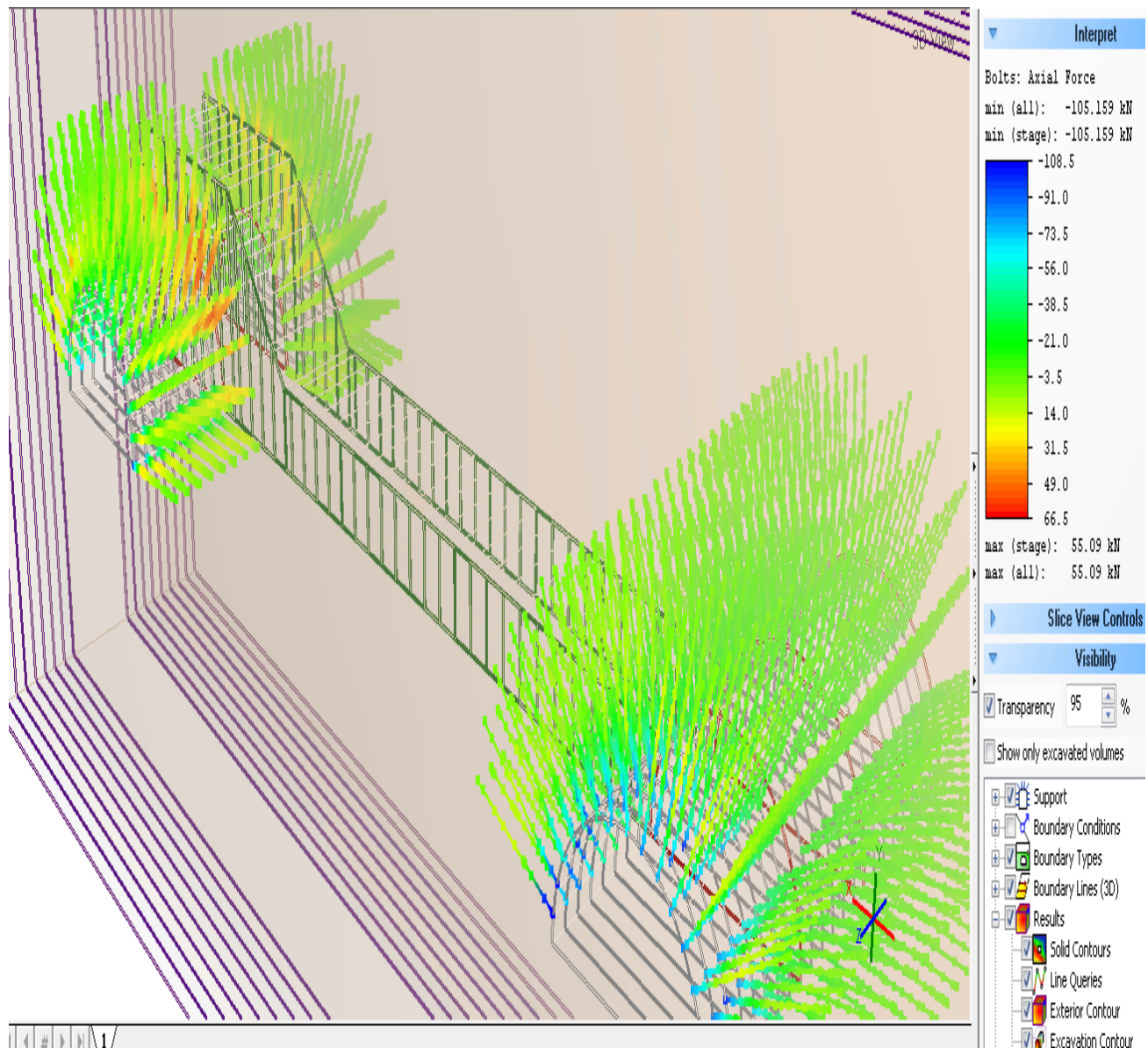
Η μέγιστη μετακίνηση που συντελείται είναι περίπου 5 χιλιοστά (5mm) και εντοπίζεται στα αγκύρια που “κοιτάνε” προς την συνδετήρια σήραγγα και στα κομμάτια της κύριας σήραγγας που κατευθύνονται προς τον Βορρά.



Βλέπουμε έπειτα την διακύμανση της τιμής της αξονικής δύναμης (axial force) των αγκυρίων.

Θα επιλέξουμε από το μενού Element: Bolts και από το μενού Data Type: Axial Force.

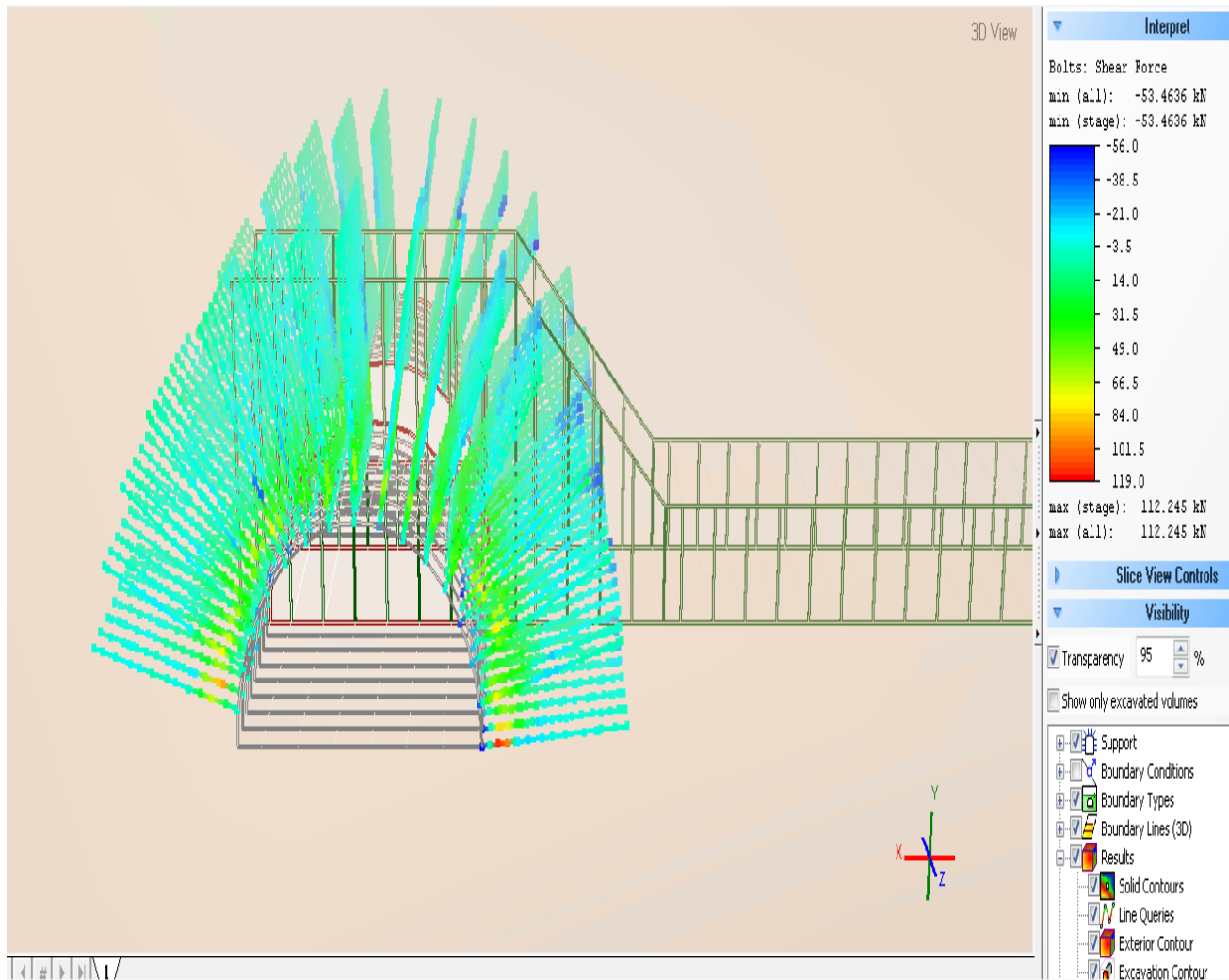
Η εικόνα που θα λάβουμε είναι η ακόλουθη:



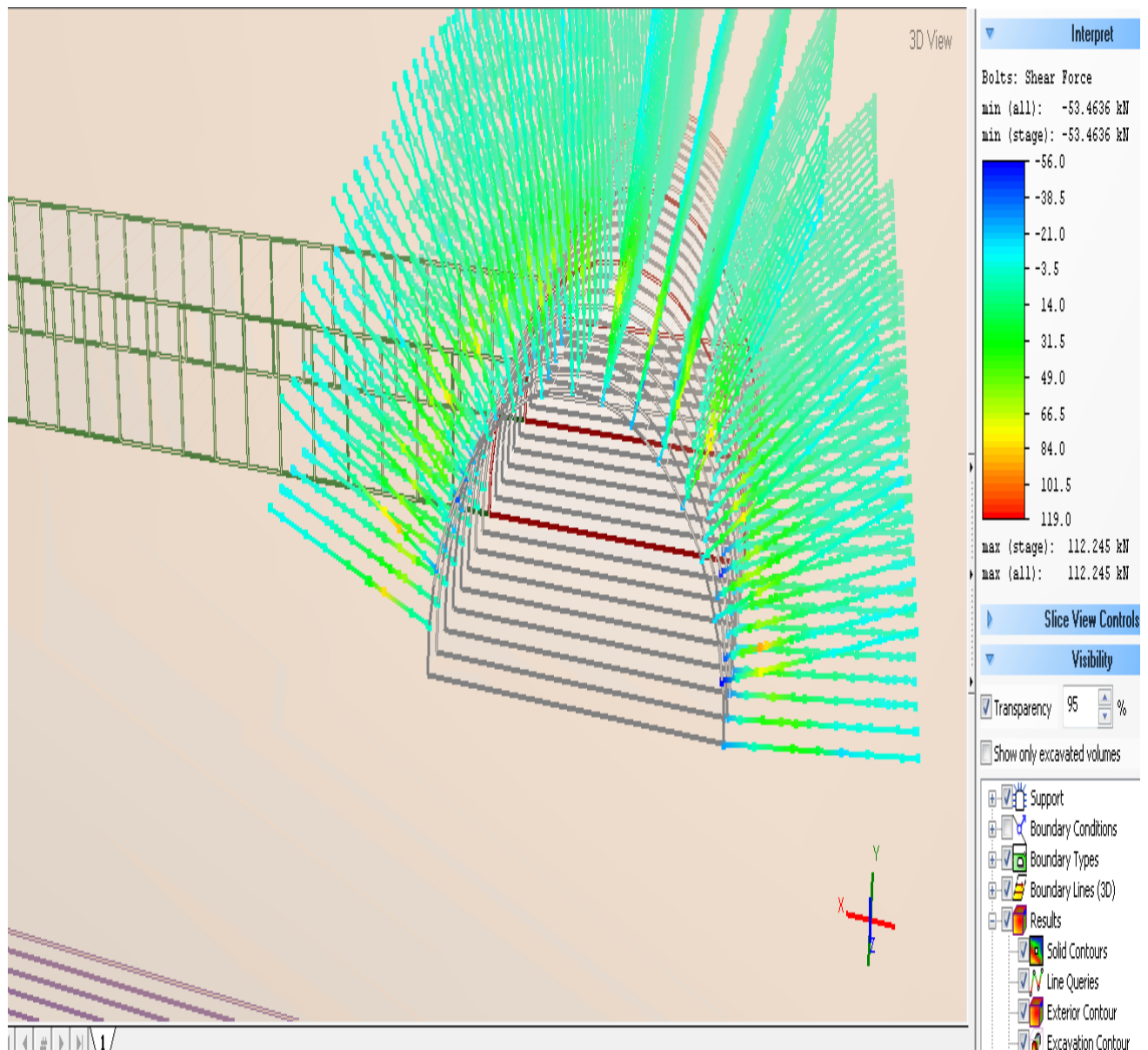
Η μέγιστη τιμή της αξονικής δύναμης των αγκυρίων είναι περίπου 55kN και εντοπίζεται στα αγκύρια που είναι τοποθετημένα στον δεύτερο κλάδο της κύριας σήραγγας κοντά στον θάλαμο ενδιάμεσης προσβολής (chamber).

Συνεχίζουμε με τα αποτελέσματα της διατμητικής δύναμης (shear force) των αγκυριών.

Επιλέγουμε από το μενού Element: Bolts και από το μενού Data Type: Shear Force.

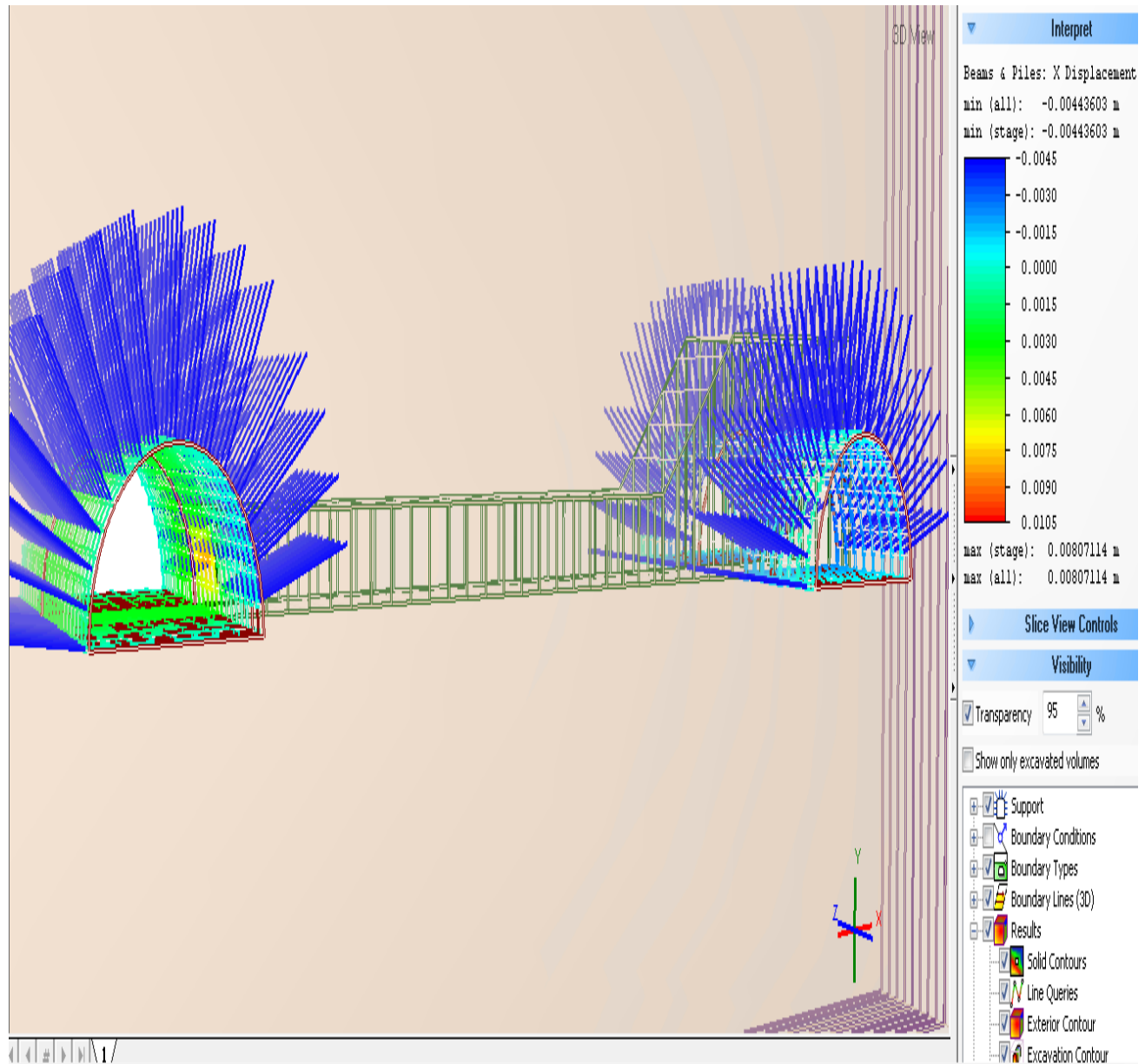


Η μέγιστη διατμητική δύναμη που παρατηρείται είναι 112kN και εντοπίζεται στον δεύτερο κλάδο της κύριας σήραγγας με κατεύθυνση προς Βορρά.

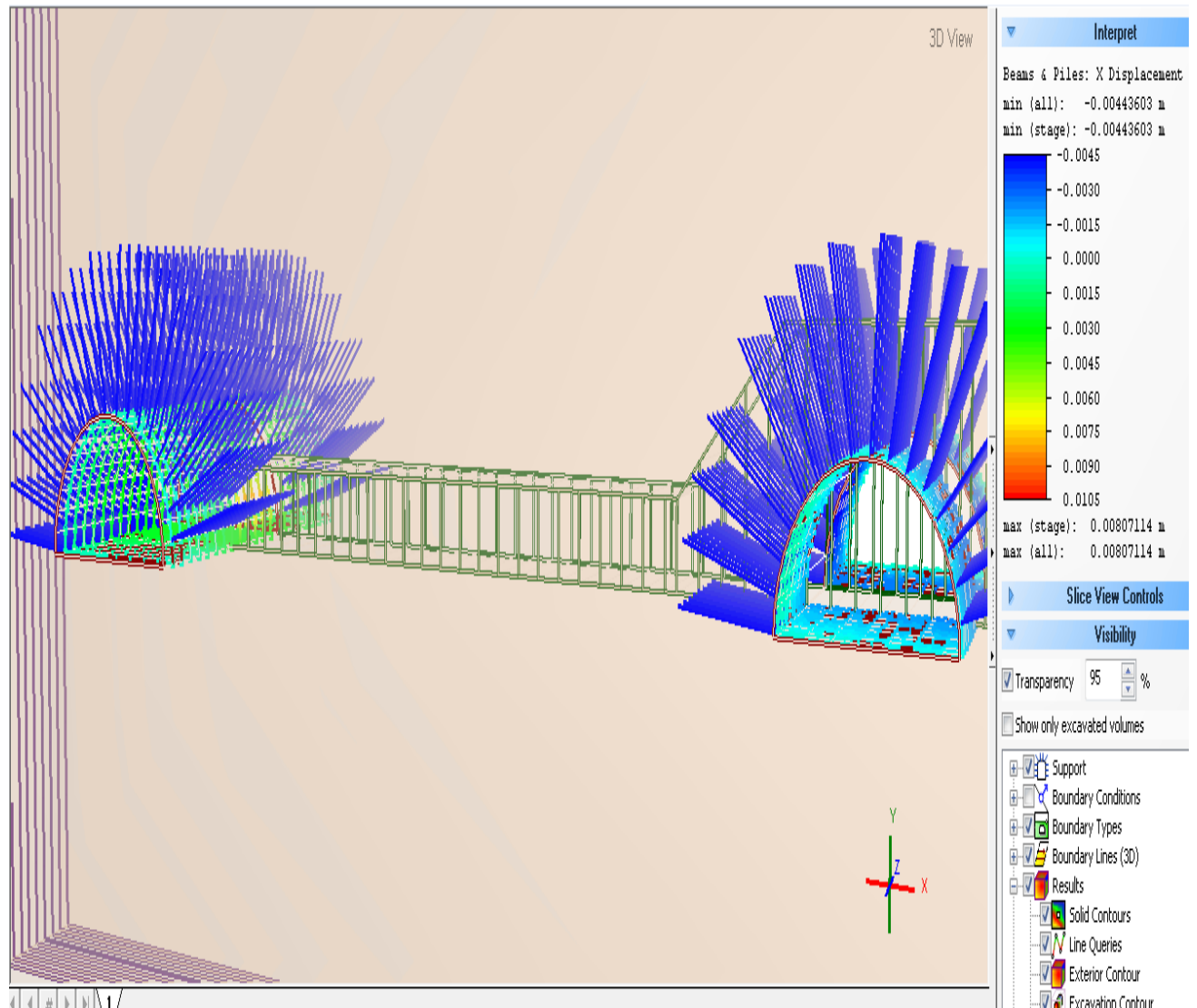


Στον πρώτο κλάδο της κύριας σήραγγας παρατηρούνται ελαφρώς μικρότερες διατμητικές δυνάμεις, της τάξης των 70kN περίπου.

Θα δούμε τώρα την μετακίνηση των πλαισίων κατά τον άξονα X. Επιλέγουμε από το μενού Element: Beams&Piles και από το μενού Data Type: X Displacement.

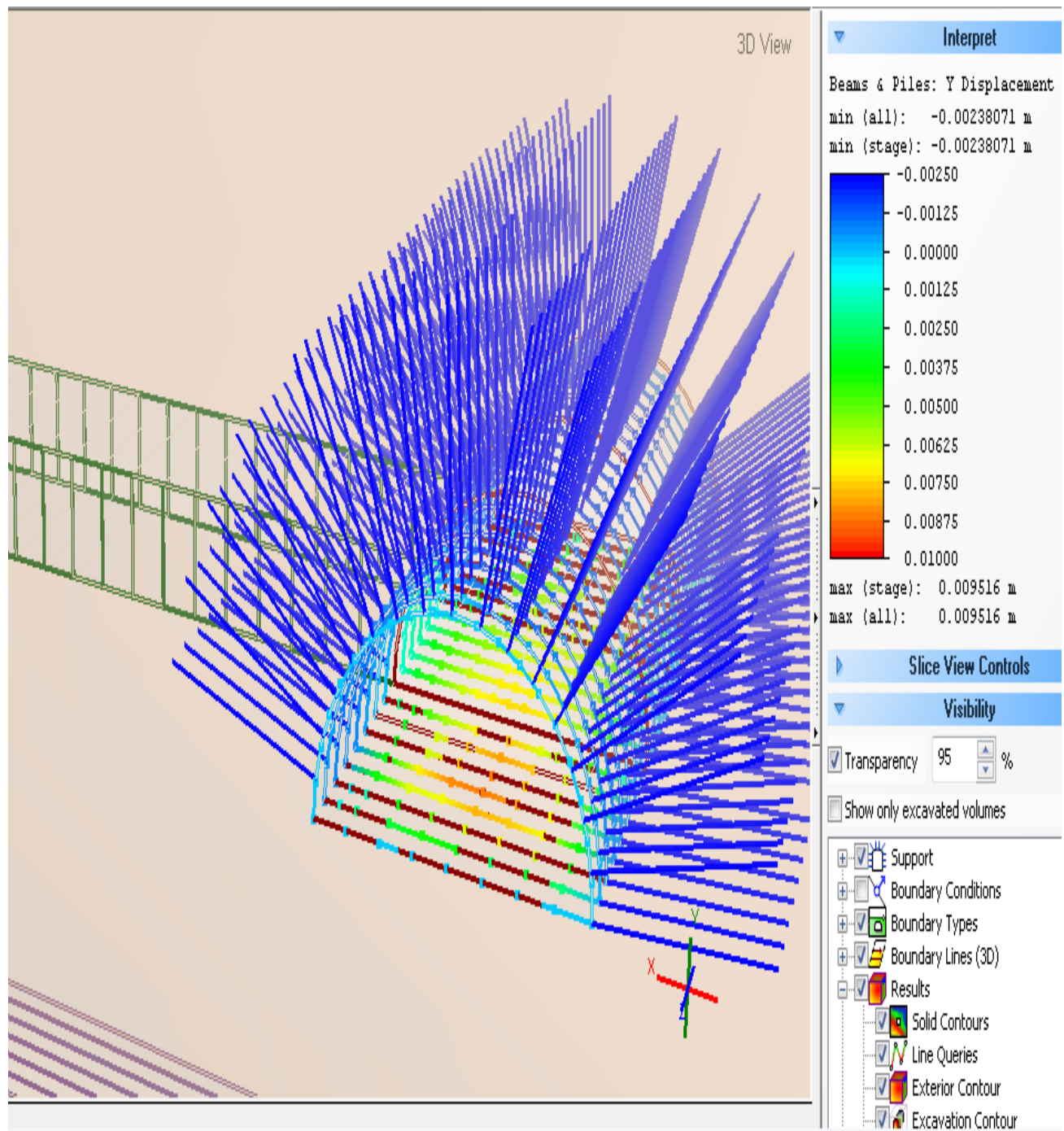


Παρατηρούμε ότι η μέγιστη τιμή της μετακίνησης των πλαισίων κατά τον άξονα X παρατηρείται στην περιοχή κοντά στην διασταύρωση του πρώτου κλάδου της κύριας σήραγγας με την συνδετήρια σήραγγα και είναι περίπου 8 χιλιοστά (8mm).

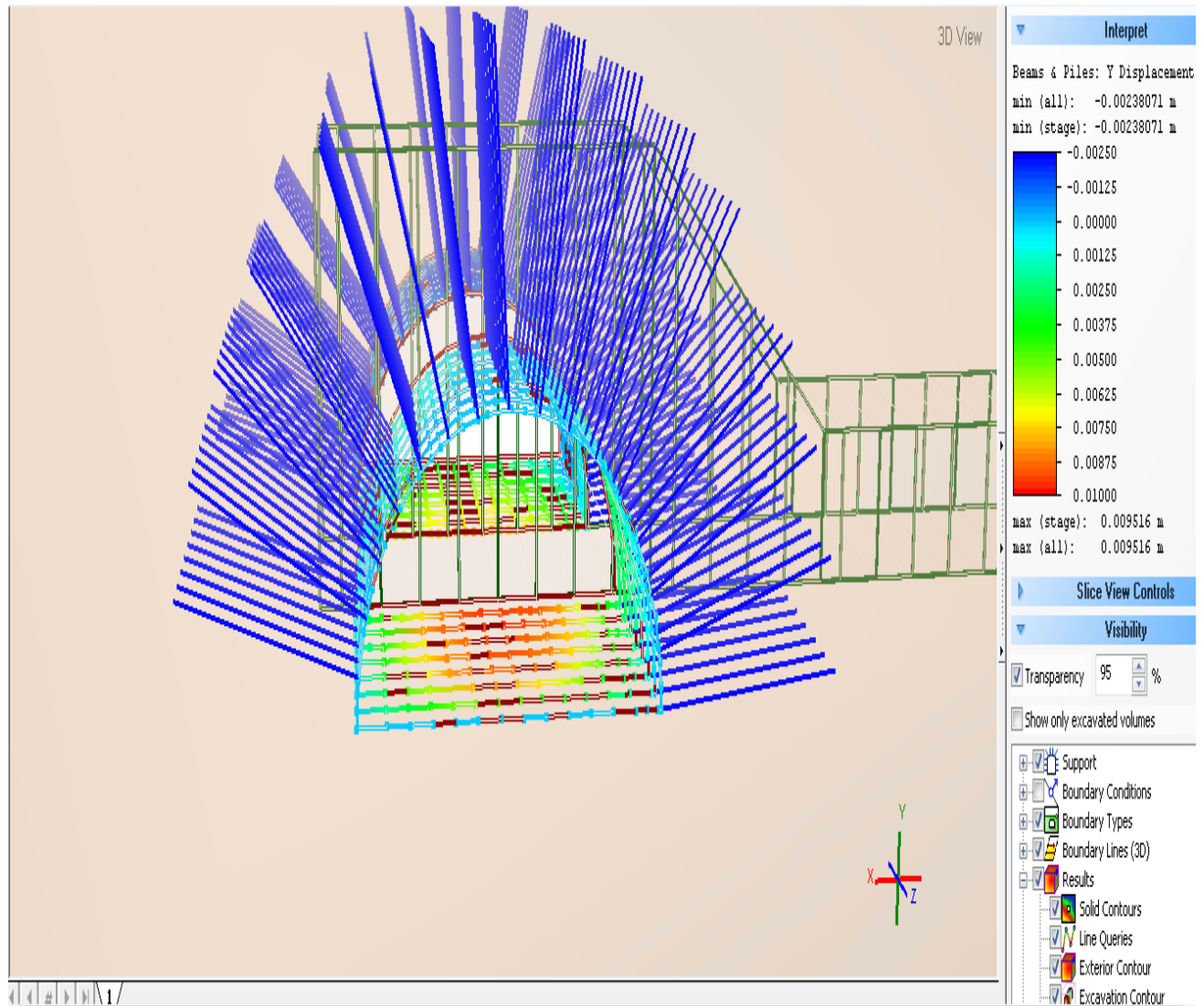


Αντίθετα, στον δεύτερο κλάδο της κύριας σήραγγας οι μετακινήσεις κατά τον άξονα X των πλαισίων που παρατηρούνται είναι σχεδόν μηδενικές.

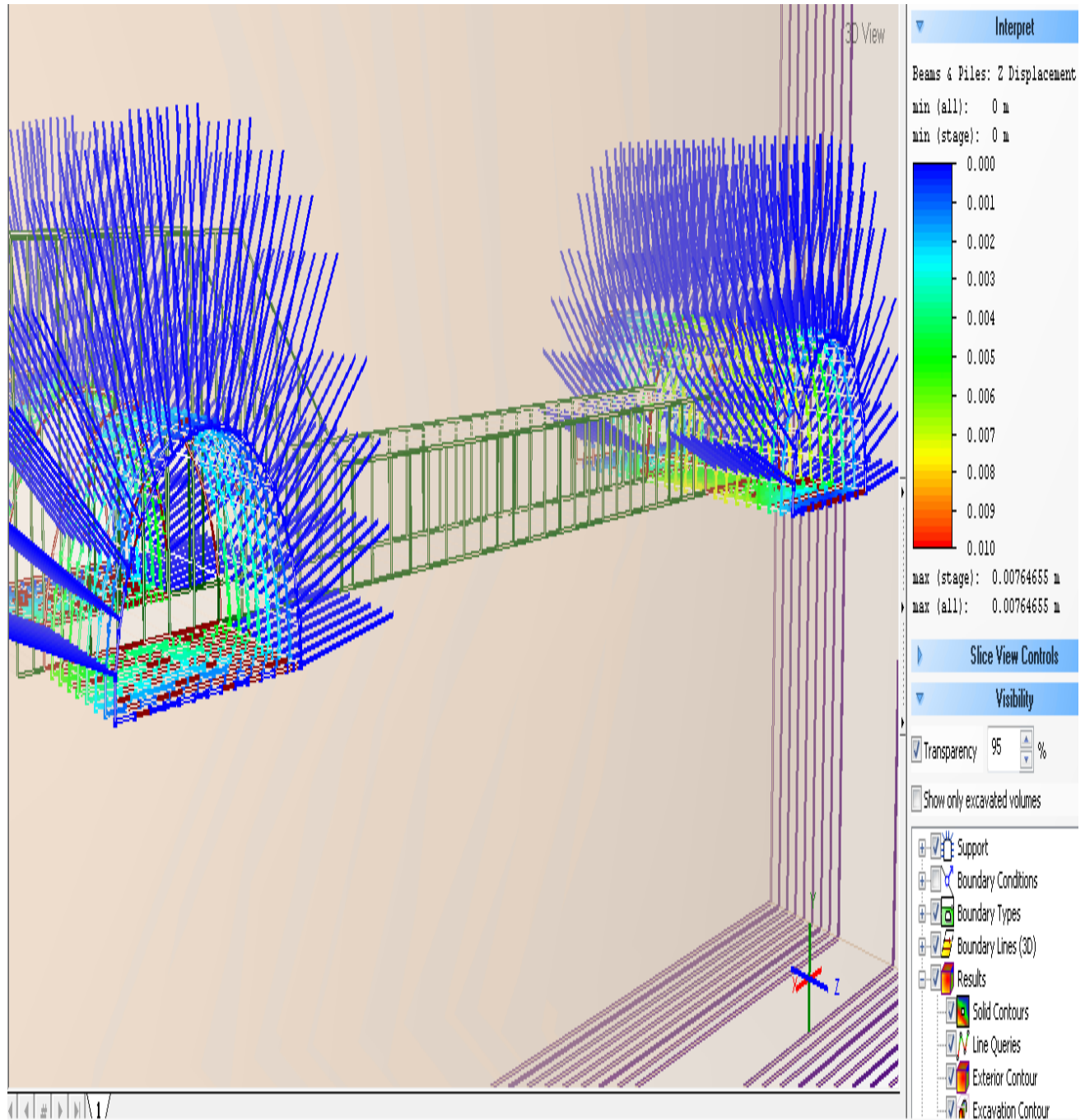
Επιλέγουμε από το μενού Element: Beams&Piles και από το μενού Data Type: Y Displacement για να δούμε την μετακίνηση των πλαισίων κατά τον άξονα Y και παίρνουμε την ακόλουθη εικόνα:



Παρατηρούμε ότι οι μέγιστες μετακινήσεις των πλαισίων κατά τον άξονα Y συντελούνται και στους δύο κλάδους της κύριας σήραγγας στα τμήματα που κατευθύνονται προς τον Βορρά και έχουν τιμή περίπου ένα εκατοστό (1cm).

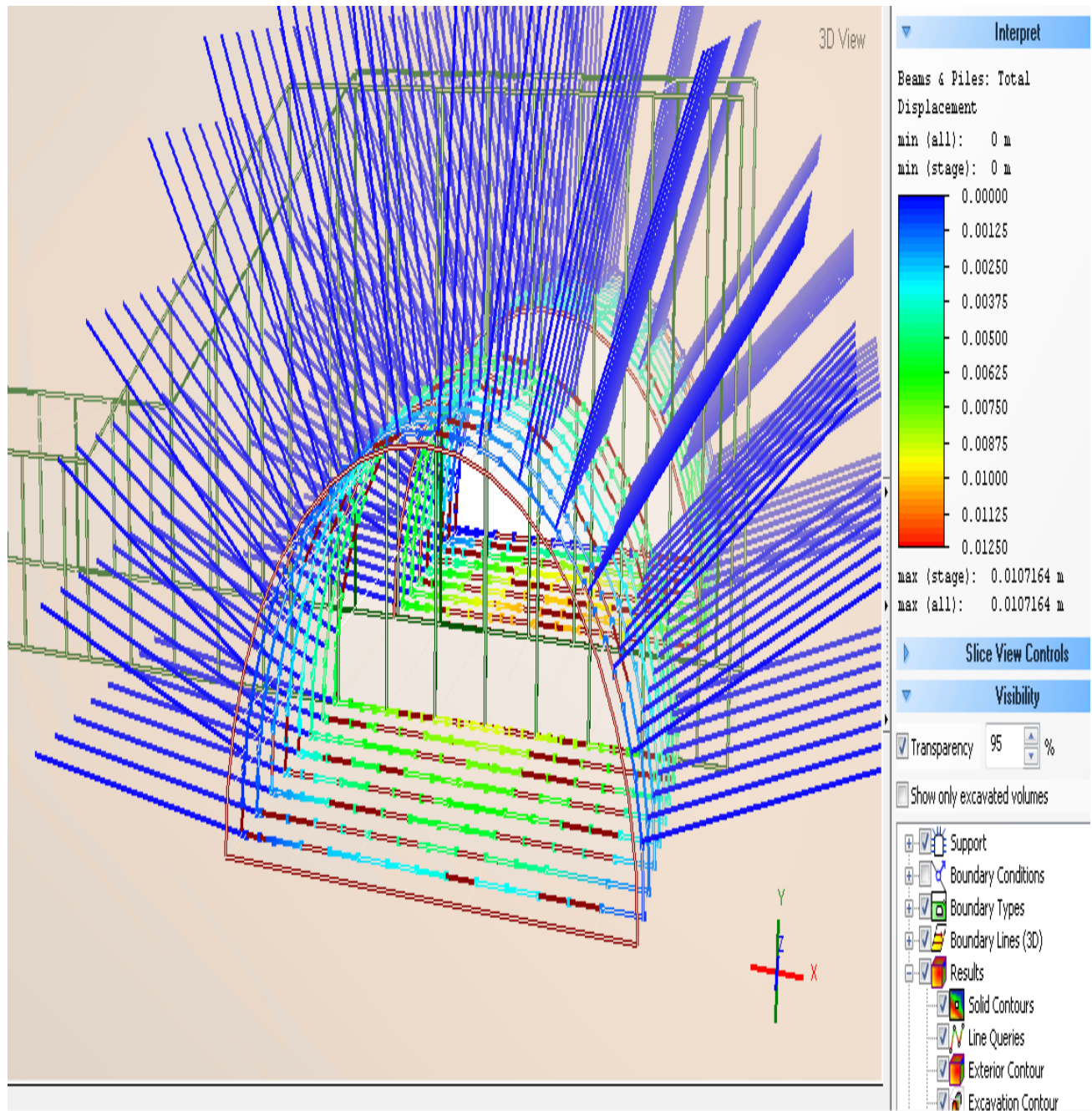


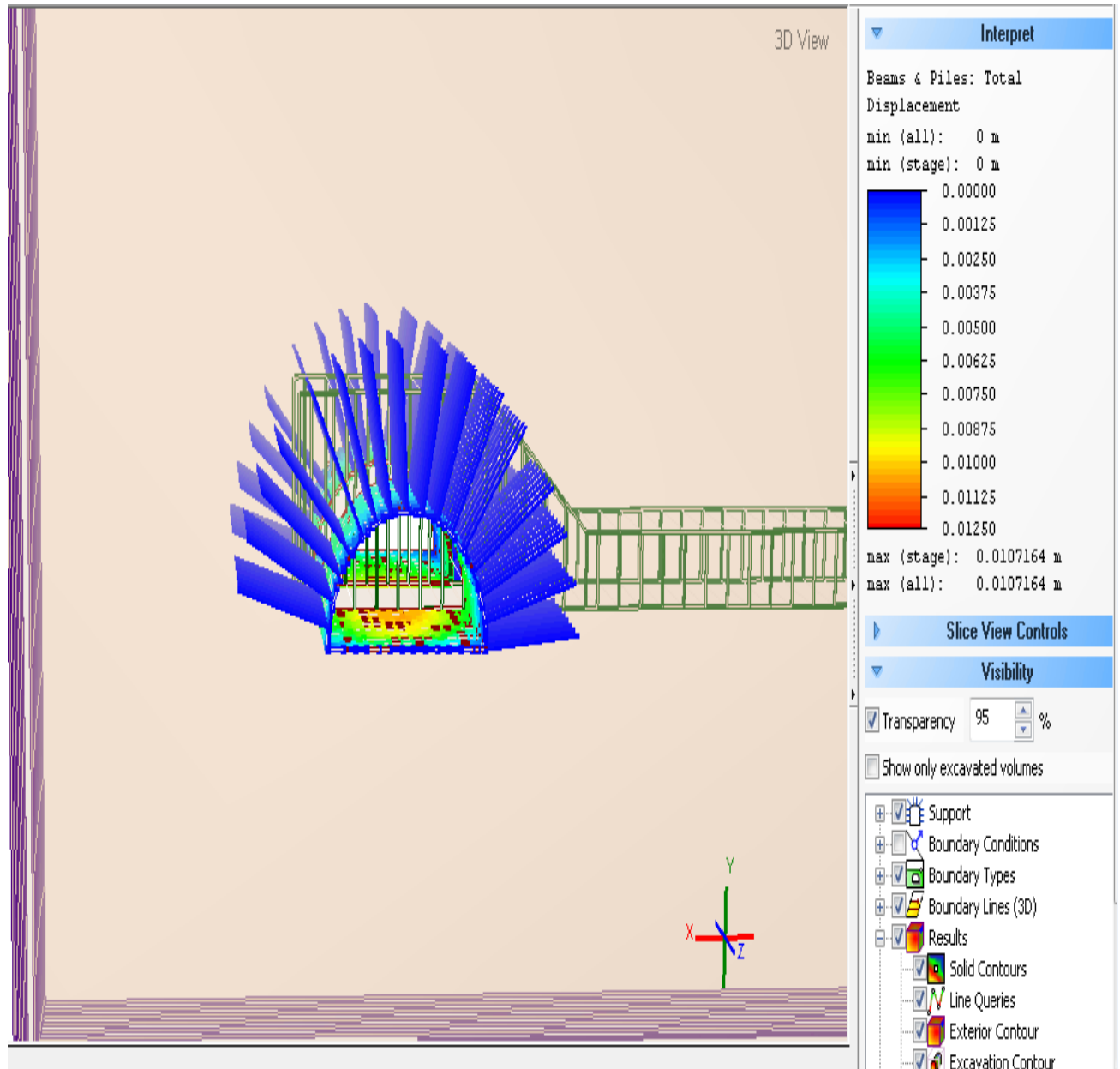
Επιλέγουμε από το μενού Element: Beams&Piles και από το μενού Data Type: Z Displacement για να δούμε την μετακίνηση των πλαισίων κατά τον άξονα Z και παίρνουμε την ακόλουθη εικόνα:



Παρατηρούμε ότι οι μεγαλύτερες τιμές των μετακινήσεων των πλαισίων κατά τον άξονα Z εντοπίζεται στον πρώτο κλάδο της κύριας σήραγγας και είναι περίπου 7,5 χιλιοστά (7,5mm).

Θα δούμε τώρα την ολική μετακίνηση των πλαισίων που έχουν τοποθετηθεί.
Επιλέγουμε από το μενού Element: Beams&Piles και από το μενού Data
Type: Total Displacement.

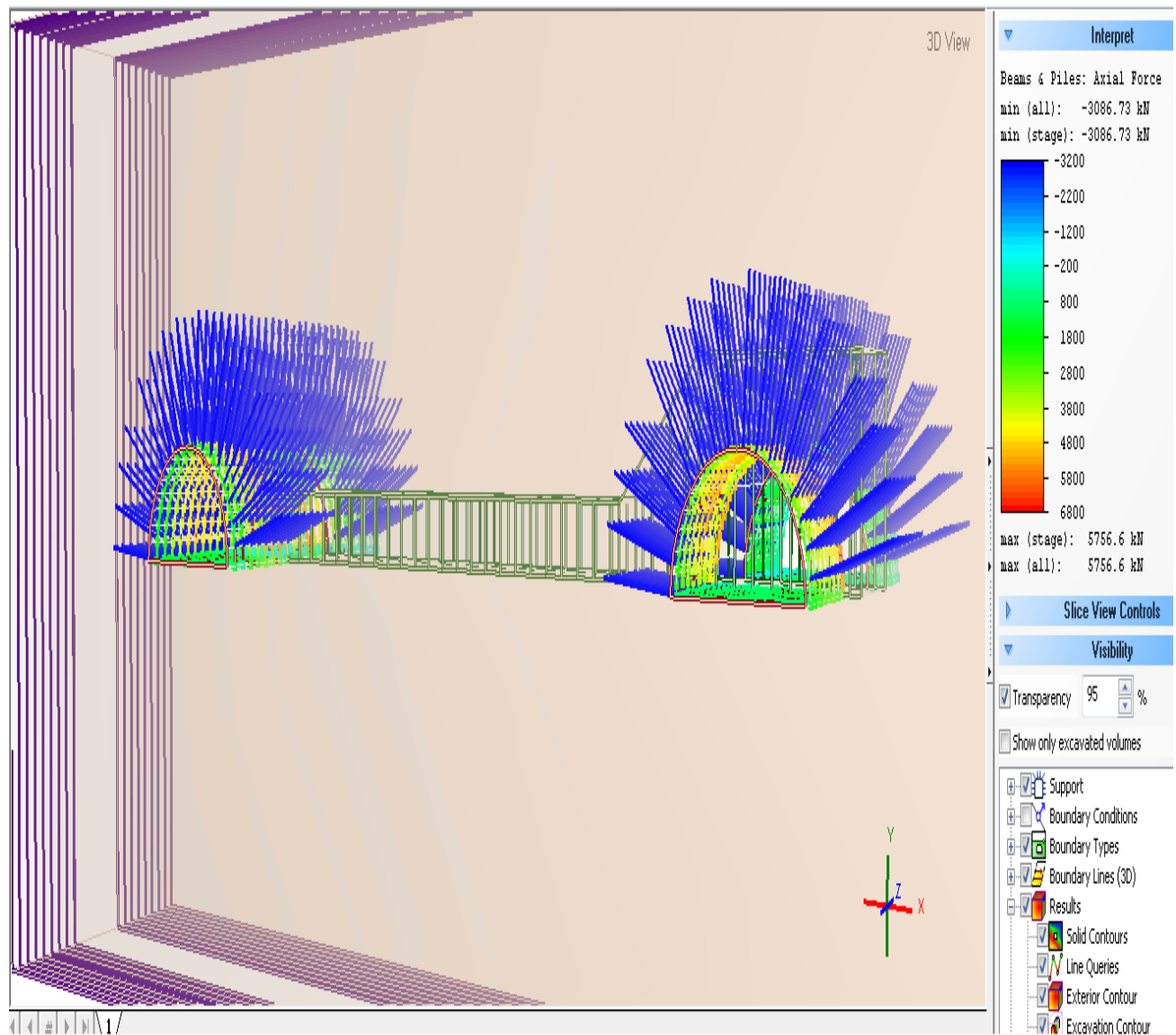


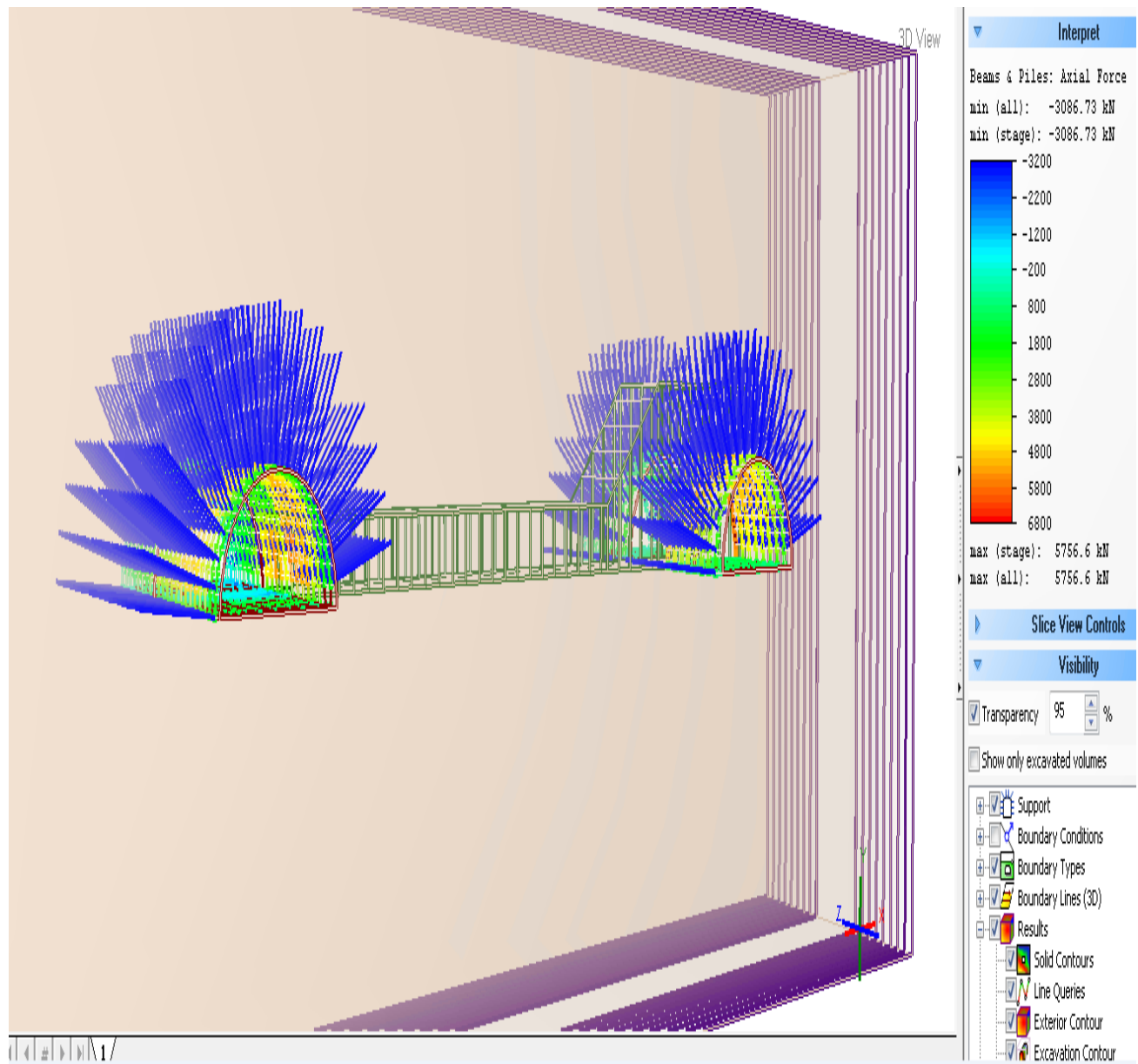


Η μέγιστη τιμή της μετακίνησης (1cm περίπου) παρατηρείται στο δάπεδο του δεύτερου κλάδου της κύριας σήραγγας, με κατεύθυνση προς τον Βορρά.

Τέλος, θα δούμε τη διακύμανση της αξονικής δύναμης των πλαισίων. Επιλέγουμε από το μενού Element: Beams&Piles και από το μενού Data Type: Axial Force.

Λαμβάνουμε τις παρακάτω εικόνες:





Βλέπουμε ότι η μέγιστη τιμή της αξονική δύναμης των πλαισίων είναι περίπου 5,7MN και εντοπίζεται στα μπροστινά τμήματα των δύο κλάδων της κύριας σήραγγας. Στην υπόλοιπη περιοχή της κύριας σήραγγας η αξονική δύναμη που εντοπίζεται λαμβάνει τιμές κάτω από 2MN.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ VI

Συμπεράσματα

Όπως έχει προαναφερθεί η παρούσα διπλωματική επιχειρεί να διερευνήσει εάν είναι δυνατή η διάνοιξη της συγκεκριμένης σήραγγας με ελαφρώς διαφοροποιημένα δεδομένα από αυτά που έλαβαν χώρα κατά την πραγματική διάνοιξη, αλλά σε ίδιες γεωλογικές συνθήκες.

Τα διαφορετικά δεδομένα οφείλονται κυρίως στο γεγονός ότι το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε δεν έχει τη δυνατότητα να προσομοιώσει ορισμένες συνθήκες. Συγκεκριμένα δεν είναι εφικτό να εισάγουμε την συνδετήρια κατασκευή μεταξύ των δύο κλάδων της κύριας σήραγγας με άλλη διατομή, πέραν της ορθογωνικής. Το γεγονός αυτό αναμένεται να προκαλέσει αυξημένες τάσεις στις γωνίες της κατασκευής μας.

Επίσης, ενώ στην μελέτη που λάβαμε από την OK Μελετητική Α.Ε. αναφέρεται πως για την υποστήριξη της συνδετήριας σήραγγας (VCP), της περιοχής διευρούμενης διατομής (trumpet) και του θαλάμου ενδιάμεσης προσβολής χρησιμοποιούνται εκτός από σκυρόδεμα, αγκύρια και πλάισια, το RS3 δεν μας επιτρέπει να χρησιμοποιήσουμε τίποτα άλλο εκτός από σκυρόδεμα.

Ας συγκρίνουμε τώρα τα αποτελέσματα που λάβαμε από την τρισδιάστατη ανάλυση που πραγματοποιήσαμε με το RS3 με τα αποτελέσματα που μας παρέχει η μελέτη της OK Μελετητικής Α.Ε. που έγινε με την βοήθεια του 3DEC.

Τα αποτελέσματα της δικής μας τρισδιάστατης ανάλυσης έδειξαν ότι η μέγιστη τιμή της κύριας τάσης (σ_1) είναι περίπου 9MPa, η οποία και εντοπίζεται κυρίως στις γωνίες του θαλάμου ενδιάμεσης προσβολής, της περιοχής διευρούμενης διατομής, αλλά και της συνδετήριας σήραγγας.

Στην μελέτη που λάβαμε από την OK Α.Ε. η μέγιστη τιμή της κύριας τάσης είναι 6MPa και εντοπίζεται και σε αυτήν την περίπτωση σε όλο το μήκος της συνδετήριας κατασκευής (VCP, trumpet, junction cavern/chamber).

Όπως αναφέραμε και στην αρχή αυτό οφείλεται ακριβώς στο γεγονός ότι η κατασκευή μας έχει τετραγωνική διατομή. Παρόλα αυτά η συγκεκριμένη τιμή της κύριας τάσης δεν είναι απαγορευτική για την κατασκευή μας.

Όσον αφορά την αξονική δύναμη (axial force) που ασκείται στα αγκύρια που έχουμε τοποθετήσει, από την τρισδιάστατη ανάλυση που πραγματοποιήσαμε προκύπτει ότι η μέγιστη τιμή της είναι περίπου 55kN και αφορά τα αγκύρια που είναι τοποθετημένα στον δεύτερο κλάδο της κύριας σήραγγας και βρίσκονται κοντά στον θάλαμο ενδιάμεσης προσβολής.

Στην μελέτη που λάβαμε από την OK A.E. η αντίστοιχη μέγιστη αξονική δύναμη είναι περίπου 40kN. Η διαφορά αυτή είναι σχετικά μικρή και δεν επηρεάζει την κατασκευή μας.

Προχωρούμε τώρα στη σύγκριση των μετακινήσεων που συντελούνται στην κύρια σήραγγα, αλλά και στην συνδετήρια κατασκευή μεταξύ των δύο κλάδων της.

Τα αποτελέσματα που λάβαμε με τη βοήθεια του RS3 δείχνουν ότι οι μετακινήσεις που έχουμε στην κύρια σήραγγα έχουν τιμή περίπου 2,5 εκατοστά (2,5cm).

Από την άλλη στα αποτελέσματα που λάβαμε από το 3DEC έχουμε στον δεύτερο κλάδο της κύριας σήραγγας με κατεύθυνση τον Βορρά, μετακινήσεις λίγων χιλιοστών και στον δεύτερο κλάδο της κύριας σήραγγας με κατεύθυνση προς τον Νότο μέγιστη μετακίνηση ενός εκατοστού (1cm) περίπου.

Τέλος θα συγκρίνουμε τις οριζόντιες και κάθετες μετακινήσεις που αφορούν την περιοχή διευρούμενης διατομής (trumpet) και τον θάλαμο ενδιάμεσης προσβολής (junction cavern).

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το RS3 σχετικά με την περιοχή διευρούμενης διατομής δείχνουν οριζόντιες μετακινήσεις περίπου 7 χιλιοστών (7mm), ενώ από την μελέτη της OK A.E. που έγινε με τη βοήθεια του RS3 προκύπτουν οριζόντιες μετακινήσεις της τάξης των λίγων χιλιοστών.

Οι μέγιστες οριζόντιες μετακινήσεις που αντιστοιχούν στον θάλαμο ενδιάμεσης προσβολής είναι σύμφωνα με το RS3 σχεδόν μηδενικές, ενώ σύμφωνα με την μελέτη της OK A.E. είναι και πάλι της τάξης των λίγων χιλιοστών.

Οι μέγιστες κάθετες μετακινήσεις που συντελούνται στην περιοχή διευρούμενης διατομής είναι σύμφωνα με το RS3 και πάλι 7 περίπου χιλιοστά (7mm), ενώ σύμφωνα με το 3DEC είναι της τάξης των λίγων χιλιοστών.

Στον θάλαμο ενδιάμεσης προσβολής έχουμε μέγιστες κάθετες μετακινήσεις σχεδόν ενός εκατοστού (1cm) σύμφωνα με την τρισδιάστατη ανάλυση που πραγματοποιήσαμε με το RS3, ενώ σύμφωνα με την μελέτη της OK A.E. που έγινε με την βοήθεια του 3DEC είναι της τάξης των λίγων χιλιοστών.

Παρατηρούμε ότι σε όλες τις παραπάνω συσχετίσεις και συγκρίσεις που παραθέσαμε ανάμεσα στις δύο μελέτες, παρ' ότι έχουν διενεργηθεί με την βοήθεια διαφορετικών προγραμμάτων τρισδιάστατης ανάλυσης και με διαφορετικά σε κάποια σημεία δεδομένα, δεν υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις στα αποτελέσματα και είναι φανερό ότι η συγκεκριμένη κατασκευή είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί και με την γεωμετρία που προτείνει η παρούσα διπλωματική διατριβή.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- 1) Α.Ι. Σοφιανός, Αθήνα 2011, Τεχνικές διάνοιξης σηράγγων
- 2) Αργύρης ΑΛΕΞΑΝΔΡΗΣ¹, Θωμάς ΧΟΥΛΙΑΡΑΣ¹,
Θεόδωρος ΚΟΝΤΟΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΣ², Βαγγέλης ΠΕΡΓΑΝΤΗΣ²,
Εμμανουήλ ΟΥΡΑΝΟΣ², Τάσος ΑΡΑΝΙΤΗΣ³, Αντώνης ΤΣΑΚΑΣ⁴),
16ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, 21-23/10/ 2009, Πάφος, Κύπρος,
Σχεδιασμός και Κατασκευή του Υπόγειου Σταθμού METRO στο Αιγάλεω
Design and Construction issues of the Underground Metro Station at Egaleo
(Athens Metro)
- 3) ΟΜΙΚΡΟΝ ΚΑΠΑ ΜΕΛΕΤΗΤΙΚΗ Α.Ε., Works Method Statement (WMS) of
Tunnel T1 – Underground Construction Works at NRB & Linking with NLB
through Cross Passage by ΟΜΙΚΡΟΝ ΚΑΠΑ Consulting S.A.
- 4) www.omikronkappa.gr