

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Δ.Π.Μ.Σ. Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπόγειων Έργων



Διάνοιξη και προσωρινή υποστήριξη σήραγγας του  
υπόγειου Σταθμού Δημοτικού Θεάτρου Πειραιά

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΠΑΒΑΪΟΣ ΘΕΜΙΣΤΟΚΛΗΣ

Επιβλέπων Καθηγητής: κ. Νομικός Παύλος

Φεβρουάριος 2021

## Ευχαριστίες

Για την παρούσα διπλωματική εργασία θα ήθελα να ευχαριστήσω την εταιρεία Αττικό Μετρό Α.Ε. για την παραχώρηση δεδομένων και σχεδίων της μελέτης της σήραγγας του σταθμού Δημοτικού Θεάτρου Πειραιά. Καθώς και την Προϊσταμένη Επίβλεψης Έργων της Αττικό Μετρό Α.Ε. κ. Βουτυρίτσα Σίσσυ, για την παραχώρηση πολύτιμου φωτογραφικού υλικού από το αρχείο και την περιγραφή λεπτομερειών της κατασκευής του έργου.

Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου, στον κ. Νομικό Παύλο, Αν. Καθηγητή ΣΜΜΜ ΕΜΠ και την κ. Γιούτα-Μήτρα Παρασκευή, ΕΔΙΠ ΣΜΜΜ ΕΜΠ, για τις συμβουλές και την καθοδήγηση τους, καθώς και για την συνεχή παρακολούθηση της διπλωματικής εργασίας.

## Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	5
1. Εισαγωγή.....	6
1.1 Γενικά στοιχεία του έργου (Η επέκταση της Γραμμής 3).....	6
1.2 Ο Σταθμός Δημοτικού Θεάτρου Πειραιά.....	8
1.3 Η λειτουργία του κτιρίου .....	10
2. Σήραγγα NATM σταθμού Δημοτικό Θέατρο Πειραιά.....	11
2.1 Γενικά για την μέθοδο NATM .....	11
2.2 Κατασκευή Σήραγγας NATM σταθμού Δημοτικού Θεάτρου .....	18
2.2.1 Σκοπός κατασκευής της σήραγγας .....	18
2.2.2 Συνοπτικά η αλληλουχία των εργασιών .....	20
2.2.3 Τεχνικογεωλογικές συνθήκες .....	21
2.2.4 Διάνοιξη σήραγγας σταθμού και Μέτρα Άμεσης υποστήριξης .....	22
2.2.4.1 Μέτρα προστασίας μετώπου.....	22
2.2.4.2 Διάνοιξη Α1 φάσης σήραγγα NATM σταθμού.....	27
2.2.4.3 Διάνοιξη Α2 φάσης σήραγγα NATM σταθμού.....	31
2.2.4.4 Διάνοιξη Β φάσης σήραγγα NATM σταθμού.....	32
2.2.4.5 Μόνιμη Επένδυση σήραγγας.....	34
2.3 Διάνοιξη σήραγγων κλιμακοστασίων .....	35
2.3.1 Περιγραφή .....	35
2.4.2 Διάνοιξη Σήραγγων Κλιμακοστασίων Αποβαθρών και Μέτρα Άμεσης Υποστήριξης .....	36
3. Εκτίμηση θεωρητικών επιφανειακών καθιζήσεων .....	37
3.1 Εισαγωγή.....	37
3.2 Εμπειρικές μέθοδοι - Κατακόρυφες μετακινήσεις .....	38
3.3 Θεωρητικές Μετακινήσεις για την σήραγγα Δημοτικού Θεάτρου Πειραιά .....	43
3.3.1 Γενικά .....	43
3.3.2 Διάγραμμα Επιφανειακών Κατακόρυφων Μετακινήσεων της σήραγγας NATM.....	46
3.3.3 Διάγραμμα Επιφανειακών Κατακόρυφων Μετακινήσεων με μεταβολή του βάθους H(m). .....	47
4. Ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία της σήραγγας NATM Δημοτικού Θεάτρου Πειραιά. ....	50
4.1 Γενικά .....	50
4.2 Γεωλογικά και Γεωτεχνικά στοιχεία.....	52

4.3 Περιγραφή προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων .....	58
4.3.1 Σύγκριση θεωρητικών μετακινήσεων με το προσομοίωμα .....	58
4.3.2 Στάδια Προσομοιώματος.....	60
4.3.3 Τοποθέτηση προσωρινής υποστήριξης προσομοιώματος.....	65
4.4 Αποτελέσματα.....	74
4.4.1 Πλαστική Ζώνη :.....	74
4.4.2 Κατακόρυφες μετακινήσεις:.....	77
5. Σύγκριση προσομοιώματος - μετρήσεων πεδίου.....	89
6. Συμπεράσματα.....	100

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται παρουσίαση της διάνοιξης και της προσωρινής υποστήριξης της σήραγγας Σταθμού Δημοτικού Θεάτρου Πειραιά, που ενώνει τη σήραγγα TBM με το ανοιχτό όρυγμα του σταθμού, ο οποίος είναι ο τερματικός σταθμός της επέκτασης της γραμμής 3 προς τον Πειραιά. Στο πρώτο μέρος της εργασίας αναλύονται όλες οι φάσεις διάνοιξης της σήραγγας, καθώς και τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης, όπου καταγράφονται οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες που απαιτήθηκαν.

Επίσης, παρουσιάζονται θεωρητικές - εμπειρικές μέθοδοι εκτίμησης επιφανειακών καθιζήσεων και εξάγονται αποτελέσματα κατακόρυφων επιφανειακών μετακινήσεων για την σήραγγα με τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά που δόθηκαν από την μελέτη, χρησιμοποιώντας κάποιες από τις μεθόδους αυτές.

Επιπλέον, γίνεται ανάλυση, με διδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα, διατομών της σήραγγας σε κάποιες χαρακτηριστικές θέσεις με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων RS2. Στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων έχουν εφαρμοστεί τα γεωτεχνικά στοιχεία που προσομοιάζουν τα πραγματικά στοιχεία του εδάφους στην περιοχή της σήραγγας και τα μέτρα υποστήριξης θα είναι αυτά της μελέτης του έργου. Με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων έχουμε λάβει αναλυτικές αναμενόμενες κατακόρυφες μετακινήσεις σε χαρακτηριστικές διατομές της σήραγγας τόσο στην επιφάνεια του εδάφους, όσο και στην στέψη της περιμέτρου της διατομής, οι οποίες συγκρίνονται με μετακινήσεις που μετρήθηκαν στο πεδίο με όργανα μέτρησης κατά την διάρκεια της διάνοιξης και μετά το πέρας αυτής. Στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων παρατηρήσαμε και την επιρροή των πλευρικών σηράγγων πρόσβασης κλιμακοστασίων στις μετακινήσεις.

# 1. Εισαγωγή

## 1.1 Γενικά στοιχεία του έργου (Η επέκταση της Γραμμής 3)

Ο σταθμός Δημοτικό Θέατρο Πειραιά είναι ο τερματικός Σταθμός της επέκτασης της γραμμής 3 προς τον Πειραιά και θα συνδέει το Αεροδρόμιο Ελευθέριος Βενιζέλος με το λιμάνι του Πειραιά. Η Επέκταση της Γραμμής 3 του Μετρό «Αγία Μαρίνα-Πειραιάς», η οποία βρίσκεται σε προχωρημένη φάση κατασκευής, αποτελείται από σήραγγα μήκους 7,6 χλμ και 6 νέους σύγχρονους σταθμούς.

Οι 6 νέοι σταθμοί:

1. Αγία Βαρβάρα
2. Κορυδαλλός,
3. Νίκαια,
4. Μανιάτικα
5. Πειραιάς

### **6. Δημοτικό Θέατρο**

Πρόκειται για έργο 730 χιλιάδων ευρώ σε περιοχές που δεν είχαν Μέσα Μαζικής Μεταφοράς σταθερής τροχιάς, όπως η Νίκαια και ο Κορυδαλλός και θα αναβαθμίσει συνολικά τις περιοχές καθώς και την συγκοινωνιακή λειτουργία τους.

Ήδη στις 6 Ιουλίου 2020 δόθηκαν προς χρήση στο επιβατικό κοινό οι 3 πρώτοι σταθμοί Αγία Βαρβάρα, Κορυδαλλός και Νίκαια. Με τη λειτουργία των τριών πρώτων σταθμών της επέκτασης προς Πειραιά, οι πρόσθετες επιβιβάσεις υπολογίζονται σε 63.000 ημερησίως συνολικά στο δίκτυο, ενώ οι κάτοικοι των Δήμων Αγίας Βαρβάρας, Κορυδαλλού και Νίκαιας έχουν στη διάθεση τους μια σύγχρονη γραμμή Μετρό.[1]

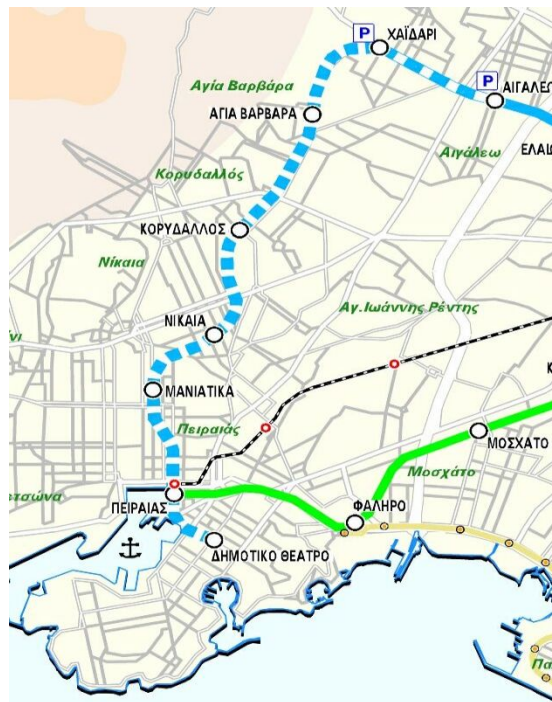
Το σύνολο της Επέκτασης της Γραμμής 3 αναμένεται να δοθεί σε λειτουργία εντός του καλοκαιριού του 2022.

Με την ολοκλήρωση του έργου και τη θέση σε λειτουργία και των σταθμών Μανιάτικα, Πειραιάς και Δημοτικό Θέατρο προβλέπεται αύξηση της συνολικής επιβατικής κίνησης στο δίκτυο του Μετρό σε 132 χιλιάδες επιβάτες ημερησίως,

μειώνοντας τόσο τον κυκλοφοριακό φόρτο των οχημάτων κατά 23 χιλιάδες ημερησίως όσο και τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα κατά 120 t ανά ημέρα. Ένα σημαντικό στοιχείο είναι ότι ο συνολικός χρόνος από το Αεροδρόμιο προς το Λιμάνι θα διαρκεί 55 λεπτά με το Μετρό.

Στο Σταθμό Πειραιά προβλέπεται να δημιουργηθεί ένα σημαντικός Συγκοινωνιακός κόμβος, ενώνοντας δυο γραμμές Μετρό, Γραμμή 1 και Γραμμή 3, το Λιμάνι, τον Προαστιακό Σιδηρόδρομο και την Επέκταση του Τραμ προς Πειραιά (5,4 χλμ. μονής γραμμής και 12 σταθμοί), διευκολύνοντας και ενώνοντας μετεπιβιβάσεις μεταξύ όλων των μέσων μεταφοράς και διευρύνοντας την πρόσβαση και άλλων περιοχών σε γραμμές υπόγειας σταθερής τροχιάς.

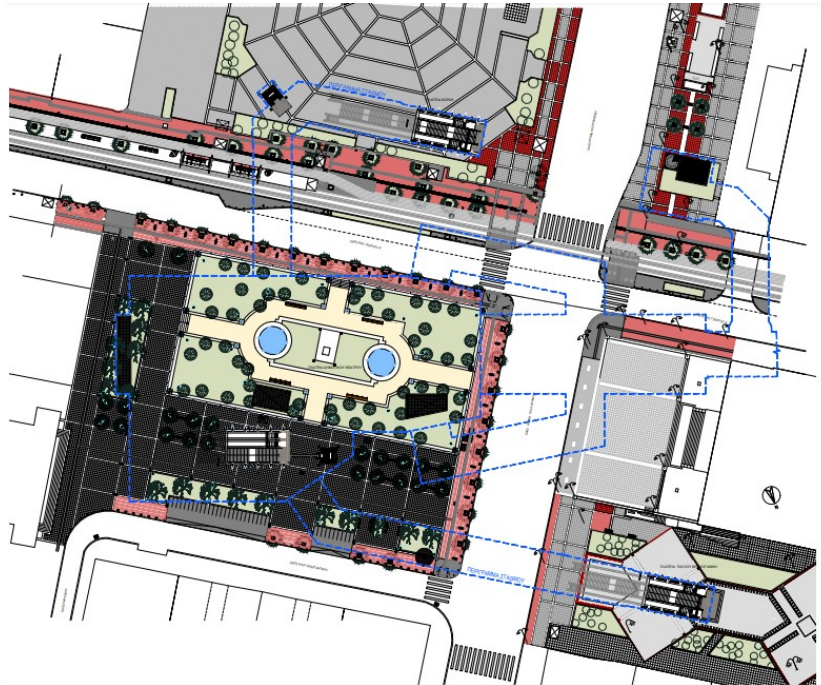
Επιπλέον, η σύνδεση που θα προκύψει μεταξύ του Λιμανιού του Πειραιά και του Αεροδρομίου «Ελευθέριος Βενιζέλος» μέσω της Γραμμής 3 του Μετρό, είναι κομβικής σημασίας για το εμπόριο, τον τουρισμό και την ανάπτυξη της περιοχής της Αθήνας και του Πειραιά αλλά και ευρύτερα για την συνολική οικονομία της χώρας.



Εικόνα 1.1: Επέκταση Γραμμής 3 [1]

## 1.2 Ο Σταθμός Δημοτικού Θεάτρου Πειραιά

Ο Σταθμός του Δημοτικού Θεάτρου Πειραιά είναι ο τερματικός σταθμός της επέκτασης της Γραμμής 3 του Μετρό Αττικής. Βρίσκεται κάτω από την κεντρική πλατεία του Πειραιά και θα ενώσει το κέντρο του Πειραιά με την Αθήνα και το Αεροδρόμιο με υπόγεια σταθερή τροχιά. Μετά την παράδοση του Σταθμού θα αυξηθεί η ταχύτητα μετακίνησης των πολιτών από το κέντρο του Πειραιά προς τις υπόλοιπες περιοχές της Αττικής και αναμένεται να μειωθεί ο κυκλοφοριακός φόρτος οχημάτων στην πόλη του Πειραιά, καθώς και να αναβαθμιστεί η οικονομία της περιοχής λόγω της ευκολότερης πρόσβασης στο κέντρο του Πειραιά από άλλες περιοχές της Αττικής.



*Εικόνα 1.2: Θέση Σταθμού στην κεντρική Πλατεία του Πειραιά [1]*

Ο Σταθμός έχει συνολικό μήκος 72 μέτρα και μαζί με την σήραγγα του σταθμού συνολικά 118 μέτρα και πλάτος 30,70 μέτρα, χωρίς να περιλαμβάνονται σε αυτά οι πλευρικές σήραγγες κλιμακοστασίων καθώς και τα βοηθητικά φρεάτια και η σήραγγα αερισμού.



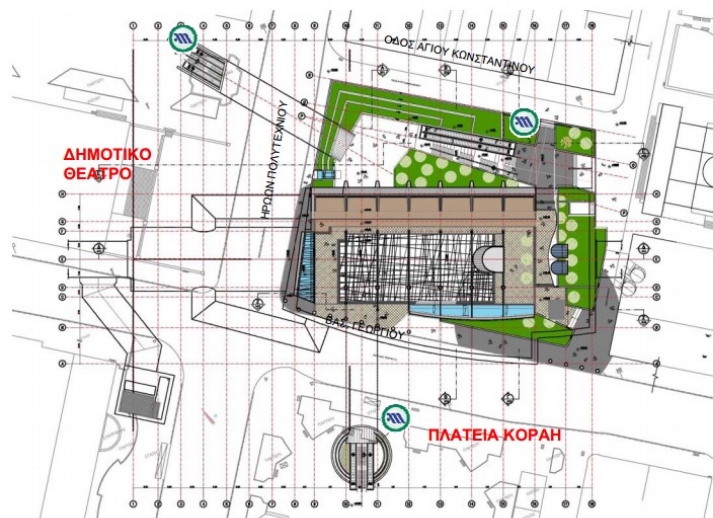
Συνολικά ο σταθμός περιλαμβάνει τα εξής τμήματα:

- Κύριο όρυγμα σταθμού με την μέθοδο cut and cover, που αποτελείται από 3 επίπεδα, μήκους 72 μέτρων και πλάτους 30,70 μέτρα, σε βάθος 30 μέτρων κάτω από την πλατεία Αγ. Κωνσταντίνου και θα υπάρχει πρόσβαση στον σταθμό από δυο εισόδους.
- Σήραγγα NATM που ενώνει το όρυγμα του σταθμού με την σήραγγα TBM. Μήκους 46 μέτρων και διαμέτρου 16,80 μέτρων.
- Είσοδος στον σταθμό για το επιβατικό κοινό με κεκλιμένη σήραγγα πρόσβασης από την πλατεία Κοραή.
- Είσοδος στον σταθμό για το επιβατικό κοινό με κεκλιμένη σήραγγα πρόσβασης από την πλατεία Π. Μπακογιάννη.
- Δύο κεκλιμένες σήραγγες πρόσβασης κλιμακοστασίων που θα ενώνουν το επίπεδο έκδοσης εισιτηρίων με τις αποβάθρες στην σήραγγα NATM.
- Φρέαρ Δεληγιάνη
- Φρέαρ Πανεπιστήμιο και σήραγγα αερισμού.



## ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΠΡΟΣ ΠΕΙΡΑΙΑ

### 6. ΔΗΜΟΤΙΚΟ ΘΕΑΤΡΟ (Λεωφ. Β. Γεωργίου & Η. Πολυτεχνείου)- Αποκατάσταση επιφανείας



Εικόνα 1.3 Σταθμός Μετρό Δημοτικό Θέατρο [1]

## 1.3 Η λειτουργία του κτιρίου

Ο υπόγειος σταθμός του δημοτικού θεάτρου Πειραιά αποτελείται από τρία βασικά λειτουργικά επίπεδα. Κατασκευάστηκαν τρεις πλάκες από οπλισμένο σκυρόδεμα για να εξυπηρετήσουν την ανάγκη τριών επιπέδων.

Πρώτο επίπεδο:

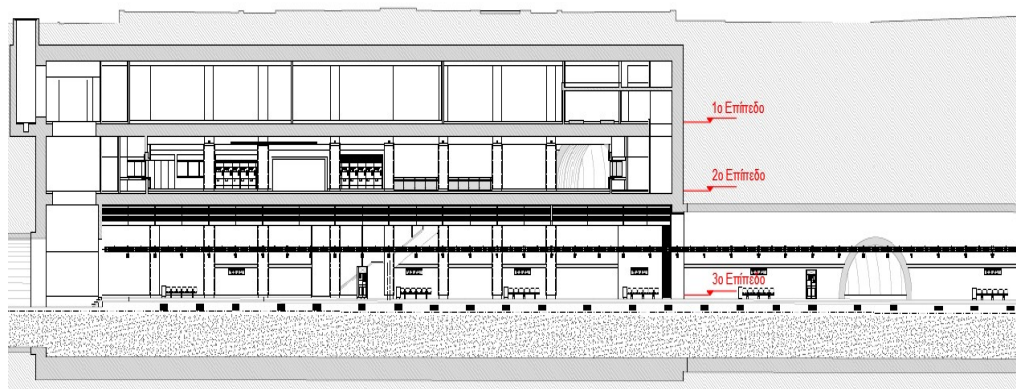
Το πρώτο επίπεδο είναι το επίπεδο έκδοσης εισιτηρίων στο οποίο το επιβατικό κοινό έχει πρόσβαση από τρεις εισόδους μέσω κλιμακοστασίων από την επιφάνεια του εδάφους. Το επίπεδο αυτό συνδέεται απευθείας με το επίπεδο -3 των αποβαθρών μέσω δύο σιηράγγων κλιμακοστασίων που συνδέουν τα δυο επίπεδα με κυλιόμενες σκάλες.

Δεύτερο επίπεδο:

Στο δεύτερο επίπεδο βρίσκονται οι εγκαταστάσεις των ηλεκτρομηχανολογικών υποδομών για την λειτουργία του σταθμού. Εδώ έχουν εγκατασταθεί οι ανεμιστήρες των εγκαταστάσεων αερισμού του σταθμού και της σήραγγας.

Τρίτο επίπεδο:

Στο τρίτο επίπεδο έχουν κατασκευαστεί οι αποβάθρες του σταθμού από τις οποίες το επιβατικό κοινό έχει πρόσβαση στις εισόδους του συρμού. Το κοινό έχει πρόσβαση στις αποβάθρες από το επίπεδο -1 των εκδοτηρίων μέσω των σιηράγγων κλιμακοστασίων αποβαθρών.



Εικόνα 1.4 : Τα επίπεδα του σταθμού [1]

## 2. Σήραγγα NATM σταθμού Δημοτικό Θέατρο Πειραιά

### 2.1 Γενικά για την μέθοδο NATM

Η διάνοιξη της κεντρικής σήραγγας του Σταθμού Δημοτικού Θεάτρου Πειραιά κατασκευάστηκε σύμφωνα με τις γενικές αρχές της μεθόδου NATM και γι' αυτό τον λόγο γίνεται μια σύντομη περιγραφή της μεθόδου.

Στην μέθοδο NATM η επιλογή μεθόδων εκσκαφής, η επιλογή φάσεων εκσκαφής τμηματικά και των μέτρων υποστήριξης γίνεται για να επιτευχθεί μια ελεγχόμενη σύγκλιση της βραχομάζας κατά την προχώρηση του μετώπου. Στόχος είναι να ενεργοποιηθεί η αντοχή της βραχομάζας μειώνοντας το ποσοστό πίεσης που θα λάβει η άμεση υποστήριξη. Με δεδομένο ότι η σύγκλιση ξεκινά μπροστά από το μέτωπο, η ταχύτητα τοποθέτησης της σωστά επιλεγμένης άμεσης υποστήριξης είναι σημαντική, ώστε να ασκηθεί η κατάλληλη πίεση στην άμεση υποστήριξη. Η συνεχομένη παρακολούθηση των συγκλίσεων και η επιλογή των κατάλληλων μέτρων είναι που διαφοροποιεί την μέθοδο NATM, διότι δεν είναι ένα σύνολο από συγκεκριμένους κανόνες.

Επίσης ο χαρακτηρισμός της βραχομάζας, ο προσδιορισμός των τύπων αστοχίας, η μέθοδος εκσκαφής, οι φάσεις, το βήμα προχώρησης, η επιλογή των μέτρων άμεσης υποστήριξης και το σύστημα παρακολούθησης της συμπεριφοράς αποτελούν το σύνολο του σχεδιασμού.

Η μέθοδος NATM περιλαμβάνει τη διάνοιξη σηράγγων με :

1. Ελεύθερο μέτωπο εκσκαφής, δηλαδή χωρίς πίεση στο μέτωπο με μηχανικά μέσα (π.χ. TBM)
2. Άμεση υποστήριξη του τοιχώματος της σήραγγας με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αγκύρια.

Δεν περιλαμβάνει:

- Υποστήριξη με συμβατικές μεθόδους (π.χ. ξύλινες δοκούς).
- Άμεση υποστήριξη με μεταλλικό κέλυφος (ασπίδα).
- Εφαρμογή τελικής επένδυσης από προκατασκευασμένα στοιχεία ή έγχυτο σκυρόδεμα [5]

Σε περιπτώσεις βραχομάζας με πολύ χαμηλά μηχανικά χαρακτηριστικά και κάποιο ειδικό τύπο αστοχίας, τα παραπάνω βασικά μέτρα υποστήριξης της NATM μπορούν να ενισχυθούν και με άλλα, όπως πλαίσια , αγκύρια μετώπου, δοκοί προπορείας (forepoling), όπως επίσης και με την επιλογή περισσότερων φάσεων και μικρότερο βήμα προχώρησης.

### **Τρόποι διάνοιξης**

Η διάνοιξη μιας σήραγγας NATM μπορεί να γίνει είτε με συμβατικά μηχανικά μέσα είτε με την χρήση εκρηκτικών υλών.

### **Φάσεις εκσκαφής**

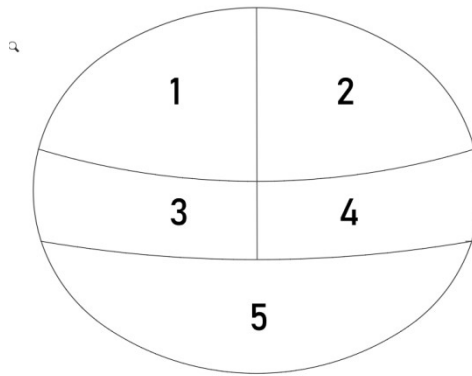
Στην μέθοδο NATM για βραχομάζες με καλά μηχανικά χαρακτηριστικά και διάμετρο μικρότερη των 12 μέτρων, μπορεί να γίνει ολομέτωπη εκσκαφή της σήραγγας.

Για μεγαλύτερο έλεγχο της σύγκλισης της βραχομάζας και για σήραγγες μεγάλης διαμέτρου επιλέγεται διάνοιξη τμηματικά του μετώπου.

Τα κυριότερα συστήματα εκσκαφής σε τμήματα είναι:

*Εκσκαφή μετώπου-βαθμίδας (top heading and bench)*

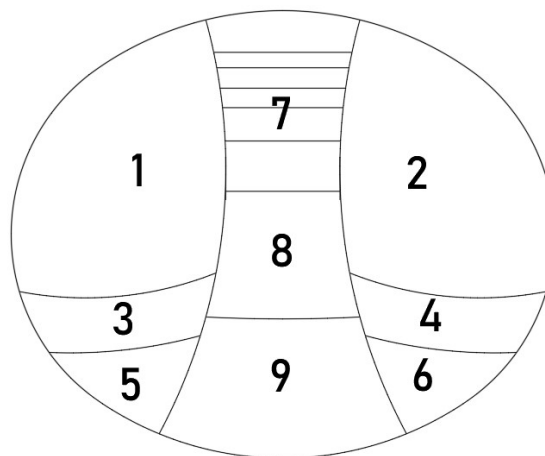
Η εκσκαφή της σήραγγας γίνεται πρώτα στο πάνω τμήμα και συνεχίζεται προς τα κάτω (invert). Η πρώτη φάση εκσκαφής (top heading) δύναται να εκσκαφεί και σε περισσότερες υποφάσεις κατά το πλάτος της σήραγγας. Στην περίπτωση αυτή η πρώτη φάση ουσιαστικά αποτελεί σήραγγα-πλότο που χρησιμεύει και για τη διερεύνηση των συνθηκών που αναμένεται να συναντηθούν κατά τη διάνοιξη της σήραγγας.



*Εικόνα 2.1 Μέθοδος Μετόπου-Βαθμίδας*

*Εκσκαφή με πλευρικές στοές (side-wall drifts)*

Η μέθοδος εφαρμόζεται σε σήραγγες μεγάλου πλάτους σε βραχώμαζες με σχετικά πτωχά χαρακτηριστικά ή στις περιπτώσεις όπου είναι κρίσιμος ο περιορισμός της σύγκλισης του τοιχώματος (π.χ. σε αστικές περιοχές). Περιλαμβάνει την υποδιαίρεση της διατομής κατά το πλάτος και διάνοιξη πρώτα της μιας πλευράς και στη συνέχεια της άλλης πλευράς. Σε ιδιαίτερες δύσκολες συνθήκες η μέθοδος μπορεί να περιλάβει δυο πλευρικές στοές και ενδιάμεσο πυλώνα (twin side-wall drifts with central pillar). Στην περίπτωση αυτή πρώτα διανοίγονται οι πλευρικές στοές και στο τέλος διανοίγεται ο κεντρικός πυλώνας.[5]



*Εικόνα 2.2: Μέθοδος με πλευρικές στοές*

## **Βήμα προχώρησης**

Το βήμα προχώρησης επιλέγεται ανάλογα με τα μηχανικά χαρακτηριστικά της βραχομάζας και το ρυθμό αποτόνωσης. Σε βραχομάζα με πτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά επιλέγουμε μικρό βήμα προχώρησης.

## **Άμεση Υποστήριξη**

Τα βασικά μέτρα υποστήριξης της NATM είναι το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (shotcrete) και τα αγκύρια βράχου (bolts).

**Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα:** Αυτός ο τύπος σκυροδέματος αποτελείται από τα συνήθη υλικά του σκυροδέματος τσιμέντο, νερό και λεπτόκοκκα αδρανή διαμέτρου έως 10mm. Η διαφοροποίηση του έγκειται στην εργασιμότητα του και στο τρόπο τοποθέτησης στα τοιχώματα, καθώς και στην όπλιση. Επίσης χρησιμοποιούνται πρόσμικτα είτε για την ταχεία πήξη (επιταχυντές) μετά την εκτόξευση, είτε για την διατήρηση της εργασιμότητας (επιβραδυντές). Εφαρμόζεται στο τοίχωμα σε στρώσεις με εκτόξευση από ειδικά μηχανήματα ψεκασμού μέσω ενός ακροφύσιου με πεπιεσμένο αέρα, που απαιτούν να έχει συγκεκριμένη ρευστότητα. Η ανάμιξη του μίγματος μπορεί να γίνει είτε με την τεχνική ξηρού μίγματος, είτε υγρού. Για τον όπλισμό του εκτοξευόμενου σκυροδέματος χρησιμοποιούνται είτε ίνες χάλυβα (steel fibres) που αναμιγνύονται με το υπόλοιπο υλικό πριν την εκτόξευση, είτε με πλέγμα (wire mesh reinforcement) που τοποθετείται στην επιφάνεια της σήραγγας πριν την διάστρωση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. [2]

**Αγκύρια:** Τα αγκύρια βράχου είναι μεταλλικές ράβδοι με χαλύβδινους τένοντες στο εσωτερικό τους, τα οποίας αυξάνουν την εφελκυστική και διατμητική αντοχή στην βραχομάζα. Τα αγκύρια μπορούν να διακριθούν σε βασικές κατηγορίες είτε ανάλογα με τον τρόπο φόρτισης τους σε:

α) Ενεργητικά αγκύρια ή Προεντεταμένα (tensioned bolts): τα οποία ενεργοποιούνται άμεσα κατά την τοποθέτηση με προένταση των τενόντων τους. Η προένταση δημιουργεί εσωτερικές θλιπτικές τάσεις στην βραχομάζα.

β) Παθητικά αγκύρια: τα οποία ενεργοποιούνται μετά από μετακίνηση της βραχομάζας στην οποία τοποθετούνται και την φόρτιση εφελκυστικά των χαλύβδινων τενόντων.

Επίσης τα αγκύρια μπορούν να διακριθούν και από τον τρόπο συγκράτησης στην βραχομάζα σε αγκύρια συνεχούς πρόσφυσης και σε αγκύρια σημειακής πάκτωσης. Τα αγκύρια συνεχούς πρόσφυσης μπορούν διακριθούν σε αγκύρια με ενεμάτωση (grouted bolts) με τσιμεντένεμα, είτε ρητίνη και σε αγκύρια που διαστέλλονται (swellex) και ασκούν πίεση στα τοιχώματα του διατρήματος.

Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και τα αγκύρια είναι τα βασικά μέτρα που χαρακτηρίζουν την άμεση υποστήριξη σε μια σήραγγα NATM. Στις περισσότερες περιπτώσεις όμως σε αστικές σήραγγες όπου απαιτούνται ελάχιστες μετακινήσεις στην επιφάνεια, είτε σε σήραγγες που συναντάμε στην πορεία βραχομάζα χαμηλών μηχανικών χαρακτηριστικών, υποστηρικτικά σε αυτά τα δυο βασικά μέτρα υποστήριξης προστίθενται και άλλα μέτρα άμεσης υποστήριξης όπως:

**Χαλύβδινα πλαίσια:** Είναι πλαίσια που τοποθετούνται στην περίμετρο της σήραγγας αμέσως μετά την διάνοιξη και συγκρατούν την σύγκλιση του πετρώματος. Τοποθετείται ένα πλαίσιο ανά βήμα προχώρησης συνήθως. Διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

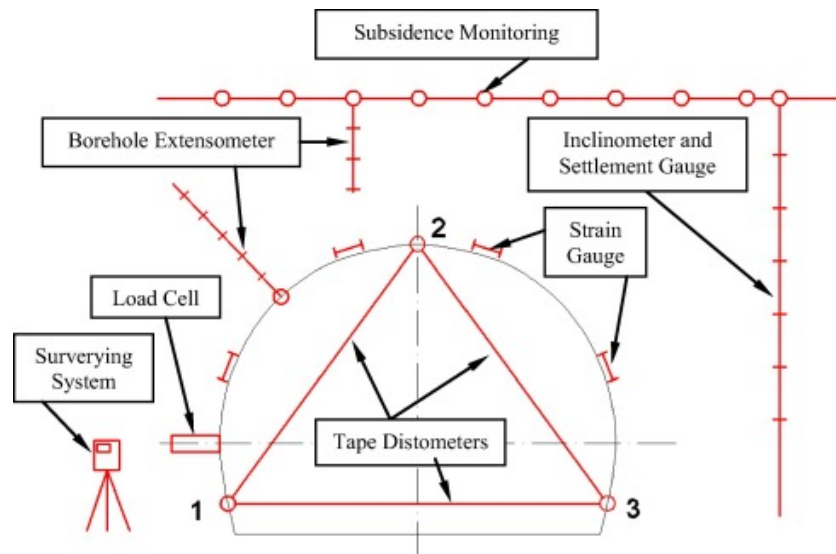
α) Πλαίσιο πλήρους τυπικής διατομής, σε διάφορες διατομές, με πιο συνήθη την HEB.

β) Δικτυωτά πλαίσια (lattice girders), που είναι καμπύλο χωροδικτώμα, αποτελούμενο από ράβδους οπλισμού και συνδετήρες.

Τα χαλύβδινα πλαίσια χωνεύονται μέσα στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα λειτουργώντας σαν επιπλέον οπλισμός του.

Ένας βασικός πυλώνας της NATM είναι η συνεχής παρακολούθηση της συμπεριφοράς των σιηράγγων και επανακαθορισμός των μέτρων υποστήριξης βάσει αυτών. Για αυτό το λόγο συνήθως κατά την διάνοιξη και πριν από αυτή τοποθετείται ένα δίκτυο από όργανα μετρήσεων στην επιφάνεια της διατομής της σήραγγας αλλά και στην επιφάνεια του εδάφους. Τα συνήθη μεγέθη που μετρούνται κατά την διάνοιξη μιας σήραγγας είναι:

- α) Μετακινήσεις του τοιχώματος στην περιφέρεια της σήραγγας.
- β) Μετακινήσεις στην επιφάνεια του εδάφους, καθιζήσεις.
- γ) Μετρήσεις πιέσεων στην επένδυση της σήραγγας
- δ) Μετακινήσεις της περιβάλλουσας βραχομάζας
- ε) Μετρήσεις δυνάμεων



*Εικόνα 2.3 Οργανομετρήσεις στην μέθοδο NATM [9]*

### **Κίνδυνοι Αστοχίας και Τύποι Αστοχίας**

Στην διάρκεια των χρόνων έχουν σημειωθεί περιστατικά αστοχιών σε σήραγγες NATM που έχουν θέσει σε κίνδυνο ανθρώπινες ζωές. Αυτές οι καταρρεύσεις επίσης, δημιούργησαν σοβαρές ζημιές σε δημόσια κτίρια και υποδομές.

Τα περιστατικά αυτά αποδίδονται σε διάφορους παράγοντες ως εξής:

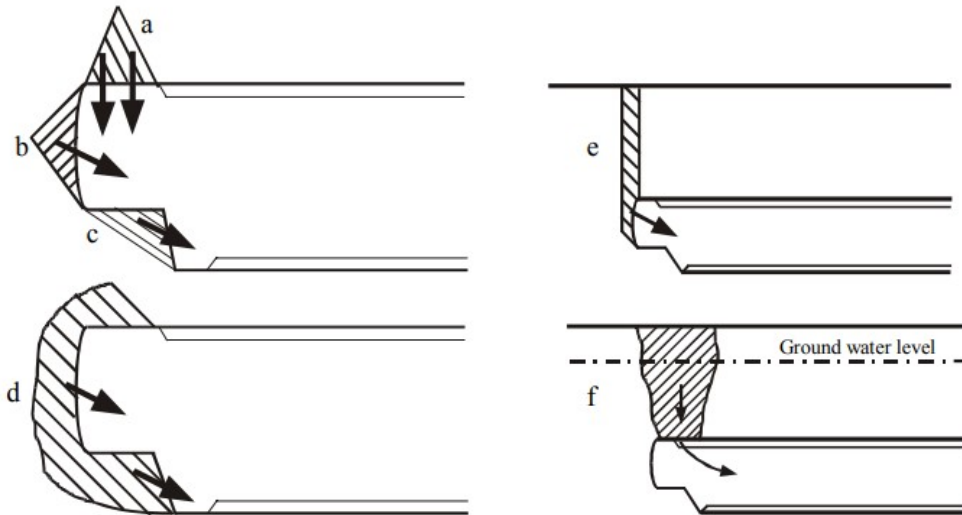
- Υπάρχουν εγγενή προβλήματα στην κατασκευή σήραγγας με NATM.  
Όπως σε περιπτώσεις διάνοιξης σηράγγων σε βραχομάζα με πολύ πτωχά χαρακτηριστικά όπου είναι συχνή η εμφάνιση φαινομένων αστάθειας μετώπου.
- Οι κίνδυνοι δεν αναγνωρίζονται, διαχειρίζονται και ελέγχονται, επαρκώς.
- Υπάρχει υπερβολική εμπιστοσύνη στη μέθοδο.



- Η NATM χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο σε πιο απαιτητικά περιβάλλοντα.
- Η NATM χρησιμοποιείται από αυτούς που δεν είναι εξοικειωμένοι με την τεχνική. [8]

### Τύποι αστοχίας:

- Αστοχίες της οροφής όπου το έδαφος ρέει μέσα στη σήραγγα
- Τοπικές αστοχίες μετώπου όπου ένα μέρος του εισέρχεται στην σήραγγα.
- Αστοχίες του κάτω μέρους του μετώπου(bench) όπου ένα μέρος ή το σύνολο του ολισθαίνει εγκάρσια ή κατά μήκος στη σήραγγα
- Πλήρης αστοχία μετώπου όπου το πάνω κα το κάτω μέρος ρέει μέσα στη σήραγγα
- Επιφανειακή αποσάθρωση μετώπου [8]



Εικόνα 2.4 Τύποι Αστοχίας κατά την διάνοιξη σήραγγας NATM [8]

## 2.2 Κατασκευή Σήραγγας NATM σταθμού Δημοτικού Θεάτρου

### 2.2.1 Σκοπός κατασκευής της σήραγγας

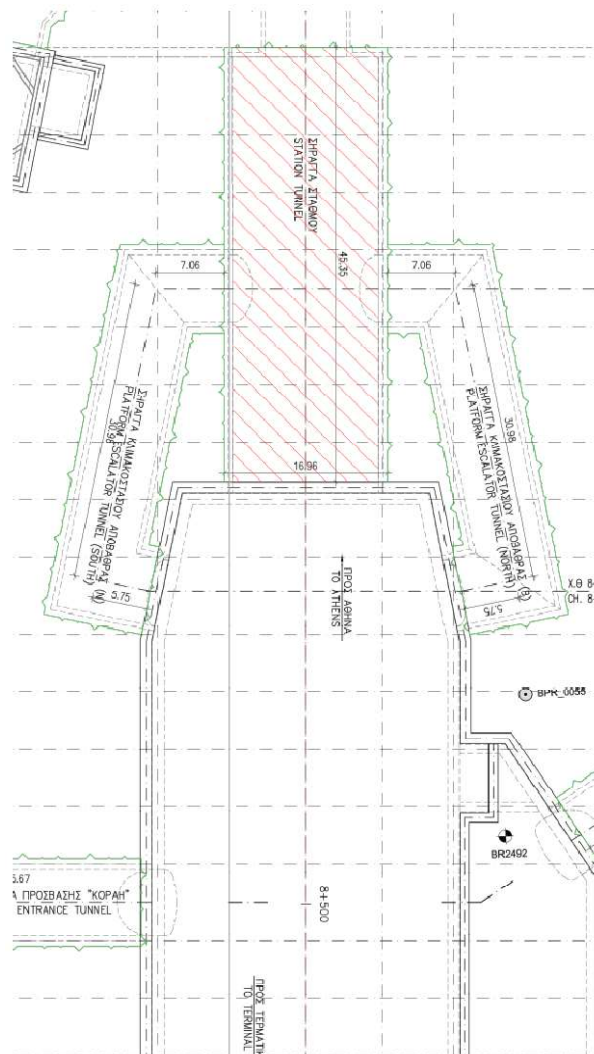
Εξαιτίας της έλλειψης χώρου στο εμπορικό κέντρο του Πειραιά να κατασκευαστεί όλος ο σταθμός με την μέθοδο ανοιχτού ορύγματος σε όλο το μήκος του, κατασκευάστηκε η σήραγγα NATM που ενώνει την σήραγγα TBM με τον σταθμό. Ήταν απαραίτητο ο σταθμός να έχει μήκος περίπου 115 μέτρα ώστε να υπάρχει ο κατάλληλος χώρος για τις αποβάθρες και τα υπόλοιπα λειτουργικά τμήματα του σταθμού όπως το επίπεδο ηλεκτρομηχανολογικών χώρων και το επίπεδο έκδοσης εισιτηρίων, αλλά και τα φρεάτια που ήταν απαραίτητα περιμετρικά του συγκεκριμένου σταθμού. Η αρχική επιλογή ήταν να κατασκευαστεί όλος ο σταθμός με την μέθοδο ανοιχτής εκσκαφής που θα πρόσφερε περισσότερους ανοικτούς χώρους και καλύτερη οργάνωση του εργοταξίου.

Εξαιτίας του πυκνού δομημένου περιβάλλοντος γύρω από την κεντρική πλατεία του Πειραιά, καθώς επίσης και της απρόσκοπτης κυκλοφοριακής κίνησης επί της οδού Ηρώων Πολυτεχνείου που έπρεπε να επιτευχθεί, το μήκος του ανοικτού ορύγματος περιορίστηκε στα 72 μέτρα και το υπόλοιπο απαιτούμενο μήκος έπρεπε να ολοκληρωθεί υπόγεια δημιουργώντας μια κεντρική σήραγγα αποβαθρών καθώς και δυο πλευρικές κεκλιμένες σήραγγες κλιμακοστασίων που θα ενώνουν τις αποβάθρες με το άνω επίπεδο έκδοσης εισιτηρίων.

Η διάνοιξη της NATM σήραγγας προηγήθηκε της έλευσης του TBM στο σημείο ένωσης των δύο σηράγγων. Η διάνοιξη ξεκίνησε μετά την κατασκευή της χαμηλότερης πλάκας του σταθμού, από το επίπεδο -4 των σιδηροτροχιών. Η κατασκευή της έγινε σε πυκνό αστικό ιστό και οι απαιτήσεις σε μικρές επιφανειακές μετακινήσεις ήταν σημαντικές. Επίσης λόγω του μικρού μήκους των υπερκείμενων γεωλογικών σχηματισμών θα έπρεπε να ακολουθηθεί η μηχανική μέθοδος εξόρυξης.

Η σήραγγα όπως προαναφέρθηκε ενώνει την σήραγγα TBM της γραμμής 3 που έχει κατεύθυνση από τον Σταθμό Πειραιά προς τον Σταθμό Δημοτικό Θέατρο και το όρυγμα του Σταθμού Δημοτικού Θεάτρου Πειραιά στην Νότια πλευρά του, στο ύψος

της στάθμης των γραμμών του συρμού. Το μήκος της σήραγγας είναι 45,35m και η διάμετρος της διατομής 16,80m. Πλευρικά η σήραγγα διακλαδώνεται με δύο άλλες σήραγγες των κλιμακοστασίων αποβαθρών, διαμέτρου 8m, οι οποίες είναι κεκλιμένες, ξεκινάνε από την στάθμη έκδοσης εισιτηρίων και κατεβαίνουν στο ύψος των αποβαθρών όπου συναντούν την σήραγγα NATM.



Σχέδιο 2.1: Κεντρική σήραγγα NATM Δημοτικού Θεάτρου Πειραιά [1]

## 2.2.2 Συνοπτικά η αλληλουχία των εργασιών

1. Κατασκευή πασσάλων αντιστήριξης του ορύγματος του σταθμού και των προσβάσεων.
2. Εκσκαφή και αντιστήριξη του ανοικτού ορύγματος του σταθμού και των προσβάσεων μέχρι την τελική στάθμη.
3. Σκυροδέτηση πλάκας πυθμένα του σταθμού.
4. Επίχωση με το κατάλληλο υλικό πάνω από την στάθμη του πυθμένα, από την πλευρά του μετώπου της σήραγγας NATM του σταθμού, έως την στάθμη του επιπέδου της Α φάσης διάνοιξης της σήραγγας σταθμού.
5. **Διάνοιξη σήραγγας NATM σταθμού σε τρεις φάσεις (A1, A2 και B), η A1 και A2 φάση ξεκίνησαν στις 17-12-15 και ολοκληρώθηκαν στις 30-03-16.**
6. Κατασκευή μόνιμης επένδυσης σήραγγας NATM του σταθμού εκτός των τμημάτων των μετώπων προσβολής των σηράγγων κλιμακοστασίων αποβαθρών. Κατασκευή μόνιμου φορέα σταθμού μέχρι το επίπεδο -2.
7. Διάνοιξη σήραγγας πρόσβασης «ΚΟΡΑΗ» (Προσβολή από το όρυγμα της πρόσβασης)
8. Κατασκευή μόνιμης επένδυσης σήραγγας πρόσβασης «ΚΟΡΑΗ» και μόνιμου φορέα πρόσβασης.
9. **Διάνοιξη σηράγγων κλιμακοστασίων αποβαθρών σε δύο φάσεις (προσβολή από το επίπεδο -1 του σταθμού).**
10. Κατασκευή μόνιμης επένδυσης σηράγγων κλιμακοστασίων αποβαθρών και ολοκλήρωση μόνιμης επένδυσης στη σύνδεση με τη σήραγγα του σταθμού. Ολοκλήρωση μόνιμου φορέα σταθμού.
11. Διάνοιξη σήραγγας πρόσβασης «ΗΡΩΩΝ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥ» (προσβολή από το όρυγμα της πρόσβασης)
12. Κατασκευή μόνιμης επένδυσης σήραγγας πρόσβασης «ΗΡΩΩΝ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥ» και μόνιμου φορέα πρόσβασης.

### 2.2.3 Τεχνικογεωλογικές συνθήκες

Σύμφωνα με τα στοιχεία της μελέτης οι βασικές τεχνικογεωλογικές ενότητες είναι οι εξής: [1]

Τεχνικογεωλογική ενότητα **NM-MS**: Ασβεστόλιθος, Μάργα, Αργιλόλιθος, Ιλυόλιθος

Εύρος GSI: 55-65

*Πίνακας 2.1: Τεχνικογεωλογική ενότητα NM-MS, Μάργα, Αργιλόλιθος, Ιλυόλιθος*

NM-MS: Μάργα, Αργιλόλιθος, Ιλυόλιθος			
E(MPa)	600	R(m)	8,40
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	22,00	P <sub>o</sub> (MPa)	0,55
$\phi$ (°)	40,00	N <sub>s</sub>	2,14
GSI	55,00	H(m)	25,00
$\sigma_{ci}$ (MPa)	0,25	$\sigma_{cm}$ (MPa)	0,51
$\nu$	0,30	$\lambda_{cr}$	0,81
$\delta$	8,00	k	4,60
K	1,33	G	231
c(MPa)	0,12		

Τεχνικογεωλογική ενότητα **NM-CN**: Ασβεστόλιθος, Μάργα, Κροκαλοπαγή, Λατυποπαγή

Εύρος GSI: 55-65

*Πίνακας 2.2: Τεχνικογεωλογική ενότητα NM-CN Μάργα, Κροκαλοπαγή, Λατυποπαγή*

NM-CN Μάργα, Κροκαλοπαγή, Λατυποπαγή			
E(MPa)	600	R(m)	8,40
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	22,00	P <sub>o</sub> (MPa)	0,55
$\phi$ (°)	42,00	N <sub>s</sub>	2,45
GSI	55,00	H(m)	25,00
$\sigma_{ci}$ (MPa)	0,25	$\sigma_{cm}$ (MPa)	0,45
$\nu$	0,30	$\lambda_{cr}$	0,80
$\delta$	8,40	k	5,04
K	1,35	G	231
c(MPa)	0,10		

## 2.2.4 Διάνοιξη σήραγγας σταθμού και Μέτρα Άμεσης υποστήριξης

Η διάνοιξη της σήραγγας NATM του Σταθμού έγινε με την μέθοδο άνω ημιδιατομής- βαθμίδας (top heading and bench) και το άνω μέρος διανοίχθηκε σε δύο φάσεις A1 πρώτα και A2 στην συνέχεια, ενώ αμέσως μετά διανοίχθηκε το κάτω μέρος (bench). Η διάνοιξη έγινε με συμβατικά μηχανικά μέσα σημειακής κοπής και βήμα προχώρησης 1m για το άνω μέρος και 2m για το κάτω.

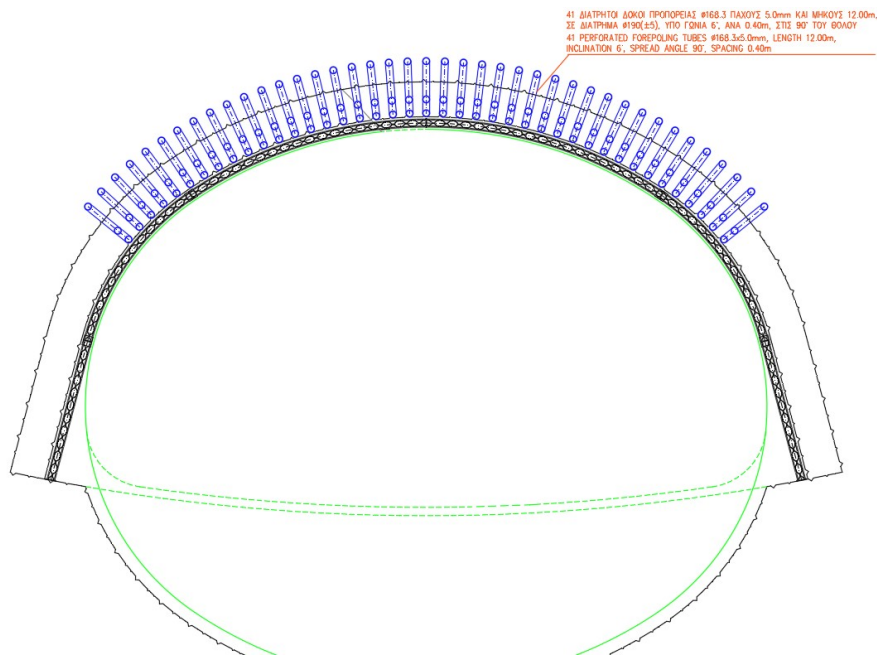
Αρχικά έγινε η ολοκλήρωση της θεμελίωσης σταθμού και της πλάκας πυθμένα από σιδηροπαγές σκυρόδεμα και στη συνέχεια επίχωση στην πλευρά του μετώπου της NATM μέχρι την στάθμη Α φάσης της διάνοιξης της σήραγγας του σταθμού.

### 2.2.4.1 Μέτρα προστασίας μετώπου

Για την ασφάλεια του μετώπου της αβαθούς σήραγγας και εξαιτίας των σημαντικών απαιτήσεων σε ελάχιστες μετακινήσεις στην επιφάνεια ήταν απαραίτητη η απομείωση των μετακινήσεων  $u_R$ . Επομένως για τα πρώτα 12m της σήραγγας στο σημείο που ενώνεται η σήραγγα NATM με τον σταθμό κατασκευάστηκε **ομπρέλα προενίσχυσης μετώπου** (umbrella arch pre-support) μόνο στο μέτωπο προσβολής από 41 διάτρητους δοκούς προπορείας  $\Phi 168.3$ , πάχους 5mm και μήκους 12m σε διάτρημα  $\Phi 190$  (υπό γωνία  $6^\circ$  ανά 0.40m στις  $90^\circ$  του θόλου).

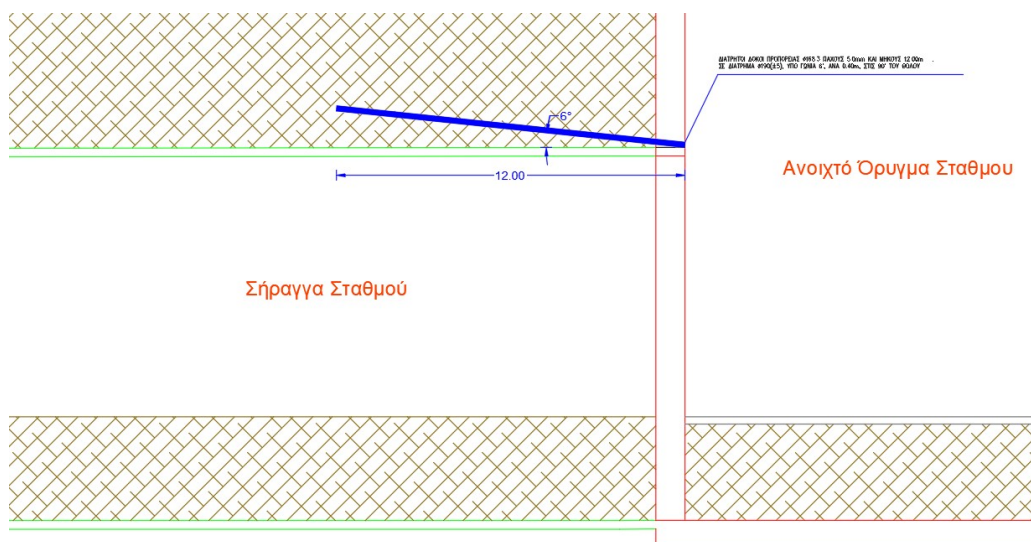


Εικόνα 2.5: Forepoling [1]



Σχέδιο 2.2: Ομπρέλα προενίσχυσης μετώπου για τα πρώτα 12m (Forepoling)[1]

Η εφαρμογή της ομπρέλας προενίσχυσης έγινε στα εξής στάδια: Διάτρηση οπών Φ190 πάνω από το θόλο που σχηματίστηκε έχοντας αρκετό χώρο για το βαρύ διατρητικό εξοπλισμό που απαιτεί η μέθοδος Forepoling, μέσα από το ανοιχτό όρυγμα. Στη συνέχεια έγινε η τοποθέτηση των σωλήνων Φ168,3mm στα διατρήματα. Τέλος, έγινε η ενεμάτωση των οπών εφαρμόζοντας πίεση στις οπές με πρέσα ενεμάτωσης. Το Forepoling εφαρμόζεται σε δύο στάδια. Πρώτα γίνεται η διάτρηση, τοποθέτηση και ενεμάτωση των μισών οπών και σωλήνων και σε επόμενο στάδιο των εναπομενόντων.

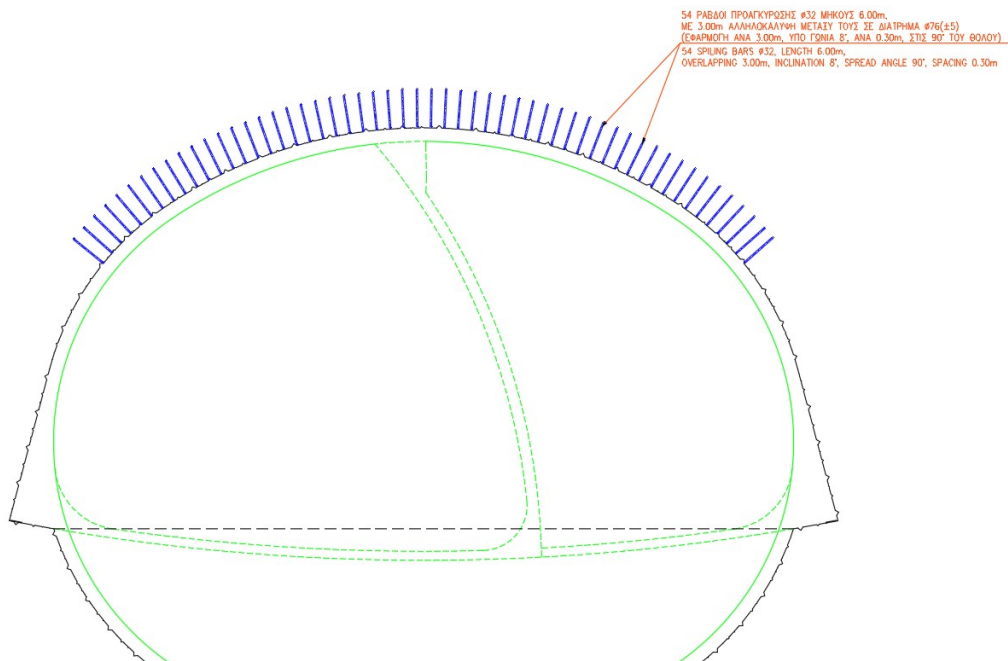


Σχέδιο 2.3: Κατά μήκος Τομή- Ένωσης σταθμού – σήραγγας. Forepoling

Εξαιτίας των απαιτήσεων ελάχιστων μετακινήσεων στην επιφάνεια της αβαθούς σήραγγας εντός αστικού περιβάλλοντος, ήταν απαραίτητη η όπλιση του θόλου σε όλο το μήκος της σήραγγας, ώστε να συγκρατηθούν στο ελάχιστο και οι συγκλίσεις που παρατηρούνται μπροστά από το μέτωπο. Γι' αυτό το λόγο επιλέχθηκε η προαγκύρωση του μετώπου σε όλο το μήκος της σήραγγας.

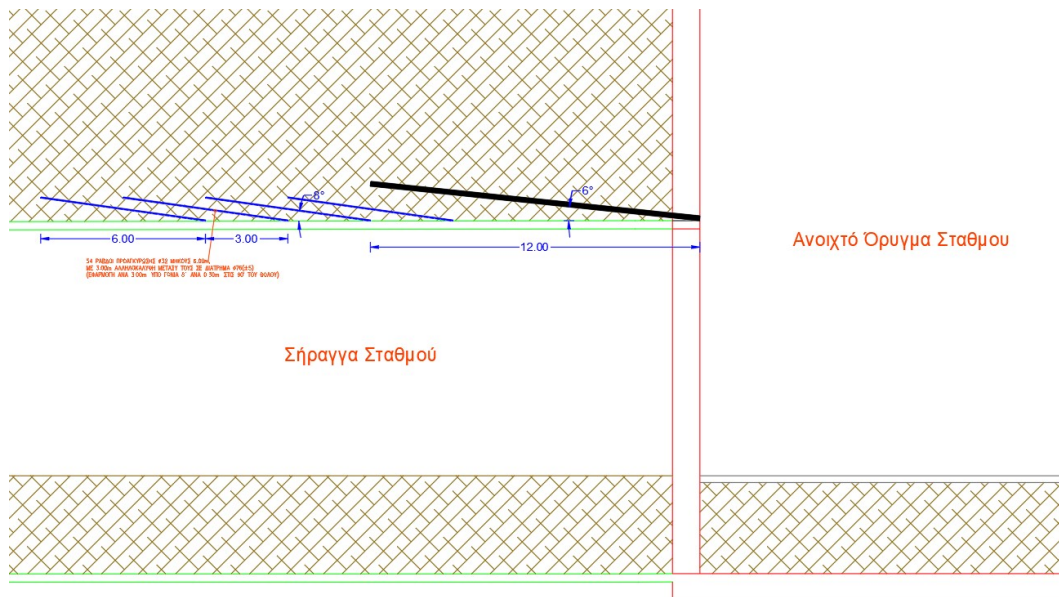
Μετά τα πρώτα 12m διάνοιξης της άνω ημιδιατομής έγινε προαγκύρωση (spiling) του μετώπου στις 90° του θόλου αποτελούμενη από 54 ράβδους φ32, σε αξονικές αποστάσεις 0.30m, μήκους 6.00m σε διάτρημα Φ76 (υπό γωνία 8° ανά 0.30).

Σε πρώτη φάση για την εφαρμογή των ράβδων έγινε διάτρηση των οπών Φ76 με ελαφρύ διατρητικό μηχανικό εξοπλισμό. Η διάτρηση πραγματοποιήθηκε ανά 3 βήματα προχώρησης σε απόσταση 3m κατά μήκος της σήραγγας. Στη συνέχεια έγινε τοποθέτηση των σωλήνων εντός των οπών με χειρωνακτικά μέσα. Τελευταίο στάδιο για την ολοκλήρωση του spiling είναι η ενεμάτωση των οπών με εισπίεση μέσω πρέσας ενεμάτωσης. Η συνέχεια της διάνοιξης στα επόμενα βήματα προχώρησης πρέπει να γίνεται τουλάχιστον 6 ώρες από την ολοκλήρωση του σταδίου ενεμάτωσης, έτσι ώστε να έχει επιτευχθεί πλήρης πήξη του τσιμεντενέματος.



Σχέδιο 2.4: Διατομή Σήραγγας - Προαγκύρωση (spiling) του μετώπου[1]



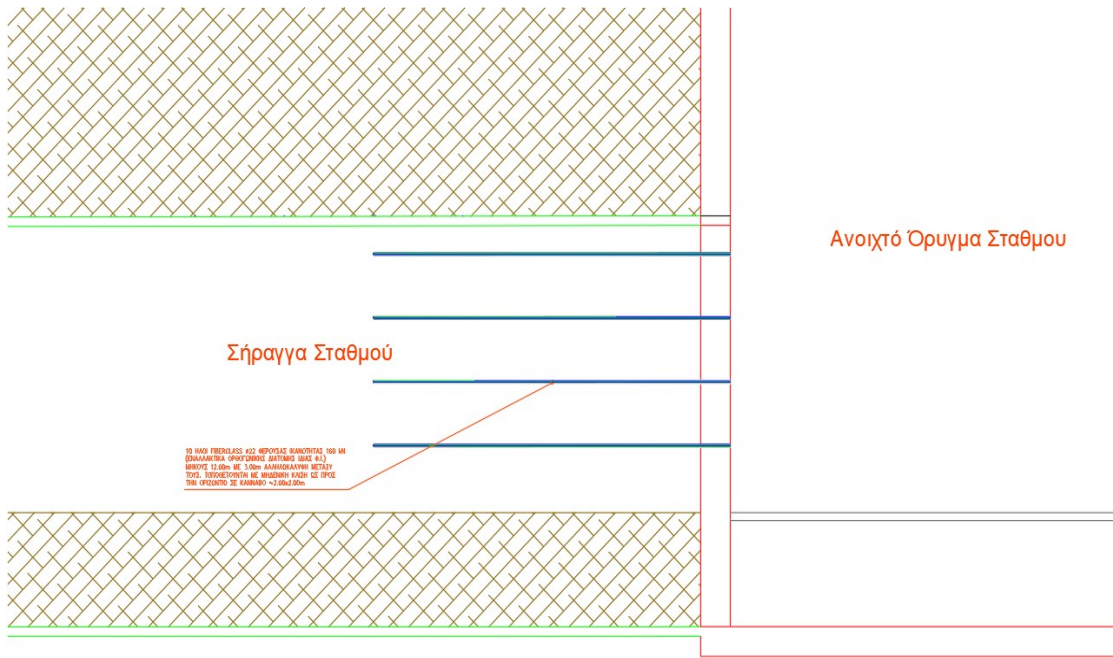


Σχέδιο 2.5: Τομή κατά μήκος - Προαγκύρωση (spiling) του μετώπου

Για την ενίσχυση του μετώπου και τον καλύτερο έλεγχο των πιθανών επιφανειακών καθιζήσεων εφαρμόστηκε οριζόντια πίεση κάθετα στο μέτωπο με την χρήση προσωρινών ήλων υαλοϊνών (fiberglass) διαμέτρου Φ22 και φέρουσας ικανότητας 160 KN. Οι ράβδοι έχουν μήκος 12m και δημιουργήθηκε αλληλοκάλυψη 3m μεταξύ τους. Ο κάνναβος που επιλέχθηκε σύμφωνα με την μελέτη ήταν 2m x 2m.

Για την τοποθέτηση των ήλων Φ22 έγιναν διατρήματα διαμέτρου  $d=76\text{mm}$  με ξηρά διάτρηση, στην συνέχεια στερεώθηκαν οι ήλοι στο κέντρο του διατρήματος και συμπληρώθηκε το κενό ανάμεσα στον ήλο και την περίμετρο του διατρήματος με τσιμεντένεμα με εισπίεση από την αρχή του διατρήματος. Οι ήλοι αυτοί ήταν προσωρινοί και η ευθραυστότητα του υλικού έδινε την δυνατότητα εύκολης κοπής τους κατά την διάνοιξη του μετώπου της σήραγγας.

Η στήριξη του μετώπου ολοκληρώνονταν με την τοποθέτηση μιας λεπτής στρώσης 5cm εκτοξευόμενου σκυροδέματος (shotcrete) C20/25 στην επιφάνεια του μετώπου και την δημιουργία οπών αποστράγγισης του μετώπου, με σωλήνες PVC μήκους 3m και καλυμμένο με γεωφάσμα στραγγιστηρίων.



Σχέδιο 2.6: Κατά μήκος Τομή - Πίεση στο μέτωπο με προσωρινούς ήλους (fiberglass)

## 2.2.4.2 Διάνοιξη A1 φάσης σήραγγα NATM σταθμού

Η διάνοιξη του πάνω αριστερά τμήματος A1 της ημιδιατομής A έγινε με υδραυλική σφύρα για την θραύση του συμπαγούς πετρώματος και απόθεση των προϊόντων εκσκαφής με ευέλικτους εκσκαφείς προς την πλευρά του ανοικτού ορύγματος και στη συνέχεια μεταφορά τους εκτός σταθμού. Αμέσως μετά την διάνοιξη έγινε απόσπαση των επισφαλών όγκων.



*Εικόνα 2.6: A1 φάση διάνοιξης [1]*

### Μέτρα υποστήριξης A1 φάσης

Ακολουθεί η τοποθέτηση των μέτρων υποστήριξης της ημιδιατομής για την συγκράτηση των συγκλίσεων της βραχώμαζας. Τοποθετείται **εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (shotcrete) C20/25** ενισχυμένο με **δομικό πλέγμα 2xT188**. Το συνολικό πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι 30cm στην αριστερή παρειά και τοποθετείται σε τρεις στρώσεις των 15cm η πρώτη, των 10cm η δεύτερη και μια τελική 5cm όταν ολοκληρωθεί και η διάνοιξη του αριστερού τμήματος A2. Δεξιά του θόλου A1 έγινε τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 25cm σε δύο στρώσεις των 15cm και 10cm και 1 πλέγματος T188 ανά στρώση, ενώ στον πυθμένα κατασκευάστηκε το αριστερό τμήμα του προσωρινού αναστραμμένου τόξου (invert) με ενισχυμένο δομικό πλέγμα T188 και διάστρωση εκτοξευόμενου σκυροδέματος των 20cm σε δύο στρώσεις των 10cm.

ΤΥΠΟΙ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΜΙΚΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ										
Όνομασία ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ	Διαστάσεις (m)	Διαμήκη σύρματα			Εγκάρσια σύρματα			Βάρος φύλλου (kg)	Φύλλα ανά δέμα (τεμ)	Βάρος ανά δέμα (kg)
		Αριθμός	Διάμετρος (mm)	Αποστάσεις (mm)	Αριθμός	Διάμετρος (mm)	Αποστάσεις (mm)			
O92	5,00X2,15	15	4,2	150	20	4,2	250	12,86	100	1.286
T92	5,00X2,15	15	4,2	150	32	4,2	156	15,67	100	1.567
T131	5,00X2,15	15	5,0	150	34	5,0	150	21,5	100	2.150
T139	5,00X2,15	22	4,2	100	50	4,2	100	23,70	50	1.185
(*)T188	5,00X2,15	15	6,0	150	32	6,0	156	31,92	50	1.596
T196	5,00X2,15	22	5,0	100	50	5,0	100	33,50	50	1.675

*Πίνακας 2.3 : Τύποι Δομικού Πλέγματος – Επιλογή του T188*

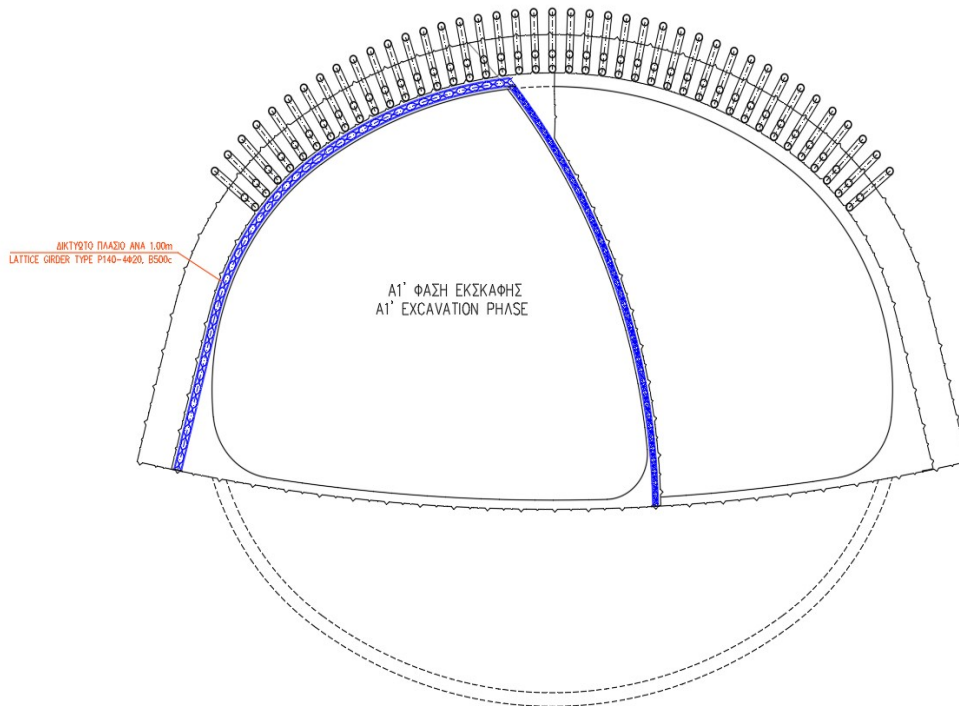


*Εικόνα 2.7: Τοποθέτηση 1<sup>ης</sup> στρώσης shotcrete με 1 πλέγμα T188*

Ανά 1m όσο είναι και το βήμα προχώρησης τοποθετούνται **χαλύβδινα δικτυωτά πλαίσια (Lattice Girder) P140 – 4Φ20** που αποτελείται από 4 διαμήκεις οπλισμούς, στις παρειές της ημιδιατομής A1 όπως φαίνεται στο σχέδιο 2.7.

Το δικτυωτό πλαίσιο οπλίζει το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Εγκιβωτίζεται στις στρώσεις του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

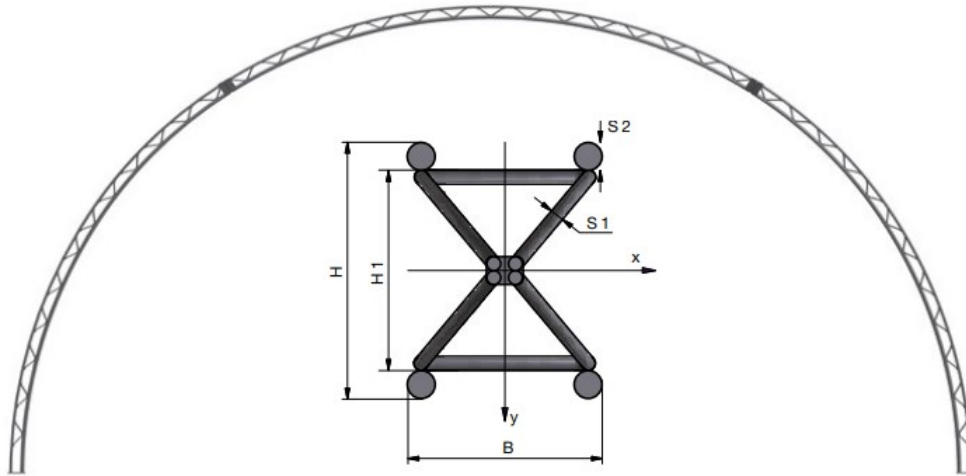
Στην δεξιά πλευρά της ημιδιατομής A1 τοποθετείται δικτυωτό πλαίσιο όπως φαίνεται στο σχέδιο 2.7 το οποίο λειτουργεί προσωρινά σαν στύλος στο κέντρο της άνω ημιδιατομής και μέχρι την διάνοιξη του δεξιού τμήματος της άνω ημιδιατομής A2.



Σχέδιο 2.7 Τοπική διατομή Α1 φάσης εκσκαφής – Δικτυωτό πλαίσιο Lattice Girder

4-bar girder											
No.	Designation <sup>1)</sup>	H1	S1	S2	Weight <sup>2)</sup>	H	B	A	W <sub>x</sub>	W <sub>y</sub>	Article No. <sup>3)</sup>
[#]	[PH1-S2]	[mm]	[mm]	[mm]	[kg/m]	[mm]	[mm]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>3</sup> ]	[cm <sup>3</sup> ]	[--]
1	P100-20	50	10	20	12.7	140	100	12.57	65	41	14200020XXXX
2	P100-25			25	14.3	150		19.63	103	56	14200025XXXX
3	P100-30			30	19.4	160		28.27	151	72	14200030XXXX
4	P100-36			36	26.7	172		40.72	222	88	14200036XXXX
5	P140-20			20	13.1	190		12.57	96	65	14220020XXXX
6	P140-25	75	10	25	18.5	200	140	19.63	151	94	14220025XXXX
7	P140-30			30	25.3	210		28.27	219	124	14220030XXXX
8	P140-36			36	35.1	222		40.72	319	161	14220036XXXX
9	P190-20	95	10	20	13.9	230	180	12.57	121	90	14240020XXXX
10	P190-25			25	19.3	240		19.63	190	132	14240025XXXX
11	P190-30			30	26.1	250		28.27	275	178	14240030XXXX
12	P190-36			36	35.9	262		40.72	399	237	14240036XXXX
13	P230-20	115	10	20	14.3	270	220	12.57	146	114	14260020XXXX
14	P230-25			25	19.7	280		19.63	228	170	14260025XXXX
15	P230-30			30	26.5	290		28.27	330	233	14260030XXXX
16	P230-36			36	36.3	302		40.72	479	316	14260036XXXX
17	P260-20			20	14.7	300		12.57	164	114	14280020XXXX
18	P260-25	130	10	25	20.1	310	220	19.63	258	170	14280025XXXX
19	P260-30			30	26.9	320		28.27	372	233	14280030XXXX
20	P260-36			36	36.7	332		40.72	539	316	14280036XXXX

Πίνακας 2.4: Τύποι δικτυωτών πλαισίων



*Εικόνα 2.8: Λεπτομέρεια Εγκάρσια Διατομής δικτυωτού πλαισίου*

Τα μέτρα άμεσης υποστήριξης της ημιδιατομής A1 ολοκληρώνονται με την τοποθέτηση αγκυρίων πλήρους πάκτωσης  $\Phi 25$  B500C, φέρουσας ικανότητας 200 KN, μήκους 4,00-6,00m σε αποστάσεις 1,00m. (Το αγκύριο πλησίον της βάσης του δικτυωτού πλαισίου συνδέεται με το πλαίσιο με ειδικά διαμορφωμένη πλάκα συναρμογής). Στις δύο παρειές του θόλου της ημιδιατομής A1 έγινε διαμόρφωση διευρυμένης έδρασης.



*Εικόνα 2.9: Διάνοιξη της ημιδιατομής. A1 και τοποθέτηση της προσωρινής υποστήριξης [1]*

### 2.2.4.3 Διάνοιξη A2 φάσης σήραγγα NATM σταθμού

Με την προχώρηση της ημιδιατομής A1 για 10 βήματα προχώρησης περίπου, ξεκίνησε η εκσκαφή του δεξιού άνω τμήματος A2. Η διάνοιξη και εδώ συνεχίζει να γίνεται με συμβατικά μηχανικά μέσα (υδραυλική σφύρα) και απόθεση των προϊόντων εκσκαφής προς το ανοικτό όρυγμα του σταθμού. Μετά την εκσκαφή ενός βήματος προχώρησης γίνεται η αφαίρεση του κεντρικού πυλώνα που δημιουργήθηκε με την τοποθέτηση χαλύβδινων πλαισίων κατά την διάνοιξη της A1 φάσης και η απόσπαση των επισφαλών όγκων πετρώματος από το άνω μέρος του θόλου.

#### **Τοποθέτηση Άμεσης Υποστήριξης άνω δεξιά τμήματος A2 ημιδιατομής.**

Αμέσως μετά την διάνοιξη ενός βήματος προχώρησης της δεξιάς άνω ημιδιατομής τοποθετήθηκε εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (shotcrete) στην δεξιά παρειά του σχηματιζόμενου θόλου συνολικού πάχους 30cm σε τρεις στρώσεις, η πρώτη των 15cm, η δεύτερη των 10cm και η τελευταία των 5cm τοποθετήθηκε μαζί με αυτή του αριστερού τμήματος A1 της ημιδιατομής. Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα οπλίζεται με δύο δομικά **χαλύβδινα πλέγματα 2xT188**, τα οποία τοποθετήθηκαν ανά ένα σε κάθε στρώση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και **χαλύβδινα δικτυωτά** πλαίσια (Lattice Girder) P140 – 4Φ20 που τοποθετήθηκαν ανά βήμα προχώρησης (1m).

Στην συνέχεια έγινε η ολοκλήρωση του προσωρινού ανεστραμμένου τόξου (invert) τοποθετώντας 2 στρώσεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος στο δεξιό τμήμα A2. Η κάθε στρώση ήταν των 10 cm και συνδυαζόταν με ένα δομικό πλέγμα από χάλυβα T188.

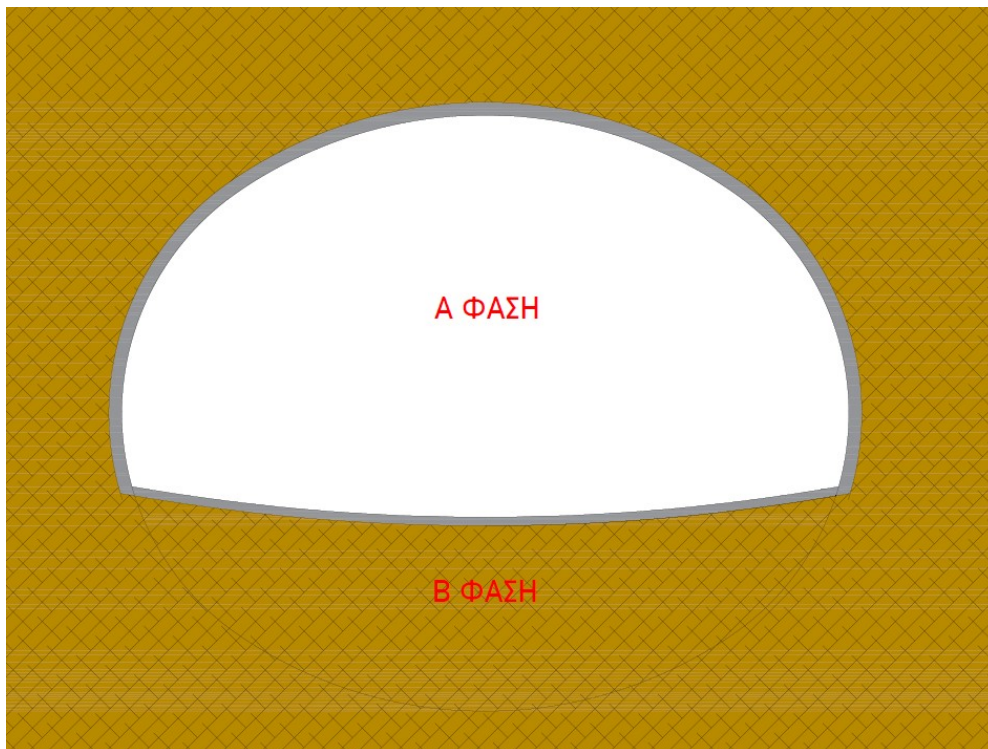
Τα μέτρα υποστήριξης του δεξιού τμήματος της άνω ημιδιατομής ολοκληρώνονται με την χρήση αγκυρίων πλήρους πάκτωσης όπως και στο τμήμα A1. Τοποθετήθηκαν αγκύρια πλήρους πάκτωσης Φ25 B500C, φέρουσας ικανότητας 200 KN, μήκους 4,00-6,00m σε αποστάσεις 1,00m, ενώ το αγκύριο πλησίον της βάσης του δικτυωτού πλαισίου στην δεξιά παρειά συνδέεται με το πλαίσιο με ειδικά διαμορφωμένη πλάκα συναρμογής, όπως και στην αριστερή παρειά.

#### 2.2.4.4 Διάνοιξη Β φάσης σήραγγα NATM σταθμού

Η διάνοιξη της Β φάσης (Βαθμίδα) της σήραγγας έγινε μετά την ολοκλήρωση της Α φάσης της άνω ημιδιατομής και με αντίθετη κατεύθυνση από την φορά διάνοιξης του άνω μέρους της σήραγγας, από το τέλος προς την αρχή και επιστροφή προς την έξοδο που ενώνεται με το όρυγμα του σταθμού.

Η διάνοιξη έγινε με μηχανικά μέσα και σε πρώτη φάση έγινε η καθαίρεση του προσωρινού ανεστραμμένου πυθμένα (invert) , ο οποίος είχε επενδυθεί με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 20cm και δομικό πλέγμα από χάλυβα.

Το βήμα προχώρησης της Β φάσης ήταν 2 μέτρα. Η εκσκαφή έγινε με υδραυλική σφύρα για την θραύση του συμπαγούς πετρώματος και η απόθεση των προϊόντων εκσκαφής έγινε με ευέλικτους εκσκαφείς προς την πλευρά το ανοικτού ορύγματος και στη συνέχεια έγινε η μεταφορά τους εκτός σταθμού.



Σχέδιο 2.8: Εκσκαφή βαθμίδας – Β φάση.





*Εικόνα 2.10: Εκσκαφή βαθμίδας – Β φάση [1]*

### **Μέτρα υποστήριξης Β φάσης**

Μετά την διάνοιξη κάθε βήματος της Β φάσης ήταν απαραίτητη η άμεση υποστήριξη και η ολοκλήρωση του τελικού δακτυλίου της σήραγγας στην ολοκληρωμένη πλέον μορφή πριν από την τοποθέτηση της μόνιμης επένδυσης.

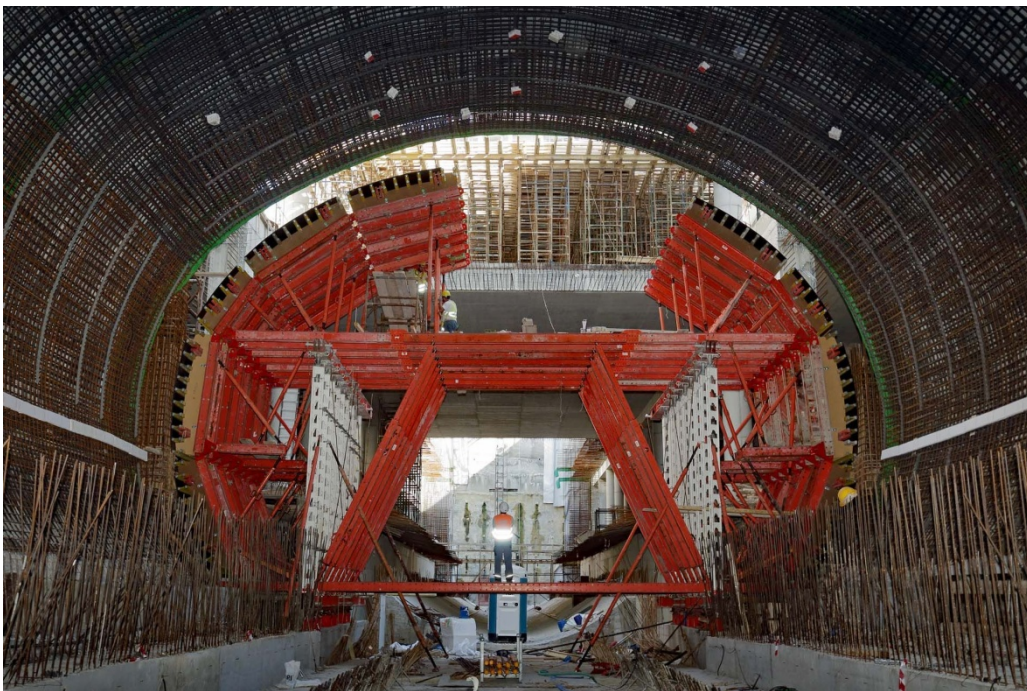
Για την άμεση υποστήριξη του πυθμένα έγινε χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος C25/30 στις παρειές, σε δυο στρώσεις των 15 cm η κάθε μια και με την τοποθέτηση ενός δομικού πλέγματος χάλυβα T188 σε κάθε μια από τις στρώσεις. Το συνολικό πάχος των 30 cm εκτοξευόμενου σκυροδέματος ενώνεται πλέον με τις παρειές της άνω ημιδιατομής, δημιουργώντας έναν ενιαίο δακτύλιο άμεσης υποστήριξης.



*Εικόνα 2.11: Ολοκλήρωση Διάνοιξης Β φάσης.[1]*

## 2.2.4.5 Μόνιμη Επένδυση σήραγγας

Μετά την ολοκλήρωση των μέτρων άμεσης υποστήριξης έγινε η επένδυση του δακτυλίου της σήραγγας με την μόνιμη επένδυση από έγχυτο σκυρόδεμα με την χρήση κινούμενου μεταλλότυπου με ειδικό φορείο μεταφοράς του επί τροχών πάνω σε σιδηροτροχιές που τοποθετήθηκαν στα πέδιλα της σήραγγας. Ο μεταλλότυπος έφερε κατάλληλες εγκοπές μέσω των οποίων γινόταν η σκυροδέτηση, η δόνηση και η επιθεώρηση του διαστρωμένου σκυροδέματος. Πριν από την διάστρωση του σκυροδέματος η επιφάνεια της σήραγγας καθαρίστηκε επιμελώς και η επιφάνεια του μεταλλότυπου επαλείφθηκε με ειδικό λάδι. Στην διεπιφάνεια άμεσης και μόνιμης υποστήριξης και πριν από την σκυροδέτηση, τοποθετήθηκε στεγανοποιητική μεμβράνη και στην συνέχεια ο εγκάρσιος και διαμήκης οπλισμός της μόνιμης επένδυσης. Ο οπλισμός στερεώθηκε στις βάσεις των παρειών της σήραγγας και σε κατάλληλη απόσταση από την επιφάνεια της άμεσης υποστήριξης, χωρίς να δημιουργηθούν βλάβες στην στεγανοποιητική μεμβράνη. Ο μεταλλότυπος αφαιρούνταν για την προχώρηση της σκυροδέτησης όταν το σκυρόδεμα αποκτούσε επαρκή αντοχή, για την αποφυγή ρηγματώσεων και αποκολλήσεων.

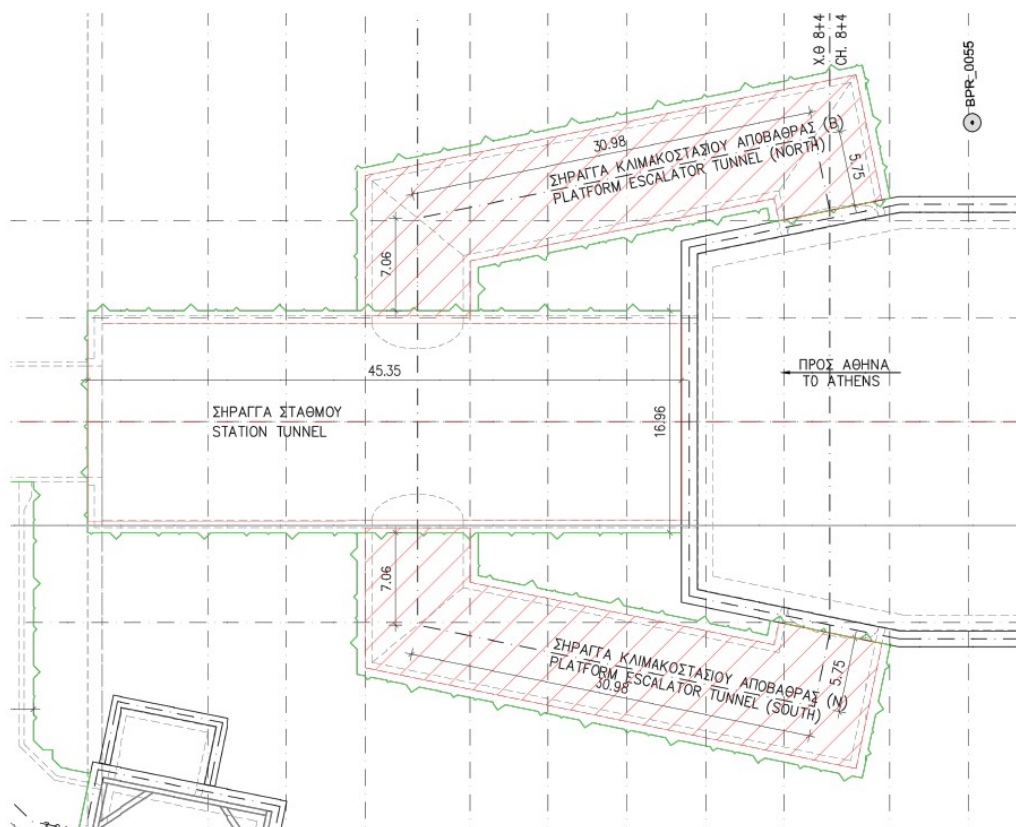


*Εικόνα 2.12: Σκυροδέτηση μόνιμης επένδυσης σήραγγας με κινούμενο μεταλλότυπο.[1]*

## 2.3 Διάνοιξη σήραγγων κλιμακοστασίων.

### 2.3.1 Περιγραφή

Οι σήραγγες κλιμακοστασίων αποβαθρών του σταθμού δημοτικού θεάτρου είναι δύο συμμετρικές κεκλιμένες σήραγγες που το ένα τους άκρο ξεκινά από την στάθμη έκδοσης εισιτηρίων του σταθμού (-1), συνεχίζουν παράλληλα στον σταθμό και την κεντρική σήραγγα NATM και καταλήγουν με τον ίδιο τρόπο να ενωθούν κάθετα στην αριστερή και δεξιά πλευρά της σήραγγας NATM του σταθμού, στο ύψος των αποβαθρών του σταθμού. Οι σήραγγες αυτές δημιουργήθηκαν για την κατασκευή κλιμακοστασίων από τα οποία θα έχει πρόσβαση το επιβατικό κοινό από τον σταθμό στις αποβάθρες που θα εκτείνονται κατά μήκος της σήραγγας NATM του σταθμού. Οι σήραγγες έχουν διάμετρο διατομής 8 μέτρα και μήκος 43,79 μέτρα η κάθε μια.



Σχέδιο 2.9: Πλευρικές σήραγγες κλιμακοστασίων αποβαθρών [1]

## 2.4.2 Διάνοιξη Σηράγγων Κλιμακοστασίων Αποβαθρών και Μέτρα Άμεσης Υποστήριξης

Οι σήραγγες έχουν διάμετρο 8 μέτρα και η διάνοιξη τους έγινε σε δύο φάσεις. Πρώτη φάση (Α) η διάνοιξη της άνω ημιδιατομής και στην συνέχεια η εκσκαφή της δεύτερης φάσης (Β) βαθμίδας. Η εκκίνηση των εργασιών έγινε με την ολοκλήρωση της σήραγγας αποβαθρών του σταθμού. Συνήθως σε κεκλιμένες σήραγγες η προχώρηση γίνεται από το κάτω επίπεδο προς τα ανώτερα. Στην συγκεκριμένη περίπτωση ακολουθήθηκε η αντίθετη φορά για πρακτικούς λόγους που διευκόλυναν την διάνοιξη. Η διάνοιξη ξεκίνησε από την στάθμη εκδοτηρίων του σταθμού για την ευκολότερη αποκομιδή των προϊόντων εκσκαφής προς το ανοιχτό σκάμα του σταθμού στο επίπεδο (-1) και από εκεί περαιτέρω προώθηση τους εκτός σταθμού.

Για την εκσκαφή των σηράγγων επιλέχθηκε η μέθοδος μετώπου βαθμίδας (top heading and bench) και εκσκαφή σε δυο φάσεις. Στην πρώτη φάση Α γίνεται η εκσκαφή της άνω ημιδιατομής ενιαία και στην συνέχεια ακολουθεί η εκσκαφή της βαθμίδας. Η εκσκαφή έγινε με μηχανικά μέσα και βήμα προχώρησης ένα μέτρο (1m) στην άνω ημιδιατομή, ενώ στην κάτω επιλέχθηκε βήμα προχώρησης δυο μέτρων(2m).



Σχέδιο 2.10: Φάσεις εκσκαφής σηράγγων κλιμακοστασίων

## 3. Εκτίμηση θεωρητικών επιφανειακών καθιζήσεων

### 3.1 Εισαγωγή

Οι πιθανές προκλήσεις αστοχιών και διαφορικών καθιζήσεων σε γειτονικές κατασκευές κατά την διάνοιξη αστικών σήραγγων δημιούργησε την ανάγκη συστηματικής παρακολούθησης των εδαφικών μετακινήσεων που προκαλούνται κατά την κατασκευή αστικών υπόγειων έργων.

Η εκδήλωση επιφανειακών εδαφικών καθιζήσεων μετά από την διάνοιξη μιας σήραγγας είναι ένα φαινόμενο αναπόφευκτο. Ο στόχος των μεθόδων εκτίμησης των επιφανειακών καθιζήσεων είναι ο περιορισμός τους σε ανεκτά όρια λειτουργικότητας για τις υπερκείμενες κατασκευές. Όλες οι παρατηρήσεις και οι μετρήσεις που συγκεντρώθηκαν βοήθησαν στη διατύπωση εμπειρικών νόμων για την εκτίμηση της κατανομής και του εύρους των εδαφικών μετακινήσεων ως συνάρτηση απλών παραμέτρων. Οι εμπειρικές μέθοδοι αποτελούν τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες μεθόδους για την πρόβλεψη των καθιζήσεων κατά τη διάνοιξη σήραγγων.

Βασική προϋπόθεση για τη σωστή εκτίμηση των επιφανειακών καθιζήσεων είναι η επιλογή κατάλληλων τιμών για τις παραμέτρους και μηχανικών χαρακτηριστικών του εδάφους. Επίσης απαιτείται ο καθορισμός του βάθους της σήραγγας από την ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους, ο καθαρισμός της μεθόδου διάνοιξης (π.χ. φάσεις διάνοιξης) και της γεωμετρίας της σήραγγας σε σχέση με την εδαφική διαστρωμάτωση. Επίσης τις επιφανειακές καθιζήσεις θα τις καθορίσει το είδος και η πυκνότητα των μέτρων υποστήριξης της περιμέτρου της σήραγγας, καθώς και η υποστήριξη του μετώπου, που στις αστικές σήραγγες μπορεί να αλληλεπιδράσει με την επιφάνεια.

Οι Peck και Schmidt (1969) συνόψισαν τους μηχανισμούς οι οποίοι κατά τη διάρκεια των εργασιών διάνοιξης μιας σήραγγας δημιουργούν απώλεια εδαφικού όγκου και συνεπώς σχετίζονται άμεσα με την εμφάνιση καθιζήσεων στην επιφάνεια του εδάφους.

Η απώλεια του εδαφικού όγκου οφείλεται στα εξής αίτια:

-Παραμορφώσεις του εδαφικού υλικού στην περιοχή του μετώπου της σήραγγας. Αυτές οι παραμορφώσεις εξαρτώνται από την αντοχή της περιβάλλουσας εδαφικής μάζας .

-Ακτινικές μετατοπίσεις οι οποίες αναπτύσσονται κατά τη διάνοιξη της σήραγγας με μηχανήματα ολομέτωπης εκσκαφής λόγω της υπερεκσκαφής που δημιουργείται μεταξύ του κελύφους του μηχανήματος και του περιβάλλοντος γεωυλικού.

-Μετατοπίσεις οι οποίες σχετίζονται με τις εργασίες πλήρωσης του κενού χώρου μεταξύ των μέτρων υποστήριξης της σήραγγας και του περιβάλλοντος εδαφικού υλικού.

- Μετατοπίσεις οι οποίες οφείλονται σε αστοχίες του εδάφους όπως είναι οι πιθανές καταπτώσεις στην περιοχή του μετώπου της σήραγγας εξαιτίας ανεπάρκειας των μέτρων σταθεροποίησης του έως και απρόβλεπτης αλλαγής των επιτόπου γεωλογικών γεωτεχνικών συνθηκών. [3]

Η εκτίμηση των επιφανειακών μετακινήσεων με εμπειρικές μεθόδους δεν συμπεριλαμβάνει συνήθως τα μέτρα υποστήριξης της περιμέτρου του ανοίγματος, καθώς και την πίεση που ασκείται στο μέτωπο με κάποιες τεχνολογίες διάνοιξης.

Η εκτίμηση των εδαφικών μετακινήσεων λόγω των εργασιών διάνοιξης σηράγγων είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί με τη χρήση μεθόδων, οι οποίες γενικώς κατηγοριοποιούνται ως ακολούθως:

- α) Εμπειρικές μέθοδοι
- β) Αναλυτικές μέθοδοι

### **3.2 Εμπειρικές μέθοδοι - Κατακόρυφες μετακινήσεις**

Οι εμπειρικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται κυρίως για την εκτίμηση των κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων και ειδικότερα των επιφανειακών καθιζήσεων κάθετα στον άξονα της σήραγγας.

Οι εμπειρικές μέθοδοι είναι κατάλληλες στις εξής περιπτώσεις:

1. Για μονές σήραγγες ή πολλαπλές σήραγγες ανάμεσα στις οποίες δεν παρατηρείται αλληλεπίδραση.

2. Για τον υπολογισμό των άμεσων καθιζήσεων σε αργιλικά εδάφη.

3. Για συνθήκες ελεύθερου πεδίου.[3]

Ανάμεσα στις εμπειρικές μεθόδους μια από τις επικρατέστερες είναι εκείνη του Peck ο οποίος μετά από επί τόπου μετρήσεις μετακινήσεων κατέληξε σε μια καμπύλη επιφανειακών μετακινήσεων που προσομοιάζει στην καμπύλη του Gauss. Η μαθηματική διατύπωση που εκφράζει αυτή την μορφή καμπύλης είναι:

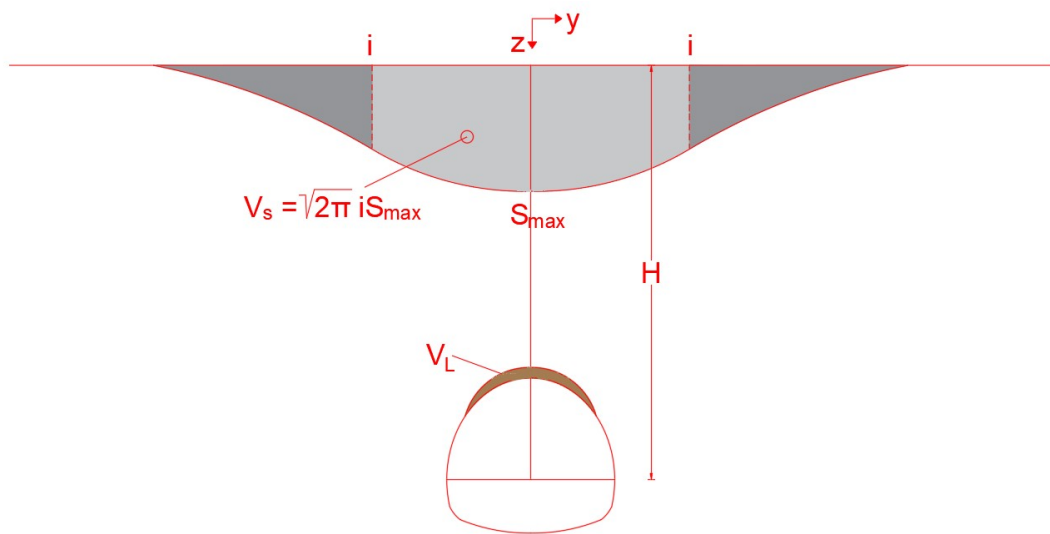
$$S = S_{max} e^{-\frac{y^2}{2i^2}} \quad (3.1)$$

Όπου:

- S: η καθίζηση στην επιφάνεια του εδάφους και σε σημείο το οποίο απέχει εγκάρσια απόσταση από τον άξονα της σήραγγας.

- S<sub>max</sub>: η μέγιστη καθίζηση στην επιφάνεια του εδάφους η οποία προκύπτει για τη θέση y=0.

- i: η παράμετρος εγκάρσιου πλάτους, υποδηλώνει την απόσταση του σημείου αλλαγής καμπυλότητας της κατανομής των καθιζήσεων από τον κεντρικό άξονα συμμετρίας. Στη θέση αυτή η καμπύλη παρουσιάζει τη μέγιστη κλίση (σημείο καμπής) και διαχωρίζεται η κοίλη από την κυρτή ζώνη. (σχ.3.1)



Σχήμα 3.1: Καμπύλη επιφανειακών καθιζήσεων κατά Peck

Εμπειρικές σχέσεις εκτίμησης του εύρους i της καμπύλης επιφανειακών καθιζήσεων:

- O' Reilly and New (1982):  $i=kH$  (3.2)

Όπου : k είναι η παράμετρος που εκφράζει το πλάτος της καμπύλης καθιζήσεων.

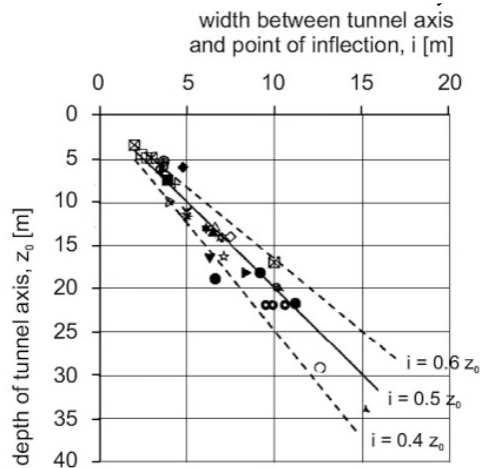
Οι Mair και Taylor (1997), συνιστούν για πρακτικές εφαρμογές σχεδιασμού τις παρακάτω τιμές παραμέτρου k:

a)  $k=0.5$  για περίπτωση αργιλικό εδαφών

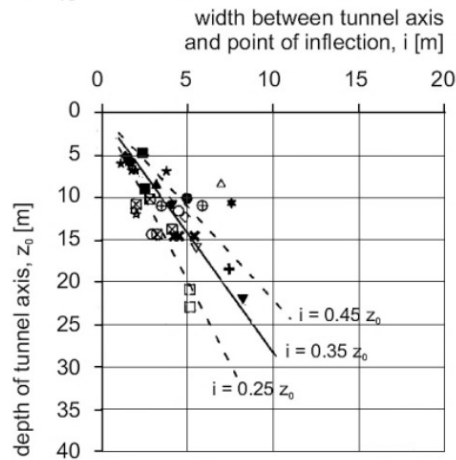
b)  $k=0.35$  για την περίπτωση κοκκώδη εδαφών

-Κατά Burland (2001):  $k=0.2-0.7$  [4]

Εκτίμηση του εύρους καμπυλότητας μέσω διαγραμμάτων:



Σχήμα 3.2 εκτίμηση του  $i$  συνάρτηση του βάθους διάνοιξης της σήραγγας σε αργιλικά εδάφη. [6]



Σχήμα 3.3 εκτίμηση του  $i$  συνάρτηση του βάθους διάνοιξης της σήραγγας σε κοκκώδη εδάφη. [6]

- Οι Oteo και Sagaseta (1982) συνδέοντας δεδομένα και στοιχεία μετρήσεων της βιβλιογραφίας, καθώς και μεγάλο αριθμό αποτελεσμάτων αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία προτείνει την ακόλουθη γραμμική σχέση:

$$\frac{i}{R} = 1.05 \frac{H}{D} - 0.42 \quad (3.3)$$



- Οι Clough και Schmid (1981), μόνο για αργίλους.

$$\frac{i}{D} = 0.5 \left( \frac{H}{D} \right)^{0.8} \quad (3.4)$$

- Mair & Taylor (1993), κυρίως για αργίλους.

$$i = \left[ 0.175 + 0.325 \left( 1 - \frac{z_s}{H} \right) \right] H \quad (3.5)$$

Όπου  $z_s$ : Βάθος από την επιφάνεια

H: Το βάθος του άξονα της σήραγγας

Μια σημαντική παράμετρος στον υπολογισμό των επιφανειακών καθιζήσεων είναι ο εδαφικός όγκος που μετακινείται εντός της καμπύλης μετά την διάνοιξη της σήραγγας. Η απώλεια του εδαφικού όγκου (ground loss) ανά μονάδα μήκους σήραγγας  $V_s$  στην επιφάνεια του εδάφους, δηλαδή όγκος ο οποίος περικλείεται από την καμπύλη των επιφανειακών καθιζήσεων, υπολογίζεται από την κάτωθι σχέση.

$$V_s = \int_{-\infty}^{+\infty} s dy = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{max} e^{-\frac{y^2}{2i^2}} dy = \sqrt{2\pi} i S_{max} \quad (3.6)$$

Ένα μέγεθος σημαντικό για την εκτίμηση της απώλειας όγκου και εν συνεχεία των επιφανειακών μετακινήσεων είναι η σχετική απώλεια εδαφικού όγκου (relative ground loss), η οποία συσχετίζει την απώλεια όγκου με τον συνολικό εδαφικό όγκο που εκσκάπτεται από την σήραγγα ανά μονάδα μήκους, και εκφράζεται από την κάτωθι σχέση.

$$V_L = \frac{V_s}{V} (\%) \quad (3.7)$$

$$V = \pi R^2$$

Οι Clough και Schmidt, για τις περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει επαρκής εμπειρία κυρίως λόγω επικρατουσών γεωτεχνικών συνθηκών πρότειναν η εκτίμηση του μεγέθους  $V_L$  να γίνεται με τη βοήθεια των παρακάτω σχέσεων:

- για προσεκτική κατασκευή σήραγγας:

$$\frac{V_s}{V} = 0.002e^{(N-1)} \quad (3.8)$$

- για συνήθη επιμέλεια στην κατασκευή της σήραγγας:

$$\frac{V_s}{V} = 0.004e^{(N-1)} \quad (3.9)$$

Όπου: N ο συντελεστής υπερφόρτισης:  $N_s=2P_o/\sigma_c$

Η εκτίμηση του Mair (1998) για την σχετική απώλεια όγκου  $V_L$ , αναφέρει ότι κατά την κατασκευή σιράγγων με χρήση τεχνολογίας μερικής εξισορρόπησης των γεωστατικών πιέσεων  $P_a$  στο μέτωπο της σήραγγας περιορίζεται σημαντικά η τιμή του συντελεστή υπερφορτίσεως, με συνέπεια η σχετική απώλεια εδαφικού όγκου να είναι μικρότερη ακόμη και του 1%. Η διάνοιξη σιράγγων με πίεση στο μέτωπο, ακόμη και σε μη συνεκτικά εδάφη παρουσίασαν τιμές  $V_L$  περίπου 1%. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι το μέγεθος της σχετικής απώλειας του εδαφικού όγκου εξαρτάται άμεσα από τον λόγο  $H/D$ . Για τον λόγο αυτό σε αβαθείς σήραγγες σε αργιλικά εδάφη που ο λόγος  $H/D$  είναι μικρός το μέγεθος του  $V_L$  είναι σημαντικά μεγάλο, της τάξεως 2-4%. [3]

Οι εξισώσεις οι οποίες υπολογίζουν την κλίση και την καμπυλότητα της καμπύλης των επιφανειακών καθιζήσεων του σχήματος δίδονται ύστερα από διαδοχικές παραγωγίσεις της εξίσωσης 3.1 και αντικαθιστώντας την  $S_{max}$  από την εξίσωση 3.6:

$$\text{Κλίση:} \quad \frac{d_s}{d_y} = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi}i^3} y e^{\frac{-y^2}{2i^2}} \quad (3.10)$$

$$\text{Καμπυλότητα:} \quad \frac{d^2_s}{d^2_y} = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi}i^3} \left( \frac{y^2}{i^2} - 1 \right) e^{\frac{-y^2}{2i^2}} \quad (3.11)$$

### 3.3 Θεωρητικές Μετακινήσεις για την σήραγγα Δημοτικού Θεάτρου Πειραιά

#### 3.3.1 Γενικά

Για την κεντρική σήραγγα NATM του σταθμού Δημοτικού Θεάτρου Πειραιά έγινε υπολογισμός της θεωρητικής καμπύλης των επιφανειακών κατακόρυφων καθιζήσεων με την χρήση των εμπειρικών εξισώσεων που προαναφέρθηκαν στην παράγραφο 3.2, (εξ:3.1-3.9) και προσομοιάζει στην καμπύλη του Gauss.

Η καμπύλη υπολογίστηκε για τα γεωτεχνικά στοιχεία που δόθηκαν από την μελέτη του έργου με διαστάσεις ακτίνας  $R=4,7\text{m}$  που αντιστοιχεί σε ακτίνα ανάλογη του όγκου που εκσκάπτεται από το άνω αριστερό τμήμα A1 που διανοίγεται στην πρώτη φάση και βάθους  $H=25\text{m}$  από την επιφάνεια του εδάφους. Οι εκτιμήσεις έγιναν για συνθήκες "ελεύθερου πεδίου" στην επιφάνεια του εδάφους και σήραγγας κυκλικής διατομής και χωρίς την επιρροή των οριζόντιων παραμορφώσεων.

*Πίνακας 3.1: Γεωτεχνικές παράμετροι*

D(m)	9,40		C(MPa)	0,12
R(m)	4,70		$\sigma_c$ (MPa)	0,515
H(m)	25		$P_0$ (MPa)	0,55
$\phi(^{\circ})$	40		Ns	2,14
$\gamma$ (kN/m <sup>2</sup> )	22			

Όπου:

D: η διάμετρος του τμήματος A1 της άνω ημιδιατομής της σήραγγας

R: η ακτίνα του τμήματος A1 της άνω ημιδιατομής της σήραγγας

H: το βάθος του άξονα της σήραγγας από την επιφάνεια του εδάφους.

$\Phi$ : η γωνία τριβής του εδάφους

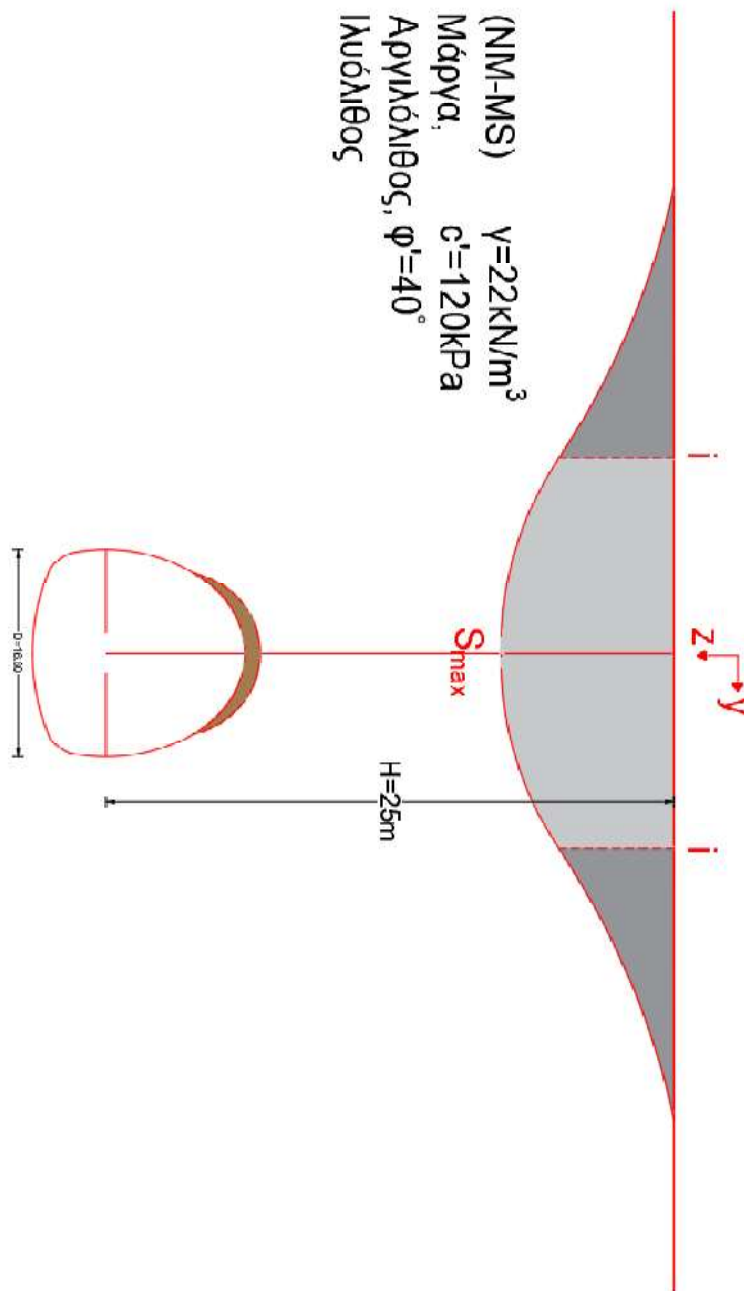
C: η συνοχή του εδάφους

$\gamma$ : το ειδικό βάρος του εδάφους

$\sigma_c$ = η θλιπτική αντοχή του εδάφους σε μονοαξονική θλίψη

$P_o$ = η αρχική εσωτερική πίεση

$N_s$ = ο συντελεστής υπερφόρτισης



Σχήμα 3.2. Καμπύλη Επιφανειακών Μετακινήσεων σήραγγας NATM

Με την χρήση των εμπειρικών εξισώσεων της παραγράφου 3.2 (εξ:3.1-3.9) σε υπολογιστικά φύλλα, για βάθος σήραγγας  $H=25\text{m}$  και ακτίνα  $R=4.70\text{m}$  και συντελεστή  $k=0.7$  (κατά Burland) για σιφρές αργίλους, εξήχθησαν τα εξής αποτελέσματα για τις θεωρητικές κατακόρυφες μετακινήσεις επιφανείας:

k	0,7
Vs	0,432787
Vs/V	0,006236
Ns	2,137243
Po(MPa)	0,55
i	17,5
H(m)	25
Smax(m)	0,009

Όπου:

Vs: η απώλεια όγκου (ground loss) σε  $\text{m}^3$ , ανά

V<sub>L</sub>: η σχετική απώλεια εδαφικού όγκου (relative ground loss) Vs/V

V: ο εδαφικός όγκος που εκσκάπτεται από την σήραγγα ανά μονάδα μήκους, σε  $\text{m}^3$

i: το σημείο αλλαγής καμπυλότητας της κατανομής των καθιζήσεων από τον κεντρικό άξονα συμμετρίας, σε m.

Smax: η μέγιστη καθίζηση στην επιφάνεια του εδάφους η οποία προκύπτει για τη θέση  $y=0$ .

Τα αποτελέσματα προέκυψαν με την χρήση των κάτωθι εξισώσεων:

$$S = S_{max} e^{-\frac{y^2}{2i^2}} \quad (3.1)$$

$$i = kH \quad (3.2)$$

$$\frac{V_s}{V} = 0.002 e^{(N-1)} \quad (3.8)$$

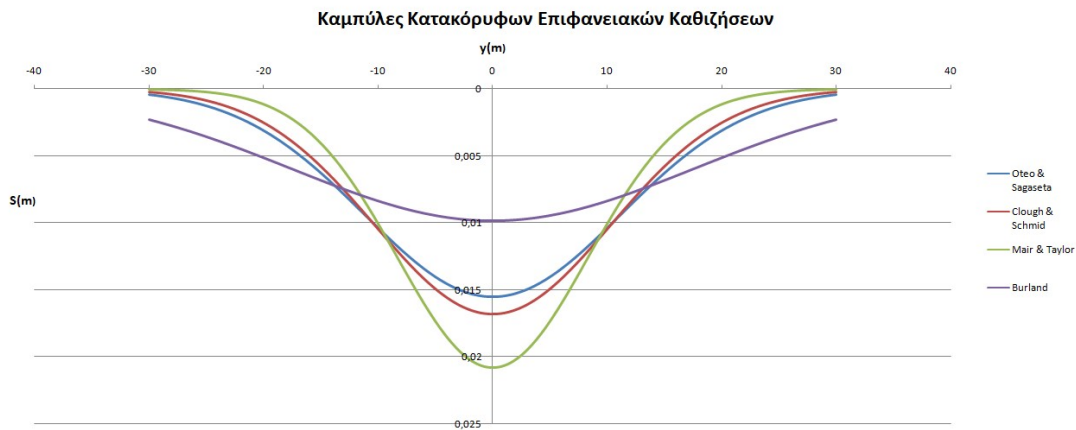
$$V = \pi R^2$$

$$N_s = 2P_o / \sigma_c$$

$$\sigma_c = 2c * \tan\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right)$$

### 3.3.2 Διάγραμμα Επιφανειακών Κατακόρυφων Μετακινήσεων της σήραγγας NATM

Από την κατανομή των επιφανειακών κατακόρυφων καθιζήσεων σε πλάτος  $y=\pm 30\text{m}$  και υπερκείμενα  $H=25\text{m}$  από τον κεντρικό κατακόρυφο άξονα της σήραγγας προέκυψαν οι πιο κάτω καμπύλες μορφής Gauss. Το διάγραμμα αφορά καμπύλες για διάφορες τιμές καμπυλότητας  $i$  με όλους τους εμπειρικούς τύπους που προαναφέρθηκαν.



Σχήμα: 3.3 Καμπύλες Κατακόρυφων Επιφανειακών Μετακινήσεων

Όπως παρατηρήθηκε οι διάφοροι τρόποι επιλογής του σημείου αλλαγής της καμπυλότητας δίνουν ένα εύρος κατακόρυφων μετακινήσεων με  $S_{\max} = 9 - 21\text{mm}$ . Από τις μετρήσεις που έγιναν στην επιφάνεια της σήραγγας με  $S_{\max}$  παρατηρούμε πως πιο κοντά στις πραγματικές μετρήσεις είναι μέθοδος O' Reilly and New (1982):  $i=kH$  με  $K=0.7$  κατά Burland(2001). Για το γεωυλικό στο οποίο διανοίχτηκε η σήραγγα (αργιλόλιθος, μάργα, ιλυόλιθος με  $GSI:45-65$ ), παρατηρούμε πως και η βέλτιστη τιμή μέγιστης κατακόρυφης μετακίνησης έχει μικρή απόκλιση από τις μετρήσεις των κατακόρυφων μετακινήσεων στην επιφάνεια, στον άξονα κατά μήκος της σήραγγας, όπου μετρήθηκαν χωροσταθμικά έχοντας ένα εύρος  $S_{\max}=5-7\text{mm}$ . Πρέπει όμως να επισημάνουμε ότι οι εμπειρικές μέθοδοι δεν λαμβάνουν υπόψιν την διάνοιξη σε φάσεις και το σχήμα της σήραγγας λαμβάνεται κυκλικό, σε αντίθεση με την πραγματική. Επίσης κατά μήκος της σήραγγας υπάρχουν διαφοροποιήσεις στις

μηχανικές αντοχές του γεωυλικού , παρότι όλη η σήραγγα βρίσκεται στην ίδια κατηγορία εδάφους.

Στην συνέχεια γίνεται υπολογισμός παρόμοιων θεωρητικών μετακινήσεων με σταθερές τις παραμέτρους των γεωτεχνικών στοιχείων καθώς και των διαστάσεων της σήραγγας και μεταβαλλόμενο το ύψος  $H(m)$  των υπερκείμενων. Η επιλογή της μεταβολής του  $H$  για την παρατήρηση της επιρροής του στις επιφανειακές κατακόρυφες μετακινήσεις, έγινε διότι είναι ο κύριος παράγοντας που μεταβάλλει σε σημαντικό βαθμό τον συντελεστή υπερφόρτισης  $N_s$  και επομένως και την σχετική απώλεια εδαφικού όγκου (relative ground loss)  $V_s/V$ . Επίσης είναι ο βασικός παράγοντας που επηρεάζει το εύρος της καμπύλης της υποχώρησης με του σημείου καμπής  $i$  που σχετίζεται άμεσα με το βάθος  $H$ .

### 3.3.3 Διάγραμμα Επιφανειακών Κατακόρυφων Μετακινήσεων με μεταβολή του βάθους $H(m)$ .

Με την χρήση των εμπειρικών εξισώσεων της παραγράφου 3.2 (εξ:3.1-3.9) σε υπολογιστικά φύλλα, για βάθη σήραγγας  $H=27,5m$ ,  $H=25m$ ,  $H=22,5m$   $H=20m$   $H=17,5m$ ,  $H=15m$  και ακτίνα  $R=8.40m$ , εξήχθησαν τα εξής αποτελέσματα για τις θεωρητικές κατακόρυφες μετακινήσεις επιφανείας για  $k=0.7$ ,  $i=kH$ :

- Για  $H=27.5m$ :

$V_s$	0,535912
$V_s/V$	0,007722
$N_s$	2,350968
$P_o(MPa)$	0,605
$i$	19,25
$H$	27,5
$S_{max}$	0,011106

- Για H=25m:

Vs	0,432787
Vs/V	0,006236
Ns	2,137243
Po(MPa)	0,55
i	17,5
H	25
Smax	0,009866

- Για H=22,5m:

Vs	0,349506
Vs/V	0,005036
Ns	1,923519
Po(MPa)	0,495
i	15,75
H	22,5
Smax	0,008853

- Για H=20m:

Vs	0,282251
Vs/V	0,004067
Ns	1,709795
Po(MPa)	0,44
i	14
H	20
Smax	0,008043

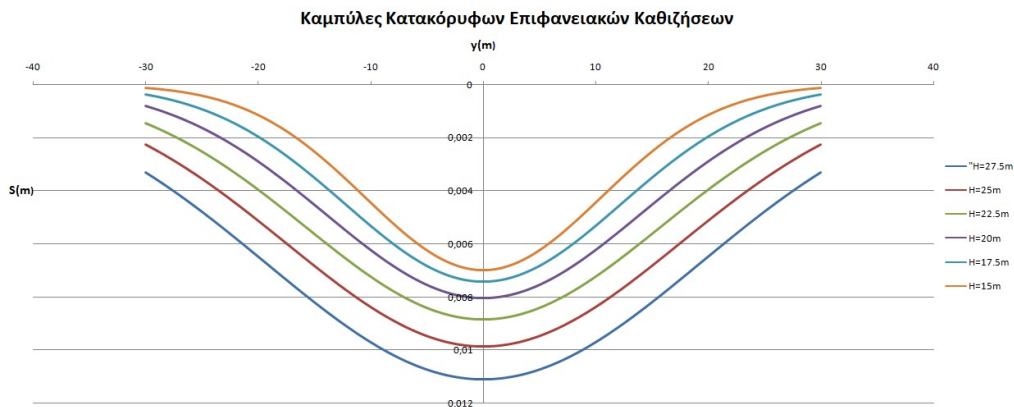
- Για H=17,5m:

Vs	0,227938
Vs/V	0,003285
Ns	1,49607
Po(MPa)	0,385
i	12,25
H	17,5
Smax	0,007423



- Για  $H=15\text{m}$ :

$V_s$	0,184076
$V_s/V$	0,002652
$N_s$	1,282346
$P_o(\text{MPa})$	0,33
$i$	10,5
$H$	15
$S_{\text{max}}$	0,006994



Από τις θεωρητικές καμπύλες επιφανειακών κατακόρυφων καθιζήσεων του σχήματος παρατηρείται ότι το βάθος του άξονα της σήραγγας επηρεάζει σημαντικά τις κατακόρυφες μετακινήσεις επιφανείας. Το εύρος των μετακινήσεων για μεταβολή του βάθους  $H=15\text{m} - 27.5\text{m}$  μας δίνει ένα εύρος μέγιστων μετακινήσεων  $S_{\text{max}}=7-11\text{mm}$ .

Οι μέγιστες μετακινήσεις μεταβάλλονται αναλογικά με το βάθος και με λίγο μεγαλύτερο ρυθμό σε μεγαλύτερα βάθη. Αυτό δείχνει ότι σε μεγάλα βάθη μπορεί να υπολογιστούν δυσανάλογα μεγάλες μετακινήσεις από εμπειρικές μεθόδους σε σχέση με την πραγματικότητα συνυπολογίζοντας την παράμετρο ότι σε μεγαλύτερα βάθη μπορεί να εξασθενεί η επιρροή του υπόγειου ανοίγματος στην επιφάνεια.

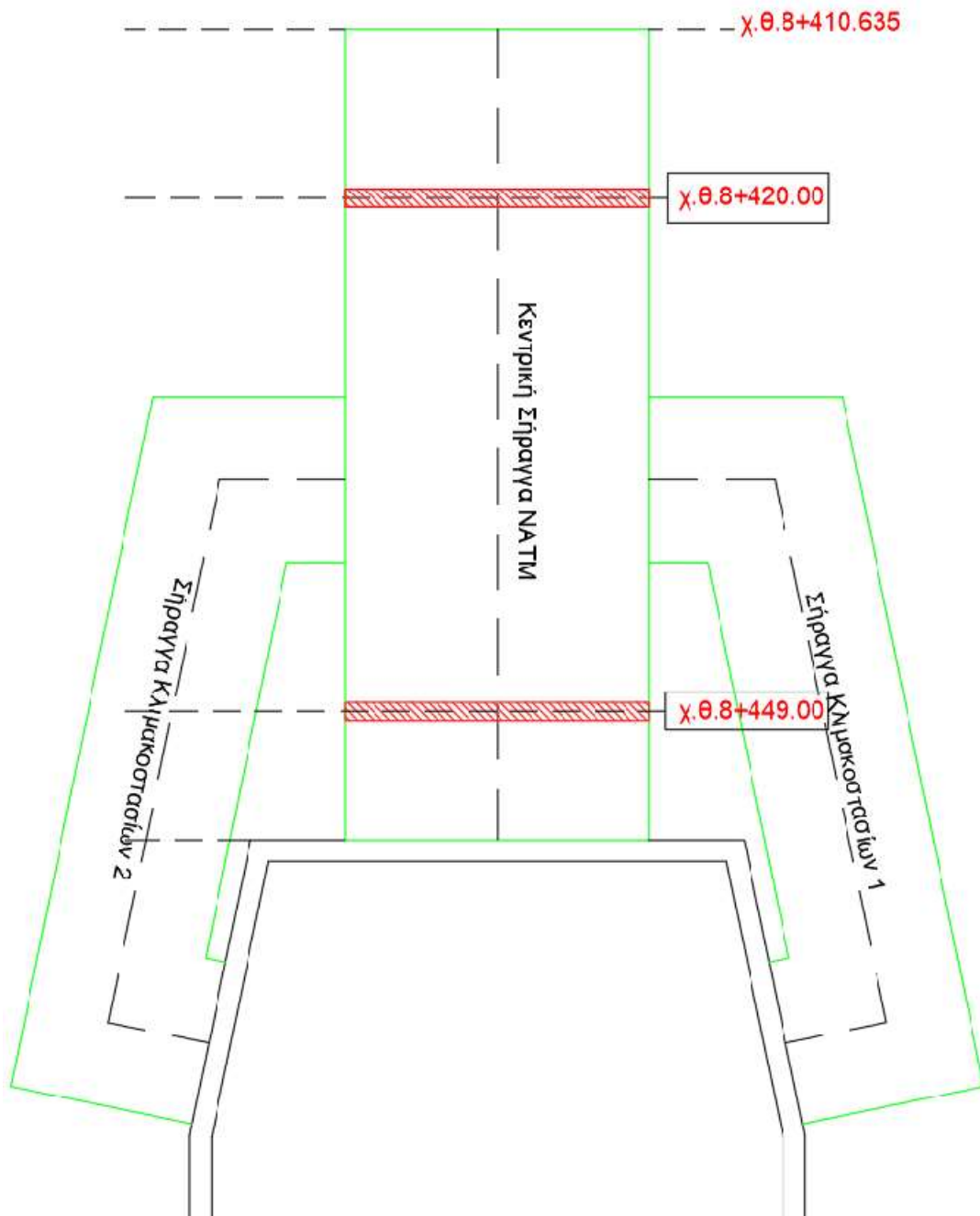
## 4. Ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία της σήραγγας NATM Δημοτικού Θεάτρου Πειραιά.

### 4.1 Γενικά

Για την ανάλυση της διάνοιξης της κεντρικής σήραγγας NATM έχει δημιουργηθεί διδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα με κώδικα πεπερασμένων στοιχείων, διατομών της σήραγγας σε δυο χαρακτηριστικές θέσεις (διατομές) με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων RS2. Η σήραγγα έχει μήκος 45,35m και διάμετρο 16,80m. Στο πρόγραμμα εφαρμόστηκαν γεωτεχνικά στοιχεία που προσομοιάζουν τα πραγματικά στοιχεία του εδάφους στην περιοχή της σήραγγας και τα μέτρα υποστήριξης θα είναι αυτά της μελέτης του έργου. Με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων υπολογίστηκαν κατακόρυφες μετακινήσεις σε χαρακτηριστικές διατομές της σήραγγας, οι οποίες συγκρίθηκαν με μετακινήσεις που μετρήθηκαν στο πεδίο με όργανα μέτρησης κατά την διάρκεια της διάνοιξης και μετά το πέρας αυτής. Στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων παρατηρείται και η επιρροή των πλευρικών σηράγγων πρόσβασης κλιμακοστασίων στις μετακινήσεις.

Το στήσιμο του προσομοιώματος έγινε με την λογική των φάσεων εκσκαφής που περιγράφεται στην μελέτη της σήραγγας και η οποία εφαρμόστηκε κατά την διάνοιξη της σήραγγας. Τα δομικά υλικά της προσωρινής υποστήριξης θα έχουν τις ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την υποστήριξη της κεντρικής σήραγγας NATM αλλά και των πλευρικών σηράγγων κλιμακοστασίων.

Αρχικά γίνεται η εκσκαφή της κεντρικής σήραγγας NATM σε 3 φάσεις A1, A2 και B όπου στο προσομοίωμα θα συμβολίζονται A,B και G. Ενώ στην συνέχεια γίνεται η διάνοιξη των δυο πλευρικών σηράγγων κλιμακοστασίων ταυτόχρονα, σε 2 φάσεις A και B όπου στο πρόγραμμα θα συμβολίζονται με τις φάσεις D και E. Γίνεται προσομοίωση της διατομής των τριών σηράγγων στην χιλιομετρική θέση 8+449,00.

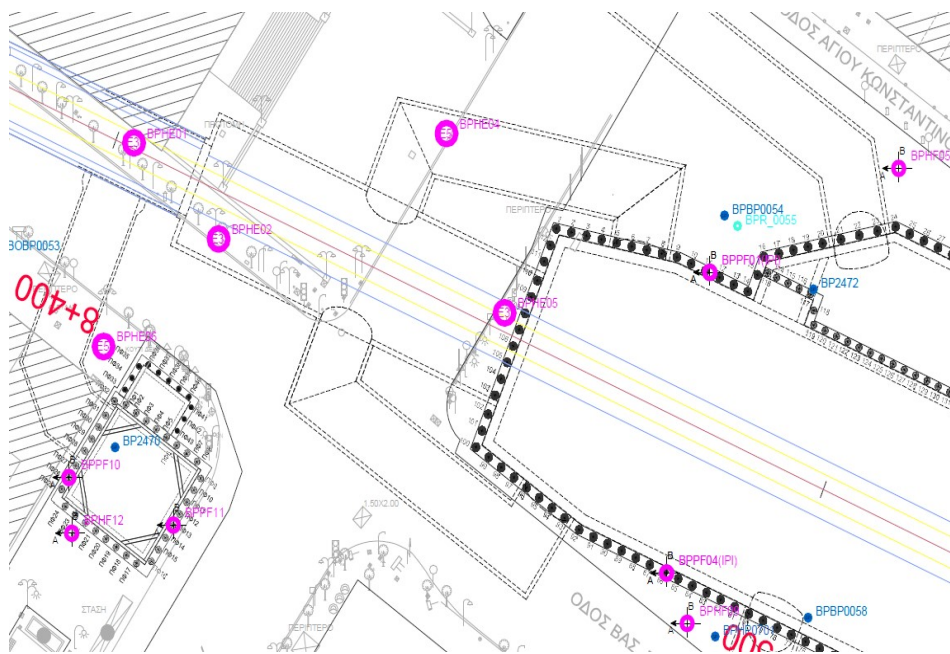


Σχέδιο 4.1: Θέσεις διατομών προσομοιώματος

## 4.2 Γεωλογικά και Γεωτεχνικά στοιχεία

Στην περιοχή της κεντρικής σήραγγας πραγματοποιήθηκαν 2 δειγματοληπτικές γεωτρήσεις και μια σε μια από τις πλευρικές σήραγγες κλιμακοστασίων. Στην περιοχή πέριξ του σταθμού πραγματοποιήθηκαν και άλλες 9 δειγματοληπτικές γεωτρήσεις.

Στα πρώτα δέκα μέτρα από την επιφάνεια ο γεωλογικός σχηματισμός απαρτίζεται κυρίως από αποσαθρωμένο ιλυόλιθο στα πρώτα μέτρα και στην συνέχεια, Ιλυόλιθο τοπικά αμμώδη καστανόλευκου χρώματος μέτρια κερματισμένο. Από τα 6 μέτρα και μέχρι το βάθος των 10.5m εντοπίστηκε Κροκαλοπαγές, πολύμεικτο ισχυρά συγκολλημένο μέτρια κερματισμένο με Ψαμμιτικές ενστρώσεις. Σε μεγαλύτερα βάθη, όπου γίνεται και η διάνοιξη της σήραγγας το γεωολικό είναι Μάργα/Ιλυόλιθος/Αργιλόλιθος λεπτοστρωματώδης καστανού μπεζ έως και πράσινο, τοπικά ασβεστιτικός μέτρια κερματισμένος έως και κερματισμένος.



Εικόνα 4.1 Δειγματοληπτικές γεωτρήσεις πέριξ του σταθμού [1]

Η διαστρωμάτωση που επιλέχτηκε για την προσομοίωση είναι η εξής:

- Γεωτεχνικοί σχηματισμοί d=0-2m (AL) Τεχνητές Επιχώσεις / Αλλουβιακές αποθέσεις.

<b>E(Mpa)</b>	40		<b>v</b>	0.30
<b>γ(kN/m<sup>3</sup>)</b>	21		<b>Ko</b>	0.40
<b>φ (°)</b>	30			
<b>c' (kPa)</b>	10			

- Γεωτεχνικοί σχηματισμοί d=2-5.45m (NM-MS) Μάργα, Αργιλόλιθος, Ιλυόλιθος

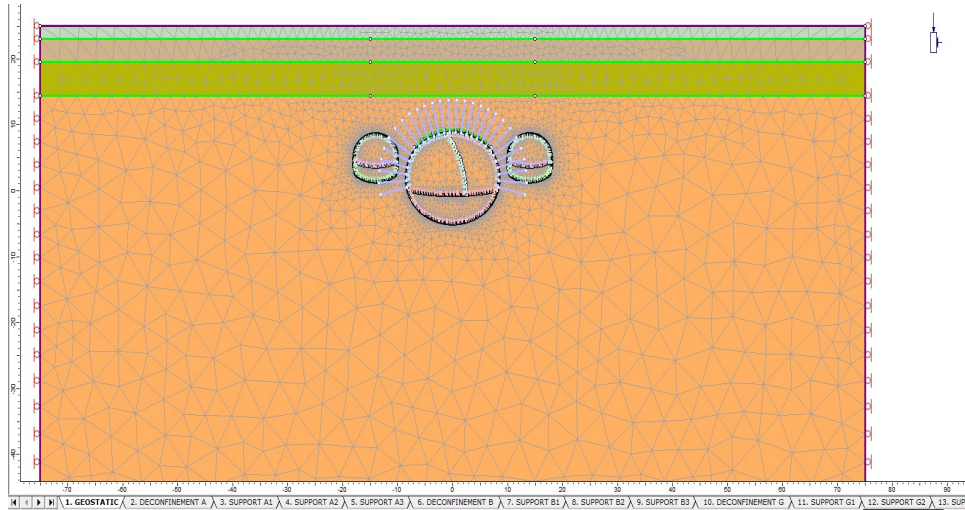
<b>GSI</b>	45-65		<b>v</b>	0.30
<b>γ(kN/m<sup>3</sup>)</b>	22		<b>Ko</b>	0.40
<b>φ' (°)</b>	40		<b>k(m/sec)</b>	1x10 <sup>-6</sup>
<b>c' (kPa)</b>	120		<b>E(Mpa)</b>	600

- Γεωτεχνικοί σχηματισμοί d=5.45-10.59 m (NM-CN) Κροκαλοπαγή, Λατυποπαγή

<b>GSI</b>	45-65		<b>v</b>	0.30
<b>γ(kN/m<sup>3</sup>)</b>	22		<b>Ko</b>	0.40
<b>φ' (°)</b>	42		<b>k(m/sec)</b>	1x10 <sup>-6</sup>
<b>c' (kPa)</b>	100		<b>E(Mpa)</b>	600

- Γεωτεχνικοί σχηματισμοί d=10.59-∞ m (NM-MS) Μάργα, Αργιλόλιθος, Ιλυόλιθος

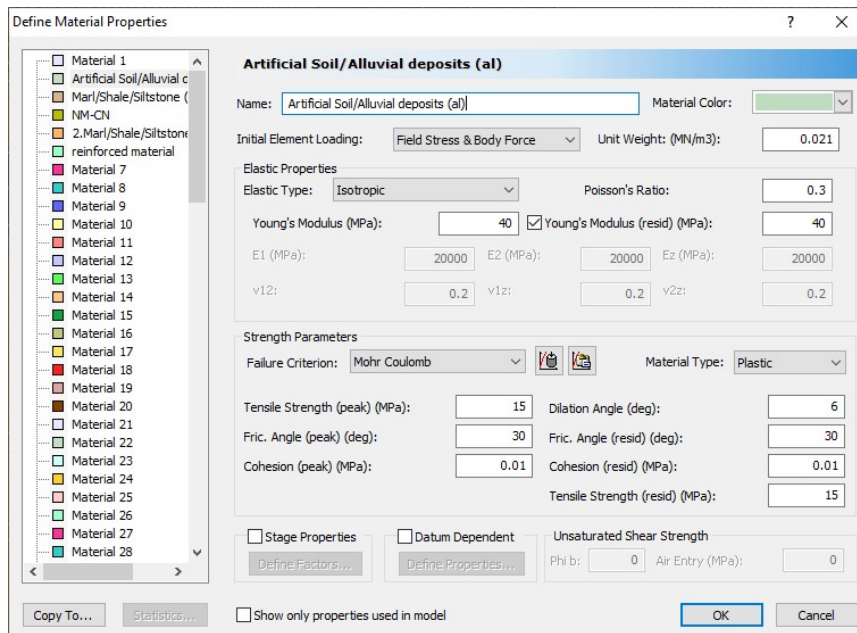
<b>GSI</b>	45-65		<b>v</b>	0.30
<b>γ(kN/m<sup>3</sup>)</b>	22		<b>Ko</b>	0.40
<b>φ' (°)</b>	40		<b>k(m/sec)</b>	1x10 <sup>-6</sup>
<b>c' (kPa)</b>	120		<b>E(Mpa)</b>	600



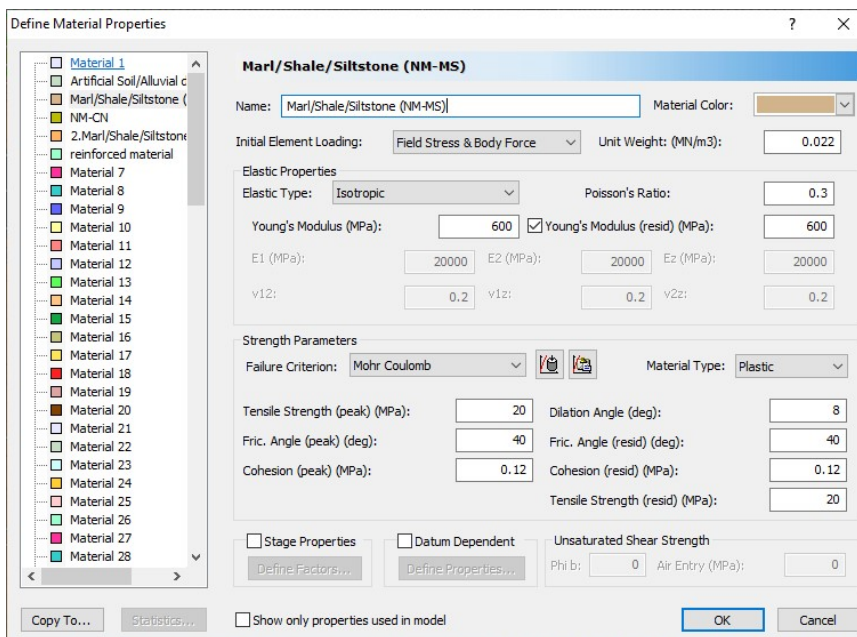
Εικόνα 4.2: Διαστρωμάτωση Γεωλικών

Η διατομή της σήραγγας βρίσκεται σε βάθος  $H = 25\text{m}$  από την επιφάνεια και διανοίχθηκε στον τέταρτο σχηματισμό (NM-MS) από τον οποία εξήχθησαν και τα επιπλέον γεωτεχνικά στοιχεία και παράμετροι όπως και η καμπύλη Panet-Chern από την οποία προέκυψε προέκυψε και ο συντελεστής αποτόνωσης για το βήμα προχώρησης που επιλέχθηκε. Το βήμα προχώρησης είναι ίδιο με αυτό της μελέτης σήραγγας και αυτό που ακολουθήθηκε κατά την κατασκευή της.

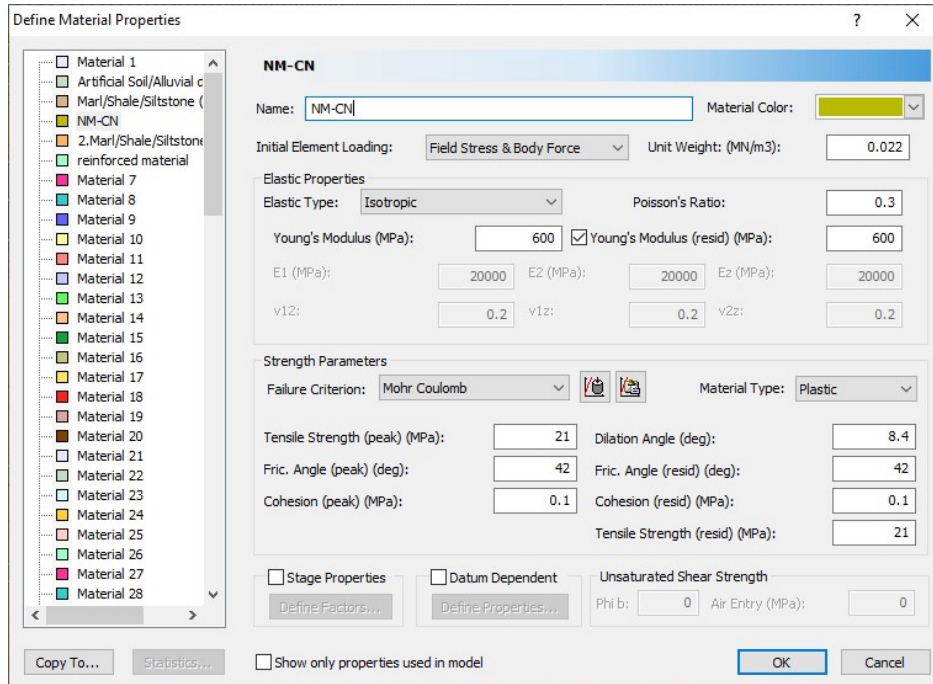
Για την επίλυση του προσομοιώματος, ως κριτήριο αστοχίας χρησιμοποιήθηκε το Mohr-Coulomb, καθώς η εκσκαφή γίνεται για αστική σήραγγα με χαμηλά υπερκείμενα. Ο υπολογισμός των παραμέτρων σχεδιασμού πραγματοποιείται με χρήση του *Roclab* και οι τελικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στις παρακάτω εικόνες για τους τέσσερις γεωτεχνικούς σχηματισμούς.



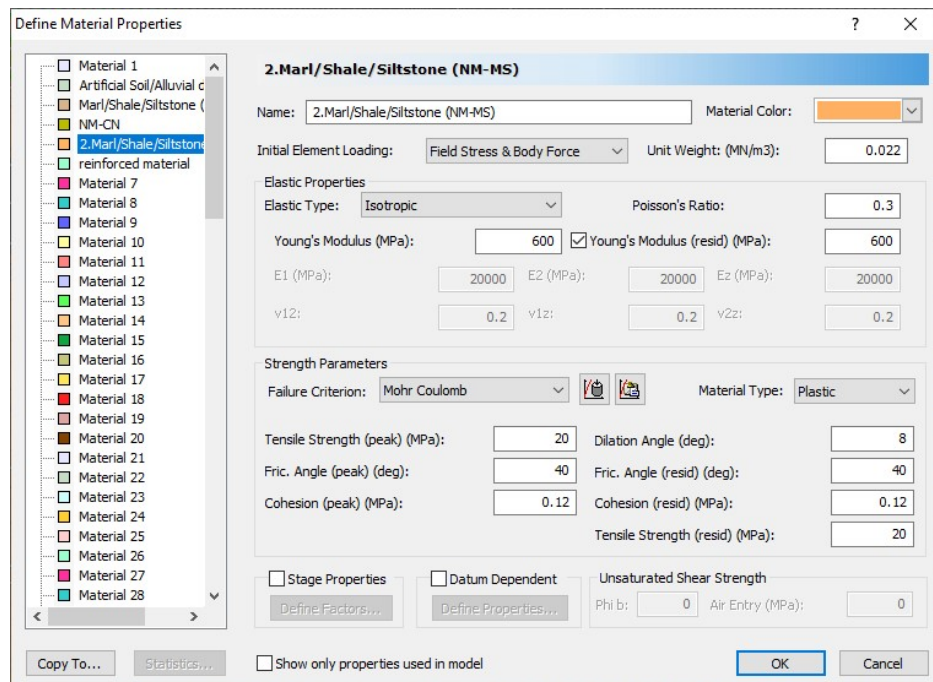
Εικόνα 4.3: Τεχνητές Επιχώσεις / Αλλουβιακές αποθέσεις



Εικόνα 4.4 (NM-MS) Μάργα, Αργιλόλιθος, Ιλολίθος



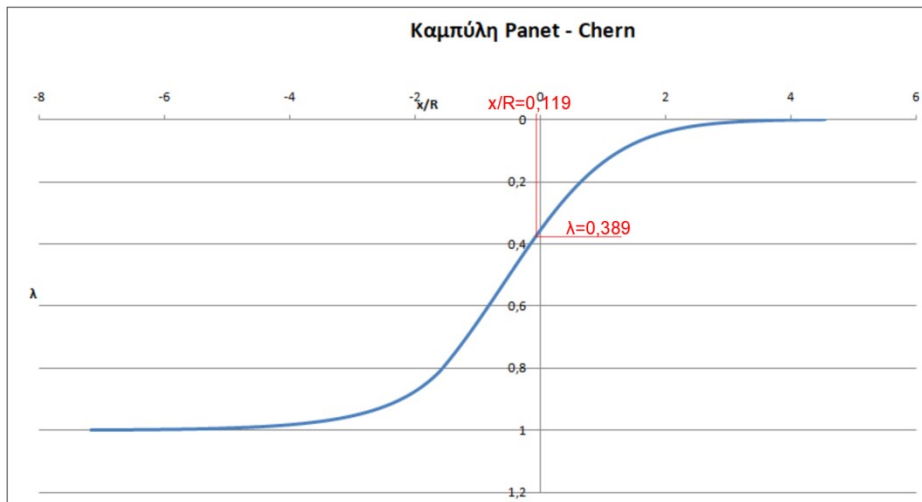
Εικόνα 4.5 (NM-CN) Κροκαλοπαγή, Λατυποπαγή



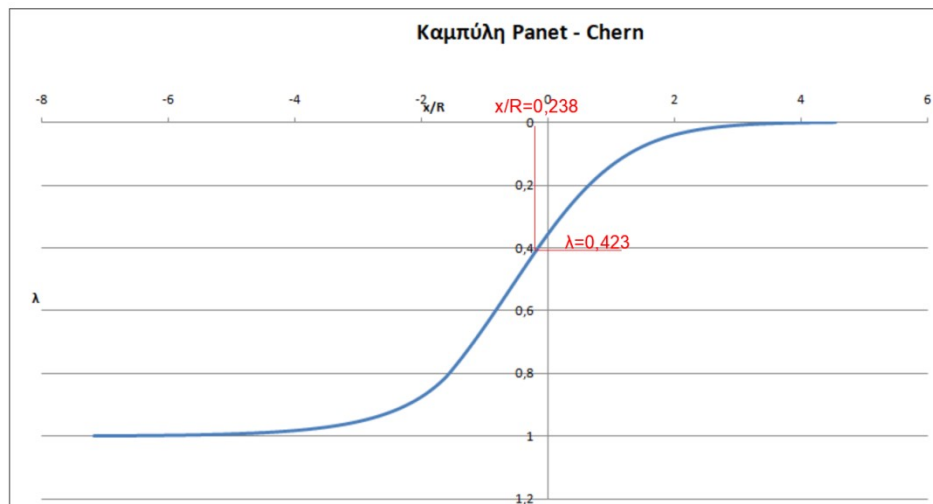
Εικόνα 4.6 Μάργα, Αργιλόλιθος, Γινώλιθος



Στην προσομοίωση είναι αναγκαίο να εισαχθεί ο τρόπος που αποτονώνεται και συγκλίνει η βραχομάζα μετά την διάνοιξη του κάθε τμήματος της εκσκαφής σε κάθε βήμα προχώρησης. Το βήμα προχώρησης για το άνω μέρος της κεντρικής σήραγγας NATM (A1 και A2 φάση) επιλέχθηκε να είναι  $x=1\text{m}$  και για το κάτω μέρος και για  $x/R=-0.119\text{m}$  με συντελεστή αποτόνωσης  $\lambda=0,389$ . Για την εκσκαφή της φάσης B της κάτω ημιδιατομής επιλέχθηκε βήμα προχώρησης  $x=2\text{m}$  και για  $x/R=-0.238\text{m}$ , προέκυψε συντελεστής αποτόνωσης  $\lambda=0,423$ .

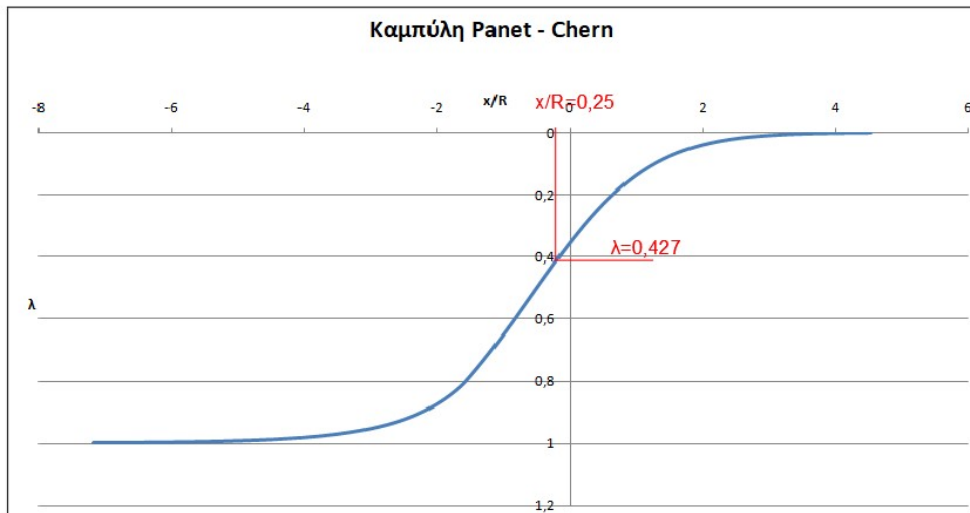


Διάγραμμα 4.1: Panet-Chern Επιλογή συντελεστή αποτόνωσης (Φάση A1, A2)



Διάγραμμα 4.2: Panet-Chern Επιλογή συντελεστή αποτόνωσης (Φάση B)

Η επιλογή του συντελεστή αποτόνωσης της βραχομάζας για την διάνοιξη των πλευρικών σηράγγων κλιμακοστασίων έγινε με τον ίδιο τρόπο, επιλέγοντας βήμα προχώρησης 1m και για τις δυο φάσεις της εκσκαφής. Για ακτίνα σήραγγας  $R=4m$  και βήμα προχώρησης  $x=1m$ , επομένως  $x/R=0,25$  από το μέτωπο, προέκυψε συντελεστής αποτόνωσης  $\lambda=0,427$  σύμφωνα με την καμπύλη Panet-Chern.



Διάγραμμα 4.3: Panet-Chern Επιλογή συντελεστή αποτόνωσης (Σήραγγες Κλιμακοστασίων)

## 4.3 Περιγραφή προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων

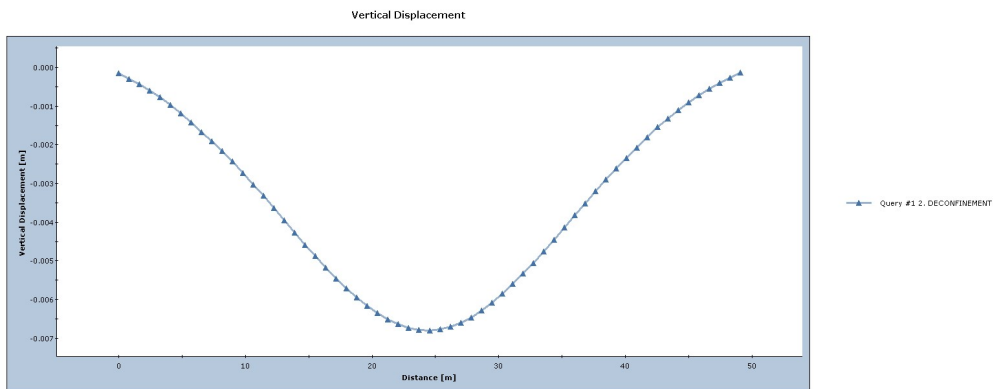
### 4.3.1 Σύγκριση θεωρητικών μετακινήσεων με το προσομοίωμα

Για τις ανάγκες σύγκρισης των θεωρητικών μετακινήσεων που παρουσιάστηκαν στο σχήμα 3.3 του κεφ.3, τροποποιήθηκε το προσομοίωμα στον κώδικα RS2 ώστε η διάνοιξη της σήραγγας να γίνεται με τις πιο κάτω παραδοχές που συμβαδίζουν με την προσέγγιση των εμπειρικών μεθόδων:

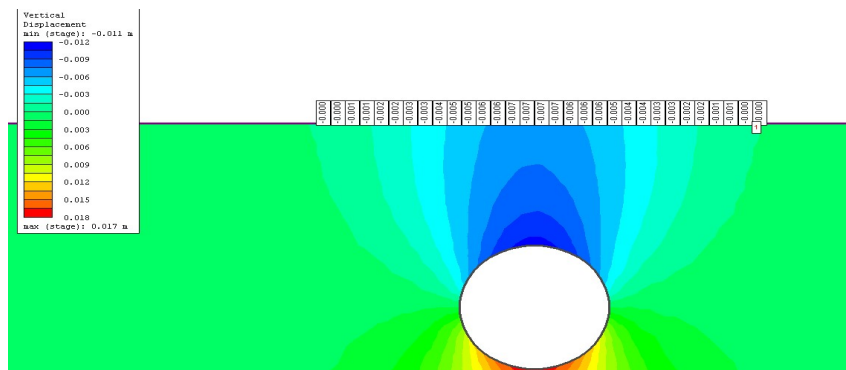
- Διάνοιξη χωρίς φάσεις εκσκαφής
- Κυκλική σήραγγα
- Διάνοιξη χωρίς μέτρα υποστήριξης
- Διάνοιξη σε ένα γεωυλικό – χωρίς διαστρωμάτωση.

- Το γεωολικό είναι αυτό στο οποίο διανοίχθηκε η σήραγγα.

Από το προσομοίωμα προέκυψαν οι πιο κάτω επιφανειακές μετακινήσεις.

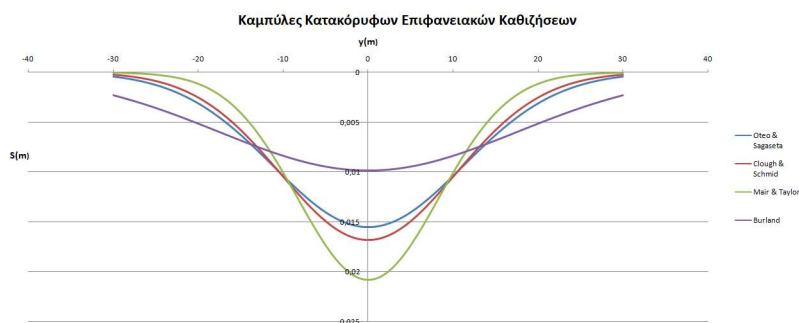


Διάγραμμα 4.4: Καμπύλη επιφανειακών κατακόρυφων μετακινήσεων από το προσομοίωμα.



Εικόνα 4.7: Επιφανειακές Καθιζήσεις

Για το προσομοίωμα που έγινε με τις πιο πάνω παραδοχές παρατηρήθηκε ότι οι επιφανειακές κατακόρυφες καθιζήσεις, έχουν παρόμοια καμπύλη με αυτή των θεωρητικών του σχ.3.3. Τα αποτελέσματα των θεωρητικών μετακινήσεων δείχνουν μεγαλύτερες μετακινήσεις, η καλύτερη προσέγγιση για τα συγκεκριμένα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά είναι κατά Burland(2001) με  $k=0.7$ , το οποίο δίνει απόκλιση 2mm από τα αναλυτικά αποτελέσματα με πεπερασμένα στοιχεία.



Διάγραμμα 4.5: Καμπύλες θεωρητικών κατακόρυφων μετακινήσεων

### 4.3.2 Στάδια Προσομοιώματος

Για τον ορισμό του προσομοιώματος προς επίλυση στο λογισμικό RS2.8, αρχικά σχεδιάζονται τα όρια του μοντέλου με βάση το γεωυλικό που θεωρείται ότι θα επηρεαστεί από την διάνοιξη της σήραγγας. Τα αριστερά, δεξιά και κάτω όρια τοποθετούνται σε απόσταση  $\pm 75$  μέτρων από τον άξονα της σήραγγας έτσι ώστε να τηρείται η παραπάνω απαίτηση. Επίσης στα περιμετρικά σύνορα του προσομοιώματος (δεξιά, αριστερά και κάτω) τοποθετήθηκαν κυλίσεις, ενώ η άνω επιφάνεια αφήνεται ελεύθερη για την προσομοίωση του γεωστατικού φορτίου. Το προσομοίωμα της εκσκαφής ορίζεται με 25m υπερκείμενα και δεν προσομοιάζονται επιπλέον φορτία από κτίρια. Στη συνέχεια, τοποθετείται το κέντρο της εκσκαφής στο (0,0) του προσομοιώματος και προσδιορίζονται τα συνολικά στάδια που θα χρειαστούν για την προσομοίωση της διαδικασίας «Αρχικές συνθήκες – Εκσκαφή - Χαλάρωση – Υποστήριξη».

Σύντομη περιγραφή των σταδίων που επιλέχτηκαν:

*Πίνακας 4.1: Στάδια προσομοιώματος*

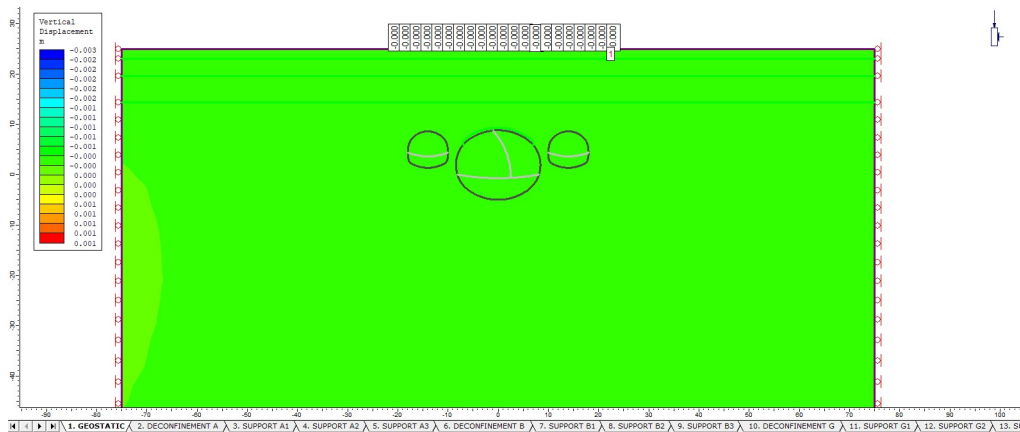
Stage	Name		Stage	Name
1	GEOSTATIC		12	SUPPORT G2
2	DECONFINEMENT A		13	SUPPORT G3
3	SUPPORT A1		14	DECONFINEMENT D
4	SUPPORT A2		15	SUPPORT D1
5	SUPPORT A3		16	SUPPORT D2
6	DECONFINEMENT B		17	SUPPORT D3
7	SUPPORT B1		18	DECONFINEMENT E
8	SUPPORT B2		19	SUPPORT E1
9	SUPPORT B3		20	SUPPORT E2
10	DECONFINEMENT G		21	SUPPORT E3
11	SUPPORT G1			

Στα στάδια που περιγράφονται πιο πάνω περιλαμβάνεται η διάνοιξη της κεντρικής σήραγγας NATM σε τρεις φάσεις εκσκαφής A,B και G, όπου οι φάσεις A και B αντιστοιχούν στην διάνοιξη της άνω ημιδιατομής της κεντρικής σήραγγας, ενώ η G φάση αντιστοιχεί στην διάνοιξη της κάτω ημιδιατομής (invert). Από την διάνοιξη της κεντρικής σήραγγας μέχρι το στάδιο G θα εξαχθούν τα αποτελέσματα για τις μετακινήσεις χωρίς την διάνοιξη των πλευρικών για της δυο διατομές στις χιλιομετρικές θέσεις χ.θ. 8+420,00 και χ.θ. 8+449,00 εφόσον πρόκειται για διατομές με παρόμοια γεωτεχνικά χαρακτηριστικά.

Τα στάδια D και E αφορούν την διάνοιξη των πλευρικών σηράγγων σε φάσεις διάνοιξης άνω και κάτω ημιδιατομής, αμέσως μετά την διάνοιξη της κεντρικής σήραγγας και σε αποστάσεις από αυτή που προσομοιάζουν την διατομή στην χ.θ. 8+449,00.

Περιγραφή Σταδίων Ανάλυσης:

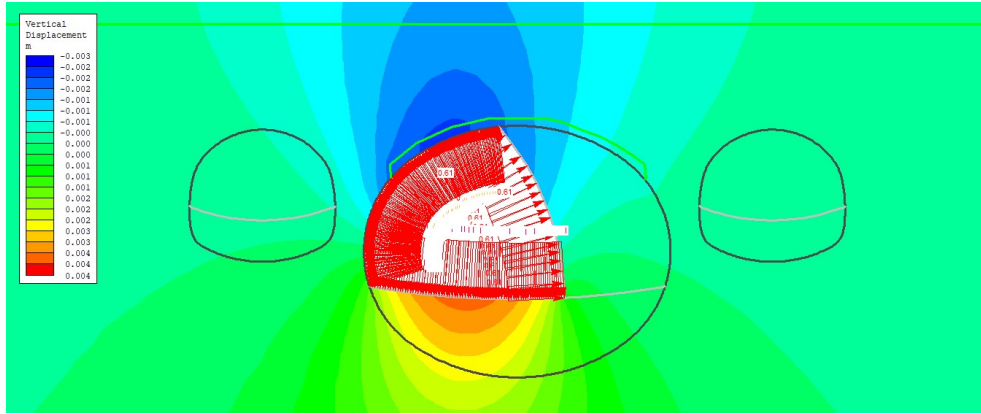
**Stage 1 (Geostatic):** Στο στάδιο αυτό προσδιορίζεται το αρχικό γεωστατικό εντατικό πεδίο. Οι μετακινήσεις είναι μηδενικές ενώ το μοντέλο βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας, εικόνα 4.8.



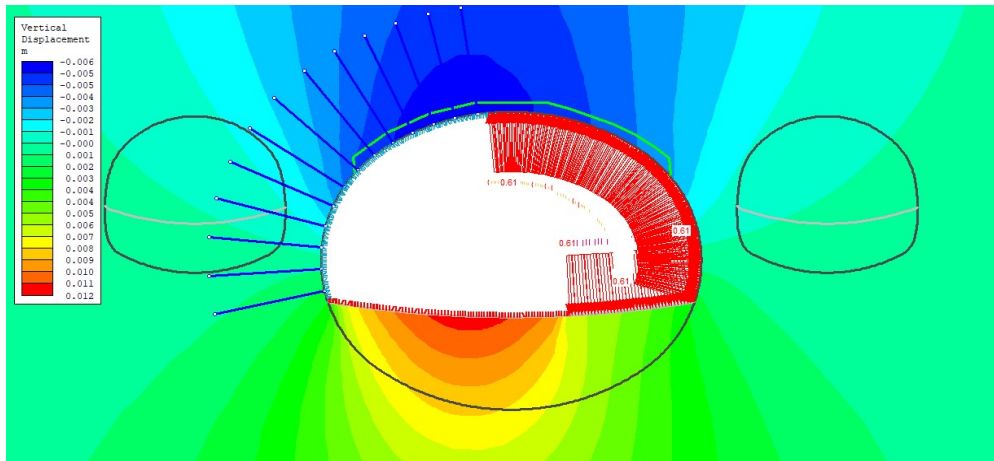
Εικόνα 4.8: Γεωστατικό Στάδιο

**Stage 2,6,10,14,18 (Deconfinement):** Με αυτό το βήμα προσομοιώνεται η χαλάρωση (αποτόνωση) του εδάφους ακριβώς μετά την εκσκαφή και πριν την τοποθέτηση της προσωρινής υποστήριξης. Μέσω των εξισώσεων Chem υπολογίζεται ο βαθμός αποτόνωσης  $\lambda$  για τα συγκεκριμένα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά και

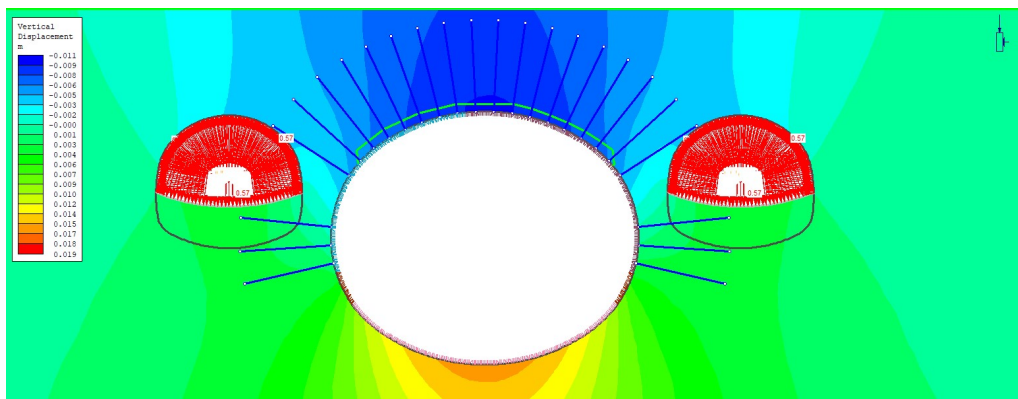
συνθήκες. Συνεπώς, τοποθετείται φορτίο που προσομοιάζει εσωτερική πίεση υποστήριξης μετά τη διάνοιξη της πρώτης φάσης (top heading) στη άνω ημιδιατομή ίσο με  $p_i=1-\lambda$ . και στην σε κάθε επόμενη φάση εκσκαφής τοποθετείται το κατάλληλο φορτίο που αντιστοιχεί στον συγκεκριμένο τμήμα.



Εικόνα 4.9: Στάδιο αποτόνωσης άνω αριστερού τμήματος A1



Εικόνα 4.10: Στάδιο αποτόνωσης κάτω ημιδιατομής B



Εικόνα 4.9: Στάδιο αποτόνωσης άνω ημιδιατομής A σηράγγων κλιμακοστασίων

**Stage 3,4,5,7,8,9,11,12,13,15,16,17,19,20,21(Support):** Σε αυτά τα στάδια γίνεται η τοποθέτηση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης μετά την εκσκαφή του κάθε τμήματος. Στην οροφή και τις παρειές της σήραγγας τοποθετείται εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, μεταλλικά πλαίσια και αγκύρια, ενώ στο δάπεδο, στο προσωρινό ανάστροφο τόξο, άοπλο σκυρόδεμα μικρού πάχους έτσι ώστε να μπορεί να σπάσει εύκολα κατά τη διάνοιξη της Β' φάσης από έναν συμβατικό εκσκαφέα. Η τοποθέτηση γίνεται στο *Stage 3*, ωστόσο χρησιμοποιούνται τα δύο επόμενα στάδια (*Stage 4, 5*) για την προσομοίωση της σταδιακής τοποθέτησης αλλά και σκλήρυνσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος με την εντολή *stage concrete properties*, εικόνα 4.6. Για την προσομοίωση της διαδικασίας αυτής τοποθετήθηκε εσωτερική πίεση  $P_i=(1-\lambda)/2$  στο πρώτο στάδιο support μετά το deconfinement και στο αμέσως επόμενο στάδιο  $P_i=0,1$  (εικόνα 4.12). Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται σε όλα τα στάδια support μετά από κάθε διάνοιξη τμήματος διατομής με 3 επιμέρους στάδια κάθε φορά.

Stage	Thickness	Young's Modulus	Compressive Strength	Tensile Strength
3	0.5	0.1	0.1	0.1
4	1	0.5	0.5	0.5
5	1	1	1	1
6	1	1	1	1
7	1	1	1	1
8	1	1	1	1
9	1	1	1	1
10	1	1	1	1
11	1	1	1	1
12	1	1	1	1
13	1	1	1	1
14	1	1	1	1
15	1	1	1	1
16	1	1	1	1
17	1	1	1	1
18	1	1	1	1
19	1	1	1	1
20	1	1	1	1
21	1	1	1	1

**Summary of Properties**

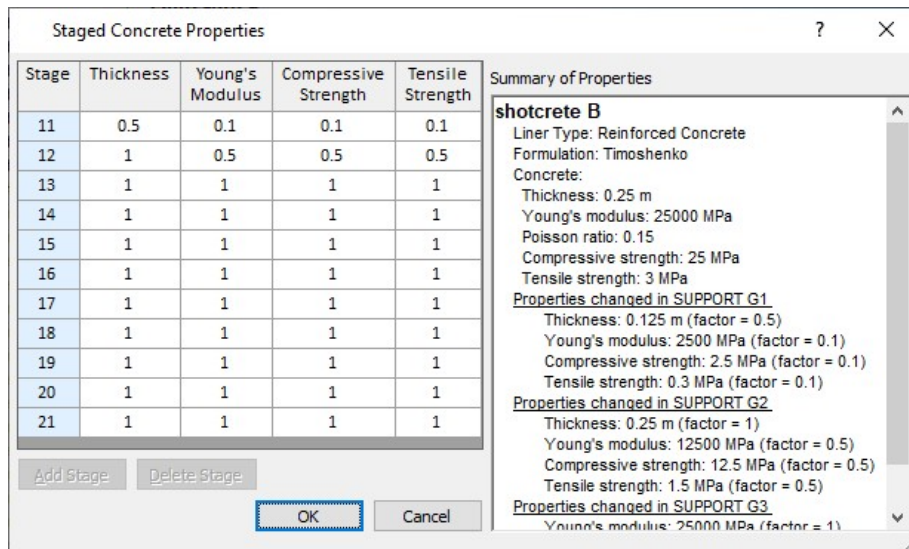
**shotcrete A**  
 Liner Type: Reinforced Concrete  
 Formulation: Timoshenko  
 Concrete:  
 Thickness: 0.25 m  
 Young's modulus: 25000 MPa  
 Poisson ratio: 0.15  
 Compressive strength: 25 MPa  
 Tensile strength: 3 MPa

**Properties changed in SUPPORT A1**  
 Thickness: 0.125 m (factor = 0.5)  
 Young's modulus: 2500 MPa (factor = 0.1)  
 Compressive strength: 2.5 MPa (factor = 0.1)  
 Tensile strength: 0.3 MPa (factor = 0.1)

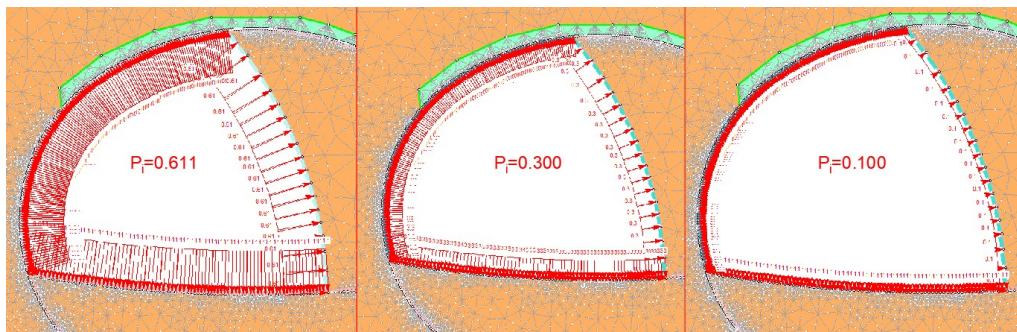
**Properties changed in SUPPORT A2**  
 Thickness: 0.25 m (factor = 1)  
 Young's modulus: 12500 MPa (factor = 0.5)  
 Compressive strength: 12.5 MPa (factor = 0.5)  
 Tensile strength: 1.5 MPa (factor = 0.5)

**Properties changed in SUPPORT A3**  
 Young's modulus: 25000 MPa (factor = 1)  
 Compressive strength: 25 MPa (factor = 1)  
 Tensile strength: 3 MPa (factor = 1)

Εικόνα 4.10: Staged Concrete properties φάση A1



Εικόνα 4.11: Staged Concrete properties φάση B



Εικόνα 4.12: Σταδιακή αποτόνωση σε τρεις φάσεις

Μετά τον προσδιορισμό των σταδίων της προσομοίωσης, ορίζεται το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων (mesh), που επιλέγεται να είναι 6 noded triangles και ακολουθεί ο υπολογισμός των παραμέτρων του εδαφικού υλικού που περιβάλλει τη σήραγγα. Το υλικό θεωρείται ισότροπο και το  $K_0$  λαμβάνεται από την γεωτεχνική μελέτη  $K_0=0,4$  για το γεωυλικό στο οποίο διανοίγεται η σήραγγα. Επιλέγεται να λαμβάνονται υπ' όψιν τα υπερκείμενα, καθώς η επίλυση γίνεται γεωστατικά και ορίζεται καταστατικό προσομοίωμα Mohr- Coulomb, διότι η διάνοιξη γίνεται σε εδαφικό υλικό (Μάργα, Αργιλόλιθος, Ιλυόλιθος) σε αβαθή αστική σήραγγα.

Μετά την ολοκλήρωση των παραπάνω βημάτων, γίνεται τοποθέτηση της προσωρινής υποστήριξης.

Οι βασικές παραδοχές που έγιναν κατά την εισαγωγή των δεδομένων για την ανάλυση, είναι οι εξής:



- Το γεωυλικό προσομοιώνεται ελαστοπλαστικά
- Θεωρούνται ξηρές συνθήκες εδάφους, λόγω της πλήρους αποστράγγισης που συμβαίνει μέσω των αποστραγγιστικών οπών
- Ο συντελεστής αποτόνωσης ( $\lambda$ ) της βραχόμαζας προσδιορίζεται με βάση τη μέθοδο *Chern et al (1998)*
- Για εδαφικά υλικά (πχ. Άμμοι, Άργιλοι, Μάργες, Κροκαλοπαγή) χρησιμοποιείται το καταστατικό προσομοίωμα Mohr- Coulomb.
- Τα μέτρα υποστήριξης προσομοιώνονται ελαστικά
- Η τοποθέτηση των μέτρων υποστήριξης, γίνεται σε απόσταση από το μέτωπο ίση με το βήμα εκσκαφής.
- Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα έχει μετρό ελαστικότητα  $E=25 \text{ GPa}$
- Προσομοιώνεται η σταδιακή τοποθέτηση και σκλήρυνση του Ε.Σ. μέσω της σταδιακής αύξησης του πάχους του και του μέτρου Ελαστικότητας.
- Δεν λαμβάνεται υπόψιν η πίεση  $P_a$  στο μέτωπο που εφαρμόστηκε στην διάνοιξη της σήραγγας.
- Ο συντελεστής ασφάλειας είναι  $SF=1$

### 4.3.3 Τοποθέτηση προσωρινής υποστήριξης προσομοιώματος

Τα μέτρα άμεσης υποστήριξης που προσομοιάζονται στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων του κώδικα RS2 είναι αυτά που εφαρμόστηκαν κατά την διάνοιξη της κεντρικής σήραγγας NATM και των πλευρικών σηράγγων πρόσβασης κλιμακοστασίων. Η πίεση στο μέτωπο που εφαρμόστηκε κατά την διάνοιξη της σήραγγας δεν λαμβάνεται υπόψιν.

Συνοπτική περιγραφή των μέτρων άμεσης υποστήριξης όπως εφαρμόστηκαν κατά την διάνοιξη:

Μέτρα υποστήριξης A1 φάσης:

- Κέλυφος από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (shotcrete) C25/30 πάχους 30cm, ενισχυμένο με δομικό πλέγμα 2xT188.

- Προσωρινό κατακόρυφο τόξο από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα C25/30 πάχους 25cm ενισχυμένο με δομικό πλέγμα 2xT188.

-Προσωρινό ανεστραμμένο invert αριστερά από το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 20cm ενισχυμένο με δομικό πλέγμα T188.

- Χαλύβδινα δικτυωτά πλαίσια Lattice Girder P140 – 4Φ20 σε αποστάσεις 1.00m.

-Αγκύρια πλήρους πάκτωσης Φ25 B500C, φέρουσας ικανότητας 200 KN, μήκους 4,00-6,00m σε αποστάσεις 1,00m.

-Διαμόρφωση διευρυμένης έδρασης της προσωρινής υποστήριξης στις δυο παρειές του θόλου της Α1 φάσης.

#### Μέτρα υποστήριξης Α2 φάσης:

- Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 5cm στην επιφάνεια του μετώπου της Α φάσης (Α1 και Α2)

- Ομπρέλα προενίσχυσης μετώπου μόνο στο μέτωπο προσβολής από 41 διάτρητους δοκούς προπορείας Φ168.3, πάχους 5mm και μήκους 12m σε διάτρημα Φ190 (υπό γωνία 6° ανά 0.40m στις 90° του θόλου).

- Προαγκύρωση (spiling) του μετώπου στις 90° του θόλου αποτελούμενη από 54 ράβδους φ32, σε αξονικές αποστάσεις 0.30m, μήκους 6.00m σε διάτρημα Φ76 (υπό γωνία 8° ανά 0.30).

-Αγκύρια fiberglass Φ22 φέρουσας ικανότητας 160KN.

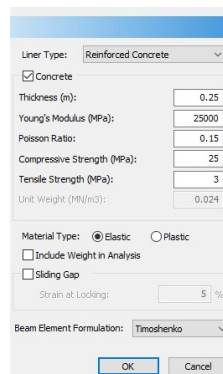
#### Μέτρα υποστήριξης Β φάσης:

- invert από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 30cm ενισχυμένο με δομικό πλέγμα 2xT188.

## Εισαγωγή μέτρων άμεσης υποστήριξης στο μοντέλο 2D RS2:

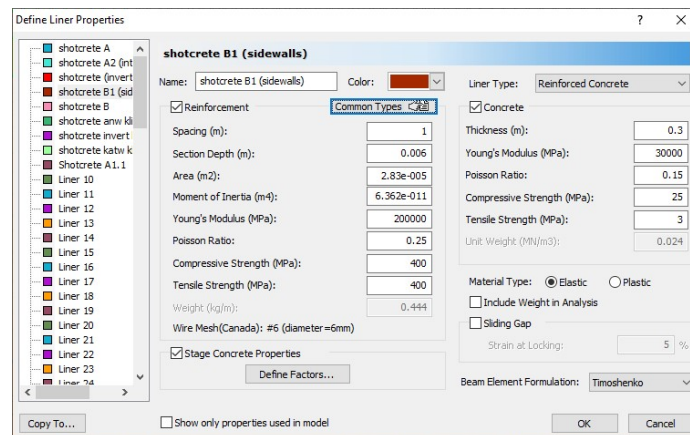
### Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα:

Για την προσομοίωση του εκτοξευμένου σκυροδέματος εισήχθησαν τα μηχανικά χαρακτηριστικά με βάση την κατηγορία σκυροδέματος που δόθηκε από την μελέτη. Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα είναι κατηγορίας C25/30 και πάχους 25cm (απομειωμένο κατά 5cm προς την πλευρά της ασφάλειας), με χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή  $f_{ck}=25\text{MPa}$ , μέτρο ελαστικότητας  $E=25\text{GPa}$ , λόγο του Poisson  $\nu=0.15$  και εφελκυστική αντοχή 3MPa. Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα προσομοιώνεται ελαστικά.



Εικόνα 4.13: Χαρακτηριστικά εκτοξευόμενου σκυροδέματος

Για την διαμόρφωση διευρυμένης έδρασης της προσωρινής υποστήριξης στις δυο παρειές του θόλου επιλέχθηκε να τοποθετηθεί εκτοξευόμενο σκυρόδεμα μεγαλύτερου πάχους 30cm με μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας  $E=30\text{GPa}$ . (εικόνα 4.14). Στο προσωρινό ανεστραμμένο τόξο (invert) τοποθετήθηκε άοπλο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για την εύκολη απομάκρυνση του κατά την διάνοιξη της Β φάσης.

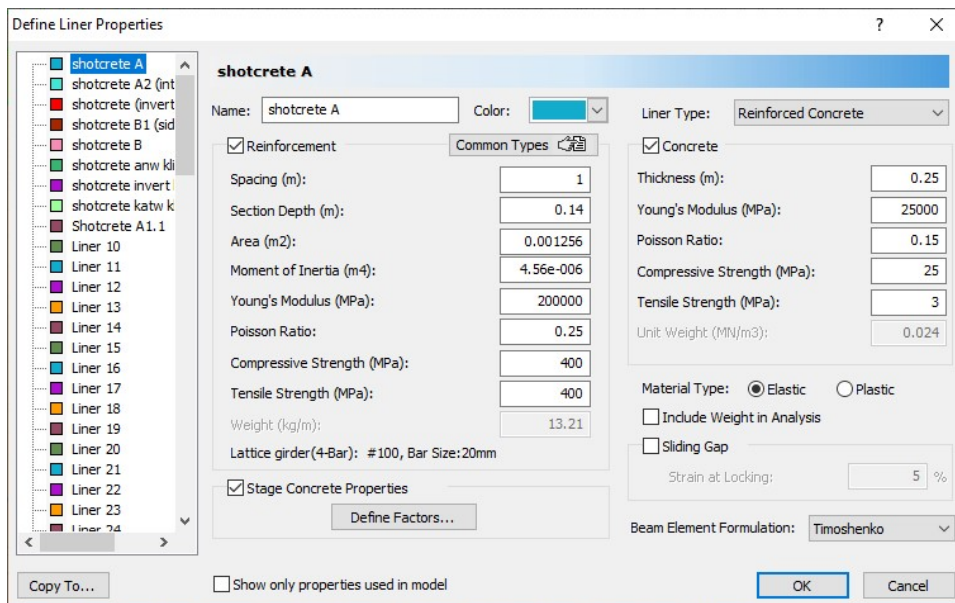


Εικόνα 4.14: Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

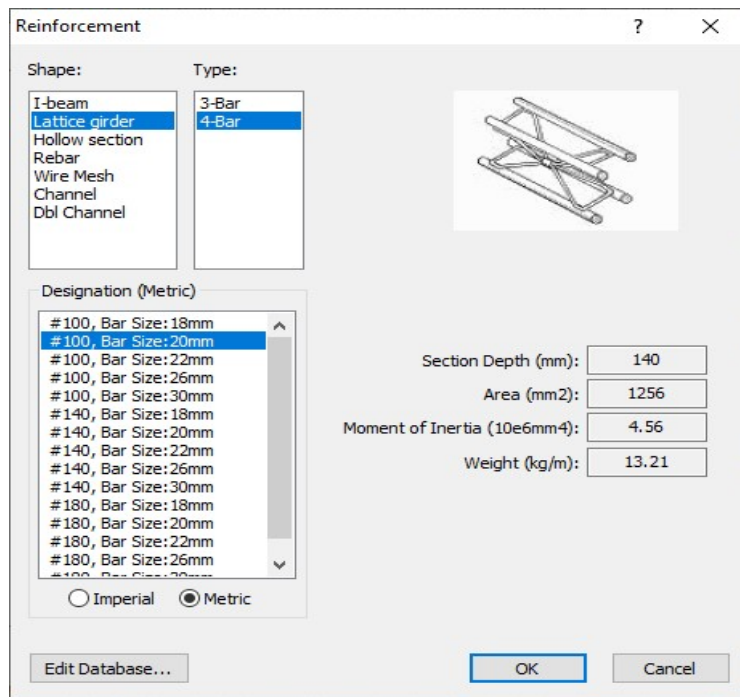
## Μεταλλικά πλαίσια και δομικό πλέγμα όπλισης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος:

Στο προσομοίωμα του κώδικα RS2.8 επιλέχθηκαν μέσω της επιλογής define liner properties → reinforcement, χαλύβδινα δικτυωτά πλαίσια Lattice Girder P140 – 4Φ20 όπως αυτά που χρησιμοποιήθηκαν κατά την κατασκευή για την άνω ημιδιατομή της κεντρικής σήραγγας και της άνω ημιδιατομής των σηράγγων κλιμακοστασίων, με χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή 400MPa, χαρακτηριστική εφελκυστική αντοχή 400MPa και μέτρο ελαστικότητας  $E=200\text{GPa}$  (εικόνα 4.13-14). Κατά την κατασκευή οι βάσεις του πλαισίου στερεώθηκαν με αγκύρια, κάτι το οποίο προσομοιώθηκε στο μοντέλο με την ενίσχυση του μέτρου ελαστικότητας του σκυροδέματος στις παρειές του θόλου στα σημεία στερέωσης του πλαισίου.

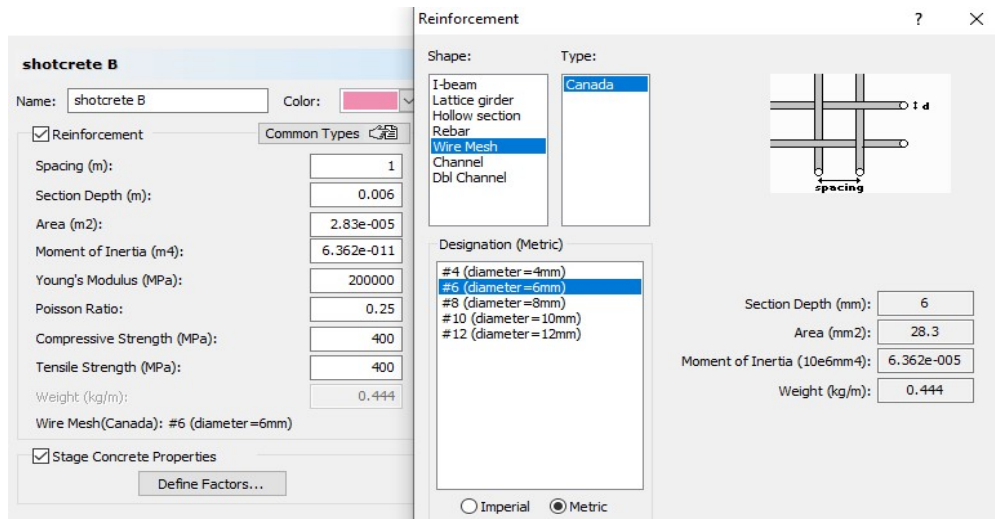
Επίσης τοποθετήθηκε δομικό πλέγμα 2xT188 στις κάτω πλευρές των θόλων για ενίσχυση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, διαμέτρου 6mm και αντοχή σε εφελκυσμό 400MPa (εικόνα 4.17).



Εικόνα 4.15:Όπλισμός με δικτυωτά πλαίσια



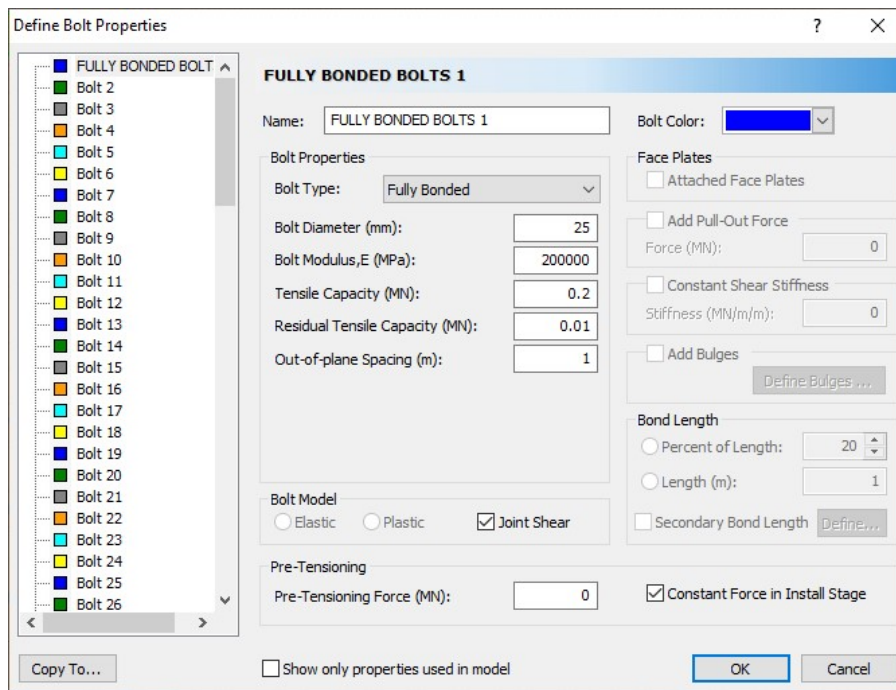
Εικόνα 4.16:Χαρακτηριστικά δικτυωτού πλαισίου



Εικόνα 4.17: Χαρακτηριστικά δομικού πλέγματος

## Αγκύρια:

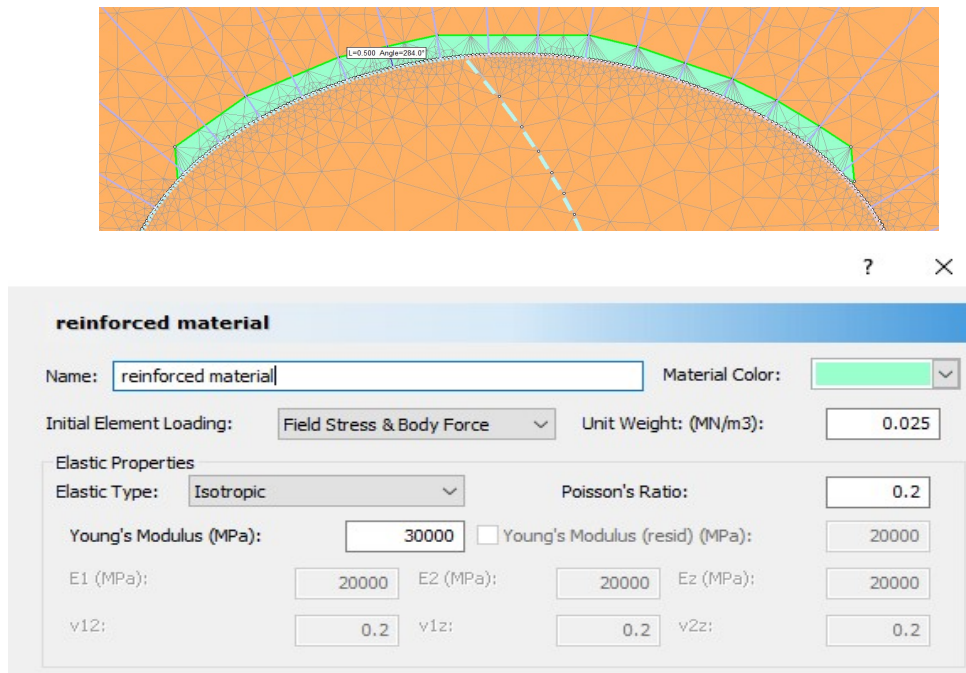
Για την προσομοίωση των αγκυρίων επιλέχθηκαν με την εντολή *Define Bolts* αγκύρια τύπου πλήρους πάκτωσης (fully Bonded) Φ25, B500C με μέτρο ελαστικότητας 200GPa και φέρουσα ικανότητα 200kN, η τοποθέτηση γίνεται για κάθε βήμα προχώρησης, τοποθετημένα σε κάναβο 1x1m. Το μήκος επιλέχθηκε 5m σύμφωνα και με την μελέτη που υλοποιήθηκε.



Εικόνα 4.18: Χαρακτηριστικά αγκυρίων fully bonded – φάσεις A1 και A2

## Δοκοί προπορείας :

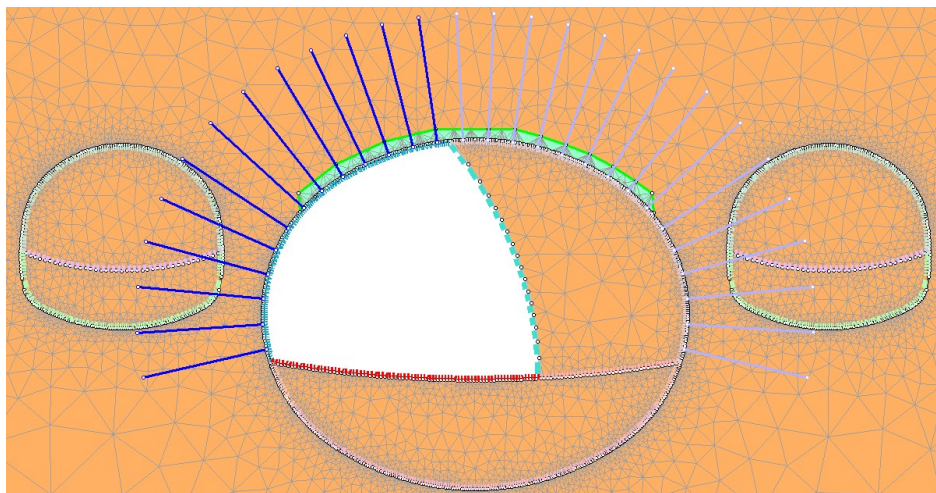
Για τις δοκούς προπορείας που τοποθετήθηκαν κατά την διάνοιξη της σήραγγας δεν υπήρχε η δυνατότητα να προσομοιωθεί σε ένα κώδικα 2D όπως αυτός που χρησιμοποιήθηκε για την παρούσα εργασία. Για τον λόγο αυτό στην οροφή του δακτυλίου της σήραγγας χρησιμοποιήθηκε μια ενισχυμένη ζώνη με υλικό μεγάλου μέτρου ελαστικότητας (30GPa) σε σχέση με το γεωυλικό που αντικαταστάθηκε, πλάτους 0.5m (εικόνα 4.19).



*Εικόνα 4.19: Χαρακτηριστικά ενισχυμένης ζώνης*

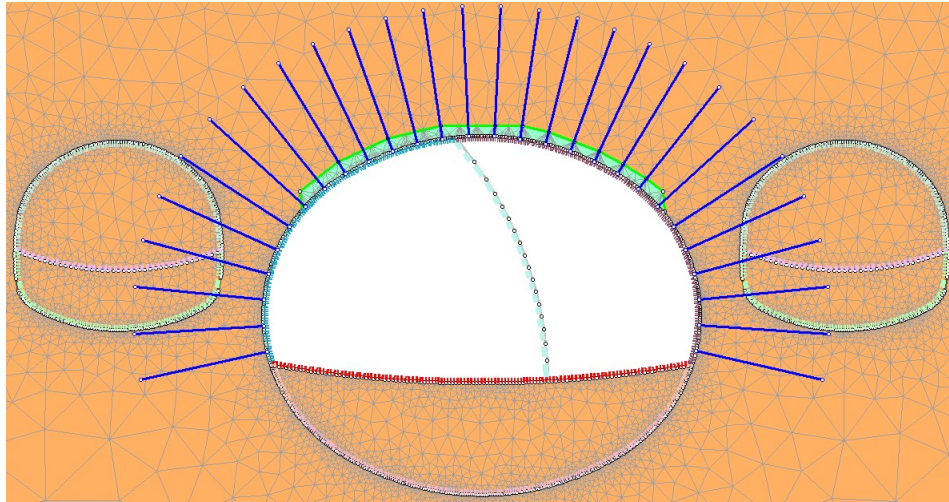
Η εφαρμογή της άμεσης υποστήριξης έγινε στον κώδικα σε στάδια τα οποία προσομοιάζουν την κάθε φάση διάνοιξης της διατομής. Η τοποθέτηση έγινε στα εξής στάδια:

Stage 3,4,5 (support A) : Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος, πλαισίων και αγκυρίων με τα χαρακτηριστικά που προαναφέρθηκαν, στο αριστερό τμήμα της άνω ημιδιατομής A1.



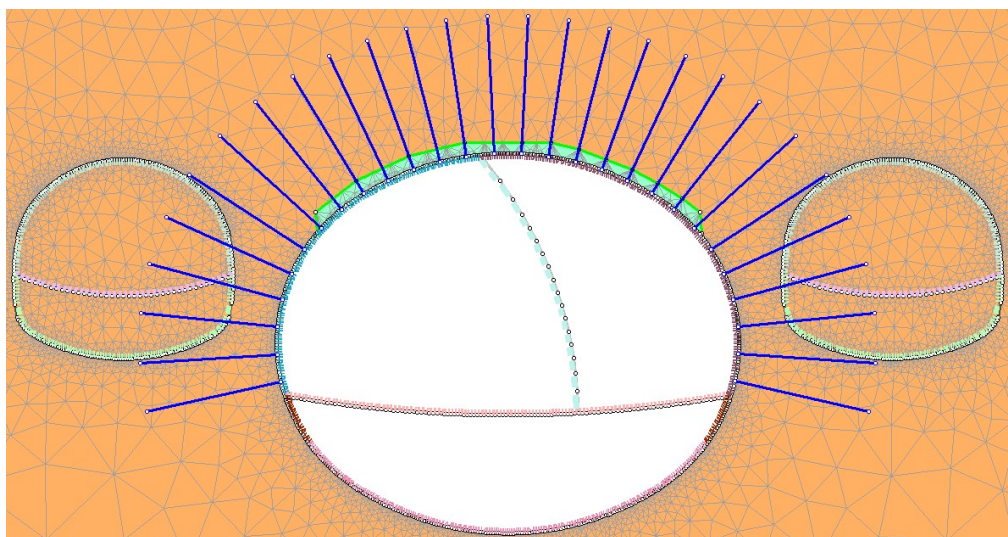
*Εικόνα 4.20: Εφαρμογή άμεσης υποστήριξης φάσης A1*

Stage 7,8,9 (support B) : Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος, πλαισίων και αγκυριών με τα χαρακτηριστικά που προαναφέρθηκαν, στο δεξιό τμήμα της άνω ημιαδομής A2. Αφαίρεση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στην δεξιά παρειά του τμήματος A1.



*Εικόνα 4.21: Εφαρμογή άμεσης υποστήριξης φάσης A2*

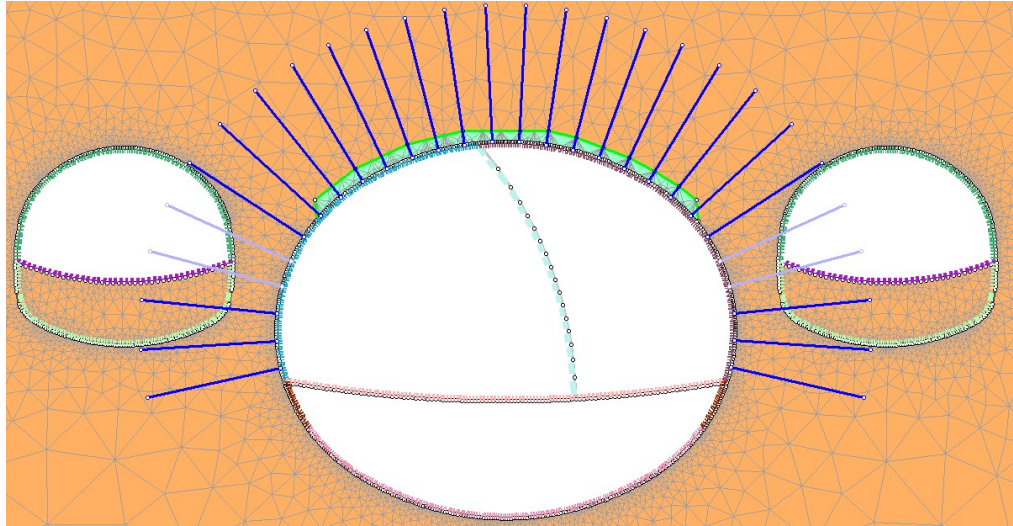
Stage 11,12,13 (support G) : Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος και δομικού πλέγματος με τα χαρακτηριστικά που προαναφέρθηκαν, στην κάτω ημιαδομή B. Αφαίρεση προσωρινού ανάστροφου τόξου. Τοποθέτηση ενισχυμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος στην δεξιά και αριστερή παρειά στις βάσεις των πλαισίων.



*Εικόνα 4.22: Εφαρμογή άμεσης υποστήριξης φάσης B*

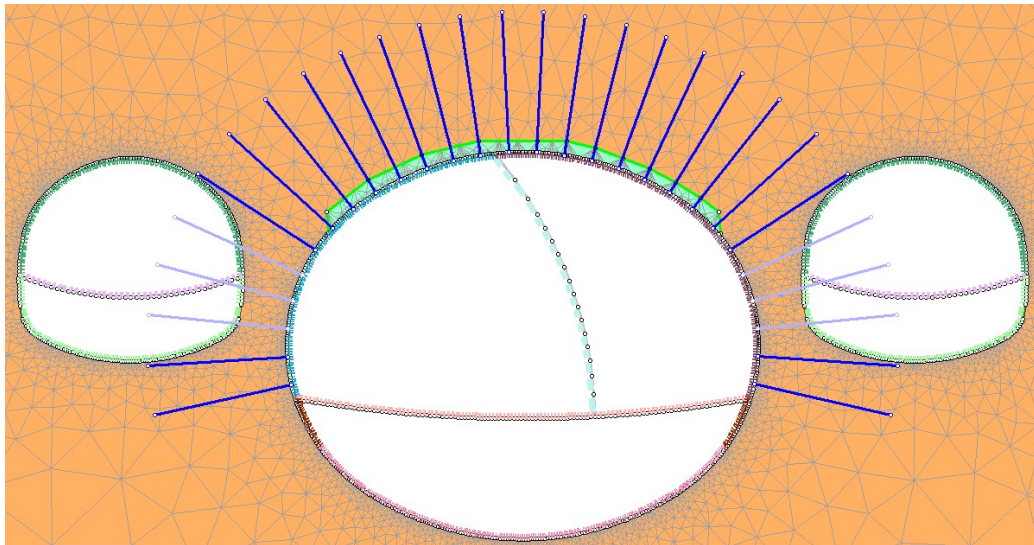


Stage 15,16,17 (support D) : Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος, πλαισίων με τα χαρακτηριστικά που προαναφέρθηκαν, στην άνω ημιδιατομή των σηράγγων κλιμακοστασίων.



*Εικόνα 4.23: Εφαρμογή άμεσης υποστήριξης φάσης Α σηράγγων κλιμακοστασίων*

Stage 19,20,21 (support E) : Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος και δομικού πλέγματος με τα χαρακτηριστικά που προαναφέρθηκαν, στην κάτω ημιδιατομή των σηράγγων κλιμακοστασίων. Αφαίρεση προσωρινού ανάστροφου τόξου.



*Εικόνα 4.24: Εφαρμογή άμεσης υποστήριξης φάσης Β σηράγγων κλιμακοστασίων*

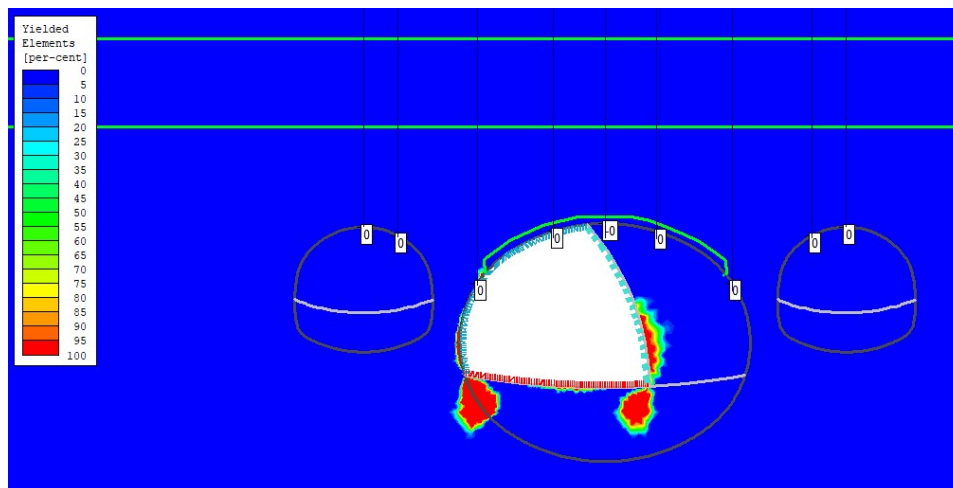
## 4.4 Αποτελέσματα

Με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων RS2.8 υπάρχει η δυνατότητα να εξαχθούν αποτελέσματα πολλών μεγεθών απαραίτητων για την μελέτη των υπογείων έργων. Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας τα διαγράμματα που έχουν εξαχθεί αφορούν κυρίως τις κατακόρυφες μετακινήσεις επιφανείας πάνω από τις διατομές των σηράγγων καθώς και τις κατακόρυφες μετακινήσεις στην στέψη των σηράγγων. Τα αναλυτικά αποτελέσματα που εξήχθησαν από το μοντέλο χρησιμοποιήθηκαν ώστε να συγκριθούν με τις πραγματικές μετρήσεις που προέκυψαν από όργανα μέτρησης στο πεδίο.

### 4.4.1 Πλαστική Ζώνη :

Ένα σημαντικό μέγεθος για την συμπεριφορά του γεωλικού στις σήραγγες είναι η πλαστική ζώνη που δημιουργείται κατά την διάνοιξη και πως αυτή μεταβάλλεται σε κάθε φάση της διάνοιξης.

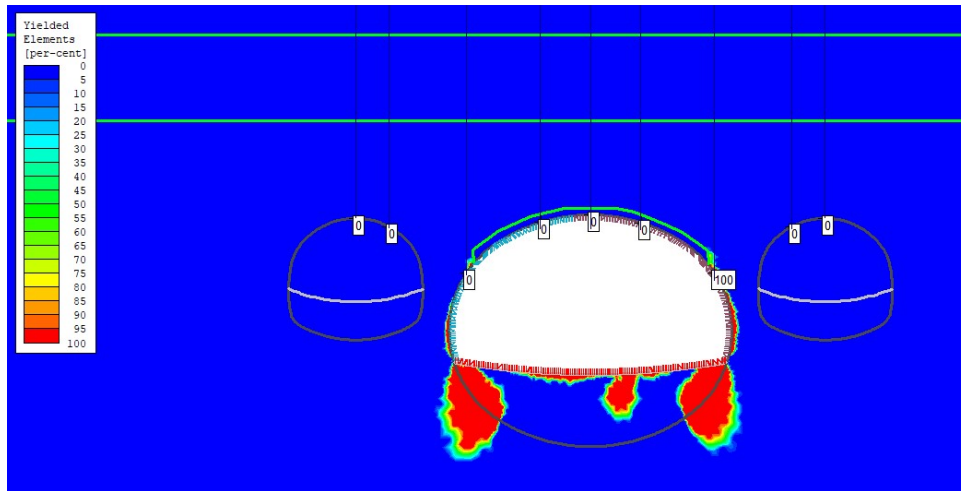
Πλαστική ζώνη μετά την διάνοιξη του άνω αριστερού τμήματος Α1.



Εικόνα 4.25: Πλαστική Ζώνη άνω αριστερού τμήματος Κεντρικής Σήραγγας

Παρατηρείται ότι η πλαστική ζώνη διαμορφώνεται στις παρειές και στον πόδα όπου στηρίζονται τα πλαίσια με προέκταση προς τα κάτω. Η ενισχυμένη ζώνη στην στέψη που προσομοιάζει τις δοκούς προπορείας φαίνεται πως λειτουργεί και δεν εμφανίζεται επέκταση της πλαστικής ζώνης εντός αυτής.

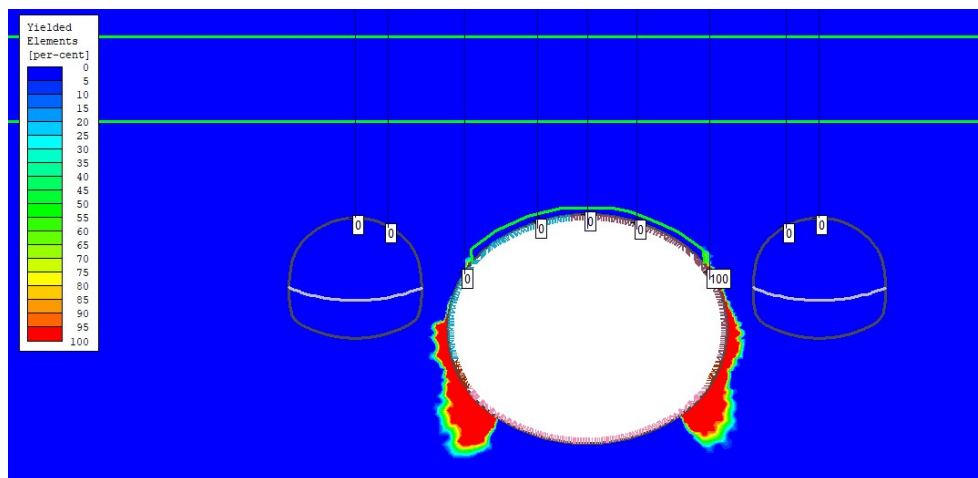
Πλαστική ζώνη μετά την διάνοιξη του άνω δεξιού τμήματος A2.



Εικόνα 4.26: Πλαστική Ζώνη άνω δεξιού τμήματος Κεντρικής Σήραγγας

Μετά την ολοκλήρωση της άνω ημιδιατομής (A1 & A2 φάση εκσκαφής σήραγγας), παρατηρείται ότι επεκτείνεται συμμετρικά η πλαστική ζώνη στις παρειές και πιο έντονα στις στηρίξεις των πλαισίων στους πόδες.

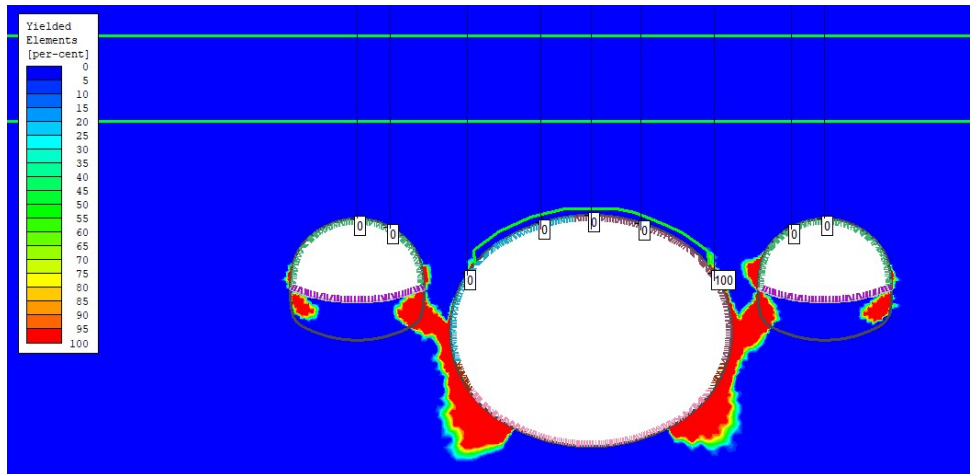
Πλαστική ζώνη μετά την διάνοιξη της κάτω ημιδιατομής B.



Εικόνα 4.27: Πλαστική Ζώνη άνω δεξιού τμήματος Κεντρικής Σήραγγας

Με την διάνοιξη της κάτω ημιδιατομής της κεντρικής σήραγγας παρατηρείται μια ενοποίηση της πλαστικής ζώνης στις παρειές με επέκταση προς τα κάτω περίπου 4 μέτρα από την στήριξη των πλαισίων. Η ενισχυμένη ζώνη στην στέψη συνεχίζει να εμποδίζει την επέκταση προς την οροφή του δακτυλίου.

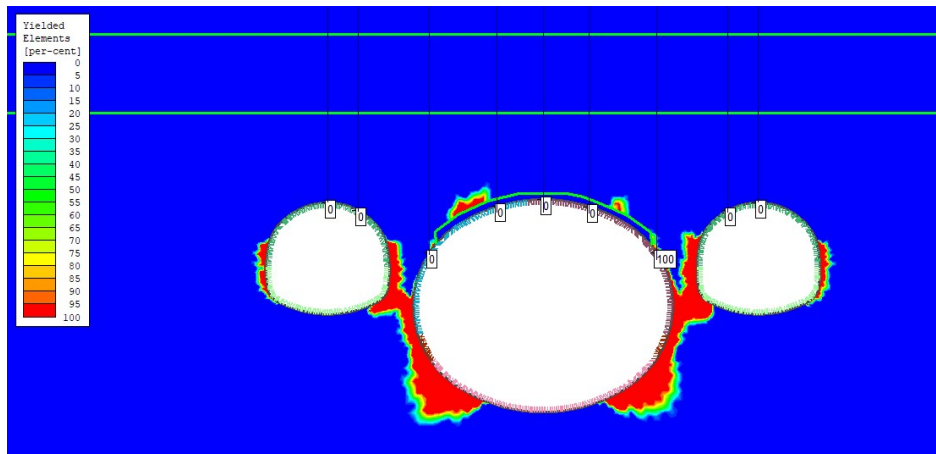
Πλαστική ζώνη μετά την διάνοιξη της Α φάσης πλευρικών σηράγγων.



Εικόνα 4.28: Πλαστική ζώνη μετά την διάνοιξη Α φάσης πλευρικών σηράγγων

Μετά την διάνοιξη της Α φάσης των πλευρικών σηράγγων κλιμακοστασίων παρατηρήθηκε, η δημιουργία πλαστικών ζωνών πλευρικά αυτών των σηράγγων κάτω από τους πόδες στις στηρίξεις των πλαισίων, με επέκταση προς τα κάτω. Οι πλαστικές ζώνες στις παρειές που βρίσκονται κοντά στην κεντρική σήραγγα έχουν μεγαλύτερη έκταση και ενοποιούνται με της κεντρικής σε κάποια τμήματα εκατέρωθεν αυτής. Είναι φανερή η αλληλεπίδραση σε σήραγγες που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση.

Πλαστική ζώνη μετά την ολοκλήρωση της διάνοιξης των πλευρικών σηράγγων.



Εικόνα 4.29: Πλαστική ζώνη μετά την διάνοιξη Β φάσης πλευρικών σηράγγων

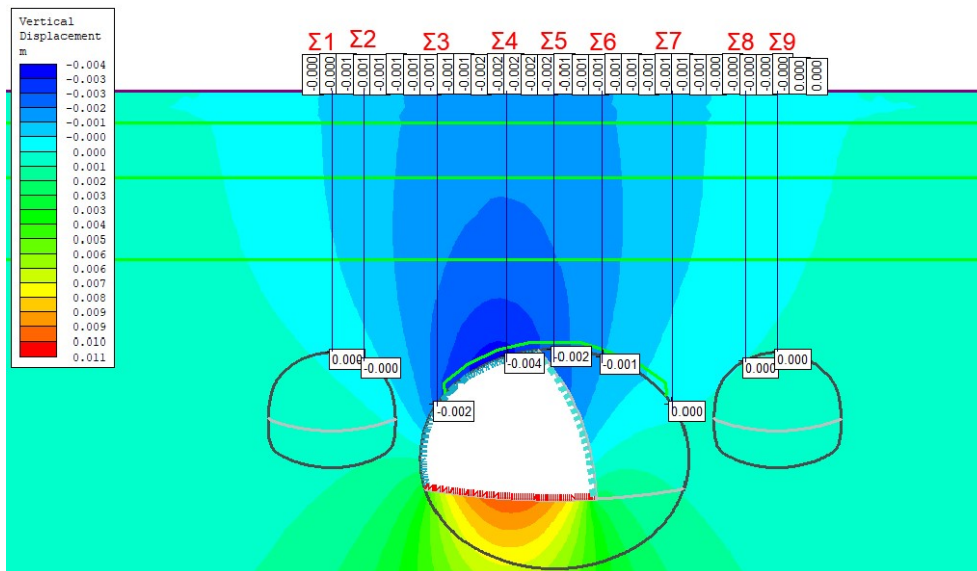
Με την ολοκλήρωση όλων των φάσεων εκσκαφής παρατηρείται η περαιτέρω επέκταση της πλαστικής ζώνης της κεντρικής σήραγγας με μεγαλύτερη επέκταση στις παρειές της, στα τμήματα που βρίσκονται κοντά στις πλευρικές σήραγγες. Η χρήση των μέτρων υποστήριξης φαίνεται να λειτουργεί και να συγκρατεί την επέκταση της πλαστικής ζώνης σε ανεκτά επίπεδα. Η ενισχυμένη ζώνη στην στέψη συνεχίζει να

εμποδίζει την επέκταση της πλαστικής ζώνης, όπου έχουν δημιουργηθεί μόνο σποραδικά σημεία που επηρεάζονται.

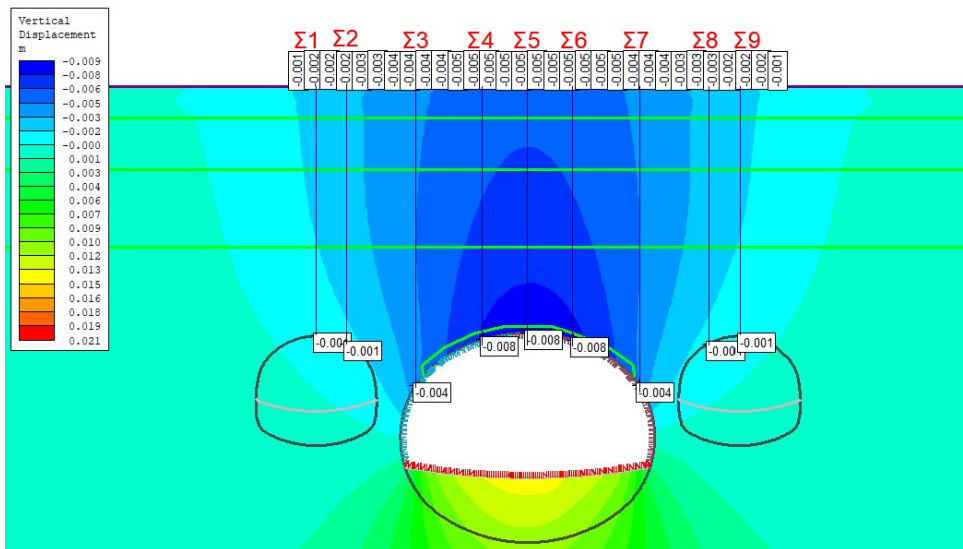
#### 4.4.2 Κατακόρυφες μετακινήσεις:

Είναι το βασικό μέγεθος για της ανάγκες της παρούσας εργασίας, διότι στην συνέχεια και μετά την εξαγωγή των αποτελεσμάτων από το προσομοίωμα θα συγκριθούν με τις κατακόρυφες μετακινήσεις που μετρήθηκαν στο πεδίο. Για τον λόγο αυτό παρατίθενται οι κατακόρυφες μετακινήσεις του προσομοιώματος στην επιφάνεια πάνω από την κεντρική σήραγγα και των πλευρικών σηράγγων. Επίσης παρουσιάζονται κατακόρυφες μετακινήσεις στην στέψη της κεντρικής σήραγγας.

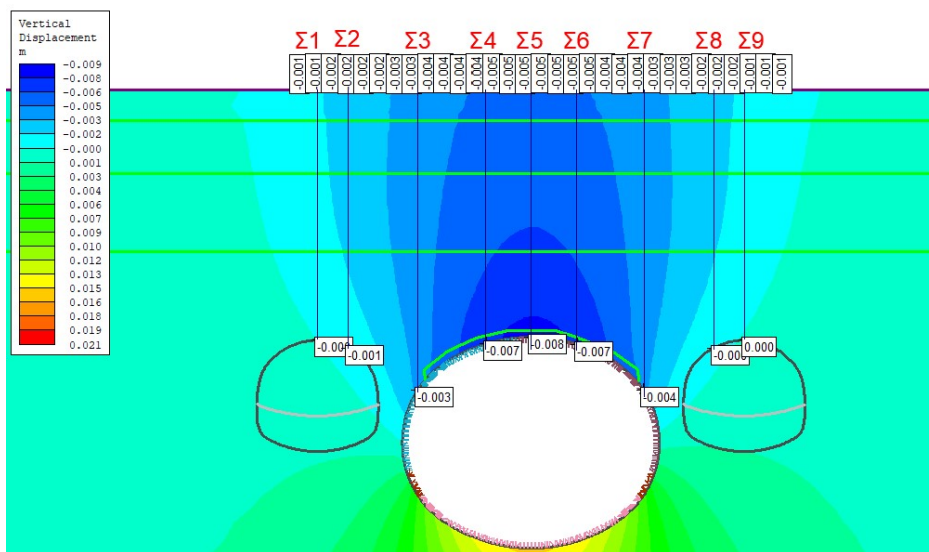
Κατακόρυφες μετακινήσεις μετά την διάνοιξη της κεντρικής και των πλευρικών σηράγγων σε εννέα σημεία:



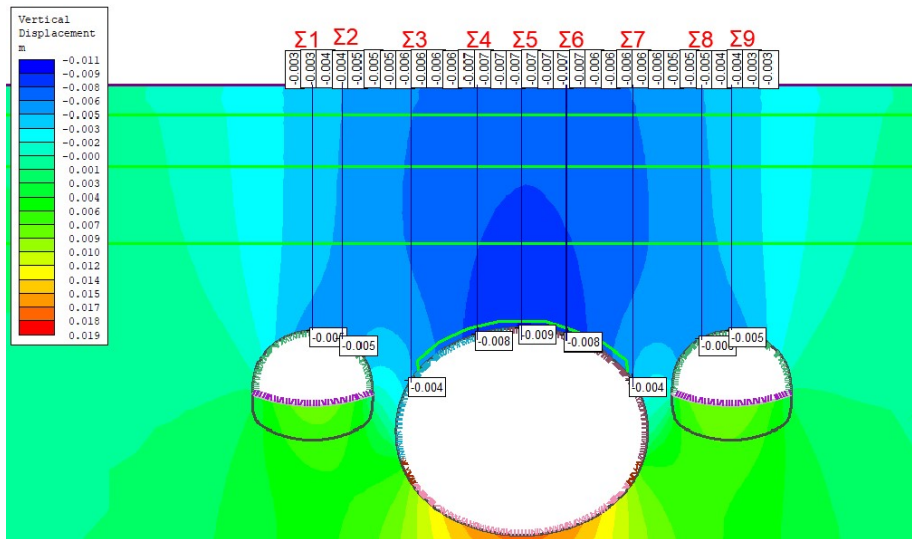
Εικόνα 4.30: Κατακόρυφες μετακινήσεις μετά την διάνοιξη του άνω αριστερού τμήματος A1



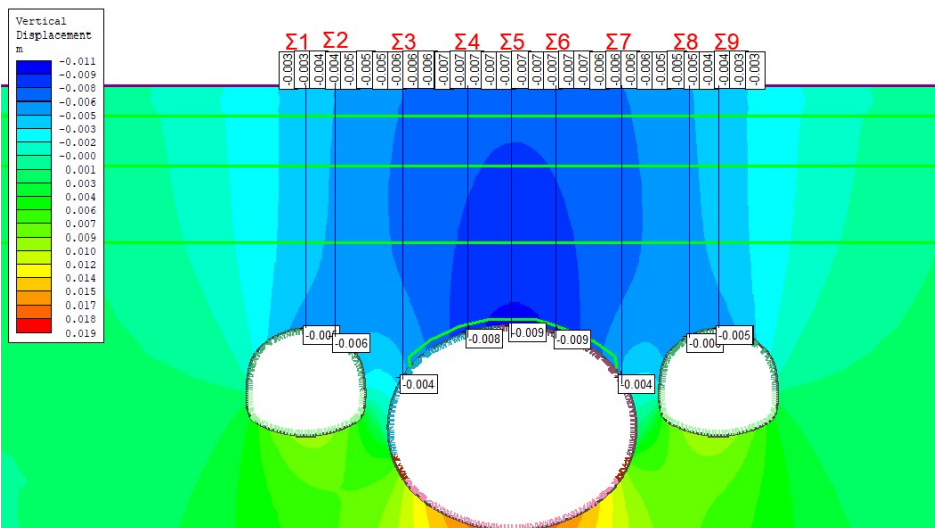
Εικόνα 4.31: Κατακόρυφες μετακινήσεις μετά την διάνοιξη του άνω δεξιού τμήματος A2



Εικόνα 4.32: Κατακόρυφες τάσεις μετά ολοκλήρωση διάνοιξης της κεντρικής σήραγγας



Εικόνα 4.33: Κατακόρυφες τάσεις μετά την διάνοιξη Α φάσης των πλευρικών σηράγγων



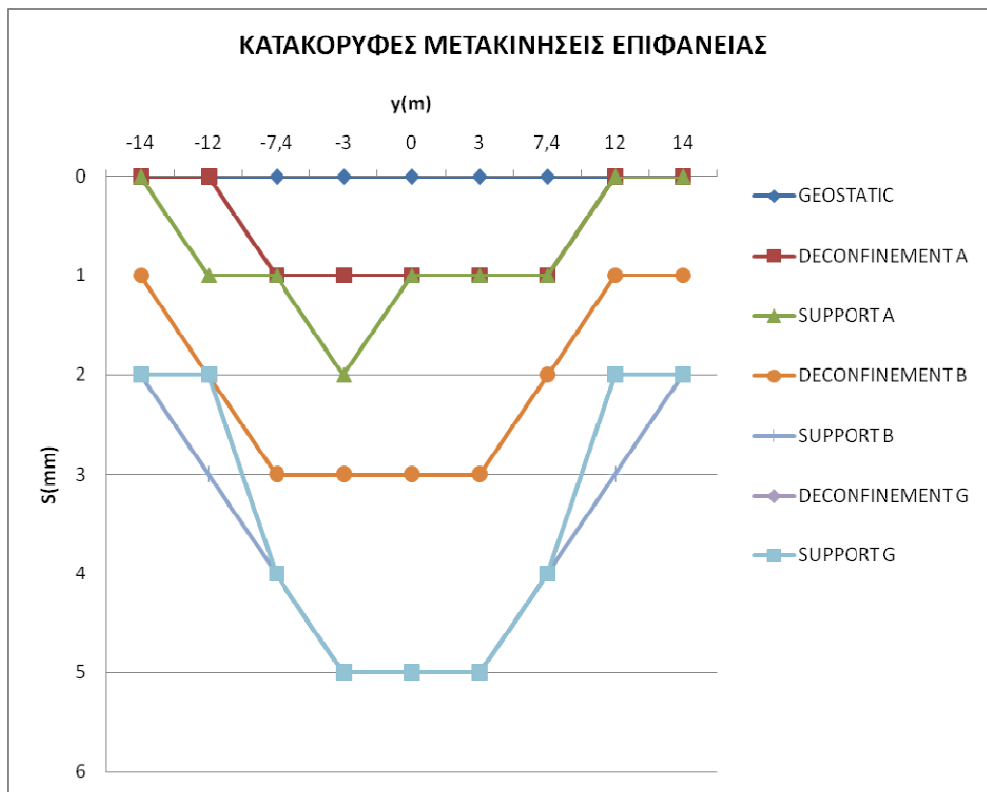
Εικόνα 4.34: Κατακόρυφες τάσεις μετά την διάνοιξη Β φάσης των πλευρικών σηράγγων

## Κατακόρυφες μετακινήσεις επιφάνειας σε 9 σημεία πάνω από τις τρεις σήραγγες:

Πίνακας 4.2: Κατακόρυφες επιφανειακές μετακινήσεις ανά στάδιο εκσκαφής

ΦΑΣΕΙΣ	Σ1	Σ2	Σ3	Σ4	Σ5	Σ6	Σ7	Σ8	Σ9
GEOSTATIC	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DECONFINEMENT A	0	0	1	1	1	1	1	1	0
SUPPORT A1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
SUPPORT A2	0	1	1	2	1	1	1	1	0
SUPPORT A3	0	1	1	2	1	1	1	1	0
DECONFINEMENT B	1	2	3	3	3	3	3	2	1
SUPPORT B1	1	2	3	4	4	4	4	3	2
SUPPORT B2	2	2	4	5	5	5	5	4	2
SUPPORT B3	2	3	4	5	5	5	5	4	3
DECONFINEMENT G	2	2	4	5	5	5	5	4	2
SUPPORT G1	2	2	4	5	5	5	5	4	2
SUPPORT G2	1	2	4	5	5	5	5	4	2
SUPPORT G3	1	2	4	5	5	5	5	4	2
DECONFINEMENT D	2	3	4	6	6	6	6	5	3
SUPPORT D1	3	4	5	6	6	6	6	5	4
SUPPORT D2	4	4	6	6	7	7	7	6	4
SUPPORT D3	4	4	6	7	7	7	7	6	4
DECONFINEMENT E	4	5	6	7	7	7	7	6	5
SUPPORT E1	4	5	6	7	7	7	7	6	5
SUPPORT E2	4	5	6	7	7	7	7	6	5
SUPPORT E3	4	5	6	7	7	7	7	6	5

Πίνακας 4.2: Κατακόρυφες επιφανειακές μετακινήσεις ανά στάδιο εκσκαφής

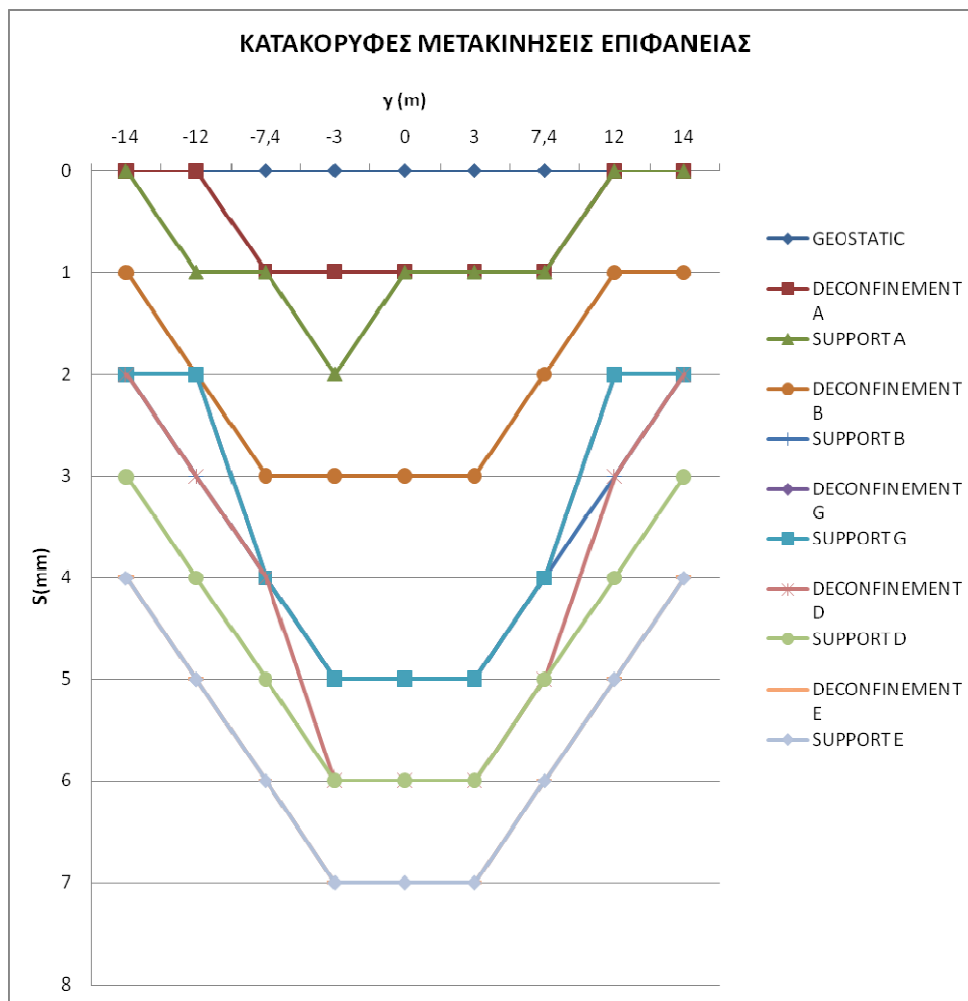


Διάγραμμα 4.6: Κατακόρυφες επιφανειακές μετακινήσεις μέχρι την διάνοιξη της κεντρικής σήραγγας

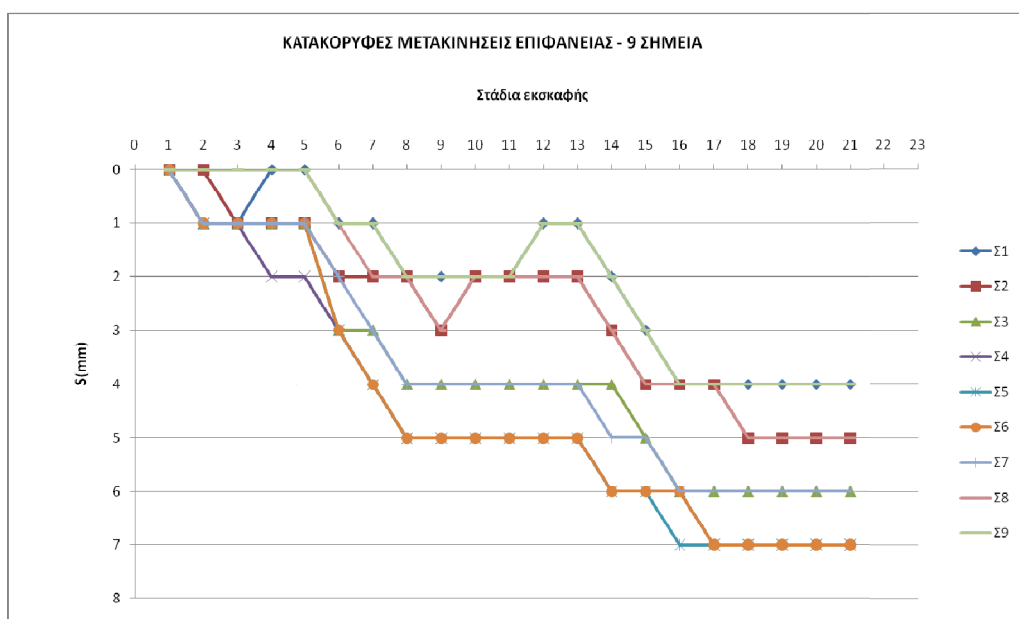
Από τις κατακόρυφες μετακινήσεις στην επιφάνεια μέχρι την διάνοιξη της κεντρικής σήραγγας NATM, παρατηρείται ότι οι μέγιστες μετακινήσεις είναι πάνω από τον κατακόρυφο άξονα της σήραγγας αυξανόμενες μέχρι την φάση υποστήριξης μετά την διάνοιξη της κάτω ημιδιατομής φάσης B, μέχρι την μέγιστη  $S_{max}=5\text{mm}$ . Στα



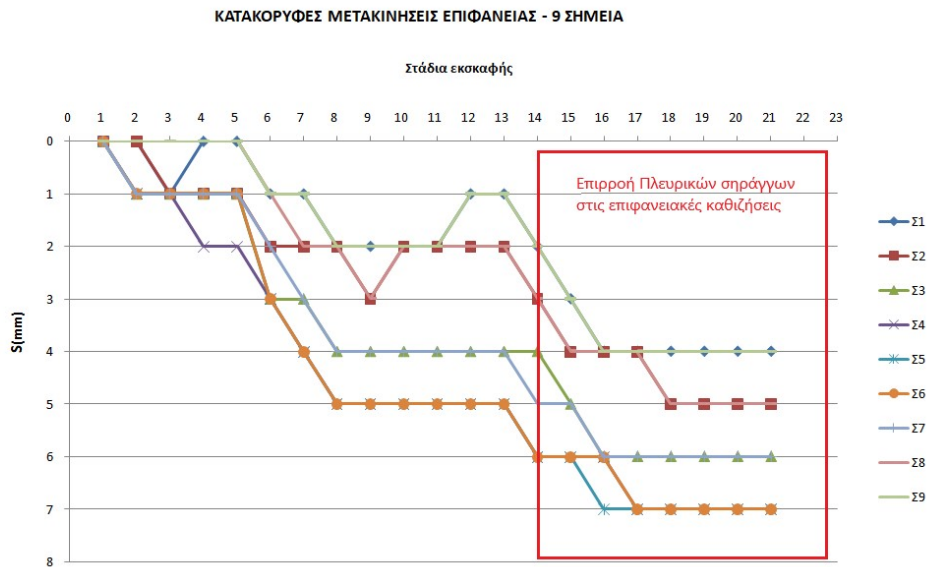
πρώτα στάδια προκύπτουν μεγαλύτερες μετακινήσεις αριστερά διότι η διάνοιξη ξεκίνησε με το αριστερό τμήμα της άνω ημιδιατομής.



Διάγραμμα 4.7: Κατακόρυφες μετακινήσεις επιφανείας μετά και την διάνοιξη των πλευρικών

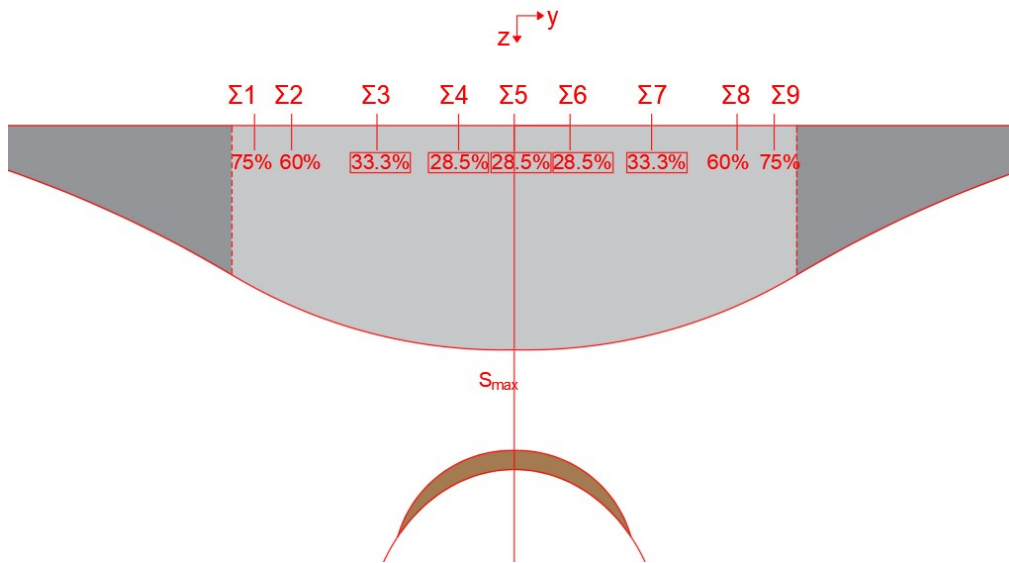


Διάγραμμα 4.8: Κατακόρυφες μετακινήσεις επιφανείας μετά και την διάνοιξη των πλευρικών



Διάγραμμα 4.9: Επιρροή πλευρικών σηράγγων στις κατακόρυφες μετακινήσεις επιφανείας

Μετά την διάνοιξη και των δυο φάσεων των πλευρικών σηράγγων κλιμακοστασιών παρατηρείται στο διάγραμμα 4.7 ότι οι κατακόρυφες επιφανειακές μετακινήσεις πάνω από την σήραγγα NATM μεγαλώνουν σε μεγάλο ποσοστό. Στο κεντρικό σημείο πάνω από την κεντρική σήραγγα η μετακίνηση μεγαλώνει από τα 5mm στα 7mm, επομένως η συμβολή των πλευρικών σε επιπλέον καθιζήσεις φθάνει σε ποσοστό 28,57%. Ενώ και στα σημεία Σ3,Σ4 που βρίσκονται  $y=\pm 3m$  και  $y=\pm 7,4m$  από τον άξονα παρατηρείται ότι μεγαλώνουν οι κατακόρυφες μετακινήσεις περίπου 2mm με ποσοστό 28,57% και 33,33% αντίστοιχα. Στα σημεία Σ2,Σ8 με  $y=\pm 12m$  που βρίσκονται πάνω από τις πλευρικές σήραγγες παρατηρείται πως οι μετακινήσεις αυξάνονται κατά 3mm αλλά με μεγαλύτερο ποσοστό αύξησης της τάξης του 60%, ενώ τα σημεία Σ1 και Σ2 που βρίσκονται πάνω από τους κεντρικούς άξονες των πλευρικών σηράγγων, είναι τα σημεία που έχουν την μεγαλύτερη επιρροή οι πλευρικές σήραγγες, με ποσοστό αύξησης, 75%.

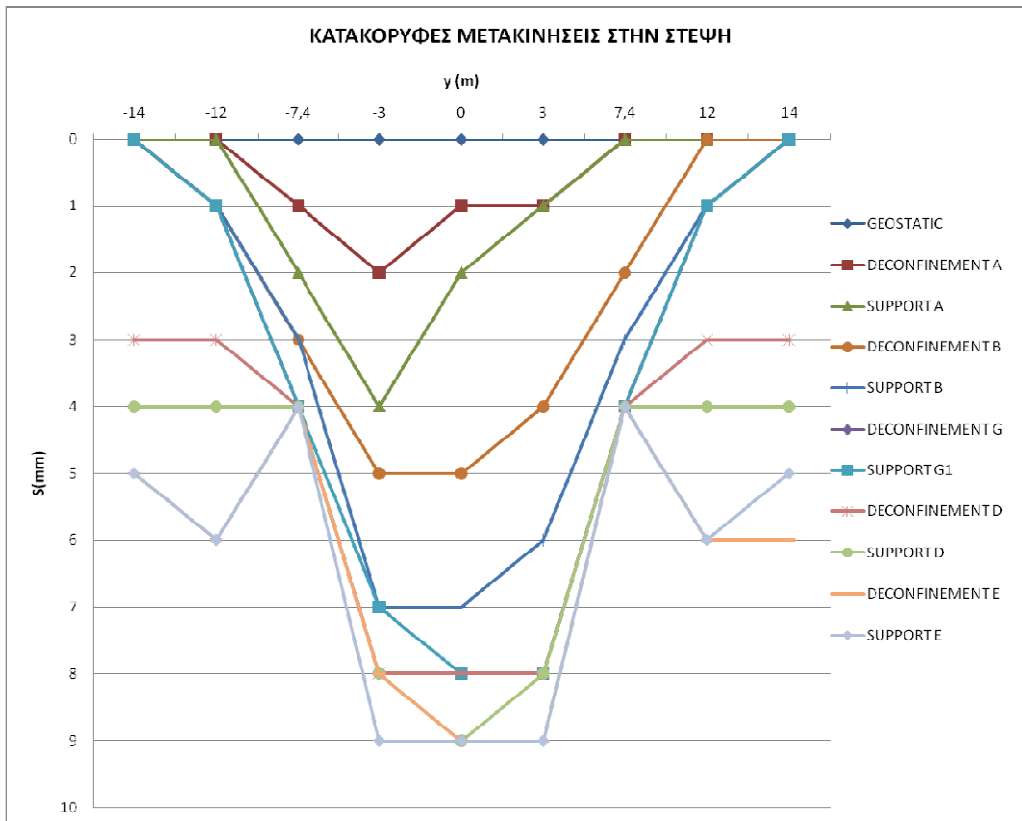


Σχέδιο 4.2: Ποσοστά αύξησης καθιζήσεων μετά την διάνοιξη πλευρικών σηράγγων.

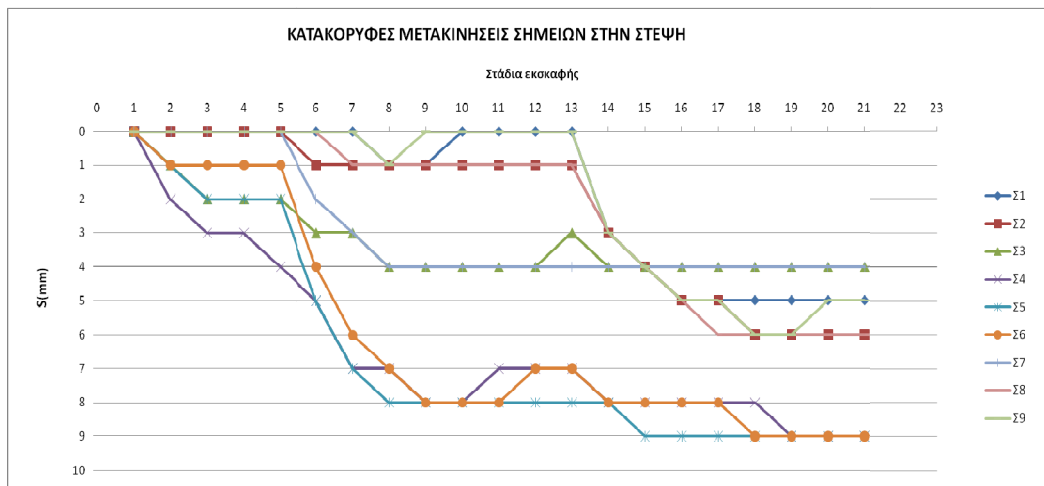
## Κατακόρυφες μετακινήσεις στην οροφή της σήραγγας.

Πίνακας 4.3 Κατακόρυφες μετακινήσεις ανά στάδιο εκσκαφής στην στέψη

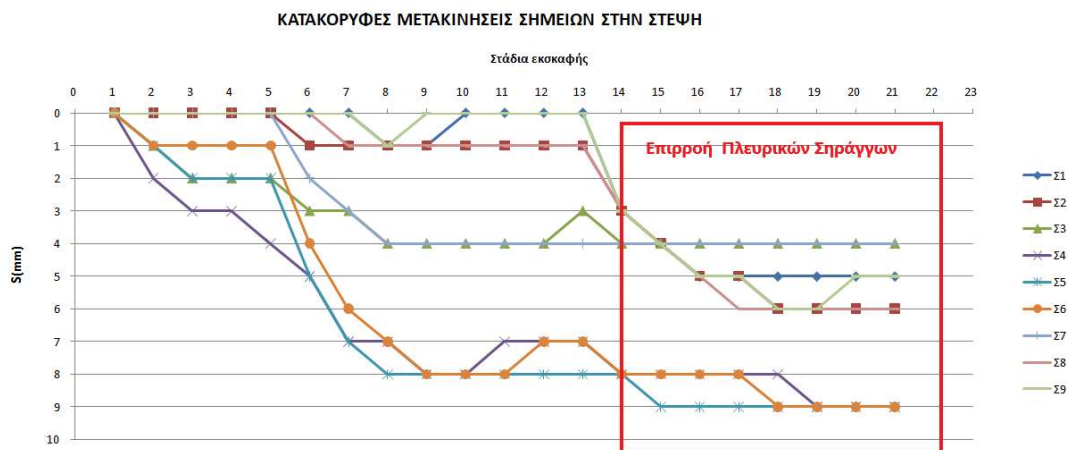
ΣΤΑΔΙΑ	Σ1 (γ=-14)	Σ2 (γ=-12)	Σ3 (γ=-7,4)	Σ4(γ=-3)	Σ5 (γ=0)	Σ6 (γ=3)	Σ7 (γ=7,4)	Σ8 (γ=12)	Σ9 (γ=14)
GEOSTATIC	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DECONFINEMENT A	0	0	1	2	1	1	0	0	0
SUPPORT A1	0	0	2	3	2	1	0	0	0
SUPPORT A2	0	0	2	3	2	1	0	0	0
SUPPORT A3	0	0	2	4	2	1	0	0	0
DECONFINEMENT B	0	1	3	5	5	4	2	0	0
SUPPORT B1	0	1	3	7	7	6	3	1	0
SUPPORT B2	1	1	4	7	8	7	4	1	1
SUPPORT B3	1	1	4	8	8	8	4	1	0
DECONFINEMENT G	0	1	4	8	8	8	4	1	0
SUPPORT G1	0	1	4	7	8	8	4	1	0
SUPPORT G2	0	1	4	7	8	7	4	1	0
SUPPORT G3	0	1	3	7	8	7	4	1	0
DECONFINEMENT D	3	3	4	8	8	8	4	3	3
SUPPORT D1	4	4	4	8	9	8	4	4	4
SUPPORT D2	5	5	4	8	9	8	4	5	5
SUPPORT D3	5	5	4	8	9	8	4	6	5
DECONFINEMENT E	5	6	4	8	9	9	4	6	6
SUPPORT E1	5	6	4	9	9	9	4	6	6
SUPPORT E2	5	6	4	9	9	9	4	6	5
SUPPORT E3	5	6	4	9	9	9	4	6	5



Διάγραμμα 4.10: Κατακόρυφες μετακινήσεις στην οροφή των σήραγγων



Διάγραμμα 4.11: Κατακόρυφες μετακινήσεις στην στέψη



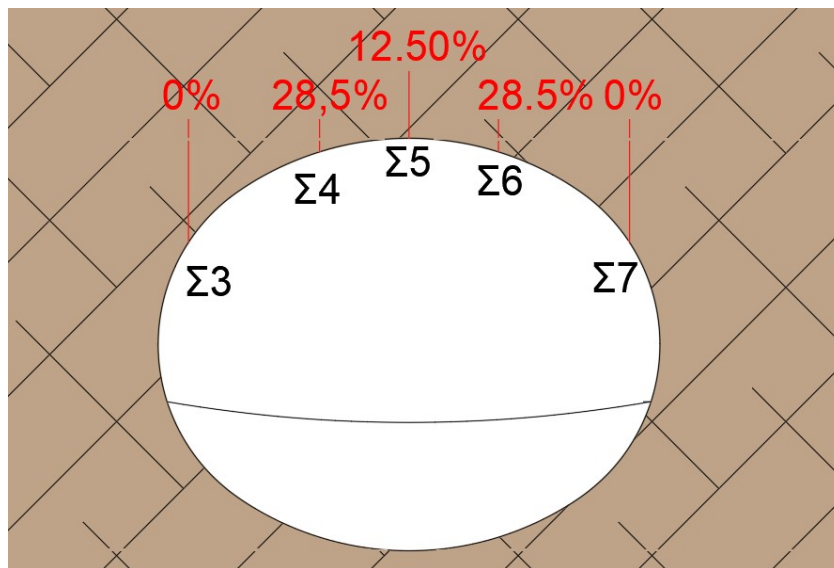
Διάγραμμα 4.12: Επιρροή πλευρικών σηράγγων στις μετακινήσεις της στέψης

Στην οροφή της περιμέτρου της κεντρικής σήραγγας παρατηρείται μια συνεχόμενη αύξηση των κατακόρυφων μετακινήσεων όπως ήταν αναμενόμενο. Μετά την διάνοιξη της Α φάσης της κεντρικής σήραγγας παρατηρείται στο κεντρικό σημείο Σ5 μια κατακόρυφη μετακίνηση της τάξης των 8mm, αμέσως μετά την υποστήριξη, που στη συνέχεια με την ολοκλήρωση της Β φάσης της κεντρικής σήραγγας παραμένει στα 8mm, ενώ κατά την διάνοιξη των πλευρικών σηράγγων φθάνει στην μέγιστη τιμή των 9mm. Επομένως το μεγαλύτερο ποσοστό της κατακόρυφης μετακίνησης στην στέψη εμφανίζεται κατά την εκσκαφή της άνω ημιδιατομής, σε ποσοστό 88,88%. Αλλά οι επιρροή των πλευρικών σηράγγων είναι σημαντική με ποσοστό αύξησης της καθίζησης στο κεντρικό σημείο Σ5, 12.50% μετά την Β φάση.

Τα σημεία Σ4 και Σ6 που βρίσκονται σε απόσταση  $y=\pm 3$  μέτρων από τον κατακόρυφο άξονα της σήραγγας παρατηρείται πως μετά την διάνοιξη των πλευρικών σηράγγων οι μετακινήσεις τους αυξάνονται από 7mm σε 9mm με αύξηση της τάξης του 28,57%.

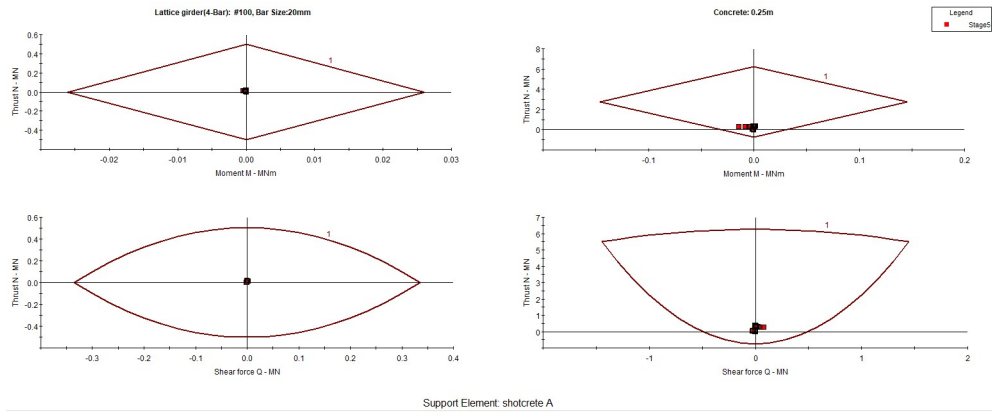
Στα σημεία Σ3 και Σ7 σε απόσταση  $y=\pm 7.4m$  από τον άξονα, δεν παρατηρείται επιρροή από την διάνοιξη των πλευρικών σηράγγων. Η μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση 4mm, παρατηρείται μετά την διάνοιξη την άνω ημιδιατομής της κεντρικής σήραγγας και παραμένει σε αυτή την τιμή και μετά την διάνοιξη των πλευρικών.

Τα σημεία Σ1, Σ2, Σ8, Σ9 στις πλευρικές σήραγγες παρατηρείται ότι μένουν ανεπηρέαστα όπως είναι αναμενόμενο κατά την εκσκαφή της κεντρικής σήραγγας και στην συνέχεια με την διάνοιξη των πλευρικών σηράγγων δημιουργούνται μετακινήσεις στις οροφές τους της τάξης των 5mm πλευρικά και 6mm στους κεντρικούς άξονες.

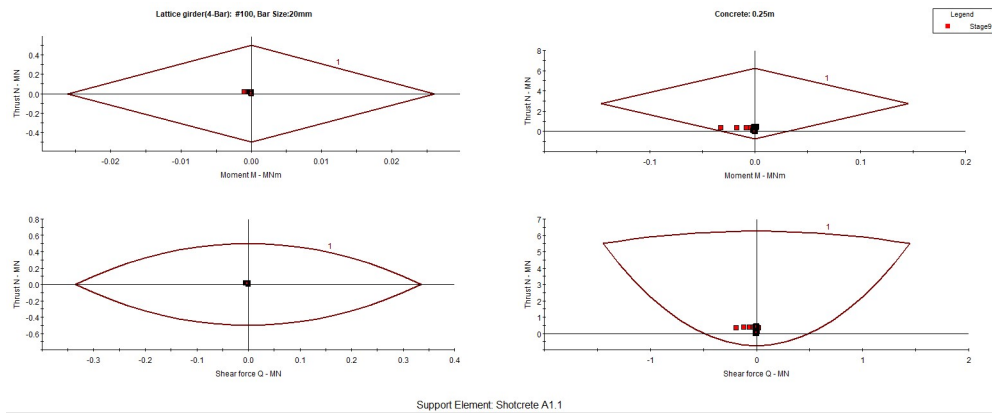


Σχέδιο4.3: Ποσοστά αύξησης των κατακόρυφων μετακινήσεων στην στέψη λόγω πλευρικών σηράγγων

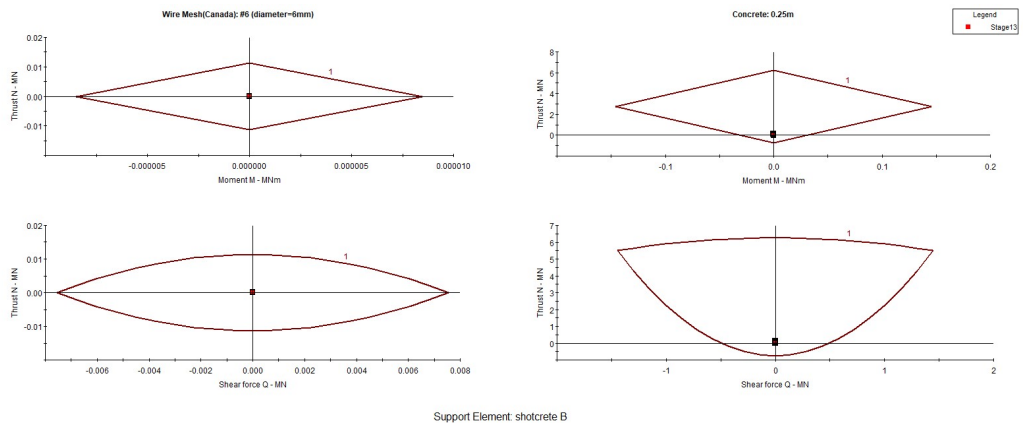
## Διαγράμματα αλληλεπίδρασης για την προσωρινή υποστήριξη:



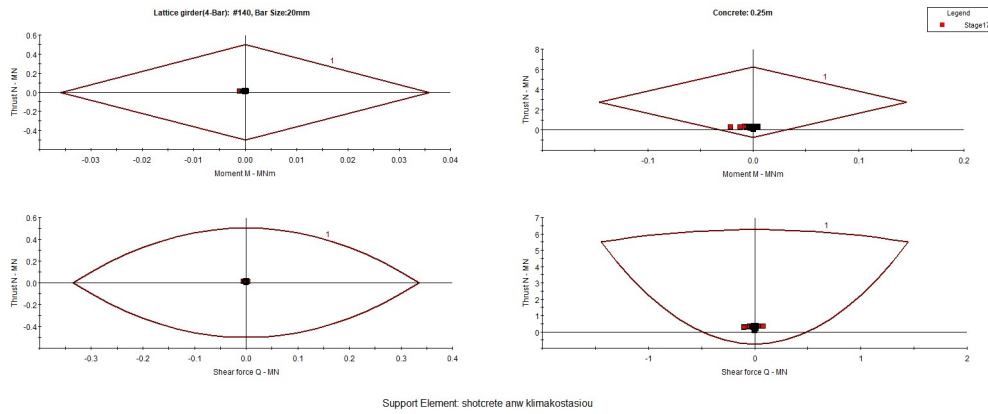
Διάγραμμα 4.13: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης N & M, φάση A1



Διάγραμμα 4.14: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης N & M, φάση A2

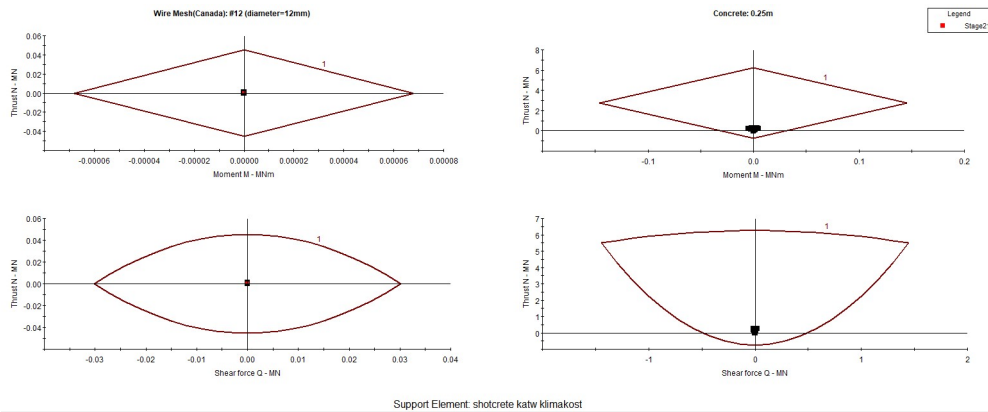


Διάγραμμα 4.15: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης N & M, φάση B



Support Element: shotcrete anw klimakostasiou

*Διάγραμμα 4.16: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης N & M, φάση A πλευρικών σηράγγων*



Support Element: shotcrete katw klimakost

*Διάγραμμα 4.17: Διαγράμματα αλληλεπίδρασης N & M, φάση B πλευρικών*

Από τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης παρατηρείται ότι για τις αξονικές δυνάμεις και τις ροπές που παρέλαβε η προσωρινή υποστήριξη σε όλες τις φάσεις διάνοιξης των σηράγγων, δεν έχουν υπερβεί σε καμία από τις φάσεις τις αντοχές της υποστήριξης, με συντελεστή ασφαλείας  $SF=1$ .



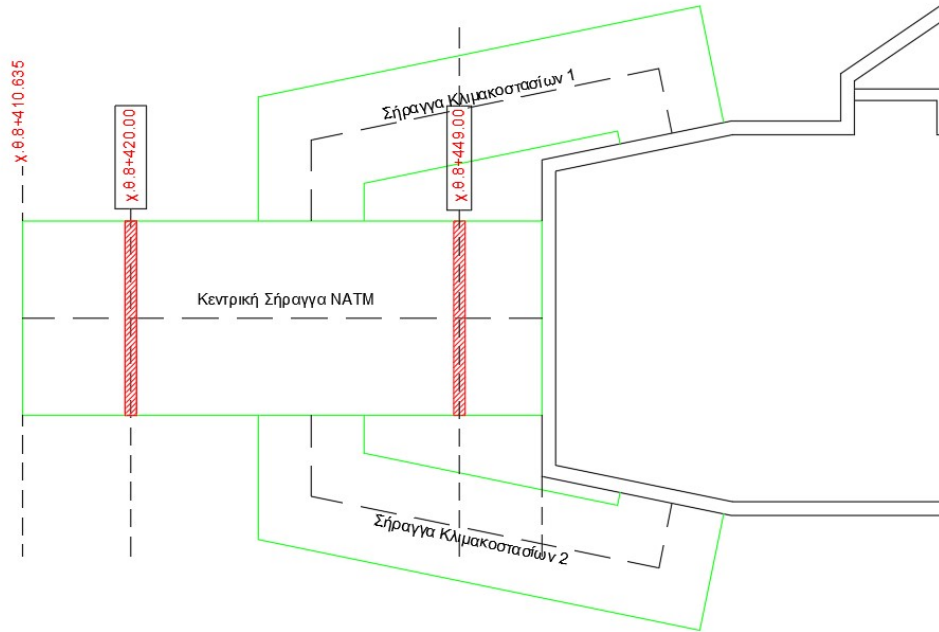
## 5. Σύγκριση προσομοιώματος - μετρήσεων πεδίου

Κατά την διάρκεια της διάνοιξης της κεντρικής σήραγγας NATM και των πλευρικών σηράγγων κλιμακοστασίου του σταθμού μετρό Δημοτικό Θέατρο Πειραιά, έγιναν μετρήσεις μετακινήσεων τόσο στην επιφάνεια πάνω από τις σήραγγες, όσο και στην περίμετρο των σηράγγων μετά την τοποθέτηση της προσωρινής υποστήριξης. Στην επιφάνεια έγιναν χωροσταθμικές μετρήσεις κατακόρυφων μετακινήσεων διότι οι ανοχές σε μετακινήσεις στην επιφάνεια ήταν μικρές λόγω του πυκνού δομημένου περιβάλλοντος πέριξ του σταθμού.

Είναι απαραίτητο να τονιστεί πως στις μετρήσεις στην περίμετρο της σήραγγας εφόσον έγιναν μετά την τοποθέτηση της προσωρινής υποστήριξης, ένα ποσοστό των μετακινήσεων δεν περιλαμβάνεται στις μετρήσεις. Είναι η μετακίνηση κατά την αποτόνωση της σήραγγας το διάστημα ανάμεσα στην εκσκαφή και την τοποθέτηση.

Επίσης πρέπει να επισημανθεί πως οι φάσεις του προσομοιώματος είναι διαδοχικές και αμέσως μετά την διάνοιξη της κεντρικής σήραγγας NATM διανοίγονται οι πλευρικές σε 2 φάσεις. Στην πραγματικότητα κατά την κατασκευή του έργου η διάνοιξη των πλευρικών σηράγγων έγινε έπειτα από μεγάλο χρονικό διάστημα μετά την διάνοιξη της κεντρικής (περίπου ένα έτος) και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μια διαφορετική συμπεριφορά του γεωυλικού, που ένα έτος μετά θα έχει ισορροπήσει από την αναδιάταξη που δημιουργείται μετά την εκσκαφή της κεντρικής σήραγγας.

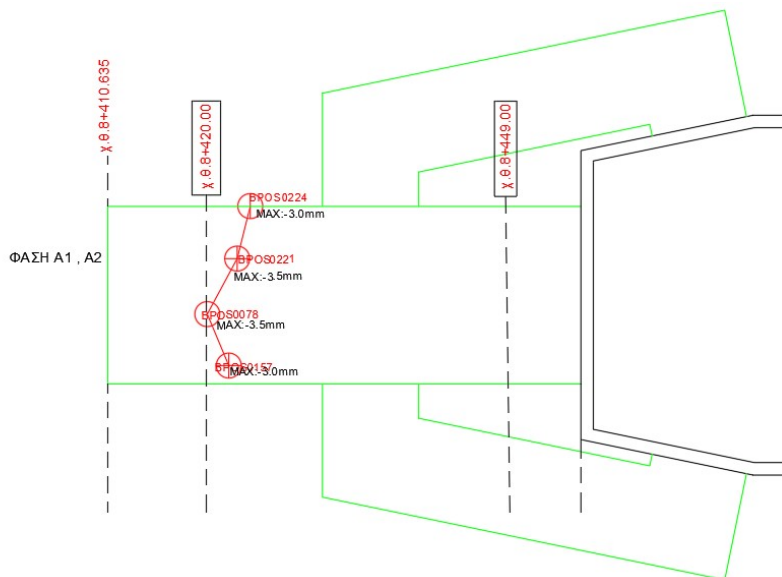
Η σύγκριση των μετρήσεων γίνεται σε 2 διατομές της σήραγγας, στην χ.θ.8+420,00 και στην χ.θ.8+449,00 (σχέδιο 5.1). Στην διατομή χ.θ.+420,00 έχουν ληφθεί μετρήσεις μέχρι και την διάνοιξη της κεντρικής σήραγγας, χωρίς την επιρροή των πλευρικών σηράγγων, διότι βρίσκεται σε χιλιομετρική θέση που δεν έχει πλευρικά σήραγγες. Για την χ.θ.8+449,00 λαμβάνονται υπόψιν όλες οι μετρήσεις συμπεριλαμβάνοντας αυτές που δημιουργούνται κατά τις φάσεις εκσκαφής των πλευρικών σηράγγων.



Σχέδιο 5.1: χ.θ. εγκάρσιων διατομών σήραγγας διατομών

Κατακόρυφες Επιφανειακές μετακινήσεις χ.θ.8+420,00

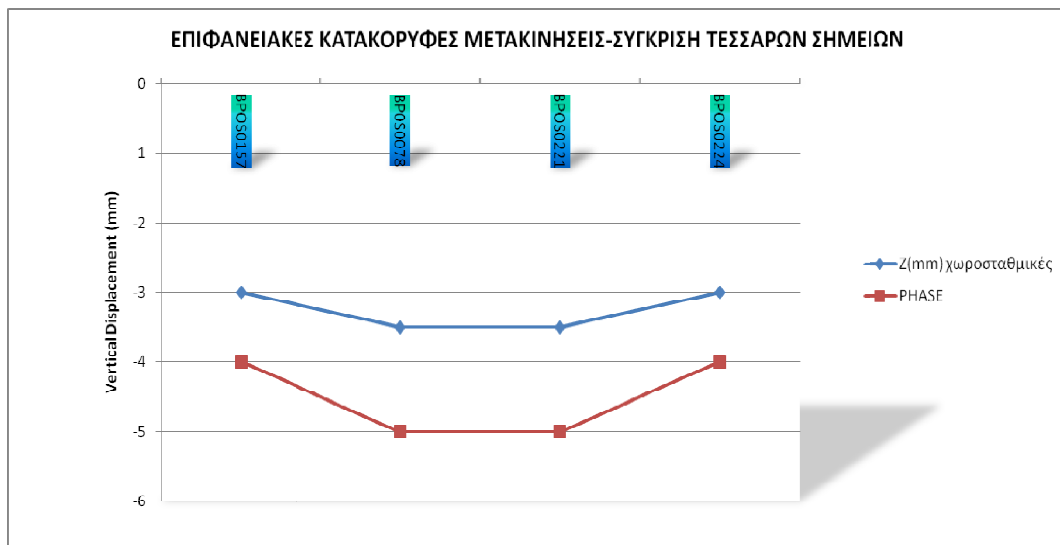
ΦΑΣΗ: Διάνοιξη άνω ημιδιατομής κεντρικής σήραγγας.



Σχέδιο 5.2: Θέσεις σημείων χωροσταθμικών μετρήσεων

Πίνακας 5.1: Κατακόρυφες Μετακινήσεις μετά την φάση Α

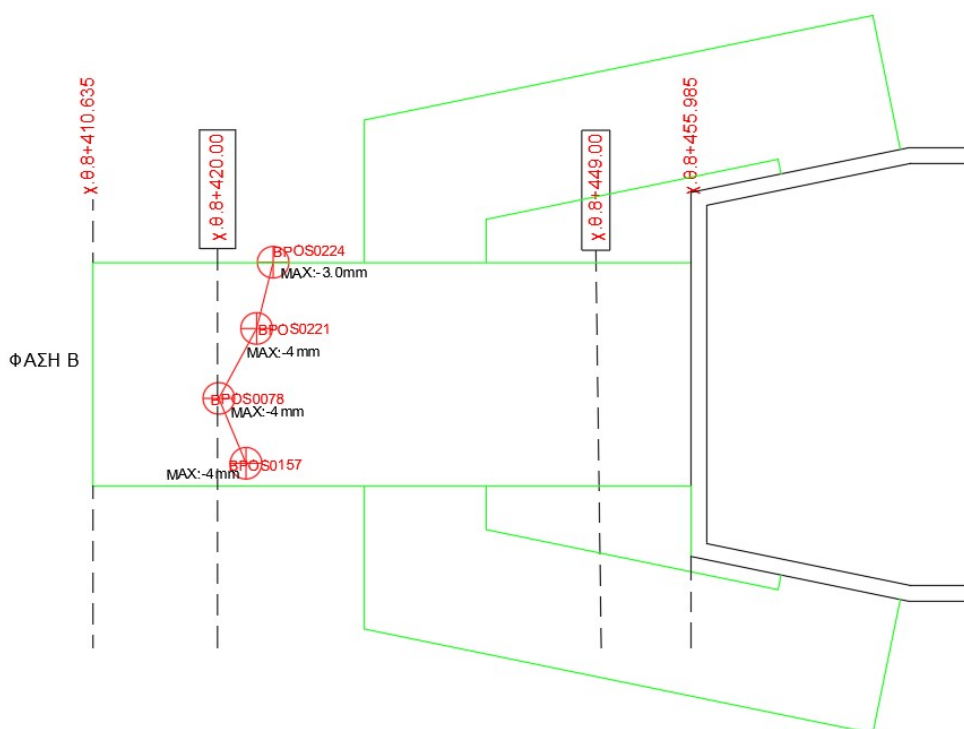
Χ. Θ. 8+ 420,00			
Α1 & Α2 ΦΑΣΗ			Α1 & Α2 ΦΑΣΗ
ΣΗΜΕΙΑ	Z(mm) RS.2 (max)		Z(mm) χωροσταθμικά (max)
BPOS0157	-4		-3
BPOS0078	-5		-3,5
BPOS0221	-5		-3,5
BPOS0224	-4		-3



Διάγραμμα 5.1: Σύγκριση κατακόρυφων μετρήσεων επιφάνειας – Φάση Α

Από την σύγκριση των επιφανειακών μετακινήσεων που μετρήθηκαν στο πεδίο με αυτές που εξήχθησαν από τον κώδικα, παρατηρείται ότι έχουν παρόμοια καμπύλη, με το προσομοίωμα να δίνει ελαφρώς μεγαλύτερες μετακινήσεις της τάξεως του 1.5mm στα κεντρικά σημεία και του 1mm στα πλευρικά.

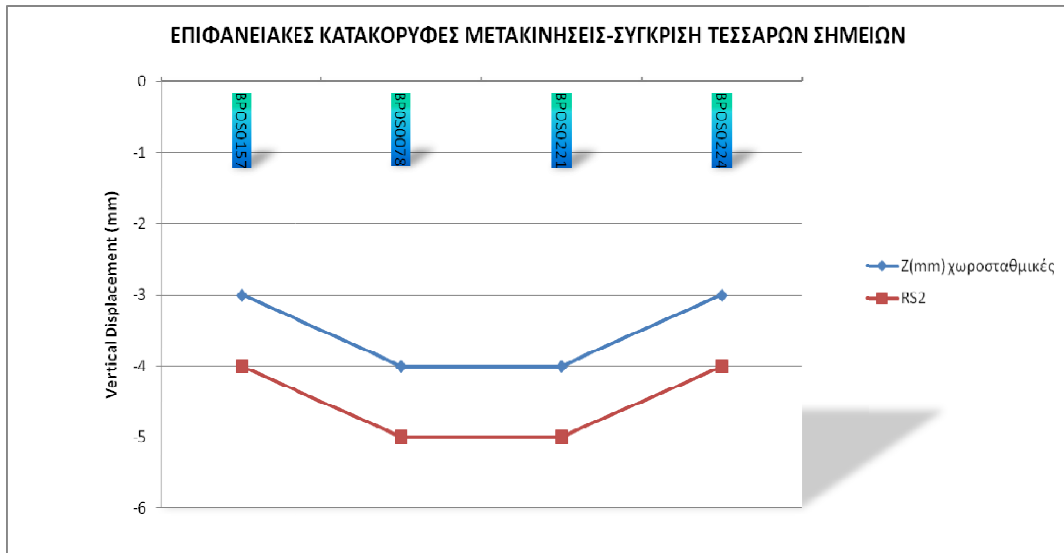
ΦΑΣΗ: Διάνοιξη κάτω ημιδιατομής κεντρικής σήραγγας.



Σχέδιο 5.3: Χωροσταθμικές μετρήσεις – Φάση Β

Πίνακας 5.2. Κατακόρυφες επιφανειακές μετακινήσεις φάσης Β

ΣΗΜΕΙΑ	Χ. Θ. 8+ 420,00	
	Β ΦΑΣΗ	Β ΦΑΣΗ
	Z(mm) RS.2 (max)	Z(mm) χωροσταθμικά (max)
BPOS0157	-4	-3
BPOS0078	-5	-4
BPOS0221	-5	-4
BPOS0224	-4	-3

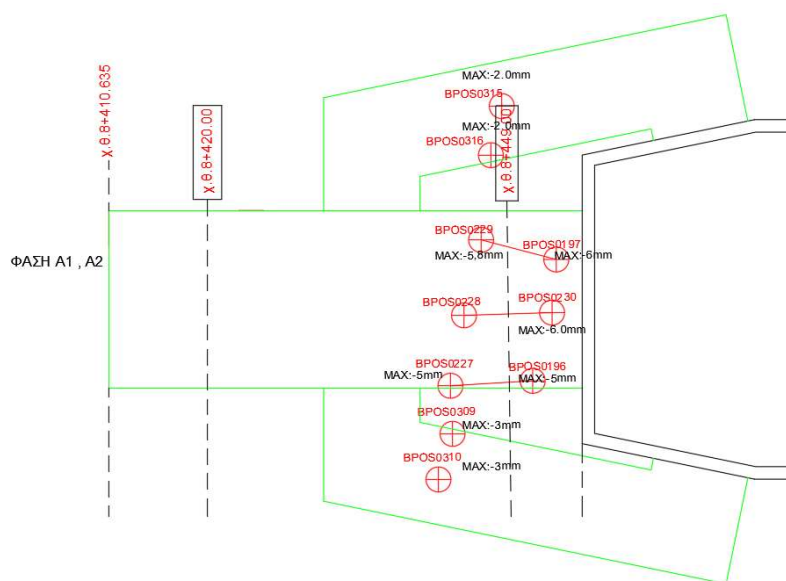


Διάγραμμα 5.2: Σύγκριση κατακόρυφων επιφανειακών μετακινήσεων Φάση Β

Μετά την διάνοιξη και της κάτω ημιδιατομής της κεντρικής σήραγγας NATM παρατηρήθηκε ότι οι καμπύλες των κατακόρυφων μετακινήσεων έχουν παρόμοια μορφή με απόκλιση 1mm σε κάθε σημείο, με τον κώδικα να δίνει λίγο πιο συντηρητικά αποτελέσματα σε σχέση με το πεδίο, αλλά με τις καμπύλες να συγκλίνουν στα κεντρικά σημεία σε σχέση την Α φάση.

Κατακόρυφες επιφανειακές μετακινήσεις Χ.Θ 8+449,00

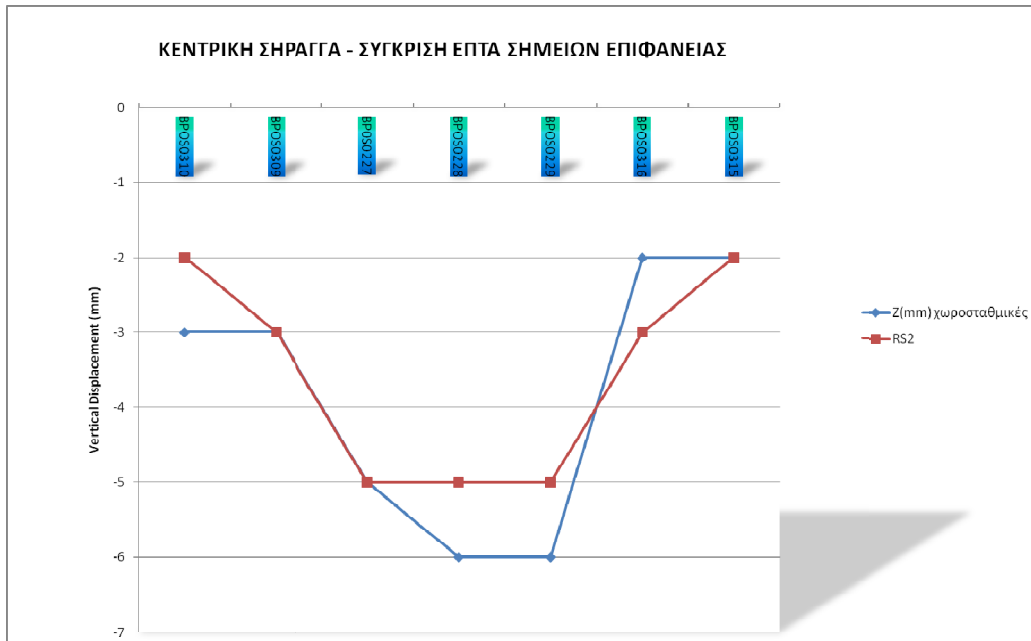
ΦΑΣΗ: Διάνοιξη άνω ημιδιατομής κεντρικής σήραγγας.



Σχέδιο 5.4: Κατακόρυφες επιφανειακές μετακινήσεις – Φάση Α

Πίνακας 5.3: Κατακόρυφες επιφανειακές μετακινήσεις – Φάση Α

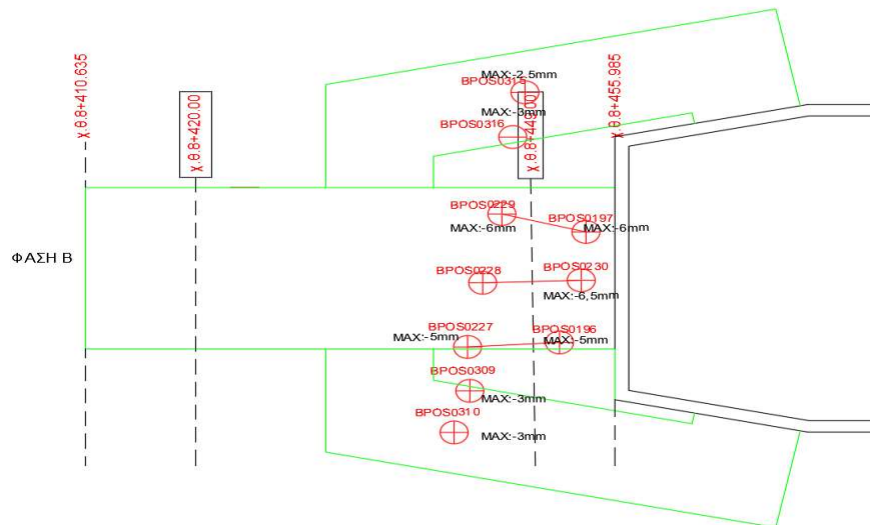
ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΤΗΣ ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ Α1 & Α2 ΦΑΣΗ		
ΣΗΜΕΙΟ	Z(mm) RS2.8 (max)	Z(mm) χωροσταθμικά (max)
BPOS0310	-2	-3
BPOS0309	-3	-3
BPOS0227	-5	-5
BPOS0228	-5	-6
BPOS0229	-5	-6
BPOS0316	-3	-2
BPOS0315	-2	-2



Διάγραμμα 5.3: Σύγκριση επιφανειακών μετακινήσεων – Φάση Α.

Από την σύγκριση των επτά σημείων επιφανείας παρατηρήθηκε πως οι καμπύλες έχουν παρόμοια μορφή, με την καμπύλη του κώδικα να είναι απόλυτα συμμετρική και να ταυτίζεται στα δυο σημεία από τα επτά. Οι αποκλίσεις στα υπόλοιπα σημεία είναι της τάξεως του 1mm.

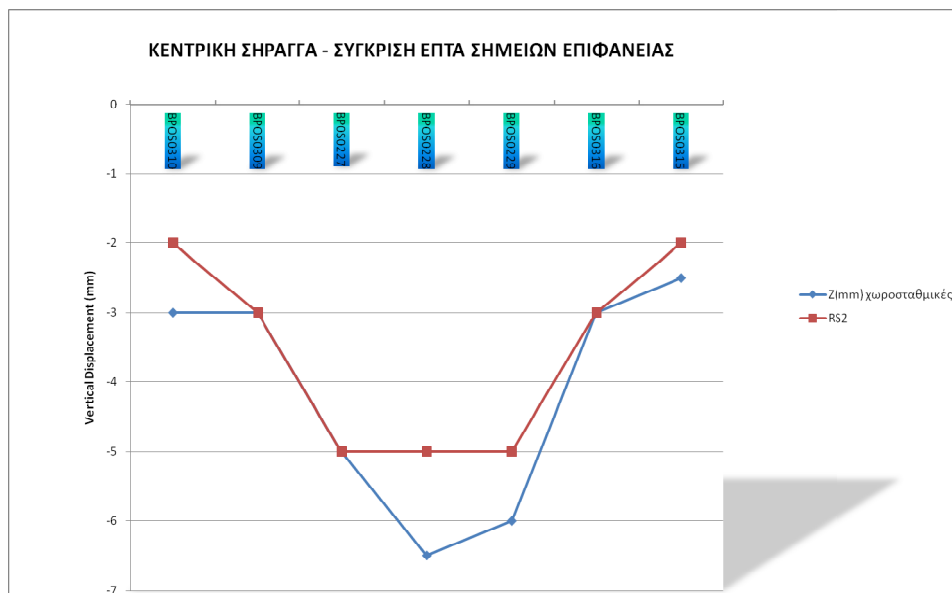
ΦΑΣΗ: Διάνοιξη κάτω ημιδιατομής κεντρικής σήραγγας.



Σχέδιο 5.5: Κατακόρυφες επιφανειακές μετακινήσεις – Φάση Β

Πίνακας 5.4: Κατακόρυφες επιφανειακές μετακινήσεις – Φάση Β

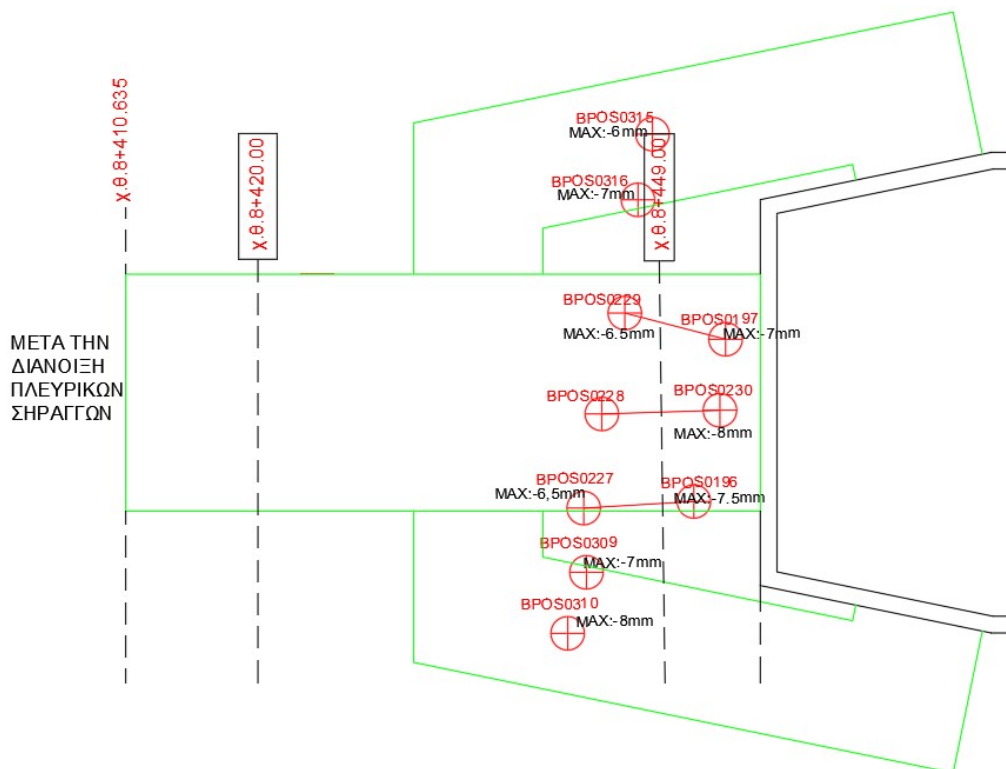
ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΤΗΣ ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ Β ΦΑΣΗ		
ΣΗΜΕΙΟ	Z(mm) RS2.8 (max)	Z(mm) χωροσταθμικά (max)
BPOS0310	-2	-3
BPOS0309	-3	-3
BPOS0227	-5	-5
BPOS0228	-5	-6,5
BPOS0229	-5	-6
BPOS0316	-3	-3
BPOS0315	-2	-2,5



Διάγραμμα 5.4: Σύγκριση επιφανειακών μετακινήσεων – Φάση Β.

Μετά από την διάνοιξη της Β φάσης της κάτω ημιδιατομής οι καμπύλες συνεχίζουν να έχουν παρόμοια μορφή με μια απόκλιση πλέον στο 1.5mm του κεντρικού σημείου από 1mm διαφορά στην προηγούμενη φάση. Με τον κώδικα να δίνει μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση σε αυτή την φάση 5mm και η μέτρηση χωροσταθμικά 6.5mm. Τα υπόλοιπα σημεία έχουν αποκλίσεις μέγιστες 1mm και τρία από τα σημεία ταυτίζονται.

ΦΑΣΗ: Διάνοιξη πλευρικών σηράγγων κλιμακοστασίων.

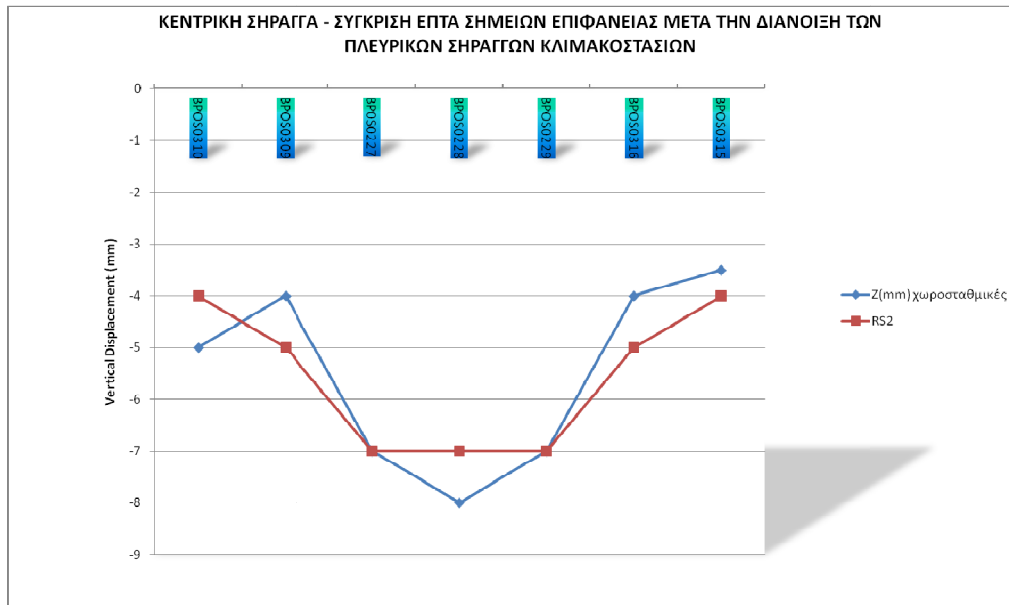


Σχέδιο 5.5: Κατακόρυφες επιφανειακές μετακινήσεις μετά την διάνοιξη πλευρικών σηράγγων.



Πίνακας 5.5: Κατακόρυφες επιφανειακές μετακινήσεις μετά την διάνοιξη πλευρικών σηράγγων

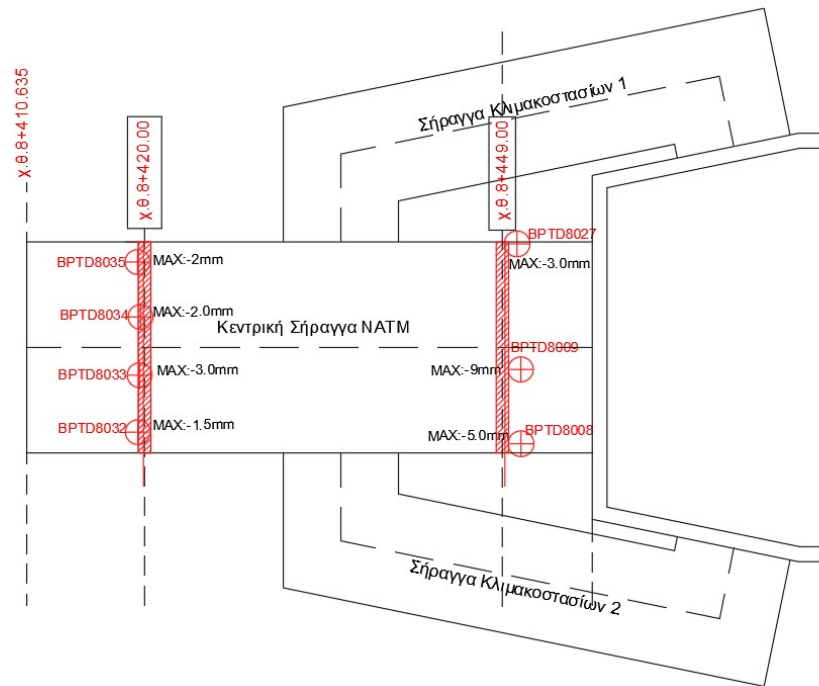
ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΤΩΝ ΠΛΕΥΡΙΚΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ		
ΣΗΜΕΙΟ	Z(mm) RS2.8 (max)	Z(mm) χωροσταθμικά (max)
BPOS0310	-4	-5
BPOS0309	-5	-4
BPOS0227	-7	-7
BPOS0228	-7	-8
BPOS0229	-7	-7
BPOS0316	-5	-4
BPOS0315	-4	-3,5



Διάγραμμα 5.5: Σύγκριση κατακόρυφων μετακινήσεων μετά την διάνοιξη των πλευρικών σηράγγων.

Οι καμπύλες από τον κώδικα και από τις χωροσταθμικές μετρήσεις ταυτίζονται πλήρως στα δυο από τα τρία κεντρικά σημεία εκατέρωθεν του άξονα πάνω από την κεντρική σήραγγα. Οι καμπύλες έχουν παρόμοια μορφή. Για την καταγραφή των τεσσάρων σημείων πάνω από τις πλευρικές σήραγγες αφαιρέθηκαν οι μετρήσεις μέχρι και την διάνοιξη της Β φάσης της κεντρικής διότι όπως αναφέρθηκε πιο πάνω οι δύο σήραγγες κλιμακοστασίων διανοίχθηκαν ένα έτος μετά την κεντρική σήραγγα και κατά την διάνοιξη των δυο σηράγγων το εντατικό πεδίο είχε ισορροπήσει. Όπως παρατηρείται και από το σχέδιο 5.5 οι μετρήσεις στα σημεία αυτά είναι δυσανάλογα μεγάλες σε σχέση με του κώδικα, όπου έγινε επίλυση σε διαδοχικές φάσεις, με την επίδραση των καθιζήσεων από την κεντρική σήραγγα και των πλευρικών να ενεργούν σε κοντινό χρονικό διάστημα και να αλληλεπιδρούν.

## Κατακόρυφες μετακινήσεις στην στέγη Χ.Θ 8+449,00



*Σχέδιο 5.6: Μετρήσεις μετακινήσεων στην στέγη με οπτικούς στόχους.*

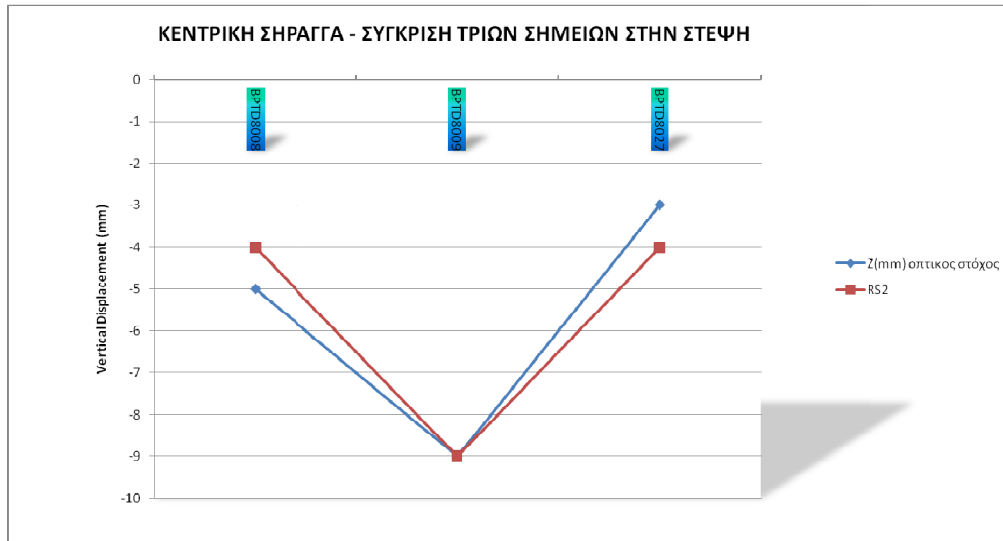
Για τις μετακινήσεις στην στέγη, η μόνη διατομή που ήταν δυνατόν να αντληθούν αξιόπιστες μετρήσεις ήταν στην χ.θ. 8+449,00, όπου η τοποθέτηση των οπτικών στόχων έγινε από την διάνοιξη της Α φάσης. Η τοποθέτηση των οπτικών στόχων έγινε μετά την τοποθέτηση της άμεσης υποστήριξης και αυτό είχε σαν αποτέλεσμα η σύγκλιση μέχρι την τοποθέτηση της προσωρινής υποστήριξης να μην έχει καταγραφεί από τα όργανα μέτρησης.

Για την διατομή της χ.θ. 8+420,00 οι μετρήσεις στην περίμετρο έγιναν με την τοποθέτηση των οπτικών στόχων μετά την διάνοιξη της Α φάσης και από την αρχή της Β. Επομένως το μεγαλύτερο ποσοστό των κατακόρυφων μετακινήσεων στη στέγη είχε ήδη ολοκληρωθεί και παρατηρείται από το σχέδιο 5.6 ότι οι κατακόρυφες μετακινήσεις είναι πολύ μικρές, στα όρια σφάλματος ενός οργάνου στόχευσης.

Για τη σύγκριση με τα αποτελέσματα του κώδικα αξιοποιήθηκαν τα τρία σημεία της διατομής στην χ.θ. 8+449,00 με τα εξής αποτελέσματα:

Πίνακας 5.6: Κατακόρυφες μετακινήσεις στην στέψη

ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΣΗΡΑΓΓΑ ΣΤΑΘΜΟΥ-ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ 3D & ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΩΔΙΚΑ - Χ.Θ. 8+449,00		
ΣΗΜΕΙΟ	Z(mm) R2.8 (max)	Z(mm) ΟΠΤΙΚΟΣ ΣΤΟΧΟΣ (max)
BPTD8008	-4	-5
BPTD8009	-9	-9
BPTD8027	-4	-3



Διάγραμμα 5.6: Κατακόρυφες μετακινήσεις τριών σημείων στην οροφή της σήραγγας

Με την σύγκριση των τριών σημείων από τις μετρήσεις στην σήραγγα και από τα αποτελέσματα του κώδικα, παρατηρείται ότι οι καμπύλες έχουν παρόμοια κατανομή. Το κεντρικό σημείο ταυτίζεται πλήρως, με μέγιστη καθίζηση της τάξης των 9mm ενώ στα πλευρικά σημεία παρατηρείται μέγιστη διαφορά του 1mm.

## 6. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε η μέθοδος διάνοιξης και προσωρινής υποστήριξης της σήραγγας NATM (προέκταση σταθμού), του σταθμού Δημοτικό Θέατρο Πειραιά της γραμμής 3 και με ιδιαίτερη έμφαση στις κατακόρυφες μετακινήσεις κυρίως στην επιφάνεια αλλά και στην οροφή του δακτυλίου της σήραγγας. Εξετάζεται ακόμη πως επηρεάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις από την διάνοιξη των πλευρικών σηράγγων.

Με την χρήση εμπειρικών μεθόδων έγινε η πρώτη εκτίμηση για τις καθιζήσεις στην επιφάνεια. Η κατασκευή μιας σήραγγας μεγάλης διαμέτρου  $D=16,80\text{m}$  όπως αυτή, σε συνδυασμό με τις απαιτήσεις σε ελάχιστες καθιζήσεις στην επιφάνεια, είναι απαραίτητο να υλοποιηθεί με την μέθοδο διάνοιξης σε φάσεις. Ένα από τα μειονεκτήματα των εμπειρικών μεθόδων είναι ότι προϋποθέτουν παραδοχές, όπως το κυκλικό σχήμα της σήραγγας και η ολομέτωπη εκσκαφή. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αναζήτηση ισοδύναμων διατομών για την προσέγγιση μιας εκσκαφής σε φάσεις όπως έγινε στην NATM του σταθμού Δημοτικού Θεάτρου. Η επιλογή έγινε με τον ισοδύναμο όγκο εκσκαφής της A1 φάσης της διάνοιξης. Από τα αποτελέσματα με τις διάφορες μεθόδους υπολογισμού του εύρους καμπυλότητας  $i$ , παρατηρήθηκε πως για ένα πολύ στιφρό εδαφικό υλικό όπως αυτό που χρησιμοποιήθηκε στην μελέτη, τα αποτελέσματα των εμπειρικών μεθόδων είναι πιο συντηρητικά από τις πραγματικές μετρήσεις, δίνοντας ένα εύρος μέγιστων μετακινήσεων  $S_{\max}(9-21\text{mm})$ . Η χαμηλότερη τιμή (9mm) αυτού του εύρους, η οποία υπολογίστηκε με την μέθοδο O'Reilly and New με την χρήση  $k=0.7$  κατά Burland(2001) προσεγγίζει τις πραγματικές (5-7mm) αλλά και τα αποτελέσματα του κώδικα (7mm). Είναι φανερό πως τα μεγέθη όπως το ύψος των υπερκειμένων  $H$  και η διάμετρος  $D$  που δρουν πολλαπλασιαστικά στους εμπειρικούς τύπους όταν έχουν μεγάλα μεγέθη όπως εδώ, μπορεί να δώσουν δυσανάλογα μεγάλες καθιζήσεις επιφανείας για στιφρές αργίλους που στην πραγματικότητα δεν παρουσιάζουν έντονες επιφανειακές κατακόρυφες μετακινήσεις. Εξάλλου το βάθος  $H$  με την αύξηση του, αυξάνει σε μεγάλο ποσοστό τις επιφανειακές καθιζήσεις, όπως παρατηρήθηκε από τις καμπύλες κατά Peck για

διάφορα βάθη. Όμως στην πραγματικότητα όπως παρατηρήθηκε από τις αναλυτικές μετρήσεις, σε μεγαλύτερη βάθη του άξονα της σήραγγας μπορεί να αρχίζει να εξασθενεί η επιρροή της αναδιάταξης του χαμένου όγκου μετά την διάνοιξη. Επίσης για πολύ στιφρές αργίλους ένα  $k$  μεγαλύτερο του 0,7 που έχει προταθεί σαν ανώτατο όριο, ίσως θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να προσεγγίσουν οι εμπειρικές μέθοδοι διανοίξεις σηράγγων που γίνονται με την μέθοδο πολλών φάσεων εκσκαφής και με ισχυρή άμεση υποστήριξη.

Όσον αφορά τις αριθμητικές μεθόδους κατασκευάστηκε διδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα με τον κώδικα RS2 για την διατομή της κεντρικής σήραγγας διαμέτρου 16,80 και των πλευρικών σηράγγων κλιμακοστασίων διαμέτρων 8m και τοποθετήθηκε άμεση υποστήριξη παρόμοια με αυτή που έχει εφαρμοστεί στην κατασκευή. Βάσει των αποτελεσμάτων του προσομοιώματος, η άμεση υποστήριξη που χρησιμοποιήθηκε ανταποκρίθηκε στις απαιτήσεις του έργου για μικρές καθιζήσεις στην επιφάνεια. Η μέγιστη επιφανειακή καθίζηση που προέκυψε είναι 7mm στον κατακόρυφο άξονα της σήραγγας. Από τις συγκρίσεις που έγιναν σε 2 διατομές της σήραγγας υπήρξαν παρόμοια διαγράμματα καθιζήσεων στην επιφάνεια με μικρές αποκλίσεις σε κάποια σημεία στα όρια του λάθους του οργάνου 1-2mm.

Στην  $\chi.\theta$  8+422,00 της σήραγγας συγκρίθηκαν 4 σημεία επιφανείας στην Α και Β φάση της διάνοιξης. Από την σύγκριση προέκυψε μια απόκλιση 1.5mm στην Α φάση στα κεντρικά σημεία που με την ολοκλήρωση της Β φάσης συνέκλινε με αυτές των μετρήσεων στο 1mm. Οι καμπύλες που προέκυψαν παρουσίασαν παρόμοια μορφή.

Στην  $\chi.\theta$  8+449,00 της σήραγγας συγκρίθηκαν 7 σημεία επιφανείας για την μέτρηση καθιζήσεων επιφανείας με τα τρία κεντρικά να βρίσκονται πάνω από την κεντρική σήραγγα και τα άλλα τέσσερα πάνω από τις πλευρικές σήραγγες. Από τις καμπύλες των μετρήσεων και του κώδικα στην Α φάση προέκυψε ότι έχουν παρόμοια κατανομή και ότι ταυτίζονται στα δυο σημεία από τα επτά, ενώ στο κεντρικό σημείο στο άξονα της σήραγγας παρατηρήθηκε απόκλιση ενός 1mm, με την μετακίνηση του κώδικα να είναι της τάξης των 5mm και των μετρήσεων 6mm. Κατά την σύγκριση των σημείων στην Β φάση με την διάνοιξη της κάτω ημιδιατομής οι καμπύλες συνεχίζουν να έχουν παρόμοια κατανομή, με μια απόκλιση πλέον στο 1.5mm του κεντρικού σημείου από 1mm στην προηγούμενη φάση. Από τον κώδικα προέκυψε κατακόρυφη

μετατόπιση σε αυτή την φάση 5mm και η μέτρηση χωροσταθμικά είναι 6.5mm. Τα υπόλοιπα σημεία έχουν μέγιστες αποκλίσεις της τάξης του 1mm και σε δυο από τα σημεία οι καμπύλες ταυτίζονται. Μετά από την διάνοιξη των πλευρικών σηράγγων, συγκρίνοντας τα σημεία πάνω από την κεντρική σήραγγα προκύπτει ότι οι επιφανειακές καθιζήσεις έχουν αποκλίσεις μέγιστες 1mm στο ένα σημείο και τρία από τα σημεία ταυτίζονται. Για την καταγραφή των τεσσάρων σημείων πάνω από τις πλευρικές σήραγγες αφαιρέθηκαν οι μετρήσεις μέχρι και την διάνοιξη της Β φάσης της κεντρικής διότι οι δύο σήραγγες κλιμακοστασίων διανοίχθηκαν ένα έτος μετά την κεντρική σήραγγα και κατά την διάνοιξη των δυο σηράγγων το εντατικό πεδίο είχε ισορροπήσει. Οι μετρήσεις στα σημεία αυτά είναι δυσανάλογα μεγάλες σε σχέση με του κώδικα, διότι στον κώδικα έγινε επίλυση σε διαδοχικές φάσεις, με την επίδραση των καθιζήσεων από την κεντρική σήραγγα και των πλευρικών να ενεργούν σε μικρό χρονικό διάστημα και να αλληλεπιδρούν. Συνολικά τα αποτελέσματα του προσομοιώματος φαίνεται να ταιριάζουν με αυτά των μετρήσεων στο πεδίο.

Από τα αποτελέσματα του προσομοιώματος προέκυψαν συμπεράσματα για την επιρροή των πλευρικών σηράγγων μετά την διάνοιξη τους στις επιφανειακές κατακόρυφες μετακινήσεις σε 9 σημεία επιφάνειας, καθώς και η επιρροή τους σε 4 σημεία της στέψης της σήραγγας. Παρατηρήθηκε αύξηση σε μεγάλο ποσοστό των καθιζήσεων στην επιφάνεια μετά την διάνοιξη των πλευρικών σηράγγων. Συγκεκριμένα, στα ακραία σημεία που βρίσκονται πάνω από τις πλευρικές σήραγγες, η αύξηση των καθιζήσεων κυμαίνεται από 75% έως 60%, ενώ στα σημεία πάνω από την κεντρική σήραγγα, η αύξηση των καθιζήσεων κυμαίνεται από 28,57% στο κεντρικό σημείο του κατακόρυφου άξονα της NATM μέχρι και 33,3% σε απόσταση R από τον άξονα.

Από τα αποτελέσματα του κώδικα για τις κατακόρυφες μετακινήσεις στην στέψη, προκύπτει ότι οι μετακινήσεις συνεχίζουν να αυξάνονται κατά την διάνοιξη των πλευρικών σηράγγων. Τα ποσοστά αύξησης των κατακόρυφων μετακινήσεων είναι 12,50% στο κεντρικό σημείο, 28,57% σε απόσταση  $y=\pm 3m$  από τον κεντρικό άξονα, ενώ για τα σημεία στα άκρα της οροφής  $y=\pm R$  παρατηρείται πως δεν υπάρχει μεταβολή των κατακόρυφων μετακινήσεων.

Συνολικά προκύπτει πως υπάρχει μεγάλη επιρροή στις κατακόρυφες μετακινήσεις όταν διανοίγονται πλευρικές σήραγγες, τόσο στην επιφάνεια, όσο και στην οροφή της κεντρικής σήραγγας και πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν στην ανάλυση και διαστασιολόγηση των μέτρων υποστήριξης.

## Βιβλιογραφία

1. Αττικό Μετρό Α.Ε. Στοιχεία Μελέτης: «Σταθμός Δημοτικό Θέατρο – Διάνοιξη και προσωρινή υποστήριξη υπογείων έργων». Σχέδια μελέτης: 3SP2CW395C011B, 3SP2CW395C321A, 3SP2CW395C322A, SP2CW395C411A. Διαγράμματα: (Χωροσταθμικά:slp\_1,slp\_2,slp\_3,slp\_4 χ.θ.8+420,00 και χ.θ.+449,00) , (3d σήραγγας: χ.θ.8+420,00 και χ.θ.+449,00).
2. Σοφιανός, Α.Ι. (2018). « Μέτρα Στήριξης Σηράγγων», Σημειώσεις, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
3. Α. Αναγνωστόπουλος, Ηλίας Μιχάλης (2004) «Αντιστηρίξεων και Καθιζήσεων λόγω εκσκαφών», Σημειώσεις, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
4. Β. Παπαδόπουλος (2017) «Αβαθείς Σήραγγες, Αντιστηρίξεις, Καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους», Σημειώσεις, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
5. Μ. Καββαδάς, (2012) «Σχεδιασμού Υπογείων έργων», Σημειώσεις, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
6. Rocscience.com – Tutorials for RS2.
7. Farshad Kolivand, Reza Rahmamejad (2018). Determination of settlement trough width and optimization of soil behavior parameters based on the design of experiment method. Int. J. Min. & Geo-Eng. (IJMGE), 52-1 (2018) 7-15
8. M. Karakuş & R.J. Fowell (2004) . An insight into the New Austrian Tunnelling Method (NATM). KAYAMEK'2004-VII. Bölgesel Kaya Mekanikği Sempozyumu / ROCKMEC'2004-VIIth Regional Rock Mechanics Symposium, 2004, Sivas, Türkiye.
9. F. Ariznavarreta-Fernández, C. González-Palacio, A. Menéndez-Díaz, C. Ordoñez,(2016) Measurement system with angular encoders for continuous monitoring of tunnel convergence, Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 56,Pages 176-185.