

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

# ΘΕΜΑ: ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ, ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΑΜΑΞΟΣΤΑΣΙΟ ΚΕΡΑΜΙΚΟΥ



ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ: ΤΟΥΜΠΑΝΑΚΗΣ ΛΕΩΝΙΔΑΣ  
ΜΕΝΕΓΗΣ ΑΡΙΣΤΕΙΔΗΣ  
ΕΙΣΗΓΗΤΡΙΑ: Dr. ΒΓΕΝΟΠΟΥΛΟΥ ΕΙΡΗΝΗ

ΠΑΤΡΑ 2011



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Βρισκόμαστε στο τέλος των σπουδών μας στο ΤΕΙ και στα πλαίσια των υποχρεώσεων μας είναι η παρούσα πτυχιακή εργασία. Η συγκεκριμένη εργασία η οποία μας πήρε αρκετό χρονικό διάστημα λόγω κάποιων προβλημάτων που παρουσιάστηκαν τελικά διεκπεραιώθηκε εκπληρώνοντας, πιστεύουμε τις προσδοκίες μας.

Στην εργασία μας παρουσιάζεται λεπτομερώς η κατασκευή της σήραγγας στον Κεραμεικό που έγινε για τις ανάγκες του Μετρό των Αθηνών. Η διάνοιξη έγινε με εφαρμογή δυο κλασσικών μεθόδων: στο πρώτο τμήμα εφαρμόστηκε η μέθοδος συμβατικής διάνοιξης (NATM) και στο δεύτερο τμήμα η μέθοδος ανοικτού ορύγματος (Cut and Cover).

Είμαστε ευγνώμονες στην καθηγήτρια κ Βγενοπούλου Ειρήνη, επιβλέπουσα της πτυχιακής εργασίας μας, για την υποστήριξη, την καθοδήγηση και το ευρύ φάσμα γνώσεων της που μας προσέφερε για την ολοκλήρωση της πτυχιακής μας εργασίας. Επίσης ευχαριστούμε την αρχιμηχανικό της Αττικό Μετρό κ Ζαννή Μαρία η οποία μας βοήθησε κατά τις επισκέψεις μας στο εργοτάξιο.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το έργο το οποίο παρουσιάζεται στην παρούσα πτυχιακή διαπραγματεύτηκε την διάνοιξη σήραγγας στο Κεραμεικό. Η σήραγγα κατασκευάστηκε με δυο μεθόδους, το πρώτο τμήμα από χ.θ 0+337 μέχρι 0+475 με την μέθοδο συμβατικής διάνοιξης (NATM) και το δεύτερο τμήμα από χ.θ 0+475 μέχρι 0+585 με την μέθοδο ανοικτού ορύγματος (Cut and Cover). Η διάνοιξη σήραγγας του Κεραμεικού υπάγεται στην Δυτική Επέκταση της γραμμής 3 και θα τοποθετηθεί διπλή σιδηροδρομική τροχιά η οποία διευκολύνει την είσοδο και έξοδο των αμαξοστοιχιών, στο αμαξοστάσιο του Αγίου Σάββα.

Το έργο είναι υπόγειο και βρίσκεται σε βάθος 20-30 μέτρων. Έγιναν οι απαραίτητες γεωτρήσεις για να διαπιστωθεί η μορφολογία του υπεδάφους. Το έδαφος στο οποίο γίνεται το έργο αποτελείται από τον Αθηναϊκό Σχιστόλιθο, ο οποίος συναντάται σε δυο μορφές την υπερκείμενη ουσιαστικά αμεταμόρφωτη Ενότητα Αθηνών και την υποκείμενη ελαφρά μεταμορφωμένη Ενότητα Αλεποβουνίου.

Στο πρώτο τμήμα του έργου που βρίσκεται στη θέση 0+337 μέχρι 0+475 όπως προαναφέραμε εφαρμόζεται η μέθοδος συμβατικής διάνοιξης (NATM). Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στη θεωρία των πλαστικών ζωνών. Κατά την μέθοδο αυτή κατασκευάζεται ο εξωτερικός δακτύλιος της σήραγγας και στη συνέχεια ο εσωτερικός δακτύλιος ο οποίος είναι η οριστική επένδυση της κατασκευής.

Στο δεύτερο τμήμα του έργου που βρίσκεται στη θέση 0+475 μέχρι 0+585 εφαρμόζεται η μέθοδος ανοικτού ορύγματος (Cut and Cover). Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε εδαφικούς σχηματισμούς όταν το έργο είναι σε μικρό βάθος. Κατά την μέθοδο αυτή η κατασκευή γίνεται από κάτω προς τα επάνω και κατασκευάζεται καταρχάς η αντιστήριξη η οποία αποτελείται από διαφραγματικούς τοίχους. Στη συνέχεια γίνεται η εκσκαφή σε όλο το εύρος από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι το βάθος στο οποίο θα εδρασθεί το έργο. Η διατομή της σήραγγας είναι ορθογωνική και κατασκευάζεται από οπλισμένο σκυρόδεμα.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος.....	i
Περίληψη.....	ii
Περιεχόμενα.....	iii

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ

1. Εισαγωγή.....	8
1.1. Γενικά στοιχεία.....	8
1.2. Γενικά στοιχεία έργου.....	10
1.3. Αρχαιολογικά ευρήματα.....	12
1.4. Βασικά χαρακτηριστικά του μετρό.....	16
1.5. Συνοπτική περιγραφή του έργου .....	17

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

2. Γεωλογικά στοιχεία.....	23
2.1. Γεωλογικά στοιχεία ευρύτερης περιοχής.....	23
2.2. Διακρίσεις του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου.....	25
2.3. Γεωλογικά στοιχεία.....	25
2.4. Γεωλογικοί σχηματισμοί ευρύτερης περιοχής μελέτης.....	27
2.5. Υδρολιθολογικές συνθήκες.....	28
2.6. Υδροφόρος ορίζοντας.....	31
2.7. Παράμετροι περιγραφής βραχομάζας.....	33
2.7.1. Αντοχή συμπαγούς πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη.....	33
2.7.2. Δείκτης ποιότητας βραχομάζας RQD .....	34
2.7.3. Συστήματα ταξινόμησης βραχομάζας .....	36
2.7.3.1 Σύστημα ταξινόμησης βραχομάζας RMR. . . . .	36
2.7.4. Σύστημα ταξινόμησης Q των Barton,NGI.....	40
2.7.5 Ταξινόμηση με το σύστημα GSI.....	45

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ

3. Μέθοδοι διάνοιξης τμήματος σήραγγας με την μέθοδο NATM.....	49
3.1. Τμήμα χθ 0+337 – 0+475.....	49

3.2.	Διαστάσεις και γραμμές εκσκαφής.....	50
3.3.	Βασικά στάδια διάνοιξης.....	52

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ

4.	Εξωτερικός δακτύλιος.....	55
4.1.	Μέτρα άμεσης υποστήριξης (M.A.Y).....	55
4.2.	Επιλογή μέτρων άμεσης υποστήριξης.....	56
4.2.1.	Αναλυτική παρουσίαση των M.A.Y που χρησιμοποιήθηκαν .....	56
4.2.2.	Μεταλλικοί δοκοί προπορείας (Forepolling).....	56
4.2.3.	Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.....	59
4.2.4.	Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με χαλύβδινες ίνες (steel fiber shotcrete)...	60
4.2.4.1	Χαρακτηριστικά των χρησιμοποιούμενων ινών.....	60
4.2.5.	Μεταλλικά πλαίσια υποστηρίγματα.....	61
4.3.	Μόνιμες ηλώσης βράχου (Αγκύρια) Φ25 τύπου Self Drilling φέρουσας ικανότητας 100 KN.....	63
4.3.1.	Μικροπάσσαλοι Φ101,4/114.....	65

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ

5.	Κριτήρια σχεδιασμού του φορτίου μόνιμης επένδυσης σήραγγας.....	67
5.1.	Γενικές παραδοχές.....	67
5.2.	Γεωμετρία τελικής επένδυσης.....	67
5.3.	Φορτίσεις.....	68
5.4.	Παραδοχές υπολογισμού και παράμετροι.....	69
5.5.	Οπλισμοί κελύφους μόνιμης επένδυσης.....	70
5.5.1.	Έλεγχος σε κάμψη με ορθή δύναμη.....	70
5.5.2.	Έλεγχος σε διάτμηση.....	71
5.5.3.	Έλεγχος σε ρηγμάτωση.....	71
5.6.	Στεγανωτική μεμβράνη.....	72
5.6.1.	Ο ρόλος της στεγανωτικής μεμβράνης.....	72
5.6.2.	Ακολουθία των εργασιών στεγάνωσης.....	72
5.6.3.	Ιδιότητες στεγανωτικής μεμβράνης.....	73
5.6.4.	Τοποθέτηση της στεγανωτικής μεμβράνης.....	73
5.6.5.	Συγκόλληση της στεγανωτικής μεμβράνης.....	74
5.7.	Μεταλλότυπος σήραγγας.....	74

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ

6.	Γεωδαιτικές εργασίες στη διάνοιξη σήραγγας.....	77
6.1.	Τοπογραφικά στοιχεία-Προδιαγραφές.....	77
6.2.	Γεωδαιτικές εργασίας σήραγγας.....	77
6.3.	Οδεύσεις.....	80
6.3.1.	Ανοιχτή εξαρτημένη οδευση με προσανατολισμό στα δυο άκρα.....	80
6.4.	Χάραξη πορείας των δοκών προπορείας.....	81
6.4.1.	Έλεγχος γεωμετρίας πλαισίων και ταυτόχρονη χάραξη άξονα.....	81
6.5.	Χάραξη γραμμής διάτρησης.....	81
6.5.1.	Θεωρητικός Γεωμετρικός έλεγχος της εκσκαφής Β φάσης.....	82
6.5.2.	Γεωμετρικός έλεγχος μεταλλότυπου θόλου.....	82
6.5.3.	Γεωμετρικός έλεγχος τελικής επένδυσης .....	82
6.6.	Εφαρμογή γεωδαιτικών μεθόδων στην παρακολούθηση μικρομετακινήσεων σηράγγων.....	82
6.6.1.	Μέθοδος μετρήσεων.....	82
6.6.2.	Στάσεις του οργάνου και θέσεις στόχων σκόπευσης.....	83
6.6.3.	Θέσεις στόχων σκόπευσης .....	83
6.6.4.	Γεωδαιτικά όργανα.....	84
6.6.5.	Συχνότητα μετρήσεων.....	85
6.6.6.	Συνθήκη μετρήσεων-προβλήματα και δυσκολίες.....	85
6.6.7.	Καταγραφή μετακινήσεων στις σήραγγες.....	85
6.7.	Πιστοποίηση κατασκευής.....	86
6.7.1.	Εσωτερικός έλεγχος.....	86
6.7.2.	Εξωτερικός έλεγχος.....	86
6.8.	Ο γεωδαιτικός σταθμός TCRM 1101 plus .....	87
6.8.1.	Το λογισμικό (TMS Tunnel Measuring System).....	88
6.9.	Αποτύπωση Διατομών –Χωματισμοί.....	91
6.9.1.	Βασικές αρχές.....	91
6.9.2.	Διαστάσεις εκσκαφής –Ανοχές ασφάλειας.....	92
6.9.3.	Γραμμή ελάχιστης εκσκαφής.....	92
6.10.	Εργασίες πεδίου.....	93
6.11.	Φάσεις αποτύπωσης διατομών σηράγγων.....	95
6.11.1	Αποτύπωση διατομής εκσκαφής.....	95
6.11.2.	Αποτύπωση διατομής εκτοξευόμενου σκυροδέματος.....	96
6.11.3	Αποτύπωση εξομάλυνσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος και σκυροδέματος τελικής επένδυσης.....	96

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΒΔΟΜΟ

7	Καθίζηση και σύγκλιση προκαλούμενες από τη διάνοιξη σήραγγων.....	97
7.1.	Επιφανειακές καθιζήσεις.....	99
7.2.	Παρακολούθηση επιφανειακών καθιζήσεων.....	100
7.3.	Παρουσίαση προγράμματος του Verruijt.....	101
7.3.1.	Χρήση προγραμμάτων του Verruijt .....	101
7.4.	Αριθμητική ανάλυση με χρήση του λογισμικού (phase 2).....	103
7.5.	Επιφανειακές καθιζήσεις.....	104
7.6.	Κατακόρυφες μετατοπίσεις τοιχώματος σήραγγας.....	104
7.7.	Συμπεράσματα.....	106

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΟΓΔΩΟ**

8	Μέθοδοι διάνοιξης τμήματος σήραγγας με την μέθοδο(Cut and Cover).....	107
8.1.	Γενικά .....	107
8.2.	Πασσαλοσυστοιχίες .....	108
8.3.	Κατασκευή κελύφους της σήραγγας.....	113
8.4.	Στεγάνωση πλάκας οροφής κελύφους.....	115

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΝΑΤΟ**

Επίλογος.....	118
Φωτογραφίες.....	119
Βιβλιογραφία.....	127

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ

## 1.. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1. Γενικά στοιχεία

Είναι ευρέως γνωστό ότι τα τελευταία χρόνια το ΜΕΤΡΟ αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα τεχνικά έργα που κατασκευάζονται στη χώρα μας.Ακόμα μεγαλύτερο είναι το μέγεθος του έργου όσο και η σημασία του αφού θα βελτιώσει την ποιότητα ζωής στην Αθήνα.

Πρόκειται για ένα σύγχρονο υπόγειο συγκοινωνιακό έργο,το οποίο απαρτίζεται από μια αλληλουχία σιδηροδρομικού ιστού,στο οποίο κινούνται μηχανοκίνητα βαγόνια μεταφοράς επιβατών.Το δίκτυο των τροχιών απαρτίζεται από μια αλλά και από ζεύγος σιδηροτροχιών και αυτό συμβαίνει μόνο κοντά στους χώρους στάθμευσης όπου συγκεντρώνονται τα μηχανοκίνητα βαγόνια ,όπου κατασκευάζονται έξω από το υπόγειο έργο.

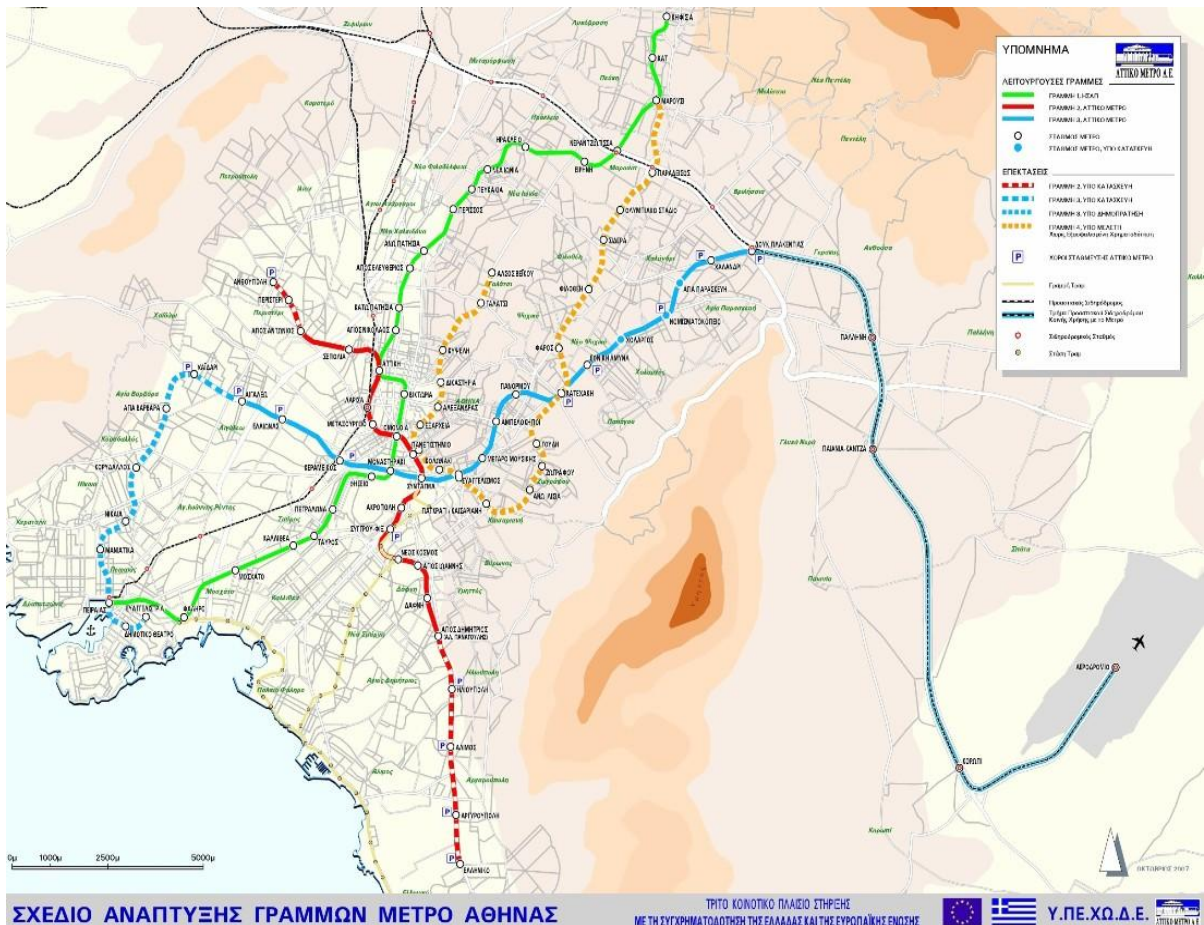
Για την επίτευξη αυτού του μεγάλου έργου δημιουργήθηκε μια ανώνυμη κατασκευαστική εταιρεία,η ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΑΕ.Η οποία ιδρύθηκε με το νόμο 1955/1991 ως νομικό πρόσωπο ιδιωτικού δικαίου με την μορφή ανώνυμης εταιρείας .Στον ίδιο νόμο προβλεπόταν ότι με την απόφαση του Υπουργού Περιβάλλοντος ,Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων παραχωρούνται και μεταβιβάζονται στην ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. όλα τα δικαιώματα και οι υποχρεώσεις του Ελληνικού Δημοσίου που απορρέουν από τη Σύμβαση με την Κοινοπραξία ΟΛΥΜΠΙΑΚΟ ΜΕΤΡΟ.

Σκοπός της εταιρείας είναι η επίβλεψη της κατασκευής του βασικού έργου και των νέων επεκτάσεων . Η ΑΜΕΛ, θυγατρική εταιρεία της, διαχειρίζεται τη λειτουργία του έργου. Το Ελληνικό Δημόσιο είναι ο μόνος μέτοχος της ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ, αλλά το 49 % των μετοχών της είναι μεταβιβάσιμες και είναι δυνατό να εισαχθούν στο Χρηματιστήριο Αθηνών.

Η κατασκευή του βασικού έργου χρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Τράπεζα Επενδύσεων με δάνεια, ενώ τα υπόλοιπα κονδύλια 11 % καλύφθηκαν από το Ελληνικό Δημόσιο. Το βασικό έργο εκτελέστηκε από την ΟΛΥΜΠΙΑΚΟ ΜΕΤΡΟ ,μια κοινοπραξία 22 ελληνικών, γερμανικών και γαλλικών εταιρειών που συνεργάστηκαν για την κατασκευή του Μετρό με σύμβαση σταθερού τμήματος.



Παρακάτω ακολουθεί σχέδιο ανάπτυξης γραμμών της Αθήνας.



(Χάρτης 1 Ανάπτυξη γραμμών μετρό)

Ο παραπάνω χάρτης απεικονίζει τις γραμμές του Μετρό στην Αθήνα, τόσο τις κατασκευασμένες όσο και τις επεκτάσεις των γραμμών που βρίσκονται σε διαδικασία κατασκευής.

Με πράσινο χρώμα απεικονίζεται η Γραμμή 1, η οποία είναι και σε πλήρη ανάπτυξη και ήδη εξυπηρετεί το κοινό. Στην συνέχεια ακολουθεί η Γραμμή 2 όπου απεικονίζεται στο υπόμνημα με κόκκινο χρώμα, όπου το μεγαλύτερο μέρος της γραμμής εξυπηρετεί το κοινό εκτός από την περιοχή του Περιστερίου που βρίσκεται βορειοδυτικά και την περιοχή της Αργυρούπολης και του Ελληνικού που βρίσκονται νοτιοανατολικά. Τέλος στο υπόμνημα απεικονίζεται η γραμμή 3 και η οποία βρίσκεται σε πλήρη κατασκευαστική εξέλιξη τμηματικά.

## 1.2. ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ

Το τμήμα της σήραγγας όπου θα ασχοληθούμε βρίσκεται στον Κεραμεικό. Το έργο αυτό υπάγεται στο τμήμα της Δυτικής επέκτασης της γραμμής 3 του μετρό.

Το εξεταζόμενο τμήμα της σήραγγας κατασκευάζεται με την διαδικασία δύο μεθόδων κατασκευής σήραγγας. Το τμήμα αποτελείται από διπλή σιδηροτροχιά και το στόμιο εξόδου της σήραγγας βρίσκεται στο υψόμετρο του εδάφους του ανοιχτού αμαξοστάσιου, όπου θα συγκεντρώνονται τα μηχανοκίνητα βαγόνια.

Το τμήμα που εξετάζουμε κατασκευάζεται από την εταιρεία ΑΚΤΩΡ ΑΤΕ η οποία έκανε κοινοπραξία με την εταιρεία IMPREGGIO S.P.A. όπου οι συγκεκριμένες εταιρείες είναι υπεύθυνες για την κατασκευή του έργου.

Όπως προαναφέραμε το τμήμα του έργου που ασχοληθήκαμε κατασκευάστηκε με δυο μεθόδους στις αντίστοιχες χιλιομετρικές θέσεις.

ΜΕΘΟΔΟΣ	ΟΡΙΟΘΕΤΗΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΕΡΓΟΥ	
Σήραγγα διπλής τροχιάς προς Depot ( NATM )	X.Θ 0+337	0+475
CUT AND COVER	X.Θ 0+475	0+585

Το έργο το οποίο ασχολούμαστε, βρίσκεται ουσιαστικά μέσα στην γη, κάτω από τα επιφανειακά πετρώματα, σε έδαφος που βρίσκεται στα 20-30 μέτρα βάθος, δηλαδή στο υπέδαφος. Η κάθε περιοχή έχει τα δικά της χαρακτηριστικά εδάφους και η Αττική, ιδίως όμως το λεκανοπέδιο των Αθηνών έχει τα δικά του ποιοτικά εδαφολογικά χαρακτηριστικά. Η Αθήνα λοιπόν καλύπτεται από τις κρυσταλλοσχιτώδεις μάζες της ευρύτερης Αττικοκυκλαδικής και στα Μάρμαρα που βρίσκονται συνήθως βαθύτερα.

Ο σχιστόλιθος της Καισαριανής που βρίσκεται παντού στην Αθήνα υπό διάφορες μορφές, προχωράει μέχρι την Λαυρεωτική και το μάρμαρο που εμφανίζεται στο Πεντελικό υπό διάφορες μορφές βρίσκεται και στον Υμηττό.

Η σήραγγα κατασκευάζεται με την χρήση τεχνικής συμβατικής διάνοιξης σηράγγων. Η εκσκαφή περιλαμβάνει μεθόδους μηχανικής εκσκαφής των παρειών, του μετώπου και του πυθμένα. Η σήραγγα θα υποστηριχτεί από μια αρχική επένδυση των παρειών του πυθμένα και θα ολοκληρωθεί με μια επένδυση από ενισχυμένο σκυρόδεμα.

Όπως προαναφέραμε το τμήμα του έργου στον Κεραμεικό βρίσκεται στην Δυτική Επέκταση της γραμμής 3. Αυτή η νέα Γραμμή 3 ξεκινά από τον σταθμό Εθνικής Άμυνας καταλήγει στον σταθμό Μοναστηράκι και κατόπιν θα φτάσει στο Αιγάλεω και φτάνει μέχρι το αεροδρόμιο. Η γραμμή 3 συναντά την γραμμή 1 του ΗΣΑΠ στο σταθμό Μοναστηράκι. Το συνολικό μήκος της 26 χιλιομέτρα και περιλαμβάνει 7 σταθμούς. Υπάρχει υπηρεσιακή γραμμή σύνδεσης των γραμμών 2 & 3 στο σταθμό του Συντάγματος που κατασκευάστηκε με την μέθοδο NATM. Οι γραμμές 2&3 συναντιούνται στο σταθμό του Συντάγματος και εξυπηρετούν 450.000 επιβάτες ημερησίως. Οι χρονοαποστάσεις των συρμών είναι ανά 3 λεπτά τις ώρες αιχμής και ανά 5-10 λεπτά τις υπόλοιπες ώρες.

Από την αρχική μελέτη του έργου για την κατασκευή της γραμμής τον Ιανουάριο του 1998 και λόγω κάποιων υποψιών που είχαν οι αρχαιολόγοι ότι θα προκληθούν βλάβες στις αρχαιότητες της περιοχής η γραμμή υπέστη μια περικοπή. Αυτή οδήγησε στη μετάθεση του ομώνυμου σταθμού και τη μετανομοσία του σε (Βοτανικός), από την διασταύρωση Πειραιώς-Ιεράς Οδού στο χώρο μεταξύ των παλαιών εγκαταστάσεων φωταερίου (Γκάζι) και της λεωφόρου Κωνσταντινουπόλεως. Στη συνέχεια η γραμμή επιστρέφει στην αρχική της χάραξη στην Ιερά Οδό , περνώντας κάτω από το Βοτανικό Κήπο. Οι επόμενοι σταθμοί είναι (Γεωπονική) ο (Άγιος Σάββας) στην διασταύρωση της Ιεράς Οδού με την οδό Αγ. Άννης-Μαρκόνι και στην συνέχεια στο Αιγάλεω.

### 1.3. ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΑ ΕΥΡΗΜΑΤΑ

Το μετρό της Αθήνας ως έργο με πολιτιστική διάσταση δίνει μεγάλη έμφαση στην αρχαιολογική έρευνα, η οποία είναι η μεγαλύτερη που έγινε ποτέ στην πόλη, συνολικής έκτασης 70.000 τ.μ. Οι σήραγγες του μετρό διανοίγονται σε βάθος 20-30 μέτρων, σε επίπεδο πολύ χαμηλότερο από αυτό στο οποίο υπάρχουν ευρήματα, ώστε να μην υπάρχουν πιθανότητες συνάντησης με αρχαιότητες. Στους χώρους ανασκαφής, οι εξειδικευμένοι αρχαιολόγοι του Υπουργείου Πολιτισμού ανασκάπτουν, καταγράφουν και αποθηκεύουν τα ευρήματα. Υπάρχει αυστηρώς έλεγχος σε αυτές τις περιοχές. Ορισμένα από τα αρχαιολογικά ευρήματα εκτίθενται σε ειδικές προθήκες σε επιλεγμένους σταθμούς του Μετρό.

Με το Νόμο 1955/1991 με τον οποίο ιδρύθηκε η ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ, καθορίστηκαν επίσης υποχρεώσεις για την Αρχαιολογική Υπηρεσία, η οποία εντός 15 ημερών από την λήψη ειδοποίησης εντοπισμού αρχαιολογικών ευρημάτων, υποχρεούται να λάβει όλα τα απαραίτητα μέτρα για την προστασία των αρχαιολογικών ευρημάτων ώστε να συνεχιστούν οι εργασίες.

Η κατασκευή του Μετρό πραγματοποιείται ανάμεσα στις σημαντικότερες τοποθεσίες της κλασικής αρχαιότητας. Πέντε από τους σταθμούς του Μετρό βρίσκονται μέσα στην καρδιά της αρχαίας Αθήνας, στη σκιά του ιερού βράχου της Ακρόπολης.

Πριν αρχίσουν οι εργασίες του έργου, η κοινοπραξία Ολυμπιακό Μετρό μαζί με το Υπουργείο Πολιτισμού είχαν επαλήθευση μέσω διερευνητικών τόμων και άλλων μεθόδων αναμενόμενες αρχαιολογικές περιοχές υψηλού κινδύνου, βασιζόμενοι στα αποτελέσματα επιμελημένης χαρτογράφησης προηγούμενων ερευνών κάτω από την επιφάνεια σε ευρήματα κοντά στην εκσκαφή θεμελίων νέων κτισμάτων καθώς και σε αρχαία κείμενα.

Αυτή η ανάλυση έδωσε βάρος σε πέντε σταθμούς (Σύνταγμα, Μοναστηράκι, Ακρόπολη, Πανεπιστήμιου και στον Κεραμεικό). Στα συγκεκριμένα σημεία έγιναν σημαντικές ανασκαφές μεγάλης διάρκειας. Στις ανακαλύψεις περιλαμβάνονται δημόσια λουτρά, υδραγωγεία, εργαστήρια επεξεργασίας μετάλλων, αρχαίοι δρόμοι και τείχη, νεκροταφεία, αποχετευτικά έργα.

Ο Κεραμεικός ήταν το σημαντικότερο νεκροταφείο της Αρχαίας Αθήνας. Η ονομασία του προέρχεται από τον πανάρχαιο συννοικισμό των κεραμίων που είχαν εγκατασταθεί στις όχθες του ποταμού Ηριδανού.

Διαιρέθηκε σε δύο τμήματα, τον "έσω" και "έξω" Κεραμεικό, όταν κατασκευάστηκε το Θεμιστόκλειο τείχος (5ος αιώνας π.Χ.). Τα τμήματα αυτά συνδέονταν μεταξύ τους με δύο από τις σπουδαιότερες πύλες της αρχαίας Αθήνας, το Δίπυλο και την Ιερά Πύλη. Από την Ιερά Πύλη ξεκινούσε η Ιερά Οδός, δίπλα ακριβώς από τον Ηριδανό ποταμό. Από τις πύλες αυτές εκκινούσαν δύο δρόμοι, εκατέρωθεν των οποίων αναπτύχθηκε το επίσημο νεκροταφείο της πόλης, το οποίο χρησιμοποιήθηκε αδιάκοπα από τον 9ο αιώνα π.Χ. έως και τα υστερορωμαϊκά χρόνια. Άλλα σημαντικά μνημεία του κεραμεικού είναι:

- Το Πομπείο στην εσωτερική μεριά των τειχών που ήταν ένα αρχαίο οικοδόμημα στο οποίο γινόταν η φύλαξη των ιερών σκευών και των αντικειμένων, αλλά και αφετηρία της πομπής των Παναθηναίων.

- Η κρήνη στην εσωτερική μεριά του δίπυλου, ένα οικοδόμημα που παρείχε νερό στους ταξιδιώτες και τους κατοίκους που εισέρχονταν στην πόλη.

- Ο ταφικός περίβολος με σημαντικά μνημεία.

- Το Δίπυλο, η επισημότερη και μεγαλύτερη Πύλη της Αθήνας. Διέθετε δύο ανοίγματα που οδηγούσαν σε εσωτερική αυλή με τέσσερις πύργους στις γωνίες.

Το τμήμα του νεκροταφείου που ήταν από την μεριά του Δίπυλου (αριστερά από την Ιερά Οδό- όπως κοιτάμε προς την Ακρόπολη) ήταν το "Δημόσιον Σήμα". Σε αυτόν τον χώρο γινόντουσαν δημοσία δαπάνη οι ταφές σημαντικών προσωπικοτήτων και όσων πέθαναν υπερασπιζόμενοι τα πάτρια εδάφη (εκτός των νεκρών της Μάχης του Μαραθώνος που ετάφησαν στον ομώνυμο Τύμβο). Το Δημόσιον Σήμα είναι μία περιοχή πλάτους 40 μέτρων και (όπως υπολογίζεται) μήκους 1100 μέτρων περίπου. Εκεί βρίσκονται οι τάφοι των επιφανών **Περικλέους, Θρασυβούλου, Φορμίωνος, Κλεισθένους, Λυκούργου, Σόλωνος** και πολλών άλλων.

Ένα νέο τμήμα του Δημοσίου Σήματος ανακαλύφτηκε στις ανασκαφές που πραγματοποιήθηκαν από την 3η εφορεία κλασικών αρχαιοτήτων υπό την διεύθυνση της Χ. Στούπα στην οδό Σαλαμίνας, βρέθηκαν τέσσερα πολυάνδρεια (κοινοί τάφοι) με οστά και ταφικά κτερίσματα - κεραμικά (ερυθρόμορφα αγγεία και λευκοί λήκυθοι) που χρονολογούνται στην εποχή του Πελοποννησιακού

πολέμου (430 με 420 π.Χ.). Ένα πέμπτο πολυάνδρειο βρέθηκε κάτω από παρακείμενο κτίριο, αλλά δεν έχει ανασκαφεί ακόμα. Σύμφωνα με την αρχαιολογική μελέτη οι τάφοι είχαν συληθεί στην ύστερη αρχαιότητα και η αρχική θέση των σκελετών έχει αλλάξει.

Σημαντικό μέρος των ευρημάτων αποτελούν τα οστά που βρέθηκαν και αυτή την στιγμή βρίσκονται για μελέτη στο Πανεπιστήμιο Adelphi της Ν. Υόρκης, όπου τα μελετάει ο ανθρωπολόγος κ. Αναγνώστης Αγγελαράκης (ο οποίος διεξάγει και άλλες ανθρωπολογικές μελέτες με οστά από την Κύπρο, το Ισραήλ κ.α.). Το μεγαλύτερο μέρος των οστών προέρχεται από τα τρία ευρεθέντα πολυάνδρεια. Τα οστά που είναι εύκολα αναγνωρίσιμα μας δείχνουν ότι πρόκειται για τμήματα οστών από κρανία, χέρια, κνήμες καθώς και λεκάνες. Με μία πρώτη δειγματοληπτική εξέταση των οστών φαίνεται ότι τα οστά ανήκαν σε άνδρες.

Ένα μεγάλο μέρος των οστών έχουν εκτεθεί σε υψηλές θερμοκρασίες περ. 800° C κατά την καύση τους. Από την πρώτη εξέταση φάνηκε ότι ένα μέρος των οστών είναι καμένο ενώ τα υπόλοιπα όχι. Αυτό οφείλεται στην γνωστή συνήθεια των αρχαίων να καίνε τους νεκρούς πολεμιστές που πέθαναν μακριά από την πατρίδα τους, προκειμένου να είναι ευκολότερη η μεταφορά των σωρών τους για να ταφούν στην πατρίδα σε επίσημη τελετή.

Σε αυτή την θερμοκρασία τα οστά συρρικνώνονται στο 1/3 του κανονικού τους μεγέθους και όλα τα οργανικά υπόλοιπα(συμπεριλαμβανομένου και του DNA και ιχνών από ασθένειες όπως ο λοιμός των Αθηνών στην εποχή του Πελοποννησιακού πολέμου) καταστρέφονται, γεγονός που κάνει την ανθρωπολογική έρευνα πολύ δύσκολη.

Νέες ταφές του Δημόσιου Σήματος, συγκεκριμένα τέσσερις σαρκοφάγους που χρονολογούνται από το τρίτο τέταρτο του 4ου αιώνα π.Χ., έφερε στο φως η αρχαιολογική έρευνα σε οικόπεδο της οδού Μυκάλης 66-68 απέναντι από τον Κεραμεικό. Οι ανασκαφές στη γύρω περιοχή αποκαλύπτουν διαρκώς νέους τάφους, οι οποίοι ανήκουν στο νεκροταφείο. Στην προκειμένη περίπτωση μάλιστα, όπως αναφέρει Το Βήμα, η μία από τις τέσσερις ταφές ήταν ασύλητη, ενώ όλες οι άλλες περιελάμβαναν σκελετικό υλικό. Οι τάφοι βρίσκονται σε περίβολο, γεγονός που ενδεχομένως σημαίνει την ταφή οικογένειας, ενώ μεταξύ των ευρημάτων ήταν μια επιτύμβια λήκυθος και ένα μεγάλο επιτύμβιο λιοντάρι (μήκους 2 μ. και ύψους 1,5 μ.) και τα δύο μαρμάρια.

Η ύπαρξη του λέοντος δείχνει ότι συνόδευε την ταφή επιφανούς νεκρού. Το σύνολο βρίσκεται σε έναν από τους αρχαίους παράδρομους του Δημόσιου Σήματος με πλάτος 3 μέτρα, καθώς εντοπίστηκαν και τα αναλήμματα του.

Το οικόπεδο, πάντως, θα απαλλοτριωθεί σύμφωνα με απόφαση του ΚΑΣ, καθώς μάλιστα το υπουργείο Πολιτισμού στοχεύει στην αναβάθμιση της περιοχής και στην ενοποίηση του Κεραμεικού με την Ακαδημία Πλάτωνος.

Μια άλλη σημαντική ανακάλυψη ήταν η εύρεση της σωρούς νεαρής κοπέλας ,ηλικίας 11 ετών. Η συγκεκριμένη ανακάλυψη απασχόλησε μια μεγάλη μερίδα του τύπου και επιστημόνων.

Το πρόσωπο της 11χρονης Μύρτιδος, όπως τη βάφτισαν, ανέπλασαν οι αρχαιολόγοι. Πρόκειται για ένα κορίτσι που έζησε πριν από 2.500 χρόνια στην Αθήνα, την εποχή του Περικλή, και πέθανε σε νεαρή ηλικία από τυφοειδή πυρετό. Το πρόγραμμα ανάπλασης του προσώπου της αποτελεί μια πρωτοποριακή διεθνώς προσπάθεια, που ξεκίνησε από τα αρχαιολογικά ευρήματα μιας ανασκαφής στον Κεραμεικό.

Η «Μύρτις», μια νεαρή κοπέλα που έζησε στα χρόνια του Πελοποννησιακού Πολέμου, αποτελεί την επιστημονική προσέγγιση στα διαχρονικά ερωτήματα, ενώ η μορφή της ρίχνει φως στις άγνωστες πτυχές της ιστορίας.

Πριν από πέντε χρόνια ευρήματα του DNA στην ανασκαφή πιστοποίησαν ότι το μικρόβιο που προκάλεσε τον αρχαίο λοιμό ήταν ο παράγον της σαλμονέλας, μικρόβιο υπεύθυνο για την εκδήλωση τυφοειδούς πυρετού. Η ανακοίνωση έκανε τον γύρο του κόσμου με δημοσιεύσεις σε δεκάδες έντυπα, από την «**Washington Post**» και τη «**Figaro**» μέχρι τους «**Times**».

Η ανάπλαση του προσώπου της κατέστη εφικτή χάρη στο κρανίο της που βρέθηκε το 1995 μαζί με τα οστά άλλων 150 ανθρώπων, ενηλίκων και παιδιών, στον λεγόμενο τάφο του Λοιμού κατά τις ανασκαφές για τις εργασίες του Μετρό στον Κεραμεικό. Η εξαιρετική διατήρηση του κρανίου ήταν ο κύριος λόγος που αποτέλεσε αντικείμενο της έρευνας του επίκουρου καθηγητή Ορθοδοντικής του Πανεπιστημίου Αθηνών **Μανώλη Ι. Παπαγρηγοράκη**.

«Το εύρημα ήταν σε τόσο καλή κατάσταση που ελάχιστες μπορεί να είναι οι αποκλίσεις από την πραγματικότητα. Ενώ το γνωρίζαμε, δεν θελήσαμε να αποδώσουμε στην έκφραση του προσώπου της τον πόνο που ίσως έζησε προτού πεθάνει. Προτιμήσαμε ένα ελαφρύ μειδίαμα που προσδίδει την αίσθηση της εσωτερικής γαλήνης και αταραξίας που θα είχε αν γνώριζε πως μαζευτήκαμε

όλοι σήμερα εδώ, 2.400 χρόνια μετά, για να αντικρίσουμε με έκπληξη, θαυμασμό και συγκίνηση το παιδικό της πρόσωπο.»

#### **1.4. ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟ**

Το μετρό αποτελεί τον σκελετό του συστήματος των Δημοσίων Συγκοινωνιών στην Αττική αποτελούμενο από τρεις γραμμές που εκτείνονται ακτινικά από το κέντρο της Αθήνας προς την Κηφισιά, την Αγία Παρασκευή, τη Γλυφάδα, τον Πειραιά, την Πετρούπολη, το Χαϊδάρι και τις νοτιοδυτικές συνοικίες, ενώ εκτός Λεκανοπέδιου εκτείνεται μέχρι το Αεροδρόμιο.

Το συνολικό μήκος των γραμμών είναι 106,4 χιλιόμετρα ενώ υπάρχουν 83 σταθμοί από τους οποίους οι επτά είναι διπλοί δηλαδή σταθμοί ανταπόκρισης μεταξύ ή γραμμών ή κλάδων του δικτύου Μετρό. Οι συρμοί που εξυπηρετούν τις γραμμές 2 και 3 του συγκοινωνιακού χάρτη είναι 28, ενώ η σύνθεση κάθε συρμού αποτελείται από 6 οχήματα. Το κάθε όχημα περιλαμβάνει 4 πόρτες ανά πλευρά. Η χωρητικότητα του συρμού είναι 1030 επιβάτες από τους οποίους οι 806 είναι όρθιοι ενώ 224 καθήμενοι.

Μελετώντας τα τεχνικά χαρακτηριστικά και ειδικότερα τη διαμόρφωση του συρμού υπάρχουν δυο μονάδες τριών οχημάτων συνδεδεμένων πλάτη με πλάτη, δηλαδή η διαμόρφωση κάθε συρμού ο οποίος είναι 106 μέτρα είναι Ιθυνήριο όχημα-Κινητήριο όχημα –Κινητήριο όχημα. Το πλάτος κάθε οχήματος είναι 2800 mm, ενώ το ύψος είναι 3600 mm. Το εσωτερικό ύψος της οροφής κάθε οχήματος είναι 2180 mm ενώ το βάρος του συρμού είναι 178 τόνοι αέρος και 245 τόνοι πλήρες φορτίο.

Η πηγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσης τάσης είναι η Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού και η τάση τροφοδοσίας είναι 20 kv, τριφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα 50 Hz.

Οι νέοι υπερσύγχρονοι συρμοί που λειτουργούν σήμερα και εξυπηρετούν τις ανάγκες του επιβατηγού κοινού είναι 21. Κάθε συρμός αποτελείται από 6 οχήματα και κάθε όχημα περιλαμβάνει τέσσερις ολισθαίνουσες θύρες εφαρμοστού τύπου ανά πλευρά.

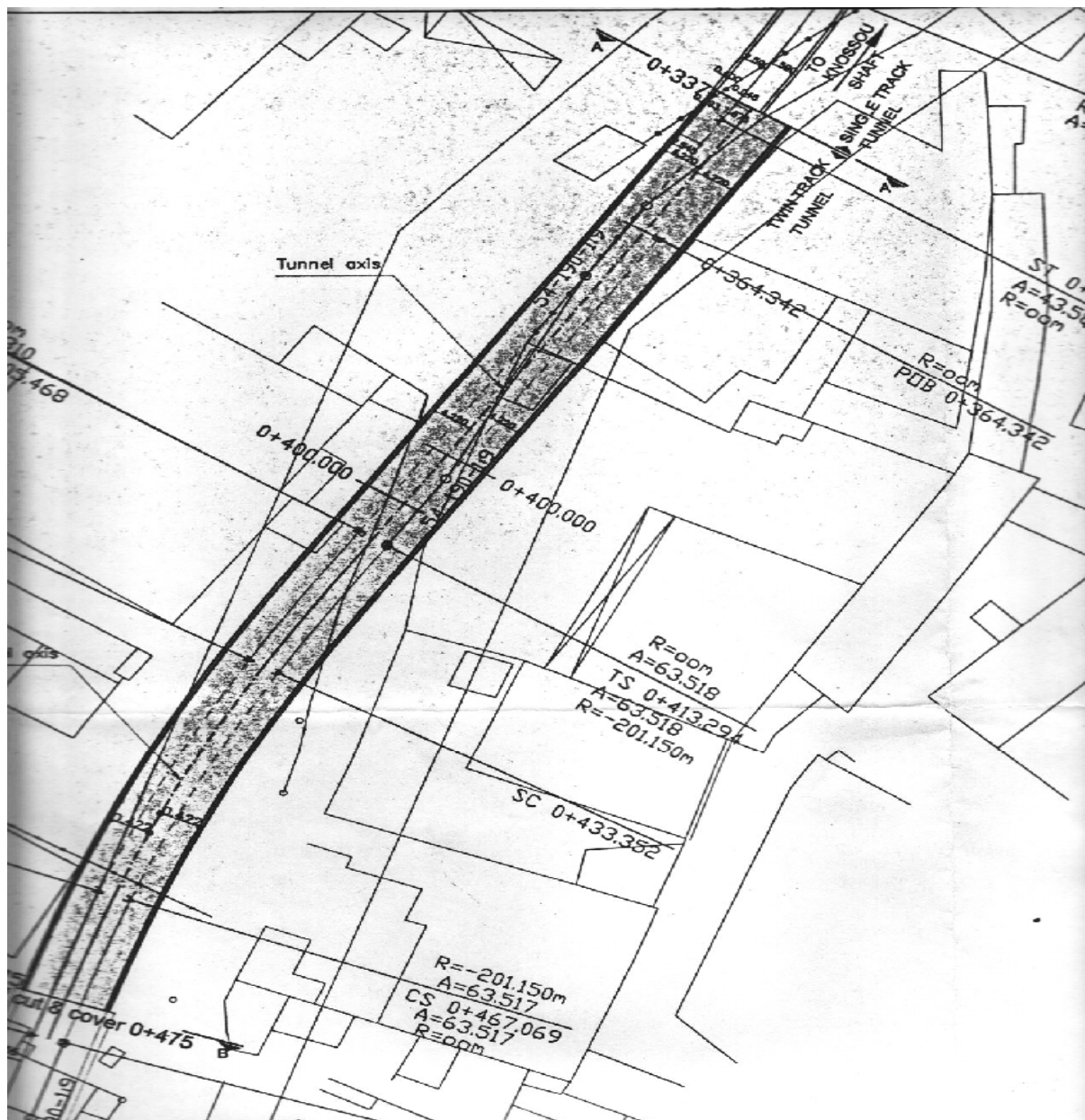
Όσον αφορά τον αερισμό υπάρχουν ανεμιστήρες μεγάλου μεγέθους με μέγεθος 2,5 μέτρων και με απόδοση 100 m<sup>3</sup> ανά δευτερόλεπτο οι οποίοι είναι



τοποθετημένοι στους κοινόχρηστους χώρους των σταθμών και των σηράγγων για αερισμό, ψύξη και έλεγχο καπνού σε περίπτωση πυρκαγιάς.

## **1.5. ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ**

Όπως προαναφέραμε το έργο με το οποίο ασχοληθήκαμε υπάγεται στην Δυτική Επέκταση της γραμμής 3 και στο πρώτο τμήμα η διάνοιξη γίνεται τμηματικά χρησιμοποιώντας την μέθοδο N.A.T.M.(New Austrian Tunneling Method). Η συγκεκριμένη μέθοδος αποτελείται από τρία βασικά στάδια, την υποστήριξη, τον εξωτερικό δακτύλιο και τον εσωτερικό (μόνιμο) δακτύλιο τα οποία αναλύονται λεπτομερέστατα στην συνέχεια.

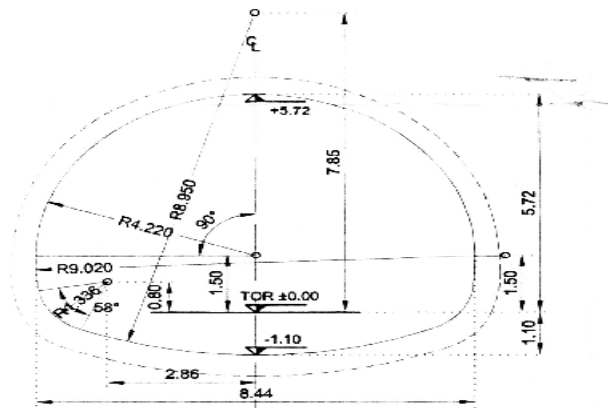


(Σχέδιο 1 τμήμα 1 χθ 0+337 - 0+475 μέθοδος NATM)

### Υποστήριξη Εξωτερικού Δακτυλίου

Στο σύνολο όλων των τμημάτων εφαρμόζονται συστηματικά μέτρα υποστήριξης της βραχομάζας. Δηλαδή γίνεται υποστήριξη της με τη δημιουργία εξωτερικού δακτυλίου από εκτοξευμένο σκυρόδεμα, αγκύρια βράχου, δομικό πλέγμα, δοκούς προπορείας-forerolling, πλαίσια ελαφρού τύπου (lattice girder) ή βαρέου τύπου (HEB) πάνω σε στήριξη τύπου (elephant foot).

Αρχικά γίνεται η υποστήριξη της άνω ημιδιατομής (Α φάση διάνοιξης) και τα μέτρα που εφαρμόζονται εξαρτώνται άμεσα από την ποιότητα της βραχομάζας. Το βήμα εκσκαφής της Α φάσης είναι από 0,80-1,20 μέτρα. Στην συνέχεια γίνεται υποστήριξη της κάτω ημιδιατομής (Β φάση) με ακριβώς τα ίδια μέτρα προστασίας που εφαρμόστηκαν στην άνω ημιδιατομή. Το βήμα εκσκαφής της (Β φάσης) είναι διπλάσιο από την (Α φάση).



ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΕΣΩΡΑΧΙΟΥ ΜΟΝΙΜΗΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ  
(ΚΛ. 1:100)  
GEOMETRY OF FINAL LINING INSIDE  
(SC. 1:100)

Το πάχος του εκτοξευμένου σκυροδέματος είναι 30 cm και αποτελείται από 3 στρώσεις σκυροδέτησης. Κατασκευάζεται η δεύτερη στρώση πάνω από την προπαρασκευαστική και είναι πάχους 5 cm, στην συνέχεια έχουμε την τρίτη στρώση που είναι πάχους 10 cm και τέλος την τέταρτη στρώση που είναι πάχους 15 cm. Η ποιότητα του εκτοξευμένου σκυροδέματος είναι C25/30.

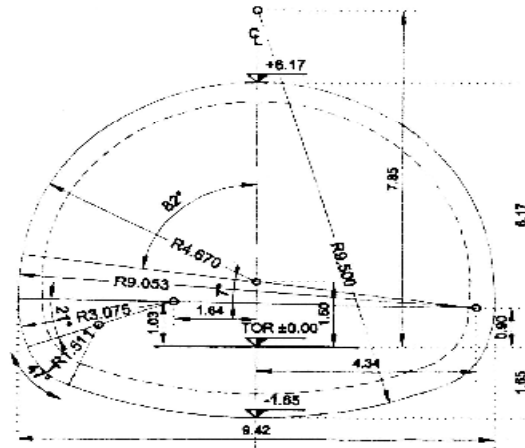
Το δομικό πλέγμα τοποθετείται σε δυο στρώσεις και είναι τύπου T188.

Τα αγκύρια βράχου είναι μήκους 6 m τύπου πλήρεις πακτώσεως.

#### Εσωτερικός Δακτύλιος (τελική επένδυση)

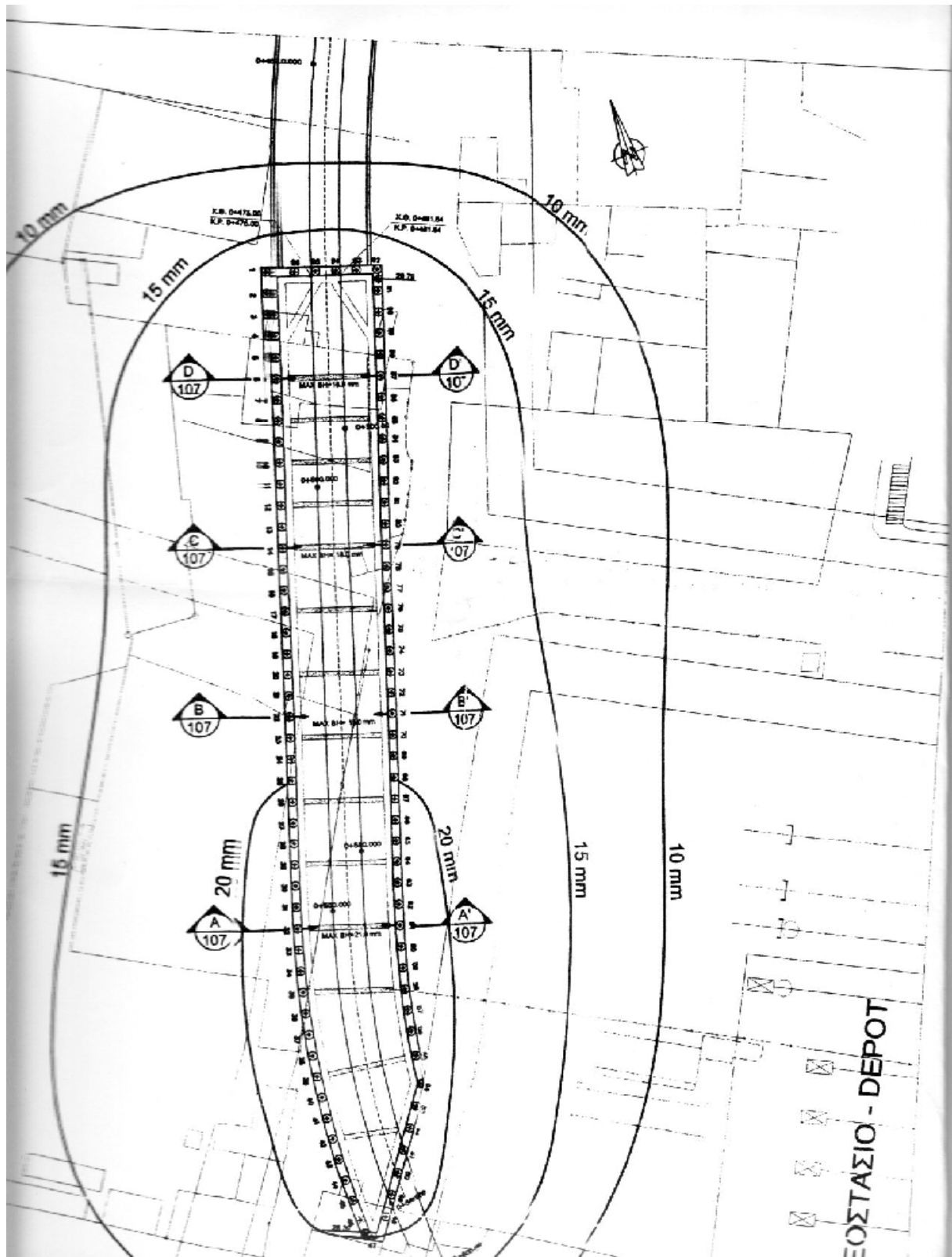
Πρόκειται για το τελευταίο στάδιο κατασκευής της σήραγγας το οποίο είναι ύψιστης σημασίας τόσο για την στατική ισορροπία της κατασκευής όσο και για την καλαισθησία της επιφάνειας της. Κατασκευάζεται με την χρήση ειδικών μεταλλικών καλουπιών. Αφού τοποθετηθούν οι στρώσεις εκτοξευμένου σκυροδέματος και τοποθετηθεί η στεγανωτική μεμβράνη, τοποθετούμε διπλή

εσχάρα σιδηροπλισμού (ποιότητας S500ς). Στην συνέχεια σκυροδετείται με την χρήση του μεταλλότυπου σύμφωνα με την τυπική διατομή της σήραγγας.



ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΕΞΩΡΑΧΙΟΥ ΜΟΝΙΜΗΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ  
(ΚΛ. 1:100)  
GEOMETRY OF FINAL LINING OUTSIDE  
(SC. 1:100)

Η διάνοιξη συνεχίζεται στο επόμενο τμήμα με την μέθοδο cut and cover όπου εφαρμόστηκε για τον λόγο ότι στο συγκεκριμένο σημείο του έργου δεν υπάρχουν κτίσματα και δεύτερον το έργο είναι σε μικρό βάθος. Η εκσκαφή γίνεται σε όλο το εύρος από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι το βάθος στο οποίο θα εδρασθεί το έργο, σε διάφορες φάσεις.



(Σχέδιο 2 τμήμα 2 χθ 0+475 – 0+585 μέθοδος cut and cover)

Πριν την εκσκαφή ,τοποθετούνται πασσαλοσανίδες δημιουργώντας ένα τοίχος για την στήριξη των παρειών του εδάφους ώστε να μην έχουμε κατάρρευση του εδαφικού υλικού και να αποφευχθούν οι καθιζήσεις. Αυτές οι πασσαλοσανίδες είναι μεταλλικές ,μήκους 6,0 μέτρων ,είναι από μέταλλο και το σχήμα τους είναι τραπεζοειδές. Στις δυο άκρες τους είναι κατασκευασμένες έτσι ώστε να μπορεί να συνδεθεί η μια με την άλλη. Η έμπειξη των πασσαλοσανίδων γίνεται από κρουστικό μηχανικό μέσο .

Οι μοναδικές καθιζήσεις που παρατηρούνται επεκτείνονται σε απόσταση 1 έως 2 μέτρα πίσω από τους τοίχους και είναι συνάρτηση του ολικού βάθους της εκσκαφής.Σημαντικό ρόλο παίζει η ποιότητα του εδάφους και σε αργιλικά εδάφη μπορεί να είναι σχετικά μεγάλες της τάξης του 1 έως 2% του ολικού βάθους της εκσκαφής.Ενώ σε αμμώδη εδάφη ανέρχονται στο ήμισυ των παραπάνω τιμών .

Η διατομή της σήραγγας είναι ορθογωνική και κατασκευάζεται από οπλισμένο σκυρόδεμα.Το πάχος της πλάκας οροφής είναι της τάξης των 60-80 cm και τοποθετείται σε βάθος 1.0 -1.5. μέτρων από την επιφάνεια ώστε η κατανομή των επιφανειακών φορτίων πάνω της να είναι καλή.Προβλήματα θεμελίωσης δεν υπάρχουν επειδή τα φορτία που υπήρχαν πριν αφαιρεθεί το έδαφος ήταν μεγαλύτερα από τα φορτία που μεταφέρει στο έδαφος η σήραγγα.Το δάπεδο αποτελεί πλάκα θεμελίωσης και προστατεύει τη σήραγγα από την εισροή υπόγειων νερών .Οι κατακόρυφοι τοίχοι δέχονται τις ωθήσεις του εδάφους και της κυκλοφορίας που δεν είναι σημαντικές.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

### 2. ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

#### 2.1. Γεωλογικά στοιχεία ευρύτερης περιοχής

Το γεωλογικό υπόβαθρο της Αθήνας στο οποίο κατασκευάζεται και το έργο του Μετρό, αποτελείται από σειρά γεωλογικών σχηματισμών γνωστοί ως Αθηναϊκός Σχιστόλιθος. Ο όρος Αθηναϊκός Σχιστόλιθος χρησιμοποιείται για να περιγράψει σειρά αρχικά ιζηματογενών πετρωμάτων φλυσχικού τύπου και πιθανόν Άνω Κρητιδικής ηλικίας που στη συνέχεια υπέστησαν παραμόρφωση.

Το σύστημα περιλαμβάνει αργιλικούς και ασβεστικούς ψαμμίτες, γραουβάκες, ιλυόλιθους, ασβεστόλιθους και αργιλικούς σχιστόλιθους. Πυριγενής δραστηριότητα έδωσε τοπικά περιδοτιτικά και διαβαστικά σώματα που προκάλεσαν λιθολογική παραμόρφωση και σημαντικές τεκτονικές παραμορφώσεις των προουπαρχόντων πετρωμάτων.

Ιστορικά το οποίο είναι πολύ πιθανόν κατά την γεωλογική περίοδο του Ηωκαίνου ο Αθηναϊκός Σχιστόλιθος υπέστη εκτεταμένη πτύχωση και κερματισμό. Πρόσθετοι παράγοντες που ελέγχουν την ποιότητα και τη συμπεριφορά των υλικών της βραχομάζας είναι η εκτεταμένη αποσάθρωση και η εξαλλοίωση των σχηματισμών.

Έτσι η βραχομάζα είναι πολύ ανομοιογενής και ανισότροπη όχι μόνο στη μακροσκοπική-γεωτεχνική κλίμακα της λεκάνης των Αθηνών, αλλά κυρίως στη μεσοσκοπική κλίμακα των εκσκαφών σηράγγων. Αυτή η εγγενής ανομοιογένεια των πετρωμάτων του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου δημιουργεί αβεβαιότητα κατά το συσχετισμό γειτονικών γεωτρήσεων, γεγονός που καθιστά εξαιρετικά δύσκολο τον σχεδιασμό αξιόπιστων γεωλογικών τομών.

Οι τεταρτογενείς σχηματισμοί που έχουν αποθεθεί από τον Αθηναϊκό Σχιστόλιθο αποτελούνται από ποτάμιες αποθέσεις (αργιλικά και αμμώδη υλικά και κροκαλοπαγή συνήθως μικρού πάχους). Επίσης μεγάλες περιοχές καλύπτονται από διλουβιακές αποθέσεις ανάμεσα στους λόφους και αποτελούνται από αργίλους, ιλύς και άμμους σε εναλλαγές με λατυποπαγή χαλαρά συγκολλημένα.

Τέλος ένα επιφανειακό στρώμα με σύγχρονες αποθέσεις ή τεχνητές αποθέσεις με ποικίλο πάχος(1-6μ) βρίσκεται στις περισσότερες περιοχές κατά μήκος της χάραξης του έργου.Οι αποθέσεις αυτές δημιουργήθηκαν κατά τους ιστορικούς χρόνους.



(εικόνα 1 Διάφορα πετρώματα στα έγκατα της Αθήνας)



## **2.2. Διακρίσεις του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου**

Με βάση τη λιθολογική σύσταση την παραμόρφωση και το βαθμό μεταμόρφωσης οι Σχιστόλιθοι Αθηνών διακρίνονται σε δυο ενότητες την υπερκείμενη ουσιαστικά αμεταμόρφωτη Ενότητα Αθηνών και την υποκείμενη ελαφρά μεταμορφωμένη Ενότητα Αλεποβουνίου.

Η ενότητα Αθηνών εμφανίζεται στο κεντρικό και δυτικό τμήμα του λεκανοπεδίου και περιλαμβάνει δυο επιμέρους λιθολογικά σύνολα τους λευκούς συμπαγείς ασβεστόλιθους του Άνω Κρητιδικού αφ' ενός και Πελαγικά ιζήματα.

Η ενότητα Αλεποβουνίου εντοπίζεται μόνο στο ανατολικό περιθώριο του λεκανοπεδίου και περιλαμβάνει φυλλίτες ,μεταψαμμίτες και κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους .

Το έργο μας είναι πλησίον του λεκανοπεδίου όπου εμφανίζονται οι σχηματισμοί της Ενότητας Αθηνών .Η Ενότητα Αθηνών δομεί το μεγαλύτερο τμήμα των Αθηνών και από λιθολογικής άποψης στην ενότητα αυτή μπορούν να διακριθούν δυο επιμέρους υποενότητες οι οποίες εναλλάσσονται διαδοχικά και παρουσιάζουν διαφορετικούς χαρακτήρες φάσεως και διαφορετική τεκτονική παραμόρφωση.

Η πρώτη υποενότητα περιλαμβάνει λευκούς γκριζωπούς και συμπαγείς ασβεστόλιθους και κατά θέσεις δολομιτικούς .Οι ασβεστόλιθοι αυτού του τύπου περιέχουν πλήρεις τομές.

Η δεύτερη υποενότητα αντιστοιχεί σε ένα σύνθετο σύστημα που περιλαμβάνει αμεταμόρφωτα κλαστικά ιζήματα ,όπως ψαμμίτες ,άργιλοι μάργες γραουβάκες καθώς και μαργαικούς ασβεστόλιθους όπου συχνά περιέχουν πυριτικές ενδιαστρώσεις

## **2.3. Γεωλογικά στοιχεία**

Αναφορικά στην περιοχή που εξετάσαμε και ύστερα από συλλογή στοιχείων από γεώτρηση όπου έγινε στο σημείο και σε βάθος 40 μ βρέθηκαν τα εξής.

Από την επιφάνεια του εδάφους και σε βάθος των 3.00 μ. βρέθηκαν πρόσφατες απόθεσης υπό μορφή ανοιχτοκαστανού χρώματος ,αργιλοιλυώδους άμμου.

Από την προηγούμενη στρώση μέχρι και το βάθος των 15.0 μ τα εδάφη μεταβάλλονται, αποτελούμενα από κοκκινό-καστανές, πολύ πυκνές ή σκληρές αμμώδεις, αργιλώδεις ιλύες και ιλυώδη αργιλικό ιστό. Στρώσεις τσιμεντωμένου υλικού που αναφέρεται ως κροκαλοπαγές εμφανίζονται μεταξύ των 12.0 και 15.0 μ.

Ο δείκτης πλαστικότητας των αργιλικών τμημάτων των εδαφών στα πρώτα 15.0 μ βάθους έχει μέση τιμή 10 και το ποσοστό υγρασίας ήταν κάτω από το όριο πλαστικότητας.

Μετά τα 15.0 μ το υλικό ήταν πιο ομοιογενές, αποτελούμενο κυρίως από ερυθρό-καστανές, στιφρές έως σκληρές, καλά διαβαθμισμένες αμμώδεις αργίλους με ορισμένες χαλικώδεις ζώνες ή ζώνες κροκαλοπαγούς. Ο δείκτης πλαστικότητας κυμαίνονταν γενικά μεταξύ 20 και 25 και το ποσοστό υγρασίας ήταν κοντά στο όριο πλαστικότητας.

Ο τύπος του υλικού αυτού εκτεινόταν στο μέγιστο του βάθους των 40,0 μ των γεωτρήσεων της περιοχής, έτσι ώστε το κατώτερο όριο του στρώματος της αμμώδους αργίλου να μην είναι γνωστό.

Από τα 23.0 μ. μέχρι και 23.30 μ. βρέθηκαν παρεμβολές ασβεστόλιθου κατακερματισμένου και εξαλλοιωμένου.

Η στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα ήταν σε βάθος περίπου 10,0 μ. Η χαμηλή αυτή στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα πιστεύεται ότι ευθύνεται κυρίως για την υψηλή αντοχή και την χαμηλή συμπιεστότητα στα ανώτερα τμήματα του εδαφικού προσομοιώματος.

Τα παραπάνω γεωλογικά στοιχεία βρέθηκαν σε γεώτρηση στην επέκταση της γραμμής 3 και στο σταθμό του Αγίου Σάββα.

Είναι αξιοσημείωτο να ειπωθεί ότι κατά την πραγματοποίηση του έργου, έγιναν αρχικά 350 γεωτρήσεις και 200 γεωτρήσεις σε επεκτάσεις των γραμμών αυτών. Όμως κατά την εκπόνηση του έργου και λόγω των κατά την εύρεση διαφορετικών στρωμάτων γαιών αναγκάστηκαν και μέχρι σήμερα έχουν πραγματοποιηθεί 1100 γεωτρήσεις.

Κατά την κατασκευή του έργου και σε διαφορετικά σημεία παρουσιάζονται διαφοροποιήσεις των πετρωμάτων ως προς την εμφάνιση τους, ως προς τις ιδιότητες τους καθώς και την περιεκτικότητά τους σε υγρασία.

Στη χαμηλή στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα συνέβαλαν καταλυτικά και οι καιρικές συνθήκες. Η περίοδο όπου έγιναν οι εργασίες ήταν καλοκαίρι με μεγάλες θερμοκρασίες και μεγάλη ξηρασία. Άρα αφού δεν υπήρχαν βροχοπτώσεις, δεν είχαμε απορροή και εισροή υδάτων στα κατώτερα στρώματα και έτσι παράμεινε χαμηλά και περιορισμένα η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα. Αυτό το φαινόμενο βοήθησε αρκετά την κατασκευή του έργου αφού δεν παρουσιάστηκαν προβλήματα από εσωτερική ροή υδάτων, όπως αποκόλληση τμημάτων εδαφικού υλικού από υποκείμενη χαλαρότητα λόγω των υδάτων.

## 2.4 Γεωλογικοί σχηματισμοί ευρύτερης περιοχής μελέτης

Οι βασικοί γεωλογικοί σχηματισμοί και ενότητες που δομούν την ευρύτερη περιοχή μελέτης, όπως προέκυψαν από την Προκαταρκτική γεωλογική μελέτη της φαίνονται και αναλύονται παρακάτω.

### ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΣ

**Παράκτιες αποθέσεις (H.cd):** συνίστανται από άμμους, ιλύ, χαλαρά αμμοχάλικα και κροκάλες ακτών και καταλαμβάνουν μικρή ζωνώδη έκταση κατά μήκος.

**Αλλουβιακές αποθέσεις και προσχώσεις (H.al):** ασύνδετα υλικά από αργίλους, άμμους και χαλίκια, με κυμαινόμενο ποσοστό κροκάλων και λατυπών. Εντοπίζονται κυρίως στην ευρύτερη περιοχή της επέκτασης της γραμμής 3.

**Σύγχρονα πλευρικά κορήματα και κώνοι κορημάτων (H.sc):** Συνίστανται από λατύπες και κροκάλες, κατά θέσεις ελαφρά συγκολλημένες με αργιλικό υλικό. Έχουν σημειακή εμφάνιση στα πρανή του ασβεστολιθικού υποβάθρου, στο νότιο τμήμα της περιοχής.

**Ποταμοχερσαίες αποθέσεις (Pt):** αποτελούνται από εναλλαγές χαλαρών κροκαλοπαγών με αργιλοαμμώδη - πηλώδη υλικά. Εντοπίζονται σημειακά στην περιοχή του Κεραμικού.

## ΝΕΟΓΕΝΕΣ

**Ενότητα Κροκαλοπαγών Μαρκοπούλου – Ωρωπού (M.co):** εναλλαγές κροκαλοπαγών μικρής έως μεγάλης συνεκτικότητας, με καστανέρυθρες αργίλους, πηλούς και ψαμμίτες Αποτελούν τον σημαντικότερο σε έκταση σχηματισμό της περιοχής μελέτης και καταλαμβάνουν σχεδόν το σύνολο της ημιπεδινής ζώνης.

**Ενότητα Μαργών και Μαργαϊκών Ασβεστολίθων (M.mk):** τα κατώτερα μέλη αποτελούνται από τις λεπτοπλακώδεις, κερματισμένες σκληρές μάργες που μεταβαίνουν προς τα πάνω σε μαργαϊκούς ασβεστόλιθους Έχουν σημαντική εξάπλωση στη περιοχή μελέτης και εντοπίζονται κυρίως στο νότιο και νοτιοδυτικό τμήμα της περιοχής του Κεραμικού.

### (Πελαγονική ζώνη μη μεταμορφωμένων σχηματισμών)

**Ηφαιστειοϊζηματογενής σειρά (b.sh):** αποτελεί μία «σχιστοκερατολιθική διάπλαση» και συνίσταται από κερατόλιθους, πηλίτες, αργιλικούς σχιστόλιθους, ασβεστόλιθους και εκχύσεις βασικών πυριγενών πετρωμάτων (οφιολίθων).

**Οφιόλιθοι (o):** αποτελούνται κυρίως από έντονα τεκτονισμένους και διακλασμένους σερπεντινωμένους περιδοτίτες. Εντοπίζονται σαν ενιαίο σύμπλεγμα μαζί με την «σχιστοκερατολιθική διάπλαση», σε μικρές εμφανίσεις στην ημιορεινή - ορεινή περιοχή

**Ασβεστόλιθοι, δολομιτικοί Ασβεστόλιθοι και Δολομίτες (Tm-Ji.k):** είναι μέσο - παχυστρωματώδεις, έως άστρωτοι και έντονα τεκτονισμένοι. Δομούν το νότιο ορεινό τμήμα της περιοχής μελέτης

## 2.5 Υδρολιθολογικές συνθήκες

Η κίνηση του νερού μέσω των διαφόρων γεωλογικών σχηματισμών επιτυγχάνεται μέσω, του πρωτογενούς πορώδους στους εδαφικούς σχηματισμούς και μέσω του δευτερογενούς ενεργού πορώδους στους βραχώδεις σχηματισμούς. Η υδρολιθολογική συμπεριφορά των γεωλογικών σχηματισμών, εξαρτάται κυρίως από την λιθολογική τους σύσταση και τον τεκτονισμό τους, καθώς και από το βαθμό αποσάθρωσης και καρστικοποίησης (για τους ανθρακικούς σχηματισμούς).

Πιο συγκεκριμένα, οι κυριότεροι γεωλογικοί σχηματισμοί που απαντώνται στην ευρύτερη περιοχή μελέτης, παρουσιάζουν την εξής γενική υδρογεωλογική συμπεριφορά

**Οι Ασβεστόλιθοι** αποτελούν ουσιαστικά την ενιαία ανθρακική πλατφόρμα της Υποπελαγονικής ενότητας, το συνολικό πάχος της οποίας ξεπερνά τα 500 μέτρα. Η σημαντική τους εξάπλωση στην ευρύτερη περιοχή της λεκανοπεδίου, τους καθιστά ως τον σημαντικότερο υδρογεωλογικά σχηματισμό της ευρύτερης υδρογεωλογικής λεκάνης της Βόρειας Πάρνηθας και χαρακτηρίζονται ως ένας μακροπερατός- καρστικός σχηματισμός, μεγάλης υδρογεωλογικής σπουδαιότητας.

Οι σημαντικές υδραυλικές ιδιότητές του, έτσι όπως έχουν εκτιμηθεί από δοκιμαστικές αντλήσεις κατά μήκος της περιοχής, αναφέρουν υδραυλική αγωγιμότητα του καρστικού υδροφορέα (T) της τάξης των 10-1 m<sup>2</sup>/sec, δηλαδή περατότητα (k) μεταξύ 10-2 και 10-3 m/sec, γεγονός που επιτρέπει πολύ μεγάλες και για συνεχές χρονικό διάστημα ταυτόχρονες αντλήσεις.

Το πρωτογενές πορώδες στα εκρηξιγενή πετρώματα, κυρίως βασικής σύστασης, καθώς και ο δευτερογενής κατακερματισμός των υπερβασικών, λόγω τεκτονικής – νεοτεκτονικής δραστηριότητας, επιτρέπουν κατά θέσεις την κίνηση του υπόγειου νερού μέσα από το σύμπλεγμα, δημιουργώντας πολύ μικρή έως ασήμαντη υδροφορία, κυρίως εποχικού και μόνο τοπικού χαρακτήρα. Ο σημαντικός επίσης βαθμός εξαλλοίωσης– σερπεντινίωσης που εντοπίζεται στο μεγαλύτερο τμήμα της επιφανειακής εξάπλωσης, αποφράζει ένα σημαντικό μέρος των παραπάνω διακλάσεων και μικροασυνεχειών, καθιστώντας το σύμπλεγμα μαζί με την σχιστοψαμμιτοκερατολιθική διάπλαση, έναν πρακτικά αδιαπέρατο σχηματισμό. Εξαίρεση αποτελεί ο εξαλλοιωμένος μανδύας της διάπλασης, η υδροφορία του οποίου είναι ασήμαντη, λόγω της πολύ μικρής συνολικής επιφανειακής εξάπλωσης.

**Οι Νεογενείς αποθέσεις** καταλαμβάνουν μια σημαντική έκταση, στην ευρύτερη περιοχή μελέτης.

Το κατώτερο σύστημα που συνίσταται από εναλλαγές μαργών, ψαμμιτών, κροκαλοπαγών και μαργαϊκών ασβεστολίθων, συνολικού πάχους περίπου 200 μέτρων, παρουσιάζει υδρολιθολογικά χαρακτηριστικά που διαφέρουν σημαντικά κυρίως κατά την εγκάρσια ως προς την στρωματογραφική ακολουθία συνιστώσα. Οι ορίζοντες των μαργαϊκών ασβεστολίθων που συναντώνται κυρίως στη βάση, πολύ συχνά, είτε λόγω της δράσης του νερού,

οπότε μετατρέπονται σε τραβερτίνες, είτε εξαιτίας του μεγάλου πρωτογενούς και δευτερογενούς πορώδους (οφειλόμενο στην τεκτονική της περιοχής), αποκτούν σημαντική περατότητα, με υδροφορία σχεδόν ανάλογη με αυτή του υποκείμενου καρστικού υδροφορέα.

Εντελώς διαφορετικές υδραυλικές ιδιότητες παρουσιάζουν οι μάργες με ενστρώσεις ψαμμιτών και ενίοτε κροκαλοπαγών, οι οποίες προσδίδουν στο πέτρωμα έναν υδατοστεγή έως ημιπερατό χαρακτήρα. Το ανώτερο σύστημα συνολικού πάχους περίπου 100 μ., περιλαμβάνει πηλούς, άμμους, αργίλους και κροκαλοπαγή χερσαίας φάσης, οι υδραυλικές ιδιότητες του οποίου εξαρτώνται άμεσα από το πάχος των κροκαλοπαγών, καθώς και από το ποσοστό του αργιλικού στοιχείου στο συνδετικό υλικό. Γενικά πρόκειται για μια ημιπερατή έως αδιαπέρατη υδραυλικά ακολουθία, οι ανώτεροι ορίζοντες της οποίας, μαζί με τις ασύμφωνες υπερκείμενες Πλειστοκαινικές χερσαίες αποθέσεις, συνιστούν έναν ενιαίο υδροφόρο ορίζοντα, με χαμηλή έως πολύ χαμηλή περατότητα (10-5 έως 10-7 m/sec).

**Οι Τεταρτογενείς αποθέσεις**, συνίστανται από μια σειρά διαφορετικών πετρωμάτων όπως: τις χερσαίες αποθέσεις του Πλειστοκαίνου, τα πλευρικά κορήματα και τους κώνους κορημάτων, τις ποτάμιες αναβαθμίδες και τις αλλουβιακές αποθέσεις και προσχώσεις. Οι υδραυλικές ιδιότητες που εξαρτώνται άμεσα από την ηλικία, αλλά κυρίως από τις φυσικοχημικές διεργασίες σχηματισμού των παραπάνω πετρωμάτων και είναι σαφές ότι παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές

Οι Πλειστοκαινικές χερσαίες αποθέσεις, λόγω της φύσης των υλικών τους, γενικά συνιστούν σχηματισμό με χαμηλή έως πολύ χαμηλή περατότητα, σε αντίθεση με τα σύγχρονα πλευρικά κορήματα και κώνους κορημάτων, με μικρό ποσοστό άμμου και αργίλου, που τα υδρογεωλογικά τους χαρακτηριστικά ταυτίζονται με έναν ημιπερατό χαρακτήρα.

Οι αλλουβιακές αποθέσεις και προσχώσεις και οι ποτάμιες αναβαθμίδες, έχουν υποβαθμισμένο υδρογεωλογικό ενδιαφέρον. Η έντονη διαφορετικότητα της λιθολογίας που παρατηρείται (κροκαλοπαγή, άργιλοι, άμμοι, κ.ά.), είτε πρόκειται για τις ποτάμιες προσχώσεις του Ασωπού ποταμού, είτε ακόμα και για μικρές ποτάμιες αναβαθμίδες, σε συνδυασμό με την σχετικά μικρή έκταση που καταλαμβάνουν, ενσωματώνει τις αλλουβιακές αποθέσεις στο σύνολό τους, μαζί με την πλειονότητα των Πλειο- πλειστοκαινικών αποθέσεων, προσδίδοντας τους έναν γενικό ημιπερατό χαρακτήρα

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά, διαχωρίζουν τους γεωλογικούς σχηματισμούς και ενότητες της περιοχής μελέτης, στις ακόλουθες κατηγορίες.

Η κατηγοριοποίηση βασίζεται αφενός στην υδρολιθολογική συμπεριφορά του κάθε σχηματισμού, και αφετέρου στην επιφανειακή του εξάπλωση, η οποία καθορίζει σε μεγάλο βαθμό και την υδρογεωλογική του σπουδαιότητα:

**Υδροπερατοί σχηματισμοί:** περιλαμβάνονται οι ασβεστόλιθοι, δολομιτικοί ασβεστόλιθοι και δολομίτες, οι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι του Νεογενούς και οι σχηματισμοί (χαλαρά κροκαλοπαγή), και τα κορήματα. Στους σχηματισμούς αυτούς είναι δυνατή η ευχερής κυκλοφορία του νερού, που επιτρέπει την ανάπτυξη διαφόρου δυναμικότητας υδροφόρων οριζόντων (Υ.Ο.).

**Ημιπερατοί σχηματισμοί:** περιλαμβάνονται οι αδρομερείς αποθέσεις του Πλειστόκαινου και του Νεογενούς (χαλαρά κροκαλοπαγή, άμμοι, κ.λπ.) και οι αλλουβιακές αποθέσεις. Στους σχηματισμούς αυτούς γίνεται εκλεκτική κίνηση του νερού, που εξαρτάται από το ποσοστό συμμετοχής του αδρομερούς κλάσματος και του πάχους τους, και έτσι μπορούν να παρουσιάσουν τοπικά ασθενή έως μέτρια υδροφορία.

**Αδιαπέρατοι σχηματισμοί:** Περιλαμβάνονται οι σχιστοκερατόλιθοι των διαπλάσεων, οι αργιλομαργαϊκοί σχηματισμοί του νεογενούς και τα οφιολιθικά πετρώματα. Η κίνηση του νερού περιορίζεται κατά μήκος του επιφανειακών αποσαθρωμένων τμημάτων και τεκτονισμένων ζωνών του πετρώματος με συνέπεια την πιθανότητα ανάπτυξης τοπικών, μικρής δυναμικότητας υδροφοριών

## 2.6 Υδροφόρος Ορίζοντας

Με βάση τα κύρια χαρακτηριστικά των υδρογεωλογικών και υδρολιθολογικών παραγόντων για την ευρύτερη περιοχή, καθώς και τις ήδη υπάρχουσες υδρογεωλογικές έρευνες για το υδατικό δυναμικό της περιοχής, προκύπτουν δύο βασικοί υδροφόροι ορίζοντες, ο βαθύτερος καρστικός Υ.Ο. των ανθρακικών σχηματισμών και ο ανώτερος κοκκώδης Υ.Ο. των Νεογενών και Τεταρτογενών αποθέσεων.

### **α) Ο κατώτερος καρστικός υδροφόρος ορίζοντας**

Η τροφοδοσία του καρστικού Υ.Ο., γίνεται αφενός από κατακόρυφες διηθήσεις στα τμήματα που δομούνται επιφανειακά από ανθρακικούς σχηματισμούς και αφετέρου από κατακόρυφες μεταγίσεις του υπερκείμενου κοκκώδη υδροφορέα. Η κίνηση του νερού συντελείται προς τα βορειοανατολικά, από την περιοχή της βόρειας Πάρνηθας. Λόγω της ταχύτατης απαγωγής των καρστικών νερών στην επικαρστική ζώνη αερισμού και παρά το σημαντικό πάχος που μπορεί να έχει μέχρι τη ζώνη του υδροφόρου ορίζοντα η ποιότητα του νερού του καρστικού υδροφορέα, μπορεί να κινδυνεύσει τόσο από φαινόμενα υφαλμύρινσης, όπως έχουν ήδη εντοπιστεί στην παράκτια (και όχι μόνο) περιοχή, αλλά και από την παρουσία ρυπογόνων δραστηριοτήτων στην περιοχή

### **β) Ο ανώτερος υδροφόρος ορίζοντας κοκκωδών σχηματισμών**

Οι κοκκώδεις - εδαφικοί σχηματισμοί αναπτύσσονται κυρίως στο πεδινό τμήμα της υδρολογικής λεκάνης. Η υδροφορία εντοπίζεται κυρίως στους μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, καθώς και στους ανώτερους αδρομερείς ορίζοντες των κροκαλοπαγών και ψαμμιτών του Πλειοπλειστοκαίνου. Παρά την πολύ καλή υδαταγωγιμότητα των υποκείμενων μαργαϊκών ασβεστολίθων, η υδροφορία τους στερείται άμεσης τροφοδοσίας λόγω της παρεμβολής αδιαπέρατων μαργαϊκών οριζόντων. Οι παρεμβολές των μαργών και ερυθρών πηλών, δημιουργεί «εγκιβωτισμένους» επιμέρους υδροφόρους ορίζοντες, οι οποίοι βρίσκονται υπό πίεση ή μερικώς υπό πίεση δίνοντας για το σύνολο της υδροφορίας των μεταλλικών αποθέσεων μια γενική εικόνα ημιελεύθερου χαρακτήρα.

Το μεγαλύτερο υδρογεωλογικό ενδιαφέρον εστιάζεται στους ανώτερους πιο αδρομερείς ορίζοντες του Τεταρτογενούς, οι οποίοι πέρα από την ικανοποιητική υδραυλική αγωγιμότητα που παρουσιάζουν, τροφοδοτούνται άμεσα από τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα.

Η έμμεση σχέση υδροφόρου ορίζοντα και επιφανειακής απορροής, εστιάζεται ουσιαστικά στη διαφοροποίηση του γεωλογικού υποβάθρου κατά μήκος των ρεμάτων, όπου εντοπίζονται πιο αδρομερείς σχηματισμοί κυρίως λόγω της παλαιογεωγραφικής εξέλιξης κατά το Τεταρτογενές. Το υπόγειο νερό ακολουθώντας την πιο «εύκολη» διαδρομή, κινείται από τους ημιπερατούς Νεογενείς σχηματισμούς προς τους περισσότερο περατούς Τεταρτογενείς, οι οποίοι εντοπίζονται στις παλαιοκοίτες των ρεμάτων, μεγάλο μέρος των οποίων ταυτίζεται με το σημερινό υδρογραφικό δίκτυο.



Γενικά φαίνεται να υπάρχει μία σύνθετη υδραυλική επικοινωνία με το υποκείμενο καρστικό σύστημα. Η παρουσία των ανθρακικών σχηματισμών στο νότιο τμήμα της περιοχής μελέτης, που υπόκεινται των Νεογενών, δηλώνει μια ξεκάθαρη τροφοδοσία του καρστικού συστήματος από τον υδροφόρο ορίζοντα των νεοτεταρτογενών

## 2.7. Παράμετροι περιγραφής βραχομάζας

### 2.7.1 Αντοχή συμπαγούς πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη

Η μηχανική αντοχή του πετρώματος από το οποίο δομείται η βραχομάζα εκφράζεται μέσω της αντοχής ( $\sigma_{ci}$ ) που προκύπτει κατά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης σε κυλινδρικά δοκίμια συμπαγούς πετρώματος. Η συγκεκριμένη δοκιμή είναι ευαίσθητη στην παρουσία επιφανειών μικρής αντοχής σε δυσμενή διεύθυνση, όπως επιφάνειες διακλάσεων, ασυνεχειών ή στρώσεων με συνέπεια να επηρεάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών και κατ'επέκταση οι μετρούμενες τιμές της αντοχής να μην είναι αντιπροσωπευτικές της πραγματικής αντοχής του άρρηκτου βράχου. Εκτός από την πειραματική διαδικασία, μια αρχική προσέγγιση του εύρους της μηχανικής αντοχής του πετρώματος γίνεται και με απλή παρατήρηση όπως φαίνεται στον πίνακα στον οποίο δίδονται οι κατηγορίες των πετρωμάτων ανάλογα με την τιμή της αντοχής τους.

Αντοχή $\sigma_{ci}$ (MPa)	Κατηγορία πετρώματος	Περιγραφή δοκιμής
>250	Εξαιρετικά ισχυρό	Δεν θραύεται με γεωλογικό σφυρί
100~250	Πολύ ισχυρό	Θραύεται μετά από αρκετούς χτύπους με γεωλογικό σφυρί
50~100	Ισχυρό	Θραύεται με περισσότερους από ένα χτύπους με γεωλογικό σφυρί
25~50	Μετρίως ισχυρό	Δεν χαράσσεται με μαχαίρι
5~25	Ασθενές	Χαράσσεται δύσκολα με μαχαίρι
1~5	Πολύ ασθενές	Χαράσσεται εύκολα με το μαχαίρι. Δε χαράσσεται με το νύχι
0,25~5	Εξαιρετικά ασθενές	Χαράσσεται με το νύχι

( Κατηγορίες πετρωμάτων με βάση την αντοχή  $\sigma_{ci}$  κατά ISMR,1981 )

Κατηγορία	Βαθμονόμηση	Αντοχή σε $\sigma_{ci}$ (MPa)
A	Πολύ υψηλή αντοχή	>225
B	Υψηλή αντοχή	110-225
C	Μέση αντοχή	55-110
D	Χαμηλή αντοχή	30-55
E	Πολύ χαμηλή αντοχή	<30

(Κατηγορίες πετρωμάτων με βάση την αντοχή  $\sigma_{ci}$  κατά Deere&Miller)

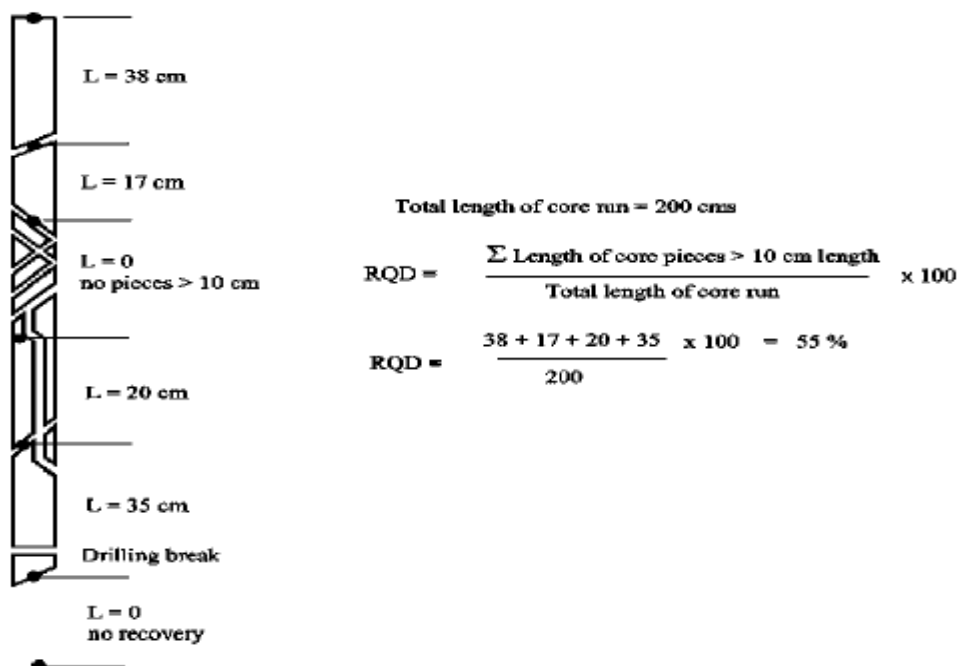
Στις κατηγορίες A και B ανήκουν ο χαλαζίας, ο συμπαγής βασάλτης καθώς και η πλειονότητα των εκρηξιγενών βράχων. Στην κατηγορία C εντάσσονται οι πορώδεις ψαμμίτες και ασβεστόλιθοι ενώ στις D και E οι αργιλικοί βράχοι καθώς και οι αποσαθρωμένοι και εξαλλοιωμένοι αργιλικοί βράχοι ανεξαρτήτως λιθολογικής σύστασης. Η μηχανική αντοχή μιας βραχόμαζας μπορεί να προσδιοριστεί, εκτός από τη δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης, με την δοκιμή και με τη σημειακής φόρτισης δοκιμή κρουσιμέτρου σφύρας Schmidt.

### 2.7.2 Δείκτης ποιότητας βραχόμαζας RQD

Ο δείκτης ποιότητας του πετρώματος αποτελεί ποσοτική εκτίμηση του κερματισμού της βραχόμαζας με βάση πυρήνες γεωτρήσεων (καρότα). Ο δείκτης RQD ορίζεται ως το ποσοστό επί τοις εκατό των τεμαχίων του βράχου άνω των 100mm, σε κάποιο μήκος γεώτρησης. Η σχέση που εκφράζει το RQD είναι :

$$RQD = \frac{\sum L_i > 100 \text{ mm}}{L} * 100 \%$$

ενώ η διαδικασία μέτρησης του μήκους και του υπολογισμού του RQD φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



(Διαδικασία υπολογισμού δείκτη RQD Hoek)

Στον παρακάτω πίνακα δίνεται η κατάταξη των πετρωμάτων με βάση την τιμή RQD:

Ποιότητα πετρώματος	RQD (%)
Πολύ πτωχή	0-25
Πτωχή	25-50
Μέτρια	50-75
Καλή	75-90
Εξαιρετική	90-100

(Συσχέτιση ποιότητας πετρώματος με δείκτη ποιότητας βραχομάζας RQD)

Ο δείκτης RQD δεν εφαρμόζεται εύκολα σε έντονα κερματισμένες βραχομάζες. Παρά την συχνή εφαρμογή του χρειάζεται προσοχή καθώς παρουσιάζει τα παρακάτω μειονεκτήματα :

Είναι πολύ ευαίσθητος σε μικρές μεταβολές του μήκους των πυρήνων. Για παράδειγμα ένας πυρήνας μήκους 101 mm αυξάνει τον δείκτη RQD κατά 10% ενώ ένας πυρήνας μήκους 99 mm δεν προκαλεί καμία αύξηση του δείκτη RQD.

Είναι πολύ ευαίσθητος στον τρόπο της δειγματοληψίας (είδος και διάμετρος του δειγματολήπτη) αλλά και σε λεπτομέρειες της γεώτρησης, όπως η ταχύτητα περιστροφής, η πίεση στην κοπτική κεφαλή, το είδος της κοπτικής

κεφαλής κ.λ.π. Οι παραπάνω παράγοντες μπορούν να προκαλέσουν δευτερογενή κερματισμό του επιτόπου πετρώματος.

Εξαρτάται από το σχετικό προσανατολισμό της γεώτρησης ως προς τις ασυνέχειες της βραχόμαζας. Για παράδειγμα, ο δείκτης RQD μιας γεώτρησης με άξονα παράλληλο προς τις ασυνέχειες δίνει πολύ υψηλότερο δείκτη RQD συγκριτικά με μια γεώτρηση κάθετα στις ασυνέχειες.

### 2.7.3. Συστήματα ταξινόμησης βραχομάζας

#### 2.7.3.1 Σύστημα ταξινόμησης βραχομάζας RMR

Το σύστημα ταξινόμησης βραχομάζας RMR αναπτύχθηκε από τον Bieniawski το 1973 και κατατάσσει την βραχόμαζα κάνοντας συνεκτίμηση των ακόλουθων έξι παραμέτρων. Οι αρχικές παράμετροι έχουν αναλυθεί σε προγενέστερο κεφάλαιο.

Κάθε μία από τις παραπάνω παραμέτρους ταξινομήθηκε από τον Bieniawski και βαθμονομήθηκε με έναν συντελεστή  $R_i$  ανάλογα με την σημασία της καθώς δεν συνεισφέρουν όλες οι παράμετροι εξίσου στην συμπεριφορά της βραχόμαζας.

1. Δείκτης  $R_1$  βάσει της αντοχής του άρρηκτου πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη

Αντοχή $\sigma_c$ (MPa)	Δείκτης $R_1$
>250	15
100~250	12~15
50~100	7~12
25~50	4~7
5~25	2~4
1~5	1~2
<1	0

2. Δείκτης  $R_2$  βάσει του κερματισμού της βραχόμαζας

RQD (%)	Δείκτης R2
>90	20
75-90	17~20
50-75	13~17
25-50	8~13
<25	3

3. Δείκτης R3 βάσει της απόστασης μεταξύ των ασυνεχειών

Απόσταση (m)	Δείκτης R3
>2	20
0.6-2	15~20
0.2-0.6	10~15
0.06-0.2	8~10
<0.06	5

4. Δείκτης R4 βάση της κατάστασης των επιφανειών των ασυνεχειών

Κατάσταση επιφανειών ασυνεχειών	Δείκτης R4
Πολύ τραχείς, χωρίς εξαλλοίωση	30
Ελαφρώς τραχείς, ελαφρά εξαλλοιωμένες, υλικό πλήρωσης < 1mm	25
Ελαφρώς τραχείς, πολύ εξαλλοιωμένες, υλικό πλήρωσης < 1mm	20
Λείες ή γυαλιστερές (slickensided), υλικό πλήρωσης 1-5mm	10
Υλικό πλήρωσης πάχους άνω των 5mm	0

5. Δείκτης R5 βάσει των συνθηκών υπογείων νερών

<b>Παρουσία υπόγειου νερού</b>	<b>Δείκτης R5</b>
Καθόλου νερό	15
Παρουσία υγρασίας	10
Υγρές επιφάνειες	7
Στάγδην	4
Με ροή	0

6. Δείκτης R6 βάσει του προσανατολισμού των ασυνεχειών σε σχέση με τη φορά διάνοιξης του έργου.

<b>Προσανατολισμός ασυνεχειών</b>	<b>Δείκτης R6</b>
Πολύ ευμενής	0
Ευμενής	-2
Αδιάφορος	-5
Δυσμενής	-10
Πολύ δυσμενής	-12

Η τιμή του δείκτη RMR προκύπτει ως άθροιση των παραπάνω δεικτών Ri ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες. Με βάση την τιμή του RMR η βραχόμαζα κατατάσσεται στην ανάλογη κατηγορία :

<b>Κατηγορία βραχόμαζας</b>	<b>Τιμές του δείκτη RMR</b>
Πολύ καλή - I	81-100
Καλή - II	61-80
Μέτρια - III	41-60
Πτωχή - IV	21-40
Πολύ πτωχή - V	0-20

Η χρήση του συστήματος ταξινόμησης RMR παρουσιάζει ορισμένες ιδιαιτερότητες. Ο δείκτης RMR αναπτύχθηκε με βάση την εμπειρία από στοές ορυχείων όπου η βραχόμαζα είναι συνήθως καλής ποιότητας ( $RMR > 40$ ). Για βραχόμαζα πτωχής ποιότητας ( $RMR < 40$ ) η μέθοδος δεν δίνει βάσιμα αποτελέσματα επειδή δεν διαθέτει επαρκές εύρος τιμών όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα :

Παράμετρος	Τιμές	Πιθανές τιμές του δείκτη
Αντοχή	<5 Μpa	0,1,2
RQD	<25%	3
Απόσταση ασυνεχειών	<15 cm	5,8,9
Κατάσταση συνεχειών	Με υλικό πλήρωσης	0,1
Παρουσία νερού	Υγρές-Στάγδην	4,7
Προσανατολισμός ασυνεχειών	Αδιάφορος	-5

Επιπρόσθετος παράγοντας είναι η σημαντική επιρροή στην τελική τιμή RMR, του δείκτη R4 ο οποίος εκφράζει την κατάσταση των επιφανειών των ασυνεχειών. Ο δείκτης R4 έχει ιδιαίτερα μεγάλο εύρος τιμών από 0 έως 10 εάν το πάχος του υλικού πλήρωσης είναι αντίστοιχα ελαφρώς περισσότερο ή ελαφρώς λιγότερο από 5 mm. Επομένως η τιμή του RMR μπορεί να αλλάξει κατά 10 ολόκληρες μονάδες δηλ. ποσοστό 50% της συνολικής, εάν το πάχος μεταβληθεί από 4,9 mm σε 5,1 mm. Αν σε αυτό συνυπολογιστεί και η μεγάλη αβεβαιότητα που περιέχει η εκτίμηση του πάχους του υλικού πλήρωσης γίνεται προφανές ότι η επιρροή του συγκεκριμένου δείκτη είναι υπερβολική. Κατά τη χρήση του δείκτη RMR για την εκτίμηση των μηχανικών παραμέτρων αντοχής και παραμορφωσιμότητας της βραχώμαζας συνιστάται ο υπολογισμός του RMR να γίνεται με άθροιση των πρώτων 5 δεικτών δηλ. χωρίς συμμετοχή της επιρροής του προσανατολισμού των ασυνεχειών σε σχέση με τη φορά διάνοιξης του έργου, δεδομένου ότι η επιρροή αυτή λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό της διάνοιξης και άμεσης υποστήριξης του έργου με διαφορετικό τρόπο.

Μετά την κατάταξη της βραχώμαζας μέσω του δείκτη RMR είναι δυνατή η συσχέτιση της κάθε κατηγορίας με τα προτεινόμενα μέτρα υποστήριξης για σήραγγες :

Κατάταξη Βραχώμαζας	Εκσκαφή	Αγκύρια Βράχου (Διαμέτρου 20mm, πληρωμένα με σκυρόδεμα)	Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα	Μεταλλικά Πλαίσια
I - Πολύ καλή βραχώμαζα RMR: 81-100	Όλο το μέτωπο Βήμα προκάμησης: 3m	Γενικά δεν απαιτούνται μέτρα υποστήριξης εκτός από τοπικές αγκυρώσεις βράχου		
II - Καλή βραχώμαζα RMR: 61-80	Όλο το μέτωπο Βήμα προκάμησης: 1-1,5m Ολοκληρωμένη υποστήριξη 20m από το μέτωπο	Τοπικά, αγκύρια βράχου στον θόλο μήκους 3m, απόστασης 2,5m, περιστασιακά με	50mm στο θόλο όταν απαιτείται	Κανένα
III - Μέτρια βραχώμαζα RMR: 41-60	A' φάση και B' φάση Βήμα προκάμησης: 1,5-3m Εκκίνηση τοποθέτησης μέτρων υποστήριξης αμέσως μετά την εκσκαφή Ολοκληρωμένη υποστήριξη 20m από το μέτωπο	Συστηματικές αγκυρώσεις βράχου μήκους 4m, απόστασης 1,5-2m στο θόλο και τα τοιχώματα, με συρματόσχοινα στο θόλο	50-100mm στο θόλο και 30mm στα τοιχώματα	Κανένα
IV - Πτωχή βραχώμαζα RMR: 21-40	A' φάση και B' φάση Βήμα προκάμησης: 1-1,5m Τοποθέτηση μέτρων υποστήριξης ταυτόχρονα με την εκσκαφή Ολοκληρωμένη υποστήριξη 10m από το μέτωπο	Συστηματικές αγκυρώσεις βράχου μήκους 4-5m, απόστασης 1-1,5m στο θόλο και τα τοιχώματα, με συρματόσχοινα	100-150mm στο θόλο και 100mm στα τοιχώματα	Ελαφρές έως μέτριες υποστηρίξεις ανά 1,5 m, όπου απαιτείται
V - Πολύ πτωχή βραχώμαζα RMR: <20	Πολλαπλά στάδια εκσκαφής στην A' φάση Βήμα προκάμησης: 0,5-1,5m Τοποθέτηση μέτρων υποστήριξης ταυτόχρονα με την εκσκαφή Εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος όσο το δυνατόν ταχύτερα	Συστηματικές αγκυρώσεις βράχου μήκους 5-6m, απόστασης 1-1,5m στο θόλο και τα τοιχώματα, με συρματόσχοινα Αγκύρωση ανάστροφου τόξου	150-200mm στο θόλο, 150mm στα τοιχώματα και 50mm στο μέτωπο	Μέτριες έως βαριές υποστηρίξεις ανά 0,75 m, με επένδυση από χαλυβδόφυλα αν απαιτείται. Κλείσιμο του ανάστροφου τόξου.

(Επιλογή μέτρων προσωρινής υποστήριξης σε σήραγγα πεταλοειδούς διατομής, εύρους 10 μέτρων )

#### 2.7.4 Σύστημα ταξινόμησης Q των Barton , N.G.I

Η ταξινόμηση που περιγράφεται κινείται στο ίδιο πνεύμα με τον Bieniawski και την ταξινόμηση RMR αλλά δίνει μεγαλύτερη βαρύτητα σε παραμέτρους όπως η τραχύτητα των ασυνεχειών , τα χαρακτηριστικά αντοχής (τριβή) του υλικού πληρώσεως τους και το γεωστατικό φορτίο.

Η ταξινόμηση που προτείνεται και η συσχέτιση της με την ευστάθεια των σηράγγων βασίστηκε σε 200 πραγματικές περιπτώσεις, ώστε οι συστάσεις για την υποστήριξη να είναι λεπτομερείς και να καλύπτουν μεγάλο εύρος βραχομαζών. Σε αντίθεση με την ταξινόμηση του Bieniawski κατά RMR, αυτή η μέθοδος στηρίζεται μόνο σε δεδομένα από σήραγγες. Η ποιότητα της βραχώμαζας με συνδυασμό 6 παραμέτρων εκτιμάται ως εξής :



$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF}$$

όπου :  $RQD$  = δείκτης κερματισμού της βραχόμαζας  
 $J_n$  = δείκτης του αριθμού των συστημάτων των ασυνεχειών  
 $J_r$  = βαθμός τραχύτητας των επιφανειών των ασυνεχειών  
 $J_a$  = βαθμός εξαλλοίωσης των επιφανειών των ασυνεχειών  
 $J_w$  = συντελεστής επιρροής του υπογείου νερού  
 $SRF$  = συντελεστής απομείωσης λόγω υψηλών τάσεων

Η τελευταία παράμετρος  $SRF$  είναι δύσκολο να εκτιμηθεί στα πρώτα στάδια του έργου. Εφ' όσον η παράμετρος αυτή εξαιρεθεί θα μπορούσε να είναι μια μέθοδος ταξινόμησης της αντοχής της μάζας του πετρώματος. Εφ' όσον υπάρχουν περισσότερα από ένα συστήματα ασυνεχειών πρέπει να λαμβάνεται υπόψη εκείνο που δίνει το μικρότερο λόγο  $J_r / J_n$ . Ο λόγος  $(RQD/J_n)$  εκφράζει το μέγεθος του τεμάχους βράχου, ο δεύτερος  $(J_r/J_a)$  την αντοχή σε διάτμηση μεταξύ των τεμαχίων και ο τρίτος  $(J_w/SRF)$  την ενεργό τάση. Η ελάχιστη τιμή του δείκτη  $RQD$  που χρησιμοποιείται στον υπολογισμό είναι 10, ενώ μια  $\pm 5\%$  είναι ακρίβεια ικανοποιητική. Η περιγραφή της βραχόμαζας και η βαθμολόγηση των παραμέτρων δίνονται στον παρακάτω πίνακα :

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΤΙΜΗ	ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ	
<b>1. Ποιότητα βραχώμαζας</b>	<b>RQD</b>	<p>1. Όταν το RQD αναφέρεται <math>\leq 10</math> (συμπεριλαμβάνοντας το 0), θεωρούμε την τιμή 10 για τον υπολογισμό του Q.</p> <p>2. Τιμές του RQD με ακρίβεια 5 μονάδων π.χ. 100, 95, 90 κ.τ.λ. θεωρούνται ακριβείς αρκετά.</p>	
A. Πολύ πτωχή	0 - 25		
B. Πτωχή	25 - 50		
C. Μέτρια	50 - 75		
D. Καλή	75 - 90		
E. Άριστη	90 - 100		
<b>2. Αριθμός συστημάτων ασυνεχειών</b>	<b>J n</b>	<p>1. Για διασταυρώσεις τριπλασιάζονται οι τιμές (<math>3.0 \times J</math>).</p> <p>2. Για εισόδους διπλασιάζονται οι τιμές (<math>2.0 \times J</math>).</p>	
A. Συμπαγές, χωρίς ή με λίγες διακλάσεις	0.5 - 1.0		
B. Ένα σύστημα διακλάσεων	2		
C. Ένα σύστημα διακλάσεων και επικλόν τυχαίες	3		
D. Δύο συστήματα διακλάσεων	4		
E. Δύο συστήματα διακλάσεων και επικλόν τυχαίες	6		
F. Τρία συστήματα διακλάσεων	9		
G. Τρία συστήματα διακλάσεων και επικλόν τυχαίες	12		
H. Τέσσερα ή περισσότερα συστήματα διακλάσεων, τυχαίες, ισχυρά διακλασμένο, «κόβιοι ζάχαρης», κ.τ.λ.	15		
J. Κοινορτοποιημένο πέτρωμα με μορφή εδαφικού σχηματισμού	20		
<b>3. Συντελεστής τραχύτητας διακλάσεων</b>	<b>Jr</b>	<p>1. Προστίθεται 1.0 στην περίπτωση που η απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών υπερβαίνει τα 3 m.</p> <p>2. <math>J = 0.5</math> μπορεί να χρησιμοποιηθεί για επίπεδες, ολισθηρές ασυνέχειες με προσανατολισμένες γραμμώσεις κατά τη διεύθυνση της ελάχιστης αντοχής.</p>	
<b>a. Τοιχώματα βράχων σε επαφή</b>			
<b>b. Τοιχώματα βράχων σε επαφή πριν από διάτμηση</b>			
A. Ασυνεχείς διακλάσεις	4		
B. Τραχείες και κοματώδεις, ακανόνιστες	3		
C. Λείες, κοματώδεις	2		
D. Ολισθηρές κοματώδεις	1.5		
E. Τραχείες ή ακανόνιστες επίπεδες	1.5		
F. Λείες επίπεδες	1.0		
G. Ολισθηρές επίπεδες	0.5		
<b>c. Τοιχώματα βράχων χωρίς επαφή κατά τη διάτμηση</b>			
H. Ζώνη με ορυκτά αργίλου πάχους αρκετού ώστε να μην εφάπτονται τα τοιχώματα	1.0 (ονομαστικά)		
J. Αμμόδεις, χαλικώδεις ή θραυστές ζώνες αρκετού πάχους ώστε να εμποδίζεται η επαφή των τοιχωμάτων του πετρώματος	1.0 (ονομαστικά)		
<b>4. Αποσάθρωση τοιχωμάτων διακλάσεων</b>	<b>Ja</b>	φρ μοίρες(περίπου)	<p>1. Οι τιμές του φρ, είναι μία κατά προσέγγιση ένδειξη των ορυκτολογικών ιδιοτήτων των προϊόντων εξαλλοίωσης αν αυτά υπάρχουν</p>
<b>a. Επαφή τοιχωμάτων</b>			
A. Πληρωμένες, υγείς, σκληρές, αδιαπέρατο υλικό πλήρωσης όπως χαλαζίας	0.75		
B. Επιφανειακά λεκιασμένα μόνο τοιχώματα, δεν υπάρχει αποσάθρωση	1.0	25 - 35	
C. Ελαφρά αποσθρωμένα τοιχώματα διακλάσεων. Μη μαλακές επιστρώσεις ορυκτών, αμμόδεις κόκκοι, μη αργιλώδες αποσυντηθημένο πέτρωμα	2.0	25 - 30	
D. Πυώδεις ή αμμόδεις επιστρώσεις αργίλου, μικρό κλάσμα αργίλου	3.0	20 - 25	
E. Μαλακές ή μικρής τριβής ψ επιστρώσεις από αργιλικά ορυκτά (καοлинίτη, μαρμαρυγίτες) επίσης τάλκης, χλωρίτης, γύψος, γραφίτης και μικρές ποσότητες από διογκούμενες αργίλους.	4.0	8 - 16	

<b>b. Με υλικό πλήρωσης. Τοιχώματα με επαφή 10cm πριν από διάτμηση</b>			
F. Αμμόδεις κόκκοι χωρίς άργιλο, κονιορτοποιημένο πέτρωμα	4.0		
G. Ισχυρά υπερστερεοποιημένα μη μαλακά αργιλικά ορυκτά ως υλικό πλήρωσης (συνεχείς < 5 mm πάχος)	6.0	16 - 24	
H. Μέσα ή χαμηλά υπερστερεοποιημένα μη μαλακά αργιλικά ορυκτά ως υλικό πλήρωσης (συνεχείς < 5 mm πάχος)	8.0	12 - 16	
J. Διογκούμενη άργιλος πλήρωσης όπως μονορυλλονίτης (συνεχείς < 5 mm πάχος). Οι τιμές του Ja εξαρτώνται από το ποσοστό διογκούμενης άργιλου και την πρόσβαση σε νερό	8.0 - 12.0	6 - 12	
<b>c. Τοιχώματα βράχων χωρίς επαφή κατά τη διάτμηση</b>			
K,L,M. Ζώνες ή τμήματα από αποσυντεθημένο ή θρυμματισμένο πέτρωμα και άργιλο, ανάλογα με τον τύπο του αργιλικού υλικού (βλ. G,H,J)	6.0, 8.0 ή 8.0-12.0	6 - 24	
N. Ζώνες ή τμήματα από ιλλιώδη ή αμμόδη άργιλο, μικρή ποσότητα μαλακής άργιλου.	5.0		
O. Στεφνή άργιλος >5mm πάχος, συνεχείς	10.0 - 13.0		
P. & R. (βλ. G,H και J για καταστάσεις της άργιλου)	6.0 - 24.0		
<b>5. Κατάσταση νερού των διακλάσεων</b>	<b>J w</b>	<b>Πίεση νερού (kgf/cm<sup>2</sup>)</b>	
A. Ξηρή εκσκαφή με λίγες εισροές < 5 l/m τοπικά	1.0	< 1.0	
B. Μέση εισροή νερού ή πίεση, περιστασιακή έκπλυση υλικού πλήρωσης	0.66	1.0 - 2.5	
C. Μεγάλη εισροή ή υψηλή πίεση σε ρωγμές χωρίς υλικό πλήρωσης	0.5	2.5 - 10.0	
D. Μεγάλη εισροή ή υψηλή πίεση σε ρωγμές με υλικό πλήρωσης	0.33	2.5 - 10.0	
E. Εξαιρετικά υψηλή εισροή ή πίεση υπό εκτόνωση με προοδευτική μείωση με τον χρόνο	0.2 - 0.1	> 10	
F. Εξαιρετικά υψηλή εισροή ή πίεση χωρίς προοδευτική μείωση με τον χρόνο	0.1 - 0.05	> 10	
<b>6. Συντελεστής μείωσης τάσεων</b>		<b>SRF</b>	
<b>a. Ασθενούς αντοχής ζώνες που τέμνουν την εκσκαφή και που μπορούν να προκαλέσουν χαλάρωση βραχώμαζας κατά τη διάνοιξη της σήραγγας</b>			
A. Πολλαπλές εμφανίσεις ασθενών ζωνών με αργιλικό υλικό ή χημικά αλλοιωμένο πέτρωμα, πολύ χαλαρό περιβάλλον πέτρωμα (για οποιοδήποτε βάθος)		10.0	
B. Μεμονωμένες εμφανίσεις ασθενών ζωνών με αργιλικό υλικό ή χημικά αλλοιωμένο πέτρωμα (βάθος εκσκαφής <50 m)		5.0	
C. Μεμονωμένες εμφανίσεις ασθενών ζωνών με αργιλικό υλικό ή χημικά αλλοιωμένο πέτρωμα (βάθος εκσκαφής >50 m)		2.5	
D. Πολλαπλές ζώνες διάτμησης σε συμπαγές πέτρωμα χωρίς αργιλικό υλικό πλήρωσης, χαλαρό περιβάλλον πέτρωμα (για οποιοδήποτε βάθος)		7.5	
E. Μεμονωμένες ζώνες διάτμησης σε συμπαγές πέτρωμα χωρίς αργιλικό υλικό πλήρωσης, χαλαρό περιβάλλον πέτρωμα (βάθος εκσκαφής < 50 m)		5.0	
F. Μεμονωμένες ζώνες διάτμησης σε συμπαγές πέτρωμα χωρίς αργιλικό υλικό πλήρωσης, χαλαρό περιβάλλον πέτρωμα (βάθος εκσκαφής > 50 m)		2.5	
G. Χαλαρές ανοιχτές ασυνέχειες. Έντονα διακλασμένη μάζα ή «κύβιοι ζάχαρης» (για οποιοδήποτε βάθος)		5.0	
			1. Factors C to F are crude estimates; increase J if drainage installed. 2. Special problems caused by ice formation are not considered.
			1. Μείωση των τιμών SRF κατά 25 - 50% όταν οι ασθενείς ζώνες διάτμησης δεν τέμνουν την εκσκαφή

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ		ΤΙΜΗ		ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ
6. Συντελεστής μείωσης τάσεων			SRF	
b. Συμπαγές πέτρωμα, πέτρωμα με προβλήματα τάσεων	$\sigma_1/\sigma_3$	$\sigma_1$		
H. Χαμηλές τάσεις, κοντά στην επιφάνεια	> 200	> 13	2.5	
J. Μέσες τάσεις	200 - 10	13 - 0.66	1.0	
K. Υψηλές τάσεις, πολύ συμπαγής δομή (συνήθως ευνοϊκή επίδραση στην ευστάθεια, δυνατή όμως δυσμενής επίδραση στην ευστάθεια των τοιχωμάτων)	10 - 5	0.66 - 0.33	0.5 - 2	
L. Ελαφρά εκτίναξη συμπαγούς πετρώματος	5 - 2.5	0.33 - 0.16	5 - 10	
M. Έντονη εκτίναξη συμπαγούς πετρώματος	< 2.5	< 0.16	10 - 20	
c. Συμπίεστο πέτρωμα, πλαστική ροή όγκιμου πετρώματος κάτω από υψηλές πιέσεις				
N. Μέτρια πίεση από τη συμπίεστικότητα			5 - 10	
O. Υψηλή πίεση από τη συμπίεστικότητα			10 - 20	
d. Διογκούμενο πέτρωμα με χημική διάγκωση σε συνάρτηση με την πίεση του νερού				
P. Μέτρια πίεση από τη διάγκωση			5 - 10	
R. Υψηλή πίεση από τη διάγκωση			10 - 15	

2. Σε έντονα ανισότροπο πεδίο (αν μετρηθεί):  
όταν  $5 \leq \sigma_1 / \sigma_3 \leq 10$ , μειώνεται η  $\sigma_c$   
σε  $0.8\sigma_c$  και η  $\sigma_t$  σε  $0.8\sigma_t$ , όταν  $\sigma_1 / \sigma_3 > 10$ ,  
Μειώνεται η  $\sigma_c$  και η  $\sigma_t$  σε  $0.6\sigma_c$  και  $0.6\sigma_t$ , όπου  
 $\sigma_c$  = αντοχή στη μονοαξονική θλίψη, και  
 $\sigma_t$  = αντοχή σε εφελκυσμό (φόρτιση αιχμής) και  
 $\sigma_3$  είναι η μέγιστη και ελάχιστη κύρια τάση.

3. Λίγα στοιχεία διαθέσιμα για περιπτώσεις σήραγγας σε βάθος μικρότερο από το εύρος της.  
Προτείνεται αύξηση του SRF από 2.5 έως 5 για τέτοιες περιπτώσεις (βλ. Η).

(Γεωτεχνική ταξινόμηση κατά Barton .Αντιστοιχία περιγραφής και τιμών δεικτών για τον υπολογισμό του Q.)

Επομένως, με βάση τους παραπάνω πίνακες βρίσκεται η τιμή του δείκτη ποιότητας κατά το σύστημα Q και ακολούθως η βραχόμαζα κατατάσσεται σε κατηγορίες σύμφωνα με τα παρακάτω:

Q	Κλάση	Ποιότητα βραχομάζας
> 400	Q-Ia	εξαιρετικά καλή
100 ~ 400	Q-Ib	πάρα πολύ καλή
40 ~ 100	Q-II	πολύ καλή
10 ~ 40	Q-IIIa	καλή
4 ~ 10	Q-IIIb	μέτρια
1 ~ 4	Q-IV a	πτωγή
0.1 ~ 1	Q- IV b	πολύ πτωγή
0.01 ~ 0.1	Q- V a	πάρα πολύ πτωγή
< 0.1	Q- V b	εξαιρετικά πτωγή

Κατάταξη βραχόμαζας με το σύστημα Q (Barton, 1974 )

### 2.7.5. Ταξινόμηση με το σύστημα GSI







Ο γεωλογικός δείκτης αντοχής GSI εισήχθη από τους Hoek E. και Marinos P το. 1995 και παρέχει ένα σύστημα για την εκτίμηση της μείωσης της αντοχής της βραχώμαζας για διαφορετικές γεωλογικές συνθήκες. Το σύστημα GSI βασίζεται στην οπτική παρατήρηση και συναξιολόγηση των παρακάτω παραμέτρων:

- i. Της δομής της βραχώμαζας, η οποία χαρακτηρίζει το βαθμό αλληλεμπλοκής των βραχωδών τεμαχών
- ii. Της κατάστασης των επιφανειών των ασυνεχειών, η οποία χαρακτηρίζει το μέγεθος της διατμητικής αντοχής τους.

Το σύστημα GSI προϋποθέτει ότι η βραχώμαζα συμπεριφέρεται ισοτροπικά και δεν υπάρχουν προτιμητέες διευθύνσεις αστοχίας. Μπορεί όμως να εφαρμοστεί με παραδεκτή ανοχή και σε ανισότροπα μέσα αν η θραύση δεν ελέγχεται από την ανισοτροπία. Πάντως στην περίπτωση όπου η βραχώμαζα είναι έντονα διακλασμένη και η συνέχεια των εμμενουσών ασυνεχειών είναι διαταραγμένη, η βραχώμαζα μπορεί να συμπεριφέρεται ισοτροπικά.

Το σύστημα GSI σχεδιάστηκε ώστε να είναι συμβατό με το σύστημα RMR για βραχώμαζες με  $RMR > 40$ , δηλαδή οι τιμές του δείκτη GSI είναι περίπου ίσες με τις αντίστοιχες του δείκτη RMR. Για βραχώμαζες με  $RMR < 40$ , το σύστημα GSI πλεονεκτεί γιατί παρέχει καλύτερη διακριτοποίηση, χωρίς απότομες μεταβολές του δείκτη, ενώ ταυτόχρονα παραμένει συμβατό με το σύστημα RMR. Οι μηχανικοί έκαναν προσπάθεια να συσχετίσουν τα συστήματα ταξινόμησης RMR και Q με το GSI και ο τύπος που προτάθηκε είναι  $GSI = RMR - Q$ . Ωστόσο σύμφωνα με τους Marinos and Hoek η συσχέτιση είναι επιτυχής για βραχώμαζες καλύτερης ποιότητας αλλά δεν συνίσταται η χρήση της για ασθενείς και ετερογενείς βραχώμαζες.

Το σύστημα GSI εφαρμόζεται σε βραχώμαζες με αλληλεμπλοκή μεταξύ των βραχωδών τεμαχών δηλαδή σε βραχώμαζες με μικρή συμμετοχή του εδαφικού υλικού σε ποσοστό μικρότερο του 20% του συνολικού όγκου της βραχώμαζας. Η χρήση του στηρίζεται στον παρακάτω πίνακα :

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

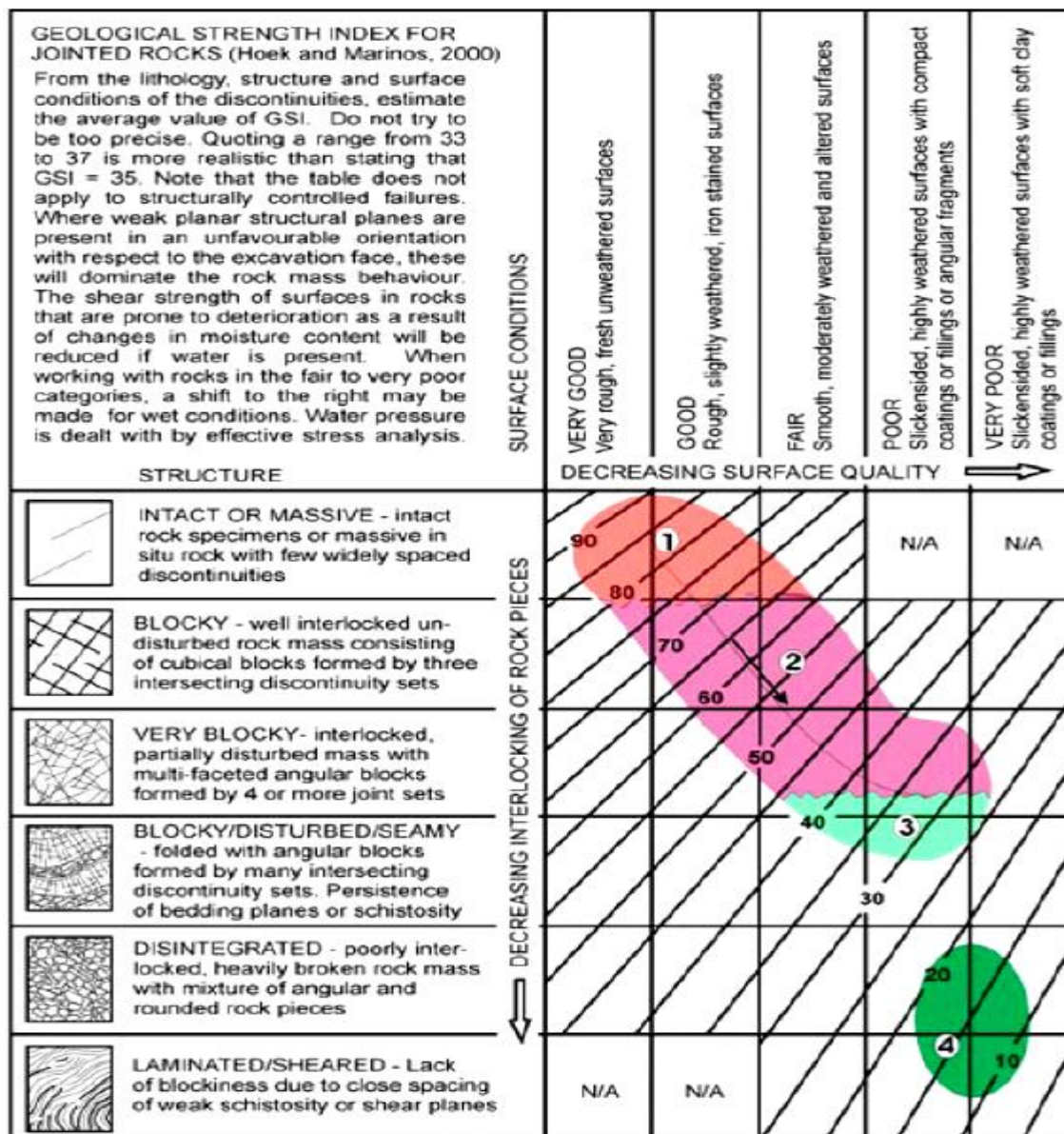
Γεωλογικός δείκτης αντοχής (GSI) (Hoek and Marinos, 2000)

Σε ετερογενείς και συχνά ασθενείς σχηματισμούς όπως οι οφιόλιθοι και ο φλύσχος είναι δύσκολος ο προσδιορισμός της μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη του άρρηκτου πετρώματος αφού είναι δύσκολο να βρεθεί κατάλληλο άρρηκτο τεμάχος για τον εργαστηριακό έλεγχο. Για τον λόγο αυτό αντί της δοκιμής της μονοαξονικής θλίψης προτείνεται ο έλεγχος της σημειακής φόρτισης σε δείγματα. Παρ'όλα αυτά η δοκιμή αυτή δεν δίνει αποτελέσματα σε πολύ ασθενή πετρώματα όπως οι αργιλικοί σχιστόλιθοι ή οι κερματισμένοι ιλυόλιθοι. Τα τελευταία προσδιορίζονται με ποιοτική περιγραφή ώστε να προσδιοριστεί έμμεσα το  $\sigma_{ci}$ . Η ταξινόμηση ετερογενών πετρωμάτων όπως ο φλύσχος γίνεται σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα :

ΔΕΙΚΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ (GSI) ΣΕ ΕΤΕΡΟΓΕΝΕΙΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΕΣ ΟΠΩΣ Ο ΦΛΥΣΧΗΣ (B. Marinos, 2007)		ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΣ (κυρίως επίπεδα στρώσης)				ΜΕΙΩΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΣ			
ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ	ΜΕΤΡΙΑ	ΠΤΩΧΗ	ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ	ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ	ΜΕΤΡΙΑ	ΠΤΩΧΗ	ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ
Επιφάνειες	Τραχιές, ελαφρά ανσοβρωμένες και	Ελαφρώς ανσοβρωμένες και	Αλείς, μετρίως ανσοβρωμένες και	Υλικό πλήρως με γλυκή βρωμάτωση	Πολύ τραχιές, υγρές, μη ανσοβρωμένες	Τραχιές, ελαφρά ανσοβρωμένες και	Ελαφρώς ανσοβρωμένες	Αλείς, μετρίως ανσοβρωμένες και	Υλικό πλήρως με γλυκή βρωμάτωση
<p><b>ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΣΥΣΤΑΣΗ</b></p> <p><b>ΤΥΠΟΣ I.</b> Αδιάρτακτος, μεσοστρωματώδης έως παχυστρωματώδης ψαμμίτης με σποραδικές πολύ λεπτούς ιαλύθους (λιωλίθους). Σε αβρέτες σφαιρικές ή πριονί αν ο μηχανισμός σσθήσεως λόγω έλλειψης πλευρικού παρεμπόδιου (χολορή δομή). Έχει κινηματικό χαρακτήρα που ελέγχεται από τα επίπεδα στρώσης, τότε δεν εφαρμόζεται ο δείκτης GSI</p> <p><b>ΤΥΠΟΣ II.</b> Αδιάρτακτος, συμπαγής ιαλύθους (δεν διακρίνονται τα επίπεδα στρώσεων) με σποραδικές, λεπτές ενστρώσεις ψαμμίτων</p> <p><b>ΤΥΠΟΣ III.</b> Μέτρια διαταραγμένος διαστρωμένος ψαμμίτης με λεπτές ενστρώσεις ιαλύθων</p> <p><b>ΤΥΠΟΣ IV.</b> Μέτρια διαταραγμένη βραχώμαλα που αποτελείται από ψαμμίτη με λεπτές ενστρώσεις ιαλύθους σε ίσες περιόδους αναλογίας</p> <p><b>ΤΥΠΟΣ V.</b> Μέτρια διαταραγμένος ιαλύθους με ενστρώσεις ψαμμίτων</p> <p><b>ΤΥΠΟΣ VI.</b> Μέτρια διαταραγμένος ιαλύθους με αραιές ενστρώσεις ψαμμίτων</p> <p><b>ΤΥΠΟΣ VII.</b> Έντονα διαταραγμένη - πτυχωμένη βραχώμαλα, η οποία διατρεί τη δομή της και αποτελείται από εναλλαγές ψαμμίτη και ιαλύθου <u>σε ίσες περιόδους αναλογίας</u></p> <p><b>ΤΥΠΟΣ VIII.</b> Έντονα διαταραγμένη- πτυχωμένη βραχώμαλα, η οποία διατρεί τη δομή της και δεν έχει παραμορφωθεί- διατρεί σε μεγάλο βαθμό και αποτελείται από ιαλύθους και αραιά σχιστολίθους με ενστρώσεις ψαμμίτη</p> <p><b>ΤΥΠΟΣ IX.</b> Αποδιοργανωμένη βραχώμαλα που απαντάται συνήθως σε μεγάλες ζώνες ρηγματίων ή/και έντονης αποσθρωσης. Στον τύπο αυτό απαντώνται κυρίως φαθούρα γεωλιτικά με διαταραγμένο ιαλύθικο υλικό ανάμεσα</p> <p><b>ΤΥΠΟΣ X.</b> Τεκτονικά παραμορφωμένος, έντονα πτυχωμένος, διατμημένος ιαλύθους ή αραιά σχιστολίθος με κερματισμένα και παραμορφωμένα ψαμμίτικα τεμάχια που διαμορφώνουν σχεδόν χαστική δομή. Οι στρώσεις του ψαμμίτη παραμένουν παράλληλες με αυτές του ιαλύθου</p> <p><b>ΤΥΠΟΣ XI.</b> Τεκτονικός, ισχυρά διατμημένος ιαλύθους ή αραιός σχιστολίθος σε χαστική δομή με βύλακες αργίλου. Λεπτά στρώματα ψαμμίτη έχουν μετατραπεί σε κερματισμένα πολύ μικρά βραχώδη τεμάχια. Ορισικά ή συμπεριφορά των γεωλιτικών μπορεί να προσομοιωθεί με εδωφικά</p>		<p>80</p> <p>70</p> <p>60</p> <p>50</p> <p>40</p> <p>30</p> <p>20</p> <p>10</p>							

(Δείκτης γεωλογικής αντοχής σε ετερογενείς βραχώμαζες όπως ο φλύσσης)

Στον επόμενο πίνακα απεικονίζεται το εύρος τιμών του δείκτη GSI για διάφορους τύπους οφιολίθων. Εξαιτίας του τρόπου σχηματισμού του οφιολιθικού συμπλέγματος, της ακανόνιστης γεωμετρίας του με το βάθος αλλά και της τάσης του να ρωγατώνεται και να αποσθρώνεται, η ποιότητα βραχόμαζας των οφιολίθων έχει ένα εύρος από άριστη έως πολύ πτωχή. Οι εξαιρετικής ποιότητας βραχόμαζες αντιστοιχούν σε τμήματα πετρώματος τα οποία δεν έχουν έρθει σε επαφή με παράγοντες εξαλλοίωσης, ενώ οι πτωχής ποιότητας βραχόμαζες οφιολίθων είναι εκείνες που έχουν υποστεί διεργασίες όπως η σερπεντινίωση.



Εύρος τιμών GSI για διάφορους τύπους οφιολίθων (Hoek E., Marinos P., 2000)



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### 3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ

Η επιλογή της μεθόδου διάνοιξης της σήραγγας είναι ευθύνη της αναδόχου εταιρείας του έργου. Με βάση τα γεωτεχνικά στοιχεία από έρευνες που διεξάχθηκαν με την βοήθεια γεωτρήσεων καθώς και τις επιτόπου συνθήκες που επικρατούν σε κάθε τμήμα, η εταιρεία υπέβαλε λεπτομερή παρουσίαση και πλήρη τεκμηρίωση των μεθόδων που πρόκειται να χρησιμοποιήσει. Στην διαδικασία αυτή συμπεριλαμβάνονται και οι οικονομικές μελέτες καθώς και αντίστοιχα χρονοδιαγράμματα, για να υπολογιστούν όλα τα παραπάνω λαμβάνονται υπόψη πιθανές δυσμενείς συνθήκες.

#### 3.1. Τμήμα χ.θ 0+337 – 0+475

Για την διάνοιξη της σήραγγας στην θέση 0+337 – 0+475 χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος NATM, όπου είναι γνωστή ως Αυστριακή μέθοδος. Αποφασίστηκε να γίνει εκσκαφή με συνδυασμό ανατινάξεων και μηχανικών μέσων. Ο λόγος που επιλέχθηκε αυτός ο συνδυασμός είναι το να παραμείνει όσο το δυνατό πιο κανονικό και λείο το περίγραμμα της εκσκαφής.

Με τη παραπάνω μέθοδο που επιλέχτηκε εξουδετερώνεται πλήρως και ελαχιστοποιείται η υπερεκσκαφή που προκαλείται κατά την διαδικασία των (διατηρημάτων – ανατινάξεων). Βέβαια η εταιρεία ανέλαβε να εκτελεί τις ανατινάξεις με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφεύγεται η διαταραχή και χαλάρωση του πετρώματος πέρα από τις προβλεπόμενες από τη μελέτη γραμμές εκσκαφής. Πρώτα πυροδοτούνται τα εκρηκτικά (προεκσκαφής) στο μέσο της διατομής και στη συνέχεια τα υπόλοιπα αναγκαία σημεία.

Οι μεγάλες εκσκαφές συντελούν στην εξασθένηση της περιβάλλουσας βραχομάζας και δημιουργούν προβλήματα υποστήριξης. Επιπλέον συνεπάγονται την εκτέλεση πρόσθετων εργασιών (πλήρωση των κοιλοτήτων με εκτοξευμένο σκυρόδεμα, μεταφορά των προϊόντων εκσκαφής).

Έχοντας όλες αυτές τις παραμέτρους κατά νου οι υπεύθυνοι του έργου εφάρμοσαν μεθόδους ελεγχόμενης ανατίναξης με σκοπό,

- ∅ Τη μείωση της ρηγματώσης του πετρώματος με το σχηματισμό μιας επιφάνειας μετάτμησης.

- ∅ Τη μείωση της υπερβάλλουσας εκσκαφής.
- ∅ Την καλύτερη εκμετάλλευση της ενέργειας της έκρηξης, για θρυμματισμό του εξορυσσόμενου υλικού.
- ∅ Τη μείωση των παραγόμενων δονήσεων.

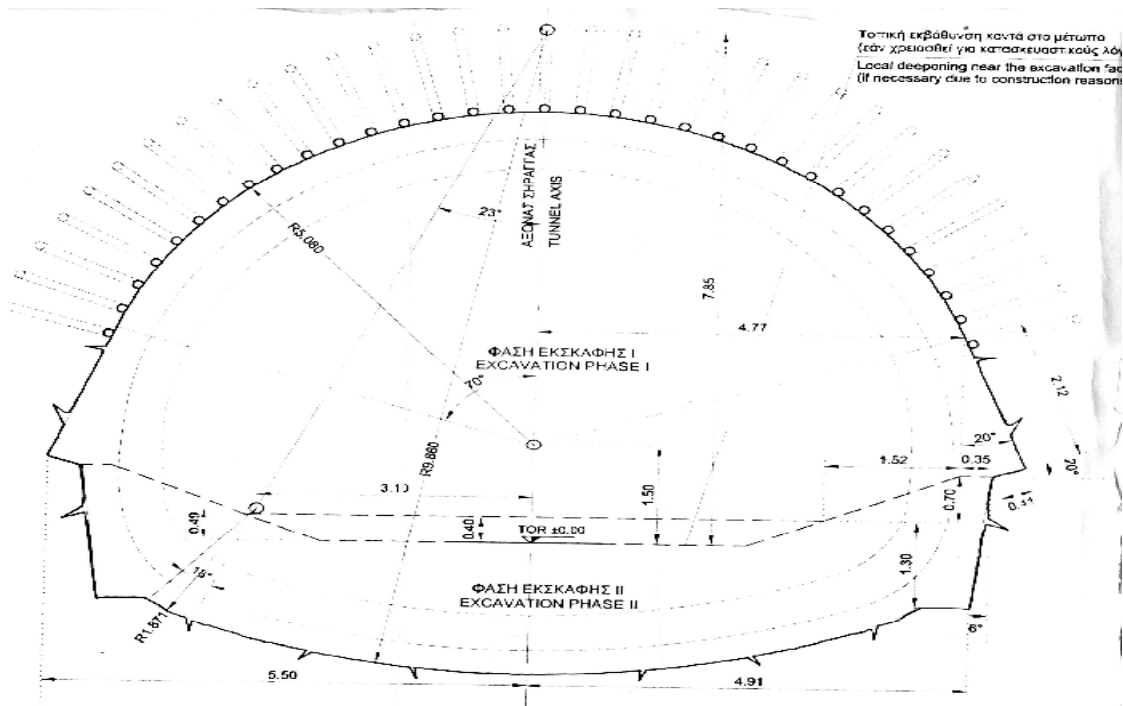
Σύμφωνα με τις απαιτήσεις χρησιμοποιήθηκαν αυτούσιες αλλά και παραλλαγές των πιο διαδεδομένων μεθόδων ελεγχόμενης ανατίναξης που είναι.

- ∅ Η ήπια ανατίναξη (smooth blasting)
- ∅ Η τελική μετάτμηση (cushion blasting)
- ∅ Η γραμμική διάτρηση (line drilling)

Για τον περιορισμό της σκόνης κατά την διάρκεια της διάτρησης οπών ανατίναξης, κρίθηκε απαραίτητη η διάτρηση με νερό αλλά με λήψη μέτρων για την αποφυγή λιμνάζοντος υδάτων στο δάπεδο της σήραγγας.

### **3.2. Διαστάσεις και γραμμές εκσκαφής**

Για να γίνει όμως κατανοητή η διαδικασία εκσκαφής θα πρέπει να γνωρίζουμε τις βασικές γραμμές εκσκαφής δηλαδή ουσιαστικά την διάσταση της διανοιγόμενης σήραγγας. Κατά την διαστασιολόγηση της σήραγγας έχουν ορισθεί λεπτομερώς τα στοιχεία που καθορίζουν τη γεωμετρία των χαρακτηριστικών γραμμών της διατομής.



(Σχέδιο 3 Γεωμετρία εκσκαφών διατομής)

### Α) Γραμμή ελάχιστης εκσκαφής Α

Η γραμμή ελάχιστης εκσκαφής είναι η γραμμή από την οποία δεν επιτρέπεται η παραμονή μη εκσκαφέντος τμήματος της βραχομάζας οποιουδήποτε είδους και διαστάσεων.

Οι θεωρητικές ακτίνες που καθορίζουν σε κάθε θέση των διατομών της σήραγγας τη γραμμή Α πρέπει να περιλαμβάνουν

- ∅ Την ακτίνα της διατομής χρήσης R
- ∅ Το στατικό απαιτούμενο πάχος της τελικής επένδυσης d3
- ∅ Το στατικό απαιτούμενο πάχος της άμεσης υποστήριξης d1
- ∅ Την πρόβλεψη για σύγκλιση d2

### Β) Γραμμή Β

Γραμμή Β είναι η γραμμή εκείνη που εμφανίζεται στα σχέδια και η οποία καθορίζει τα εξωτερικά όρια έως τα οποία δικαιολογείται η πρόσθετη εκσκαφή (πέραν της γραμμής Α).

Η γραμμή Β απέχει από την γραμμή ελάχιστης εκσκαφής Α απόσταση d0. Η φύση του πετρώματος μπορεί να καταστήσει αναγκαία την αλλαγή της απόστασης μεταξύ της γραμμής Α και της τελικής εσωτερικής επιφάνειας της επένδυσης από σκυρόδεμα

### **3.3. Βασικά στάδια διάνοιξης**

Η τμηματική εκσκαφή της σήραγγας ήταν η καταλληλότερη επειδή το πέτρωμα χαρακτηρίστηκε ως ασθενές και τμηματικά ασταθές και λόγω των υπερκείμενων κατασκευών πάνω από την κατασκευή μας. Η εκσκαφή χωρίζεται σε τρεις βασικές φάσεις.

#### **Α΄ Φάση**

Πρόκειται για την άνω ημιδιατομή της σήραγγας. Αρχικά τοποθετούνται οι δοκοί προπορείας βαρέως τύπου που είναι κυρίως προστασία από τα υπερκείμενα πετρώματα του θόλου. Παράλληλα με τις δοκούς προπορείας γίνεται η τοποθέτηση αποστραγγιστικών γεωτρήσεων μετώπου για την απορροή υδάτων και την εκτόνωση της βραχομάζας. Έπειτα ακολουθεί η τοποθέτηση αγκυρίων (fiber glass) μετώπου σε διαφορετικό χρόνο από τις δοκούς προπορείας.

Αφού έχουν ολοκληρωθεί οι προαναφερθείσες εργασίες γίνεται εκτίμηση της κατάστασης από κλιμάκιο της επιβλέπουσας αρχής της εταιρείας και της Αττικό Μετρό. Για την διαμόρφωση των μετώπων των σηράγγων και τη διάνοιξη των πρώτων 20 μέτρων των σηράγγων από τα μέτωπα χρησιμοποιούνται υποχρεωτικά μέθοδοι ελεγχόμενης ανατίναξης

Στη συνέχεια γίνεται εκσκαφή της άνω ημιδιατομής με εκσκαπτικό μηχάνημα (με προσαρτημένο βραχίονα για την χρήση του σε υπόγεια έργα. Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται κατά την εκσκαφή της περιοχής θεμελίωσης των πλαισίων τύπου elephant foot ώστε να αποδεχθούν υπερεκσκαφές.

Μόλις γίνει η εκσκαφή σε αστήρικτες διατομές, όλο το χαλαρωμένο υλικό εντός της γραμμής Β, το οποίο ενδέχεται να πέσει ή να μετακινηθεί απομακρύνεται. Η απομάκρυνση των προεξοχών αυτών γίνεται οποτεδήποτε κατά την διάρκεια των εργασιών και της μονωτικής μεμβράνης. Αυτή η μηχανική απόσπαση των επισφαλών όγκων ονομάζεται αλλιώς και ως ξεσκάρωμα. Τέλος εφαρμόζεται στρώση προστασίας μετώπου εκσκαφής από ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ελάχιστου στατικού πάχους 10 cm στις θέσεις κατασκευής των δοκών προπορείας και 5 cm στα ενδιάμεσα βήματα

προχώρησης. Πλέον το τμήμα της κατασκευής μας είναι έτοιμο να δεχθεί τα μέτρα της άμεσης υποστήριξης.



(Εικόνα 2 Φάση εκσκαφής 1)

### **Β' Φάση**

Πρόκειται για το κάτω τμήμα της διατομής . Γίνεται πλήρως εκσκαφή της κάτω ημιδιατομής, με βήμα διπλάσιο από εκείνο της προχώρησης της άνω ημιδιατομής. Αμέσως μετά γίνεται μηχανική απόσπαση των επισφαλών όγκων των παρειών. Εφαρμόζεται εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 3-5 cm στο μέτωπο όταν κριθεί απαραίτητο, ενώ στις παρειές εφαρμόζεται υποχρεωτικά ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 5 cm. Έτσι το τμήμα της διατομής είναι έτοιμο να δεχθεί τα μέτρα άμεσης υποστήριξης τα οποία εφαρμόζουν ακριβώς στα μέτρα άμεσης υποστήριξης της Α φάσης.

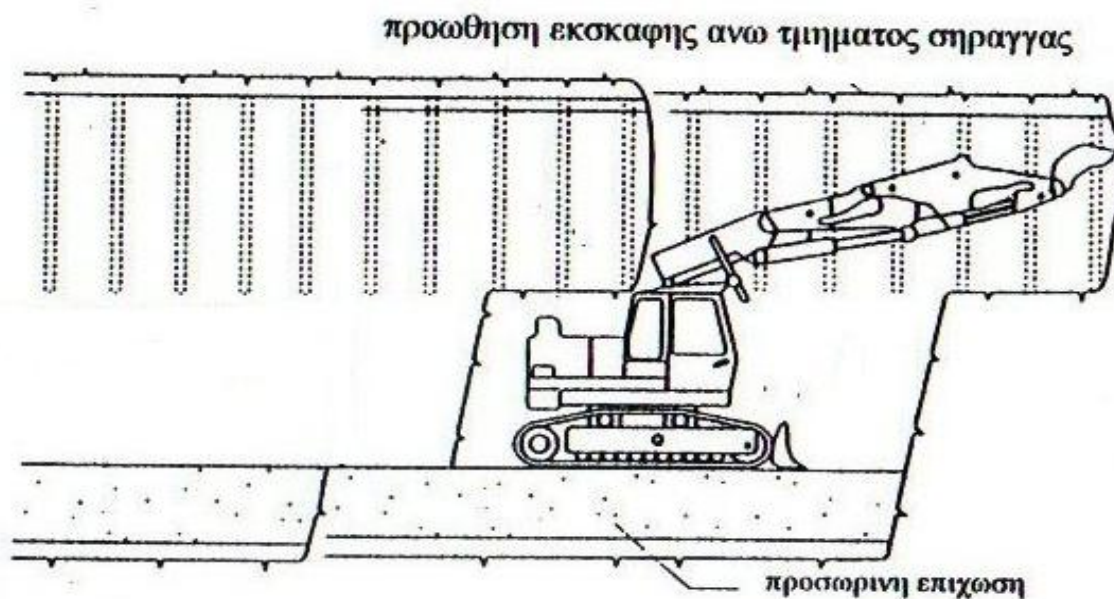
### **Γ Φάση**

Αποτελεί την τελευταία φάση της εκσκαφής με την οποία ολοκληρώνεται η διατομή της σήραγγας. Έχουμε εκσκαφή του τελικού ανεστραμμένου τόξου και

τοποθέτηση 30 cm εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Τοποθετείται το πρώτο δομικό πλέγμα T188 με την χρήση αποστατών ύψους 5 cm και ακολουθεί η πρώτη στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 15 cm. Στη συνέχεια τοποθετείται και το δεύτερο δομικό πλέγμα T188 με εφαρμογή στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 5 cm.

Όταν τοποθετηθεί το πλαίσιο και έπειτα από το πέρας ορισμένου διαστήματος γίνεται επανεπίχωση του ανάστροφου τόξου με υλικό εκσκαφής πάχους τουλάχιστον 1 m από το χαμηλότερο σημείο του ανάστροφου τόξου. Πρέπει να δοθεί μεγάλη προσοχή ώστε κανένας μηχανικός εξοπλισμός να μην πατήσει επάνω στο νωπό κέλυφος του τόξου.

Κατά την διαδικασία της διάνοιξης της σήραγγας, παρουσιάστηκαν μικρά προβλήματα, όπως χαλαρό εδαφικό υλικό, εδαφικά ρήγματα και ζώνες με ασταθή πετρώματα. Παρόλα αυτά με τον κατάλληλο μηχανικό εξοπλισμό και με την εμπειρία δεν δημιουργήθηκαν προβλήματα και καθυστερήσεις στο έργο.



(Σκαρίφημα 1 Φάσεις εκσκαφής, οριζόντια)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ

### 4 ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΣ ΔΑΚΤΥΛΙΟΣ

#### 4.1. Μέτρα άμεσης υποστήριξης(M.A.Y)

Με τον όρο μέτρα άμεσης υποστήριξης αναφερόμαστε σε όλα εκείνα τα μέτρα, που πρέπει να ληφθούν κατά την διάρκεια της εκσκαφής ή αμέσως μετά από αυτή και τα οποία θα μας επιτρέψουν να εκσκαφθεί η διατομή, σύμφωνα με τους υπολογισμούς της οριστικής μελέτης.

Επιπλέον τα μέτρα άμεσης υποστήριξης ,

- Ø Εμποδίζουν την πιθανή κατάρρευση της βραχομάζας ή την εκδήλωση παραμορφώσεων, που δεν είναι αποδεκτές, πριν ολοκληρωθεί η κατασκευή της τελικής επένδυσης.
- Ø Προστατεύουν από κινδύνους καταστροφών τις κατασκευές και εξασφαλίζουν το εργαζόμενο προσωπικό από τον κίνδυνο ατυχημάτων .

Για την κατασκευή της σήραγγας χρησιμοποιήθηκαν τα εξής μέτρα άμεσης υποστήριξης.

- 1) Ηλώσεις βράχου(αγκύρια) τύπου Self Drilling
- 2) Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.
- 3) Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με χαλύβδινες ίνες.
- 4) Μεταλλικό πλέγμα
- 5) Χαλύβδινα πλαίσια
- 6) Μεταλλικοί δοκοί προπορείας(βαρέως τύπου – Forepolling)
- 7) Μεταλλικοί δοκοί προπορείας (ελαφρού τύπου – Spilling)

8) Προενίσχυση πετρώματος ,ενέσεις σταθεροποίησης, μικροπάσσαλοι.

## **4.2.Επιλογή μέτρων άμεσης υποστήριξης**

Κατά την διάρκεια της διάνοιξης της σήραγγας ο καθορισμός της βραχομάζας και αντίστοιχα η επιλογή των μέτρων υποστήριξης που προβλέπετε από την μελέτη έγινε από την ομάδα μηχανικών που ορίστηκαν από την Αττικό Μετρό. Στο τμήμα του έργου που εξετάσαμε δεν διαπιστώθηκαν αποκλίσεις από την αρχική μελέτη για αυτό και δεν χρειάστηκε οποιαδήποτε άλλη παρέμβαση από την μελετητική εταιρεία.

### **4.2.1. Αναλυτική παρουσίαση των Μ.Α.Υ που χρησιμοποιήθηκαν.**

Για να μπορέσουμε να καταλάβουμε τον τρόπο αλλά και την σημασία τοποθέτησης των μέτρων άμεσης υποστήριξης είναι αναγκαίο να γνωρίζουμε, για καθένα από αυτά, τα τεχνικά χαρακτηριστικά.

### **4.2.2. Μεταλλικοί δοκοί προπορείας (Forepolling)**

Οι μεταλλικοί δοκοί προπορείας χρησιμοποιούνται σε εδάφη με σοβαρά προβλήματα αστάθειας. Πρόκειται για χαλύβδινες δοκούς, διαμέτρου Φ 114 mm, με μήκος 9 m όπου τοποθετούνται αξονικά με κενό κάθε 0,40 cm και κλίση 8°. Η τοποθέτηση τους γίνεται με ώθηση από μηχανικά μέσα. Διαθέτουν βαλβίδες για εισπίεση ενέματος με κατάλληλη πίεση.

Η τοποθέτηση τους γίνεται σε διάταξη τέτοια ώστε να σχηματίζεται μια κωνοειδής επιφάνεια (ομπρέλα) , όπου υπό την προστασία της γίνονται αρκετά βήματα προχώρησης με ασφάλεια. Πριν εξαντληθεί το μήκος της ομπρέλας και συγκεκριμένα 2 βήματα προχώρησης νωρίτερα αρχίζει να τοποθετείται η νέα ομπρέλα. Με αυτόν τον τρόπο πετυχαίνεται επικάλυψη μεταξύ τους και οι εργασίες εκτελούνται στην σήραγγα με ασφάλεια.

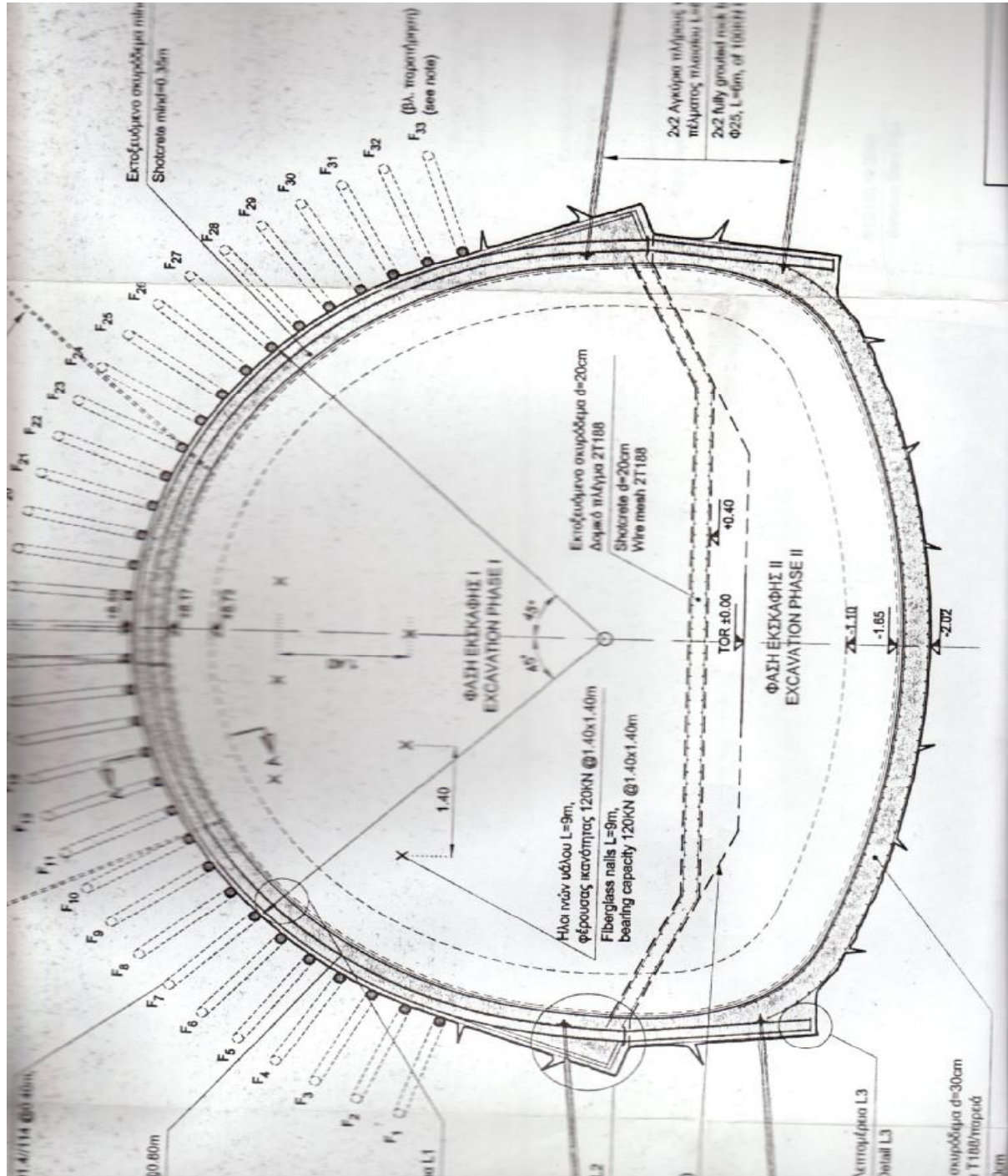
Στην συνέχεια η πλήρωση με τσιμεντένεμα των δοκών προπορείας διενεργείται σε φάσεις.

Η πρώτη φάση περιλαμβάνει διάνοιξη των οπών F1 έως F33, στην συνέχεια γίνεται η τοποθέτηση των σωλήνων και η ενεμάτωση αυτών.

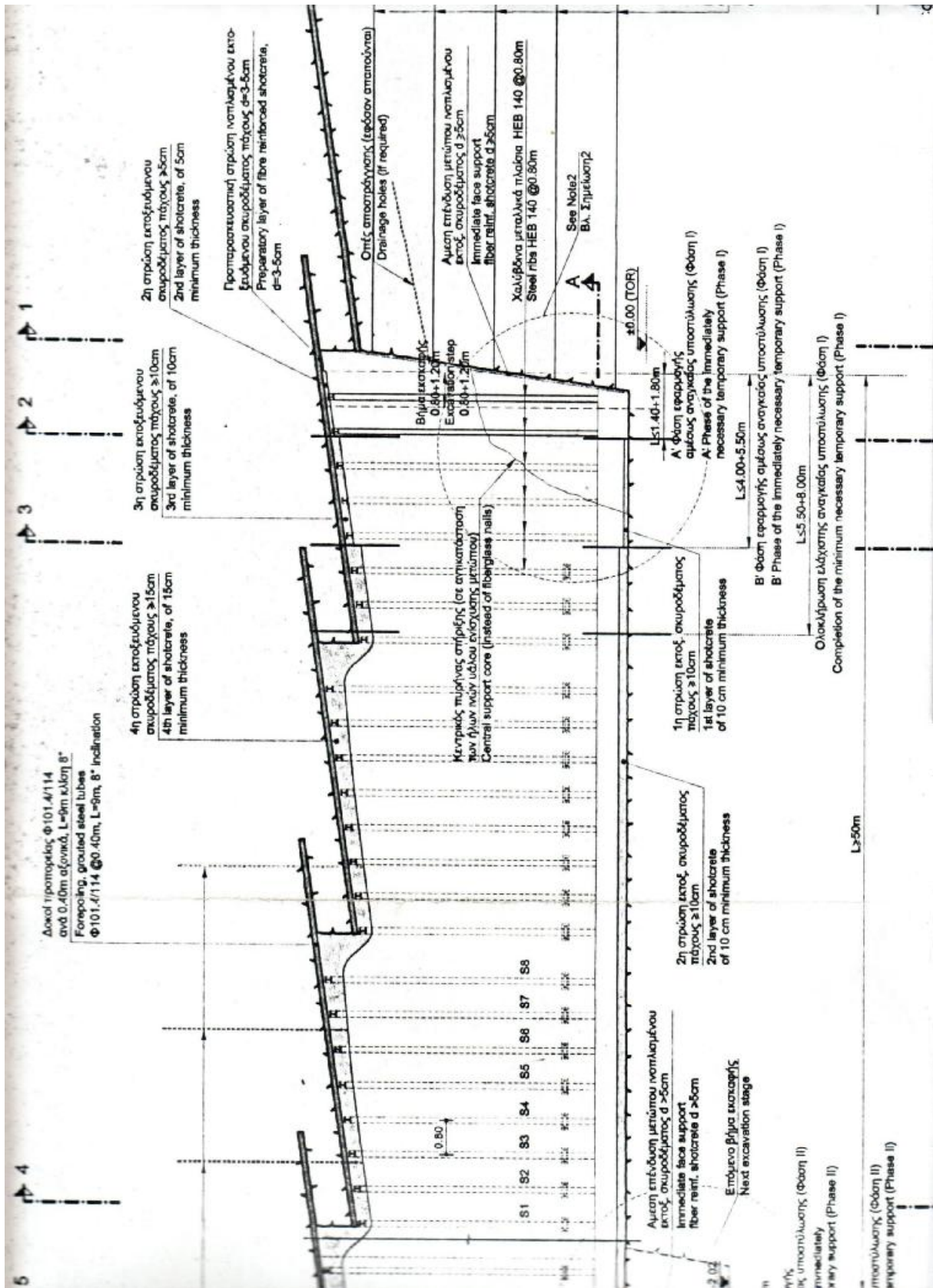
Όταν πληρωθεί ο σωλήνας με υλικό και επιστραφεί αυτό από τον σωλήνα ανακούφισης, σφραγίζεται ο σωλήνας ανακούφισης και εισπιέζεται ένεμα υπό



πίεση 3 έως 4 bar. Στο σφράγισμα του σωλήνα ανακούφισης η εισπίεση του ενέματος γίνεται με μεγαλύτερη πίεση 5 έως 6 bar και αυτό γιατί πρέπει να αποφευχθεί ο κίνδυνος ώστε να δημιουργηθούν κενά και φυσαλίδες κατά την ανακούφιση.



(Σχέδιο 4 Σύστημα προσωρινής υποστήριξης διατομής)



(Σχέδιο 5 Ακολουθία κατασκευής συστήματος προσωρινής υποστήριξης)



(Εικόνα 3 Τοποθέτηση Forepolling)

#### **4.2.3. Εκτοξευμένο σκυρόδεμα**

##### **α) Ορισμοί**

Ως εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (shotcrete guniting) ορίζεται το σκυρόδεμα που διαστρώνεται πάνω σε μια επιφάνεια με εκτόξευση του από ακροφύσιο, ώστε να σχηματίσει στρώση σκυροδέματος πάνω στην εν λόγω επιφάνεια.

Ως αναπήδηση (rebound) του εκτοξευόμενου σκυροδέματος χαρακτηρίζεται το φαινόμενο κατά το οποίο μέρος των εκτοξευόμενων υλικών αναπηδούν πάνω στην επιφάνεια εφαρμογής και δεν ενσωματώνονται τελικά στην σχηματιζόμενη στρώση σκυροδέματος της εν λόγω επιφάνειας.

##### **Β) Σύθεση**

Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αποτελείται από:

- 1) Τσιμέντο
- 2) Αδρανή (διάσταση κόκκου έως 10 mm)
- 3) Παιπάλη πυριτίου
- 4) Εγκεκριμένα πρόσμικτα (Επιταχυντής πήξεως)
- 5) Νερό

Θα πρέπει όμως να ληφθούν υπ' όψιν ορισμένες λεπτομέρειες:

- ∅ Η σε νερό περιεκτικότητα των αδρανών κατά το χρόνο της ενσωμάτωσης τους στο μίγμα, πρέπει να είναι μικρότερη του 5% του βάρους του αδρανούς ξηραμένου σε φούρνο.
- ∅ Ο χρησιμοποιούμενος στο εκτοξευμένο σκυρόδεμα αέρας θα είναι καθαρός και απαλλαγμένος από κάθε είδος ελαίου.
- ∅ Μέσα στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα θα ενσωματώνεται ταχυπηκτικό πρόσμικτο εγκεκριμένου τύπου.

#### **4.2.4. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με χαλύβδινες ίνες (Steel Fiber Shotcrete)**

Μια ξεχωριστή και ιδιαίτερη χρήσιμη κατηγορία σκυροδέματος είναι το εκτοξευόμενο με χαλύβδινες ίνες. Ουσιαστικά πρόκειται για εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο οποίο έχει ενσωματωθεί κατά την διάρκεια της ανάμειξης μια συγκεκριμένη ποσότητα μεταλλικών ινών.

Παρουσιάζει ανάλογες ιδιότητες με εκείνες του συνδυασμού του εκτοξευόμενου σκυροδέματος με ενσωματωμένο δομικό πλέγμα. Όμως μπορεί να το αντικαταστήσει όπου απαιτηθεί παρέχοντας τα εξής θετικά αποτελέσματα:

- ∅ Ταχύτητα στην εφαρμογή και επομένως σημαντικό όφελος για την ασφάλεια των υπόγειων έργων, αφού η άμεση εφαρμογή των μέτρων προστασίας είναι επιβεβλημένη ώστε να αποφθεχθεί η υπερβολική χαλάρωση της βραχομάζας.
- ∅ Σημαντική μείωση του χρόνου εφαρμογής, σε σχέση με τον χρόνο που απαιτείται για την τοποθέτηση και στερέωση του πλέγματος. Επομένως έχουμε μείωση του χρόνου κάθε κύκλου εργασίας με τελικό αποτέλεσμα τη μείωση του χρόνου αποπεράτωσης της εκσκαφής και υποστήριξης (σε συνδυασμό και με άλλα μέτρα υποστήριξης που απαιτούνται σε κάθε περίπτωση) κάθε υπόγειου τμήματος.

##### **4.2.4.1 Χαρακτηριστικά των χρησιμοποιούμενων ινών**

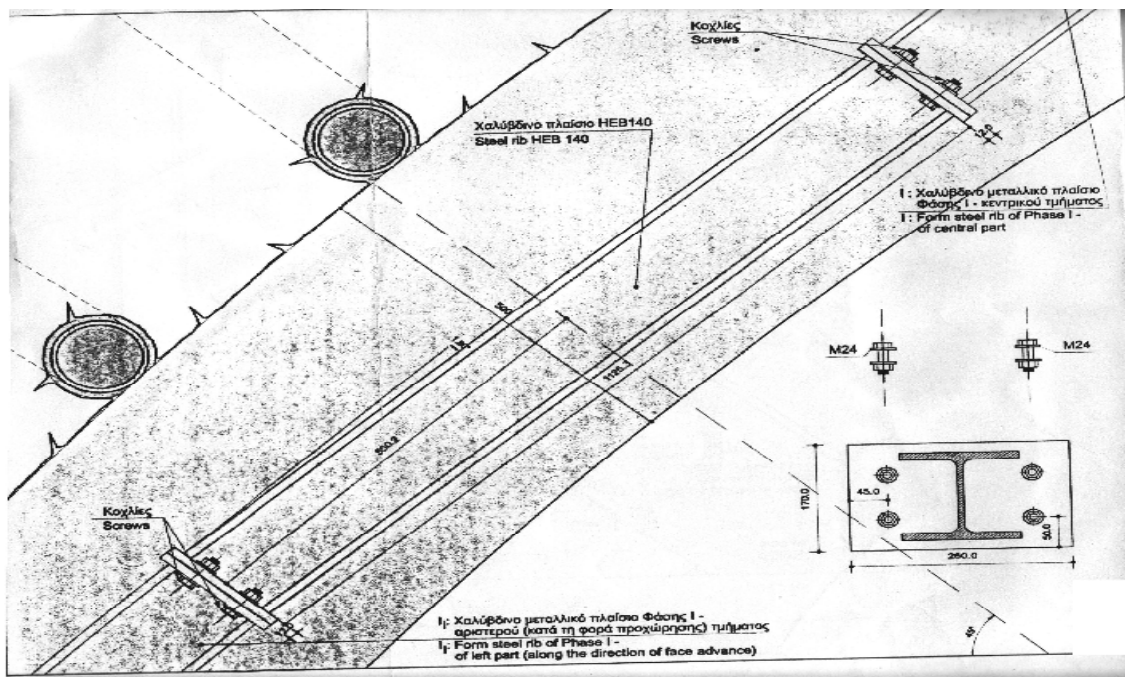
Οι χαλύβδινες ίνες πρέπει να πληρούν τις απαιτήσεις της πρότυπης Ευρωπαϊκής Προδιαγραφής 03361-03241 και ποιότητας Cs30.H αντοχή

θραύσης σε εφελκυσμό δεν πρέπει να είναι μικρότερη από  $1100\text{N/mm}^2$  ( $1100\text{Mpa}$ ). Οι διαστάσεις των χαλύβδινων ινών κυμαίνονται από 25-50 mm σε μήκος και 0,40-0,80 mm σε διάμετρο. Τα άκρα των χαλύβδινων ινών είναι κεκαμμένα σύμφωνα με την έγκριση της επιβλέπουσας αρχής του έργου.

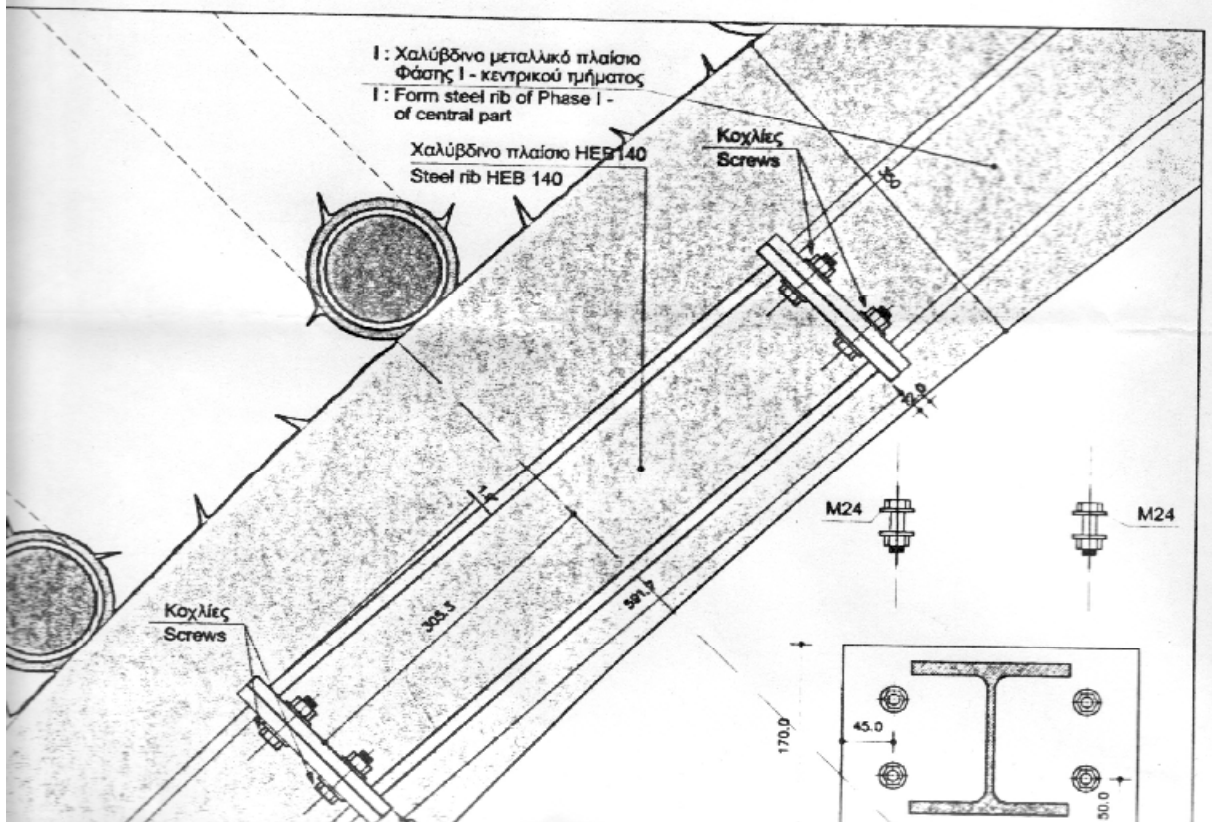
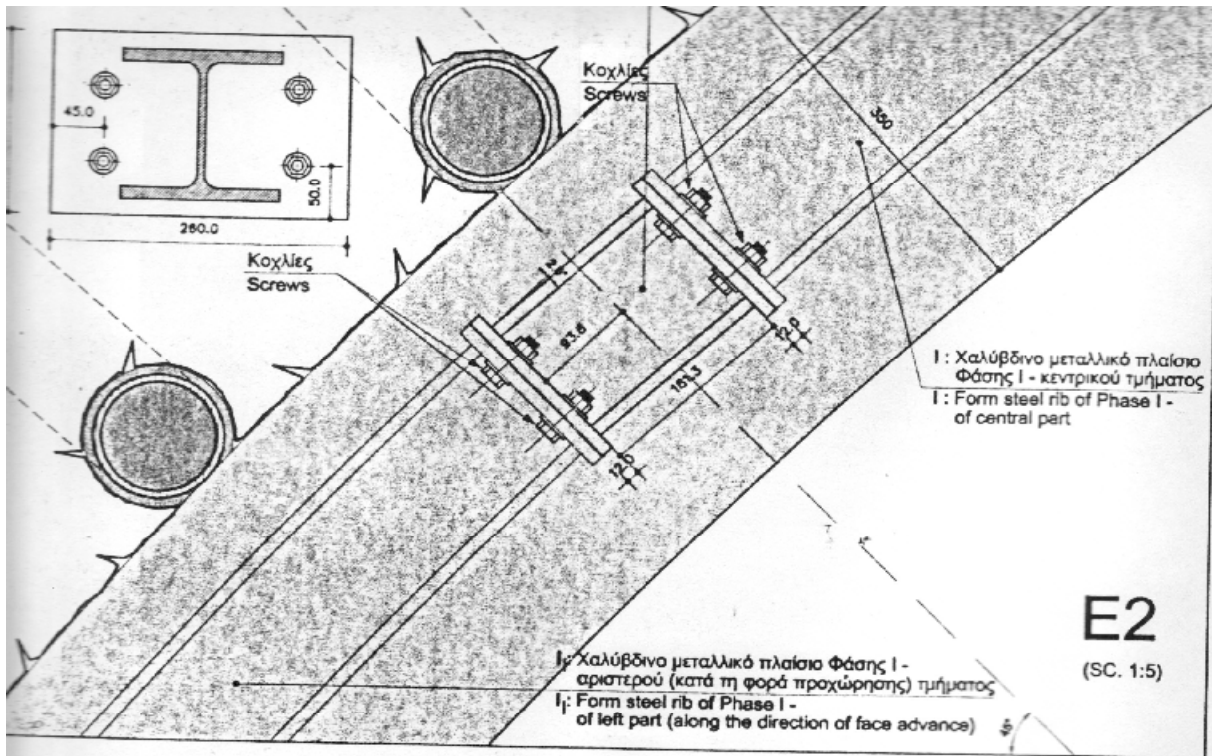
Επιπλέον σε καμία περίπτωση η ποσότητα των χαλύβδινων ινών δεν πρέπει να είναι μικρότερη από  $40\text{ Kg/m}^3$ . Ειδική μέριμνα λαμβάνεται κατά την ανάμειξη των ινών στο σκυρόδεμα έτσι ώστε να αποφεύγεται η δημιουργία σβώλων και η αναπήδηση του υλικού. Η ανάμειξη και η εκτόξευση γίνεται με ειδικό μηχάνημα (gunite). Το οποίο μηχάνημα αποτελείται από μια χοάνη περισυλλογής του υλικού εκτόξευσης, από σωλήνες (ακροφύσια) τα οποία από ειδικούς αεροσυμπιεστές μεταφέρουν ποσότητα αέρα υπό πίεση. Τέλος το μηχάνημα αποτελείται από τον υδραυλικό βραχίονα με την μάνικα εκτόξευσης όπου με συγκεκριμένο ακροφύσιο γίνεται η εκτόξευση και διασπορά του υλικού.

#### 4.2.5. Μεταλλικά Πλαίσια Υποστηρίγματα

Τα μεταλλικά πλαίσια υποστηρίγματα είναι τυποποιημένες διατομές συνήθως πλατύπελμες και συγκεκριμένα HEB 140. Τα συγκεκριμένα πλαίσια λειτουργούν κυρίως ως οπλισμός του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και τοποθετούνται κατά την διατομή της σήραγγας.



(Σχέδιο 6 Χαλύβδινό μεταλλικό πλαίσιο κεντρικού τμήματος)



(Σχέδιο 7 Χαλύβδινα πλαίσια από αριστερά στα δεξιά)

### **4.3.Μόνιμες ηλώσεις βράχου (Αγκύρια) Φ25 ,τύπου Self Drilling, φέρουσας ικανότητας 100 KN**

Οι μόνιμες ηλώσεις βράχου τύπου Self Drilling είναι από χάλυβα ποιότητας S500s και αποτελούν το κυριότερο και ευρέως χρησιμοποιούμενο μέσο υποστήριξης των σηράγγων.

Ο διάτρητος ήλος βράχου τύπου Self Drilling ,αποτελείται από στέλεχος εξωτερικής διαμέτρου 25 mm.Η φέρουσα ικανότητα τους ανέρχεται στα 100 KN και είναι κατασκευασμένες από ειδικό χάλυβα με όριο διαρροής 220 KN και όριο θραύσης 280 KN και έχει ραβδώσεις σε όλο το μήκος της η ράβδος.

#### **A)Κατασκευαστικές λεπτομέρειες**

Η διεύθυνση των ήλων πρέπει να προσαρμόζεται πάντοτε στα συστήματα των ασυνχειών της βραχομάζας, ώστε να απεφεύγεται η χαλάρωση της και η δημιουργία και αποκόλληση βράχων σε σχήμα σφήνας. Η διεύθυνση των ήλων πρέπει να σχηματίζει γωνία μεγαλύτερη των 20° με τις επιφάνειες των ασυνχειών.

Σε κάθε ήλο το άκρο που προεξέχει της οπής φέρει κατάλληλο σπείρωμα στο οποίο πρέπει να είναι προσαρμοσμένο εξαγωνικό περικόχλιο, βαρέως τύπου. Ακόμη πρέπει να προσαρμόζεται ροδέλα από σκληρό χάλυβα, δυο ή περισσότερες σφηνοειδείς ροδέλες ,όπως απαιτείται και χαλύβδινη πλάκα έδρασης επίπεδη ,η οποία πλάκα θα φέρει οπές ή εγκοπές για τσιμεντενέσεις.

Το μέτωπο του βράχου πρέπει να έχει τέτοια επιφάνεια ώστε η πλάκα έδρασης των αγκυρίων να μεταβιβάζει τα φορτία πάνω του. Επίσης είναι αναγκαίο η διάμετρος της οπής που θα διατρηθεί στο βράχο για την τοποθέτηση του αγκυρίου να έχει το μέγεθος που απαιτείται για να επιτευχθεί η βέλτιστη πάκτωση ,για τον τύπο του ήλου που χρησιμοποιείται. Οι οπές θα διατρηθούν σε βάθος 20cm πέρα από το θεωρητικό άκρο του ήλου.

Στη συνέχεια οι οπές καθαρίζονται από τα προϊόντα διάτρησης(λάσπες και θραύσματα βράχου) με αέρα και νερό υπό πίεση. Σε οπές σε βραχομάζα με τάσεις διόγκωσης ή ασυνέχειες πληρωμένες με αργίλικό υλικό, χρησιμοποιείται μόνο πεπιεσμένος αέρας.

#### **B)Εγκατάσταση ήλων**

Η διαδικασία εγκατάστασης του ήλου είναι τέτοια ώστε να μην παθαίνει ζημία το προεξέχον σπείρωμα στην άκρη του ήλου. Το σπείρωμα αυτό πρέπει

να εκτείνεται τουλάχιστον 5 cm πέρα από το περικόχλιο ,ώστε να υπάρχει αρκετό μήκος για την τοποθέτηση συσκευής δοκιμαστικής τάνυσης ή δομικού πλέγματος, με προσθετή πλάκα και περικόχλιο.

Η τάνυση των ήλων μπορεί να γίνει είτε με δυναμόκλειδο πεπιεσμένου αέρα ή με μηχανικό δυναμόκλειδο, που έχουν τη δυνατότητα προεπιλογής της εφαρμοστέας ροπής στρέψης.

Μετά την εγκατάσταση τους ,οι ήλοι ελέγχονται με δυναμόκλειδο ,για να εξακριβωθεί τυχόν μη επαρκή περίσφιξη, καθώς επηρεάζεται η ανάληψη των φορτίων. Αν από τον έλεγχο βρεθεί τέτοια μείωση η ανάδοχος εταιρεία λαμβάνει μέτρα αποκατάστασης. Τα μέτρα αυτά μπορούν να ληφθούν ξεχωριστά ή και όλα μαζί και είναι τα εξής:

- Ø Αύξηση της έντασης των ήλων
- Ø Μείωση της απόστασης των ήλων που θα τοποθετηθούν στο μέλλον.
- Ø Τοποθέτηση πρόσθετων ήλων ώστε να μειωθεί η απόσταση μεταξύ των υφιστάμενων ήλων.

Με το πέρας της εγκατάστασης και μετά την ολοκλήρωση τάνυσης του ήλου, το φορτίο απαγορεύεται να ελαττωθεί για την πλήρωση της οπής με ένεμα ή για οποιονδήποτε άλλο λόγο. Μετά την αρχική τοποθέτηση η κατασκευάστρια εταιρεία μετράει και καταγράφει τη ροπή στρέψης με σκοπό να επανατανύσει (όπου απαιτείται) οποιοδήποτε ήλο βράχου δεν έχει πληρωθεί με ένεμα.

### **Γ)Ενεμάτωση ήλων**

Μετά την τοποθέτηση του κοχλία και την τάνυση τους, τσιμεντώνονται σε όλο το μήκος τους. Η τσιμεντένεση πληροί την οπή εξαρχής. Οι οπές των ήλων σφραγίζονται και το ένεμα εισπνέζεται με αρκετή πίεση ώστε να γεμίζει πλήρως η οπή. Η πλήρωση των ήλων γίνεται με μηχανική αντλία ενέματος ελάχιστης ικανότητας 700Kpa.Ένας ήλος θεωρείται ότι έχει πληρωθεί με ένεμα όταν παρατηρηθεί σταθερή επιστροφή ενέματος μέσα από τη διαμήκη κεντρική οπή του ήλου.

Πρέπει να δώσουμε μεγάλη προσοχή στην περίπτωση που κατά τη διάρκεια της ενεμάτωσης παρατηρηθεί ροή ενέματος από σημεία γύρω από τον ήλο ή από γειτονικά σημεία στη βραχομάζα. Μόλις παρατηρηθεί διαρροή πρέπει άμεσα να φραχθούν ώστε να σταματήσει η διαρροή ενέματος.



Η σύσταση του ενέματος αποτελείται από μίγμα νερού-τσιμέντου με λόγο 4:10 κατά βάρος. Το υλικό αναμιγνύεται το λιγότερο για 2 λεπτά σε αναδευτήρα υψηλής ταχύτητας. Η προαναφερθείσα σύνθεση είναι τέτοια ώστε ο χρόνος πήξης του υλικού να είναι περίπου 10 λεπτά.

Η ενεμάτωση του ήλου γίνεται σε 7 ημέρες από την τάνυση τους. Ιδιαίτερη φροντίδα δίνεται στην προστασία των κεφαλών των ήλων από τη διάβρωση. Οι κεφαλές οι οποίες δεν καλύπτονται από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ή δεν ενσωματώνονται σε σκυρόδεμα, κρίνεται αναγκαίο να προστατευθούν με κονίαμα εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

#### **4.3.1. Μικροπάσσαλοι Φ 101.4/114**

Η επόμενη εξίσου σπουδαία εργασία είναι η τοποθέτηση των μικροπασσάλων.

##### **Α) Διάτρηση**

Χρησιμοποιείται μηχανικό γεωτρήπανο με κατάλληλο υδραυλικό βραχίονα και κοπτικό άκρο. Η σταθερότητα των τοιχωμάτων κατά την διάτρηση επιτυγχάνεται με την χρήση σωλήνωσης στο εδαφικό στρώμα η οποία αφαιρείται κατά την σκυροδέτηση. Ως τελική διάμετρο του μικροπασσάλου θεωρείται η εξωτερική διάμετρος της σωλήνωσης. Η κλίση του διατρήματος είναι 8° από την νοητή κάθετη γραμμή.

##### **Β) Οπλισμός**

Μετά την ολοκλήρωση της διάτρησης ο πάσσαλος οπλίζεται με μεταλλικό σωλήνα εξωτερικής διαμέτρου 101.4mm και πάχους τοιχώματος 3,2 mm από χάλυβα. Τα τεμάχια του σωλήνα συνδέονται μεταξύ τους με μούφες ενώ η επιφάνεια του καθαρίζεται επιμελώς πριν την τοποθέτηση ώστε να είναι πλήρως απαλλαγμένες από λάδια και σκουριές. Το κάτω άκρο του σωλήνα είναι ελεύθερο και σε αυτό συγκολλώνται σταυροειδώς ράβδοι χάλυβα S500s διαμέτρου Φ12, ώστε να εξασφαλίζεται χώρος για την σκυροδέτηση.

##### **Γ) Σκυροδέτηση**

Ο πάσσαλος σκυροδετείται με την έγχυση σκυροδέματος εντός του σωλήνα, έτσι το σκυρόδεμα εξερχόμενο από το κάτω άκρο του σωλήνα να ανέρχεται πλευρικά από κάτω προς τα πάνω. Το χρησιμοποιούμενο υλικό πλήρωσης είναι τσιμεντοκονίαμα με κόκκους αδρανών 4 mm. Αμέσως μετά τη

σκυροδέτηση ακολουθεί δόνηση από μηχανικό εξοπλισμό και επιπλέον πιέζεται το υλικό πλήρωσης του μικροπασσάλου με την βοήθεια πεπιεσμένου αέρα. Εάν μετά την άσκηση πίεσης το υλικό πλήρωσης του πασσάλου υποχωρήσει, ασκείται και δεύτερη διοχέτευση τσιμεντοκονιάματος. Με την διαδικασία αυτή το τσιμεντοκονίαμα εισχωρεί στο έδαφος δημιουργώντας το (ρίζωμα) του μικροπασσάλου.

Πρέπει να δείξουμε μεγάλη προσοχή διότι απαγορεύεται να κατασκευάζεται πάσσαλος δίπλα σε άλλον που κατασκευάστηκε την ίδια μέρα σε απόσταση μικρότερη των 80 cm. Για να αποφευχθεί οποιαδήποτε αποκόλληση του μικροπασσάλου, οι εργασίες συνεχίζονται σε απόσταση ανά δεύτερο μικροπάσσαλο, δηλαδή τα 80 cm. Εάν παρατηρηθεί και πάλι κάποιο πρόβλημα οι εργασίες συνεχίζονται από την αντίθετη μεριά του τόξου.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ

### 5.ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΣ ΔΑΚΤΥΛΙΟΣ

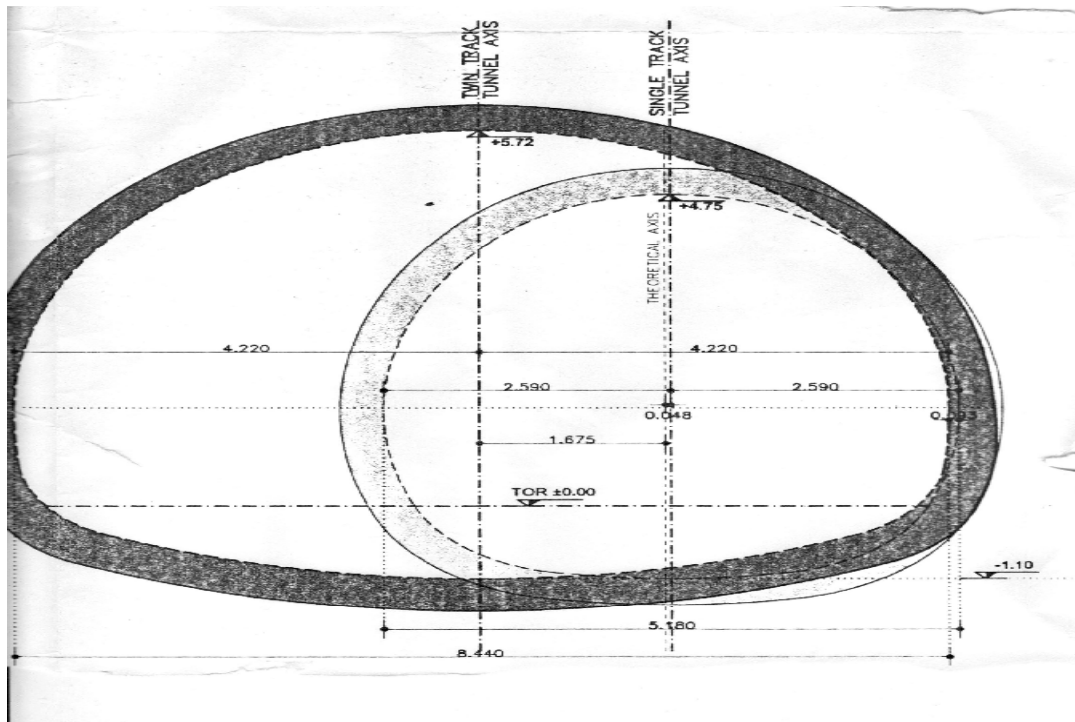
**Κριτήρια σχεδιασμού και φορτία μόνιμης επένδυσης σήραγγας.  
Έλεγχος κελύφους μόνιμης επένδυσης**

#### 5.1.Γενικές παραδοχές

Ως κρίσιμη φόρτιση λόγω των συνθηκών, από τις παρατηρήσεις στη διάνοιξη, θεωρείται η περίπτωση φορτίου αρχικών τάσεων εξαιτίας των μεγάλων αναπτυσσομένων παραμορφώσεων του εδάφους που προκαλούν καταναγκασμό και επομένως ένταση στη μόνιμη επένδυση. Αυτές οι παραμορφώσεις εξ αιτίας της ύπαρξης της προσωρινής επένδυσης, αρχικά δεν προκαλούν ένταση στη μόνιμη επένδυση. Με το πέρασμα του χρόνου, λόγω του ερπυσμού της προσωρινής επένδυσης και του περιβάλλοντος πετρώματος οι πρόσθετες παραμορφώσεις μεταφέρονται απ'ευθείας στη μόνιμη επένδυση και προκαλούν ένταση. Έτσι για το στατικό υπολογισμό της μόνιμης επένδυσης της σήραγγας δεν λαμβάνεται υπόψη η ύπαρξη της προσωρινής αντιστήριξης.

#### 5.2. Γεωμετρία τελικής επένδυσης

Πρόκειται για κλειστή διατομή με μόνιμο ανάστροφο τόξο ελάχιστου πάχους 1.00m.Για το περίγραμμα ελεύθερου χώρου και την εσωτερική γεωμετρία τηρήθηκε η τυπική διατομή της Αττικό Μετρό.



Σχέδιο 8 Γεωμετρία τελικής επένδυσης

### 5.3.Φορτισεις

Τα είδη των φορτίσεων είναι τα παρακάτω:

#### (Φόρτιση 1) Φορτίο αρχικών τάσεων

Πρόκειται για φόρτιση που προκαλείται στην μόνιμη επένδυση από τα υπερκείμενα εδάφη.

#### (Φόρτιση 2) Ίδιο βάρος μόνιμης επένδυσης

Είναι το ίδιο βάρος του σκυροδέματος της μόνιμης επένδυσης  $g=25 \text{ KN/M}$ .

#### (Φόρτιση 3) Φορτίο επίχωσης πυθμένα

Πρόκειται για το μόνιμο φορτίο λόγω της επίχωσης του πυθμένα και των ασφαλτικών στρώσεων. Ελήφθη τιμή ομοιόμορφου φορτίου  $P_{\text{πυθ}}=40 \text{ KN/M}^2$

#### **(Φόρτιση 4) Υδατική πίεση**

Στο σύστημα μας δεν αναμένεται η ανάπτυξη υδατικής πίεσης, λόγω του προβλεπόμενου συστήματος αποστράγγισης. Παρόλα αυτά η μόνιμη επένδυση εξετάστηκε και για την περίπτωση υδατικής πίεσης. Ο έλεγχος έγινε με τη θεώρηση ομοιόμορφης υδροστατικής πίεσης περιμετρικά της μόνιμης επένδυσης. Η τιμή της πίεσης ελήφθη  $P=50 \text{ Kpa}$ .

#### **(Φόρτιση 5) Κινητό φορτίο κυκλοφορίας**

Λόγω της κυκλοφορίας των οχημάτων στη σήραγγα ελήφθη φορτίο κυκλοφορίας  $P_{\text{κυκλ}}=25 \text{ Kn/m}^2$ .

#### **(Φόρτιση 6) Φορτίο πρόσκρουσης**

Λαμβάνεται φορτίο πρόσκρουσης  $Q_{\text{πρ}}=500 \text{ Kn}$  σε ύψος 1.20m από την στάθμη της ερυθράς.

#### **(Φόρτιση 7) Φορτίο έκρηξης**

Θεωρούμενο φορτίο έκρηξης λαμβάνεται  $P=100 \text{ Kpa}$

#### **(Επιβαλλόμενες παραμορφώσεις) Φορτία καταναγκασμού**

Τα φορτία καταναγκασμού πρόκειται για ένταση που προκαλείται στον φορέα λόγω των θερμοκρασιακών μεταβολών του περιβάλλοντος και της συστολής ξηράνσεως του σκυροδέματος. Δηλαδή

- Συστολή Ξήρανσης:  $-15^{\circ}\text{C}$  (φόρτιση 8)
- Ομοιόμορφη μεταβολή θερμοκρασίας  $\pm 10^{\circ}\text{C}$  (φορτίσεις 9 και 10)
- Διαφορά θερμοκρασίας μέσα-έξω ίνας  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  (φορτίσεις 11 και 12)

Στους υπολογισμούς οι θερμοκρασιακές μεταβολές εισάγονται ως επιβαλλόμενες παραμορφώσεις. Για το σκυρόδεμα ο συντελεστής θερμικής διαστολής λαμβάνεται  $\alpha=10^{-5}$ .

#### **5.4.Παραδοχές υπολογισμού και παράμετροι**

Η ανάλυση για την κατασκευή της σήραγγας έγινε το 1998,στη συνέχεια όμως μετά από προβλήματα όπου αντιμετωπίστηκαν στον Κεραμεικό και στο

τμήμα του έργου που ασχοληθήκαμε εμείς, η ανάλυση επαναλήφθηκε το 2003. Η ανάλυση την δεύτερη φορά έγινε με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, η οποία εκτελέστηκε με την βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή και με το πρόγραμμα Phase 2. Κατά το οποίο κατασκευάστηκε ένα δισδιάστατο υπολογιστικό μοντέλο με σύνδεση τριγωνικών στοιχείων με τρεις κόμβους. Οι αναλύσεις εκτελέστηκαν σε συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης. Στο μοντέλο υπολογισμού, ο φορέας της μόνιμης επένδυσης είναι ελαστικά εδρασμένος στο έδαφος. Οι ελαστικές παράμετροι υπολογισμού δίνονται στον παρακάτω πίνακα. Η επιφάνεια μεταξύ εδάφους και κελύφους προσομοιώθηκε ως λεία λόγω ότι τοποθετήθηκε στις συγκεκριμένες επιφάνειες στεγανωτική μεμβράνη.

	Μέτρο ελαστικότητας	Λόγος Poisson $\nu$
Έδαφος	400 Mpa	0.3
Μόνιμη επένδυση	300000Mpa	0.2

(Πίνακας 5.1. Ελαστικές παράμετροι υπολογισμού)

## 5.5 Οπλισμοί κελύφους μόνιμης επένδυσης

### 5.5.1 Έλεγχος σε κάμψη με ορθή δύναμη

Μέσα και έξω, στο κελύφος του θόλου τοποθετούνται Φ25/15. Όπου και ελέγχονται οι συντελεστές ασφαλείας έναντι φορτίου στις δυσμενέστερες διατομές του κελύφους για τον ανώτερο οπλισμό. Οι έλεγχοι που πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με τους Ευρωπαϊκούς Κανονισμούς. Για τους ελέγχους το πάχος του κελύφους που λαμβάνεται υπόψη περιλαμβάνει και μέρος της διεύρυνσης λόγω των δοκών προπορείας. Στην περιοχή της στέψης το πάχος της μόνιμης επένδυσης λαμβάνεται ίσο με :

$$T = [d/4 + (EΠΕ - ΕΜΕ - ΠΣ)] \text{ όπου}$$

- Ø  $d=80\text{cm}$  είναι η μέγιστη διεύρυνση λόγω των δοκών προπορείας
- Ø  $ΠΣ=25\text{cm}$  είναι το περιθώριο σύγκλισης
- Ø  $EΠΕ$  = είναι το Εσωράχιο Προσωρινής Επένδυσης στη θέση του μικρότερου πλαισίου
- Ø  $ΕΜΕ$  = είναι το Εσωράχιο Μόνιμης Επένδυσης. Για το ανάστροφο τόξο οι υιοθετούμενοι οπλισμοί είναι Φ20/15 στην άνω ίνα και Φ16/15 στην κάτω.

Στην συνέχεια ελέγχονται οι κρίσιμες διατομές του κελύφους της μόνιμης επένδυσης με τα αντίστοιχα πάχη σκυροδέματος και τα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη. Ο έλεγχος γίνεται ως εξής:

- Καταρτίζονται συνδυασμοί φορτίσεων με επί μέρους συντελεστές φορτίων  $\gamma=1.00$ .
- Μέσω λογισμικού επιλέγεται ο συντελεστής ασφαλείας για τις κρίσιμες διατομές του κελύφους και για δεδομένες διατομές σκυροδέματος και χάλυβα οπλισμού.
- Συγκρίνουμε τον διαθέσιμο συντελεστή ασφαλείας με τον απαιτούμενο.

	Συνδυασμός φορτίων	Απαιτούμενος Σ.Α	Διαθέσιμος Σ.Α
ΔΙΑΤΟΜΗ 1	1	1.35	1.989
	2	1.00	1.910

(Πίνακας 5.1.) Αποτελέσματα ελέγχου κρίσιμης διατομής

Στο παραπάνω πίνακα θεωρείται ενιαίος απαιτούμενος συντελεστής ασφαλείας για όλους τους συνδυασμούς σε επίπεδο αστοχίας 1.35, επειδή τα εξαγόμενα εντατικά μεγέθη σε όλες τις φορτίσεις είναι αμελητέα σε σχέση με τα γεωστατικά φορτία (φόρτιση 1). Οι διαθέσιμοι συντελεστές είναι μεγαλύτεροι από τους απαιτούμενους.

### 5.5.2. Έλεγχος σε διάτμηση

Ο επόμενος έλεγχος στη μελέτη αφορά την διάτμηση στις κρίσιμες διατομές του κελύφους σύμφωνα με τον Ε.Κ.Σ, όπου δεν χρειάζεται οπλισμός διάτμησης, λόγω της μεγάλης θλιπτικής αξονικής δύναμης του κελύφους.

### 5.5.3. Έλεγχος σε ρηγμάτωση

Ο έλεγχος του εύρους των ρωγμών που ενδέχεται να εμφανιστούν παράλληλα με τον άξονα της σήραγγας δεν εκτελείται αφού οι διατομές είναι

πρακτικά θλιβόμενες. Για τον έλεγχο του εύρους των ρωγμών που ενδέχεται να εμφανιστούν κάθετα στον άξονα της σήραγγας θεωρήθηκε ο ελάχιστος οπλισμός για τον έλεγχο της ρηγματώσης. Ως ελάχιστο οπλισμό τοποθετείται Φ14/15 και στις δυο παρειές του κελύφους.

## **5.6. Στεγανωτική μεμβράνη**

### **5.6.1.Ο ρόλος της στεγανωτικής μεμβράνης**

Μια από τις σημαντικότερες εργασίες μετά την άμεση υποστήριξη της διατομής είναι η τοποθέτηση της στεγανωτικής μεμβράνης. Πρέπει να επιτευχθεί η πλήρης στεγάνωση της κατασκευής ,αυτό γίνεται με την τοποθέτηση του γεωφάσματος ,όπου είναι μια υδρομαστευτική στρώση και στεγανωτικές μεμβράνες με υψηλά πολυμερή με μεγάλη περιεκτικότητα πολυαιθυλενίου. Η επιλογή του πολυμερές αυτού του υλικού γίνεται λόγω των μηχανικών ιδιοτήτων τους, όπως είναι η ευκαμψία, δυνατότητα προσαρμογής σε ανωμαλίες, ανάληψη παραμορφώσεων, εύκολη επεξεργασία κατά την τοποθέτηση.

Ο ρόλος του γεωφάσματος είναι πολλαπλός. Αφενός προστατεύει τη μεμβράνη η οποία κινδυνεύει να πληγωθεί από πιθανές καταπονήσεις μηχανικής και υδραυλικής πίεσης καθώς και από κάποιο προεξέχον τμήμα της άμεσης υποστήριξης. Προσφέρει τη δυνατότητα στράγγισης του νερού πίσω από την εσωτερική επένδυση ,οδηγώντας τα νερά πίσω από την εσωτερική επένδυση και στην συνέχεια οδηγείται στους συλλεκτήριους αποχετευτικούς αγωγούς.

### **5.6.2. Ακολουθία των εργασιών στεγάνωσης**

Η ακολουθία των εργασιών στεγάνωσης είναι οι εξής:

- Ø Καθαρισμός της επιφάνειας της βραχομάζας από οποιοδήποτε προεξέχον τμήμα.
- Ø Πάνω στην επιφάνεια έχει διαστρωθεί το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα άμεσης υποστήριξης.
- Ø Πάνω στην επιφάνεια του εκτοξευόμενου σκυροδέματος τοποθετείται η υδρομαστευτική στρώση του γεωφάσματος.
- Ø Τοποθέτηση των μέσων στερέωσης της στεγανωτικής μεμβράνης πάνω στο γεωφάσμα.



- Ø Θερμοσυγκολλήται η στεγανωτική μεμβράνη.
- Ø Θερμοκολλούνται οι ραφές της στεγανωτικής μεμβράνης.

### 5.6.3.Ιδιότητες στεγανωτικής μεμβράνης

Η στεγανωτική μεμβράνη η οποία εξασφαλίζει την πλήρη στεγάνωση της διατομής της σήραγγας είναι κατασκευασμένη από πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας και διατίθεται σε φύλλα τυποποιημένων διαστάσεων.

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΤΕΓΑΝΩΤΙΚΗΣ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ	
Αντίσταση σε διάτρηση	Διάτρηση για ύψος πτώσεως 750 mm
Αντίσταση σε πίεση	Σε πίεση 5 bar είναι στεγανή
Συμπεριφορά αρμών συρραφής	Ουδεμία διαφυγή αέρα μέχρι πίεση 0.5 bar
Συμπεριφορά σε πυρκαγιά	Δύσκολη ανάφλεξη
Ανθεκτικότητα στα αλκαλικά	Ανεπηρέαστη
Αντίσταση σε ανάπτυξη ριζών	Καμία ανάπτυξη ριζών

### 5.6.4. Τοποθέτηση της στεγανωτικής μεμβράνης

Κατά την τοποθέτηση της στεγανωτικής μεμβράνης πρέπει να προσέχουμε τα εξής:

- Ø Να υπάρχουν κατάλληλες εγκαταστάσεις πυρασφάλειας.
- Ø Να υπάρχουν έξοδοι διαφυγής σε οποιοδήποτε τμήμα του έργου.
- Ø Να μην γίνονται εργασίες με φλόγιστρα στην περιοχή όπου τοποθετούνται μονωτικά υλικά.

Η τοποθέτηση της μεμβράνης τοποθετείται με την βοήθεια κινητών φορείων ανύψωσης. Όπου η διάταξη των φορείων είναι τέτοια ώστε να μην παρεμποδίζεται η ροή των άλλων εργασιών.



(εικόνα 4 Σκαλωσιά τοποθέτησης μεμβράνης)

### **5.6.5. Συγκόλληση της στεγανωτικής μεμβράνης**

Κατά την τοποθέτηση της μεμβράνης οι ραφές από κάθε μεμβράνη αλληλεπικαλύπτονται μεταξύ τους απόλυτα στεγανά. Γίνεται με μηχανική συγκόλληση, με την επαφή με μεταλλικό θερμαντικό στοιχείο. Επίσης χρησιμοποιούνται μηχανισμοί στερεοποίησης, οι ροδέλες, οι οποίες σε περίπτωση μεγάλης καταπόνησης να σπάσει η ροδέλα χωρίς να επέλθει ζημιά για την μεμβράνη.

Η ποιότητα της συγκόλλησης των ραφών είναι υψηλή και προκύπτει από την σωστή θερμοκρασία συγκόλλησης. Η ραφή είναι υποχρεωτικά διπλή, για μεγαλύτερη αντοχή στην πίεση για λόγους ασφαλείας.

### **5.7. Μεταλλότυπος σήραγγας**

Η επένδυση της σήραγγας των παρειών και των θόλων κατασκευάζεται από σκυρόδεμα. Η σκυροδέτηση γίνεται με τη χρήση του μεταλλότυπου. Ο μεταλλότυπος είναι μια κατασκευή από χάλυβα η οποία χωρίζεται σε τμήματα

και έχει το σχήμα της τελικής επένδυσης του θόλου. Η κίνηση του γίνεται πάνω σε δυο σιδηροτροχιές που αποτελούν τους οδηγούς. Στην συνέχεια γίνεται η τοποθέτηση και συναρμολόγηση των τεμαχίων του μεταλλότυπου. Οι σιδηροτροχιές ή αλλιώς λεγόμενοι οδηγοί τοποθετούνται με απόλυτη ακρίβεια, η τοποθέτηση τους γίνεται με την χρήση ταχυμέτρου σύμφωνα με την γεωμετρία της κατασκευής μας.

Όπως προαναφέραμε ο μεταλλότυπος είναι κατασκευασμένος από χάλυβα, όπου είναι μια ισχυρή κατασκευή ώστε να μπορεί να παραλάβει οποιαδήποτε φορτία και πιέσεις. Σε κάθε από τις πλευρές του φέρει σειρά ανοιγμάτων τα οποία επιτρέπουν την σκυροδέτηση καθώς και την προσπέλαση των δονητών και την επιθεώρηση του διαστρωμένου σκυροδέματος πίσω από το μεταλλότυπο. Αυτά τα ανοίγματα έχουν διαστάσεις 0.45\*0.90 m με την μεγάλη διάσταση παράλληλη προς τον άξονα της σήραγγας και οι θύρες τους ανοίγουν χειροκίνητα από τις εξέδρες όπου έχουν διαμορφωθεί.



(εικόνα 5 Το χάλυβδινο τόξο σε πλήρη στοίχιση και τροχοδρόμηση.)

Ο μεταλλότυπος αφαιρείται μέσα σε 24 ώρες από την σκυροδέτηση, ώστε να μην κολλήσει το σκυρόδεμα στην επιφάνεια του μεταλλότυπου. Στη συνέχεια ακολουθεί η επισκευή και γενικά η επεξεργασία της επιφάνειας του σκυροδέματος. Οι επισκευές που εκτελούνται αφορούν την πλήρωση κενών στο

σκυρόδεμα, οι οποίες δημιουργήθηκαν κατά την αφαίρεση του μεταλλότυπου. Γενικά επιδιορθώνονται κάθε εσοχή, ανωμαλία, διόγκωση κάθε κενό που έχει δημιουργηθεί από φυσαλίδα. Το υλικό πλήρωσης είναι κονίαμα με τσιμέντο και άμμο(λεπτόκοκκο) σε αναλογία 1:2.

Η τελική επένδυση κατασκευάζεται από σκυρόδεμα κατηγορίας C30/37 πάχους 45 cm και χρησιμοποιήθηκε χάλυβας S500s. Το μήκος της επικάλυψης των ράβδων οπλισμού πρέπει να μην είναι μικρότερο από το προδιαγραφόμενο πέραν των 25mm.



(εικόνα 6 Ο μεταλλότυπος τροχοδρομείται στην διατομή)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### 6.ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΤΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ

#### 6.1. Τοπογραφικά στοιχεία – Προδιαγραφές

Πριν από την έναρξη κατασκευής ενός έργου ,ο μηχανικός πρέπει να έχει διαθέσιμες τις μελέτες που αφορούν στην κατασκευή του έργου. Αυτό είναι αυτονόητο διότι είναι απολύτως απαραίτητο να εξαχθούν εγκαίρως οποιαδήποτε στοιχεία είναι απαραίτητα για την κατασκευαστική πρόοδο του έργου, όπως μηκοτομές και οριζοντιογραφίες, τυπικές διατομές της σήραγγας ώστε να διασφαλίζεται κάθε στιγμή η ορθότητα της κατασκευής και της γεωμετρίας. Επίσης, πληροφορίες οι οποίες είναι χρήσιμες στον μηχανικό αποτελούν τα στοιχεία τριγωνομετρικού δικτύου και υψομετρικού δικτύου που υπάρχουν στην περιοχή.

#### Προδιαγραφές

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η σωστή κατασκευή της σήραγγας τόσο η διεύθυνση της όσο και τα στατικά, λαμβάνονται υπόψη κάποιες προδιαγραφές, οι οποίες είτε δημοσιεύονται σε έντυπα(για παράδειγμα στην τεχνική συγγραφή υποχρεώσεων),είτε εμπεριέχονται ως σχόλια στις αντίστοιχες μελέτες στις οποίες αφορούν.

#### 6.2. Γεωδαιτικές εργασίες σήραγγας

Ο μηχανικός είναι ο κύριος υπεύθυνος για την άρτια γεωμετρία ενός υπόγειου έργου καθώς επίσης και για την πιστοποίηση αυτής. Η παρουσία του κρίνεται απαραίτητη από την αρχή του έργου μέχρι το πέρας αυτού. Στην συνέχεια παρατίθενται οι εργασίες πεδίου που απαιτούνται.

#### A. Οριοθέτηση του μετώπου της σήραγγας

Μια από τις πρώτες εργασίες που απασχολεί το μηχανικό είναι η χάραξη και οριοθέτηση της εκσκαφής, ώστε να επιτευχθεί η απαιτούμενη θέση του μετώπου εξόδου ,το οποίο έχει οριστεί από την αρχική μελέτη. Κατά την φάση των εργασιών ,υπάρχουν δυο θέματα που χρίζουν ιδιαίτερης προσοχής και είναι **α)** τα όρια της εκσκαφής ,δηλαδή από πού θα ξεκινήσει η εκσκαφή να κινείται προς τα κάτω και **β)** οι κλίσεις των πρανών της εξόδου.

## **B) Εγκατάσταση τριγωνομετρικού δικτύου**

Με την περάτωση των εργασιών του περιβάλλοντα χώρου ,η επόμενη και αρκετά σημαντική εργασία είναι η ίδρυση τριγωνομετρικού δικτύου. Έτσι λοιπόν, αρχικά ιδρύονται τα τριγωνομετρικά βάθρα στην περιοχή των μετώπων της σήραγγας, από τα οποία εξασφαλίζονται αμοιβαίες σκοπεύσεις.



(εικόνα 7 Τριγωνομετρικά βάθρα)

Επίσης εκτός από το οριζοντιογραφικό δίκτυο πρέπει να ιδρυθεί και το υψομετρικό δίκτυο το οποίο αποτελείται από τις ίδιες στάσεις του οριζοντιογραφικού δικτύου ,είτε από επιπλέον υψομετρικά βάθρα.

## **Γ) Ίδρυση πολυγωνομετρικού δικτύου εντός της σήραγγας**

### **Στάσεις**

Όσο η διάνοιξη μιας σήραγγας προχωρά, τόσο το μέτωπο της απομακρύνεται από αρχικώς εγκατεστημένα στους εξωτερικούς χώρους τριγωνομετρικά δίκτυα .Έτσι κρίνεται η ανάγκη ίδρυσης ενός πολυγωνομετρικού δικτύου μέσα στη σήραγγα, ώστε να καθίσταται δυνατή η γρήγορη και ασφαλής περαίωση των εργασιών του μηχανικού. Εδώ χρειάζεται αρχικά η εγκατάσταση στάσεων οι οποίες θα μπορέσουν να χρησιμοποιηθούν με άνεση και ασφάλεια. Οι τρόποι που χρησιμοποιούνται είναι οι ακόλουθη:

### **Ø Με πάκτωση στα τοιχώματα της σήραγγας**

Ο τρόπος αυτός είναι αρκετά σίγουρος διότι επιτρέπει την ίδρυση στάσεων όσο το δυνατόν μακριά από την κυκλοφορία των οχημάτων που κινούνται στην σήραγγα. Η διάτρηση για την τοποθέτηση των ράβδων διεξάγεται με διατρητικό μηχάνημα ,επομένως η αγκύρωση τους μπορεί να γίνει σε μεγάλο μήκος. Παρ'όλα αυτά, οι στάσεις αυτές δεν είναι απολύτως ασφαλείς αφού ενδέχεται να χτυπηθούν από μηχανήματα ή φορτηγά κατά την διέλευση τους.



(εικόνα 8 Στάση με αγκυρωμένες ράβδους χάλυβα και ενεματώσεις τσιμέντου)

### **Ø Με βάθρα από τσιμέντο**

Η κατασκευή τσιμεντένιων βάθρων στον πυθμένα της σήραγγας εξασφαλίζει μεγαλύτερες ορατότητες και μεγαλύτερη διάρκεια χρήσης ,έχοντας όμως ένα μειονέκτημα να είναι πιο ευάλωτες σε καταστροφή από πρόσκρουση με κάποιο όχημα

### **Ø Στην τελική επένδυση της σήραγγας**

Η τελική επένδυση αποτελεί και το τελικό στάδιο στις φάσεις διάνοιξης μιας σήραγγας. Επομένως οι στάσεις στην τελική θα είναι και οι τελευταίες που εγκαθίστανται στο έργο.



(εικόνα 9 Στάση πακτωμένη στην τελική επένδυση)

### 6.3. Οδεύσεις

Οι πολυγωνικές οδεύσεις συνδέονται και εξαρτώνται από το τριγωνομετρικό δίκτυο. Αποτελούνται από μια σειρά διαδοχικών στάσεων που σχηματίζουν στην προβολή τους μια τεθλασμένη γραμμή.

Υπολογισμός της όδευσης είναι η επίλυση και ένταξη των συντεταγμένων όλων των σημείων (κορυφών). Μετά τον υπολογισμό της, η όδευση αποτελεί τον βασικό άξονα πάνω στον οποίο οι μετρήσεις των σημείων λεπτομερειών του εδάφους και της σήραγγας, για τον προσδιορισμό τους ως προς το σύστημα αναφοράς.

#### 6.3.1. Ανοιχτή εξαρτημένη όδευση με προσανατολισμό στα δυο άκρα

Είναι η κατηγορία οδεύσεων που εφαρμόστηκε στο έργο μας. Οι οδεύσεις αυτής της κατηγορίας ξεκινούν και καταλήγουν σε στάσεις γνωστών συντεταγμένων (A,B), από τα οποία έχουν μετρηθεί οι γωνίες προς δυο άλλες γνωστές στάσεις. Η επίλυση των οδεύσεων αυτών επιτρέπει τον έλεγχο των γωνιομετρήσεων και τον υπολογισμό της γραμμικής μετατόπισης του τελευταίου σημείου της όδευσης (ολικό σφάλμα). Όμως εξαρτάται και από τα δυο άκρα και για αυτό η πραγματοποίηση της γίνεται μόνο όταν τελειώσει η διάνοιξη της σήραγγας δηλαδή το ξेत्रύπημα.

Η επίλυση της όδευσης αυτής γίνεται για δυο λόγους:

Ο πρώτος λόγος αφορά την διαπίστωση της ορθότητας των δικτύων των δυο κατασκευαστικών μετώπων της σήραγγας, για τα οποία δεν υπήρχε δυνατότητα ελέγχου.



Ο δεύτερος λόγος αφορά στην ένταξη όλης της σήραγγας σε ένα ενιαίο οριζοντιογραφικό και υψομετρικό δίκτυο, προκειμένου να διασφαλιστεί η ομοιογένεια της κατασκευής.

#### **6.4. Χάραξη πορείας των δοκών προπορείας**

Όπως έχει προαναφερθεί, οι δοκοί προπορείας χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση του μετώπου σε μη συνεκτικά εδάφη, τα οποία έχουν κακές μηχανικές ιδιότητες. Η τοποθέτησή τους γίνεται συνήθως στις εισόδους της σήραγγας αλλά, αναλόγως με τις γεωλογικές συνθήκες και εντός της σήραγγας. Κατά την εφαρμογή δοκών προπορείας, ο μηχανικός έχει την ευθύνη ώστε να κατευθύνει το διατηρητικό μηχάνημα ,προκειμένου οι δοκοί προπορείας να έχουν την καθορισμένη κατεύθυνση.

##### **6.4.1. Έλεγχος γεωμετρίας πλαισίων και ταυτόχρονη χάραξη άξονα**

Όλες οι διατομές ανεξαρτήτου κατηγορίας, έχουν μία συγκεκριμένη γεωμετρία. Έτσι λοιπόν, αφού ο μηχανικός έχει εξάγει στοιχεία για την γεωμετρία κάθε διατομής, είναι σε θέση να ορίσει που ακριβώς θα τοποθετηθεί το πλαίσιο. Κατά τις εργασίες τοποθέτησης ενός πλαισίου, ο μηχανικός ελέγχει την απόκλιση του πλαισίου σε σχέση με την θεωρητική του θέση από την μελέτη εφαρμογής. Σήμερα, με την βοήθεια σύγχρονων γεωδαιτικών οργάνων τα οποία παρέχουν τη δυνατότητα εισαγωγής και επεξεργασίας δεδομένων σε λογισμικά, μειώνεται σημαντικά ο χρόνος και ο βαθμός δυσκολίας της διαδικασίας, η οποία πλέον είναι αρκετά απλουστευμένη στην πράξη.

Έπειτα από την τοποθέτηση του πλαισίου, η τελευταία εργασία που απομένει είναι η παραλαβή του πλαισίου και της εκσκαφής. Στην ουσία η διαδικασία της παραλαβής αποτελεί την αποτύπωση του πλαισίου και της εκσκαφής σε σχέση με την θεωρητική θέση του πλαισίου.

#### **6.5. Χάραξη γραμμής διάτρησης**

Μετά την διάστρωση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, το μέτωπο εκσκαφής (καθρέπτης) είναι έτοιμο για την επόμενη διάτρηση. Όπως αναφέρθηκε όμως, σε αντίθεση με τα πλαίσια εδώ ο χειριστής δεν γνωρίζει ποια τα όρια της, έτσι, χαράσσονται τα όρια της διατομής της ανάλογης κατηγορίας εκσκαφής ώστε να είναι δυνατή η πρόοδος των επιμέρους εργασιών .

### **6.5.1. Θεωρητικός Γεωμετρικός έλεγχος της εκσκαφής Β΄ φάσης**

Όλες οι εργασίες που αναφέρθηκαν μέχρι στιγμής, αφορούν εργασίες στην Α΄ φάση εκσκαφής. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η διάνοιξη διεξάγεται σε δύο ή περισσότερες φάσεις στις οποίες επίσης, είναι απαραίτητη η παρουσία Μηχανικού. Το αντικείμενο δεν διαφέρει ιδιαίτερα από αυτό της Α΄ Φάσης, δηλαδή ελέγχεται η εκσκαφή των παρειών, η σωστή τοποθέτηση των απολήξεων των πλαισίων (ποδαρικά) καθώς και αν επιτυγχάνεται η επιθυμητή στάθμη του πυθμένα (ταμπάνι).

### **6.5.2. Γεωμετρικός έλεγχος μεταλλότυπου θόλου**

Ο μεταλλότυπος θόλου είναι ουσιαστικά το καλούπι το οποίο χρησιμοποιείται για την σκυροδέτηση της τελικής επένδυσης. Είναι λοιπόν αυτονόητο ότι η γεωμετρία του καλουπιού πρέπει να ταιριάζει με αυτή της θεωρητικής τελικής επένδυσης. Κι εδώ πάλι, ο μηχανικός καλείται ελέγχοντας τις αποκλίσεις από τις θεωρητικές τιμές να υλοποιήσει την βέλτιστη θέση τοποθέτησής του (στήσιμο). Επίσης, κατά την αρχική τοποθέτηση του μεταλλότυπου διεξάγεται ταυτόχρονος έλεγχος και στα δύο άκρα του, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η συνολική ταύτιση του με την γεωμετρία της τυπικής διατομής. Μετά και τον τελικό γεωμετρικό έλεγχο, ο μεταλλότυπος μετακινείται στην κατάλληλη θέση και μπορεί να ξεκινήσει η διαδικασία σκυροδέτησης.

### **6.5.3. Γεωμετρικός έλεγχος τελικής επένδυσης**

Μετά την φάση της σκυροδέτησης της τελικής επένδυσης, κρίνεται απαραίτητος ο έλεγχος της Ο έλεγχος αυτός θα υποδείξει κατά πόσο η γεωμετρία κατασκευής ταυτίζεται με τη θεωρητική γραμμή ή αν υπάρχουν αποκλίσεις να παρθούν μέτρα για την εξάλειψη η βελτίωση αυτών.

## **6.6. Εφαρμογή γεωδαιτικών μεθόδων στην παρακολούθηση μικρομετακινήσεων σηράγγων**

### **6.6.1. Μέθοδος μετρήσεων**

Η γεωδαιτική μέθοδος παρακολούθησης των εδαφικών παραμορφώσεων στα τοιχώματα μιας σήραγγας βασίζεται στις αρχές της ταχυμετρίας. Αρχικά ορίζονται οι στάσεις σκόπευσης(οι οποίες συχνά επιλέγονται μεταξύ των στάσεων στον άξονα της σήραγγας που ορίζονται για τη χάραξη της σήραγγας). Οι συντεταγμένες των σημείων στάσεων λαμβάνονται ως προς ένα τοπικό

σύστημα αναφοράς που συνήθως ορίζεται για τις ανάγκες του έργου, εξαρτώμενο από γειτονικά σημεία του τριγωνομετρικού δικτύου ή από τοπικό δίκτυο. Η μέτρηση γίνεται διαδοχικά σε κάθε έναν από τους στόχους μιας διατομής και καταγράφονται οι συντεταγμένες τους. Διατομές ελέγχου ορίζονται σε αποστάσεις που κυμαίνονται από 5 ως 100m ανάλογα με τις συνθήκες και απαιτήσεις του έργου.

Η παρακολούθηση των εδαφικών παραμορφώσεων της σήραγγας είναι πιθανότατα η πιο σημαντική εργασία του τοπογραφικού συνεργείου, καθότι αποτελεί τον μοναδικό τρόπο πρόληψης πιθανής κατάρρευσης της σήραγγας. Έτσι, κρίθηκε σκόπιμη η περαιτέρω αναφορά σε αυτή την διαδικασία.

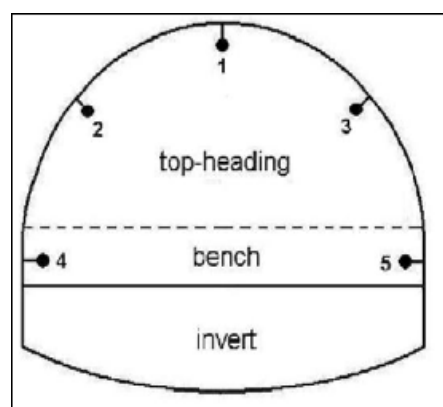
### 6.6.2. Στάσεις του οργάνου και θέσεις στόχων σκόπευσης

#### Στάσεις

Οι δύο μέθοδοι μετρήσεων που χρησιμοποιούνται για τις μετρήσεις μικρομετακινήσεων είναι α) το στήσιμο σε στάση, μηδενισμός σε προηγούμενη στάση και σκόπευση των σταθμών και, β) η μέτρηση των σταθμών συγκλίσεων από ελεύθερη στάση.

### 6.6.3. Θέσεις στόχων σκόπευσης

Αμέσως μετά την τοποθέτηση της προσωρινής αντιστήριξης και σε μικρό χρονικό διάστημα από τη διάνοιξη σε κάθε διατομή ελέγχου, εγκαθίστανται τρεις οπτικοί στόχοι(ανακλαστήρες) ένας στην κλείδα και δύο εκατέρωθεν αυτής στις παρειές της. Κατά την εκσκαφή της β' φάσης τοποθετούνται δύο ακόμη ανακλαστήρες χαμηλότερα στις παρειές και κοντά στον πυθμένα για την παρακολούθηση ολόκληρης της διατομής



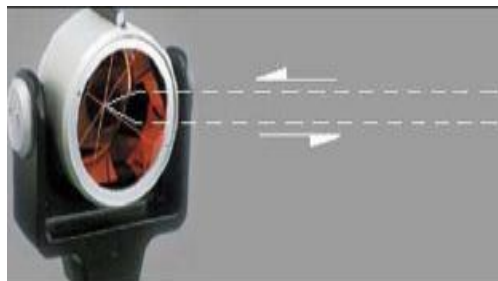
(εικόνα 10 Σχηματική διάταξη εγκατάστασης οπτικών στόχων)

#### 6.6.4. Γεωδαιτικά Όργανα

Για τη διάνοιξη σηράγγων χρησιμοποιούνται συνήθως ηλεκτρονικοί θεοδόλιχοι (total station) ακρίβειας. Τα τελευταία χρόνια δε, τα γεωδαιτικά όργανα νέας γενιάς (Ρομποτικά– Robotic Total Station, RTS) βρίσκουν ευρεία εφαρμογή σε σήραγγες, κυρίως για την παρακολούθηση των παραμορφώσεων της επιφάνειας του εδάφους πάνω από σήραγγες Μετρό σε αστικό περιβάλλον. Επίσης, σύγχρονοι γεωδαιτικοί σταθμοί που δεν απαιτούν τη χρήση ανακλαστήρων(reflector less; non prism total stations) έχουν κάνει την εμφάνισή τους σε υπόγεια έργα.

#### Ανακλαστήρες

Οι διάφοροι ανακλαστήρες που είναι διαθέσιμοι διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες ανάλογα με την οπτική τους λειτουργία: i) τους πρισματικούς και ii) τους επίπεδους



(εικόνα 11 Βασικοί τύποι ανακλαστήρων (άνω: πρισματικός, κάτω:επίπεδος πλαστικός)

Στις περισσότερες περιπτώσεις μετρήσεων σε σήραγγες κυρίως μη-πρισματικοί αυτοκόλλητοι ή πλαστικοί στόχοι διαστάσεων 3-4cm.

### **6.6.5. Συχνότητα Μετρήσεων**

Οι μετρήσεις ξεκινούν λίγο μετά τη διάνοιξη μιας διατομής και επαναλαμβάνονται καθημερινά μέχρι τη χρονική στιγμή που δεν παρατηρείται επιπλέον μεταβολή των συντεταγμένων των στόχων. Μετά από το παραπάνω διάστημα συνήθως εξακολουθούν οι μετρήσεις αλλά με πολύ χαμηλότερη συχνότητα ώστε να καταγράφονται πιθανές (μικρές) μετακινήσεις από φαινόμενα ερπυσμού κλπ. Οι μετρήσεις αυτές γίνονται περίπου με εβδομαδιαία ως μηνιαία συχνότητα.

### **6.6.6. Συνθήκες μετρήσεων - Προβλήματα και δυσκολίες**

#### **Συνθήκες μετρήσεων στο εσωτερικό σήραγγων**

Η δυσκολία των μετρήσεων στις σήραγγες οφείλεται στις συνθήκες του περιβάλλοντος στο εσωτερικό τους (καπνός, μειωμένη ορατότητα, κακός φωτισμός, σκόνη, υγρασία, λάσπη, θόρυβος) και στη συνεχή κίνηση οχημάτων και προσωπικού. Συχνά προκαλείται καθυστέρηση στις μετρήσεις από τις δονήσεις των σκαπτικών μηχανημάτων που δουλεύουν σε αποστάσεις λίγων μέτρων. Τέλος, σε πολλές περιπτώσεις, διαρροές νερού, λάσπη ή αστάθεια του πυθμένα δημιουργούν προβλήματα στη σήμανση των στάσεων και στη διεξαγωγή των μετρήσεων.

### **6.6.7. Καταγραφή μετακινήσεων στις σήραγγες**

Στο παρελθόν, η μέτρηση των παραμορφώσεων της διατομής σήραγγας βασιζόταν στη χρήση μηκυσιόμετρων ακριβείας, μια μέθοδος χρονοβόρα και δύσχρηστη, που παρέχει μόνο σχετικές μεταβολές των μετρούμενων αποστάσεων. Σήμερα η παρακολούθηση των παραμορφώσεων βασίζεται σχεδόν αποκλειστικά στη χρήση γεωδαιτικών οργάνων και μεθοδολογιών, που απόλυτες μεταβολές των θέσεων των σημείων ελέγχου παρέχουν σε τρεις διαστάσεις x,y,z και γενικά είναι πιο οικονομικές και εύχρηστες. Από τις μετρήσεις των συντεταγμένων υπολογίζονται οι παραμορφώσεις της διατομής κάθετα στον άξονα, ως οριζόντια και κατακόρυφη σύγκλιση. Η κατακόρυφη σύγκλιση ορίζεται ως η (απόλυτη) κατακόρυφη μετακίνηση του κεντρικού κατόπτρου δεδομένου ότι στις συνήθεις σήραγγες η κατασκευή άκαμπτης πλάκας σκυροδέματος στο κάτω μέρος της διατομής – invert – δεν

επιτρέπει ανύψωση του πυθμένα. Η οριζόντια σύγκλιση ορίζεται ως η σχετική μεταβολή της απόστασης των πλευρικών ανακλαστήρων

## **6.7. Πιστοποίηση κατασκευής**

### **6.7.1. Εσωτερικός έλεγχος**

Η χάραξη του άξονα της σήραγγας, ο έλεγχος των διατομών εκσκαφής, εκτοξευόμενου σκυροδέματος, τελικής επένδυσης είναι σημαντικά στοιχεία πιστοποίησης της ποιότητας και της προόδου ενός υπογείου έργου. Για παράδειγμα, ο έλεγχος των διατομών εκσκαφής καθώς και του βήματος προχώρησης, είναι πολύ σημαντικός για τον μηχανικό του έργου, ο οποίος μπορεί να κρίνει εάν τηρείται το ενδεδειγμένο σχέδιο ανατίναξης.

Επίσης, ο έλεγχος του βήματος προχώρησης και των συνολικών μέτρων προχώρησης, ημερησίως, εβδομαδιαίως ή μηνιαίως, είναι μία πληροφορία απολύτως αναγκαία για το εάν και κατά πόσο τηρείται το χρονοδιάγραμμα κατασκευής του έργου

### **6.7.2. Εξωτερικός έλεγχος**

Επιπροσθέτως, τα στοιχεία που συλλέγονται συνήθως κατατίθενται και σε εξωτερικούς ελεγκτικούς φορείς, όπως για παράδειγμα:

Ø Στην Επιβλέπουσα Αρχή (Ανεξάρτητος Μηχανικός, κτλ) την υπηρεσία δηλαδή που επιβλέπει την κατασκευή

Ø Στην Κοινοπραξία κατασκευής, εάν υπάρχει

Οι κυριότεροι λόγοι για τους οποίους οι υπηρεσίες απαιτούν τα στοιχεία κατασκευής, είναι οι εξής:

Ø Για την βεβαίωση της σωστής και σύμφωνα με τις προδιαγραφές κατασκευής του Έργου

- Ø Για την εξέταση και αξιολόγηση των προτάσεων ή λύσεων σε τυχόν προκύπτοντα προβλήματα στοιχείων και την εν συνεχεία παροχή
- Ø Για την χρηματική αποζημίωση του κατασκευαστή στο ποσοστό που του αναλογεί
- Ø Για τον έλεγχο ψευδούς κατάθεσης της κατασκευαστικής προόδου

### **6.8. Ο γεωδαιτικός σταθμός TCRM 1101 plus**

Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε για τις τοπογραφικές εργασίες και για την αποτύπωση των διατομών είναι ο γεωδαιτικός σταθμός της εταιρείας LEICA GEOSYSTEMS AG, σειρά TPS 1100, τύπος TCRM 1101 Plus. Το όργανο διαθέτει σκόπευτρο με δυνατότητα πλήρους περιστροφής επί οριζοντίου και κατακόρυφου άξονα και μπορεί να επιτύχει μετρήσεις ακρίβειας, μέχρι 3cc.

Ο Γεωδαιτικός σταθμός παρέχει πληθώρα λειτουργιών οι οποίες είναι πολύ χρήσιμες, διότι μειώνουν κατά πολύ τον χρόνο των εργασιών, όπως για παράδειγμα η αυτόματη εύρεση της θέσης του οργάνου με σκόπευση από ελεύθερη στάση. Η οριζοντίωσή του επιτυγχάνεται χονδρικά με αεροστάθμη και τρικόγλιο, ενώ η λεπτομερής διεξάγεται ψηφιακά, αφού το όργανο διαθέτει ευαίσθητο ηλεκτρονικό κλισίμετρο. Το όργανο διαθέτει υποδοχή κάρτας μνήμης αλλά, λόγω της παλαιότητας του (εν συγκρίσει με την αλματώδη πρόοδο της τεχνολογίας) υποστηρίζει μνήμη μέχρι 32Mb. Επίσης, το όργανο περιέχει λογισμικό Οδοποιίας με το οποίο καθίσταται δυνατή η χάραξη σημείων, είτε αυτά ανήκουν στον άξονα είτε σε οριογραμμή και κυρίως, ο υψομετρικός καθορισμός τους, αφού το λογισμικό επιδέχεται την εισαγωγή μηκοτομικών, οριζοντιογραφικών και στοιχείων επικλίσεων. Η πιο σημαντική λειτουργία που παρέχει όμως είναι η δυνατότητα μέτρησης χωρίς πρίσμα, αφού έτσι είναι δυνατή η αποτύπωση δυσπρόσιτων σημείων.



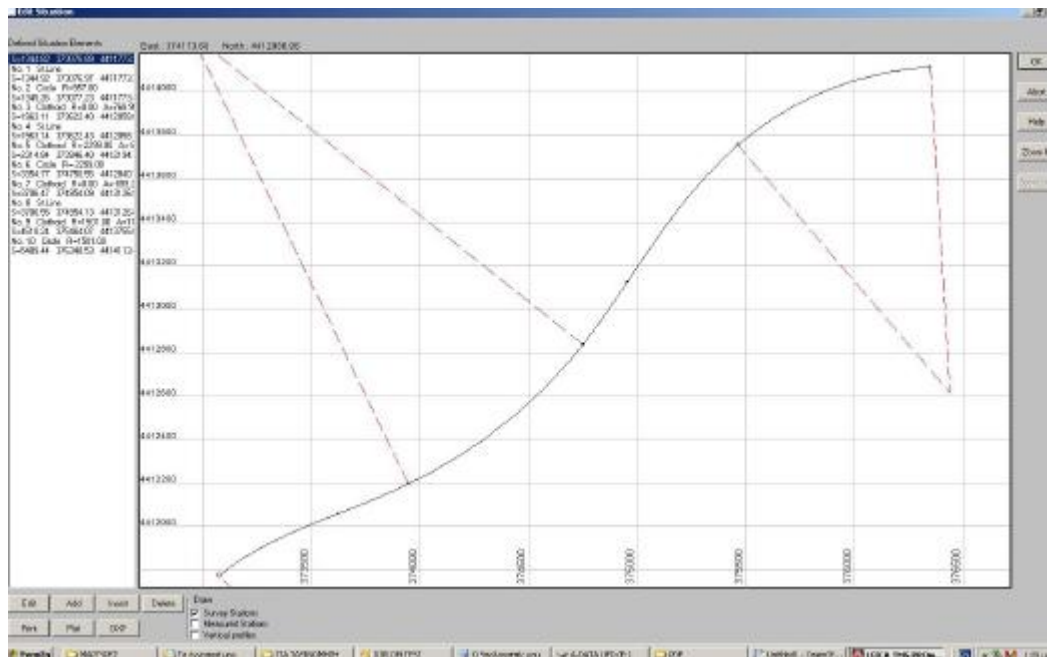
(εικόνα 12 Ο γεωδαιτικός σταθμός Leica TCRM 1101)

### **6.8.1. Το λογισμικό TMS (Tunnel Measuring System)**

#### **Βασικές λειτουργίες**

Το λογισμικό TMS PROwin της Leica Geosystems είναι ένα πολυχρηστικό εργαλείο για τον Μηχανικό, το οποίο αναπτύχθηκε με γνώμονα την εύκολη και γρήγορη περάτωση πληθώρας εργασιών εντός της σήραγγας. Το λογισμικό παρέχει την δυνατότητα εισαγωγής μηκοτομικών και οριζοντιογραφικών στοιχείων, καθώς και θεωρητικών διατομών. Η διαδικασία εισαγωγής δεδομένων περιγράφεται στο παράρτημα.



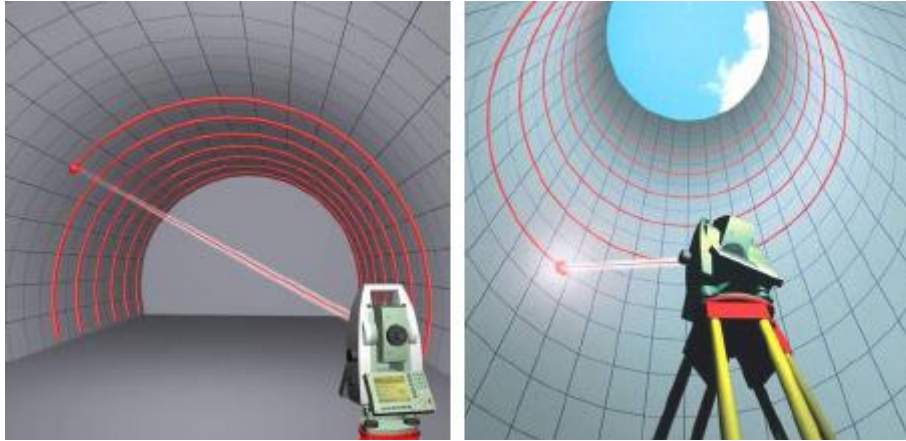


(σκαρίφημα 2 Εισαγωγή στοιχείων οριζοντιογραφίας)

Το βασικότερο προτέρημά του είναι η λήψη διατομών εντός σήραγγας και η δυνατότητα άμεσης εξαγωγής αποτελεσμάτων για την αξιολόγησή τους. Μερικές από τις λειτουργίες που προσφέρει το λογισμικό TMS PROwin και σχετίζονται άμεσα με τις εργασίες σε σήραγγα είναι οι εξής:

- Άμεσος έλεγχος διατομής εκσκαφής
- Υπολογισμός εμβαδού και όγκου των στρώσεων gunite ή σκυροδέματος
- Υπολογισμός γεωλογικών υποεκσκαφών ή υπερεκσκαφών

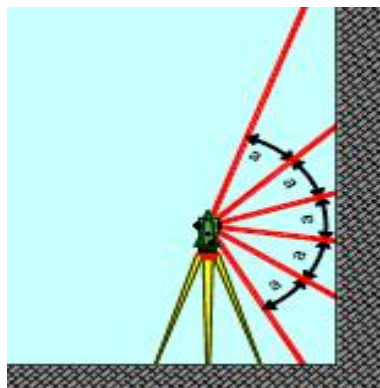
Με το λογισμικό είναι δυνατή επίσης η αποτύπωση είτε μεμονωμένων σημείων, επιλέγοντας δηλαδή ο χειριστής τα σημεία, είτε πολλαπλών σημείων σε συγκεκριμένες θέσεις, επιλέγοντας την αυτόματη μέθοδο. Οι μετρήσεις διεξάγονται χωρίς πρίσμα αλλά με δεσμίδα laser ενώ είναι δυνατή η αποτύπωση σε διατομή κάθετη στον άξονα της σήραγγας καθώς και πλευρική διατομή, παράλληλη δηλαδή με τον άξονα. Η δεύτερη χρησιμοποιείται συνήθως στην αποτύπωση.



εικόνα 13 α) Διατομή κάθετη στον άξονα β) Πλευρική παραλαβή διατομής

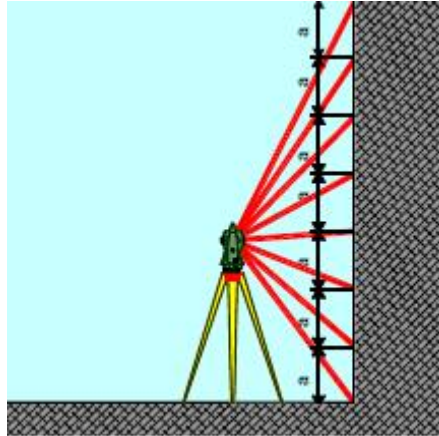
Μερικοί ακόμη τρόποι αποτύπωσης που μπορούν να επιλεγούν είναι οι εξής:

1. Μπορούν να αποτυπωθούν σημεία με βάση την γωνιακή διάταξη (ή αραίωση), δηλαδή το όργανο μπορεί να στρέφεται κατά μία συγκεκριμένη γωνία κάθε φορά ανάμεσα από την αποτύπωση κάθε σημείου



εικόνα 14 α) Διατομή κάθετη στον άξονα

2. Επίσης, πάνω στην ίδια λογική, δύναται να παραληφθούν σημεία με κριτήριο την απόσταση μεταξύ τους. Το όργανο δηλαδή στρέφεται έτσι, ώστε τα αποτυπωθέντα σημεία να ισαπέχουν μεταξύ τους



εικόνα 15 β) Πλευρική παραλαβή διατομής

3. Τέλος, το λογισμικό επιδέχεται την εισαγωγή κανάβου αποτύπωσης καθώς επίσης και συγκεκριμένων προτύπων αποτύπωσης (συνδυασμό των παραπάνω).

## 6.9. Αποτυπώσεις διατομών

### 6.9.1. Βασικές αρχές

Η επιλογή της μεθόδου διάνοιξης σηράγγων, δηλαδή εκσκαφή με ανατινάξεις ή με μηχανικά μέσα, εκσκαφή ολομετώπου προσβολής σε μία ή περισσότερες φάσεις, καθώς και η επιλογή του εξοπλισμού, είναι αποφάσεις οι οποίες λαμβάνονται με βάση τα γεωλογικά και γεωτεχνικά στοιχεία από έρευνες που διεξάγονται ή έχουν διεξαχθεί στην περιοχή των σηράγγων. Η σήραγγα κατασκευάζεται με ένα καθορισμένο γεωμετρικό σχήμα το οποίο επίσης επιλέγεται ανάλογα με τις γεωλογικές συνθήκες που συναντώνται κατά τις ανωτέρω μελέτες, τον σκοπό που εξυπηρετεί η σήραγγα και άλλους παράγοντες.

Ωστόσο, κατά την φάση των εργασιών διάνοιξης και ιδιαίτερα στις συμβατικές μεθόδους, ενδέχεται να προκύψουν αρκετά δυσμενείς καταστάσεις (υπερεκσκαφές, υποεκσκαφές) οι οποίες προκαλούνται είτε λόγω της φύσης του εδάφους είτε λόγω της διαταραχής των πετρωμάτων λόγω εργασιών και επίσης, δεν είναι πάντοτε προβλέψιμες ελεγχόμενες. Συνεπώς, κρίνεται αναγκαία η δυνατότητα ελέγχου της γεωμετρίας και της διεύθυνσης της σήραγγας ανά πάσα στιγμή και σε κάθε φάση κατασκευής της. Συμπερασματικά, γίνεται αμέσως κατανοητό ότι πρέπει να υιοθετηθεί ένα σύστημα αναφοράς μέσω του οποίου θα είναι δυνατό να ελέγχεται κάθε παρέκκλιση από τα προβλεπόμενα στοιχεία της μελέτης.

### 6.9.2. Διαστάσεις εκσκαφής – Ανοχές ασφαλείας

Η εκσκαφή των διατομών της σήραγγας πρέπει να γίνεται με ελάχιστη υπερεκσκαφή, στις γραμμές, και διαστάσεις που ορίζονται στα σχέδια της εγκεκριμένης οριστικής μελέτης εκσκαφής και άμεσης υποστήριξης, με τις τυχόν αναγκαίες τροποποιήσεις της μελέτης εφαρμογής, η οποία συντάσσεται κατά την φάση των εργασιών εκσκαφής και άμεσης υποστήριξης.

Κατά την διαστασιολόγηση κατηγορίας εκσκαφής της σήραγγας έχουν ορισθεί λεπτομερώς τα στοιχεία εκείνα τα οποία καθορίζουν την γεωμετρία των χαρακτηριστικών γραμμών της διατομής της σήραγγας, τα οποία είναι τα παρακάτω και διαφέρουν για κάθε κατηγορία πετρώματος

### 6.9.3. Γραμμή ελάχιστης εκσκαφής

Είναι η γραμμή εκείνη μέσα από την οποία δεν επιτρέπεται παραμονή μη εκσκαφθέντος τμήματος της βραχομάζας, οποιουδήποτε είδους και διαστάσεων. Οι θεωρητικές ακτίνες που καθορίζουν σε κάθε θέση των διατομών της σήραγγας τη Γραμμή εκσκαφής), πρέπει να περιλαμβάνουν:

R: Ακτίνα διατομής χρήσης

d1: Το στατικώς απαιτούμενο πάχος της άμεσης υποστήριξης  
(εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και σιδηρά πλαίσια)

d2: Την πρόβλεψη για σύγκλιση

d3: Το συνολικό πάχος την στρώσης εξομάλυνσης (μη οπλισμένο με ίνες εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, στεγανωτική μεμβράνη)

d4: Το στατικώς απαιτούμενο πάχος της τελικής (μόνιμης) επένδυσης

Πολλές φορές, σε μία διατομή ενδέχεται να χρησιμοποιούνται παραπάνω από μία ακτίνες ή ακόμη και ευθείες γραμμές για τον σχεδιασμό και την διαστασιολόγησή της. Αυτό συνεπάγεται και τα παραπάνω στοιχεία d1,2..4, να διαφοροποιούνται αναλόγως. Επίσης, το μέγεθος d3 συνήθως ταυτίζεται με τα μεγέθη d1 και d2, δηλαδή ισχύει  $d3=d1+d2$ . Συμπεραίνεται λοιπόν ότι το πάχος της στρώσης εξομάλυνσης δεν υπερβαίνει το όριο της σύγκλισης.

Εκτός από τις ανοχές σε κάθε διατομή της σήραγγας, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και οι τυχόν αποκλίσεις του άξονα της πραγματικής εκσκαφής της σήραγγας σε σχέση με τον θεωρητικό άξονα, ώστε να εξασφαλιστεί η απαιτούμενη, σύμφωνα με την μελέτη γεωμετρία του θεωρητικού άξονα της σήραγγας (οριζοντιογραφικά και υψομετρικά). Έτσι

λοιπόν, αναφέρεται ότι ισχύουν (εάν δεν ορίζεται διαφορετικά) σαν μέγιστες δυνατές αποκλίσεις, οι ακόλουθες:

Για σήραγγες μήκους  $L < 500\text{m}$

- Μέγιστη οριζοντιογραφική απόκλιση άξονα  $\pm 0,05\text{m}$
- Μέγιστη μηκοτομική απόκλιση άξονα  $\pm 0.03\text{m}$

Για σήραγγες μήκους  $L > 500\text{m}$

- Μέγιστη οριζοντιογραφική απόκλιση άξονα  $\pm 0.10\text{m}$
- Μέγιστη μηκοτομική απόκλιση άξονα  $\pm 0.05\text{m}$

### **6.10. Εργασίες πεδίου**

Το αντικείμενο που πιθανότητα φέρει τη μεγαλύτερη βαρύτητα κατά την διάρκεια της διάνοιξης και κατασκευής μίας σήραγγας, είναι η ορθότητα της γεωμετρίας της και η σωστή πορεία της. Επιπλέον, από τα δύο αυτά ζητούμενα προκύπτουν και άλλα χρήσιμα δεδομένα, όπως για παράδειγμα η δομική αστοχία των μέτρων υποστήριξης ή της μόνιμης επένδυσης, ο εντοπισμός συγκλίσεων και καθιζήσεων, καθώς επίσης και οι όγκοι των εκσκαφών αλλά και των επενδύσεων (gunite, τελική επένδυση) του έργου. Για να εξαχθούν όμως όλα τα παραπάνω, κρίνεται απαραίτητη η δυνατότητα λήψης διατομών σε διάφορες θέσεις της σήραγγας.

Για να γίνει εφικτή η αποτύπωση διατομών εντός σηράγγων, απαραίτητη προϋπόθεση είναι να υπάρχουν

α) τα στοιχεία μελέτης της σήραγγας (οριζοντιογραφία, μηκοτομή, τυπικές διατομές)

β) η ύπαρξη πολυγωνομετρικού δικτύου εντός της σήραγγας, εξαρτημένου με το σύστημα αναφοράς της μελέτης

Οι παράγοντες που θα καθορίσουν τις εργασίες, τον εξοπλισμό και τον χρόνο που θα απαιτηθούν για την αποτύπωση διατομών, είναι οι εξής:

α) Η μέθοδος με την οποία θα γίνει η λήψη των στοιχείων, δηλαδή η επιλογή οργάνου(π.χ. Γεωδαιτικός σταθμός)

β) Ο τρόπος με τον οποίο θα διεξαχθεί η αποτύπωση, για παράδειγμα με την χρήση πρίσματος, δεσμίδας laser

Η διαδικασία που ακολουθείται για την αποτύπωση, εξαρτάται από τους παράγοντες που αναφέρθηκαν προηγουμένως, και είναι ξεχωριστή για κάθε μία. Βέβαια, οι διαδικασίες αυτές παρουσιάζουν και μερικά κοινά μεταξύ τους.

1. Έτσι λοιπόν, βασική προϋπόθεση της διαδικασίας που θα επιλεγεί αποτελεί το πεδίο συλλογής πληροφοριών που πρόκειται να αποτυπωθεί, το οποίο δεν είναι άλλο από την σήραγγα που κατασκευάζεται. Άρα, το πρώτο θέμα που πρέπει να διευθετηθεί, είναι η επιφάνεια προς αποτύπωση, δηλαδή εάν πρόκειται για μεγάλο μήκος σήραγγας ή για μεμονωμένες διατομές. Αυτό θα κρίνει σε μεγάλο βαθμό και την μέθοδο που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί αφού μεγάλο πεδίο συλλογής δεδομένων συνεπάγεται και μεγαλύτερο όγκο δεδομένων, άρα και ανάγκη για ταχύτερη μέθοδο αποτύπωσης.

2. Στη συνέχεια και ανεξάρτητα από την μέθοδο (γεωδαιτικός σταθμός) που επιλέγεται, το επόμενο βήμα είναι ο προσανατολισμός του οργάνου σε σχέση με την σήραγγα και, κυρίως με τον άξονα της σήραγγας (εάν αυτό είναι δυνατό, διότι μερικά όργανα δεν παρέχουν τέτοια δυνατότητα). Αυτό επιτυγχάνεται με την βοήθεια στάσεων οι οποίες ανήκουν σε πολυγωνομετρικό δίκτυο της σήραγγας.

3. Το τελευταίο βήμα αφορά εξ' ολοκλήρου στην μέθοδο αποτύπωσης που επιλέγεται.

A) Κατά την αποτύπωση με γεωδαιτικό σταθμό, το πλήθος των σημείων που θα αποτυπωθούν, καθώς και ποια σημεία της επιφάνειας της διατομής θα είναι αυτά, υπόκειται στην κρίση του Τοπογράφου. Τα σημεία που λαμβάνονται είναι αυτά τα οποία φαινομενικά έστω, τείνουν να πλησιάζουν προς την θεωρητική γραμμή αναφοράς που λαμβάνεται κάθε φορά.

B) Κατά την αυτόματη αποτύπωση με TMS profiler, είναι δυνατή η εισαγωγή του πεδίου συλλογής δεδομένων με την μορφή χιλιομετρικών θέσεων, αφού τα σύγχρονα όργανα παρέχουν λογισμικά με ανάλογες λειτουργίες. Επιπλέον, είναι δυνατή η επιλογή του βήματος λήψης μεταξύ των διατομών (π.χ. ανά 1 μέτρο), καθώς και η απόσταση από σημείο σε σημείο σε κάθε διατομή (π.χ. ανά 10cm).

## **6.11. Φάσεις αποτύπωσης διατομών σιηράγγων**

Στη σήραγγα, οι φάσεις αποτύπωσης διατομών, ακολουθούν την παρακάτω σειρά:

Φάση 1η: Αποτύπωση διατομής εκσκαφής

Φάση 2η: Αποτύπωση διατομής πρώτης στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος(Gunite)

Φάση 3η: Αποτύπωση διατομής εκτοξευόμενου σκυροδέματος μετά την εξομάλυνση (δεύτερη στρώση)

Φάση 4η: Αποτύπωση της τελικής επένδυσης

### **6.11.1. Αποτύπωση διατομής εκσκαφής**

Ο έλεγχος της εκσκαφής αποτελεί το πρώτο και πιο σημαντικό βήμα για την σωστή εξέλιξη των εργασιών (υποστήριξη, επένδυση) που έπονται. Σε αυτή τη φάση διαπιστώνεται ο βαθμός στον οποίο η πραγματική εκσκαφή ικανοποιεί τις συνθήκες εκείνες που απαιτεί η θεωρητική, εάν η γεωμετρία της είναι σωστή. Επίσης, η αποτύπωση της εκσκαφής αποτελεί μία διαδικασία αξιολόγησης της αποτελεσματικότητας των εφαρμοσμένων μεθόδων διάνοιξης.

Αφού ελεγχθεί και διαπιστωθεί ότι η εκσκαφή δεν επιδέχεται διορθώσεις, το επόμενο βήμα είναι η αποτύπωσή της.

Εδώ να σημειωθεί πως, όπως φαίνεται και στο ανωτέρω σχήμα, η εκσκαφή είναι μία ακανόνιστη γραμμή που αλλάζει συνεχώς, πόσο μάλλον εάν την επιφάνεια. Είναι κατανοητό λοιπόν ότι η λεπτομερής αποτύπωση της εκσκαφής φανταστούμε ως μία– ειδικά αν γίνει με την χρήση συμβατικών μεθόδων, όπως συμβαίνει στην πλειοψηφία των περιπτώσεων – θα είναι μία αρκετά επίπονη και χρονοβόρα διαδικασία , εάν αναλογιστούμε την πληθώρα σημείων που πρέπει να αποτυπωθούν. Έτσι λοιπόν, από την πραγματική εκσκαφή όπως αυτή φαίνεται στο ανωτέρω σχήμα, προκύπτει το ακόλουθο σχήμα το οποίο είναι αποτέλεσμα χειροκίνητης διαδικασίας, κύριος σκοπός της οποίας είναι η κατά το βέλτιστο πιστή απεικόνιση με λήψη των λιγότερων δυνατών σημείων

### **6.11.2. Αποτύπωση διατομής εκτοξευόμενου σκυροδέματος**

Τα επόμενο βήμα είναι η παραλαβή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ή Gunitite. Κι εδώ επίσης, όπως και στην εκσκαφή και όπως και σε κάθε διατομή, υπάρχει μία τυπική διατομή με την οποία ελέγχεται η σωστή εφαρμογή του Gunitite.

Σε αυτή τη φάση και, εάν όλοι οι άλλοι παράγοντες (εγκατεστημένες κοντινές στάσεις, απουσία σκόνης, ελάχιστη κυκλοφορία οχημάτων ή προσωπικού) είναι ικανοποιητικοί, η παραλαβή διεξάγεται αρκετά πιο γρήγορα. Ο κύριος λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι η επιφάνεια του Gunitite είναι εκ των πραγμάτων αρκετά πιο ομαλή από αυτή της εκσκαφής και, κατά συνέπεια, δεν υπάρχει τόση ανησυχία για το ποιο σημείο χρειάζεται αποτύπωση και ποιο όχι.

Βέβαια, αυτό δεν σημαίνει ότι δεν υπάρχουν περιπτώσεις όπου για διάφορους λόγους(απροσεξία του χειριστή, αδυναμία να αντιληφθεί τις ποσότητες που εκτοξεύονται, μικρή εκσκαφή) ακόμη και το Gunitite να εισχωρήσει στην θεωρητική γραμμή εφαρμογής του, προκαλώντας έτσι προβλήματα μεγάλης ή μικρής βαρύτητας.

### **6.11.3. Αποτύπωση εξομάλυνσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος και σκυροδέματος τελικής επένδυσης**

Και σε αυτές τις φάσεις δεν αλλάζει τίποτα στην διαδικασία αποτύπωσης, παρά μόνο η τυπική διατομή (γραμμή εξομάλυνσης gunitite, εσωράχιο τελικής επένδυσης για την τελική επένδυση. Τόσο κατά την παραλαβή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μετά την εξομάλυνση, όσο και κατά την παραλαβή της τελικής επένδυσης, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί αυτόματη μέθοδος αποτύπωσης της διατομής, λόγω της ομαλής κι ενιαίας καμπύλης επιφάνειας που δημιουργείται.



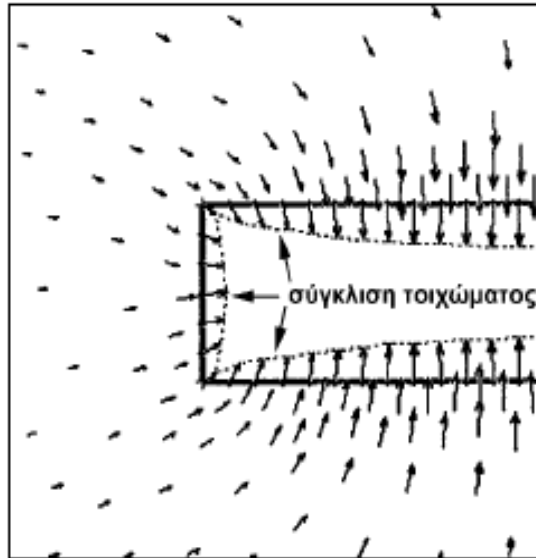
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

### 7. ΚΑΘΙΖΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΥΓΚΛΙΣΕΙΣ ΠΡΟΚΑΛΟΥΜΕΝΕΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

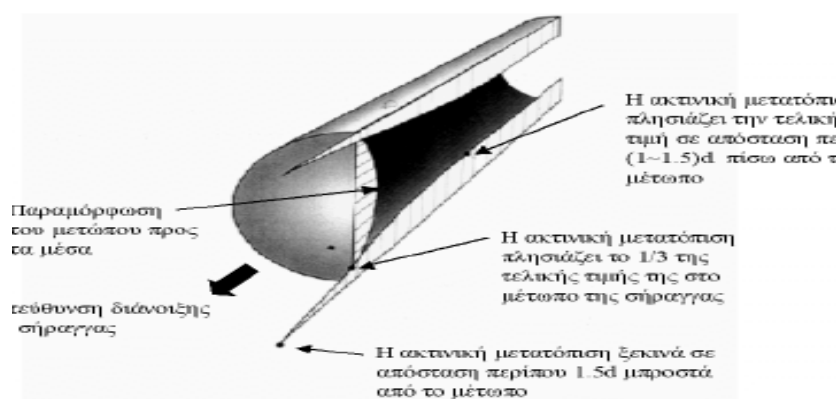
Κατά τη διάνοιξη σήραγγας οι μετατοπίσεις του εδάφους αρχίζουν σε θέσεις αρκετά μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής, δηλαδή πριν αυτό φτάσει σε κάποια συγκεκριμένη θέση. Στην Εικόνα 18 φαίνεται η παραμόρφωση της βραχομάζας κατά την προώθηση μιας κυκλικής σήραγγας μέσα σε υδροστατικό τασικό πεδίο ( $K=1$ ), μέσω μιας τρισδιάστατης ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία. Το σχήμα δείχνει τα διανύσματα μετατόπισης μέσα στη βραχομάζα καθώς και τη μορφή της παραμόρφωσης της σήραγγας. Στην Εικόνα 19 συνοψίζονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά της ανάλυσης.

Η παραμόρφωση της βραχομάζας ξεκινά σε απόσταση περίπου  $1.5d$  μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής, όπου  $d$  είναι η διάμετρος της σήραγγας και αποκτά τη μέγιστη τιμή της σε απόσταση περίπου  $(1\div 1.5)d$  μπροστά από το μέτωπο. Στη θέση του μετώπου το  $1/3$  περίπου της συνολικής σύγκλισης έχει ήδη σημειωθεί και το μέτωπο της σήραγγας μετατοπίζεται προς τα μέσα, όπως απεικονίζεται στις Εικόνες 1 και 2. Κατά πόσο οι παραμορφώσεις αυτές προκαλούν ή όχι προβλήματα ευστάθειας στη σήραγγα εξαρτάται από τον βαθμό αντοχής της βραχομάζας στο επίπεδο των επί τόπου τάσεων. Εάν η συμπεριφορά του εδάφους παρουσιάζει χαρακτηριστικά έντονης χαλάρωσης (δηλαδή μείωση της αντοχής με παρατεταμένη παραμόρφωση) τότε η διατομή της σήραγγας δεν ισορροπεί, η σύγκλιση της οροφής αυξάνει απεριόριστα και η διατομή καταρρέει.

Τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, χαλύβδινα πλαίσια, αγκύρια κλπ), τοποθετούνται συνήθως σε κάποια (μικρή) απόσταση πίσω από το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας. Σκοπός της τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης είναι ο περιορισμός της σύγκλισης του τοιχώματος της σήραγγας, η αποφυγή κατάρρευσης της οροφής (στην περίπτωση συμπεριφοράς τύπου χαλάρωσης) καθώς και η αποφυγή αποσφηνώσεων βραχωδών τεμαχίων.



(Εικόνα 16 Διανύσματα μετατόπισης μέσα στην βραχομάζα που περιβάλλει προωθούμενη σήραγγα)



(Εικόνα 17 Μορφή της παραμόρφωσης στη βραχομάζα που περιβάλλει μια υπό διάνοιξη σήραγγα)

Η τελική επένδυση συνήθως κατασκευάζεται μετά την ολοκλήρωση της διάνοιξης και άμεσης υποστήριξης του συνόλου του μήκους της σήραγγας αλλά οπωσδήποτε αφού η σήραγγα ισορροπήσει με την άμεση υποστήριξη. Η τελική

επένδυση της σήραγγας σχεδιάζεται για να αναλάβει μέρος (ή το σύνολο) των φορτίων της περιβάλλουσας βραχομάζας.

Η σύγκλιση του τοιχώματος μιας αβαθούς σήραγγας επηρεάζει τις καθιζήσεις της επιφάνειας του εδάφους και γι' αυτό η εκτίμηση της τιμής της σε διάφορες θέσεις είναι πολύ σημαντική και αποτελεί τον συνηθέστερο τρόπο ελέγχου των παραδοχών της μελέτης (μέσω σύγκρισης προβλέψεων - μετρήσεων) και προσαρμογής της διάνοιξης και υποστήριξης στις επί τόπου συνθήκες.

## 7.1. ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΚΑΘΙΖΗΣΕΙΣ

Η Εικόνα 18 παρουσιάζει την κατανομή των επιφανειακών καθιζήσεων που προκαλούνται από την κατασκευή σήραγγας. Οι όροι που καθορίζουν τη γεωμετρία, την καθίζηση και το σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιείται καθορίζονται στην εικόνα αυτή.

Ο Peck (1969) αναφέρει ότι η κατανομή των καθιζήσεων εγκάρσια στο διαμήκη άξονα της σήραγγας μπορεί να περιγραφεί από την ανεστραμμένη καμπύλη της κανονικής κατανομής (καμπύλη του Gauss) και αυτή η μαθηματική περιγραφή έχει γίνει ευρέως αποδεκτή από τότε. Ακολουθώντας αυτήν την προσέγγιση, η καθίζηση στην εγκάρσια διεύθυνση δίνεται από την εξίσωση:

$$S_{F(x)} = S_{F,\max} \cdot e^{-\frac{x^2}{2i_x^2}} \quad (1)$$

όπου το  $S_{v,\max}$  είναι η μέγιστη καθίζηση που μετριέται πάνω από τον άξονα της σήραγγας. Η παράμετρος  $i_x$  (παράμετρος πλάτους της καμπύλης), αντιπροσωπεύει την τυπική απόκλιση της καμπύλης των επιφανειακών καθιζήσεων.

Αναπόσπαστο μέρος κάθε μελέτης κατασκευής σήραγγας αποτελεί το πρόγραμμα της παρακολούθησης των παραμορφώσεων του έργου με κατάλληλα όργανα, τόσο κατά τη διάρκεια της κατασκευής του, όσο και κατά τη φάση της λειτουργίας του. Το πρόγραμμα ενόργανης παρακολούθησης είναι προσαρμοσμένο κυρίως σε γεωτεχνικά όργανα παρακολούθησης. Εκτός αυτών

όμως, γίνεται σήμερα ευρύτατη χρήση όλων των γνωστών γεωδαιτικών οργάνων.

Στις παραγράφους που ακολουθούν περιγράφονται οι μέθοδοι με τις οποίες μετρήθηκαν τα στοιχεία των επιφανειακών καθιζήσεων και των συγκλίσεων που μας διατέθηκαν από την Αττικό Μετρό Α.Ε. για το τμήμα της σήραγγας από το Αιγάλεω στον Κεραμεικό της Επέκτασης της Γραμμής 3.

## **7.2. Παρακολούθηση επιφανειακών καθιζήσεων**

Για τον προσδιορισμό των επιφανειακών καθιζήσεων πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις προς στόχους οι οποίοι τοποθετήθηκαν στην επιφάνεια του εδάφους, σε παρακείμενα κτίρια ή σε άλλες διαθέσιμες κατασκευές, κάθε 10m ή πιο σπάνια κάθε 50m. Οι μετρήσεις έγιναν με ψηφιακούς χωροβάτες έτσι ώστε να μετρηθούν οι απόλυτες καθιζήσεις των σημείων όπου τοποθετήθηκαν οι στόχοι και να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα από κοινού με άλλα όργανα. Η συνήθης ακρίβεια των μετρήσεων αυτών είναι 1-2mm.

Για τον προσδιορισμό των συγκλίσεων πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις προς οπτικούς ανακλαστήρες (στόχους) με χρήση ψηφιακών ολοκληρωμένων γεωδαιτικών σταθμών. Αποτέλεσμα των μετρήσεων είναι οι συντεταγμένες των ανακλαστήρων στο χώρο. Με τον τρόπο αυτό παρακολουθείται η χρονική εξέλιξη της μετακίνησης ενός σημείου του τοιχώματος της σήραγγας.

Οι μετρήσεις των παραμορφώσεων βασίζονται στο δίκτυο της σήραγγας. Μεταξύ των διαδοχικών διατομών συνιστώνται αποστάσεις της τάξεως των 10m-20m κατά μέσο όρο.

Τουλάχιστον τρεις στόχοι τοποθετούνται στο επάνω τμήμα της διατομής, περιλαμβάνοντας έναν στην στέψη και τουλάχιστον δυο στόχοι τοποθετούνται στο επίπεδο του ανάστροφου τόξου του πυθμένα.

Η ακρίβεια των μετρήσεων εξαρτάται από την απόσταση σκόπευσης, την ακρίβεια του οργάνου αλλά και άλλους παράγοντες όπως η θερμοκρασία του αέρα και η παρουσία καυσαερίων στη σήραγγα. Η συνήθης ακρίβεια τέτοιων μετρήσεων είναι 2-4mm.

Τα σημεία ελέγχου που απέχουν μικρή απόσταση από τον άξονα της σήραγγας εμφανίζουν μεγαλύτερες κατακόρυφες μετατοπίσεις σε σχέση με τα σημεία που απέχουν περισσότερο από αυτόν. Συνεπώς, η μέγιστη υπόγεια καθίζηση θα εμφανίζεται επάνω στον άξονα της σήραγγας, όπως άλλωστε αναμενόταν αφού από διεθνείς καταγραφές φαίνεται ότι και οι καμπύλες των υπόγειων καθιζήσεων κατά πλάτος της σήραγγας περιγράφονται από την ανεστραμμένη καμπύλη του Gauss.

### 7.3. Παρουσίαση Προγραμμάτων του *Verruijt*

Η πρόβλεψη των επιφανειακών καθιζήσεων και των κατακόρυφων μετατοπίσεων έγινε σε διάφορες χιλιομετρικές θέσεις της σήραγγας με χρήση αναλυτικών λύσεων ελαστικότητας (προγράμματα του Verruijt). Τα προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν (Jeffery, GroundLoss και Mindlin) στηρίζονται αντίστοιχα στην επίλυση τριών προβλημάτων.

Η γεωμετρία των προβλημάτων αυτών είναι εκείνη του ημι-επιπέδου με μια κυκλική κοιλότητα. Οι συνοριακές συνθήκες θεωρούν ότι το άνω σύνορο του ημι-επιπέδου είναι ελεύθερο τάσεων και ότι το σύνορο της κοιλότητας υφίσταται μια προκαθορισμένη μετατόπιση, για παράδειγμα μια ομοιόμορφη ακτινική μετατόπιση (πρόβλημα της απώλειας του εδάφους).

Το πρόβλημα του Jeffery θεωρεί ότι η κυκλική κοιλότητα φορτίζεται με ομοιόμορφη ακτινική τάση. Το πρόβλημα GroundLoss θεωρεί ότι το σύνορο της κοιλότητας υφίσταται μια ομοιόμορφη ακτινική μετατόπιση  $w$ . Το πρόβλημα του Mindlin θεωρεί ότι η κυκλική κοιλότητα φορτίζεται μόνο από τη βαρύτητα και επειδή κατά την εκσκαφή αφαιρείται έδαφος, δηλαδή βάρος, το έδαφος που υπόκειται του πυθμένα της σήραγγας αποφορτίζεται και ανυψώνεται.

#### 7.3.1. Χρήση Προγραμμάτων του *Verruijt*

Η διάνοιξη της σήραγγας στο εξεταζόμενο τμήμα της επέκτασης της Γραμμής 3 του Μετρό της Αθήνας, έγινε με τη μέθοδο NATM και ως εκ τούτου η διατομή που προέκυψε είναι κυκλική. Στα προγράμματα του Verruijt, η σήραγγα παριστάνεται με μια κυκλική κοιλότητα μέσα σε ένα ελαστικό ημι-επίπεδο. Για τη χρήση των προγραμμάτων αυτών υπολογίστηκε η ακτίνα του ισοδύναμου κύκλου της διατομής της σήραγγας, η οποία βρέθηκε ίση με:  $r=9\text{m}$ .

Το βάθος  $h$  του κέντρου του κύκλου υποτίθεται ότι βρίσκεται στη στάθμη γραμμών της σήραγγας. Στο τμήμα που εξετάζεται, ένα μέρος της σήραγγας βρίσκεται μέσα σε άργιλο-ιλύ και ένα μέρος της μέσα σε λατυποπαγές. Σύμφωνα με τα στοιχεία της Γεωτεχνικής Μελέτης της Αττικό Μετρό Α.Ε. οι σχηματισμοί αυτοί έχουν λόγο Poisson  $\nu=0.20$  και  $K_0=0.90$ , ενώ οι τιμές των γεωτεχνικών παραμέτρων  $E$  και  $\gamma$  διαφέρουν για κάθε σχηματισμό. Από το μέτρο ελαστικότητας του Young  $E$  και τον λόγο του Poisson  $\nu$  υπολογίζεται το μέτρο ελαστικότητας σε διάτμηση  $G$ , σύμφωνα με τη σχέση:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

Οι γεωτεχνικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στη Χ.Θ. 0+450 είναι:  
 $E=890\text{MPa}$ ,  $\gamma=24\text{KN/m}^3$  και  $G=371.04\text{MPa}$

Οι υπολογισμοί που πραγματοποιήθηκαν με τα προγράμματα Jeffery, GroundLoss και Mindlin για την πρόβλεψη της επιφανειακής καθίζησης πάνω στον άξονα της σήραγγας και της σύγκλισης της οροφής της σήραγγας στη Χ.Θ. 0+450 παρατίθενται στον Πίνακα 1.

Επιφανειακή Καθίζηση (m)			Σύγκλιση Οροφής (m)		
Jeffery	GroundLoss (w = 1 cm)	Mindlin	Jeffery	GroundLoss (w = 1 cm)	Mindlin
-0.006	-0.012	0.001	-0.008	-0.016	-0.001

Η μετρημένη τιμή της επιφανειακής καθίζησης στη Χ.Θ. 0+450 είναι της τάξεως του 1cm (9mm), ενώ η τιμή της ανύψωσης του εδάφους λόγω διάνοιξης της σήραγγας είναι σχεδόν μηδενική. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του προγράμματος Jeffery με τη μετρημένη επιφανειακή καθίζηση, παρατηρούμε ότι υπάρχει μία μικρή απόκλιση. Αυτό οφείλεται καταρχήν στο γεγονός ότι αλλάζει η στρωματογραφία, αλλά οι υπολογισμοί μας βασίστηκαν σε τιμές γεωτεχνικών παραμέτρων σταθερές για όλο το έδαφος κατά μήκος της σήραγγας. Βέβαια, δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι εκτός από την κατακόρυφη μετατόπιση, στην παραμόρφωση της σήραγγας συμβάλλουν μία ωοειδής παραμόρφωση και μία ομοιόμορφη ακτινική μετατόπιση, οι οποίες επηρεάζουν αισθητά το τελικό αποτέλεσμα και τις οποίες δε λάβαμε καθόλου υπόψη στο συγκεκριμένο πρόγραμμα. Όσον αφορά στο πρόγραμμα Ground Loss, για ομοιόμορφη ακτινική παραμόρφωση  $w = 1\text{cm}$ , οι τιμές των επιφανειακών καθιζήσεων που προκύπτουν είναι μέσα στα όρια της μέγιστης επιτρεπτής τιμής (0.025m). Τέλος, το πρόγραμμα Mindlin παράγει αποτελέσματα επιφανειακών καθιζήσεων που πλησιάζουν τις τιμές των πραγματικών μετρημένων καθιζήσεων, όπως συμπεραίνουμε από τον παραπάνω πίνακα. Παρόλο που έχουμε διαφορετική στρωματογραφία, το έδαφος κατά μήκος όλης της σήραγγας ανυψώνεται ελάχιστα (1cm ~2cm) λόγω της εκσκαφής και της αφαίρεσης ενός τμήματός του. Γι' αυτό το λόγο, τα θεωρητικά αποτελέσματα σχεδόν ταυτίζονται με τα πραγματικά δεδομένα.

Από τις αναλυτικές μεθόδους που εφαρμόστηκαν εκείνη που προσεγγίζει περισσότερο την πραγματική σύγκλιση στη στέψη της σήραγγας, που εκτιμάται γύρω στα 8mm, είναι το πρόγραμμα Jeffery, που προβλέπει συγκλίσεις της τάξεως των 8mm. Οι δύο άλλες αναλυτικές μέθοδοι που εφαρμόστηκαν, υπερεκτιμούν ή υποεκτιμούν τις σύγκλιση στη στέψη της σήραγγας. Το

πρόγραμμα GroundLoss δίνει σύγκλιση της τάξεως των 1.6cm για ομοιόμορφη ακτινική μετατόπιση  $w=1\text{cm}$  ενώ το πρόγραμμα Mindlin, δίνει σύγκλιση της τάξεως του 1 mm.

#### **7.4. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ “PHASE 2”**

Το “Phase 2” είναι ένα πρόγραμμα που υπολογίζει τις τάσεις και τις μετατοπίσεις γύρω από υπόγειες εκσκαφές, χρησιμοποιώντας τη δισδιάστατη πλαστική ανάλυση με Πεπερασμένα Στοιχεία. Με χρήση του προγράμματος “Phase 2” υπολογίστηκαν οι μετατοπίσεις που εμφανίζονται γύρω από τη σήραγγα της επέκτασης της Γραμμής 3 του Μετρό της Αθήνας Αιγάλεω-Κεραμεικός και οι επιφανειακές καθιζήσεις.

Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε πέντε στάδια. Στο πρώτο στάδιο (Stage 1), θεωρήθηκε η αρχική κατάσταση, πριν από την έναρξη των εκσκαφών. Στο δεύτερο στάδιο (Stage 2), πραγματοποιήθηκε η εκσκαφή του “άνω” μέρους της σήραγγας. Στο τρίτο στάδιο (Stage 3), πραγματοποιήθηκε η επένδυση του “άνω” μέρους της σήραγγας με σκυρόδεμα. Στο τέταρτο στάδιο (Stage 4), πραγματοποιήθηκε η εκσκαφή του “κάτω” μέρους της σήραγγας. Στο πέμπτο στάδιο (Stage 5), πραγματοποιήθηκε η επένδυση του “κάτω” μέρους της σήραγγας με σκυρόδεμα.

Στην Εικόνα 20 παρουσιάζονται οι επιφανειακές καθιζήσεις και οι κατακόρυφες μετατοπίσεις στο τοίχωμα της σήραγγας αφού ολοκληρωθεί η εκσκαφή και η τοποθέτηση της επένδυσης. Στην ίδια εικόνα φαίνονται τα διανύσματα κατακόρυφης μετατόπισης της περιβάλλουσας βραχώδους και η παραμόρφωση της διατομής της σήραγγας.

Στις Εικόνες 21 και 22 που παρατίθενται αντιστοιχούν στα διαγράμματα των επιφανειακών καθιζήσεων και των κατακόρυφων μετατοπίσεων στο τοίχωμα της σήραγγας, για το πρώτο, τρίτο και πέμπτο στάδιο εκσκαφής. Δεν απαιτείται η δημιουργία διαγραμμάτων κατά το δεύτερο και τέταρτο στάδιο εκσκαφής, διότι οι μετατοπίσεις στα στάδια αυτά ισούνται με εκείνες κατά το τρίτο και πέμπτο στάδιο αντίστοιχα, αφού η μόνη τους διαφορά είναι η τοποθέτηση της επένδυσης και συνεπώς δεν επηρεάζονται οι εδαφικές μετακινήσεις.

## 7.5. Επιφανειακές καθιζήσεις

Στο πρώτο στάδιο, παρόλο που δεν πραγματοποιείται καμία εκσκαφή, εμφανίζεται μία σταθερή επιφανειακή εδαφική καθίζηση που ισούται περίπου με 0.043m και οφείλεται στο ίδιο βάρος των υλικών. Στο τρίτο στάδιο, όπου έχει εκσκαφθεί το πάνω μέρος της σήραγγας και έχει τοποθετηθεί επένδυση, η επιφανειακή καθίζηση αυξάνεται, όπως είναι αναμενόμενο, και αποκτά τιμή 0.064m περίπου. Στο πέμπτο στάδιο, όπου έχει ολοκληρωθεί η εκσκαφή και η τοποθέτηση της επένδυσης της σήραγγας, η καθίζηση φτάνει την τιμή 0.068m περίπου. Επομένως, η επιφανειακή καθίζηση που προκαλείται λόγω της διάνοιξης της σήραγγας έχει τιμή 0.025m περίπου, η οποία ισούται και με τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή. Παρατηρούμε επίσης ότι το διάγραμμα των επιφανειακών καθιζήσεων ακολουθεί την καμπύλη Gauss και εμφανίζει μέγιστη τιμή πάνω από τον άξονα της σήραγγας.

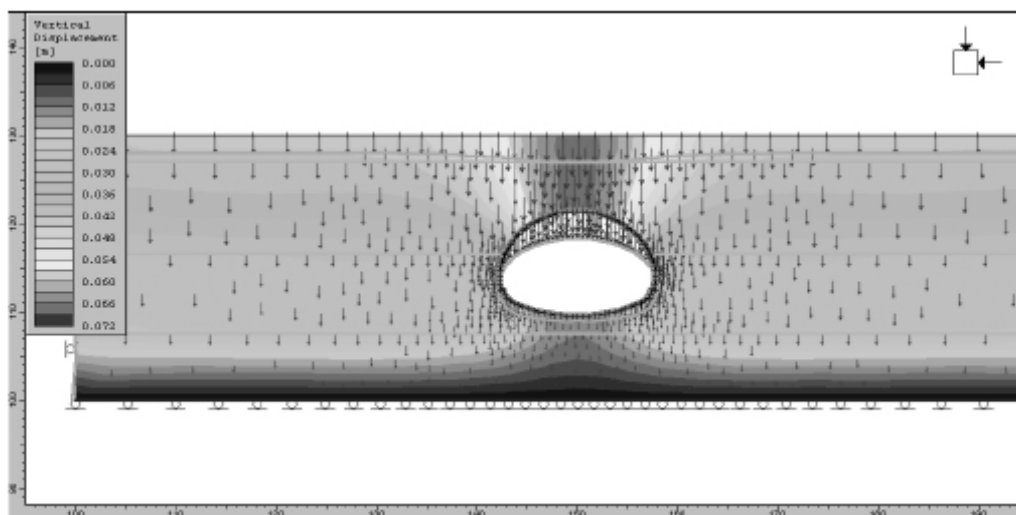
## 7.6. Κατακόρυφες μετατοπίσεις τοιχώματος σήραγγας

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 21, το διάγραμμα των κατακόρυφων μετατοπίσεων στην οροφή της σήραγγας ακολουθεί την καμπύλη του Gauss και η μέγιστη τιμή σύγκλισης εμφανίζεται επάνω στον άξονα της σήραγγας. Επίσης, παρατηρείται ανύψωση του πυθμένα της σήραγγας.

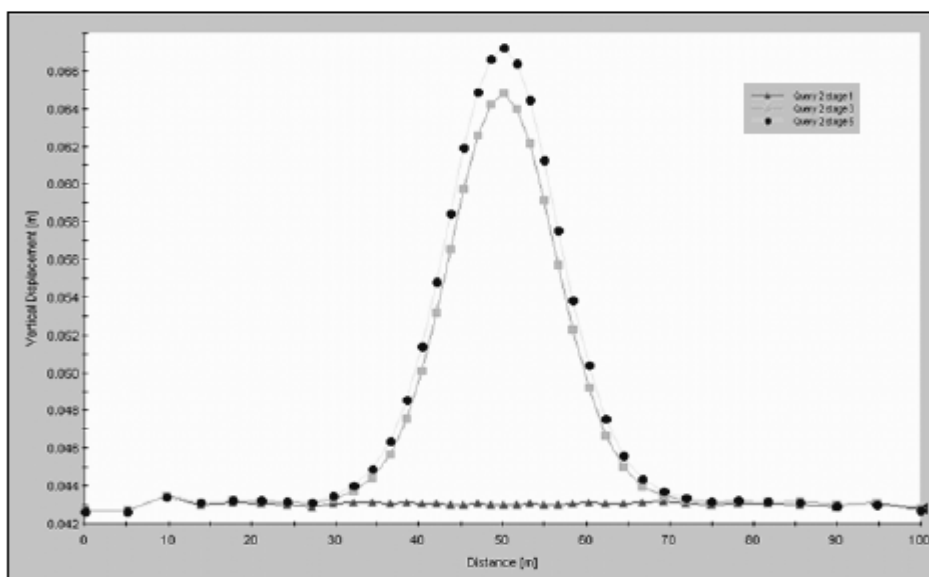
Κατά την εκσκαφή και επένδυση του “άνω” μέρους της σήραγγας η μέγιστη καθίζηση της οροφής εμφανίζεται στη στέψη της σήραγγας και είναι της τάξεως των 2.7 cm. Κατά την εκσκαφή και του “κάτω” μέρους της σήραγγας η στέψη υποχωρεί κι άλλο και η επιπλέον αυτή υποχώρηση είναι περίπου 3mm. Όπως φαίνεται, η μέγιστη υποχώρηση στην οροφή σημειώνεται επάνω στον άξονα της σήραγγας, ενώ όσο απομακρυνόμαστε από τον άξονα μικραίνουν οι υποχωρήσεις. Η συνολική μέγιστη καθίζηση στη στέψη της σήραγγας είναι της τάξεως των 3cm και αντιστοιχεί σε σύγκλιση (ακτινική μετατόπιση).

Κατά την εκσκαφή και επένδυση του “κάτω” μέρους της σήραγγας η μέγιστη ανύψωση του πυθμένα εμφανίζεται επάνω στον άξονα της σήραγγας και είναι της τάξεως των 11 mm. Κατά την εκσκαφή και του “κάτω” μέρους της σήραγγας ο πυθμένας ανυψώνεται κι άλλο, περίπου κατά 5mm. Είναι φανερό πως όσο απομακρυνόμαστε από τον άξονα η ανύψωση του πυθμένα μικραίνει.

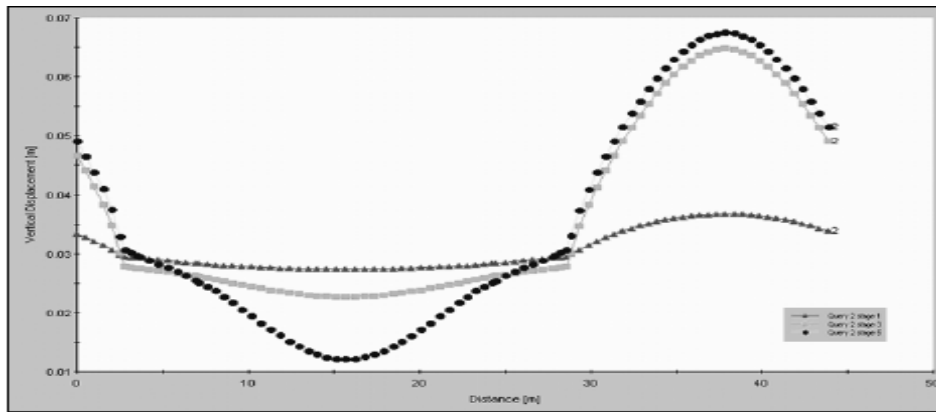




(εικόνα 18 Κατακόρυφες μετακινήσεις)



(εικόνα 19 Διάγραμμα επιφανειακών καθιζήσεων)



(εικόνα 20 Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων τοιχώματος σήραγγας)

## 7.7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τις λύσεις που εφαρμόστηκαν πιο αξιόπιστη αναδεικνύεται η πρόβλεψη με τη χρήση του προγράμματος “Phase 2” και για τις συγκλίσεις και για τις καθιζήσεις και αυτό διότι συνυπολογίζει την πραγματική στρωματογραφία της περιβάλλουσας βραχώμαζας και τα στάδια εκσκαφής της σήραγγας.

Αποδεικνύεται από τις παραπάνω εφαρμογές ότι κάθε αναλυτική μέθοδος ερμηνεύει μία συνιστώσα της παραμόρφωσης σηράγγων. Στη συγκεκριμένη διατομή το πρόγραμμα Jeffery δίνει τιμές συγκλίσεων και καθιζήσεων της ίδιας τάξης μεγέθους με τις πραγματικές (μετρημένες) τιμές. Όσον αφορά στο πρόγραμμα GroundLoss, τα αποτελέσματα εξαρτώνται από την τιμή  $w$  που επιλέγει ο χρήστης. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, για  $w=1\text{cm}$ , η απόκλιση της προβλεπόμενης τιμής της επιφανειακής καθίζησης και της σύγκλισης από την πραγματική είναι 3mm και 8mm αντίστοιχα. Τέλος, τα αποτελέσματα του προγράμματος Mindlin παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση από τις πραγματικές τιμές των συγκλίσεων, ενώ αντιθέτως παρατηρείται μεγάλη ακρίβεια στην πρόβλεψη της ανύψωσης του εδάφους στη συγκεκριμένη εφαρμογή.

Οι παραδοχές που πραγματοποιούνται σε κάθε εφαρμογή πρέπει να λαμβάνονται πάντα υπόψη κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων των επιφανειακών καθιζήσεων και των συγκλίσεων.

Κρίνεται σκόπιμη η εφαρμογή όλων των διατιθέμενων μεθόδων πρόβλεψης επιφανειακών καθιζήσεων και συγκλίσεων του τοιχώματος της σήραγγας, συνεκτίμηση των αποτελεσμάτων και επιλογή του δυσμενέστερου σεναρίου.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

### 8 ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΟΡΥΓΜΑΤΟΣ

#### 8.1. Γενικά

Όπως προαναφέραμε η επιλογή της μεθόδου της σήραγγας είναι ευθύνη της Αττικό Μετρό. Με βάση τα γεωτεχνικά στοιχεία από έρευνες που πραγματοποιήθηκαν και στην προκείμενη κατάσταση, όπου το έργο είναι αβαθής και στο ότι δεν υπάρχουν υπερκείμενες κατασκευές, η διάνοιξη στο κομμάτι με χ.θ 0+475 μέχρι 0+585 θα πραγματοποιηθεί με την μέθοδο cut and cover.

Τα στάδια αυτής της κατασκευής είναι τα ακόλουθα:

Εκτελείται γεωτεχνική/γεωλογική έρευνα και δοκιμές (επί τόπου και εργαστηριακές) για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών του εδάφους στην περιοχή όπου έχει σχεδιασθεί να γίνει η κατασκευή μας.

Γίνεται η μελέτη (υπολογισμοί και σχέδια) εκσκαφής και προσωρινής αντιστήριξης, με βάσει τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του εδάφους που προέκυψαν στο προηγούμενο στάδιο. Επίσης, εκτελείται και η μελέτη του μόνιμου φορέα της κατασκευής.

Πριν την έναρξη των κυρίως εργασιών εκτελούνται οι απαιτούμενες αρχαιολογικές έρευνες στη περιοχή όπου θα εκτελεσθούν οι εκσκαφές, απομακρύνονται όλοι οι αγωγοί κοινής ωφελείας (ύδρευσης, ηλεκτρισμού, τηλεφώνου, κλπ) και πραγματοποιούνται οι ενδεχόμενες κυκλοφοριακές παρακάμψεις.

Η προσωρινή αντιστήριξη της εκσκαφής αποτελείται συνήθως από πασσάλους σκυροδέματος, κυκλικής διατομής με διάμετρο της τάξεως 0.80-1.00 μ, που τοποθετούνται ανά αποστάσεις μεταξύ τους 1.50-2.50μ περιμετρικά της προβλεπόμενης εκσκαφής προτού αυτή αρχίσει. Η πασσαλοστοιχία συνδέεται στην κορυφή της με ισχυρή δοκό σκυροδέματος. Η εκσκαφή πραγματοποιείται με συμβατικά μηχανικά μέσα (εκσκαφείς, σφύρες, κλπ) έως ένα καθορισμένο βάθος, π.χ. 3.5μ, και στη συνέχεια τοποθετούνται αγκύρια σε οπές που διανοίγονται στο έδαφος μέσω των πασσάλων. Τα αγκύρια αυτά έχουν μεγάλο μήκος (της τάξεως 15-25μ) και προεντείνονται με την προβλεπόμενη

από τη μελέτη δύναμη. Κατόπιν εφαρμόζεται δομικό πλέγμα σε όλη την περιμετρική επιφάνεια του σκάμματος και τοποθετείται εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Μετά από αυτά, συνεχίζεται η εκσκαφή ως την επόμενη στάθμη και τοποθετείται και προεντίνεται άλλη μια σειρά αγκυρίων. Ο κύκλος αυτός συνεχίζεται έως την τελική στάθμη εκσκαφής όπου θα θεμελιωθεί η κατασκευή. Εάν υπάρχει παρουσία υπογείων υδάτων στις επιφάνειες του σκάμματος, αυτά εκτονώνονται με συστηματικά διατρήματα / σωληνώσεις βάθους συνήθως 3-4 μ επί της αντιστήριξης / εκσκαφής και απομακρύνονται με κατάλληλο σύστημα αποστράγγισης.

Το σύστημα υδατοστεγάνωσης της κατασκευής, όπως συμβαίνει πλέον σε όλο το νέο δίκτυο του Μετρό, τοποθετείται στον πυθμένα και στις περιμετρικές επιφάνειες του σκάμματος και αποτελείται συνήθως από γεωφάσματα, μεμβράνη υδατοστεγάνωσης και υδατοφραγμούς.

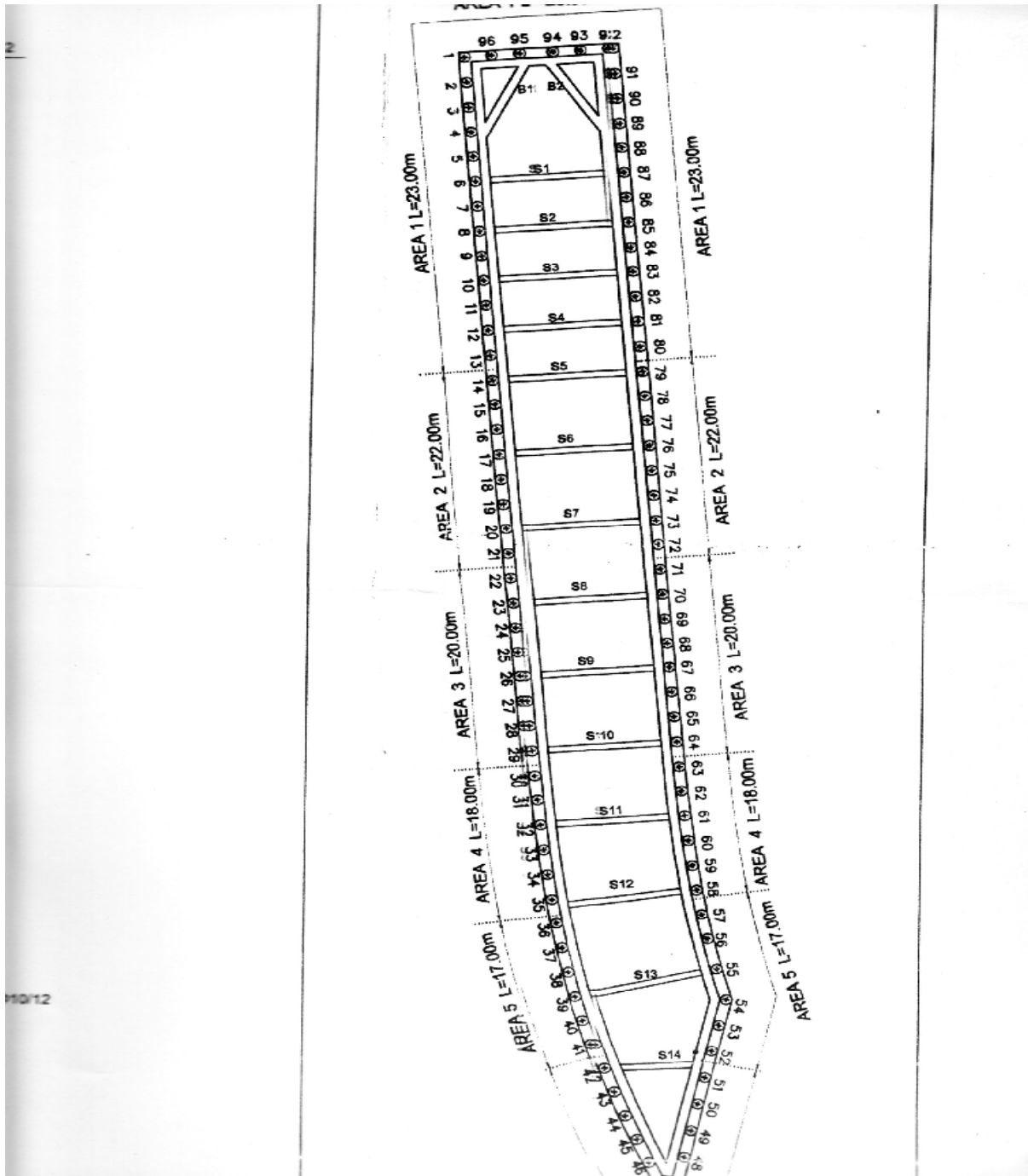
Η κατασκευή του φέροντος οργανισμού γίνεται κατά φάσεις αρχίζοντας από την θεμελίωση, ακολουθούν τα τοιχεία και κατόπιν η πλάκα οροφής εάν πρόκειται για την περίπτωση σήραγγας, ενώ για τους σταθμούς γίνεται, επιπλέον, και η κατασκευή ενδιάμεσων επιπέδων πλακών και τοιχείων. Η κατασκευή αρχίζει με την τοποθέτηση των σιδηρών οπλισμών της πλάκας θεμελίωσης (ή γενικής κοιτόστρωσης) όπως προβλέπονται από τη μελέτη. Κατόπιν γίνεται η έγχυση του σκυροδέματος, κατηγορίας αντοχής C25/30, κατά φάσεις κατά το μήκος της κατασκευής με πρόβλεψη καταλλήλων αρμών. Παρομοίως γίνεται και η κατασκευή των υπολοίπων στοιχείων της μόνιμης κατασκευής

Το πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ο μειωμένος χρόνος εκτεταμένων εργοταξιακών καταλήψεων και η ταχύτητα αποκατάστασης και απόδοσης σε χρήση της περιοχής (οδική κυκλοφορία, πλατείες, κλπ), και τελικώς η αποφυγή μακρόχρονης όχλησης των λειτουργιών της πόλης. Τα μειονεκτήματα της είναι, κυρίως, το αυξημένο κόστος και η πολυπλοκότερη κατασκευαστική διαδικασία.

## **8.2. Πασσαλοσυτοιχίες**

Το αρχικό στάδιο της κατασκευής είναι η τοποθέτηση των κυλινδρικών πασσάλων από σκυρόδεμα, όπου θα δημιουργηθεί ένα τοίχος προστασίας, όπου θα αποτρέψει οποιαδήποτε παραμόρφωση του εδάφους στις υπερκείμενες κατασκευές. Συνήθως οι καθιζήσεις εάν δημιουργηθούν επεκτείνονται σε απόσταση 1 -2 μέτρων από τους τοίχους.

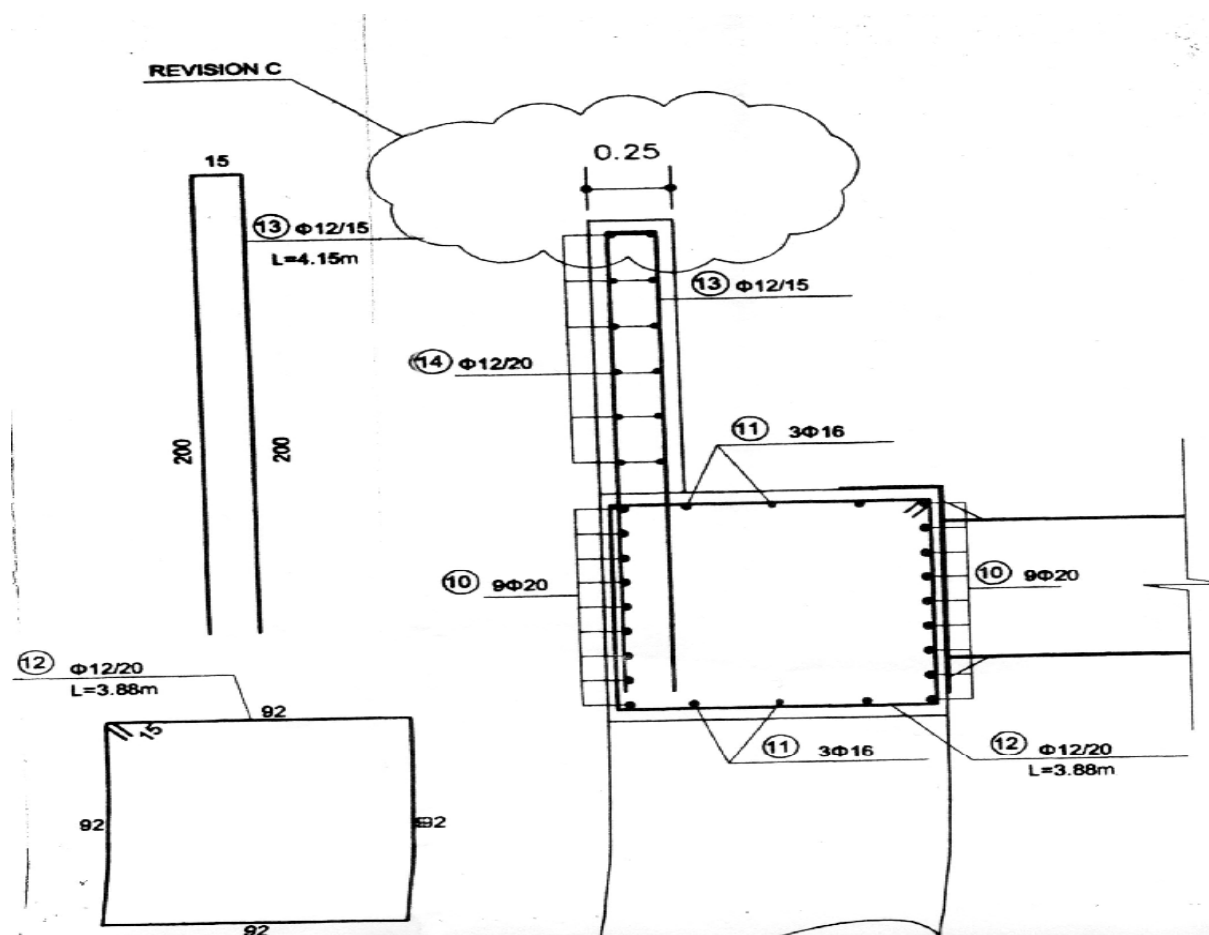
Το βάθος του πασσάλου ανέρχεται στα 24 μέτρα, αποτελείται από σκυρόδεμα και χαλύβδινο οπλισμό. Στο πάνω μέρος του πασσάλου δημιουργείται μια εσοχή όπου τοποθετείται χαλύβδινη στρογγυλή σωλήνα αντιστήριξης, η οποία καλείται κεφαλόδεσμος. Μετά την τοποθέτηση τους αφαιρούμε το εδαφικό υλικό χωρίς καμία μετακίνηση των πασσάλων. Στο έργο μας τοποθετήθηκαν 96 πάσσαλοι.



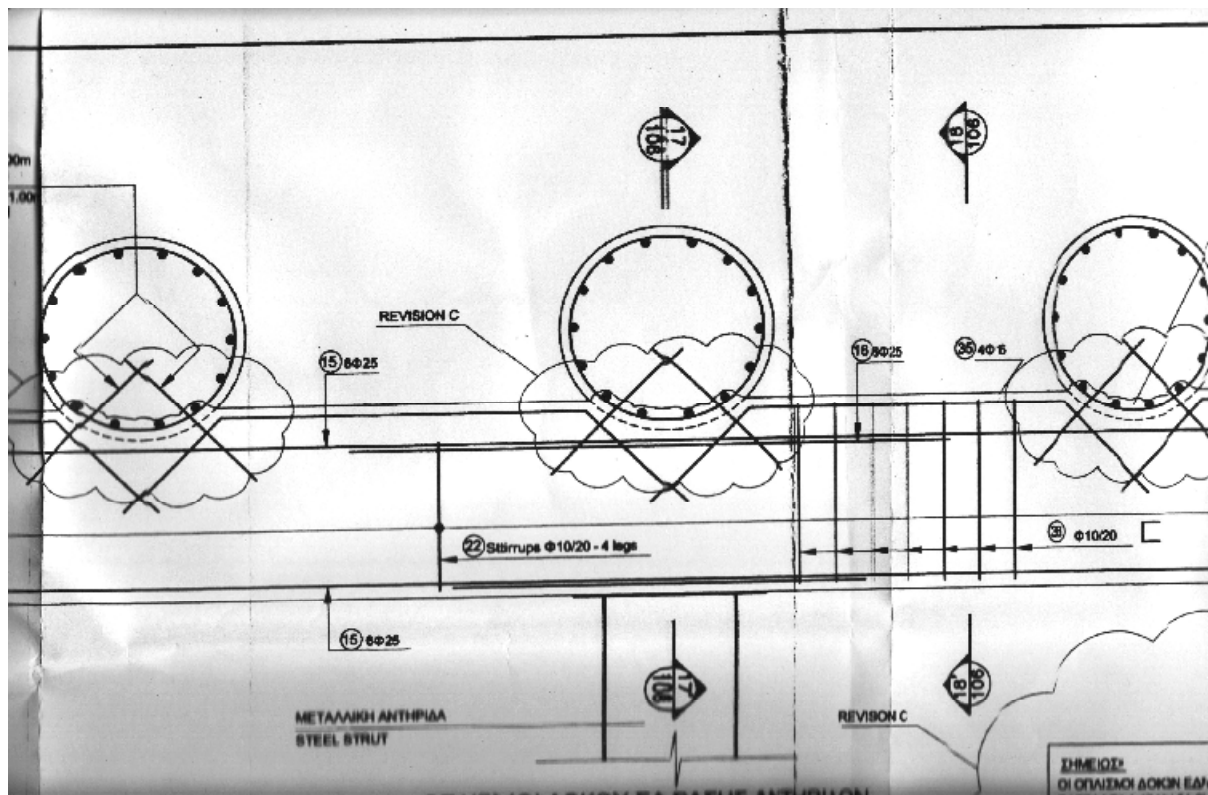
(Σχέδιο 9 Διάταξη πασσάλων και κεφαλόδεσμων)

Η διάτρηση των οπών στο έδαφος γίνεται με κατακόρυφο γεωτρήπανο και στην συνέχεια τοποθετείται ο ήδη κατασκευασμένος χαλύβδινος οπλισμός ,ο οποίος έχει κυκλική μορφή.Στη συνέχεια πληρώνονται με σκυρόδεμα το οποίο περιέχει πρόσμικτα ρευστοποίησης ,ώστε το σκυρόδεμα κατά την κάθοδο του να μπορέσει να συμπυκνωθεί μόνο του αφού δεν μπορεί να γίνει συμπύκνωση με τεχνικά μέσα.

Μετά την σκυροδέτηση των πασσάλων ξεκινάν οι χωματουργικές εργασίες ,όπου αφαιρείται το εδαφικό υλικό μέσα από τους πασσάλους.Μόλις αφαιρεθεί 1-2 μέτρα υλικού κατασκευάζεται στο πάνω μέρος των πασσάλων ο δοκός έδρασης αντηρίδων. Η δοκός έδρασης έχει διαστάσεις 92\*92 cm ,είναι τετραγωνικής διατομής.



(Σχέδιο 10 Η δοκός έδρασης)



(Σχέδιο 11 Οριζόντια διάταξη οπλισμού δοκού)



(εικόνα 21 Δοκοί έδρασης με τις αντηρίδες)

Στην συνέχεια με μηχανικά μέσα απομακρύνεται το εδαφικό υλικό μέχρι το βάθος του έργου μας.Στη συνέχεια με προσοχή καθαρίζονται οι πάσσαλοι από υπερκείμενα εδαφικά στοιχεία, ώστε να μπορέσουν να διατηρηθούν και να τοποθετηθούν αγκύρια .Στη συνέχεια τοποθετείται δομικό πλέγμα και σκυροδετείτε με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα,σε δυο στρώσεις.



(εικόνα 22 Τοποθέτηση αγκυρίου στον πάσσαλο)

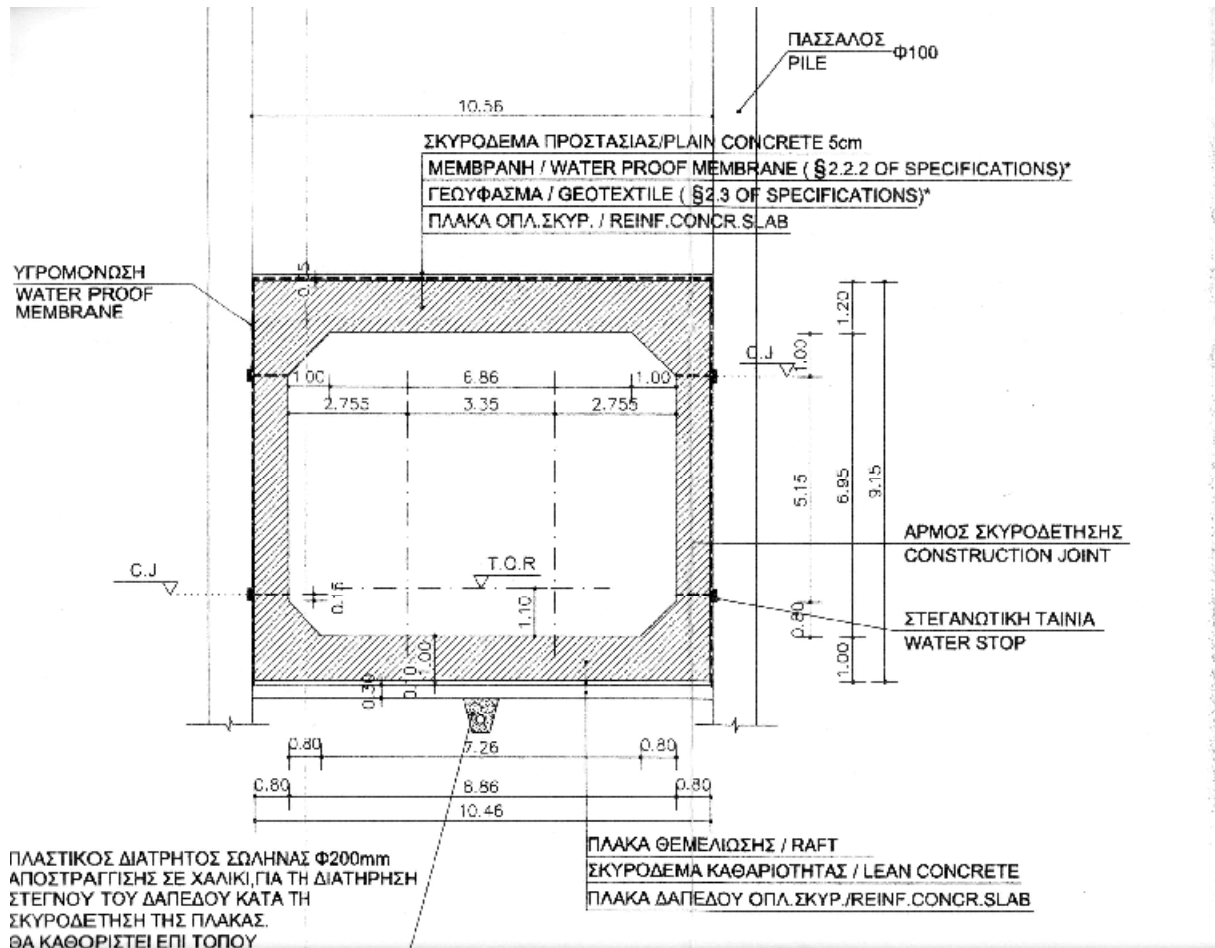


(εικόνα 23 Σκυροδετημένο πλέγμα πάνω στους πασσάλους)



### 8.3. Κατασκευή κελύφους της σήραγγας

Στην μέθοδο cut and cover όπου σε όλες τις περιπτώσεις ακολουθούμε τα ίδια βήματα, κατά την κατασκευή όμως και το σχήμα του κελύφους υπάρχουν αλλαγές. Το σχήμα του κελύφους μπορεί να είναι τοξωτό, τετράγωνο ή παραλληλόγραμμο. Στο έργο μας το κελύφος είναι παραλληλόγραμμο με εξωτερικές διαστάσεις 9.15-10.46 cm.



(Σχέδιο 12 Διατομή κελύφους)

Στην επόμενη φάση κατασκευάζεται τάφρος αποστράγγισης κάτω από την στάθμη του έργου μας. Τοποθετείται πλαστικός διάτρητος σωλήνας  $\Phi 200$  και πληρώνεται με χαλίκι. Στη συνέχεια κατασκευάζεται το σκυρόδεμα της καθαριότητας και έπειτα τοποθετείται ο οπλισμός της πλάκας θεμελίωσης. Κατά την τοποθέτηση του οπλισμού στις παρειές αφήνονται αναμονές με κατακόρυφη φορά και αυτό ώστε ο επόμενος οπλισμός του τοιχείου να μπορεί να συνδεθεί.



(εικόνα 24 Οπλισμός σε αναμονή)

Όπως παρατηρούμε στην παραπάνω εικόνα 26 πίσω από τον οπλισμό μια μεμβράνη η οποία είναι τοποθετημένη κατακόρυφα στην τάφρο. Η στεγανωτική μεμβράνη προστατεύει την κατασκευή μας από τα νερά. Η μεμβράνη αυτή είναι σε ρολό και τοποθετείται παράλληλα στην τάφρο. Η οποία στη συνέχεια συράφεται με ταινίες πολυαιστερικές και καρφώνεται με προσοχή στο εδαφικό υλικό που έχει από πίσω της. Στη συνέχεια τοποθετείται ο οπλισμός των τοιχίων ο οποίος είναι διπλής εσχάρας μέσα –έξω όπου συγκρατείται με χαλύβδινες ράβδους σχήματος  $\zeta$ . Στη συνέχεια τοποθετούνται ικριώματα ώστε να μπορεί να τοποθετηθούν οι οπλισμοί καθώς και να τοποθετηθεί ο ξυλότυπος. Το μήκος του οπλισμού φτάνει μέχρι το κάτω μέρος του κεφαλόδεσμου όπου θα γυρίσει προς το μέσα μέρος της σήραγγας για να τοποθετηθεί ο οπλισμός της οροφής.

Μόλις τελειώσει η κατασκευή του ξυλότυπου γίνεται με προσοχή η σκυροδέτηση του κατακόρυφου τοιχείου ώστε να μην δημιουργηθεί κάποιο πρόβλημα στον ξυλότυπο. Η σκυροδέτηση γίνεται σε στάδια ωστόσο φτάσουμε μέχρι την οροφή.



(εικόνα 25 Τοποθέτηση οπλισμού και ξυλότυπου τοιχίων)

Το τελευταίο στάδιο είναι η τοποθέτηση του οπλισμού εσχάρας της πλάκας οροφής και στην συνέχεια σκυροδετείται η πλάκα ύψους 1.20 .Η σκυροδέτηση της πλάκας γίνεται σε στρώσεις ανά 15 cm ώστε να μην δημιουργηθούν αρμοί συστολής κατά την ενυδάτωση του σκυροδέματος. Το πάχος της πλάκας είναι μεγάλο ώστε να μπορεί να παραλάβει τα υπερκείμενα βάρη εδαφικού υλικού.

#### 8.4 Στεγάνωση πλάκας οροφής κελύφους

##### Στεγάνωση με μεμβράνη PVC

**Προετοιμασία του υποστρώματος :** αποκοπή των τυχόν αναμονών σιδηρού οπλισμού και επισκευή αυτών με επισκευαστικό κονίαμα τύπου **MAXREST** της **DRIZORO**, καθαίρεση των εξάρσεων του σκυροδέματος ή πλήρωση των σημαντικών κοιλιοτήτων και γενικά προσπάθεια απόδοσης ομαλού υποστρώματος που δεν εγκυμονεί κινδύνους τραυματισμού της

μετέπειτα στεγανωτικής επένδυσης,προσεκτικός καθαρισμός υποστρώματος με αέρα υπό πίεση.

#### **A. ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ**

- Δημιουργία στρώσης εξομάλυνσης με διάστρωση μη υφαντού γεωφάσματος πολυπροπυλενίου βάρους  $500 \text{ gr/m}^2$  τύπου **P 006** του οίκου **POLYFELT** Αυστρίας.
- Τα φύλλα του γεωφάσματος διαστρώνονται ακτινικά και με επικάλυψη περί τα 10 cm κατά μήκος της οποίας θερμοσυγκολλούνται σημειακά για αποφυγή υφαρπαγής τους από τον άνεμο.
- Στεγανοποίηση με στεγανωτική μεμβράνη από PVC ,πάχους όχι μικρότερο των 1,5mm.Η μεμβράνη παρουσιάζει ζώνη επισήμανσης πάχους 0,6mm για να είναι εύκολη η οπτική εποπτεία σε όποια φάση της κατασκευής για τυχόν τραυματισμούς και εκδορές. Τα φύλλα θερμοσυγκολλούνται μεταξύ τους με αυτόματο μηχάνημα Leister Twinny του οίκου,που παράγει διπλή ραφή συνολικού πλάτους 4cm, με ενδιάμεσο κανάλι αέρα 1cm, ώστε να αποδώσουν ενιαία στεγανή επιφάνεια. Για τα ιδιάζοντα σημεία (μπαλώματα,διασταυρώσεις διπλ.ραφών θα χρησιμοποιηθεί μηχάνημα συγκόλλησης χειρός με θερμό αέρα με ακροφύσιο 4 cm (μονή ραφή).
- Δημιουργία στρώσης προστασίας έναντι της επιχωμάτωσης με διάστρωση μη υφαντού γεωφάσματος πολυπροπυλενίου με μηχανική πλέξη βάρους βάρους  $500 \text{ gr/m}^2$  τύπου P 006 του οίκου POLYFELT Αυστρίας.
- Τα φύλλα του γεωφάσματος διαστρώνονται ακτινικά και με επικάλυψη περί τα 10 cm κατά μήκος της οποίας θερμοσυγκολλούνται σημειακά για αποφυγή υφαρπαγής τους από τον άνεμο.

#### **ΈΛΕΓΧΟΙ ΣΤΕΓΑΝΩΣΗΣ**

**Οπτικές επιθεωρήσεις:** Πριν από τη τοποθέτηση του συστήματος στεγάνωσης θα επιθεωρείται το υπόστρωμα. Μετά την τοποθέτηση της μεμβράνης και στη συνέχεια του οπλισμού του σκυροδέματος, θα επιθεωρείται η μεμβράνη για τυχόν σκισίματα. Στο τέλος κάθε βάρδιας θα γίνεται οπτική επιθεώρηση όλων των ραφών. Επιπλέον θα γίνονται και οι εξής δοκιμές:

**Έλεγχος σε συγκολλήσεις διπλής ραφής:** Η στεγανότητα και η μηχανική αντοχή της διπλής ραφής ελέγχεται με την διοχέτευση αέρα υπό πίεση στο κανάλι μεταξύ των δύο ραφών. Κατ'αρχήν τοποθετείται ένας σφικτήρας στο τέλος του καναλιού. Μετά εισάγεται μια βελόνα με ενσωματωμένο πιεσόμετρο,

συνδέεται με ένα συμπιεστή αέρα και εφαρμόζεται πίεση 0,2 MPa=2bar (μέγιστο 0,25 MPa) η οποία πρέπει να διατηρηθεί επί 10 λεπτά. Η πτώση πίεσης επιτρέπεται να είναι μέχρι 20% λόγω διεύρυνσης του καναλιού μεταξύ των ραφών.

**Έλεγχος σε συγκολλήσεις χειρός:** Χρησιμοποιείται η μέθοδος της καρφίδος με την οποία διατρέχουμε το μήκος της ραφής ελέγχοντας την πληρότητα αυτής.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

### Επίλογος

Σε αυτήν την πτυχιακή εργασία προσπαθήσαμε να αναφερθούμε και να αναλύσουμε στο μέτρο πάντα του δυνατού, τα πιο σημαντικά και καίρια σημεία στην πορεία της κατασκευής της σήραγγας του μετρό της επέκτασης της γραμμής 3 στον Κεραμεικό.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η πτυχιακή εργασία και συγκεκριμένα η έρευνα για την συγκέντρωση του υλικού έγινε αρκετό καιρό πριν, όπου το έργο ήταν σε πλήρη εξέλιξη. Αυτή την στιγμή το τμήμα της σήραγγας που μελετήσαμε έχει ολοκληρωθεί και έχει τεθεί σε λειτουργία.

Στην εργασία μας δώσαμε έμφαση στις δυο μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν για την διάνοιξη των σηράγγων αλλά και στα μέτρα υποστήριξης του εσωτερικού και εξωτερικού δακτυλίου. Βέβαια αναφερθήκαμε και σε γεωλογικά στοιχεία που εντοπίστηκαν στην περιοχή ,καθώς και σε τοπογραφικές εργασίες που έγιναν κατά την διάρκεια διάνοιξης της σήραγγας

Κατά το πέρας της εργασίας την οποία είχαμε την ευκαιρία να αποκομίσουμε πολύτιμες γνώσεις και εμπειρίες.

Αρωγοί στην προσπάθεια μας αυτή ήταν αφενός η καθηγήτρια μας και εισηγήτρια της εργασίας Δρ. Ειρήνη Βγενοπούλου ,αφετέρου δε οι μηχανικοί και το προσωπικό της εταιρείας Άκτωρ .Κατά την προσέλευση μας στο εργοτάξιο και ύστερα από μια μικρή ενημέρωση για την προστασία μας στο χώρο είχαμε την δυνατότητα να πάμε σε οποιαδήποτε σημείο του έργου καθώς και να συνομιλήσουμε με τα αντίστοιχα συνεργεία.

## ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ



(εικόνα 26 Περιοχή Αμαξοστάσιου -Έξω από την σήραγγα)



(εικόνα 27 Εργασίες στο τμήμα cut and cover )



(εικόνα 28 Προεξέχον Οπλισμός αναμονής ποδιού )



(εικόνα 29 Συνδεσμολογία κύριου οπλισμού κελύφους)

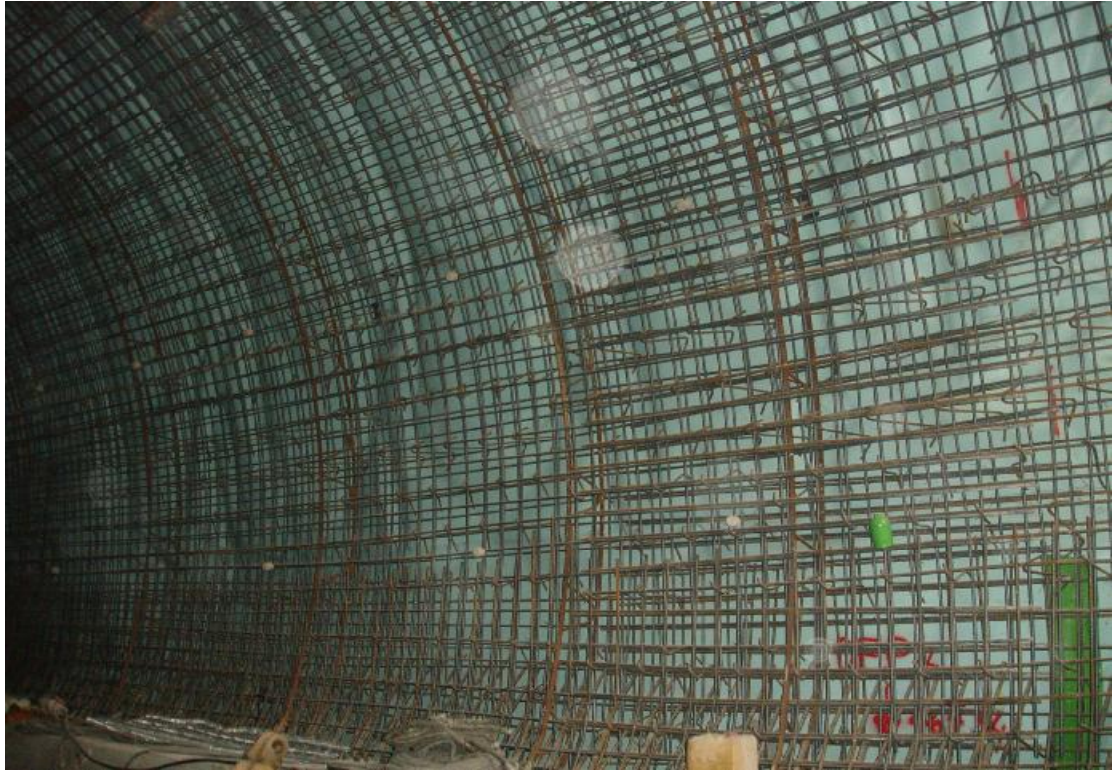




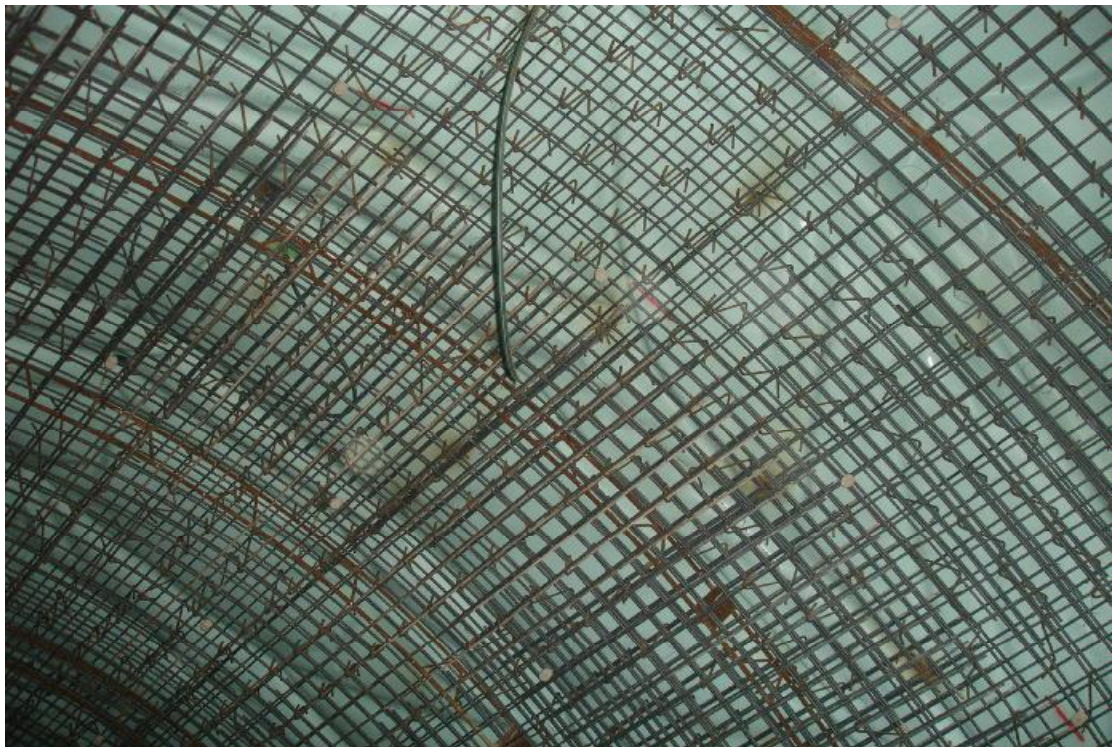
(εικόνα 30 Τμηματική σκυροδέτηση τελικής επένδυσης και τοποθέτηση μεμβράνης στην επιφάνεια του)



(εικόνα 31 Αποστάτες σχήματος  $\zeta$  τοποθετημένη στην διπλή εσχάρα οπλισμού)



(εικόνα 32 Ανερχόμενος οπλισμός προς την οροφή)



(εικόνα 33 Οπλισμός οροφής)



(εικόνα 34 Πάσσαλοι επενδυμένοι με πλέγμα και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα)



(εικόνα 35 Διπλή στρώση αντηρίδων κεφαλής)



(εικόνα 36 Τοποθέτηση στεγανωτικής μεμβράνης, συρραφή και κάρφωμα)



(εικόνα 37 Ανάπτυξη οπλισμού από το πόδι του δαπέδου)



(εικόνα 38 Τοποθέτηση διπλής εσχάρας οπλισμού)



(εικόνα 39 Τοποθέτηση οπλισμού οροφής στο σημείο του τοξωτού κελύφους)



(εικόνα 40 Μέσα στη σήραγγα)



(εικόνα 41 Τοποθετημένο αγκύριο)

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αττικό Μετρό Α.Ε. 2001. Μετρό Αθήνας - Επέκταση Γραμμής 3: Τεχνικές Προδιαγραφές για τη Μελέτη, Τόμος 3
- Καββαδάς, Μ. 2002. Σχεδιασμός Υπόγειων Έργων
- Κορδελούλη, Μ. 2004. Διερεύνηση των μετατοπίσεων που προκαλούνται από τη διάνοιξη σήραγγας, με έμφαση στις συγκλίσεις. Εφαρμογή στο Μετρό της Αθήνας (Επέκταση Γραμμής 3 )
- Μιχαλοπούλου, Α. 2004. Διερεύνηση προκαλούμενων επιφανειακών καθιζήσεων λόγω διάνοιξης σηράγγων σε αστικό περιβάλλον. Εφαρμογή στο Μετρό της Αθήνας. (επέκταση της γραμμής 3:
- Μεταπτυχιακή εργασία (Με θέμα Σχεδιασμός Σηράγγων Ανδρέας Φράγκος, Πολιτικός Μηχανικός ,ΕΜΠ ,Αθήνα 2009
- Διπλωματική εργασία (Με θέμα σχεδιασμός υπόγειων έργων και σύγκριση μεθοδολογιών),Ελπίδα Ιουλία Αλέξη, Αθήνα 2010
- Μελέτη Γεωλογικής Καταλληλότητας, Με θέμα εντοπισμός και διαχωρισμός από άποψη εδαφικών συνθηκών των περιοχών μελέτης μας, Γεωργίου Καταπόδι Αθήνα 2009
- Διπλωματική εργασία, Με θέμα Αποτύπωση Διατομών σηράγγων κατά την διάνοιξη τους, Καντιανής Ελευθέριος ,ΕΜΠ, Αθήνα 2010
- Διδακτικό βιβλίο Μ. Καββαδά. Στοιχεία εδαφομηχανικής <http://users.civil.ntua.gr/kavvadas/>
- Διδακτικό βιβλίο Μ.Καββαδά ,Σημειώσεις θεμελιώσεων τεχνικών έργων
- Σήραγγες και υπόγεια έργα ,Σημειώσεις, Αναπλ. Καθηγητή Αιμίλιου Κωμοδρόμο ,Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
- Αναλυτικός υπολογισμός των πεδίων τάσεων και παραμορφώσεων γύρω από τυπικές πεταλοειδείς διατομές NATM ,Μ. Σακελαρίου, Αναπληρωτή Καθηγητή ΕΜΠ

