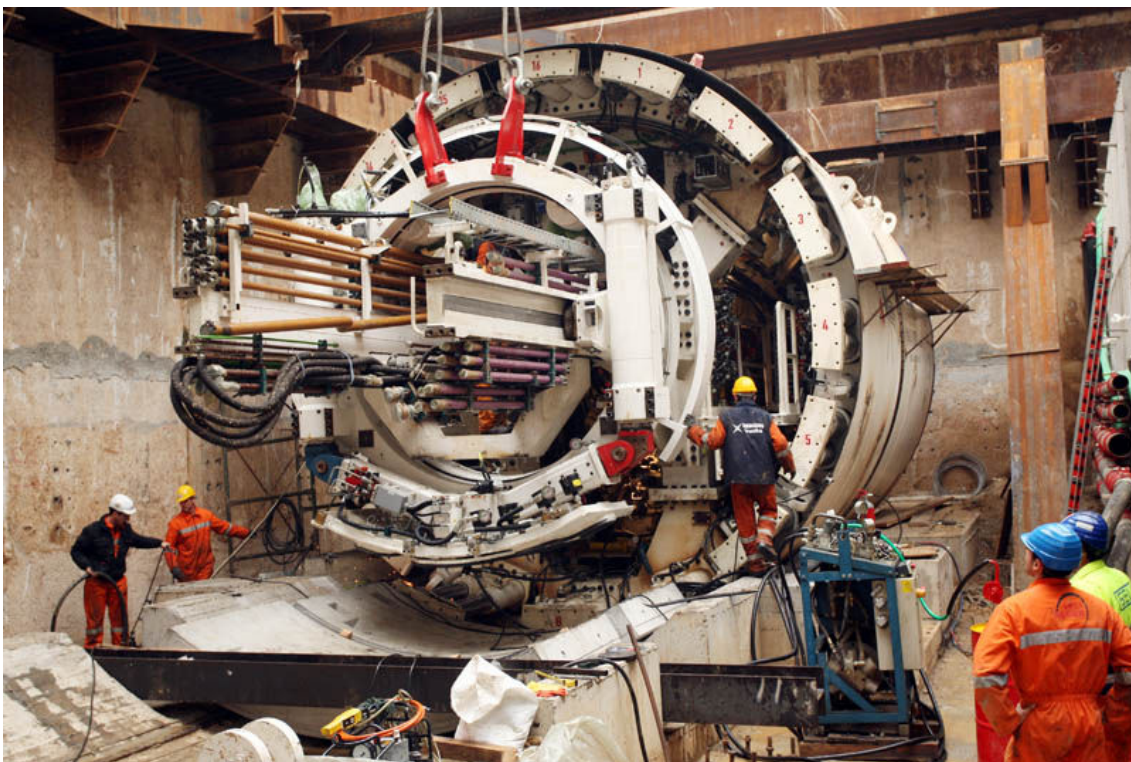


**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΒΑΖΑΙΟΥ ΙΩΑΝΝΗ**

**Η ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΙ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΩΝ  
ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΗΧΑΝΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗ  
ΣΗΡΑΓΓΩΝ.**

***ΤΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΓΡΑΜΜΗΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ***



**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ  
Π.Γ. ΜΑΡΙΝΟΣ  
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ**

**ΑΘΗΝΑ, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2010**

*Αφιερώνεται στην οικογένεια μου, στους φίλους μου και στο Γεώργιο Μαντά που με στήριξαν στα μαθητικά και φοιτητικά μου χρόνια*

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας κύριο Παύλο Μαρίνο, καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, που μου έδωσε την ευκαιρία να μάθω και να ασχοληθώ γύρω από ένα θέμα, του οποίου η μελέτη αποτελεί πρόκληση για το μηχανικό και στο οποίο μπόρεσα να εφαρμόσω τις γνώσεις που απέκτησα κατά τη πενταετή φοίτηση μου στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, καθώς και για τη καθοδήγηση του και τη βοήθεια του στην εκπόνηση της εργασίας μου.

Ιδιαίτερα θέλω να ευχαριστήσω το κύριο Βασίλη Μαρίνο, Λέκτορα στο Τμήμα Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου της Θεσσαλονίκης, για τη πολύτιμη βοήθεια του, με τη παράθεση στοιχείων, οδηγιών και επιστημονικών γνώσεων καθώς και για την οργάνωση της εργασίας μου, για το χρόνο που διέθεσε καθόλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας βοηθώντας με, για τη διάθεση για υποστήριξη που μου έδειξε και για τη συμβολή του στο να μπορέσω να ασχοληθώ με ένα θέμα εξαιρετικού ενδιαφέροντος.

Αμφότερους ευχαριστώ το κύριο Παύλο Μαρίνο και το κύριο Βασίλη Μαρίνο για την εμπιστοσύνη τους στο πρόσωπο μου με την ανάθεση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

## Περίληψη

Η συγκεκριμένη διπλωματική έχει ως αντικείμενο την εξέταση και ανάλυση των γεωλογικών, τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών που αναμένεται να απαντηθούν από το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας της επέκτασης του Μετρό της Θεσσαλονίκης από το σταθμό Δημοκρατίας, ο οποίος ανήκει στο βασικό έργο, προς τη Σταυρούπολη. Από την ανάλυση αυτή θα εξεταστεί η δυνατότητα εφαρμογής μηχανοποιημένων μεθόδων εκσκαφής με την εκλογή του κατάλληλου μηχανήματος TBM για τη διάνοιξη της σήραγγας.

Με τη πλήρη δόμηση και ανάπτυξη των αστικών περιοχών και τον αυξανόμενο αριθμό των χρησιμοποιούμενων αυτοκινήτων στη σύγχρονη εποχή, η δυνατότητα για κατασκευή επίγειων οδικών αξόνων που θα εξυπηρετήσουν την ανάγκη για γρήγορη και ασφαλή μετακίνηση των πολιτών έχει περιοριστεί σημαντικά. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα ο άνθρωπος να στραφεί προς την εκμετάλλευση του υπεδάφους και τη δημιουργία μητροπολιτικών, υπόγειων σιδηροδρόμων προκειμένου να επιλύσει το πρόβλημα αυτό.

Με τη κατασκευή του Μετρό στη Θεσσαλονίκη πραγματοποιείται προσπάθεια προκειμένου να επιτευχθεί αυτός ο σκοπός μέσα σε ένα έντονα αστικό περιβάλλον με το συγκεκριμένο έργο να διαθέτει 13 σταθμούς στη βασική του γραμμή και 9.6km σήραγγας. Η επέκταση προς Σταυρούπολη, στην οποία εστιάζεται η παρούσα διπλωματική, θα διαθέτει 5 σταθμούς με συνολικό μήκος σήραγγας περίπου 5km, η οποία θα αναπτύσσεται αρχικά σε πεδινό περιβάλλον με το υψόμετρο του ανάγλυφου να αυξάνεται μέχρι και τα 80m περίπου στο τελικό τμήμα της σήραγγας. Η γεωλογία στη περιοχή επέκτασης της σήραγγας χαρακτηρίζεται από τη παρουσία Τεταρτογενών, εδαφικών σχηματισμών, οι οποίοι εντοπίζονται στο αρχικό και τελικό τμήμα της σήραγγας, Νεογενών, εδαφικών σχηματισμών, οι οποίοι εντοπίζονται στο κεντρικό τμήμα αυτής καθώς και βραχωδών σχηματισμών που αποτελούνται από Πρασινοσχιστόλιθους και ανήκουν στην Ενότητα του Χορτιάτη, η οποία συνθέτει το αλπικό υπόβαθρο της περιοχής.

Στο συγκεκριμένο έργο η απαίτηση για εφαρμογή μηχανοποιημένων μεθόδων εκσκαφής προέρχεται από την ανάγκη για γρήγορη περαίωση του έργου και τη μικρότερη δυνατή διαταραχή του υπεδάφους, καθώς δυνητικά επικίνδυνες καταστάσεις κατά την εκσκαφή πιθανότατα θα εμφανίσουν και προβλήματα στην εδαφική επιφάνεια. Για το λόγο αυτό περιγράφονται εκτενώς τόσο τα χαρακτηριστικά των μηχανοποιημένων μεθόδων εκσκαφής, οι οποίες κάνουν χρήση μηχανών TBM, καθώς και οι τεχνικογεωλογικές και γεωτεχνικές παράμετροι των προς εκσκαφή σχηματισμών που σχετίζονται με την επιλογή αυτών καθώς και οι εργαστηριακές και οι επί τόπου στο έργο δοκιμές που πραγματοποιούνται για το προσδιορισμό τους.

Τα στοιχεία, που ελήφθησαν από το σύνολο 72 γεωτρήσεων κατά μήκος της χάραξης της σήραγγας, περιλαμβάνουν για τους εδαφικούς σχηματισμούς τη κοκκομετρική ανάλυση των γεωυλικών, το όριο υδαρότητας εκ των ορίων Atterberg, το δείκτη πλασιμότητας, το δείκτη συνεκτικότητας (σε συγκεκριμένα τμήματα), την ποιότητα των γεωυλικών, τις τιμές από τη δοκιμή SPT και τις τιμές διαπερατότητας αυτών. Ανάλογα για τους βραχώδεις σχηματισμούς εξετάζονται ο δείκτης GSI, η ποιότητα της βραχώμαζας βάσει της τιμής RQD, η αντοχή δοκιμίων άρρηκτου βράχου σε δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης καθώς και η διαπερατότητα αυτών. Όλα τα παραπάνω μεγέθη παρουσιάζονται και σε προβολές όπου φαίνεται πως αναπτύσσεται κάθε παράμετρος κατά μήκος της σήραγγας. Από τα παραπάνω στοιχεία εξετάζεται η εφαρμοσιμότητα 4 τύπων μηχανών TBM, οι οποίες περιλαμβάνουν μηχανήματα ανοικτού μετώπου με ασπίδα, TBM για βραχώδεις σχηματισμούς, μηχανήματα πολφού μπετονίτη με ασπίδα και μηχανήματα εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης και κρίνεται η συμπεριφορά τους έναντι της εκσκαφής κατά τη διάνοιξη της σήραγγας, βάσει των εκτιμώμενων τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών κατά μήκος της χάραξης αυτής.

## **Abstract**

The particular thesis has as an object to examine and analyze the geological and geotechnical conditions which are possible to be met by the face of the excavation of the tunnel of the Thessaloniki Metropolitan Railway construction from the Dimokratia station, which belongs to the main project, to Staouroupoli. From this analysis is going to be discussed the applicability of mechanized tunneling methods and the selection of the most appropriate for the excavation type of TBM.

As a result of the complete development of the urban areas and the increase of private vehicle use in the recent years, the ability to construct roads which are going to cover the demand of quick and safe transport has been limited significantly. For this reason man has turned towards the exploitation of levels beneath the ground surface and the construction of underground, metropolitan railways in order to solve this problem.

The construction of the Metropolitan Railway of Thessaloniki is an ambitious effort to fulfill this objective in a heavily urban environment while the main railway line consists of a 9.6km long tunnel and 13 stations. The extension to Staouroupoli, on which the thesis focuses on, consists of 5 stations and a 5km long tunnel, which is going to be developed initially in a plain environment with the altitude of the soil surface increasing up to 80m in the final part of the tunnel. The geology of the area of the extension is characterized of the presence of Quaternary, soil formations, which are located in the initial and final part of the tunnel, Neogene, soil formations, which are located mainly in the middle part of the tunnel and rocky formations which consist of Green Schists and belong to the Chortiatis Unit, which is the alpine base of the area.

In this particular project the demand of the practice of mechanized tunneling methods comes from the necessity for quick completion of the construction and the minimization of the underground disturbance, as possible dangerous situations during the excavation may lead to surface problems. This is the reason why the characteristics of the mechanized tunneling methods, which use TBMs, and the geological and geotechnical properties of the formations, that are going to be excavated, and are related to the selection of the appropriate for the excavation machine, and the laboratory and in situ tests that take place to define them, are described in detail.

The data, which has been collected from 72 boreholes along the tunnel alignment, include for the soil formations particle size analyses of the geomaterials, the liquid limit of the Atterberg limits, the plasticity index, the consistency index (in a few parts of the tunnel), the quality of the geomaterials, the SPT values and the permeability of the formations. For the rocky formations are presented the values of the GSI, the quality of the rock mass based on RQD values, the unconfined compression strength of the intact rock and the permeability of them. All of the above properties are presented also in figures where it becomes apparent how they develop along the tunnel alignment. From the data above the applicability of 4 TBM types, which include open face shield machines, rock TBMs, slurry shield TBMs and EPB machines, is described and the behavior of them versus the excavation is judged based on the geological and geotechnical conditions along the tunnel alignment.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

### Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή-Σκοπός

1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Σκοπός.....	2

### Κεφάλαιο 2. Η επέκταση του μητροπολιτικού υπόγειου σιδηροδρόμου (Μετρό) της Θεσσαλονίκης προς Σταυρούπολη

#### 2.1 Το Μετρό της Θεσσαλονίκης

2.1.1 Γενικά.....	3
2.1.2 Ιστορικό.....	3
2.1.3 Περιγραφή του έργου.....	3

#### 2.2 Η επέκταση του Μετρό της Θεσσαλονίκης προς Σταυρούπολη

2.2.1 Περιγραφή της επέκτασης.....	5
2.2.2 Η γεωμορφολογία της περιοχής επέκτασης.....	6
2.2.3 Γεωλογικές-Τεχνικογεωλογικές συνθήκες	
2.2.3.1 Γενικά-Στρωματογραφία.....	7
2.2.3.2 Γεωλογικές συνθήκες της στενής περιοχής της επέκτασης προς Σταυρούπολη.....	7
2.2.4 Οι εργαστηριακές και επί τόπου δοκιμές κατά μήκος της χάραξης.....	8

Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 2.....	9
-------------------------------	---

### Κεφάλαιο 3. Το θεωρητικό υπόβαθρο

3.1 Εισαγωγή.....	11
-------------------	----

#### 3.2 Μηχανοποιημένες μέθοδοι διάνοιξης σηράγγων

3.2.1 Γενικά.....	12
3.2.2 Κατηγοριοποίηση μηχανοποιημένων τεχνικών διάνοιξης σηράγγων.....	13
3.2.3 Η μηχανική μέθοδος διάνοιξης σηράγγων κάνοντας χρήση μηχανών ολομέτωπης κοπής TBM (Tunnel Boring Machine).....	13
3.2.4 Σχεδιασμός.....	16
3.2.5 Τύποι μηχανών ολομέτωπης κοπής TBM.....	17
3.2.6 Λειτουργία των μηχανημάτων ολομέτωπης κοπής TBM.....	20
3.2.7 Μηχανήματα TBM για σκληρά πετρώματα (Hard-rock TBM).....	21
3.2.8 Μηχανήματα TBM συμπιεσμένου αέρα (Compressed Air TBM).....	22
3.2.9 Μηχανήματα TBM πολφού μπετονίτη με ασπίδα (Slurry Shield TBM).....	23
3.2.10 Μηχανήματα TBM εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης (Earth Pressure Balance machines EPB).....	23
3.2.11 Μηχανήματα TBM μικτών συνθηκών μετώπου με ασπίδα (Mixed face shield TBM/"Universal" TBM).....	24
3.2.12 Αποδοτικότητα της μεθόδου διάνοιξης με TBM.....	24
3.2.13 Κρίσιμες καταστάσεις και δυσκολίες στη διάνοιξη σηράγγων με μηχανήματα ολομέτωπης κοπής TBM.....	27
3.2.14 Διαχείριση ρίσκου στη διάνοιξη σηράγγων.....	28

3.2.15 Κρίσιμες καταστάσεις διάνοιξης σηράγγων σε εδαφικούς σχηματισμούς με χρήση μηχανήματος TBM.....	28
3.2.16 Κρίσιμες καταστάσεις διάνοιξης σηράγγων σε βραχώδεις σχηματισμούς με χρήση μηχανήματος TBM.....	30
3.2.17 Μικτές γεωλογικές συνθήκες διάνοιξης με χρήση μηχανήματος TBM.....	34
3.2.18 Παραδείγματα εφαρμογής TBM στον ελλαδικό χώρο και σε παγκόσμιο επίπεδο.....	34
3.3 Συστήματα ταξινόμησης της βραχώμαζας.....	43
3.3.1 Σύστημα GSI.....	43
3.4 Μηχανική συμπεριφορά της βραχώμαζας	
3.4.1 Γενικά.....	45
3.4.2 Αστοχία βραχώμαζας.....	45
3.4.3 Κριτήριο Αστοχίας κατά Hoek-Brown.....	46
3.5 Εδαφικοί και βραχώδεις σχηματισμοί: Τα στοιχεία που τους χαρακτηρίζουν και οι δοκιμές που πραγματοποιούνται για το προσδιορισμό τους	
3.5.1 Εισαγωγή.....	51
3.5.2 Διάνοιξη σήραγγας σε εδαφικό (μαλακό) σχηματισμό.....	51
3.5.3 Προσδιορισμός της κοκκομετρικής διαβάθμισης εδαφικού υλικού.....	52
3.5.4 Προσδιορισμός της διαπερατότητας εδαφικού υλικού.....	54
3.5.5 Προσδιορισμός των ορίων Atterberg και του ποσοστού υγρασίας.....	56
3.5.6 Προσδιορισμός των εκτιμώμενων καθιζήσεων.....	57
3.5.7 Προσδιορισμός πιεζομετρικής γραμμής και στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα.....	62
3.5.8 Προσδιορισμός της διογκωσιμότητας εδαφικού υλικού.....	62
3.5.9 Προσδιορισμός των διατμητικών παραμέτρων αντοχής και της ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής.....	64
3.5.10 Προσδιορισμός του κίνδυνου απόφραξης (Clogging Risk).....	66
3.5.11 Διάνοιξη σήραγγας σε βραχώδη (σκληρό) σχηματισμό.....	67
3.5.12 Προσδιορισμός της πυκνότητας του βράχου.....	68
3.5.13 Προσδιορισμός της πετρογραφικής, ορυκτολογικής σύστασης του βράχου, της σκληρότητας και το περιεχόμενο ποσοστό χαλαζία.....	68
3.5.14 Προσδιορισμός διαπερατότητας.....	71
3.5.15 Προσδιορισμός της τιμής του RQD.....	72
3.5.16 Προσδιορισμός της εφελκυστικής αντοχής.....	73
3.5.17 Προσδιορισμός ανεμπόδιστης θλιπτικής αντοχής.....	73
3.5.18 Προσδιορισμός της τριαξονικής αντοχής άρρηκτου βράχου.....	74
3.5.19 Προσδιορισμός του μέτρου ελαστικότητας.....	75
3.5.20 Προσδιορισμός της γωνίας τριβής και της συνοχής βραχώδους υλικού.....	78
3.5.21 Προσδιορισμός της δυνατότητας διόγκωσης βραχώδους υλικού.....	78
Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 3.....	79
<b>Κεφάλαιο 4. Οι εκτιμώμενες Γεωλογικές συνθήκες κατά μήκος της χάραξης της σήραγγας επέκτασης του Μετρό της Θεσσαλονίκης προς Σταυρούπολη</b>	
4.1 Γεωλογική σύσταση των γεωυλικών.....	81

<b>4.2 Χαρακτηρισμός των εδαφικών υλικών βάσει της συνεκτικότητας, της πυκνότητας και της αντοχής των σχηματισμών</b>	
4.2.1 Λεπτόκοκκοι εδαφικοί σχηματισμοί.....	91
4.2.2 Αδρόκοκκοι εδαφικοί σχηματισμοί.....	98
4.2.3 Συμπεράσματα επί της συνεκτικότητας και της πυκνότητας των εδαφικών σχηματισμών στο σύνολο τους.....	100
<b>4.3 Γεωλογική και Τεχνικογεωλογική διακριτοποίηση σε ζώνες κατά μήκος της χάραξης του άξονα της σήραγγας.....</b>	<b>100</b>
Τμήμα Χ.Θ. 0+000 έως 0+050.....	102
Τμήμα Χ.Θ. 0+050 έως 0+265.....	102
Τμήμα Χ.Θ. 0+265 έως 0+375.....	103
Τμήμα Χ.Θ. 0+375 έως 0+600.....	107
Τμήμα Χ.Θ. 0+600 έως 0+700.....	110
Τμήμα Χ.Θ. 0+700 έως 2+150.....	117
Τμήμα Χ.Θ. 2+150 έως 3+300.....	132
Τμήμα Χ.Θ. 3+300 έως 4+400.....	136
Τμήμα Χ.Θ. 4+400 έως 5+245.....	141
<b>4.4 Η τεκτονική κατά μήκος της χάραξης της επέκτασης του Μετρό της Θεσσαλονίκης προς Σταυρούπολη</b>	
4.4.1 Τεκτονική-Σεισμοτεκτονική (Ενεργά Ρήγματα).....	154
4.4.2 Κατηγορίες εδάφους κατά τον ΕΑΚ κατά μήκος του άξονα χάραξης της σήραγγας.....	155

<b>Κεφάλαιο 5. Ζώνες Γεωλογικής Επικινδυνότητας κατά μήκος της χάραξης της επέκτασης του Μετρό της Θεσσαλονίκης προς Σταυρούπολη.....</b>	<b>157</b>
---	------------

**Κεφάλαιο 6. Η συμπεριφορά των γεωυλικών κατά μήκος του άξονα της σήραγγας έναντι μηχανοποιημένων μεθόδων εκσκαφής-Εκλογή του κατάλληλου τύπου μηχανήματος**

6.1 Εισαγωγή.....	159
6.2 Μηχάνημα με μηχανική υποστήριξη του μετώπου (TBM βράχου-Rock TBM)	
6.2.1 Γενικά.....	160
6.2.2 Η εκτιμώμενη συμπεριφορά του μηχανήματος Rock TBM έναντι των τεχνικογεωλογικών συνθηκών του τεχνικού έργου.....	161
6.2.3 Συμπεράσματα.....	162
6.3 Μηχάνημα ανοικτού μετώπου με ασπίδα (Open Face Shield TBM-OFS)	
6.3.1 Γενικά.....	162
6.3.2 Η εκτιμώμενη συμπεριφορά του μηχανήματος OFS έναντι των τεχνικογεωλογικών συνθηκών του τεχνικού έργου.....	163
6.3.3 Συμπεράσματα.....	167



6.4 Μηχάνημα πολφού μπετονίτη με ασπίδα (Slurry Shield TBM-SS TBM).....	168
6.5 Μηχάνημα εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης (Earth Pressure Balance TBM-EPB).....	169
6.6 Η εκτιμώμενη συμπεριφορά των μηχανημάτων STM και EPB έναντι των τεχνικογεωλογικών συνθηκών του τεχνικού έργου.....	172
6.6.1 Κοκκομετρική διαβάθμιση των προς εκσκαφή εδαφικών σχηματισμών κατά μήκος της χάραξης της σήραγγας.....	172
6.6.2 Η διαπερατότητα των εδαφικών σχηματισμών.....	180
6.6.3 Η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα πάνω από το επίπεδο του άξονα της σήραγγας όπου αναπτύσσονται εδαφικοί σχηματισμοί.....	181
6.6.4 Το όριο υδαρότητας (LL), ο δείκτης πλασιμότητας (PI) και ο δείκτης συνεκτικότητας (Ic) των γεωυλικών.....	182
6.6.5 Συμπεράσματα.....	186
6.6.6 Εξέταση του μηχανήματος εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης (EPB) ως προς τον τρόπο λειτουργίας του.....	186
Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 6.....	192
<b>Κεφάλαιο 7. Συμπεράσματα.....</b>	<b>193</b>

## **Παραρτήματα**

Παράρτημα Α: Προβολές αναφορικά με τα γεωλογικά και τεχνικογεωλογικά στοιχεία της περιοχής της χάραξης της σήραγγας.....	203
Παράρτημα Β: Αποτελέσματα αντοχής της βραχώμαζας κάνοντας εφαρμογή του προγράμματος Rocklab, Διαγράμματα κινδύνου αποφράξεως (Clogging Risk) κατά M.Thewes, W. Burger(2004).....	215
Παράρτημα Γ: Φωτογραφικό υλικό από τα γεωυλικά των γεωτρήσεων κατά μήκος της χάραξης της σήραγγας επέκτασης.....	219

## 1. Εισαγωγή-Σκοπός

### 1.1 Εισαγωγή

Στις σύγχρονες μεγάλες πόλεις ανά τον κόσμο πλέον δημιουργείται η απαίτηση για γρήγορη μετάβαση από κάποιο σημείο της σε ένα άλλο με όσο το δυνατό μεγαλύτερη άνεση και ασφάλεια στο μικρότερο δυνατό χρόνο. Η ανάγκη αυτή προκύπτει από το γεγονός ότι σε συνθήκες βαριάς αστικής ανάπτυξης το σύνολο των δραστηριοτήτων που πρέπει να συντελεστούν είναι πάρα πολύ μεγάλο με αποτέλεσμα ένας πάρα πολύ μεγάλος αριθμός ανθρώπων να πρέπει να μετακινείται καθημερινά καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας.

Αρχικά οι επίγειοι οδικοί άξονες ήταν επαρκείς προκειμένου να εξυπηρετήσουν την ανάγκη για μετακίνηση, κάνοντας χρήση ιδιωτικών και δημόσιων μέσων μεταφοράς. Παρόλα αυτά, η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση και απαιτήσεις του επιβατηγού κοινού και σε συνδυασμό με τη πυκνή δόμηση καθιστά πλέον τη δημιουργία νέων οδικών αξόνων ανεπαρκή. Οι περιορισμοί συνεπώς που τέθηκαν για το σχεδιασμό και τη κατασκευή νέων οδικών έργων οδήγησαν προς τη κατεύθυνση εκμετάλλευσης του υπόγειου ορίζοντα των βαριά αστικών περιοχών με τη δημιουργία μητροπολιτικών, υπόγειων σιδηροδρόμων (metro) προκειμένου να αντιμετωπιστεί η ανεπάρκεια του οδικού δικτύου αυτών.

Η Ελλάδα είναι μία από τις πολλές χώρες οι οποίες συνειδητοποίησαν την ανάγκη για τη δημιουργία μητροπολιτικών, υπόγειων σιδηροδρόμων, με το Μετρό της πόλης των Αθηνών να είναι το πρώτο υπόγειο έργο τόσο μεγάλης κλίμακας στον ελλαδικό χώρο, ενώ το δίκτυο του συνεχώς βελτιώνεται και επεκτείνεται προκειμένου να εξυπηρετήσει ακόμα περισσότερους ανθρώπους στο χώρο της πρωτεύουσας και των προαστίων της. Μετά τη κατασκευή του Μετρό των Αθηνών η δεύτερη μεγαλύτερη πόλη της Ελλάδας, η πόλη της Θεσσαλονίκης, παρουσίασε με τη σειρά της την ανάγκη για τη δημιουργία δικτύου υπόγειου σιδηροδρόμου προκειμένου να εξυπηρετηθεί ένας επίσης μεγάλος αριθμός ανθρώπων σε ένα βαριά αστικό περιβάλλον.

Η δημιουργία ενός τέτοιου έργου αποτελεί για το πολιτικό μηχανικό μία από τις πλέον μεγάλες προκλήσεις που μπορεί να αντιμετωπίσει. Αυτό συμβαίνει λόγω του σύνθετου χαρακτήρα του έργου, καθώς πρέπει να χρησιμοποιηθούν και να συνδυαστούν γνώσεις και στοιχεία που αφορούν στη γεωλογία της περιοχής του έργου, τη μηχανική συμπεριφορά των εδαφικών και των βραχωδών σχηματισμών που αναμένεται να παρουσιαστούν, στη μηχανική των σιδηροδρόμων και τη διαστασιολόγηση αυτών καθώς και γνώσεις που ξεφεύγουν από το πεδίο του πολιτικού μηχανικού και απαιτούν τη συμμετοχή και άλλων ειδικοτήτων όπως αυτή άλλων μηχανικών, γεωλόγων και τεχνικών γεωλόγων κλπ, ώστε να δημιουργηθεί ένα έργο άρτιο και λειτουργικό.

Μέσα στις προκλήσεις που αντιμετωπίζονται συμπεριλαμβάνεται επίσης το μικρό βάθος εκσκαφής, καθώς η σήραγγα κατασκευάζεται σε απόσταση σχετικά μικρή από την εδαφική επιφάνεια. Για το λόγο αυτό απαιτείται προσοχή προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι διαταραχές κατά την εκσκαφή, ώστε να αποφευχθούν καταστάσεις που ενδεχομένως να δημιουργήσουν προβλήματα στην εδαφική επιφάνεια, όπως καθιζήσεις και διαφορικές καθιζήσεις κατασκευών, ρωγμές σε αυτές ή αστοχία αυτών, όπου συντελείται το σύνολο της ανθρώπινης δραστηριότητας, ενώ άλλη σημαντική παράμετρος είναι η ύπαρξη του υδροδοτικού και αποχετευτικού δικτύου, το οποίο δε γίνεται να βρίσκεται στο χώρο όπου αναμένεται να εκσκαφτεί, καθώς και η παρουσία αρχαιολογικών ευρημάτων που είναι συνήθως στον ελλαδικό χώρο.

## 1.2 Σκοπός

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στην επέκταση του Μετρό της Θεσσαλονίκης προς το δήμο Σταυρουπόλεως και την εφαρμοσιμότητα μηχανοποιημένων μεθόδων εκσκαφής σηράγγων για τη διάνοιξη αυτής κάνοντας χρήση μηχανών TBM (Tunnel Boring Machine). Δεδομένης της ανάγκης για γρήγορη περαίωση του έργου, με όσο το δυνατόν μικρότερες διαταραχές του υπεδάφους κατά την εκσκαφή, καθώς βρισκόμαστε σε έντονα επιβαρυσμένο αστικό περιβάλλον, εξετάστηκαν μόνο μηχανοποιημένες μέθοδοι, όπως προαναφέρθηκε, και η εξέταση της εναλλακτικής επιλογής εφαρμογής συμβατικών μεθόδων εκσκαφής, όπως η Νέα Αυστριακή Μέθοδος, δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής.

Κύριο αντικείμενο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας αποτελεί η εξέταση της γεωλογίας της περιοχής, όπου αναμένεται να κατασκευαστεί η σήραγγα επέκτασης, καθώς και τα τεχνικογεωλογικά και γεωτεχνικά στοιχεία των προς εκσκαφή σχηματισμών που αναμένονται κατά μήκος της χάραξης της σήραγγας. Από τα στοιχεία αυτά, που προέκυψαν από 72 γεωτρήσεις κατά μήκος της χάραξης, εξετάζονται οι εδαφικοί και βραχώδεις σχηματισμοί προκειμένου να κριθεί η ποιότητα αυτών και η εκτιμώμενη κατά την εκσκαφή τους συμπεριφορά. Εν συνεχεία και από την ανάλυση που έχει προηγηθεί εξετάζεται η καταλληλότητα τεσσάρων μηχανοποιημένων μεθόδων εκσκαφής που περιλαμβάνουν διάνοιξη σηράγγων με μηχανήμα ανοικτού μετώπου με ασπίδα (OFS), με TBM βράχου με μηχανική υποστήριξη του μετώπου (Rock TBM), με μηχανήμα κλειστού μετώπου πολφού μπετονίτη με ασπίδα (Slurry Shield TBM) και με μηχανήμα εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης (EPB Machine) προκειμένου να εκσκαφτεί η σήραγγα.

Της ανάλυσης των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών στοιχείων έχει προηγηθεί εκτενής βιβλιογραφική αναφορά στην οποία περιλαμβάνονται οι μέθοδοι εκσκαφής που χρησιμοποιούνται ευρύτατα ανά τον κόσμο, με κύρια αναφορά επί των μηχανοποιημένων μεθόδων εκσκαφής, και οι ιδιότητες, τα σχετιζόμενα μεγέθη και οι δοκιμές, μέσω των οποίων προσδιορίζονται αυτά, των εδαφικών και βραχώδων σχηματισμών καθώς και ο ρόλος που διαδραματίζουν για την εκλογή της πλέον κατάλληλης μηχανοποιημένης μεθόδου εκσκαφής για τη διάνοιξη της σήραγγας, ώστε να γίνει πλήρως κατανοητή η διαδικασία εξέτασης των στοιχείων των γεωτρήσεων και της εξαγωγής συμπερασμάτων.

**Για την εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας αξιοποιήθηκε ένα παρά πολύ μεγάλο μέρος από το σύνολο των αποτελεσμάτων της γεωτεχνικής έρευνας, που διενεργήθηκε προκειμένου να προσδιοριστούν οι τεχνικογεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες κατά μήκος της χάραξης, αλλά όχι το σύνολο αυτών και συνεπώς δε συνθέτουν μελέτη επί του έργου αλλά αξιολόγηση των πληροφοριών για το ποιοτικό προσδιορισμό του κατάλληλου τύπου μηχανήματος εκσκαφής TBM.**

## **2. Η επέκταση του μητροπολιτικού υπόγειου σιδηροδρόμου (Μετρό) της Θεσσαλονίκης προς Σταυρούπολη**

### **2.1 Το Μετρό της Θεσσαλονίκης**

#### **2.1.1 Γενικά**

Το Μετρό της Θεσσαλονίκης συγκαταλέγεται ανάμεσα στα μεγαλύτερα έργα συγκοινωνιακής υποδομής που έχουν κατασκευαστεί ποτέ στον ελλαδικό χώρο, το οποίο προσβλέπει στη βελτίωση της ποιότητας ζωής των κατοίκων της Θεσσαλονίκης παρέχοντας τους ταχύτερη, ασφαλέστερη και ανετότερη μετακίνηση.

Το βασικό έργο του Μετρό της Θεσσαλονίκης και οι μελλοντικές επεκτάσεις του αποτελούν ένα νέο σύστημα μαζικής μεταφοράς για τη πόλη που φιλοδοξεί να αντιστρέψει τη τάση των κατοίκων της να μετακινούνται κάνοντας χρήση Ι.Χ. αυτοκινήτων, ο αριθμός των οποίων τα τελευταία χρόνια έχει αυξηθεί δραματικά.

Η εξοικονόμηση χρόνου, ενεργειακών πόρων και χρημάτων καθώς και η μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, η βελτίωση της εικόνας της Θεσσαλονίκης, η δημιουργία νέων εμπορικών και επιχειρηματικών πόλων γύρω από τους νέους σταθμούς και ο εντοπισμός σημαντικών αρχαιολογικών ευρημάτων είναι κάποια από τα οφέλη της κατασκευή και λειτουργίας του Μετρό.

#### **2.1.2 Ιστορικό**

Μετά την αποτυχημένη απόπειρα κατασκευής του Μετρό Θεσσαλονίκης με τη μέθοδο της παραχώρησης (1998 - 2003), τον Σεπτέμβριο του 2003 αποφασίστηκε να κατασκευαστεί το Μετρό ως δημόσιο έργο, με χρηματοδότηση του Ελληνικού Δημοσίου και της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Με βάση τη διακήρυξη του νέου Διαγωνισμού, τον Ιούνιο του 2004 υπέβαλαν εκδήλωση ενδιαφέροντος πέντε κοινοπραξίες με σημαντικές ελληνικές και ξένες εταιρείες του κλάδου. Το πρώτο στάδιο του διαγωνισμού ολοκληρώθηκε τον Νοέμβριο του 2004. Τέσσερις από τις πέντε κοινοπραξίες συνέχισαν στο δεύτερο στάδιο και τον Ιανουάριο 2005 έλαβαν τα τεύχη δημοπράτησης και τη νέα προμελέτη του έργου.

Στις 12 Μαΐου 2005 οι προεπιλεγείσες κοινοπραξίες υπέβαλαν την τεχνική και οικονομική προσφορά τους και στις 19 Αυγούστου ολοκληρώθηκε η αξιολόγηση των τεχνικών και οικονομικών προσφορών των τριών κοινοπραξιών που έμειναν στο τελικό στάδιο του διαγωνισμού.

Για την χρηματοδότηση της κατασκευής του Μετρό Θεσσαλονίκης έχουν εξασφαλιστεί 550.000.000 € από την Ευρωπαϊκή Τράπεζα Επενδύσεων, ως εγκεκριμένο δάνειο με ευνοϊκούς όρους και 250.000.000 € από το Γ' Κοινοτικό Πλαίσιο Στήριξης. Ο συνολικός προϋπολογισμός του βασικού έργου ανέρχεται στο 1.052.000 €. Επίσης, εξασφαλίστηκε χρηματοδότηση ύψους 400.000.000 € από το Δ' Κοινοτικό Πλαίσιο Στήριξης για την επέκταση του βασικού έργου προς την Καλαμαριά, μήκους 5 km με 5 σταθμούς.

#### **2.1.3 Περιγραφή του έργου**

Η κατασκευή του Μετρό της Θεσσαλονίκης θα ενσωματώνει τα πλέον σύγχρονα τεχνολογικά δεδομένα και τις πιο απαιτητικές προδιαγραφές ποιότητας και λειτουργικότητας, με αποτέλεσμα να είναι όχι μόνο καλύτερο από το Μετρό της Αθήνας, αλλά το πιο σύγχρονο Μετρό στην Ευρώπη.

Τα βασικά χαρακτηριστικά του δικτύου Μετρό στην Θεσσαλονίκη είναι τα εξής:

- 13 σύγχρονοι σταθμοί με κεντρική αποβάθρα
- 9.6 km γραμμής με δύο ανεξάρτητες σήραγγες μονής τροχιάς

- 18 υπέρ-αυτόματοι συρμοί τελευταίας τεχνολογίας, πλήρως κλιματιζόμενοι οι οποίοι θα κινούνται χωρίς οδηγό αλλά με συνοδό
- Συστήματα αυτόματων θυρών επί των αποβάθρων κάθε σταθμού για τη καλύτερη εξυπηρέτηση και τη μέγιστη ασφάλεια του επιβατικού κοινού
- Δημιουργία αμαξοστασίου έκτασης 50000 m<sup>2</sup> στη περιοχή της Πυλαίας

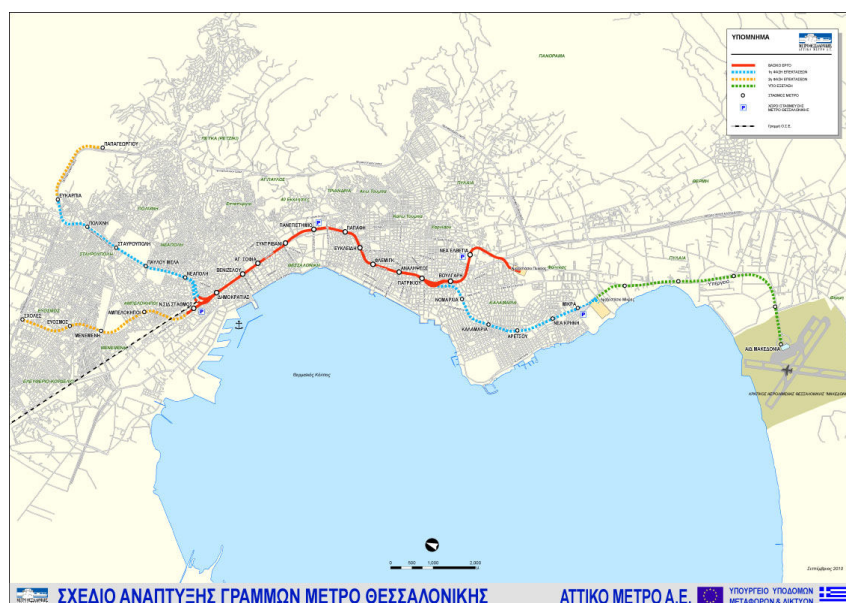
Επίσης στο πρόγραμμα ανάπτυξης χώρων στάθμευσης της Αττικό Μετρό προβλέπεται η κατασκευή υπόγειων χώρων στάθμευσης στο Μετρό της Θεσσαλονίκης, συνολικής χωρητικότητας 3700 θέσεων όπως παρουσιάζεται και στο παρακάτω πίνακα

ΣΤΑΘΜΟΣ	ΘΕΣΕΙΣ	ΕΠΙΠΕΔΑ
Ν. Σιδηροδρομικός Σταθμός 1	450	-4 υπόγεια
Νέος Σιδ. Σταθμός 2	600	-4 υπόγεια
Νέα Ελβετία	650	-1, ισόγειο, +2
Πανεπιστήμιο 1	1000	-4 υπόγεια
Πανεπιστήμιο 2	1000	-4 υπόγεια
Σύνολο	3700	

ενώ η Αττικό Μετρό ΑΕ έχει συμπεριλάβει στο βασικό έργο του Μετρό Θεσσαλονίκης την αναγκαία υποδομή που απαιτείται προκειμένου να υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας επεκτάσεων Μετρό δίχως διακοπή της λειτουργίας του έργου όπου στην Α' Φάση των επεκτάσεων για το Μετρό Θεσσαλονίκης προβλέπεται η κατασκευή δύο επεκτάσεων:

- Βορειοδυτικά προς Σταυρούπολη, με μήκος 5 km με πέντε νέους σταθμούς
  - Νοτιοανατολικά προς Καλαμαριά, με μήκος 5 km με επίσης πέντε σταθμούς
- ενώ για αυτές τις επεκτάσεις έχουν ληφθεί υπόψη :
- Η κατασκευή των απαραίτητων προβλέψεων στα έργα Πολιτικού Μηχανικού και στα Ηλεκτρομηχανολογικά και Σιδηροδρομικά Συστήματα του βασικού έργου
  - Η λειτουργία των συρμών με διπλή χρονοαπόσταση
  - Η διερεύνηση για την ανάγκη κατασκευής πρόσθετου αμαξοστασίου

Στο σχήμα 2.1.3.1 που ακολουθεί παρουσιάζεται το Μετρό της Θεσσαλονίκης μαζί με τις υπό εξέταση επεκτάσεις του.



**Σχήμα 2.1.3.1: Το Μετρό της Θεσσαλονίκης**  
**Πηγή: <http://www.ametro.gr>**

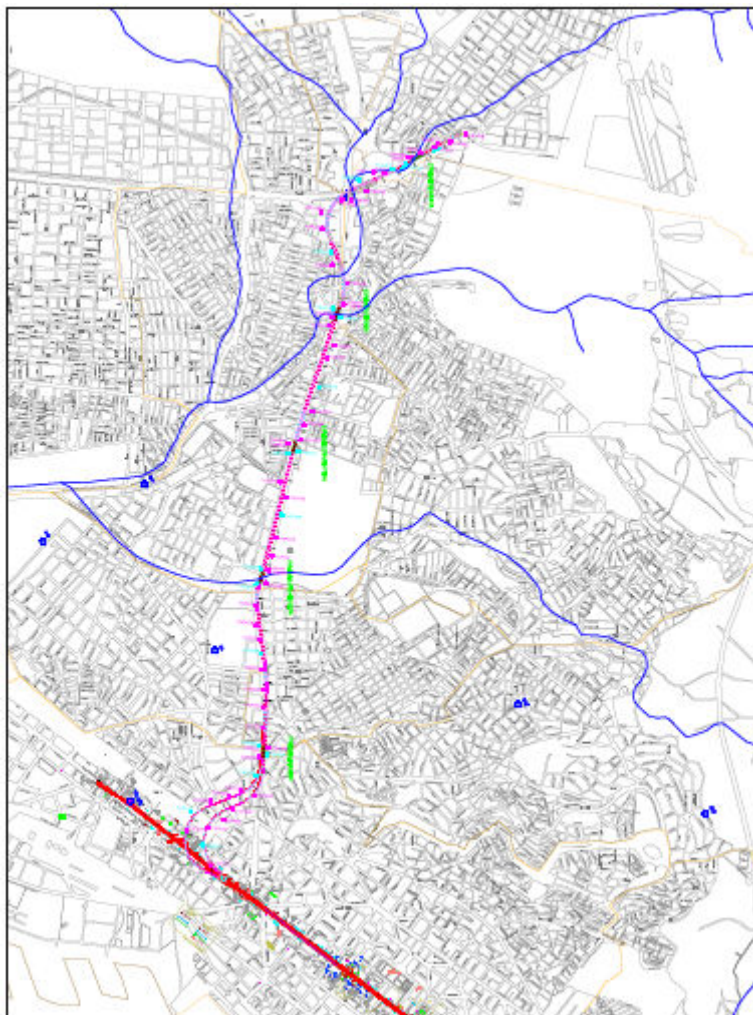
## 2.2 Η επέκταση του Μετρό της Θεσσαλονίκης προς Σταυρούπολη

### 2.2.1 Περιγραφή της επέκτασης

Η επέκταση του Μετρό της Θεσσαλονίκης προς Σταυρούπολη έχει μήκος περίπου 5km και περιλαμβάνει τους πέντε παρακάτω σταθμούς :

- Σταθμός Νεάπολης (Χ.Θ. 1+100)
- Σταθμός Παύλου Μελά (Χ.Θ. 2+100)
- Σταθμός Σταυρούπολης (Χ.Θ. 2+900)
- Σταθμός Πολίχνης (Χ.Θ. 3+700)
- Σταθμός Ευκαρπίας (Χ.Θ. 4+900)

Η επέκταση προς Σταυρούπολη παρουσιάζει την ιδιομορφία ότι από τη χιλιομετρική θέση 0+000, ξεκινώντας δηλαδή από το Σταθμό Δημοκρατίας που ανήκει στο βασικό έργο, έως τη χιλιομετρική θέση 1+100, δηλαδή στο Σταθμό Νεάπολη, η χάραξη της σήραγγας διαχωρίζεται σε δύο κλάδους μονής τροχιάς με διαφορετική καμπυλότητα όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2.1.1 . Στο υπόλοιπο τμήμα της έως και το τέλος της επέκτασης ακολουθείται ενιαία χάραξη.

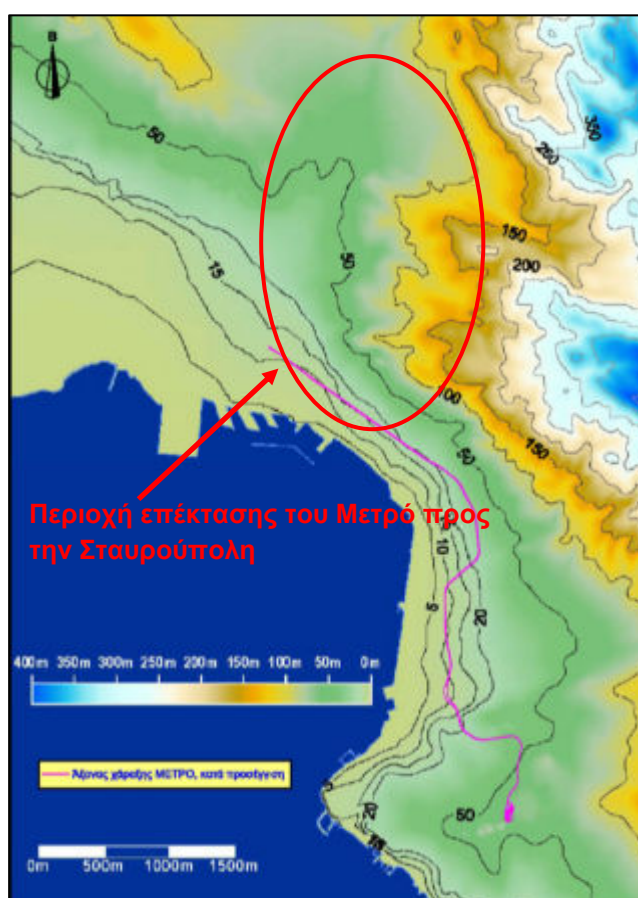


*Σχήμα 2.2.1.1: Το Μετρό της Θεσσαλονίκης  
Πηγή: ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.*

Η χάραξη της σήραγγας ακολουθεί κυρίως το κύριο οδικό άξονα της Λεωφόρου Λαγκαδά όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα 2.2.1.1 αλλά διέρχεται επίσης κάτω από οικοδομημένες εκτάσεις και κατά συνέπεια απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή προκειμένου να αποφευχθούν προβλήματα στην εδαφική επιφάνεια. Η διατομή της σήραγγας αναμένεται να έχει ύψος που εκτιμάται στα 6m και θα έχει στρογγυλό, τυποποιημένο σχήμα καθώς η εκσκαφή αναμένεται να πραγματοποιηθεί από μηχάνημα TBM που έχει προκαθορισμένο σχήμα διατομής.

## 2.2.2 Η γεωμορφολογία της περιοχής επέκτασης

Η περιοχή όπου θα κατασκευαστεί η επέκταση προς Σταυρούπολη αναπτύσσεται προς τα δυτικά-βορειοδυτικά του δήμου της Θεσσαλονίκης και παρουσιάζει τοπογραφικό ανάγλυφο, το οποίο αρχίζει σχεδόν από τη παραλιακή ζώνη στο επίπεδο της θάλασσας και αναπτύσσεται ομαλά καταλήγοντας στη περιοχή της Νεάπολης σε μικρούς λόφους υψομέτρου 20m έως 30m και στη συνέχεια μέχρι και το τέλος της επέκτασης προς τα βόρεια-βορειοδυτικά σε λόφους με υψόμετρο 50m έως 100m όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.2.2.1.



Σχήμα 2.2.2.1: Η περιοχή της επέκτασης προς Σταυρούπολη

## 2.2.3 Γεωλογικές-Τεχνικογεωλογικές συνθήκες

### 2.2.3.1 Γενικά-Στρωματογραφία

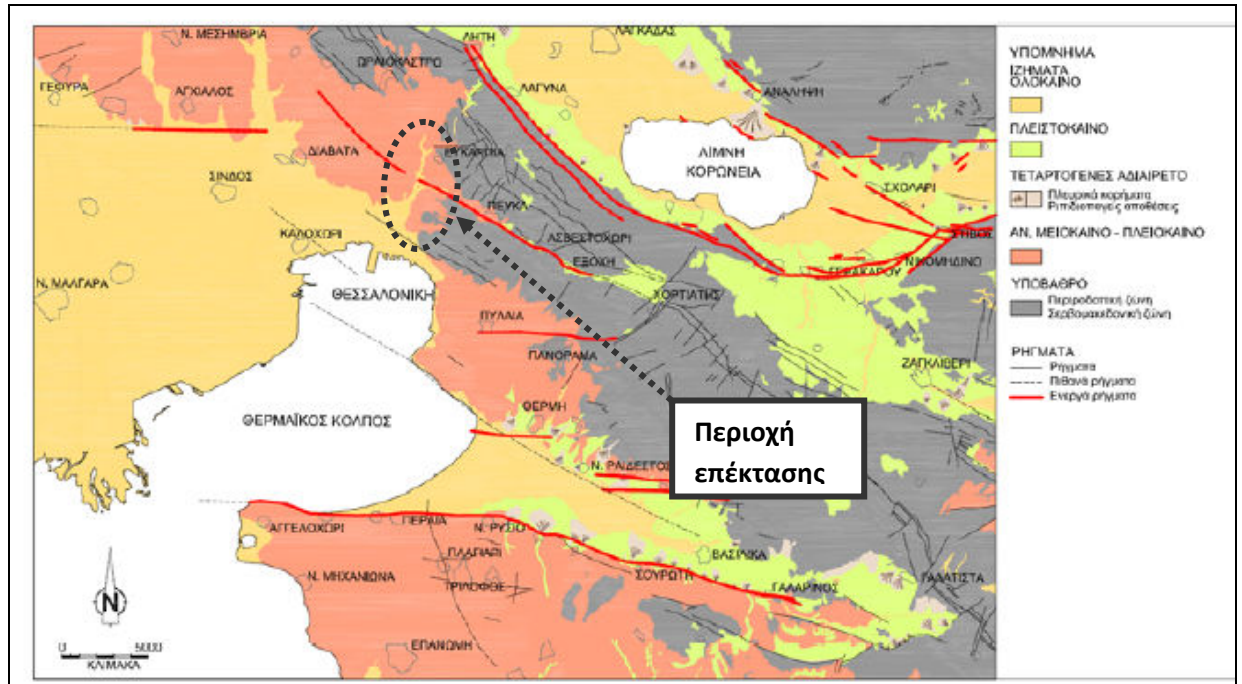
Η πεδινή περιοχή γύρω από το κόλπο της Θεσσαλονίκης και η λοφώδης που αναπτύσσεται στο ανατολικό τμήμα της πόλης με κατεύθυνση βόρειο-βορειοδυτικά/νότιο-νοτιανατολικά αποτελούν τμήμα του κλάδου της Δοϊράνης μέσα στη μάζα της γεωτεκτονικής ζώνης του Αξιού (Osswald, 1938). Με τη μετέπειτα διακριτοποίηση, ανήκουν στη γεωτεκτονική ζώνη της Παιονίας, όπως χαρακτηρίστηκε το ανατολικό τμήμα της ζώνης του Αξιού (Mercier, 1966)

Το ιστορικό κέντρο της πόλης εντός των τειχών συνίσταται στα επιφανειακά στρώματα από ιστορικές αποθέσεις του αρχαιολογικού στρώματος ή τεχνητές αποθέσεις με το πάχος αυτών να κυμαίνεται από 1 έως 12m στη περιοχή της παλιάς πόλης νότια της Εγναντίας Οδού. Σε μεγαλύτερο βάθος παρατηρούνται ποταμοχειμάρριες και άλλες τεταρτογενείς αποθέσεις (πιθανότατα Πλειστοκαινικής-1.6 εκ. χρόνια πριν- και Ολοκαινικής-0.01 εκ. χρόνια πριν-ηλικίας) καθώς και το στρώμα διάβρωσης νεογενών σχηματισμών. Οι ποταμοχειμάρριες αποθέσεις συνθέτονται από στρώματα και φακούς άμμων, αργίλων και χαλικών προερχόμενα από τους νεογενείς σχηματισμούς ή από το βραχώδες υπόβαθρο της Θεσσαλονίκης. Οι Τεταρτογενείς σχηματισμοί αναμένεται ότι θα απαντήσουν το μέτωπο εκσκαφής στη περιοχή εισόδου και εξόδου αυτής. Πριν το αλπικό υπόβαθρο συναντώνται οι Νεογενείς σχηματισμοί (πιθανότατα Άνω Μειόκαινο-Κάτω Πλειόκαινο (23-6.3 εκ. χρόνια πριν) (χάρτες ΙΓΜΕ 1978)) οι οποίες γενικά υπόκεινται των Τεταρτογενών σχηματισμών. Οι Νεογενείς αποθέσεις στη περιοχή της επέκτασης αποτελούνται στρωματογραφικά από τη «Σειρά των Ερυθρών Αργίλων». Η «Σειρά των Ερυθρών Αργίλων» αποτελείται κυρίως από αργιλικά γεωλικά (ορίζοντες αργιλώδων άμμων και χαλικώδεις ορίζοντες). Οι εναλλαγές αυτές αναμένεται να κυριαρχήσουν στο κεντρικό τμήμα της χάραξης της σήραγγας επέκτασης με μήκος 2.3km περίπου. Τέλος στη περιοχή από τη χιλιομετρική θέση 0+700 έως τη χιλιομετρική θέση 2+150 (μήκος 1450m) εμφανίζεται το αλπικό υπόβαθρο της περιοχής που εντάσσεται στην Ενότητα του Χορτιάτη και συνθέτεται από Πρασινοσχιστόλιθους. Οι Πρασινοσχιστόλιθοι υπόκειται κυρίως των Τεταρτογενών Αποθέσεων, ελάχιστα της «Σειράς των Ερυθρών Αργίλων» ή των τεχνητών επιχώσεων.

### 2.2.3.2 Γεωλογικές συνθήκες της στενής περιοχής της επέκτασης προς Σταυρούπολη

Η περιοχή της επέκτασης προς Σταυρούπολη, όπως προαναφέρθηκε αποτελείται από μεταμορφωμένους, βραχώδεις σχηματισμούς (Πρασινοσχιστόλιθοι), από τους νεογενείς, ιζηματογενείς σχηματισμούς (Μειόκαινο-Πλειόκαινο) και από τεταρτογενείς σχηματισμούς (Πλειστόκαινο-Ολόκαινο). Η διαφορά της επέκτασης της Σταυρούπολης από το βασικό έργο, σε ότι αφορά τις γεωλογικές συνθήκες, έγκειται στη παρουσία του αλπικού υποβάθρου αλλά και στο εκτεταμένο μήκος όπου το μέτωπο εκσκαφής απαντά τις Νεογενείς Αποθέσεις, οι οποίες εκτείνονται τόσο σε μεγάλο μήκος όσο και βάθος με ακόμα και επιφανειακές εμφανίσεις, ενώ οι τεταρτογενείς σχηματισμοί έχουν πιο περιορισμένη έκταση. Οι γεωλογικές συνθήκες στην ευρύτερη περιοχή εμφανίζονται στο σχήμα 2.2.3.2.1 που ακολουθεί όπου εμφανίζεται και η περιοχή επέκτασης. Εκτενέστερη αναφορά ακολουθεί στο Κεφάλαιο 4 όπου παρουσιάζονται και εξετάζονται οι γεωλογικές συνθήκες κατά μήκος της χάραξης της σήραγγας καθώς και οι τεχνικογεωλογικές και γεωτεχνικές παράμετροι των σχηματισμών.





Σχήμα 2.2.3.2.1: Η περιοχή της επέκτασης προς Σταυρούπολη  
 Πηγή : ΙΓΜΕ (1978)

## 2.2.4 Οι εργαστηριακές και επί τόπου δοκιμές κατά μήκος της χάραξης

Προκειμένου να προσδιοριστούν οι ιδιότητες των γεωλικών ο ανάδοχος του έργου προχώρησε στη πραγματοποίηση 72 δειγματοληπτικών γεωτρήσεων. Από τα γεωλικά τα οποία ελήφθησαν διαμορφώθηκαν δοκίμια και πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακές δοκιμές ώστε να προσδιοριστούν οι ιδιότητες αυτών ενώ πραγματοποιήθηκαν επίσης και επί τόπου δοκιμές που συνετέλεσαν σε αυτό. Ενδεικτικά παρακάτω ακολουθούν κάποιες από αυτές ενώ με αστερίσκο σημειώνονται όσων τα αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν στο Κεφάλαιο 4 για την ανάλυση των προς εκσκαφή σχηματισμών :

### Εργαστηριακές δοκιμές

- Δοκιμές τριαξονικής θλίψης
- Δοκιμές σε ανεμπόδιστη θλίψη \*
- Δοκιμή προσδιορισμού των ορίων Atterberg\*
- Κοκκομετρική ανάλυση των γεωλικών\*
- Δοκιμή συμπίεσομέτρου για τη διογκωσιμότητα των εδαφικών σχηματισμών
- Δοκιμή Cerchar για το προσδιορισμό της σκληρότητας των βραχωδών σχηματισμών

### Επί τόπου δοκιμές/περιγραφές

- Δοκιμή πρότυπης διείδυσης SPT \*
- Προσδιορισμός του RQD των βραχωδών σχηματισμών\*
- Προσδιορισμός του δείκτη GSI των βραχωδών σχηματισμών\*
- Δοκιμές διαπερατότητας πίπτοντος και σταθερού υδραυλικού φορτίου\*
- Προσδιορισμός στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα\*

Από τα αποτελέσματα των παραπάνω δοκιμών δημιουργήθηκαν τομές-προβολές των γεωλικών όπου παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α.

## **Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 2**

### **Βιβλιογραφία υποκεφαλαίου 2.1**

- <http://www.ametro.gr>

### **Βιβλιογραφία υποκεφαλαίου 2.2**

- ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.
- <http://www.ametro.gr>
- Ειδική Έκδοση του Νεοτεκτονικού Χάρτη της Ελλάδας/Φύλλο Θεσσαλονίκης-Δ.Μουντράκης & Συνεργάτες του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης (Αθήνα 1997)



### 3. Το θεωρητικό υπόβαθρο

#### 3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται οι πληροφορίες και τα στοιχεία που συνθέτουν το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, προκειμένου να γίνει κατανοητή η δομή αυτής και να παρουσιαστούν τα κριτήρια και οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

#### 3.2 Μηχανοποιημένες μέθοδοι διάνοιξης σηράγγων

##### 3.2.1 Γενικά

Η ανθρωπότητα ανέπτυξε τεχνικές για να δημιουργεί σήραγγες μέσα από εμπόδια πριν από περίπου 5000 χρόνια. Η πρώτη από όλες τις υπόγειες κατασκευές που περιελάμβαναν σήραγγες ήταν υδρευτικές και αποστραγγιστικές σήραγγες. Το 2500 Π.Χ. η βασίλισσα Semiramis λέγεται ότι ανέθεσε τη κατασκευή μίας σήραγγας μήκος ενός χιλιομέτρου κάτω από το ποταμό Ευφράτη από το βασιλικό παλάτι έως το ναό του Baal στη Βαβυλώνα. Το 700 Π.Χ. οι υδρευτικές σήραγγες στην Ιερουσαλήμ, οι οποίες εκσκάφθηκαν με απλά μέσα όπως αξίνες και σφυριά, έφταναν σε συνολικό μήκος τα 540m καλύπτοντας συνολική επιφάνεια 20000m<sup>2</sup>. Το 530-520 Π.Χ. κατασκευάστηκε το υδραγωγείο της Σάμου από το Μεγαρέα μηχανικό Ευπαλίνο, κατασκευή η οποία περιελάμβανε όρυγμα μήκους 1036m το οποίο είναι η πρώτη καταγεγραμμένη περίπτωση σήραγγας που εκσκάφθηκε από δύο μέτωπα. Το 36 Π.Χ. ο Ρωμαίος αυτοκράτορας Οκτάβιος κατασκεύασε τις πρώτες οδικές σήραγγες κοντά στη Νάπολη, οι οποίες εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται ακόμα και σήμερα.

Η σύγχρονη εποχή στην οποία ζούμε θα ήταν πολύ διαφορετική δίχως αυτές τις υπόγειες κατασκευές. Η σημασία τους είναι πάρα πολύ μεγάλη ιδιαίτερα στις πυκνά κατοικημένες περιοχές ανά τον κόσμο και η αναγκαιότητα και η ζήτηση για αυτές τις υψηλά τεχνολογικά κατασκευές συνεχώς αυξάνεται καθώς ο ανθρώπινος πληθυσμός συνεχίζει να μεγαλώνει. Ιδιαίτερα ο μεγάλος αριθμός απαιτητικών κατασκευών κατά τη διάρκεια των τελευταίων τριάντα χρόνων εισήγαγε πολλές τεχνολογικές καινοτομίες στη δημιουργία σηράγγων.

Οι διάφορες τεχνικές διάνοιξης σηράγγων εξαρτώνται από τη γεωλογία, τη τοπογραφία της περιοχής, το μήκος και τη γεωμετρία των διατομών της σήραγγας κλπ. Στη κατασκευή σηράγγων υπάρχουν τρεις βασικές μέθοδοι:

- Ανοικτή εκσκαφή (open-cut method of construction)
- Εκσκαφή και επανεπίχωση (cut-and-cover method of construction)
- Κλειστού μετώπου (closed-face method of construction)

Η κατασκευή σήραγγας εφαρμόζοντας τη μέθοδο ανοικτής εκσκαφής ξεκινάει κάθετα από την εδαφική επιφάνεια στο επίπεδο της εκσκαφής. Μετά την κατακόρυφη εκσκαφή ακολουθεί η πραγματική κατασκευαστική ακολουθία. Έπειτα συνεχίζει η εκσκαφή σε οριζόντια διεύθυνση.

Με τη μέθοδο του κλειστού μετώπου η σήραγγα οδηγείται οριζοντίως από ένα εναρκτήριο φρέαρ (π.χ. σε μια αστική περιοχή). Η μέθοδος εκσκαφής και επανεπίχωσης είναι μια υβριδική μέθοδος η οποία συνδυάζει τόσο τη μέθοδο ανοικτής εκσκαφής όσο και υπόγειες κατασκευαστικές μεθόδους. Σήραγγες στις οποίες το βάθος των υπερκειμένων είναι μικρότερο από τη μισή διάμετρο της διατομής τους συνήθως κατασκευάζονται με τη μέθοδο αυτή.

Με τη μέθοδο του κλειστού μετώπου κατασκευής σιράγγων εφαρμόζονται διάφορες τεχνικές για την εκσκαφή:

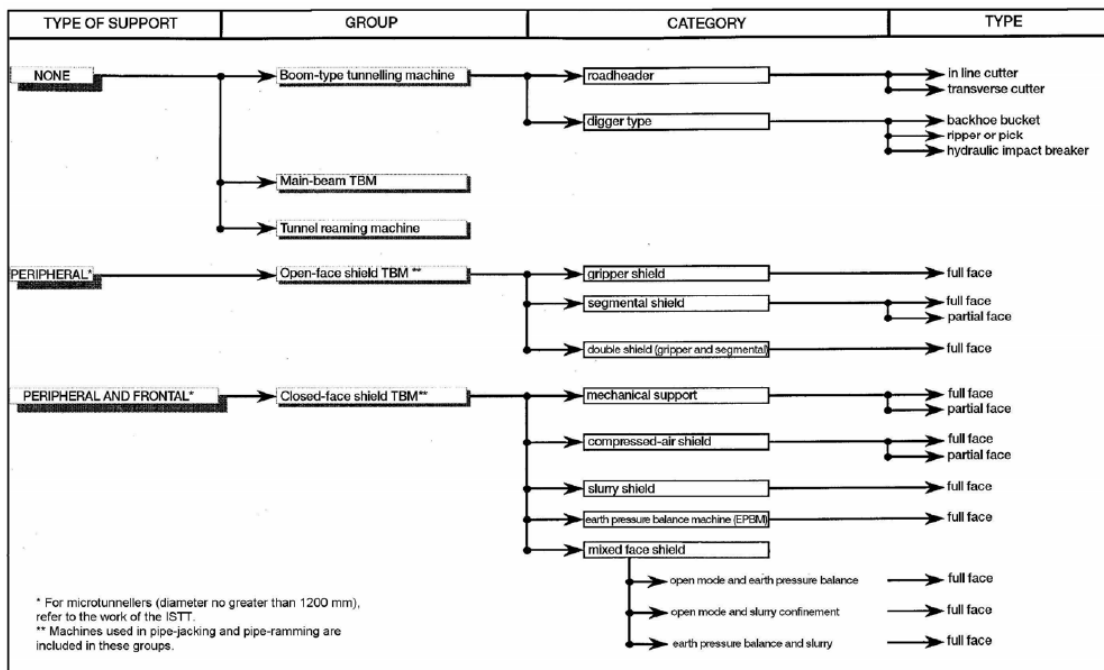
- Διάνοιξη σήραγγας με μηχανικά μέσα, τα οποία ποικίλουν από εκσκαφείς με κοπτικές οδοντώσεις, υδραυλικής κοπής (hydraulic rams), μηχανήματα Roadheader μέχρι διάφορους τύπους μηχανών ολομέτωπης κοπής TBM (Tunnel Boring Machine). Η εκσκαφή με μηχανές ολομέτωπης κοπής TBM αναφέρεται πάντα ως πλήρως μετώπου μηχανοποιημένη μέθοδος. Σύμφωνα με τον ορισμό της Γαλλικής Ένωσης Σιράγγων και Υπόγειου Χώρου (AFTES, 2000) , «μηχανοποιημένες τεχνικές διάνοιξης (όπως αντιτίθεται στις επονομαζόμενες συμβατικές μεθόδους) είναι όλες εκείνες οι μέθοδοι στις οποίες η εκσκαφή πραγματοποιείται μηχανικά με μέσα που διαθέτουν ‘δόντια’, αξίνες ή δίσκους». Ανάμεσα στις μηχανοποιημένες μεθόδους εκσκαφής περιλαμβάνονται όλες (ή σχεδόν όλες) οι κατηγορίες μηχανικών μέσων από το απλούστερο τρυπάνι έως το πιο σύνθετο μηχανήμα TBM.
- Μέθοδοι εκτοξευόμενου σκυροδέματος, όπως είναι η Ευθυγράμμιση με Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα (Sprayed Concrete Lining SCL), η Νέα Αυστριακή Μέθοδος (New Austrian Tunneling Method NATM), η Νορβηγική Μέθοδος (Norwegian Method of Tunneling NMT) συνήθως περιλαμβάνουν ενέργειες εκσκαφής με συμβατικά μέσα και εκρηκτικά (drilling and blasting).
- Ειδικές κατασκευαστικές μέθοδοι (pipe jacking, Microtunneling, Caissons, οριζόντιας διεύθυνσης διάνοιξη (Horizontal direction drilling)).

Σιράγγες σήμερα κατασκευάζονται όπου οι απαιτείται από τις ανθρώπινες δραστηριότητες και όχι όπου οι γεωλογικές συνθήκες είναι περισσότερο πρόσφορες. Αυτό προσδίδει στη κατασκευή ενός τέτοιου έργου περισσότερες δυσκολίες, περισσότερους κινδύνους και μεγαλύτερο κόστος. Στα περισσότερα έργα οικονομικοί και προγραμματιστικοί παράγοντες είναι τα κρίσιμα στοιχεία για οποιαδήποτε απόφαση η οποία μπορεί να διαμορφώσει την επιλογή της μεθόδου εκσκαφής. Παρόλα αυτά όλες οι μέθοδοι εκσκαφής σιράγγων πρέπει να στοχεύουν συνεχώς στη βελτίωση του κόστους, της αποδοτικότητας και των συνθηκών ασφαλείας.

### **3.2.2 Κατηγοριοποίηση μηχανοποιημένων τεχνικών διάνοιξης σιράγγων**

Επίσης σύμφωνα με την AFTES (2000) είναι σημαντικό να υπάρχει μία επίσημη κατάταξη μηχανοποιημένων μεθόδων διάνοιξης με σκοπό να εναρμονιστεί η ονοματολογία που εφαρμόζεται στις απλούστερες μεθόδους.

Το σχήμα 3.2.2.1 που ακολουθεί παρουσιάζει αυτή τη κατάταξη. Ο πίνακας διαχωρίζει τη κατάταξη σε ομάδες μηχανημάτων σε προκαταρκτικό στάδιο σε είδη ανάλογα με την άμεση υποστήριξη που προσφέρουν στο μέτωπο και στα τοιχώματα της σήραγγας (καμία υποστήριξη, περιφερειακή υποστήριξη, περιφερειακή και εμπρόσθια υποστήριξη). Προκειμένου να δοθούν περισσότερες λεπτομέρειες πάνω στα διάφορα είδη μεθόδων οι αρχικές ομάδες διαχωρίζονται σε επιπλέον κατηγορίες και είδη.



**Σχήμα 3.2.2.1: Κατάταξη μηχανοποιημένων μεθόδων διάνοιξης σηράγγων (AFTES,2000)  
Πηγή: TBM and Lining Essential Interfaces-Nguyen Duc Toan (Politenico di Torino)**

Από το σχήμα 3.2.2.1 διάφορες μηχανοποιημένες μέθοδοι είναι δυνατό να επανακαταθούν με μερικούς σχετικούς ορισμούς που παρέχονται παρακάτω:

- Μηχανήματα τα οποία δε προσφέρουν άμεση υποστήριξη
  - Γεωτρύπανα και μηχανήματα τύπου Roadheader
  - Συμβατικά εκσκαπτικά μηχανήματα
  - TBM για σκληρούς βράχους (Hard rock TBM)
- Μηχανήματα τα οποία προσφέρουν άμεση, περιφερειακή υποστήριξη
  - Ασπιδοφόρο TBM ανοικτού μετώπου με αρπάγες (Open-face gripper shield TBM)
  - Ασπιδοφόρο TBM ανοικτού μετώπου (Open-face shield TBM)
  - TBM διπλής ασπίδας (Double shield TBM)
- Μηχανήματα τα οποία προσφέρουν άμεση, περιφερειακή και εμπρόσθια υποστήριξη ταυτόχρονα
  - Μηχανικής υποστήριξης TBM (Mechanical-support TBM)
  - TBM πεπιεσμένου αέρα (Compressed-air TBM)
  - Ασπιδοφόρο TBM πολφού μπετονίτη (Slurry Shield TBM)
  - TBM εξισορρόπησης της πίεσης του εδάφους με ασπίδα (Earth Pressure Balance machine EPB)
  - TBM με ασπίδα μικτού μετώπου (Mixed-face shield TBM)

### 3.2.3 Η μηχανική μέθοδος διάνοιξης σηράγγων κάνοντας χρήση μηχανών ολομέτωπης κοπής TBM (Tunnel Boring Machine)

Η μηχανική μέθοδος διάνοιξης σηράγγων κάνοντας χρήση μηχανών ολομέτωπης κοπής TBM (Tunnel Boring Machine) γνωρίζει σήμερα τεράστια επιτυχία ανά τον κόσμο. Αυτό γίνεται φανερό από το γεγονός ότι αποτελεί πλέον μία από τις πρώτες επιλογές για τη διάνοιξη σηράγγων μεγάλου μήκους (συνήθως ελάχιστο ωφέλιμο μήκος σήραγγας μεγαλύτερο του 1 km) σε διάφορες εδαφικές συνθήκες από πολύ σκληρά πετρώματα μέχρι πολύ μαλακούς, εδαφικούς σχηματισμούς. Αυτό οφείλεται κυρίως στα εκτεταμένα πλεονεκτήματα που προσφέρει η μέθοδος και ιδιαίτερα η οικονομική αποδοτικότητα που

προσδίδει στα έργα που έχουν να κάνουν με σήραγγες. Τα σύγχρονα τεχνικά έργα απαιτούν να κατασκευάζονται σήραγγες συνεχώς όλο και μεγαλύτερου μήκους σε διάφορους τύπους εδαφών και για το λόγο αυτό οι κατασκευαστές μηχανών ολομέτωπης κοπής είναι όλο και περισσότερο ικανοί και πρόθυμοι, λόγω και της συνεχώς αποκτούμενης εμπειρίας, να κατασκευάσουν μηχανήματα εξειδικευμένα για τις απαιτήσεις ενός συγκεκριμένου τεχνικού έργου. Αν και παλαιότερα υπήρχε σαφής διαχωρισμός μεταξύ μηχανών ολομέτωπης κοπής για σκληρούς βράχους και για μαλακά εδάφη, υπάρχει πλέον ποικιλία μηχανών που καλύπτει και ενδιάμεσες εδαφικές συνθήκες.

Όπως αναφέραμε παραπάνω η μηχανική μέθοδος διάνοιξης σηράγγων αποτελεί πλέον μια από τις ενδεδειγμένες μεταξύ άλλων μεθόδων εκσκαφής και διάνοιξης. Οι λόγοι για τους οποίους η χρήση TBM πλέον κυριαρχεί, ιδιαίτερα σε σήραγγες που πρόκειται να διανοιχτούν σε αστικό περιβάλλον, έναντι συμβατικών μεθόδων διάνοιξης όπως είναι η Νέα Αυστριακή Μέθοδος (NATM/SATM), η χρήση συμβατικών μέσων και εκρηκτικών (Drill and Blast), Roadheader και λοιπές μέθοδοι, είναι :

- Περιορισμός της διαταραχής των γεωλογικών σχηματισμών γύρω από τη σήραγγα κατά την εκσκαφή και διάνοιξη της σήραγγας
- Λιγότερες διεργασίες υποστήριξης των τοιχωμάτων της σήραγγας
- Σημαντική μείωση του χρόνου εκσκαφής και συνεχή λειτουργία
- Μείωση του κόστους εκσκαφής λόγω της πλήρους εκμηχάνισης αυτής και τήρηση του ορισθέντος χρονοδιαγράμματος
- Βελτίωση των συνθηκών εργασίας κατά τη διάνοιξη
- Αυξημένη ασφάλεια έναντι εργατικών ατυχημάτων
- Εφαρμογή όπου περιβαλλοντικοί, πολιτικοί ή άλλοι λόγοι απαγορεύουν την εφαρμογή άλλης μεθόδου όπως χρήση εκρηκτικών
- Δυνατότητα απομακρυσμένης, αυτοματοποιημένης λειτουργίας

Το πιο σημαντικό ίσως από τα πλεονεκτήματα τα οποία προσφέρει η μέθοδος είναι το πρώτο το οποίο αναφέραμε παραπάνω. Η μικρή διαταραχή στα περιβάλλοντα γεωυλικά γύρω από τη σήραγγα κάνει τη μηχανική διάνοιξη ιδανική για σήραγγες που πρόκειται να κατασκευαστούν σε αστικές περιοχές σε μικρά κυρίως βάθη (αβαθείς σήραγγες). Αυτό προκύπτει από την απαίτηση να μην επηρεαστεί το επιφανειακό στρώμα στο οποίο λαμβάνει χώρα κάθε ανθρώπινη δραστηριότητα (κατασκευαστική ή μη) το οποίο είναι εν γένει ευαίσθητο σε θέματα καθιζήσεων. Περιπτώσεις στις οποίες η μηχανική μέθοδος διάνοιξης δεν υπερτερεί έναντι των συμβατικών μεθόδων είναι οι εξής:

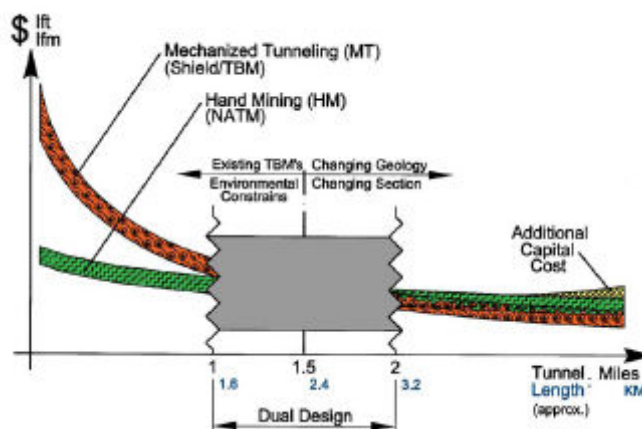
- Η γεωμετρία της διατομής ξεφεύγει από τα πλαίσια της κυκλικής συνεπώς τα μηχανήματα TBM που προορίζονται για τυποποιημένες κυκλικές διατομές δεν είναι κατάλληλα
- Το μήκος της σήραγγας είναι σχετικά μικρό συνεπώς το κόστος του μηχανολογικού εξοπλισμού που χρησιμοποιείται στις συμβατικές μεθόδους είναι χαμηλότερο από αυτό για την αγορά και χρήση ενός TBM
- Εξαιρετικές περιπτώσεις ακραίων γεωλογικών συνθηκών όπου το μηχάνημα TBM δεν είναι τόσο ευέλικτο ώστε να ανταποκριθεί σε αυτές

Στο παρακάτω σχήμα 3.2.3.1 παρουσιάζεται μια άλλη σύγκριση μεταξύ των συμβατικών μεθόδων εκσκαφής και της χρήση μηχανημάτων TBM σε κατασκευαστικούς και λειτουργικούς όρους.

Item no.	Phase	Assessment criteria	Shotcrete tunnelling method	TBM
1		Supporting agent in face zone	variable	safer
2		Lining thickness	variable	constant
3		Safety of the tunneling crews	lower	higher
4		Working and health protection	lower	higher
5		Degree of mechanization	limited	high
6	Construction phase	Degree of standardization	conditional	high
7		Danger of break	higher	lower
8		Construction time - short tunnel	shorter	longer
9		Construction time - long tunnel	longer	shorter
10		Construction cost - short tunnel	lower	higher
11		Construction cost - long tunnel	higher	lower
12		Tunnel cross-section	variable	constant
13	Operational phase	Cross-section form	as desired	generally circular
14		Degree of utilization of the drive-related tunnel cross-sections	generally higher	generally lower

**Σχήμα 3.2.3.1: Σύγκριση μεταξύ κύριων κριτηρίων ανάμεσα στις συμβατικές μεθόδους και τη χρήση μηχανήματος TBM**  
**Πηγή: A. Haack, 1996**

Αναφορικά με το κόστος, μεταξύ συμβατικών μεθόδων διάνοιξης σηράγγων και της μηχανοποιημένης μεθόδου με χρήση TBM, το παρακάτω διάγραμμα (σχήμα 3.2.3.2) παρουσιάζει πως για περιπτώσεις σηράγγων μικρότερες από 2.4 km, αλλαγές στη γεωμετρία της διατομής, συνεχώς μεταβαλλόμενες γεωτεχνικές συνθήκες οι συμβατικές μέθοδοι διάνοιξης σηράγγων είναι οικονομικά πιο συμφέρουσες από τη χρήση TBM. Διακρίνεται επίσης μια περιοχή όπου οι δυο αυτές κύριες μέθοδοι είναι ισοδύναμες, και είναι δυνατό να θεωρούνται εξίσου ικανές για τη διάνοιξη, και μια περιοχή όπου συνίσταται σχεδιασμός ο οποίος περιλαμβάνει και τις δύο μεθόδους. Για σήραγγες, των οποίων το μήκος ξεπερνά τα 3.2 km το κόστος της μηχανοποιημένης μεθόδου εκσκαφής παρουσιάζεται μικρότερο από αυτό της συμβατικής.



**Σχήμα 3.2.3.2 : Κόστος διάνοιξης Μηχανοποιημένης έναντι Συμβατικής μεθόδου συναρτήσει του μήκους της σήραγγας (Sauer, 2004)**  
**Πηγή: TBM and Lining Essential Interfaces-Nguyen Duc Toan (Politenico di Torino)**



### 3.2.4 Σχεδιασμός

Ένα οποιοδήποτε τεχνικό έργο που περιλαμβάνει τη κατασκευή σηράγγων, σε αστική ή μη περιοχή, απαιτεί τα εξής βήματα στη προετοιμασία και το σχεδιασμό. Τα βήματα αυτά είναι τα εξής:

- Επιλογή ενός συστήματος διάνοιξης σηράγγων που είναι κατάλληλο και συμβατό με το δοθέν εδαφικό προφίλ και τους γεωλογικούς σχηματισμούς
- Ανάλυση του κόστους και των κινδύνων για να καθορίσουμε τη βέλτιστη επιλογή σε περιπτώσεις όπου περισσότερες από μια μεθόδους μπορούν να εφαρμοστούν
- Λεπτομερής εξέταση και σχεδιασμός της σήραγγας που περιλαμβάνει:
  1. Ανάλυση των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών των γεωλογικών σχηματισμών που βρίσκονται στο περιβάλλον της σήραγγας όπως η αντοχή και η παραμορφωσιμότητα των γεωλικών
  2. Το καθεστώς των υπογείων νερών στο περιβάλλον της σήραγγας όπως η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα και η διαπερατότητα των σχηματισμών
  3. Οι γεωμορφολογικές συνθήκες
  4. Η ύπαρξη και εκτίμηση εξωτερικών φορτίων που επηρεάζουν τη σήραγγα
  5. Η επιλογή μέτρων για να ελέγξουμε τη συμπεριφορά των σχηματισμών όπως τεχνικές βελτίωσης του εδαφικού profile και την αλληλεπίδραση που θα έχουν με την κατασκευή

Ιδιαίτερα στις αστικές περιοχές ένας παράγοντας που παίζει πάρα πολύ σημαντικό ρόλο, όπως προαναφέραμε, είναι η ύπαρξη κτιριακών εγκαταστάσεων, κατασκευών, έργων οδοποιίας κλπ που βρίσκονται στην εδαφική επιφάνεια και το κατά πόσο αυτές είναι ευαίσθητες σε ενδεχόμενες καθιζήσεις, κάνοντας την ευστάθεια της σήραγγας και τη παραμορφωσιμότητα των σχηματισμών παράγοντες κρίσιμης σημασίας για το σχεδιασμό του τεχνικού έργου.

Οι μεταβολές και διαφοροποιήσεις των γεωτεχνικών και γεωμορφολογικών συνθηκών από τμήμα σε τμήμα του τεχνικού μας έργου είναι ένας ακόμα σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την επιλογή της μεθόδου διάνοιξης, καθώς θα πρέπει να είναι ευέλικτη και να προσαρμόζεται εύκολα στις εναλλαγές των γεωλογικών σχηματισμών.

Πιο συγκεκριμένα για τη μέθοδο της μηχανικής διάνοιξης σηράγγων και την εκλογή του σωστού μηχανήματος για τη πραγματοποίηση αυτής, η γνώση της γεωλογίας της περιοχής ενδιαφέροντος για το τεχνικό έργο μας είναι πολύ σημαντική και για το λόγο αυτό πραγματοποιούνται δειγματοληπτικές γεωτρήσεις, δοκιμές πρεσσιομέτρων, δοκιμές διείσδυσης (SPT,CPT), γεωφυσική έρευνα, εργαστηριακές δοκιμές κλπ προκειμένου αυτή να προσδιοριστεί.

Για τις σήραγγες που πρόκειται να διανοιχτούν σε βραχώδεις σχηματισμούς είναι πολύ σημαντικό να γνωρίζουμε:

- Τη θλιπτική, εφελκυστική και διατμητική αντοχή του βράχου
- Την ύπαρξη μεμονωμένων ή οικογενειών ασυνεχειών, τη τραχύτητα των διεπιφανειών και το υλικό πλήρωσης αυτών
- Το βαθμό αποσάθρωσης και διάβρωσης αυτού
- Την ορυκτολογική σύσταση αυτού

Τα μηχανήματα ολομέτωπης κοπής που είναι ικανά να λειτουργήσουν σε πετρώματα διακρίνονται σε μηχανές ολομέτωπης κοπής ανοικτού τύπου ( Open ή Gripper TBMs) και σε μηχανές με ασπίδα ( απλής ή διπλής τηλεσκοπικής).

Αντίστοιχα για τους μαλακούς, εδαφικούς σχηματισμούς είναι σημαντικό να γνωρίζουμε:

- Τις κοκκομετρικές καμπύλες τους
- Τη γωνία τριβής και τη συνοχή
- Τη θλιπτική και διατμητική αντοχή
- Το πορώδες
- Τη πλασιμότητα του εδάφους
- Το γεγονός αν διογκείται ή όχι
- Η διαπερατότητα του γεωυλικού

Τα μηχανήματα που είναι ικανά να λειτουργήσουν σε εδαφικούς σχηματισμούς διακρίνονται σε κλειστού τύπου ολομέτωπης κοπής με ασπίδα εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης ( Earth-Pressure-Balance Shield/EPB Shield) και σε μικτές ολομέτωπης κοπής με ασπίδα ( Mixshield TBMs) , οι οποίες αποτελούν συνδυασμό των EPB Shield με τις ασπιδοφόρες μηχανές πολφού ( Slurry Shield TBMs). Το καθεστώς νερού στο περιβάλλον της σήραγγας είναι σημαντικό για οποιοδήποτε τύπο γεωυλικού όπως έχουμε αναφέρει και παραπάνω.

Η γνώση όλων των παραπάνω παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην επιλογή του σωστού μηχανήματος TBM καθώς επηρεάζει τεχνικές και κατασκευαστικές λεπτομέρειες όπως για παράδειγμα την ευστάθεια του μετώπου, τα μέτρα υποστήριξης του μετώπου, πιθανή επιφανειακή καθίζηση, τη τριβή μεταξύ του μηχανήματος και των τοιχωμάτων της σήραγγας, παραμορφώσεις του περιβάλλοντος σχηματισμού κλπ. Σημαντική είναι επίσης η διεύθυνση της σήραγγας. Το επιλεχθέν TBM πρέπει να σχεδιαστεί και να κατασκευαστεί ώστε να ικανοποιεί τη κατακόρυφη και οριζόντια προτεινόμενη διεύθυνση λαμβάνοντας υπόψη την ελάχιστη ακτίνα καμπυλότητας και τη μέγιστη κλίση. Τα περισσότερα TBM ικανοποιούν την απαίτηση για καμπυλότητες με ακτίνα μεγαλύτερη των 300m. Εν συνεχεία υπόψη λαμβάνουμε τη διάμετρο της σήραγγας που θέλουμε να διανοίξουμε. Οι περισσότεροι τύποι TBM είναι διαθέσιμοι για διατομές μεγάλης διαμέτρου αλλά για μικρές διαμέτρους η διαθεσιμότητα μπορεί να περιορίζεται. Οι επί τόπου περιορισμοί επίσης συμβάλλουν στην εκλογή του μηχανήματος. Η βαρύτητα του συγκεκριμένου παράγοντα είναι ιδιαίτερη σε βαριά αστικά περιβάλλοντα όπου υπάρχουν περιορισμοί τόσο χωρικοί όσο και πρόσβασης. Οι μηχανισμοί που εμπλέκονται για να παραδοθεί, να συναρμολογηθεί και να λειτουργήσει, καθώς και να απομακρυνθεί από τη κατασκευασμένη πλέον σήραγγα, έχουν αντίκτυπο στην επιλογή που θα πραγματοποιηθεί. Η ανάκτηση ή όχι του μηχανήματος για επαναπώληση ή επαναχρησιμοποίηση έχει σημαντική οικονομική επιρροή. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν ως προς την εκλογή του μηχανήματος είναι η τοπική εμπειρία και διαθεσιμότητα προσωπικού έμπειρου στη χρήση ενός μηχανήματος TBM καθώς και το χρονικό πλαίσιο στο οποίο πρέπει να ολοκληρωθεί το έργο. Ιδιαίτερα σε τεχνικά έργα μεγάλης κλίμακας η εκλογή, ο σχεδιασμός και η διάθεση του TBM για λειτουργία σε πρώιμο στάδιο ενδέχεται να έχει πολύ σημαντικά οφέλη.

### 3.2.5 Τύποι μηχανών ολομέτωπης κοπής TBM

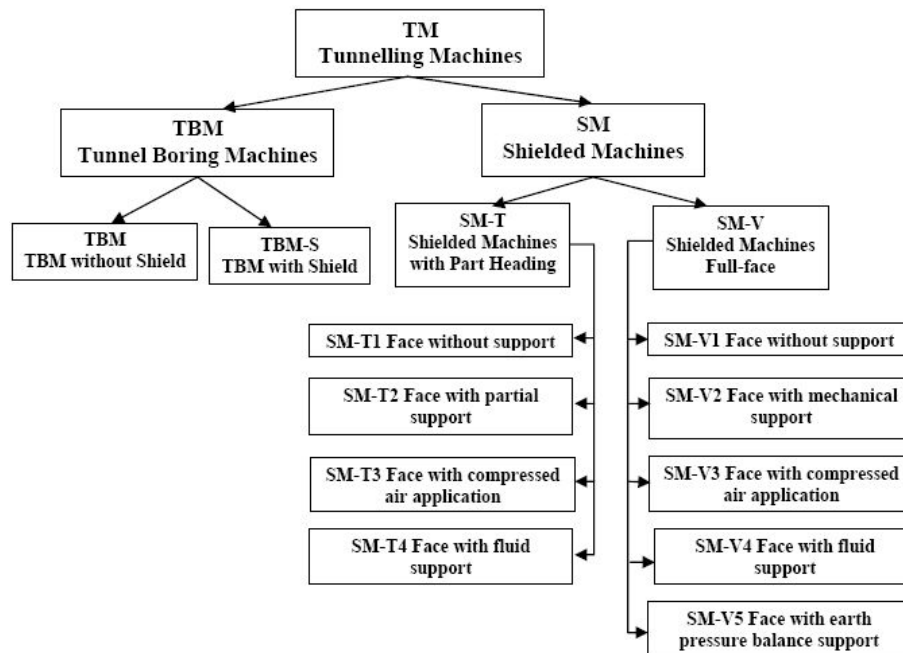
Ένα TBM είναι ένα πολυσύνθετο κομμάτι τεχνολογικού εξοπλισμού το οποίο επικαλείται να εκσκάψει τη σήραγγα. Ένα μηχανήμα TBM περιλαμβάνει κάποια βασικά στοιχεία τα οποία είναι η κεφαλή κοπής (cutterhead), η οποία διαθέτει κοπτικά εργαλεία και κάδους, συστήματα παροχής ενέργειας, παραγωγής περιστροφικής κίνησης και εμπρόσθιας ώθησης της κοπτικής κεφαλής, συστήματα υποστήριξης του μηχανήματος TBM κατά την εκσκαφή, εξοπλισμό για την εγκατάσταση υποστήριξης του εδάφους, ασπίδα για τη προστασία του εργατικού προσωπικού και ένα κατευθυντήριο σύστημα. Συστήματα υποστηρικτικού

εξοπλισμού παρέχουν μεταφορά του εκσκαφέντος εδαφικού υλικού, του προσωπικού και υλικού εξοπλισμού, εξαερισμό κλπ.

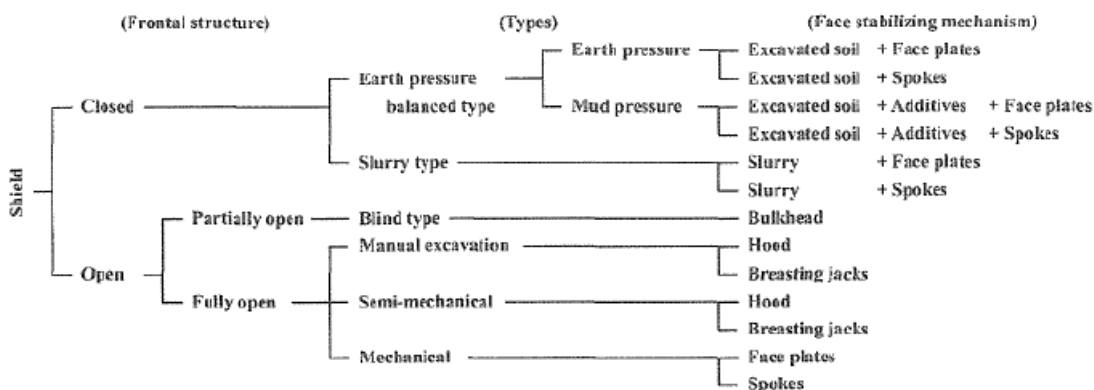
Μια λίστα με τα σημαντικότερα συνθετικά στοιχεία παρουσιάζεται παρακάτω:

- Εμπρόσθιο μέτωπο όπου το γεωυλικό εκσκάπτεται με ειδικά εργαλεία (κεφαλή κοπής (cutterhead))
- Κατευθυντήριος μηχανισμός με μηχανές παραγωγής εμπρόσθιας κίνησης
- Μηχανισμός ελέγχου εκτροπής και απόκλισης
- Εγκατάσταση απομάκρυνσης για τη μεταφορά του εκσκαφέντος υλικού διαμέσου του μηχανήματος σε ένα διαχωριστή ή απευθείας σε ένα ανεξάρτητο σύστημα μεταφοράς
- Εγκαταστάσεις πίσω από το θάλαμο εργασίας οι οποίες επιτρέπουν είτε επιτρέπουν βελτιώσεις των γεωυλικών του μετώπου (πχ σύστημα τσιμεντενέσεων, εκτοξευόμενου σκυροδέματος κλπ) είτε χρησιμοποιούνται για προκαταρκτικές, ερευνητικές διεργασίες
- Υποστηρικτικές εγκαταστάσεις κάτω από τη προστασία της ασπίδας
- Μηχανισμοί ενεμάτωσης του κενού που δημιουργείται από την ευθυγραμμία της ασπίδας και του υπεδάφους

Επιπρόσθετα, πέρα από τη προαναφερθείσα τεχνική κατάταξη των μηχανών εκσκαφής από την AFTES, υπάρχουν και διάφορες εθνικές κατατάξεις όπως είναι η DAUB (η Γερμανική Επιτροπή για τις Υπόγειες Κατασκευές), όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 3.2.5.1, η Ιαπωνική Κοινότητα Πολιτικών Μηχανικών (Japan Society of Civil Engineers-JSCE), που παρουσιάζεται στο σχήμα 3.2.5.2, η Ιταλική Ένωση Σηράγγων (Italian Tunneling Association) κλπ.



**Σχήμα 3.2.5.1 : Κατάταξη μηχανών διάνοιξης σηράγγων (DAUB)**  
 Πηγή: *TBM and Lining Essential Interfaces-Nguyen Duc Toan (Politenico di Torino)*



**Σχήμα 3.2.5.2: Κατάταξη μηχανών διάνοιξης σηράγγων με ασπίδα (JSCE,1996)**  
**Πηγή: TBM and Lining Essential Interfaces-Nguyen Duc Toan (Politenico di Torino)**

Πέρα από τις εθνικές οργανώσεις ορισμένες εταιρείες που δραστηριοποιούνται στο συγκεκριμένο τομέα είτε μεμονωμένα άτομα έχουν επίσης προχωρήσει στο διαχωρισμό και τη κατάταξη των μηχανημάτων. Παρακάτω ακολουθεί μια κατηγοριοποίηση κατά τον Rehm (2006) για τα μηχανήματα TBM:

- Υδραυλική ασπίδα/Μικτή ασπίδα (Hydroshield/Mixshield)
- EPB με ασπίδα
- TBM για σκληρούς βράχους, τα οποία διαχωρίζονται σε μονής ή διπλής ασπίδας μηχανήματα και μηχανήμα με αρπάγες και ασπίδα (Single/Double shield & Gripper shield)
- Μηχάνημα με ασπίδα με μερική εκσκαφή του μετώπου
- Μίκρο-μηχανές (Micromachines)

Η εταιρεία Herrenknecht AG έχει προχωρήσει σε κατάταξη των μηχανημάτων που κατασκευάζει βάσει των διαμέτρων τους. Ο παρών διαχωρισμός παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα 3.2.5.3.

Diameter		0mm -> 1,000mm	-> 2,000mm	-> 16,000mm
	Auger Drilling Machines	DN 150 – DN 800		
	AVN Micromachines	DN 250 – DN 2000		
	Pipe Jacking		DN 1200 – DN 3500	
	Segmental Lining		DN 1800 – DA 12000	
	Pipe Jacking		DN 1200 – DN 3000	
	Segmental Lining		DN 1800 – DA 16000	
	Pipe Jacking		DN 1600 – DN 3000	
	Segmental Lining		DN 1800 – DA 15060	
	Hard Rock-TBM		DN 1200 – DA 12500	
	Hard Rock Gripper-TBM			DN 2200 – DN 10000

**Σχήμα 3.2.5.3: Κατάταξη μηχανών διάνοιξης σηράγγων TBM βάσει της διαμέτρου τους**  
**Πηγή: Herrenknecht**

Μία ακόμη κατηγοριοποίηση για μηχανήματα TBM και καταστάσεις λειτουργίας (Grandori, 2006) παρουσιάζονται στο σχήμα 3.2.5.4 που ακολουθεί.

TBM TYPES AND OPERATIONAL MODES- RESUMING TABLE																			
		TBM TYPES																	
		GRIPPER TYPE			DOUBLE SHIELD			DSU			SINGLE SHIELD			EPB SHIELD			SLURRY SHIELD		
		CAPABILITY	EFFICIENCY	NOTES	CAPABILITY	EFFICIENCY	NOTES	CAPABILITY	EFFICIENCY	NOTES	CAPABILITY	EFFICIENCY	NOTES	CAPABILITY	EFFICIENCY	NOTES	CAPABILITY	EFFICIENCY	NOTES
		a)			a)			a)			a)			a)			a)		
OPEN MODE	Grippers and NATM support	YES	5		YES	3		YES	4	b)	NO			NO			NO		
TELESCOPIC MODE	Telescopic mode and segmental lining	NO			YES	4		YES	5		NO			NO			NO		
SINGLE SHIELD OPEN MODE	Excav. & segmental lining installation in separate phases	NO			YES	3		YES	4		YES	5		YES	4		NO		
FACE SUPPORT MODE	Pretreatment of the face with forepiling/piles and grouting	YES	3		YES	4		YES	5	b)	YES	3		YES	3		YES	2	
SINGLE SHIELD CLOSE MODE	Face support by pressurised muck/slurry in the working chamber	NO			NO			YES	4	b)	NO			YES	5		YES	5	

Notes  
a) Efficiencies of the different TBM types to operated in the different operational modes are rated 1 to 5  
b) Single shield and DSU TBMs can be configured with some modifications inside the tunnel to work in EPB mode

DSU = Double Shield Universal TBM

**Σχήμα 3.2.5.4: Τύποι μηχανημάτων TBM και καταστάσεις λειτουργίας**  
**Πηγή: TBM and Lining Essential Interfaces-Nguyen Duc Toan (Politenico di Torino)**

Οι μηχανικές εκσκαπτικές μέθοδοι που χρησιμοποιούν μηχανές ολομέτωπης κοπής TBM είναι δυνατό να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες (Pelizza, 2006) :

- Συνεχής, μηχανοποιημένη μέθοδος εκσκαφής πλήρως μετώπου χρησιμοποιώντας μηχανήματα TBM σε σήραγγες σε βράχο. Το κύριο πρόβλημα είναι η εκσκαψιμότητα του σκληρού βράχου.
- Συνεχής, μηχανοποιημένη μέθοδος εκσκαφής χρησιμοποιώντας μηχανήματα TBM με ασπίδα και επιβολή πίεσης στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας σε εδάφη με τον υδροφόρο ορίζοντα πάνω ή κάτω από αυτό. Το κύριο πρόβλημα είναι η ευστάθεια του μετώπου καθώς επίσης ο έλεγχος των υπογείων υδάτων.

Τόσο τα TBM σε σκληρούς βράχους όσο και τα ασπιδοφόρα TBM σε μαλακούς σχηματισμούς πρέπει να ικανοποιούν τους ίδιους σκοπούς:

- Η διασφάλιση συστηματικής και αυτοματοποιημένης εκσκαφής
- Διασφάλιση επαρκούς ασφαλείας για το εργατικό δυναμικό
- Διασφάλιση της ευστάθειας του μετώπου και των περιφερειακών τοιχωμάτων της σήραγγας
- Μεταφορά του εκσκαφέντος υλικού

### 3.2.6 Λειτουργία των μηχανημάτων ολομέτωπης κοπής TBM

Γενικά η κατασκευή σηράγγων κάνοντας χρήση ενός μηχανήματος TBM περιλαμβάνει τρεις κύριες διεργασίες:

- Εκσκαφή
- Απομάκρυνση του εκσκαφέντος υλικού
- Υποστήριξη της σήραγγας

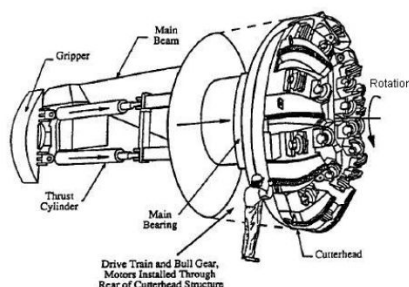
Οι βασικές προδιαγραφές ενός μηχανήματος TBM περιλαμβάνουν:

- Τη διάμετρο της ασπίδας
- Το βάρος του μηχανήματος
- Τη μέγιστη ροπή (Το μέγεθος αυτό χρειάζεται για τη περιστροφή της κεφαλής κοπής υπό το καθεστώς μέγιστης εμπρόσθιας ώσης)
- Την εγκατεστημένη ισχύ
- Τη ταχύτητα περιστροφής της κεφαλής κοπής RPM
- Τη δύναμη των αρπάγων
- Τη διεσδυτικότητα του μηχανήματος
- Τη διάμετρο της κεφαλής κοπής
- Τον αριθμό των κοπτικών που βρίσκονται στη κεφαλή κοπής

Ένας βασικός διαχωρισμός ο οποίος εκτελείται είναι αυτός ανάμεσα σε ανοικτού τύπου μηχανές, TBM για σκληρούς βράχους, TBM πούλφου μπετονίτη με ασπίδα και TBM εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης με ασπίδα. Παρακάτω ακολουθεί περιγραφή της λειτουργίας των διαφόρων τύπων TBM.

### 3.2.7 Μηχανήματα TBM για σκληρά πετρώματα (Hard-rock TBM)

Τα μηχανήματα αυτά προορίζονται να διανοίξουν σήραγγες σε σκληρά, βραχώδη υλικά, τα οποία συνήθως έχουν επαρκή χρόνο αυτουποστήριξης μέχρι τη τοποθέτηση της τελικής επένδυσης, και διαθέτουν κοπτικά εργαλεία τα οποία έχουν τη δυνατότητα να σπάνε ακόμα και τους σκληρότερους βράχους. Η εκσκαφή διενεργείται σε συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης και η μεταφορά του εκσκαφέντος υλικού πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας βαγονέτα, φορτηγά ή ιμάντες μεταφοράς ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι φθορές. Ένα τέτοιου είδους μηχανήμα παρουσιάζεται στο σχήμα 3.2.7.1.



**Σχήμα 3.2.7.1: Σχηματική απόδοση ανοικτού τύπου TBM με αρπάγες**  
**Πηγή: TBM and Lining Essential Interfaces-Nguyen Duc Toan (Politenico di Torino)**

Η εφαρμογή των πρότυπων τύπων TBM για σήραγγες μεγάλου μήκους και διαμέτρους για ποικίλες εδαφικές συνθήκες θα ένεχε μεγάλο ρίσκο και πιο συγκεκριμένα :

- TBM ανοικτού τύπου με αρπάγες είναι πολύ ευαίσθητα σε συνθήκες ασθενούς βράχου, ιδιαίτερα σε διατομές μεγάλων διαμέτρων
- TBM μονής ασπίδας δε μπορούν να φτάσουν σε επίπεδα υψηλής αποδοτικότητας σε σκληρούς βράχους και είναι ευαίσθητα σε συμπιεστά εδάφη και αστάθειες του μετώπου εκσκαφής
- TBM διπλής ασπίδας, ενώ μπορούν να επιτύχουν επίπεδα υψηλής αποδοτικότητας σε καλό και ασθενή βράχο, εξακολουθούν να είναι ευαίσθητα σε συμπιεστά εδαφικά υλικά και αστάθειες του μετώπου εκσκαφής

Οι εξαιρετικά δύσκολες γεωλογικές συνθήκες αποτέλεσαν λόγο προκειμένου να αναπτυχθεί ένα νέο είδος TBM το οποίο είναι DSU TBM (Double Shield Universal TBM), το οποίο παρουσιάζεται στο σχήμα 3.2.7.2, το οποίο μπορεί να προσαρμοστεί ώστε να ικανοποιήσει τις εκάστοτε απαιτήσεις ενός τεχνικού έργου και της γεωλογία αυτού.



*Σχήμα 3.2.7.2 : DSU TBM*

*Πηγή: TBM and Lining Essential Interfaces-Nguyen Duc Toan (Politenico di Torino)*

### **3.2.8 Μηχανήματα TBM συμπιεσμένου αέρα (Compressed Air TBM)**

Ένα TBM συμπιεσμένου αέρα (σχήμα 3.2.8.1) μπορεί να διαθέτει είτε ολομέτωπη κεφαλή κοπής είτε εκσκαπτικά μέλη όπως αυτά που διαθέτουν τα συμβατικά εκσκαπτικά μέσα. Η ευστάθεια του μετώπου επιτυγχάνεται υποβάλλοντας στον αέρα στο θάλαμο της κεφαλής σε καθεστώς υψηλών πιέσεων. Το εκσκαφέν υλικό απομακρύνεται συνεχώς ή περιοδικά μέσω ενός συστήματος ανακούφισης της πίεσης, το οποίο παίρνει το υλικό από το θάλαμο μέσα στη σήραγγα.

Είναι δυνατό για το TBM να λειτουργήσει με τη πίεση του αέρα όταν το εδαφικό υλικό είναι σχεδόν αδιαπέρατο από αυτόν. Αυτό είναι πιθανό να συμβαίνει σε σπάνιες περιπτώσεις. Επιπλέον η εφαρμογή και χρήση συμπιεσμένου αέρα ενέχει κινδύνους πχ σε απότομη μείωση της υποστηρικτικής πίεσης λόγω ταχείας μείωσης του αέρα στο θάλαμο κοπής αφού ο αέρας διαφεύγει προς την επιφάνεια του εδάφους διαμέσου των πόρων αυτού είτε από υπερύψωση της εδαφικής μάζας πάνω από την ασπίδα.

Στα πρόσφατα χρόνια χάρη στις τεχνολογικές εξελίξεις ο συγκεκριμένος τύπος TBM δε χρησιμοποιείται συχνά και έχει αντικατασταθεί από τα TBM πολφού μπετονίτη με ασπίδα και τα TBM εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης EPB σε περιπτώσεις διάνοιξης σηράγγων σε ασταθείς εδαφικές συνθήκες.



*Σχήμα 3.2.8.1: TBM συμπιεσμένου αέρα  
Πηγή: AFTES, 2000*

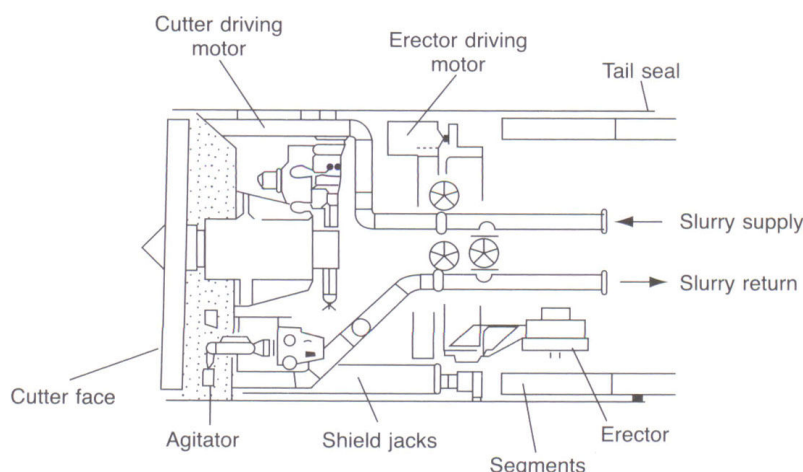
### 3.2.9 Μηχανήματα TBM πολφού μπετονίτη με ασπίδα (Slurry Shield TBM)

Τα μηχανήματα TBM πολφού μπετονίτη με ασπίδα και τα μηχανήματα εξισορρόπησης της πίεσης του εδάφους EPB έχουν αναπτυχθεί τις τελευταίες δεκαετίες καθώς έχουν τη δυνατότητα να ελέγχουν τις ασταθείς συνθήκες του εδαφικού προφίλ προς εκσκαφή σε δύσκολες γεωτεχνικές και υδρογεωλογικές συνθήκες με διάφορους εξωτερικούς περιορισμούς που τίθενται από το εκάστοτε τεχνικό έργο.

Με ένα μηχάνημα πολφού (σχήμα 3.2.9.1) το ασταθές μέτωπο εκσκαφής υποστηρίζεται από ένα υγρό μίγμα μπετονίτη το οποίο τοποθετείται υπό υψηλή πίεση παράγοντας μια ισοδύναμη πίεση έναντι της πίεσης του εδαφικού υλικού. Ένα φίλτρο ανάμεσα στο υπάρχων εδαφικό υλικό και το υγρό μίγμα το αποτρέπει από το να διεισδύσει και να εξαφανιστεί μέσα στο έδαφος. Εξαρτώμενο από τη διαπερατότητα του γεωυλικού, η πυκνότητα και το ιξώδες του υγρού μίγματος ποικίλουν και η πίεση διαμορφώνεται ελέγχοντας τη ταχύτητα διανομής και τη τροφοδοσία του από τις αντλίες.

Η εκσκαφή πραγματοποιείται από μια κυκλική κεφαλή κοπής. Το εκσκαφέν εδαφικό υλικό και ο μπετονίτης που είναι αναμεμιγμένος σε αυτό στη συνέχεια με ειδικές διατάξεις διαχωρίζονται ώστε ο μπετονίτης να ανακυκλωθεί και να επαναχρησιμοποιηθεί.

Ένας τύπος μηχανήματος ο οποίος ανάγεται στο συγκεκριμένο είδος TBM είναι και οι υδραυλικές ασπίδες (Hydroshields). Με την αρχή λειτουργίας να είναι η ίδια με τα μηχανήματα πολφού, η πιο σημαντική διαφορά που υπάρχει μεταξύ των δύο αυτών μηχανημάτων είναι ότι η πίεση υποστήριξης που προέρχεται από το υγρό υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής ελέγχεται από μια διάταξη συμπιεσμένου αέρα.



Σχήμα 3.2.9.1 : Σχηματική απόδοση μηχανήματος TBM πολφού μπετονίτη με ασπίδα  
Πηγή: Principles of operation of a Slurry TBM (Fujita,1989 Mair & Taylor)

### 3.2.10 Μηχανήματα TBM εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης (Earth Pressure Balance machines EPB)

Αντί να χρησιμοποιείται το μίγμα μπετονίτη όπως στα μηχανήματα πολφού, το εκσκαφέν έδαφος στο EPB χρησιμοποιείται ως συστατικό μέρος του υγρού μίγματος και δημιουργεί ένα εδαφικό πολφό. Αυτή η μέθοδος απαιτεί εδαφικό υλικό το οποίο να είναι ομογενές, μαλακό και συνεκτικό.

Εάν το περιεχόμενο σε νερό του εδάφους είναι πολύ χαμηλό ή μικρά σωματίδια από τη κοκκομετρική διαβάθμιση απουσιάζουν, πρέπει να προστεθούν τεχνητά κάνοντας χρήση μπετονίτη, διάφορων πολυμερών, αφρού κλπ (soil conditioning). Στη περίπτωση αυτή η περιβαλλοντική συμβατότητα των υλικών αυτών με το εδαφικό υλικό είναι σημαντικό α λαμβάνεται υπόψη.



Ένα μηχάνημα EPB (σχήμα 3.2.10.1) έχει το τεχνικό πλεονέκτημα συγκρινόμενο με ένα μηχάνημα πολφού (Slurry Shield) ότι δε χρειάζεται εγκατάσταση διαχωρισμού συνεπώς κόστος και εργοταξιακός χώρος για αυτά τα συστήματα δεν υφίσταται στο συγκεκριμένο μηχάνημα.



*Σχήμα 3.2.10.1: Το μεγαλύτερο EPB TBM με διάμετρο 15,20m που χρησιμοποιήθηκε στη Μαδρίτη για τη κατασκευή οδικής σήραγγας  
Πηγή: Herrenknecht*

### **3.2.11 Μηχάνημα TBM μικτών συνθηκών μετώπου με ασπίδα (Mixed face shield TBM/“Universal” TBM)**

Η εξέλιξη της τεχνολογίας έδωσε τη δυνατότητα να σχεδιαστούν μικτού τύπου ευέλικτα μηχανήματα, ικανά να ανταποκριθούν με διαφορετικά (ακόμα και εξαιρετικά ετερογενή) εδαφικά υλικά κατά τη διάρκεια ενός μόνο τεχνικού έργου, τα οποία θα μπορούσαν να λειτουργήσουν τόσο σε μηχανήματα EPB όσο και σαν TBM για σκληρούς βράχους με ορισμένες μετατροπές στη κεφαλή κοπής και στο σύστημα απομάκρυνσης του εκσκαφέντος υλικού. Η μεταβολή από τη μια κατάσταση λειτουργίας στην άλλη απαιτεί μηχανικές παρεμβάσεις για να αλλάξει η μηχανολογική διάταξη.

Η μεγαλύτερη πρόκληση που απαντά η βιομηχανία κατασκευής σηράγγων σήμερα και στα χρόνια που θα έρθουν σχετίζεται με το σχεδιασμό μηχανημάτων TBM μεγάλων διαμέτρων για τη κατασκευή οδικών και σιδηροδρομικών έργων σε δύσκολες γεωλογικές συνθήκες και συνεχείς εναλλαγές βραχώδων και εδαφικών σχηματισμών κάνοντας την ανάπτυξη του συγκεκριμένου τύπου μηχανήματος επιβεβλημένη.

Ένα πράγμα το οποίο αξίζει να σημειωθεί είναι ότι επειδή το μέγεθος του ρίσκου, το οποίο σχετίζεται με τις διάφορες καταστάσεις της βραχώμαζας, είναι μεγάλο αναπτύχθηκε ένας νέος τύπος μηχανήματος TBM μικτού μετώπου με διπλή ασπίδα (Double Shield Universal TBM-DSU TBM). Παρόλα αυτά τα DSU TBMs ενδέχεται να είναι αντιοικονομικά όπου απαιτείται συστηματική «φροντίδα» του μετώπου εκσκαφής σε όλο σχεδόν το μήκος της σήραγγας. Στη περίπτωση αυτή η χρήση ενός EPB TBM εξοπλισμένο με ειδικά συστήματα θραύσεως και εφαρμογής πρόσθετων (πολυμερή, αφρό κλπ) ενδεχομένως να αποτελεί καλύτερη οικονομικά λύση.

### **3.2.12 Αποδοτικότητα της μεθόδου διάνοιξης με TBM**

Ορισμένες από τις πιο σημαντικές παραμέτρους για τον έλεγχο της λειτουργίας μιας μηχανής TBM είναι ο ρυθμός προχώρησης (advance rate AR), ο ρυθμός κοπής ή διείσδυσης (Penetration rate PR) και ο βαθμός χρησιμοποίησης του (utilization U). Οι ποικίλες και ευμετάβλητες γεωλογικές συνθήκες επηρεάζουν άμεσα το χρόνο στον οποίο θα ολοκληρωθεί το τεχνικό έργο καθώς και τον ενδεχόμενο χρόνο καθυστερήσεων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα

τη μείωση του ποσοστού χρησιμοποίησης του TBM και του ρυθμού προχώρησης που μπορεί να επιτευχθεί με αρνητικές συνέπειες ως προς το οικονομικές εκφάνσεις του έργου. Ακόμα και σε πολύ καλής ποιότητας πετρώματα ο ρυθμός προχώρησης AR είναι συγκριτικά μικρότερος από το ρυθμό κοπής PR ενώ ο βαθμός χρησιμοποίησης U συνήθως κινείται μεταξύ του 30-50%. Αυτό συμβαίνει λόγω των συνήθων εργασιών συντήρησης του μηχανήματος. Σε βραχώμαζες πτωχές σε ποιότητα ο ρυθμός κοπής μπορεί να είναι αρκετά υψηλός. Αρνητικό του γεγονότος αυτού όμως αποτελεί η ανάγκη για υποστήριξη του γεωυλικού που έχει σα συνέπεια το μικρό ρυθμό προχώρησης και σε βαθμό χρησιμοποίησης του 5 ή 10% ή λιγότερο.

Για τη περιγραφή της απόδοσης του μηχανήματος έχουν διατυπωθεί διάφορες σχέσεις που συνδυάζουν το ρυθμό κοπής με τις παραμέτρους της βραχώμαζας, όπως την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη ή εφελκυσμό, τη σκληρότητα του γεωυλικού κλπ, παρουσιάζοντας μάλιστα ικανοποιητικά αποτελέσματα σε περιπτώσεις όπως ομοιογενών και ελαφρά ρωγματομένων πετρωμάτων όπως το μοντέλο εκτίμησης της Σχολής Μεταλλείων του Colorado των Η.Π.Α. σύμφωνα με το οποίο ο ρυθμός κοπής και ο βαθμός χρησιμοποίησης υπολογίζονται μέσω της ισορροπίας δυνάμεων, σχετίζοντας τη γεωμετρία κοπής και την αντοχή μονοαξονικής θλίψης και εφελκυσμού του άρρηκτου πετρώματος.

Σε ρωγματομένα πετρώματα η παρουσία των ασυνεχειών μειώνει την αντοχή της βραχώμαζας και έτσι αυξάνεται ο ρυθμός κοπής για συγκεκριμένο TBM. Οι εξισώσεις εκτίμησης της απόδοσης θα πρέπει να βασίζονται στις ιδιότητες της βραχώμαζας, για παράδειγμα θα πρέπει να συσχετίζουν την απόδοση του TBM με την αντοχή της όπως υπολογίζεται από τυποποιημένες γεωμηχανικές κατηγοριοποιήσεις.

Ο Barton πρότεινε βάσει αυτών μια διευρυμένη εκδοχή του συστήματος Q. Εισήγαγε επιπλέον παραμέτρους σχετικά με το πέτρωμα, το μηχάνημα και τη μάζα του πετρώματος, έτσι ώστε να υπολογίζεται η κατάσταση του πετρώματος και η αντίστοιχη συμπεριφορά του TBM σε σχέση με αυτό. Από τη διαδικασία αυτή προέκυψε το σύστημα  $Q_{TBM}$ . Χάρη στο σύστημα αυτό έγινε δυνατός ο υπολογισμός των ρυθμών κοπής και προχώρησης για ένα πολύ μεγάλο εύρος γεωλογικών συνθηκών. Η σχέση που προκύπτει είναι η παρακάτω:

$$Q_{TBM} = Q_o \frac{SIGMA}{F^{10}} \frac{20}{20^9} \frac{q}{CLI} \frac{\sigma_{\theta}}{20 \cdot 5}$$

Όπου :

- $Q_o$  : ο δείκτης της μάζας του πετρώματος υπολογιζόμενος σύμφωνα με το αρχικό σύστημα ταξινόμησης Q
- SIGMA : η μονοαξονική αντοχή σε MPa
- F : ο μέσος όρος φορτίου των κοπτικών (tnf)
- CLI : ο χρόνος ζωής του κοπτικού
- q : το ποσοστό του χαλαζία σε ποσοστό επί τοις εκατό
- $\sigma_{\theta}$  : η μέγιστη εφαπτομενική τάση στο πέτρωμα, υπολογισμένη με αναλυτικές ή αριθμητικές μεθόδους

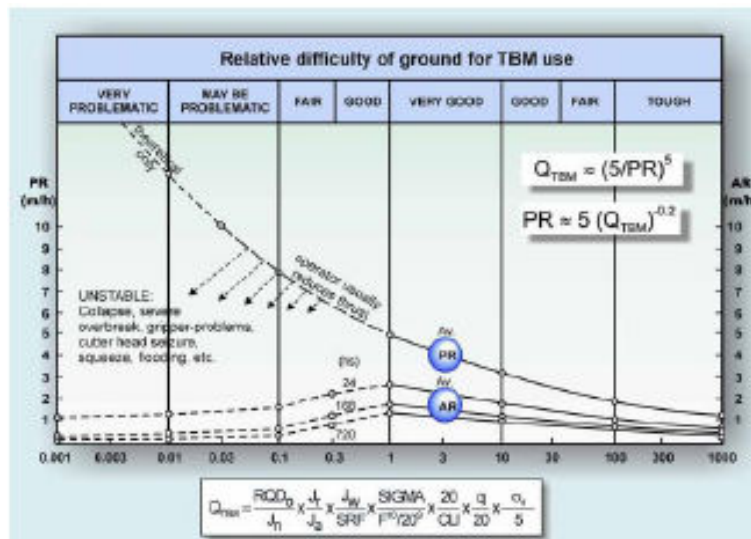
Στη συνέχεια θεωρώντας το χρόνο ολοκλήρωσης T σε διάνοιξη της σήραγγας μήκους L και εκθέτη m, που εκφράζει τη μείωση του μέσου όρου του ρυθμού προχώρησης καθώς η μονάδα του χρόνου αυξάνει, ο ρυθμός προχώρησης προκύπτει:

$$AR = PR * T^m$$

Όπου η διορθωμένη παράμετρος m υπολογίζεται από τη σχέση :

$$m = m_1 \left(\frac{20}{CLI}\right)^{0,15} \left(\frac{q}{20}\right)^{0,10} \left(\frac{n}{2}\right)^{0,05}$$

Όπου n το πορώδες του πετρώματος και m<sub>1</sub> η αρχική παράμετρος μείωσης του ρυθμού προχώρησης με το χρόνο σχετιζόμενη με το δείκτη Q. Για την εφαρμογή του δείκτη Q<sub>TBM</sub>, προτείνεται από τον Barton το σχήμα 3.2.12.1, σύμφωνα με το οποίο εκτιμούνται ο ρυθμός κοπής και προχώρησης του μηχανήματος.



Σχήμα 3.2.12.1: Συσχέτιση του ρυθμού κοπής και του ρυθμού προχώρησης με το δείκτη Q<sub>TBM</sub>  
 Πηγή: TBM and Lining Essential Interfaces-Nguyen Duc Toan (Politenico di Torino)

Αντί των παραπάνω για τον υπολογισμό του ρυθμού κοπής μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση

$$PR = 5 Q_{TBM}^{-0,2}$$

Και αντικαθιστώντας στη σχέση  $AR = PR * T^m$  προκύπτει η τιμή του ρυθμού προχώρησης από τη σχέση:

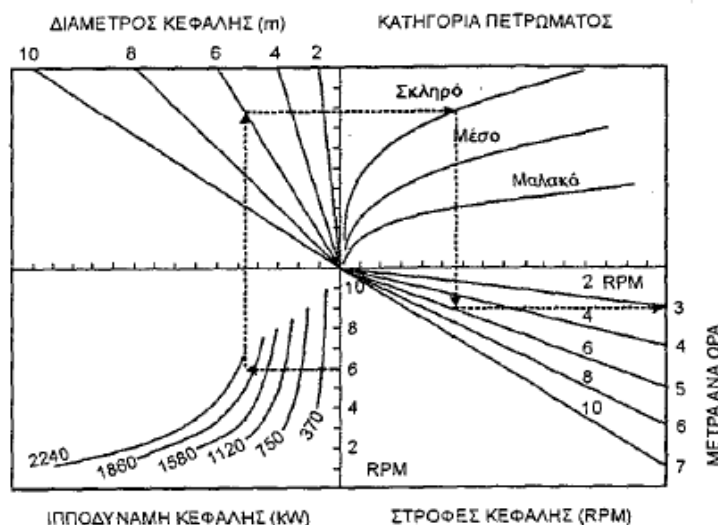
$$AR = 5 Q_{TBM}^{-0,2} * T^m$$

Για την εκτίμηση του βαθμού χρησιμοποίησης του μηχανήματος εφαρμόζεται η σχέση:

$$U = AR/PR$$

Παρά το γεγονός ότι ο Barton εισήγαγε στις σχέσεις υπολογισμού της απόδοσης των μηχανών τα λειτουργικά τους χαρακτηριστικά, το μοντέλο αυτό απέχει από την πραγματικότητα.

Για τον υπολογισμό της απόδοσης των μηχανών ολομέτωπης κοπής TBM η κατασκευάστρια εταιρεία Terratec προτείνει σχετικό νομογράφημα του σχήματος 3.2.12.2.



**Σχήμα 3.2.12.2 :** Διάγραμμα υπολογισμού της απόδοσης των μηχανών ολομέτωπης κοπής  
 Πηγή: Terratec Asia Pacific ([www.terratec.com.au/tbm/performance.html](http://www.terratec.com.au/tbm/performance.html))

Με δεδομένα τις στροφές ανά λεπτό (RPM), την ιπποδύναμη και τη διάμετρο της κεφαλής κοπής καθώς και τη ποιότητα της βραχώμαζας, με αφητηρία τις στροφές ανά λεπτό της κοπτικής κεφαλής χαράσσεται οριζόντια γραμμή προς τα αριστερά μέχρι να τμήσουμε την ιπποδύναμη της κοπτικής κεφαλής. Εν συνεχεία χαράσσουμε κατακόρυφη γραμμή προς τα άνω ως τη διάμετρο της κεφαλής και ακολούθως οριζόντια γραμμή προς τα δεξιά ως την πιο αντιπροσωπευτική τιμή της αντοχής του πετρώματος. Τέλος φέρουμε κατακόρυφη γραμμή προς το κάτω μέρος του νομογραφήματος μέχρι τη τιμή των στροφών ανά λεπτό της κοπτικής κεφαλής που είχαμε επιλέξει στην αρχή και οριζόντια γραμμή προς τα δεξιά ώστε να καθοριστεί η αναμενόμενη απόδοση της μηχανής.

### 3.2.13 Κρίσιμες καταστάσεις και δυσκολίες στη διάνοιξη σηράγγων με μηχανήματα ολομέτωπης κοπής TBM

Το πιο εμφανές και συνηθισμένο πρόβλημα που σχετίζεται με τη διάνοιξη σηράγγων ανεξάρτητα από τη μέθοδο που εφαρμόζεται είναι η φυσική ποικιλότητα του εδάφους. Ο έντονα ανομοιογενής χαρακτήρας του και ανισότροπη συμπεριφορά του από θέση σε θέση έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία προβλημάτων κατά τη διάρκεια της διάνοιξης. Ομοίως, οι κατασκευαστικές μέθοδοι και εγκαταστάσεις που σχετίζονται με μεγάλα τεχνικά έργα και υποδομές ενέχουν σοβαρούς κινδύνους και δυσκολίες. Η διάνοιξη σηράγγων σε αστικές περιοχές υπόκειται σε αυτούς τους περιορισμούς όπως και οποιαδήποτε άλλη επιχείρηση που περιλαμβάνει δημιουργία σηράγγων. Παρόλα αυτά, η διάνοιξη σηράγγων σε αστικές περιοχές διαφέρει καθώς επηρεάζεται από σειρά άλλων δυσκολιών οι οποίες πρέπει να αναγνωριστούν και να λάβουν κατάλληλης διαχείρισης τόσο κατά την ανάλυση και το σχεδιασμό του τεχνικού έργου όσο και κατά τη διάρκεια και φάση κατασκευής του.

Παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν σε πολύ μεγάλο βαθμό την απόδοση ενός TBM είναι η ποιότητα της βραχώμαζας ή του εδαφικού υλικού, τον επιλεγθέντα τύπο μηχανήματος και τη διάμετρο της διατομής της σήραγγας. Οι τεχνολογικές εξελίξεις στο τομέα της ανάπτυξης μηχανημάτων TBM και η αξιοπιστία αυτών οδήγησαν στη διάνοιξη σηράγγων διαμέσου εδαφικών συνθηκών που ιστορικά θεωρούνταν πάρα πολύ δύσκολες. Παρόλα αυτά οι κρισιμότητα της διαδικασίας και οι διάφοροι κίνδυνοι και δυσκολίες που ενέχονται σε αυτή δεν εξαφανίζονται. Κατά τη διάρκεια της εκσκαφής η κατάσταση δύναται να γίνει πολύ κρίσιμη οποιαδήποτε στιγμή.

### 3.2.14 Διαχείριση ρίσκου στη διάνοιξη σηράγγων

Γίνεται αντιληπτό ότι η διαδικασία διάνοιξης σηράγγων ενέχει σημαντικό αριθμό δυσκολιών και ρίσκων. Κάθε σήραγγα αποτελεί ένα μοναδικό τεχνικό έργο λόγω των μοναδικών γεωλογικών και εδαφικών υλικών στο εκάστοτε μέρος όπου είναι επιθυμητό να κατασκευαστεί. Η σωστή επιλογή της κατασκευαστικής μεθόδου με τη κατάλληλη επιλογή του ανθρώπινου δυναμικού που διαθέτει την εμπειρία σε τέτοια τεχνικά έργα είναι κρίσιμο για την επιτυχία της κατασκευής. Παρόλα αυτά ο πιο σημαντικός παράγοντας, όπως προαναφέρθηκε, που είναι η γεωλογία της εκάστοτε περιοχής είναι γνωστή μόνο σε περιορισμένο βαθμό. Οποιοδήποτε ατύχημα ή άλλη απρόοπτη κατάσταση κατά τη διάρκεια της κατασκευής προκαλεί σημαντικές διακοπές και καθυστερήσεις μέχρι την επίλυση των προβλημάτων.

Διάφορα είδη ρίσκων τα οποία περιλαμβάνονται στη διαδικασία διάνοιξης σηράγγων (ITA Guidelines, 2004) είναι τα παρακάτω:

- Σημαντική υπέρβαση κόστους για τη κατασκευή
- Εργοταξιακές καθυστερήσεις που εμποδίζουν την εύρυθμη διαδικασία της κατασκευής
- Περιβαλλοντικές επιπτώσεις του τεχνικού έργου
- Καταρρεύσεις τοιχωμάτων και καταπτώσεις υλικών εντός του χώρου της σήραγγας, απώλεια ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής και άλλες καταστροφές (δυναμικά μεγάλης κλίμακας ατυχήματα κατά τη διάρκεια της κατασκευής)
- Κίνδυνοι δημιουργίας ζημιών έναντι τρίτων προσώπων και των περιουσιών τους σε αστικές περιοχές (ιδιαίτερη ανησυχία υφίσταται κυρίως για κτίρια ιστορικής σημασίας)
- Ενδεχόμενες πληθυσμιακές αντιδράσεις και διαμαρτυρίες έναντι της κατασκευής σηράγγων

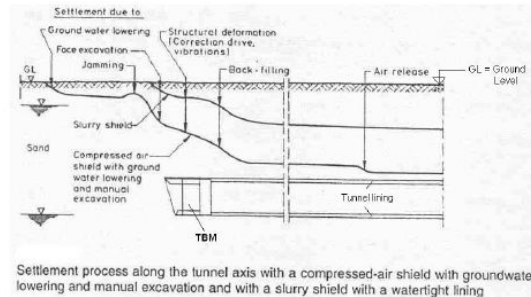
Ο όρος διαχείρισης ρίσκου περιλαμβάνει την αναγνώριση των διάφορων κινδύνων, την ανάλυση, την εκτίμηση και τις διαδικασίες ελέγχου αυτών ώστε να αντιμετωπιστούν με όσο το δυνατόν αποτελεσματικότερο τρόπο. Η διαδικασία αυτή πλέον αποτελεί ρουτίνα σε μεγάλα τεχνικά έργα ανά τον κόσμο. Παραδοσιακά οι εκάστοτε δυναμικά επικίνδυνες καταστάσεις διαχειρίζονταν έμμεσα μέσω των αποφάσεων των μηχανικών κατά τη διάρκεια της κατασκευής. Παρόλα αυτά στη σύγχρονη εποχή διάφοροι διεθνείς και εθνικοί οργανισμοί έχουν προτείνει τεχνικές συστηματικής διαχείρισης των ρίσκων δημιουργώντας ένα πλάνο διαχείρισης (Risk Management Plan-RMP), το οποίο υιοθετούμενο από τα αρχικά στάδια σχεδιασμού έως τη κατασκευή και τη φάση λειτουργίας του έργου είναι δυνατό να αντιμετωπίσει με το πλέον αποδοτικό τρόπο τις περισσότερες καταστάσεις.

### 3.2.15 Κρίσιμες καταστάσεις διάνοιξης σηράγγων σε εδαφικούς σχηματισμούς με χρήση μηχανήματος TBM

Γενικά οι κύριες ανησυχίες, οι οποίες εγείρονται κατά τη διαδικασία διάνοιξης σηράγγων σε εδαφικούς σχηματισμούς, είναι η ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής και γενικότερα των τοιχωμάτων της σήραγγας και ο έλεγχος του πεδίου των καθιζήσεων. Η ενίσχυση και βελτίωση των εδαφικών υλικών μέσω χημικών πρόσθετων (ground conditioning) κατέχει έναν αρκετά σημαντικό ρόλο στη διάνοιξη σηράγγων με χρήση μηχανημάτων ολομέτωπης κοπής TBM, ενώ σε στερεοποιημένες αργίλους η βελτιστοποίηση των τιμών και ποσοτήτων της πίεσης που ασκείται από πολφό ή εκσκαφέντα εδαφικά υλικά είναι κρίσιμης σημασίας της τεχνολογίας των TBM. Σε συνθήκες εδάφους η διάνοιξη σηράγγων αποτελεί ιδιαίτερη πρόκληση καθώς χαρακτηρίζονται από πρόσφατους, ασθενείς, γεωλογικούς σχηματισμούς κοντά στη επιφάνεια, από συνεχόμενες εναλλαγές γεωυλικών (φακοί υλικών, εναλλασσόμενα στρώματα κλπ) και από υδροφόρο ορίζοντα πάνω από τη στέψη της σήραγγας.

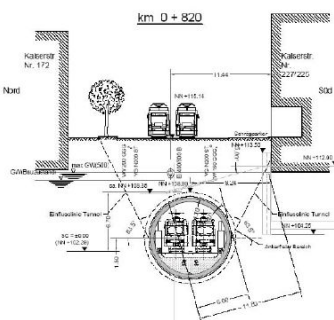
Σε αστικές περιοχές σημεία τα οποία λαμβάνονται σημαντικά υπόψη (Kovari et al, 2004) είναι :

- Το μικρό βάθος υπερκειμένων : Μικρό βάθος υπερκειμένων συνδυαζόμενο με σήραγγες μεγάλης διαμέτρου ενδέχεται να δημιουργεί μεγάλες παραμορφώσεις, κυρίως με την εμφάνιση επιφανειακών καθιζήσεων, και καταρρεύσεις που ενδέχεται να έχουν και επιφανειακές εκφάνσεις όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2.15.1 που ακολουθεί.



**Σχήμα 3.2.15.1 : Εκσκαφή πλήρους μετώπου με TBM σε σήραγγα μικρού βάθους**  
**Πηγή: Maidl et al, 1996**

- Κολλώδης συμπεριφορά του εδαφικού υλικού σε αργιλικά εδάφη (Clogging risk) : Κατά τη διάνοιξη της σήραγγας σε αργιλικούς σχηματισμούς σε μηχανήματα TBM με ασπίδα είναι δυνατό να εμφανιστεί κολλώδης συμπεριφορά των γεωυλικών, ειδικά σε περιπτώσεις όπου εφαρμόζεται σύστημα υποστήριξης του μετώπου υγρού μίγματος ή πολφού. Η συνέπεια είναι δυσκολίες κατά την εκσκαφή, όπου αρχικά παρεμποδίζεται η μεταφορά του υλικού στη κεφαλή κοπής και έπειτα η εκσκαφή και η εξαγωγή αυτού που μπορεί να οδηγήσει ακόμα και σε πλήρη διακοπή της ροής αυτού. Αν το πρόβλημα δε μπορεί να επιλυθεί οδηγεί σε δραστική μείωση της απόδοσης του μηχανήματος λόγω του μικρού βαθμού προώθησης αυτού και των διαδικασιών καθαρισμού των κοπτικών.
- Η ύπαρξη κατασκευών κοντά στο χώρο εκσκαφής : Οι κατασκευές που βρίσκονται πλησίον του χώρου εκσκαφής (σχήμα 3.2.15.2) μπορεί να συνίσταται από κτιριακές εγκαταστάσεις, οδικές οδούς, σιδηροδρομικές οδούς, γέφυρες, υπόγεια δίκτυα υδροδοτήσεως ή αποχετεύσεως, υπόγειοι σιδηρόδρομοι κλπ. Η ευαισθησία αυτών των κατασκευών σε εδαφικές καθιζήσεις καθώς και οι δυνητικές ζημιές λόγω εδαφικής κατάρρευσης ποικίλουν καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα επικινδυνότητας. Η παρατήρηση και καταγραφή της επιφάνειας (Surface Monitoring) είναι θεμελιώδης προκειμένου να ελεγχτούν οι επιδράσεις και οι πιθανές ζημιές σε διάφορες κατασκευές και οικοδομήματα.



**Σχήμα 3.2.15.2 : Επιρροή εκσκαφής με TBM σε γειτονικά κτίρια (Gruebl, 2006)**  
**Πηγή: TBM and Lining Essential Interfaces-Nguyen Duc Toan (Politenico di Torino)**

- Η ύπαρξη ξένων σωμάτων μέσα στο έδαφος : Η παρουσία συχνά κρυμμένων σωμάτων μέσα στο υπέδαφος αποτελεί επίσης προβληματική κατάσταση σε διάνοιξη σηράγγων σε αστική περιοχή με μηχανήματα TBM. Αυτό ενδέχεται να περιλαμβάνει φρέατα, πασσάλους στη θεμελίωση κάποιας κατασκευής, αρχαιολογικά αντικείμενα, εγκαταλελειμμένες υπόγειες εγκαταστάσεις, τεχνητές επιχώσεις κλπ.
- Περιορισμοί στην ευθυγραμμία της σήραγγας : Η επιλογή της κατακόρυφης και οριζοντιογραφικής ευθυγραμμίας της σήραγγας περιέχει κάποιους περιορισμούς. Η σήραγγα διανοίγεται συνήθως κάτω από δημόσιες εκτάσεις γης, κάτω από κύριες οδικές αρτηρίες. Παρόλα αυτά όμως δεν είναι πάντα εφικτό να γίνει αυτό και η χάραξη της σήραγγας μπορεί να περνάει κάτω από κτίρια και άλλες κατασκευές, γεγονός το οποίο μπορεί να προκαλέσει διάφορα προβλήματα αφού οι θεμελιώσεις αυτών είναι δυνατό να προκαλέσουν επιπλοκές κατά την εκσκαφή.
- Περιορισμοί για βοηθητικές εργασίες : Ένα πολύ πρακτικό πρόβλημα το οποίο εγείρεται όταν πρόκειται να κατασκευαστεί μια σήραγγα είναι οι χωρικοί περιορισμοί οι οποίοι τίθενται όταν επιλέγονται μέρη όπου θα ανοιχτεί το αρχικό φρέαρ προκειμένου να οριστεί το σημείο έναρξης της κατασκευής, καθώς επίσης και η μεταφορά των υλικών στο εργοτάξιο. Άλλοι περιορισμοί έγκεινται στις ερευνητικές γεωτρήσεις, προκειμένου να εξακριβωθούν η φύση των γεωυλικών κατά μήκος της χάραξης, η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα κλπ.
- Οπτική παρουσία ζημιών : Σε αστικά περιβάλλοντα οι ζημιές οι οποίες ενδεχομένως να προκληθούν σε κτίρια, σε δρόμους κλπ είναι εμφανείς. Το γεγονός αυτό μπορεί να προκαλέσει μεγάλες αντιδράσεις από το ευρύ κοινό, πράγμα το οποίο μεταφράζεται σε ενδεχόμενες καθυστερήσεις του έργου έως σε ακραίες περιπτώσεις διακοπή αυτού ή ακύρωση άλλων προβλεπόμενων υπόγειων, τεχνικών έργων.

### **3.2.16 Κρίσιμες καταστάσεις διάνοιξης σηράγγων σε βραχώδεις σχηματισμούς με χρήση μηχανήματος TBM**

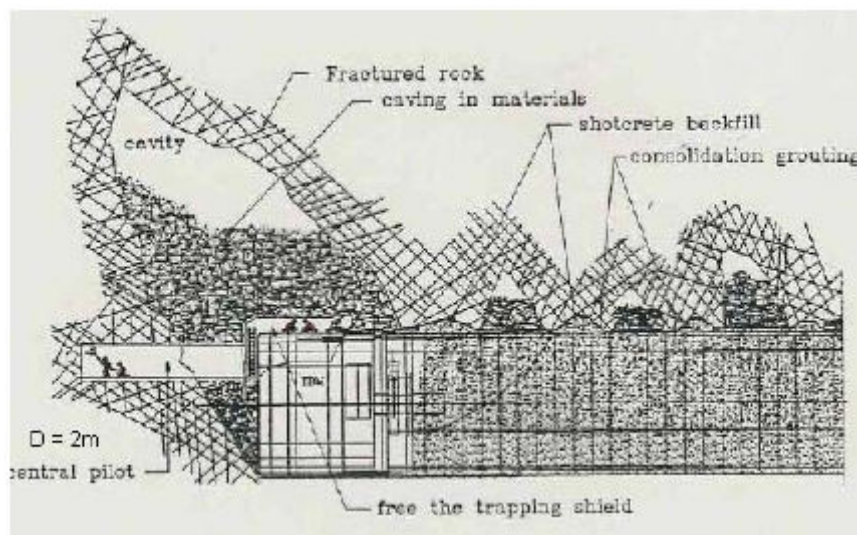
Μερικοί από τους παράγοντες υψηλού ρίσκου που αντιμετωπίζονται κατά τη διάνοιξη σηράγγων με μηχανήματα TBM μέσα σε βραχώδεις σχηματισμούς είναι οι παρακάτω (Barton, 2006) :

- Ζώνες ρηγμάτων
- Δυσμενώς προσανατολισμένες, ως προς το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας, ασυνέχειες πληρωμένες με αργιλικής φύσης υλικό
- Πολύ ασθενείς ή πολύ ισχυρές βραχώμαζες (πολύ χαμηλές ή πολύ υψηλές τιμές αντοχών σε ανεμπόδιστη θλίψη-UCS)
- Πολύ σκληρές βραχώμαζες (υψηλό περιεχόμενο σε χαλαζιακής σύστασης υλικό)
- Πεδίο πολύ χαμηλών ή πολύ υψηλών πιέσεων
- Εξαιρετική τασική ανισοτροπία
- Ζώνες υψηλού κερματισμού ή ύπαρξη εκτεταμένων καρστικών εγκοίλων με υψηλό περιεχόμενο νερού (κίνδυνος σοβαρών εισροών υδάτων)
- Υψηλές τιμές διαπερατότητας

Σημαντικοί επίσης, κατά τη διάνοιξη σήραγγας με χρήση μηχανημάτων ολομέτωπης κοπής, θεωρούνται παράγοντες όπως η εκσκαψιμότητα του υλικού, διαμέσου ισχυρών βράχων, αστάθειες στα τοιχώματα της εκσκαφής, το οποίο επηρεάζει κυρίως τα ανοικτού τύπου TBM (Open TBM) και ασταθείς συνθήκες στο μέτωπο της εκσκαφής (Barla & Pelizza, 2000). Παρακάτω ακολουθεί αναφορά στους παραπάνω παράγοντες υψηλού ρίσκου κατά τη διάνοιξη της σήραγγας.

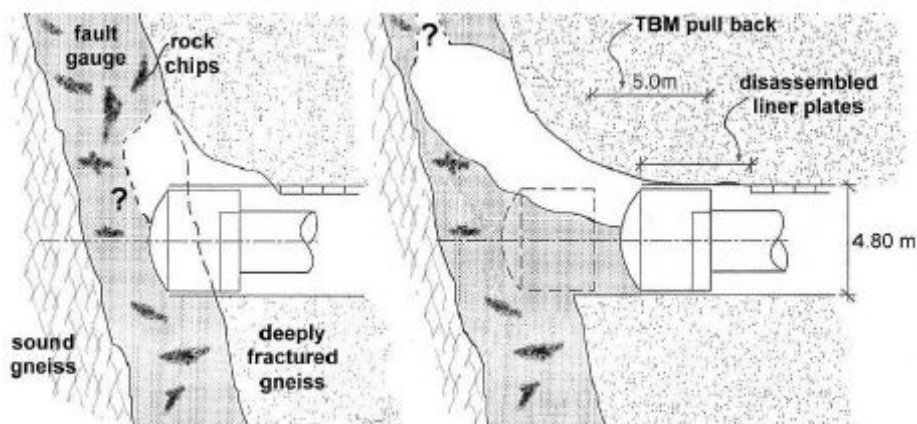
### Ζώνες υψηλού κερματισμού

Τα αίτια κάποιας κατάρρευσης ή εμπλοκής της κεφαλής κοπής ενός TBM (σχήμα 3.2.16.1) συνήθως γίνονται αντιληπτά στους υπεύθυνους μηχανικούς αφού έχουν γίνει. Καθυστερήσεις και διακοπές λειτουργίας λόγω ύπαρξης ζωνών κερματισμού με καταπτώσεις υλικών, που προκειμένου να ξεπεραστούν πραγματοποιείται χρήση εκρηκτικών ώστε να ελευθερωθεί η κεφαλή κοπής, ενδεχομένως να οδηγούν σε εγκατάλειψη της επιλογής διάνοιξης με TBM. Για το λόγο αυτό ακολουθούνται τα πλέον απαισιόδοξα σενάρια προκειμένου να ληφθούν υπόψη οι δυσμενέστερες συνθήκες.



**Σχήμα 3.2.16.1 : Εμπλοκή της κεφαλής κοπής του TBM λόγω καταπτώσεων υλικού στη σήραγγα Pinglin στη Taiwan  
Πηγή: Shen et al, 1999**

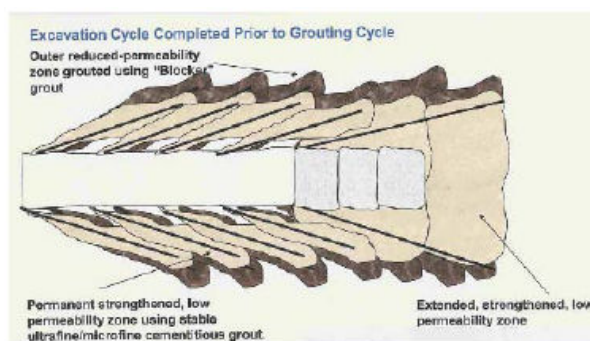
Ακόμα και μικρού μήκους ζώνες διατμήσεως με παρουσία αργιλικού υλικού ενδεχομένως να προκαλέσει σοβαρές καθυστερήσεις για διάνοιξη σήραγγας με χρήση TBM λόγω της ροής του μαλακού εδαφικού υλικού μέσα στη σήραγγα καθώς το TBM το εκσκάπτει. Στο σχήμα 3.2.16.2 που ακολουθεί παρουσιάζεται σχηματικά μια τέτοια κατάσταση όπου το μηχάνημα αναγκάζεται να οπισθοχωρήσει και πραγματοποιείται αλλαγή στην ευθυγράμμιση ώστε να παρακαμφθεί η ασθενής ζώνη και το ρέον υλικό.



**Σχήμα 3.2.16.2 : Οπισθοχώρηση του TBM και αλλαγή ευθυγράμμισης ώστε να παρακαμφθεί η ροή υλικού μέσα στη σήραγγα  
Πηγή: Oggeri, 2006**



Προκειμένου να αντιμετωπιστούν τέτοιου είδους προβλήματα, η προενεμάτωση του μετώπου εκσκαφής θεωρείται ως ένας τρόπος μείωσης των δυνητικά επικίνδυνων καταστάσεων καθώς η χρήση ενέματος μπορεί να αυξήσει σε ένα βαθμό τη ποιότητα της βραχώμαζας (Barton). Η εφαρμογή πολλαπλών στρώσεων ενέματος, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 3.2.16.3, αποσκοπεί στο να μειωθεί η ζώνη διαπερατότητας με το πρώτο στρώμα, το δεύτερο στρώμα προορίζεται για να δημιουργήσει ένα εσωτερικό πιο ισχυρό μανδύα χαμηλής διαπερατότητας σε σχέση με το πρώτο, χρησιμοποιώντας τσιμεντένια ενέματα, ενώ το τρίτο στρώμα είναι μια εκτεταμένη ζώνη ενίσχυσης πολύ χαμηλής διαπερατότητας μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής.



**Σχήμα 3.2.16.3 : Γραφική απεικόνιση ενεμάτωσης πολλαπλών στρωμάτων**  
**Πηγή: TBM and Lining Essential Interfaces-Nguyen Duc Toan (Politenico di Torino)**

#### *Πεδίο υψηλών τάσεων*

Σοβαρά προβλήματα μπορεί να προκύψουν λόγω ανάπτυξης πολύ μεγάλων τάσεων σε σήραγγες, οι οποίες διανοίγονται με μηχανήματα TBM, οι οποίες περιλαμβάνουν θραύσεις σε σκληρό βράχο και συνεπώς σημαντικά προβλήματα ασφαλείας (πχ σε περιπτώσεις αντικατάστασης των κοπτικών μέσων) καθώς και καθυστερήσεις στη πρόοδο της εκσκαφής (πχ λόγω απώλειας υποστήριξης του TBM στις αρπάγες που βρίσκονται σε επαφή με τα τοιχώματα της σήραγγας). Πεδίο υψηλών τάσεων ενδέχεται επίσης να οδηγήσει σε φαινόμενα «λυγισμού» σε βραχώμαζες σχιστώδους φύσης.

Είναι σημαντικό να μπορούν να διενεργηθούν διαδικασίες ενίσχυσης της βραχώμαζας (rock bolting) αμέσως πίσω από τη κεφαλή κοπής με σκοπό να διατηρηθούν οι συνθήκες εργασιακής ασφαλείας και σταθερότητας των τοιχωμάτων ώστε να μπορεί να στηριχτεί επαρκώς το μηχάνημα και επιτυγχάνεται συνεχής διάνοιξη. Η ανάγκη για επιτυχή διαχείριση συνθηκών υψηλών τάσεων οδήγησε στη τεχνολογική ανάπτυξη των μηχανημάτων TBM και στην απόκτηση εμπειρίας, η οποία εφαρμόζεται από τα αρχικά στάδια σχεδιασμού σε τεχνικά έργα όπου αναμένονται τέτοια προβλήματα.

#### *Υπαρξη υδροφόρου οριζοντα*

Η μοναδική τεχνική διάνοιξης σηράγγων η οποία μπορεί να αποτρέψει την εισροή υπογείων υδάτων σε πάρα πολύ μεγάλο βαθμό είναι η χρήση μηχανήματος TBM εξισορρόπησης της πίεσης του εδάφους (EPB TBM). Τέτοιου τύπου μηχανήματα προορίζονται για διάνοιξη σηράγγων σε εδαφικούς σχηματισμούς περιορίζονται σε σήραγγες μικρού βάθους (αβαθείς σήραγγες), συνήθως λιγότερο από 15m.

Σε διάνοιξη σηράγγων σε σκληρές βραχώμαζες η παραπάνω επιλογή δεν είναι διαθέσιμη. Προκειμένου να αποφευχθεί η εισροή υπογείων υδάτων λαμβάνονται μέτρα με χρήση εκτοξευόμενου ενέματος, ώστε να αποτραπεί η εισροή στο χρόνο που μεσολαβεί μέχρι να μπει η τελική επένδυση. Ακόμα και η εφαρμογή αυτού του τρόπου αντιμετώπισης γίνεται δύσκολη σε περιπτώσεις όπου υπάρχει σημαντικά αυξημένη ροή.

Όταν η εισροή υδάτων έχει συντελεστεί, διαμέσου ρωγμών και διακλάσεων, οπότε η ενεμάτωση είναι δύσκολο και δαπανηρό να γίνει, ειδικά κάτω από υψηλή πίεση,

πραγματοποιούνται διαδικασίες οι οποίες ως σκοπό έχουν την άντληση αυτών από τον εργοταξιακό χώρο, με τον όγκο του νερού ο οποίος μπορεί να απομακρυνθεί με άντληση να έγκειται σε σαφείς περιορισμούς από το σύστημα άντλησης που χρησιμοποιείται. Η ύπαρξη υδροφόρου ορίζοντα υψηλής στάθμης μπορεί επίσης να προκαλέσει προβλήματα λόγω δημιουργίας πιδάκων (water jets), οι οποίοι ψεκάζοντας την επιφάνεια του μετώπου προκαλούν δύσκολες εργασιακές συνθήκες, ειδικά σε χαμηλές θερμοκρασίες.

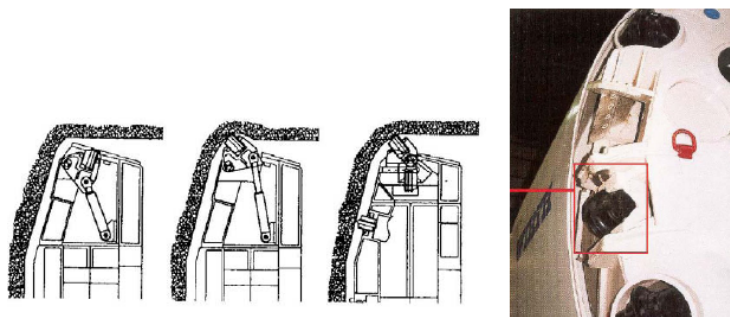
#### *Συνθήκες συμπίεσης του μηχανήματος σε βραχώδεις σχηματισμούς λόγω σύγκλισης*

Σημαντική πίεση μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία της υποστήριξης της σήραγγας οδηγώντας σε μεγάλες παραμορφώσεις, οι οποίες οδηγούν στη μείωση του ανοίγματος της διατομής και στην εμφάνιση αυτού του φαινομένου «συμπίεσης» (squeezing rock conditions). Χαμηλή αντοχή και υψηλή παραμορφωσιμότητα της βραχώμαζας καθώς και πίεση λόγω της παρουσίας νερού έχουν σα συνέπεια την εμφάνιση αυτής της κατάστασης. Είδη βραχώμαζας τα οποία έχουν τη τάση να εμφανίζουν τέτοιου είδους συμπεριφορά περιλαμβάνουν μεταμορφωμένους γνεύσιους, σχιστόλιθους, φυλλίτες, σερπεντίνη, τόφφοι και ορισμένοι τύποι φλύσχη (Kovari, 1998).

Μηχανοποιημένες μέθοδοι εκσκαφής με χρήση μηχανημάτων TBM σε τέτοιες συνθήκες χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό δυσκολίας και αντιμετωπίζονται αρκετά συντηρητικά. Τα σημαντικότερα προβλήματα που προκαλούνται είναι :

- Αστάθεια μετώπου
- Σχετική μη-ευελιξία στη διάμετρο εκσκαφής της διατομής
- Προβλήματα στην ώθηση του μηχανήματος για μηχανήματα με αρπάγες (gripper type TBM) λόγω μειωμένης απόδοσης των αρπάγων
- Δυσκολία στη διατήρηση της κατεύθυνσης του μηχανήματος σε μαλακό και ετερογενές έδαφος

Είναι δύσκολο γενικά να εκτιμηθεί το ακριβές μέγεθος και ο χρόνος της σύγκλισης και όταν ο ρυθμός πρόωθησης του μηχανήματος είναι αργός ο κίνδυνος να εγκλωβιστεί το μηχάνημα αυξάνει σημαντικά. Η διακοπή λειτουργίας ενός TBM συντελείται από πολλούς παράγοντες, όπως εισροή νερών, βλάβη του μηχανήματος κλπ. Σε συνδυασμό με τη παρουσία του παραπάνω φαινομένου, υπό την επιρροή συνεχών παραμορφώσεων, το μηχάνημα μπορεί να «συμπιεστεί» σε τέτοιο βαθμό που να οδηγήσει σε δυσκολία έως και αδυναμία για επανεκκίνηση αυτού. Συνθήκες «συμπίεσης» μικρού έως μεσαίου βαθμού αντιμετωπίζονται από ειδικά διαμορφωμένες μηχανολογικές διατάξεις (σχήμα 3.2.16.4), οι οποίες αναπτύσσονται ειδικά για να αντιμετωπίσουν τις ακτινικές παραμορφώσεις όπως το μηχάνημα προωθείται.



**Σχήμα 3.2.16.4 : Χρήση κοπτικών εργαλείων για ακτινική εκσκαφή που αυξάνει τη διάμετρο της διατομής της σήραγγας**

**Πηγή: TBM and Lining Essential Interfaces-Nguyen Duc Toan (Politenico di Torino)**

Μέτρα αντιμετώπισης τα οποία συνίσταται έναντι τέτοιας συμπεριφοράς του υπεδάφους για μηχανοποιημένες μεθόδους εκσκαφής είναι τα παρακάτω:

- Οριζόντια κεφαλή κοπής
- Υπερεκσκαφές
- Επανεκτίμηση των συνθηκών των σχηματισμών που αναμένεται να εκσκαφθούν
- Χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος και πλαίσια για τη λήψη κάποιων παραμορφώσεων (ανοικτού τύπου TBM)
- Εκτεταμένες επιφάνειες πέδλων υποστήριξης (gripper surfaces) (ανοικτού τύπου TBM)
- Χρήση κωνικής ασπίδας ( TBM διπλής ασπίδας)
- Τσιμεντενέσεις με μπετονίτη (TBM διπλής ασπίδας)

### **3.2.17 Μικτές γεωλογικές συνθήκες διάνοιξης με χρήση μηχανήματος TBM**

Για ένα συγκεκριμένο τεχνικό έργο, που περιλαμβάνει σήραγγες μεγάλου μήκους, ενδέχεται να αντιμετωπίζει διαφορετικές γεωλογικές συνθήκες από τμήμα σε τμήμα. Επιτυχής και οικονομική ολοκλήρωση καθενός τμήματος απαιτεί τη κατάλληλη επιλογή τύπου TBM και υποστήριξης του υπεδάφους, βάσει των αναμενόμενων γεωλογικών συνθηκών και για το λόγο αυτό για ένα τεχνικό έργο ενδεχομένως να χρειάζονται παραπάνω από ενός τύπου μηχανήματα και μέτρων υποστήριξης, προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι εκάστοτε συνθήκες. Για το λόγο αυτό τη τελευταία εικοσαετία η ανάπτυξη των TBM έφερε τύπους μηχανημάτων που να αποδίδουν εξίσου καλά σε σκληρούς και μαλακούς σχηματισμούς. Η συνεχής βελτίωση των τεχνικών εκσκαφής έχει οδηγήσει σε μηχανήματα ικανά να διανοίγουν σήραγγες και σε εξαιρετικά ετερογενή εδάφη, που αποτελούν μίγμα μαλακών εδαφών, μη στερεοποιημένων σχηματισμών και βραχώμαζας.

### **3.2.18 Παραδείγματα εφαρμογής TBM στον ελλαδικό χώρο και σε παγκόσμιο επίπεδο**

#### *Σήραγγα εκτροπής Ευήνου-Μόρνου*

Το έργο του Ευήνου (φράγμα και σήραγγα Ευήνου-Μόρνου) αποτελεί τη δεύτερη φάση του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας. Η σήραγγα έχει συνολικό μήκος 29.4 km και εσωτερική διάμετρο 3.5m. Οι κύριοι γεωλογικοί σχηματισμοί κατά μήκος της χάραξης της σήραγγας είναι :

- Λεπτοκοκκώδης φλύσχης (ποσοστό 30%)
- Χαοτικός και ψαμμιτικός φλύσχης (ποσοστό 40%)
- Ασβεστόλιθος του ανώτερου Κρητιδικού (ποσοστό 20%)
- Μεταβατικές ζώνες αργιλικού σχιστόλιθου (ποσοστό 10%)

ενώ το ύψος των υπερκειμένων κυμαίνεται από 800 έως 1250m.

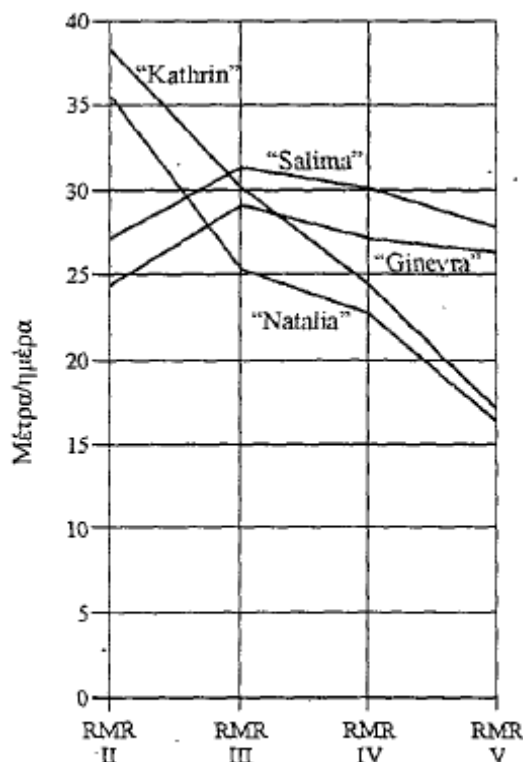
Η διάνοιξη έγινε συγχρόνως από τέσσερα μέτωπα εκσκαφής, τα οποία περιλαμβάνουν δύο από τα άκρα της σήραγγας και δύο από ενδιάμεση πρόσβαση. Τα δύο ακραία τμήματα έχουν διάμετρο εκσκαφής 4.2m και μήκος 8487m και 3427m αντίστοιχα. Η διάνοιξη αυτών έγινε από δύο μηχανήματα ολομέτωπης κοπής χωρίς ασπίδα και η αντιστήριξη όπως αυτή θα πραγματοποιούνταν με τη μέθοδο NATM. Μετά την ολοκλήρωση της διάνοιξης της σήραγγας ακολούθησε επένδυση αυτής από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Τα δύο ενδιάμεσα τμήματα έχουν διάμετρο εκσκαφής 4.04m και μήκος 9300m και 8178m αντίστοιχα. Η διάνοιξη τους έγινε από δύο μηχανήματα ολομέτωπης κοπής με διπλή, τηλεσκοπική ασπίδα ακολουθούμενα από μηχανήματα τοποθέτησης της επένδυσης από προκατασκευασμένα στοιχεία. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των μηχανημάτων ολομέτωπης κοπής, που χρησιμοποιήθηκαν, παρουσιάζονται στο σχήμα 3.2.18.1 που ακολουθεί.

Μηχάνημα		
Χαρακτηριστικά	TBM διπλής ασπίδας Robbins (κωδ. 1111 - 234/2)	TBM διπλής ασπίδας Robbins (κωδ. 118 - 221/2)
Διάμετρος Εκσκαφής (m)	4,04	4,04
Διάμετρος Κοπτικών (in/mm)	17 / 431,8	17 / 431,8
Μέγιστη Δύναμη Ώθησης (kN)	6.000	5.560
Ταχύτητα Περιστροφής (cycl/sec)	11,26	9,53
Ισχύς (HP)	900	900

**Σχήμα 3.2.18.1 : Τεχνικά χαρακτηριστικά των μηχανών διπλής τηλεσκοπικής ασπίδας της σήραγγας εκτροπής Ευήνου-Μόρνου**  
**Πηγή: S.E.L.I. SpA, Construction Activities-Evinos, Project information,1995**

Οι αποδόσεις των μηχανημάτων ήταν εξαιρετικές αν και σε ορισμένες περιπτώσεις απρόβλεπτα συμβάντα επέβαλαν ειδικές μεθόδους εκσκαφής καθώς οδήγησαν σε μείωση της προχώρησης της διάνοιξης της σήραγγας και αύξηση το κόστους. Στο σχήμα 3.2.18.2 παρουσιάζονται οι μέσες αποδόσεις των μηχανημάτων TBM σε σχέση με τη κατάταξη της βραχώμαζας κατά RMR. Παρατηρείται ότι η απόδοση των TBM διπλής ασπίδας αυξάνεται σε κατηγορία RMR III, ενώ στις υπόλοιπες κατηγορίες πετρώματος παρατηρείται μειωμένη. Σε αντίθεση με αυτά, τα μηχανήματα χωρίς ασπίδα έχουν αυξημένη απόδοση στη κατηγορία RMR I, με αυτή να μειώνεται συνεχώς καθώς συναντούν πετρώματα με χαμηλότερο RMR.



“Kathrin”, “Natalia”: Ανοικτού Τύπου  
“Salima”, “Geneva”: Διπλής Τηλεσκοπικής Ασπίδας

**Σχήμα 3.2.18.2 : Μέσος όρος προχώρησης των μηχανών σε σχέση με τη κατάταξη βραχώμαζας κατά RMR**

**Πηγή: S.E.L.I. SpA, Construction Activities-Evinos, Project information,1995**

## Αττικό Μετρό

Το Μετρό των Αθηνών είναι το μεγαλύτερο υπόγειο έργο που έχει κατασκευαστεί στον ελλαδικό χώρο, ενώ σήμερα προγραμματίζεται και πραγματοποιείται το σύστημα επέκτασης του, ώστε να μπορεί να καλύπτει ένα μεγάλο τμήμα των προαστίων της πρωτεύουσας. Το υπόγειο δίκτυο του αποτελείται από δύο γραμμές (γραμμές 2 και 3) με ακτινωτή κατεύθυνση από τη Πλατεία Συντάγματος προς Δουκίσσης Πλακεντίας (με την υπέργεια επέκταση αυτής να φτάνει μέχρι το Αεροδρόμιο Ελευθέριος Βενιζέλος), Άγιο Δημήτριο (με την επέκταση αυτής να φτάνει μέχρι τη περιοχή του Ελληνικού), Άγιο Αντώνιο και το Αιγάλεω, σε βάθος που κυμαίνεται από 9 έως 26m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.

Το γεωλογικό υπόβαθρο της ευρύτερης περιοχής της Αθήνας αποτελείται από σειρά γεωλογικών σχηματισμών, γνωστοί ως Αθηναϊκός Σχιστόλιθος. Ο όρος αυτός χρησιμοποιείται για να περιγράψει σειρά αρχικά ιζηματογενών πετρωμάτων τύπου φλύσχη και πιθανόν Άνω Κρητιδικής ηλικίας που στη συνέχεια υπέστησαν παραμόρφωση. Το σύστημα περιλαμβάνει αργιλικούς και ασβεστιτικούς ψαμμίτες, γραουβάκες, ιλύολίθους, ασβεστόλιθους και αργιλικούς σχιστόλιθους. Πυριγενής δραστηριότητα έδωσε τοπικά περιδοιτικά και διαβασικά σώματα που προκάλεσαν λιθολογική παραμόρφωση και σημαντικές τεκτονικές παραμορφώσεις των προϋπαρχόντων πετρωμάτων. Προκειμένου να συλλεχθούν οι απαραίτητες πληροφορίες για τη μελέτη πραγματοποιήθηκαν περισσότερες από 350 γεωτρήσεις, οι οποίες συμπλήρωναν τις 200 γεωτρήσεις που είχαν πραγματοποιηθεί κατά μήκος της χάραξης των γραμμών σε παλαιότερες έρευνες, ενώ κάθε γεώτρηση έφθανε κατά μέσο όρο τα 20 με 30m. Οι γεωτεχνικές έρευνες συνεχίστηκαν και κατά τη διάρκεια της κατασκευής ενώ συνολικά πραγματοποιήθηκαν 1100 γεωτρήσεις για τις ανάγκες του βασικού έργου.

Το έργο του Μετρό της Αθήνας είναι εξολοκλήρου υπόγειο, όπως προαναφέρθηκε. Με τον τρόπο αυτό εξυπηρετείται ο στόχος του ο οποίος είναι η γρήγορη μετακίνηση των πολιτών στην ευρύτερη περιοχή της πρωτεύουσας. Για τη κατασκευή των υπόγειων σταθμών και σηράγγων του μετρό χρησιμοποιήθηκαν σύγχρονες μέθοδοι εκσκαφής οι οποίες περιλαμβάνουν :

- Εκσκαφή με μηχανήματα ολομέτωπης κοπής TBM και σημειακής κοπής
- Εφαρμογή της συμβατικής Νέας Αυστριακής Μεθόδου διάνοιξης σηράγγων (NATM)
- Εφαρμογή της μεθόδου Ανοικτού Ορύγματος και Επανεπίχωσης (Cut and Cover)
- Εφαρμογή της μεθόδου Επικάλυψης-Εκσκαφής (Cover and Cut)

Η μηχανοποιημένη μέθοδος διάνοιξης σηράγγων εφαρμόστηκε για τη διάνοιξη διαφόρων τμημάτων των σηράγγων του βασικού έργου. Τα μηχανήματα που χρησιμοποιήθηκαν για τη κατασκευή αυτών είναι τα παρακάτω:

- Μηχάνημα Διάτρησης σηράγγων κλειστού τύπου για σκληρά πετρώματα

Το TBM κλειστού τύπου για σκληρά πετρώματα (σχήμα 3.2.18.3) σχεδιάστηκε από την εταιρεία MITSUBISHI Ιαπωνίας και κατασκευάστηκε από την NEYRPIC FRAMATOME MECHANIQUE (NFM) Γαλλίας. Το μήκος του TBM, συμπεριλαμβανομένων των βαγονιών υποστήριξης και του κλειδιού California είναι 150m και το συνολικό του βάρος 1650t.

Στο βασικό έργο χρησιμοποιήθηκαν δύο TBM κλειστού τύπου για σκληρά πετρώματα, για τη διάνοιξη σηράγγων διπλής γραμμής μεταξύ των σταθμών, συνολικού μήκους 11km. Συγκεκριμένα το TBM1 (με το όνομα «Ιάσωνας») χρησιμοποιήθηκε στο τμήμα της Γραμμής 2 από το Σταθμό Λαρίσης έως το Σταθμό του Αγίου Ιωάννη και το TBM2 (με το όνομα «Περσεφόνη») χρησιμοποιήθηκε στο τμήμα της Γραμμής 3 από το Σταθμό Κατεχάκη έως το Σταθμό Συντάγματος. Τα δύο TBM έκαναν διάνοιξη σε βάθος 28m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους ώστε να διασφαλιζόταν η ακεραιότητάς τους και η αντιμετώπιση δύσκολων καταστάσεων (αποφυγή δικτύων ύδρευσης/αποχέτευσης, αρχαιολογικά ευρήματα κλπ).

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των δύο TBM παρουσιάζονται στο σχήμα 3.2.18.4 που ακολουθεί.

Συνολικό μήκος	149 m
Συνολικό Βάρος ( κενό )	1650 tn
Συνολική Εγκατεστημένη Ισχύς	4000 kVA
Διάμετρος Κεφαλής Κοπής	9456 mm
Ταχύτητα Περιστροφής	0-4 rpm
Διάμετρος Κοπτικών Δίσκων	17 in (431,8mm)
Μέσος Ρυθμός Εκσκαφής	8 cm/min
Ρυθμός Εργασιών TBM 1	4,5 μέτρα/ εργάσιμη ημέρα
Ρυθμός Εργασιών TBM 2	4,5-17 μέτρα/ εργάσιμη ημέρα
Μέγιστος Ρυθμός Εργασιών	19,5-24 μέτρα/ εργάσιμη ημέρα

**Σχήμα 3.2.18.4 : Τεχνικά χαρακτηριστικά και ρυθμοί προχώρησης των δύο TBM του Αττικό Μετρό (Τελική διάμετρος σήραγγας 8.5m)  
Πηγή: Μηχανική διάτρηση σιδηρών-Εφραιμίδης Χ. (Αθήνα, 1994)**

Από τα παραπάνω συνάγεται το αποτέλεσμα ότι για λειτουργία 16 ωρών ανά ημέρα η απόδοση του συγκεκριμένου μηχανήματος αναμενόταν στα 10m. Το βήμα προχώρησης είναι της τάξης του 1.5m, όπου στο τυπικό αυτό κύκλο όρυξης, πρέπει να τοποθετηθούν τα 8 προκατασκευασμένα στοιχεία δακτυλίου. Στη πραγματικότητα όμως, λόγω δυσκολιών που συναντήθηκαν από τις συγκεκριμένες μηχανές, η απόδοση αυτών περιορίστηκε σε χαμηλότερες τιμές. Οι κύριοι λόγοι ήταν οι πτωχές εδαφικές συνθήκες πάνω από το επίπεδο της στέγης του TBM, το μικρό εύρος υπερκειμένων προς την επιφάνεια, η ύπαρξη παλιών περιοχών διέλευσης ύδατος κλπ.



**Σχήμα 3.2.18.3 : Ένα εκ των TBM που χρησιμοποιήθηκαν στο Μετρό των Αθηνών  
Πηγή: [www.attikometro.gr](http://www.attikometro.gr)**

- Μηχάνημα εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης (EPB TBM)

Το EPB που χρησιμοποιήθηκε στην επέκταση της Γραμμής 3 προς το σταθμό Δουκίσσης Πλακεντίας σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε από τη Γερμανική εταιρεία Herrenknecht A.G., ώστε να λειτουργεί σε ετερογενή εδάφη. Χρησιμοποιήθηκε για τη κατασκευή της σήραγγας από το Σταθμό Χαλανδρίου έως το φρέαρ Ξάνθου (3374m) της επέκτασης της Γραμμής 3, και σήμερα χρησιμοποιείται στην επέκταση της Γραμμής 2 προς το Σταθμό του Ελληνικού. Η κεφαλή κοπής και το σύστημα υποστήριξης του EPB χωρίζονται σε τομείς για την εύκολη μεταφορά και συναρμολόγηση τους στο εκάστοτε εργοτάξιο. Η πίεση λειτουργίας είναι 3 bar και η εξωτερική διάμετρος της μπροστινής ασπίδας είναι 9.44m. Το

συνολικό μήκος του EPB είναι 94m, ενώ το βάρος του ανέρχεται στους 1100t. Η επιλογή του συγκεκριμένου τύπου μηχανήματος έγινε λόγω των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών του εδάφους (μικρή υδατοπερατότητα και πλασιμότητα), της παρουσίας υδροφόρου ορίζοντα πάνω από τη στέψη της σήραγγας, του βάθους των υπερκειμένων από τη στέψη της σήραγγας και της παρουσίας στην επιφάνεια κατοικημένων περιοχών.

- Μηχάνημα τύπου Ανοικτής Ασπίδας (OFS)

Το OFS του Μετρό της Αθήνας, στο οποίο είχε δοθεί αρχικά το όνομα «Δάφνη» σχεδιάστηκε από την εταιρεία Herrenknecht GmbH, για εκσκαφή σε πετρώματα. Είχε συνολικό μήκος 150m, με τα βαγόνια υποστήριξης, και λειτουργούσε υπό ατμοσφαιρική πίεση. Χρησιμοποιήθηκε για τη κατασκευή της σήραγγας από το Σταθμό της Δάφνης έως το Σταθμό του Αγίου Ιωάννη του βασικού έργου μήκους 765m και για το τμήμα μεταξύ του Σταθμού Ανθούπολη και του Σταθμού Περιστερίου της επέκτασης της Γραμμής 2, μήκους 910m. Ουσιαστικά πρόκειται για το TBM2, του οποίου η κεφαλή κοπής κλειστού τύπου αντικαταστάθηκε από τη νέα κεφαλή ανοικτής ασπίδας, αντικατάσταση στην οποία προχώρησε η εταιρεία Herrenknecht GmbH. Τα βαγόνια υποστήριξης του μηχανήματος παρέμειναν τα ίδια με το TBM2, με αλλαγές/βελτιώσεις ηλεκτρομηχανολογικής φύσεως για την υποστήριξη της νέας κεφαλής. Η ασπίδα αποτελείται από δύο κύρια μέρη:

- Πρόσθιο τμήμα διαμέτρου 9495mm και μήκους 7920mm, που περιλαμβάνει πλάκες προπορείας, τον εκσκαφέα σημειακής κοπής, δύο καδοφόρους εκσκαφείς, δύο τηλεσκοπικά γεωτρύπανα, έμβολα υποστήριξης του μετώπου εκσκαφής, δύο θαλάμους ελέγχου και το μεταφορικό κοχλία υλικών εκσκαφής
- Οπίσθιο τμήμα διαμέτρου 9460mm και μήκους 3425mm, που περιλαμβάνει το σύστημα εγκατάστασης των προκατασκευασμένων στοιχείων δακτυλίων, τα σημεία έκχυσης του πρωτογενούς ενέματος, το διάφραγμα μόνωσης τύπου συρματόβουρτσας και τον εξοπλισμό άντλησης υδάτων.

Το συνολικό βάρος του μηχανήματος ανέρχεται στους 840t.

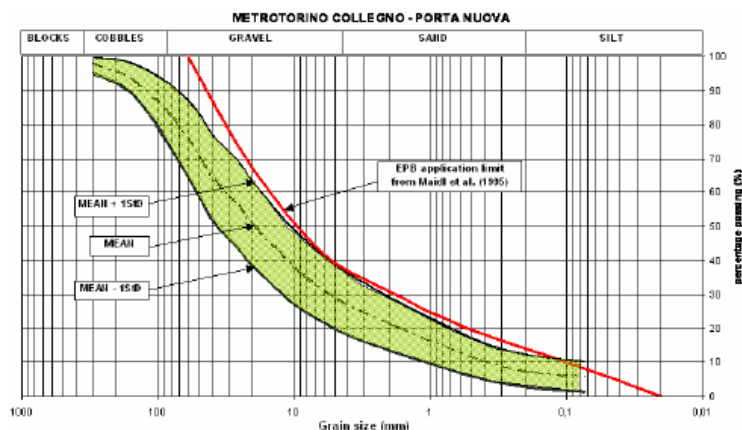
#### *Το Μετρό της πόλης του Τορίνο, Ιταλία (Ευρώπη)*

Η εταιρεία GTT (Turin Transportation Group) διαχειρίζεται τις δημόσιες συγκοινωνίες της πόλης του Τορίνο και συμμετέχει στο σχεδιασμό, τη κατασκευή και τη διαχείριση της γραμμής 1 του Μετρό. Η κατασκευή της συγκεκριμένης γραμμής είναι ένας από τους βασικούς πυλώνες του συγκοινωνιακού σχεδίου στη περιοχή του Τορίνο. Το πρώτο κομμάτι από τη περιοχή του Collegno στη περιοχή της Porta Nuova περιλαμβάνει μια σήραγγα 9.5km και 15 σταθμούς όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2.18.5.



**Σχήμα 3.2.18.5 : Η χάραξη της σήραγγας της γραμμής 1 του Μετρό της πόλης του Τορίνο**  
Πηγή: Crova R., 2006

Το πρώτο κομμάτι της γραμμής 1 έχει εκσκαφθεί πλήρως στο ανώτερο κομμάτι ποτάμιων αποθέσεων. Αυτές οι αποθέσεις παρουσιάζουν οριζόντια και κατακόρυφα μη συνεχή επίπεδα (φακούς) με διαφορετική κοκκομετρική διαβάθμιση και διάφορους βαθμούς συγκόλλησης. Στο σχήμα 3.2.18.6 που ακολουθεί παρουσιάζεται η κοκκομετρική διαβάθμιση των γεωλικών, από δείγματα τα οποία ελήφθησαν.



**Σχήμα 3.2.18.6 : Κοκκομετρική διαβάθμιση των γεωλικών στο Μετρό του Τορίνο**  
**Πηγή: Crova R., 2006**

Οι «γεω-περιορισμοί» που τέθηκαν για την επιλογή της κατασκευαστικής μεθόδου που θα ακολουθείτο ήταν το έδαφος, όπου χαλίκια με άμμο και σε μεγάλο ποσοστό σκληρά, βραχώδη block, ενώ σε μικρό έως πολύ μικρό ποσοστό ιλύος και αργίλου, η παρουσία τυχαία διασκορπισμένων φακών χαλαρού υλικού (άμμος και/ή χαλίκια), τυχαίος βαθμός συγκόλλησης των γεωλικών και ο υδροφόρος ορίζοντας. Η κοκκομετρική διαβάθμιση ήταν ελλιπής λόγω της απουσίας λεπτόκοκκων γεωλικών (ποσοστό μικρότερο από 2%) και της σχεδόν συστηματικής παρουσίας αδρόκοκκων σε υψηλά ποσοστά. Η κοκκομετρία αυτή των υλικών δεν επέτρεψε να λειτουργήσουν αποδοτικά τα TBM σε κατάσταση λειτουργίας EPB.

Από τα κριτήρια που τέθηκαν από τους παραπάνω γεωλογικούς περιορισμούς αποφασίστηκε η επιλογή μηχανημάτων τύπου EPB TBM προκειμένου να πραγματοποιηθεί η εκσκαφή κάτω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα, για γρηγορότερη περάτωση του έργου και για μικρότερο κόστος εκσκαφής σε σχέση με παραδοσιακές μεθόδους εκσκαφής. Παρόλα αυτά το μειονέκτημα στο συγκεκριμένο έργο είναι ότι πρώτη φορά χρησιμοποιούνται μηχανήματα TBM στο τραχύ έδαφος της πόλης του Τορίνο, δίχως προηγούμενη εμπειρία. Δύο από τα μηχανήματα που χρησιμοποιήθηκαν κατασκευάστηκαν από την εταιρεία Lovat Inc. (σχήμα 3.2.18.7) ενώ το τρίτο TBM που χρησιμοποιήθηκε ήταν ένα μεταχειρισμένο TBM, το οποίο είχε κατασκευαστεί από την εταιρεία NEYRPIE FRAMATOME MECHANIQUE (NFM). Στο σχήμα 3.2.18.8 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των μηχανημάτων.



TBM model	LOVAT RME 306 Series 20600 (Lots 3 and 4)	NFM TBM - EPB Mod. 13310506/001 (Lot 5)
Technical data		
Excavation diameter	7,802 mm	8,030 mm
Cutter head power	2,100 kW	2,000 kW
Cutter head speed	Variable: 1 - 2 rpm	Variable: 0 - 2.4 rpm
Propulsion thrust	76,000 kN	91,350 kN
Torque	20,400 kNm	15,000 kNm
Shield length	10.0 m	9.1m
Back-up length	98 m	100 m

**Σχήμα 3.2.18.8 : Τεχνικά χαρακτηριστικά των TBM που Χρησιμοποιήθηκαν στο Μετρό του Τορίνο**  
**Πηγή: TBM and Lining Essential Interfaces-Nguyen Duc Toan (Politenico di Torino)**



**Σχήμα 3.2.18.7 : Ένα από τα TBM της εταιρείας Lovat Inc που Χρησιμοποιήθηκαν στο Μετρό του Τορίνο**  
**Πηγή: TBM and Lining Essential Interfaces-Nguyen Duc Toan (Politenico di Torino)**

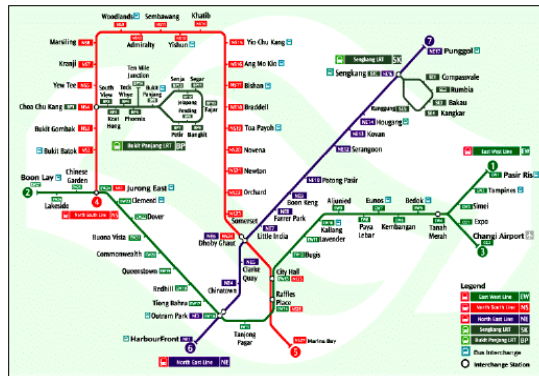
Η διάνοιξη της σήραγγας κάνοντας χρήση των TBM ξεκίνησε τον Οκτώβριο του 2003 από το Σταθμό του Fermi και ήταν απαραίτητο να βρεθεί μια ισορροπία ανάμεσα στα πρόσθετα στερεοποίησης από τα εκσκαφέντα γεωυλικά στο θάλαμο εκσκαφής προκειμένου το εκσκαφέν υλικό να ομογενοποιηθεί. Επειδή το υπέδαφος του Τορίνο ποικίλει αρκετά ως προς τη κοκκομετρική διαβάθμιση των υλικών και της μηχανικής συμπεριφοράς αυτών, η χρήση προσθέτων κατά την εκσκαφή πραγματοποιήθηκε ώστε :

- Να υπάρχει επαρκής πίεση στο μέτωπο εκσκαφής
- Να λιπανθεί το λασπώδες υλικό προκειμένου να διευκολυνθεί η απομάκρυνση του υλικού μέσω του ελικοειδούς μετακομιστή (screw conveyor)
- Ελάττωση της δύναμης της μηχανής στην ασπίδα εκσκαφής
- Αποφυγή παραπάνω επιβάρυνσης της μηχανής του TBM

Η απόδοση των TBM με αμελητέα πίεση να ασκείται στο μέτωπο, με τη πρόβλεψη δημιουργίας ενός στρώματος εδάφους με ένεμα στη στέψη της σήραγγας χαρακτηρίζεται από μια μέση απόδοση προώθησης 10m/ημέρα.

### *Το Μετρό της πόλης της Σιγκαπούρης, Σιγκαπούρη (Νοτιοανατολική Ασία)*

Η Γενική Αρχή Μεταφορών (Land Transport Authority-LTA) της Σιγκαπούρης είναι υπεύθυνη για την εγκατάσταση του συστήματος Μαζικής, Ταχείας Μετάβασης (Mass Rapid Transit-MRT) στο νησί. Η κατασκευή του υπόγειου σιδηροδρομικού δικτύου ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του 1980 και με την ολοκλήρωση της Βορειοανατολικής Γραμμής και της Γραμμής Changi, το συνολικό μήκος του δικτύου ανέρχεται στα 138km. Η LTA συνεχίζει την επέκταση του δικτύου με τη κατασκευή της Κυκλικής Γραμμής. Μέχρι και το 2010 προστέθηκαν στο ήδη υπάρχον δίκτυο 34km επιπλέον ενώ και άλλες γραμμές μεταφοράς βρίσκονται υπό μελέτη. Το δίκτυο παρουσιάζεται στο σχήμα 3.2.18.9 που ακολουθεί.



**Σχήμα 3.2.18.9 : Το Μετρό της Πόλης της Σιγκαπούρης**

**Πηγή: Progress of Rail (Metro) Tunnel Construction in Singapore-Past, Present & Future-Chun Nam Ow, Ariaratnam Kulaindran, C.K. Knight-Hassell, Tiong Peng Seah**

Στην αξιολόγηση της κατασκευασιμότητας του έργου, κάποια από τα κριτήρια που λήφθηκαν υπόψη ήταν η ευθυγραμμία που θα ακολουθείτο, οι γεωλογικές συνθήκες, περιβαλλοντικές και τοπογραφικές συνθήκες καθώς και η ποικιλία των μεθόδων και μέσων εκσκαφής που θα μπορούσαν να διατεθούν. Η διάνοιξη στη πρώτη φάση του τεχνικού έργου κυρίως διενεργήθηκε από ανοικτού τύπου ασπιδοφόρα μηχανήματα με κεφαλή κοπής τύπου Roadheader. Μέχρι τη στιγμή που ξεκίνησε η κατασκευή της Βορειοανατολικής Γραμμής στα μέσα της δεκαετίας του 1990, η τεχνολογία των TBM είχε εξελιχθεί αρκετά με μηχανήματα τύπου EPB TBM να γίνονται συχνά στη χρήση. Από τα συνολικά 16 TBM που χρησιμοποιήθηκαν, 14 ήταν τύπου EPB και 2 ήταν ανοικτού τύπου.

Το βασικό έργο χωρίστηκε σε δύο φάσεις περιλαμβάνοντας 67km και 42 σταθμούς. Η κατασκευή έλαβε χώρα μεταξύ του 1983 και του 1984. Από τους 42 σταθμούς, οι 27 ήταν υπέργειοι και οι υπόλοιποι 15 ήταν υπόγειοι και ενώνονταν με δίδυμη σήραγγες μήκους 16.8km, από τα οποία 11km διανοίχτηκαν με μηχανοποιημένη μέθοδο με εσωτερική διάμετρο 5.2m. Οι υπόλοιπες σήραγγες κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο εκσκαφής και επανεπίχωσης (cut and cover).

Η γεωλογική έρευνα κατά μήκος της σήραγγας αποκάλυψε ποικίλες εδαφικές συνθήκες. Κοιλιάδες ιλυόλιθου και ψαμμίτη του σχηματισμού Jurong και ο γρανίτης του Bukit Timah παρατηρήθηκε ότι είναι πληρωμένα με ποτάμιας και άλλες αποθέσεις του σχηματισμού Kallang. Σε ορισμένες τοποθεσίες το μαλακό έδαφος του σχηματισμού του Kallang εκτείνεται σε βάθος 45m. Επίσης προκειμένου να αποφευχθούν οι θεμελιώσεις κτιρίων ο άξονας των σιδηρόδρομων ακολούθησε κυρίως την ευθυγραμμία κύριων οδικών αξόνων.

Αρχικά εφαρμόστηκαν μηχανοποιημένες μέθοδοι εκσκαφής τύπου Roadheader καθώς και συστήματα συμπίεσμένου αέρα όπου το μέτωπο συναντούσε μαλακό έδαφος ή τον υδροφόρο ορίζοντα. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας, η χρήση μηχανημάτων τύπου EPB με ασπίδα εισήχθη στο Μετρό της Σιγκαπούρης κατά τη 2<sup>η</sup> Φάση κατασκευή του έργου διανοίγοντας τη σήραγγα από το Σταθμό του Lavender έως το Σταθμό Bugis που βρισκόταν σε μαλακή άργιλο. Οι εδαφικές καθιζήσεις περιορίστηκαν αρκετά στο σύνολο του έργου αλλά σε

κάποιες περιπτώσεις μετρήθηκαν καθιζήσεις έως και 140mm που ήταν μεγαλύτερες από τις καθιζήσεις που έδιναν τα ανοικτού τύπου μηχανήματα. Από την αποκτηθείσα εμπειρία από το συμβάν αυτό προέκυψε ότι προκειμένου να μειωθούν οι καθιζήσεις σε μαλακές αργίλους ήταν απαραίτητο να :

- Αποφυγή άσκησης πίεσης του μετώπου περισσότερο από το 20% της συνολικής πίεσης των υπερκειμένων. Πιέσεις μεγαλύτερες από αυτές μπορεί να οδηγήσουν σε υπερβολική καθίζηση εκ στερεοποιήσεως
- Περιορισμός ή και αποφυγή στη χρήση διαμετρικών κοπτικών (overcutters), τα οποία αυξάνουν τη διάμετρο της εκσκαφείσας διατομής
- Χρήση ταυτόχρονης ενεμάτωσης στο κενό του οπίσθιο τμήματος του μηχανήματος ώστε να εξασφαλιστεί ότι το κενό αυτό πληρώνεται προτού το έδαφος μπορεί να κινηθεί πάνω στην ευθυγραμμία της σήραγγας

Ακολουθώντας την ολοκλήρωση του κύριου δικτύου το 1990 το 1996 ξεκίνησε και το 2003 ολοκληρώθηκε η Βορειοανατολική γραμμή του δικτύου με κόστος που ανήλθε στα 4.6 δισεκατομμύρια δολάρια. Από τη συνολική διαδρομή μήκους 20km τα 11.5km κατασκευάστηκαν κάνοντας χρήση μηχανημάτων TBM και τα υπόλοιπα με τη μέθοδο εκσκαφής και επανεπίχωσης. Στις σήραγγες που διανοίχτηκαν με τη μηχανοποιημένη μέθοδο χρησιμοποιήθηκαν 14 EPB TBM και 2 ανοικτού μετώπου ασπίδες.

Παρόμοια με το βασικό έργο, οι εδαφικές συνθήκες παρουσίασαν μεγάλη ποικιλία. Παλιές Αλλουβιακές Αποθέσεις και ο σχηματισμός του Jurong συναντήθηκαν σχεδόν σε όλο τον άξονα της σήραγγας. Κατά τη διάνοιξη το μέτωπο επίσης συνάντησε μαλακές αργίλους, ποτάμιες αποθέσεις, άμμους καθώς και ισχυρούς έως πολύ ισχυρούς βραχώδεις γρανιτικούς σχηματισμούς του Bukit Timah. Τα EPB που χρησιμοποιήθηκαν, αντίθετα με αυτά που χρήση τους έγινε στο βασικό έργο για τις μαλακές αργίλους, ήταν κατάλληλα εξοπλισμένα ώστε να εκσκάπτουν τόσο μαλακούς όσο και σκληρούς σχηματισμούς.

Η γραμμή για το αεροδρόμιο Changi κατασκευάστηκε επίσης τη δεκαετία του 1990 και είχε μήκος 6.5km από το Σταθμό Tanah Merah μέχρι το αεροδρόμιο. Το μήκος της διαδρομής που διανοίχτηκε με μηχανήματα TBM ήταν 3.5km. Από τη γεωλογική έρευνα προέκυψε ότι τα γεωυλικά κατά μήκος της χάραξης αποτελούνταν κυρίως από τραχύ, ασθενή ψαμμίτη και μαλακές αργίλους του σχηματισμού Kallang. Για τις συγκεκριμένες γεωλογικές συνθήκες προέκυψε ότι η καλύτερη λύση για την εκσκαφή ήταν η χρήση EPB TBM. Τα μηχανήματα που ελέχθησαν ήταν δύο EPB της εταιρείας Lovat Inc (σχήμα 3.2.18.10), το πρώτο εκ των οποίων ξεκίνησε τον Ιούλιο του 1999 και διάνοιξε 3.5km σε 11 μήνες. Ο μέσος ρυθμός πρόωθησης ήταν 300m/μήνα. Το δεύτερο TBM ξεκίνησε το Σεπτέμβριο του 1999 και για τη διάνοιξη της ίδιας απόστασης χρειάστηκε 11.5 μήνες. Και τα δύο TBM περνώντας κάτω από το αεροδρόμιο προξένησαν ελάχιστες καθιζήσεις.



*Σχήμα 3.2.18.10 : Ένα από τα TBM της εταιρείας Lovat Inc που Χρησιμοποιήθηκαν στο Μετρό της Σιγκαπούρης*

*Πηγή: [www.lovat.com](http://www.lovat.com)*

### 3.3 Συστήματα ταξινόμησης της βραχώμαζας

Η ταξινόμηση της βραχώμαζας σε κατηγορίες είναι απαραίτητη τόσο κατά το σχεδιασμό όσο και κατά την επακόλουθη κατασκευή των υπογείων έργων. Τυπικά, ο σχεδιασμός των υπογείων έργων μεγάλου μήκους (σήραγγες) γίνεται για περισσότερες της μίας κατηγορίες βραχώμαζες με διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά. Κατά τη φάση της κατασκευής, η ταξινόμηση της επιτόπου βραχώμαζας σε κατηγορίες είναι απαραίτητη στην απόφαση περί της εφαρμοστέας τυπικής διατομής της μελέτης του έργου.

Τα πιο διαδεδομένα συστήματα ταξινόμησης της βραχώμαζας είναι :

- Το σύστημα ταξινόμησης της βραχώμαζας κατά Bieniawski (RMR)
- Το σύστημα Q (NGI)
- Ο Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής (Geological Strength Index-GSI)

Παρακάτω ακολουθεί η περιγραφή του συστήματος GSI, οι τιμές του οποίου προσδιορίστηκαν για τους βραχώδεις σχηματισμούς της Ενότητας του Χορτιάτη που πρόκειται να εκσκαφτούν για το τμήμα της επέκτασης της σήραγγα του Μετρό της Θεσσαλονίκης προς Σταυρούπολη για το τμήμα με χιλιομετρική θέση 0+700 έως τη χιλιομετρική θέση 2+150.

#### 3.3.1 Σύστημα GSI







Το σύστημα GSI (Geological Strength Index) αρχικώς προτάθηκε από τον Evert Hoek (1995) και με βελτιώσεις από τους Hoek, P. Marinos και Benissi το 1998 και τους Hoek, P. Marinos και V. Marinos το 2000 για ετερογενείς βραχώμαζες, δίνει ιδιαίτερη έμφαση σε σχετικώς πτωχής ποιότητας βραχώμαζες με  $RMR < 40$  αλλά με λειτουργία αλληλεμπλοκής μεταξύ των βραχωδών τεμαχών. Τέτοιου τύπου βραχώμαζες δομούν ένα σημαντικό ποσοστό του Ελλαδικού χώρου και κατά συνέπεια έχουν μεγάλη σημασία για το σχεδιασμό υπογείων έργων.

Το σύστημα GSI σχεδιάστηκε ώστε εν γένει να είναι συμβατό με το σύστημα RMR για βραχώμαζες με  $RMR > 40$ , όπου οι τιμές μεταξύ των δύο συστημάτων είναι περίπου ίσες. Για βραχώμαζες με  $RMR < 40$  το σύστημα GSI πλεονεκτεί καθώς παρέχει καλύτερη διακριτοποίηση, δίχως να παρουσιάζει απότομες μεταβολές τιμών ενώ παραμένει ταυτόχρονα συμβατό με το σύστημα RMR.

Το σύστημα GSI βασίζεται στη συναξιολόγηση δύο παραμέτρων της βραχώμαζας :

- Της δομής της βραχώμαζας, που χαρακτηρίζει το βαθμό αλληλεμπλοκής των βραχωδών τεμαχών (ορίζονται έξι κατηγορίες βάσει αυτής)
- Της κατάστασης των επιφανειών των ασυνεχειών που χαρακτηρίζει το μέγεθος της διατμητικής αντοχής τους (ορίζονται πέντε κατηγορίες που δείχνουν το βαθμό αποσάθρωσης, εξαλλοίωσης καθώς και την ύπαρξη και τη φύση του υλικού πληρώσεως)

Σημειώνεται επίσης ότι η ύπαρξη νερού επηρεάζει τη κατάταξη μιας βραχώμαζας. Η συναξιολόγηση των παραμέτρων και οι αντίστοιχες τιμές του δείκτη GSI φαίνονται στο σχήμα 3.3.1.1 που ακολουθεί. Το σύστημα GSI εφαρμόζεται σε βραχώμαζες με αλληλεμπλοκή μεταξύ των βραχωδών τεμαχών, δηλαδή σε βραχώμαζες με μικρό ποσοστό συμμετοχής εδαφικών υλικών (τυπικά λιγότερο από το 20% του συνολικού όγκου της βραχώμαζας).

<p>ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΡΗΓΜΑΤΩΜΕΝΟΥΣ ΒΡΑΧΟΥΣ (Hoek and Marinos, 2000)            Βασίζονται στην εμφάνιση της βραχόμαζας (περιγραφή δομής και κατάσταση επιφάνειας 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 βραχόμαζας. Η διατηρητική αντοχή επιφανειών σε βράχους που υπόκεινται σε εξασθένηση λόγω διακύμανσης της περιεκτικότητας σε υγρασία, είναι περαιτέρω μειωμένη όταν υπάρχει νερό. Όταν, οι βραχόμαζες ανήκουν στις μέτριες έως πτωχές κατηγορίες και υπάρχει νερό τότε μετακινούμαστε προς τα δεξιά. Η υδροστατική πίεση λαμβάνεται υπόψη με την ανάλυση ενεργών τάσεων.</p>		<p>ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ</p> <p>ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ Πολύ τραχιές, μη αποσπασθωμένες επιφάνειες</p> <p>ΚΑΛΗ Τραχιές, ελαφρά αποσπασθωμένες και οξείδωμένες επιφάνειες</p> <p>ΜΕΤΡΙΑ Λείες, μετριώς αποσπασθωμένες και εξολεωμένες επιφάνειες</p> <p>ΠΤΩΧΗ Επιφάνειες ολίσθησης, πολύ αποσπασθωμένες με σημαντική επιφθορά ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη θραύσματα</p> <p>ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ Επιφάνειες ολίσθησης πολύ αποσπασθωμένες με μαλακό οργανικό υλικό πλήρωσης</p>				
ΔΟΜΗ		ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ				
	INTACT OR MASSIVE - Άρρηκτα βραχώδη τεμάχια ή άστρωτος βράχος με λίγες ασυνέχειες σε μεγάλη απόσταση	90			N/A	N/A
	BLOCKY - Αδιτάρακτη βραχόμαζα με πολύ καλό αλληλοκλείδωμα που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από τρεις ορθογώνια τεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών	80	70			
	VERY BLOCKY - Μερικώς διαταραγμένη βραχόμαζα με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια (blocks) που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών		60	50		
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - Πτυχωμένη με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από πολλές αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Εμμονή στρώσης ή σχιστότητας			40		
	DISINTEGRATED - Ισχυρά κερματισμένη βραχόμαζα με πτωχό αλληλοκλείδωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιωδών και αποστρογγυλωμένων τεμαχίων				30	
	LAMINATED/SHEARED - Φυλλώδης ή σχιστοποιημένη και τεκτονικώς διατηρημένη ασθενής βραχόμαζα. Η σχιστότητα επικρατεί έναντι οποιαδήποτε άλλης οικογένειας ασυνεχειών εμποδίζοντας την δημιουργία γωνιωδών τεμαχίων				20	
						10
		N/A	N/A			

**Σχήμα 3.3.1.1 : Ταξινόμηση της βραχόμαζας κατά το σύστημα GSI.**  
**Πηγή : Σημειώσεις Σχεδιασμού Υπογείων Έργων-Μ.Καββαδά (Μάρτιος 2005)**

Σκοπός της χρήσης του γεωλογικού δείκτη GSI, είναι η απομείωση των παραμέτρων του άρρηκτου βράχου  $\sigma_c$  και  $m_i$  που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των μηχανικών ιδιοτήτων της βραχόμαζας από τις εργαστηριακά προσδιορισμένες τιμές (πχ αντοχή σε μονοαξονική θλίψη δοκιμίου άρρηκτου βράχου) στις επιτόπου τιμές τους.

Σε ότι αφορά τη διαδικασία κατάταξης, από παρατηρήσεις δίνεται στη δομή της βραχόμαζας ένας χαρακτηρισμός που αντιστοιχεί σε μία από τις έξι κατηγορίες και ένας για τη ποιότητα των ασυνεχειών από τις πέντε κατηγορίες του πίνακα. Τελικώς ορίζεται ένα εύρος τιμών του δείκτη GSI για την υπό εξέταση βραχόμαζα.

## 3.4 Μηχανική συμπεριφορά της βραχόμαζας

### 3.4.1 Γενικά

Προκειμένου να σχεδιασθεί, να διανοιχθεί και να υποστηριχθεί ένα υπόγειο έργο πρέπει να προσδιοριστούν οι παράμετροι αντοχής των εδαφικών σχηματισμών και της βραχόμαζας που πρόκειται να εκσκαφτούν. Ο προσδιορισμός αυτών των μεγεθών πραγματοποιείται μέσω εργαστηριακών δοκιμών επί των υλικών και από επιτόπου δοκιμές και παρατηρήσεις στο χώρο του έργου.

### 3.4.2 Αστοχία βραχόμαζας

Τα αίτια που μπορούν να οδηγήσουν μία βραχόμαζα στην αστοχία οφείλονται στη φύση και τη δομή της. Οι ασυνέχειες, οι ρωγμές, οι πτυχώσεις, η σχιστότητα και τα ρήγματα που υπάρχουν μέσα στη μάζα της οδηγούν σε ένα υλικό ανομοιογενές και ανισότροπο που δημιουργεί δύσκολες συνθήκες κατά την εκσκαφή του. Η αστοχία οφείλεται σε δύο λόγους οι οποίοι περιγράφονται παρακάτω.

- **Διατμητική αστοχία**  
Το ύψος των υπερκειμένων σε συνδυασμό με τα μηχανικά χαρακτηριστικά της βραχόμαζας καθορίζουν τη πιθανότητα διατμητικής αστοχίας κατά ένα επίπεδο εντός της μάζας αυτής. Μίας τέτοιας μορφή αστοχία μπορεί να οδηγήσει σε δυσμενείς έως καταστρεπτικές καταστάσεις όπως τη δημιουργία ζώνης πλαστικοποίησης περιμετρικά από τη διατομή της σήραγγας, χαλάρωση και αποδιοργάνωση της βραχόμαζας, τη σύγκλιση των τοιχωμάτων της σήραγγας, ακόμα και την αστοχία των δομικών στοιχείων αυτής έως και τη κατάρρευση αυτής. Η διατμητική αστοχία των βραχωδών σχηματισμών ελέγχεται από κριτήρια όπως το κριτήριο Mohr-Coulomb, το κριτήριο Griffith, το ενεργειακό κριτήριο και το κριτήριο Hoek-Brown, που είναι ένα από τα πλέον διαδεδομένα και ευρέως εφαρμοσμένα κριτήρια. Το κριτήριο Hoek-Brown περιγράφεται παρακάτω.
- **Αστοχία κατά μήκος ασυνεχειών πτωχών μηχανικών ιδιοτήτων**  
Αστοχία σε μία βραχόμαζα επίσης μπορεί να προκύψει κατά μήκος ασυνεχειών πτωχής ποιότητας. Σε τέτοιες περιπτώσεις, οι ασυνέχειες διασταυρώνονται μεταξύ τους δημιουργώντας τεμάχια βράχου, κάποιες φορές σημαντικού βάρους, τα οποία πέφτουν υπό μορφή σφηνών από την οροφή του υπογείου έργου λόγω βαρύτητας ή ολισθαίνουν κατά μήκος αυτών από τα τοιχώματα της σήραγγας, λόγω της γεωμετρίας των ασυνεχειών και του προσανατολισμού τους, εφόσον δεν εμφανίζονται μεγάλες δυνάμεις τριβής που θα συγκρατούσαν τα τεμάχια στη θέση τους. Το πρόβλημα αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε περιπτώσεις αβαθών σηράγγων, όπου λόγω του μικρού βάρους των υπερκειμένων οι αναπτυσσόμενες οριζόντιες τάσεις ( $\sigma_h = k \cdot \sigma_v$ ) είναι και αυτές σχετικά μικρές για τη συγκράτηση των σφηνών οροφής. Η αστοχία αυτή ελέγχεται από το κριτήριο του Barton.

Προκειμένου να κατηγοριοποιηθούν οι βραχόμαζες ως προς τη μορφή αστοχίας που αναμένεται να εμφανίσουν, εκτιμάται ότι στις βραχόμαζες που είναι έντονα κερματισμένες κρίσιμη είναι η διατμητική μορφή αστοχίας, η οποία ελέγχεται κυρίως με το κριτήριο Hoek-Brown, ενώ για βραχόμαζες ελαφρά κερματισμένες η αστοχία κατά μήκος ασυνεχειών με πτωχής ποιότητας επιφάνειες είναι η πιο κρίσιμη και ελέγχεται με το κριτήριο του Barton. Στο σχήμα X που ακολουθεί παρουσιάζεται η παραπάνω διακριτοποίηση της βραχόμαζας βάσει του μηχανισμού αστοχίας που εκτιμάται ως ο πιο κρίσιμος.

### 3.4.3 Κριτήριο Αστοχίας κατά Hoek-Brown

Με το κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown (1980, 2002) γίνεται προσπάθεια για την απομείωση των ιδιοτήτων του άρρηκτου βράχου με τη δημιουργία και χρήση όρων και παραγόντων που λαμβάνουν υπόψη τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών της βραχόμαζας. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το κριτήριο αυτό θεωρεί τη βραχόμαζα ως ισότροπο υλικό.

Σύμφωνα με την έκδοση 2002 του κριτηρίου αντοχής Hoek-Brown, αυτό εκφράζεται με τη σχέση

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} * \left( m_b * \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (1)$$

όπου

- $\sigma_1$  και  $\sigma_3$  είναι οι κύριες τάσεις
- $\sigma_{ci}$  η αντοχή του άρρηκτου βράχου σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης
- $m_b$  η απομειωμένη σταθερά του υλικού, η οποία υπολογίζεται από τη σχέση

$$m_b = m_i * \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14 * D}\right) \quad (2)$$






- $s$  η σταθερά της βραχόμαζας η οποία υπολογίζεται από τη σχέση

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3 * D}\right) \quad (3)$$

- $a$  η σταθερά που υπολογίζεται από τη σχέση

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} * \left( e^{\frac{-GSI}{15}} - e^{\frac{-20}{3}} \right) \quad (4)$$

Ο συντελεστής  $D$  που εμφανίζεται στις παραπάνω σχέσεις εισάγει τη διαταραχή στην οποία υπόκειται η βραχόμαζα λόγω εκσκαφής με εκρηκτικές ύλες ή λόγω μείωσης των τάσεων. Οι τιμές που παίρνει ο συντελεστής κυμαίνεται από 0 έως 1 και στο σχήμα 3.4.3.1 που ακολουθεί φαίνονται οι περιπτώσεις χρήσης αυτού ανάλογα με τη ποιότητα της εκσκαφής.

Appearance of rock mass	Description of rock mass	Suggested value of $D$
	Excellent quality controlled blasting or excavation by Tunnel Boring Machine results in minimal disturbance to the confined rock mass surrounding a tunnel.	$D = 0$
	Mechanical or hand excavation in poor quality rock masses (no blasting) results in minimal disturbance to the surrounding rock mass.  Where squeezing problems result in significant floor heave, disturbance can be severe unless a temporary invert, as shown in the photograph, is placed.	$D = 0$  $D = 0.5$ No invert
	Very poor quality blasting in a hard rock tunnel results in severe local damage, extending 2 or 3 m, in the surrounding rock mass.	$D = 0.8$
	Small scale blasting in civil engineering slopes results in modest rock mass damage, particularly if controlled blasting is used as shown on the left hand side of the photograph. However, stress relief results in some disturbance.	$D = 0.7$ Good blasting  $D = 1.0$ Poor blasting
	Very large open pit mine slopes suffer significant disturbance due to heavy production blasting and also due to stress relief from overburden removal.  In some softer rocks excavation can be carried out by ripping and dozing and the degree of damage to the slopes is less.	$D = 1.0$ Production blasting  $D = 0.7$ Mechanical excavation

**Σχήμα 3.4.3.1 : Οδηγίες για την εκτίμηση του συντελεστή διαταραχής  $D$ .**  
**Πηγή : Hoek-Brown Failure Criterion 2002 Edition-Evert Hoek, Carlos Carranza-Torres, Brent Corkum**



Με την αντικατάσταση της τάσης  $\sigma_3=0$  στη σχέση (1) προκύπτει η αντοχή της βραχόμαζας σε μονοαξονική θλίψη :

$$\sigma_c = \sigma_{ci} * s^a \quad (5)$$

Η εφελκυστική αντοχή προκύπτει θέτοντας  $\sigma_1=\sigma_3=\sigma_t$  στη σχέση (1) :

$$\sigma_t = -\frac{s * \sigma_{ci}}{m_b} \quad (6)$$

Η σχέση αυτή παρουσιάζει μια κατάσταση διαξονικού εφελκυσμού. Ο E. Hoek έδειξε ότι για κερματισμένα υλικά η μονοαξονική αντοχή σε εφελκυσμό είναι ίση με τη διαξονική εφελκυστική αντοχή. Η τιμή της εφελκυστικής αντοχής δε μηδενίζεται ποτέ λόγω της αλληλεμπλοκής των τεμαχών. Για τη περίπτωση άρρηκτου βράχου το κριτήριο Hoek-Brown εκφράζεται από τη σχέση :

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} * \left( m_i * \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + 1 \right)^{0.5} \quad (7)$$

Επίσης υπολογίζεται και η αντοχή της βραχόμαζας από τη σχέση :

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} * \frac{[m_b + 4 * s - a * (m_b - 8 * s)] * (m_b / 4 + s)^{a-1}}{2 * (1 + a) * (2 + a)} \quad (8)$$

Η μονοαξονική αντοχή σε θλίψη του άρρηκτου βράχου  $\sigma_{ci}$  και η σταθερά του υλικού  $m_i$  προκύπτουν από τη πραγματοποίηση μονοαξονικών και τριαξονικών δοκιμών θλίψης αντίστοιχα, με τη σταθερά  $m_i$  να εκφράζει το αλληλοκλείδωμα των κόκκων των υλικών. Συνήθως οι τιμές προκύπτουν από πίνακες όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4.3.2 και 3.4.3.3 που ακολουθούν.

Grade*	Term	Uniaxial Comp. Strength (MPa)	Point Load Index (MPa)	Field estimate of strength	Examples
R6	Extremely Strong	> 250	>10	Specimen can only be chipped with a geological hammer	Fresh basalt, chert, diabase, gneiss, granite, quartzite
R5	Very strong	100 - 250	4 - 10	Specimen requires many blows of a geological hammer to fracture it	Amphibolite, sandstone, basalt, gabbro, gneiss, granodiorite, peridotite, rhyolite, tuff
R4	Strong	50 - 100	2 - 4	Specimen requires more than one blow of a geological hammer to fracture it	Limestone, marble, sandstone, schist
R3	Medium strong	25 - 50	1 - 2	Cannot be scraped or peeled with a pocket knife, specimen can be fractured with a single blow from a geological hammer	Concrete, phyllite, schist, siltstone
R2	Weak	5 - 25	**	Can be peeled with a pocket knife with difficulty, shallow indentation made by firm blow with point of a geological hammer	Chalk, claystone, potash, marl, siltstone, shale, rocksalt,
R1	Very weak	1 - 5	**	Crumbles under firm blows with point of a geological hammer, can be peeled by a pocket knife	Highly weathered or altered rock, shale
R0	Extremely Weak	0.25 - 1	**	Indented by thumbnail	Stiff fault gouge

\* Grade according to Brown (1981).

\*\* Point load tests on rocks with a uniaxial compressive strength below 25 MPa are likely to yield highly ambiguous results.

### Σχήμα 3.4.3.2 : Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου βράχου $\sigma_{ci}$ .

Πηγή : GSI : A Geological friendly tool for rock mass strength estimation-Paul Marinos, Evert Hoek

Rock type	Class	Group	Texture			
			Coarse	Medium	Fine	Very fine
SEDIMENTARY	Clastic		Conglomerates *	Sandstones 17 ± 4	Siltstones 7 ± 2	Claystones 4 ± 2
			Breccias *		Greywackes (18 ± 3)	Shales (6 ± 2) Marls (7 ± 2)
	Non-Clastic	Carbonates	Crystalline Limestone (12 ± 3)	Sparitic Limestones (10 ± 2)	Micritic Limestones (9 ± 2)	Dolomites (9 ± 3)
		Evaporites		Gypsum 8 ± 2	Anhydrite 12 ± 2	
	Organic				Chalk 7 ± 2	
METAMORPHIC	Non Foliated		Marble 9 ± 3	Hornfels (19 ± 4) Metasandstone (19 ± 3)	Quartzites 20 ± 3	
	Slightly foliated		Migmatite (29 ± 3)	Amphibolites 26 ± 6	Gneiss 28 ± 5	
	Foliated**			Schists 12 ± 3	Phyllites (7 ± 3)	Slates 7 ± 4
IGNEOUS	Plutonic	Light	Granite 32 ± 3	Diorite 25 ± 5	Granodiorite (29 ± 3)	
		Dark	Gabbro 27 ± 3	Norite 20 ± 5	Dolerite (16 ± 5)	
	Hypabyssal			Porphyries (20 ± 5)	Diabase (15 ± 5)	Peridotite (25 ± 5)
	Volcanic	Lava		Rhyolite (25 ± 5)	Dacite (25 ± 3)	Basalt (25 ± 5)
Pyroclastic		Agglomerate (19 ± 3)	Breccia (19 ± 5)	Tuff (13 ± 5)		

\* Conglomerates and breccias may present a wide range of  $m_i$  values depending on the nature of the cementing material and the degree of cementation, so they may range from values similar to sandstone, to values used for fine grained sediments (even under 10).

\*\* These values are for intact rock specimens tested normal to bedding or foliation. The value of  $m_i$  will be significantly different if failure occurs along a weakness plane.

### Σχήμα 3.4.3.3 : Τιμές της σταθεράς του υλικού $m_i$ .

Πηγή : GSI : A Geological friendly tool for rock mass strength estimation-Paul Marinos, Evert Hoek

Σημειώνεται ότι η διαφοροποίηση της έκδοσης του κριτηρίου Hoek-Brown του 2002 σε σχέση με το 1980, αφορά στη χρήση της σχέσης περιγραφής του κριτηρίου, η οποία πλέον χρησιμοποιείται ανεξάρτητα της τιμής του δείκτη GSI ή RMR, ενώ παλαιότερα η τιμή 25 αποτελούσε κομβικό σημείο αλλαγής της σχέσης, χωρίς βέβαια να παρατηρούνται μεγάλες διαφορές στα αποτελέσματα κατά τις δύο περιπτώσεις.

Επιπλέον υπολογίζεται το μέτρο ελαστικότητας της βραχόμαζας  $E_m$  από τη σχέση

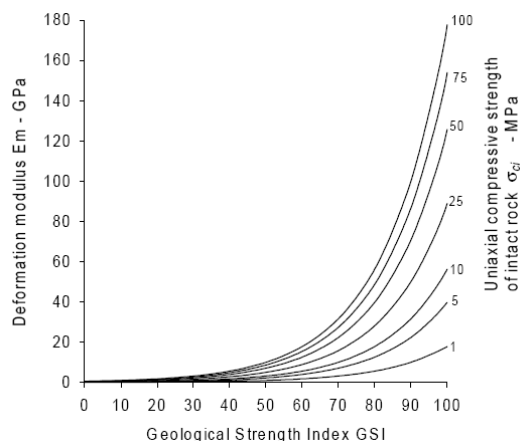
$$E_m (GPa) = \left(1 - \frac{D}{2}\right) * \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} * 10^{((GSI-10)/40)} \quad (9)$$

ενώ ο λόγος Poisson δίνεται προσεγγιστικά από τον πίνακα του σχήματος 3.4.3.4 που ακολουθεί. Επίσης στο σχήμα 3.4.3.5 παρουσιάζεται η σχέση του μέτρου ελαστικότητας της βραχόμαζας βάσει του δείκτη GSI.

Τύπος βραχόμαζας	Λόγος Poisson
Τεμαχώδης με καλή αλληλεμπλοκή των κόκκων χωρίς διαταραχή	0.20-0.25
Τεμαχώδης ελαφρώς διαταραγμένη	0.30-0.35
Διαταραγμένη, πτυχωμένη με γωνιώδη τεμάχια	0.35-0.40
Πολύ διαταραγμένη με γωνιώδη και στρογγυλεμένα τεμάχια	0.30-0.35
Τελείως εξαλλοιωμένη βραχόμαζα	0.25-0.30

**Σχήμα 3.4.3.4 : Τιμές του λόγου του Poisson  $\nu$  .**

**Πηγή : Σημειώσεις Σχεδιασμού Υπογείων Έργων-Μ.Καββαδά (Μάρτιος 2005)**



**Σχήμα 3.4.3.5 : Διάγραμμα του μέτρου ελαστικότητας  $E_m$  σε σχέση με το δείκτη GSI και την αντοχή του άρρηκτου βράχου .**

**Πηγή : GSI : A Geological friendly tool for rock mass strength estimation-Paul Marinos, Evert Hoek**

Ενώ το κριτήριο Hoek-Brown αντικατοπτρίζει τη πραγματική συμπεριφορά μίας βραχόμαζας, εντούτοις τα περισσότερα υπολογιστικά πακέτα που χρησιμοποιούνται εκτελούν τους υπολογισμούς τους βάσει του κριτηρίου Mohr-Coulomb. Για το λόγο αυτό με τη βοήθεια μαθηματικών σχέσεων και μεθόδων επιχειρείται η γραμμικοποίηση της περιβάλλουσας αστοχίας Hoek-Brown, ώστε να πλησιάσει τη γραμμική του κριτηρίου Mohr-Coulomb υπολογίζοντας τις ισοδύναμες παραμέτρους  $c$ ,  $\phi$  και  $\sigma_{cm}$ .

### **3.5 Εδαφικοί και βραχώδεις σχηματισμοί: Τα στοιχεία που τους χαρακτηρίζουν και οι δοκιμές που πραγματοποιούνται για το προσδιορισμό τους**

#### **3.5.1 Εισαγωγή**

Συνήθως γεωλογικοί χάρτες ή γεωλογικές μελέτες σε αστικά περιβάλλοντα είναι διαθέσιμες προς χρήση για τους υπεύθυνους για το έργο μηχανικούς. Αυτές οι πληροφορίες συνθέτουν μια πολύ χρήσιμη βάση προκειμένου να προσδιοριστούν και να βελτιστοποιηθούν συγκεκριμένες εδαφικές διερευνήσεις που θα πραγματοποιηθούν προκειμένου να ολοκληρωθεί η απαιτούμενη γνώση για τις εδαφικές συνθήκες που υπάρχουν στο περιβάλλον του τεχνικού έργου.

Οι πιο συνηθισμένες μέθοδοι που εφαρμόζονται στη πράξη είναι:

- Δειγματοληπτικές γεωτρήσεις
- Δοκιμές στην εκσκαμμένη τρύπα της γεώτρησης
- Εργαστηριακές δοκιμές σε δείγματα

Οι παρακάτω τεχνικές μπορεί να είναι επίσης απαραίτητες για το πλήρη προσδιορισμό των εδαφικών συνθηκών:

- Λήψη αεροφωτογραφιών ή με χρήση δορυφόρου
- Διερεύνηση σεισμικής συμπεριφοράς
- Χρήση ηλεκτρομαγνητικού radar
- Χρήση γεωλογικού radar
- Εφαρμογή ηλεκτρογεωλογικών μεθόδων

Οι παραπάνω τεχνικές πλαισιώνονται από επί τόπου δοκιμές (in situ tests) και παρατήρηση κατά τη διάρκεια της διάνοιξης της σήραγγας.

Προσδιορίζοντας τη φύση των γεωυλικών που πρόκειται να εκσκαφθούν θα πρέπει να πραγματοποιηθούν οι ακόλουθες διερευνήσεις:

- Προσδιορισμός των εδαφικών παραμέτρων σε περίπτωση μαλακού (εδαφικού) σχηματισμού ή των παραμέτρων και ιδιοτήτων της βραχώμαζας σε περίπτωση σκληρού σχηματισμού (βράχος)
- Προσδιορισμός του αρχικού εντατικού πεδίου
- Μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων των γεωυλικών
- Προσδιορισμός του καθεστώτος υπογείων υδάτων στο χώρο του έργου και τα υδραυλικά χαρακτηριστικά των γεωυλικών

#### **3.5.2 Διάνοιξη σήραγγας σε εδαφικό (μαλακό) σχηματισμό**

Οι μηχανές διάνοιξης σήραγγων TBM που χρησιμοποιούνται σε εδαφικούς (μαλακούς) σχηματισμούς χωρίζονται σε δύο κύριους τύπους συστημάτων:

1. Συστήματα μηχανών πολφού μπετονίτη με ασπίδα (Slurry Shield) SS TBMs και μηχανών με ασπίδα εξισορρόπησης του εδάφους ( Earth Pressure Balance) EPB TBMs
2. Συστήματα ανοικτού και κλειστού μετώπου

Επίσης είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν μηχανήματα διάνοιξης σήραγγων με ασπίδα μικτού τύπου (Mixshield TBM), τα οποία υπό τη μεταβολή των εδαφικών συνθηκών μπορούν να λειτουργήσουν είτε ως EPB TBM είτε ως STBM, ανοικτού ή κλειστού μετώπου.

Τα χαρακτηριστικά του εδάφους, τα οποία πρέπει να προσδιοριστούν, ώστε να γίνει η εκλογή του κατάλληλου μηχανήματος TBM είναι:

- Η πυκνότητα αυτού υπό κορεσμένες και ξηρές συνθήκες
- Το ποσοστό υγρασίας
- Η κοκκομετρική διαβάθμιση
- Ο δείκτης πόρων
- Τα όρια Atterberg όταν εμπεριέχεται άργιλος
- Το μέτρο ελαστικότητας E και ο λόγος του Poisson  $\nu$
- Η συνοχή
- Η διαπερατότητα
- Η γωνία τριβής
- Η αστράγγιστη διατμητική αντοχή
- Η δυνατότητα διόγκωσης του εδαφικού υλικού
- Προσδιορισμός πιεζομετρικής γραμμής και στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα

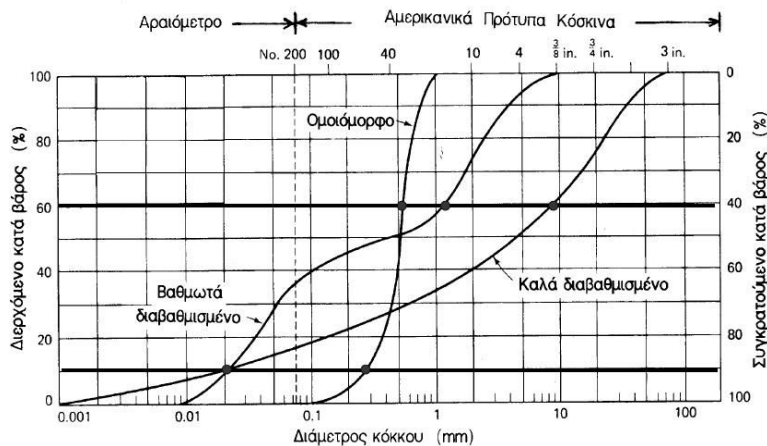
### 3.5.3 Προσδιορισμός της κοκκομετρικής διαβάθμισης εδαφικού υλικού

Τα εδαφικά υλικά παρουσιάζουν πολύ μεγάλη ποικιλία σε ότι αφορά το μέγεθος των κόκκων από τους οποίους συνθέτονται, επηρεάζοντας τη φύση, τις μηχανικές και άλλες ιδιότητες αυτών. Ο προσδιορισμός της κατανομής του μεγέθους των κόκκων γίνεται για να μη συνεκτικά εδαφικά υλικά (χάλικες και άμμους) με τη λεγόμενη κοκκομετρική ανάλυση με χρήση κοσκίνων. Για τα συνεκτικά υλικά, όπως ιλεις και αργίλους, εφαρμόζεται η μέθοδος του αραιομέτρου. Η ανάλυση με κόσκινα πραγματοποιείται με μηχανική δόνηση του δείγματος διαμέσου σειράς κοσκίνων με βαθμιαία μικρότερη διάσταση οπής. Το υλικό που συγκεντρώνεται σε κάθε κόσκινο ζυγίζεται και προσδιορίζεται έτσι το ποσοστό του διερχόμενου υλικού. Οι πρότυπες διαστάσεις οπής των κοσκίνων ποικίλουν. Στην Ελλάδα χρησιμοποιούνται κόσκινα που ακολουθούν την Αμερικάνικη προδιαγραφή ASTM D422-1980. Ο κωδικός και η διάσταση της οπής παρατίθενται στο παρακάτω σχήμα 3.5.3.1. Το κόσκινο No200 αντιστοιχεί στο συμβατικό όριο μεταξύ άμμων και ιλύων, συνεπώς για εδαφικά υλικά μεγέθους κόκκων μικρότερο από αυτό εφαρμόζεται η μέθοδος του αραιομέτρου. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στο νόμο του Stokes για την κίνηση σφαιρών σε ιξώδες ρευστό με την επίδραση της βαρύτητας, σύμφωνα με τον οποίο η οριακή ταχύτητα καθίζησης εξαρτάται από τη διάμετρο και την πυκνότητα του υλικού των σφαιρών, την πυκνότητα του ρευστού και το ιξώδες του. Κατά την εφαρμογή της πειραματικής διαδικασίας μετράται η πυκνότητα του μείγματος νερού- εδάφους σε διάφορους χρόνους και προσδιορίζεται η πυκνότητα καταβύθισης των κόκκων του εδαφικού υλικού από την οποία και προκύπτει η κατανομή του μεγέθους των κόκκων. Από τις μετρήσεις αυτές συνθέεται η κοκκομετρική καμπύλη του υλικού σε λογαριθμική κλίμακα όπως αυτή φαίνεται στο σχήμα 3.5.3.2.

Αμερικανική σειρά κοσκίνων  
κατά ASTM

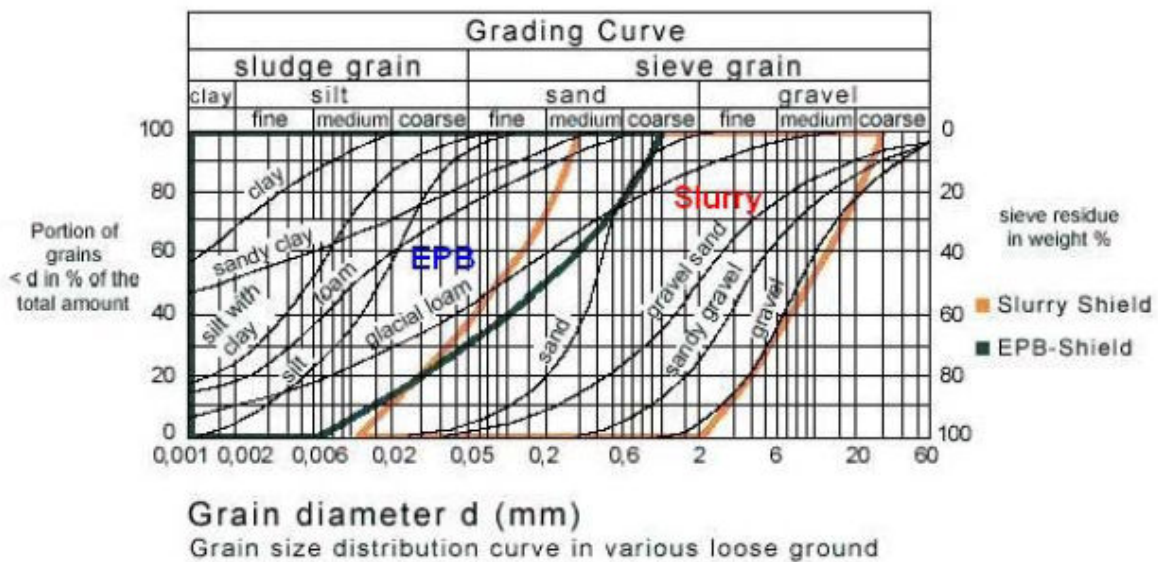
Κόσκινο	Μέγεθος οπής (mm)
2"	50.8
1+1/2"	38.1
1"	25.4
3/4"	19.0
1/2"	12.7
1/4"	6.35
No 4	4.75
No 10	2.00
No 20	0.85
No 40	0.425
No 60	0.25
No 100	0.15
No 140	0.106
No 200	0.075

**Σχήμα 3.5.3.1: Αμερικάνικη σειρά κοσκίνων κατά ASTM**  
**Πηγή: Στοιχεία Εδαφομηχανικής-Μ.Καββαδά**



**Σχήμα 3.5.3.2 : Παρουσίαση κοκκομετρικών καμπυλών σε λογαριθμικό διάγραμμα**  
**Πηγή: Στοιχεία Εδαφομηχανικής-Μ.Καββαδά**

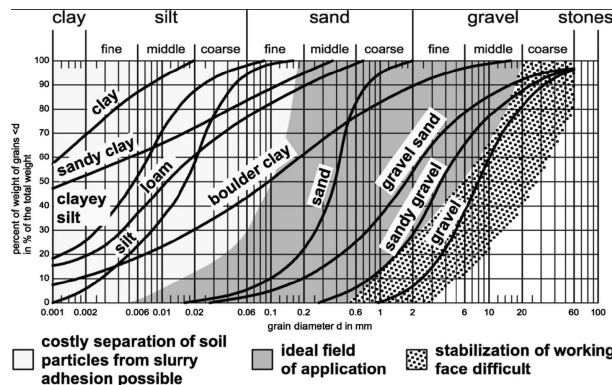
Η κοκκομετρική ανάλυση του εδαφικού υλικού, μέσα στο οποίο πρόκειται να διανοιχτεί η σήραγγα, είναι πολύ σημαντική καθώς επηρεάζει άμεσα την επιλογή του κατάλληλου μηχανήματος και πιο συγκεκριμένα την επιλογή ανάμεσα σε μηχάνημα EPB TBM ή SS TBM όπως φαίνεται και από το σχήμα 3.5.3.3, όπου παρουσιάζονται οι συνιστάμενες περιοχές λειτουργίας για τους δύο αυτούς τύπους μηχανημάτων από το νομογράφημα της εταιρείας Herrenknecht. Από το νομογράφημα του σχήματος 3.5.3.3 φαίνεται πως τα μηχανήματα Slurry Shield TBM είναι κατάλληλα για διηθούμενες άμμοις και αμμοχάλικα, ενώ για εδαφικά υλικά που περιέχουν σε μεγάλο ποσοστό λεπτόκοκκα υλικά (άργιλος, ιλύ, λεπτόκοκκη άμμο) η διάνοιξη αντιμετωπίζεται με μεγαλύτερη ευχέρεια από τα μηχανήματα EPB TBM.



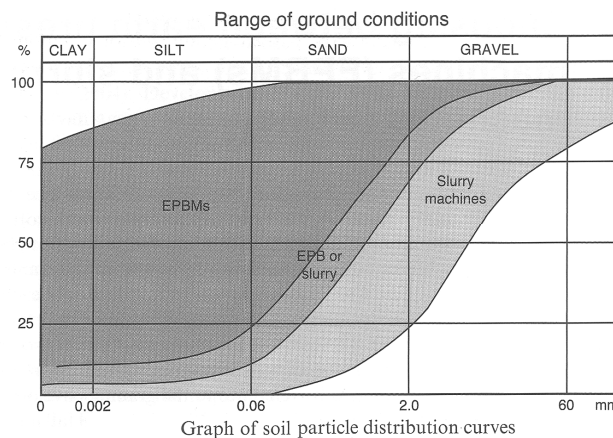
**Σχήμα 3.5.3.3 :Σχετική κοκκομετρική διαβάθμιση για μηχάνημα EPB ή Slurry TBM**  
**Πηγή: Herrenknecht (2001)**

Ένα μηχάνημα πολφού μετονίτη με ασπίδα SS TBM είναι ιδανικό για χονδρόκοκκα εδαφικά υλικά διότι μπορούν να διαχωριστούν εύκολα στη διάταξη διαχωρισμού του υλικού του μηχανήματος σε αντίθεση με τα αργιλοιλιάδη υλικά που περιέχουν σημαντικό ποσοστό λεπτόκοκκων, όπου και ένα μηχάνημα εξισορρόπησης της πίεσης του εδάφους EPB TBM υπερτερεί αφού το εδαφικό υλικό στη περίπτωση αυτή βοηθάει στη δημιουργία στεγανών συνθηκών στον ελικοειδή μετακομιστή (screw conveyor) οπότε και στον έλεγχο των εισροών

υπόγειων νερών. Άλλα νομογραφήματα σε ότι αφορά τη κοκκομετρική διαβάθμιση που χρησιμοποιούνται είναι αυτό κατά τον Maidl (1995) στο σχήμα 3.5.3.4 και κατά της Βρετανικής Κοινότητας Σηράγγων (British Tunneling Society) (2005) στο σχήμα 3.5.3.5 που ακολουθούν.



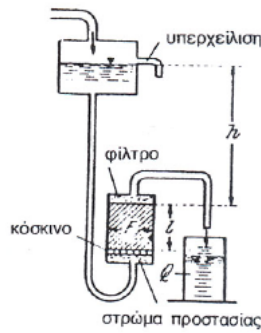
**Σχήμα 3.5.3.4 : Σχετική κοκκομετρική διαβάθμιση για μηχανήμα Slurry TBM**  
 Πηγή: *Geological constraints and geotechnical issues in mechanized tunneling-P. Marinos (Torino2009)*



**Σχήμα 3.5.3.5 : Σχετική κοκκομετρική διαβάθμιση για μηχανήμα Slurry TBM**  
 Πηγή: *Geological constraints and geotechnical issues in mechanized tunneling-P. Marinos (Torino2009)*

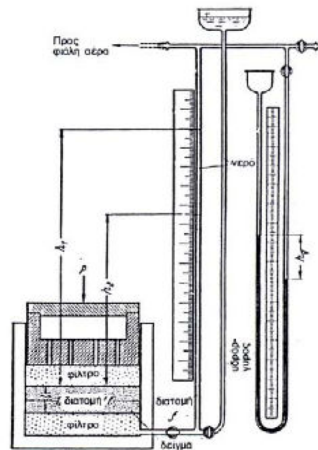
### 3.5.4 Προσδιορισμός της διαπερατότητας εδαφικού υλικού

Για το προσδιορισμό της διαπερατότητας ενός εδαφικού υλικού, της ικανότητας δηλαδή του νερού να διέρχεται εύκολα ή δύσκολα και σε ποιο βαθμό μέσα από τη μάζα του, εφαρμόζονται επίσης επί τόπου δοκιμές όπως είναι η δοκιμή εισπιάσεων και εργαστηριακές, επί αδιατάρακτων δειγμάτων, δοκιμές με χρήση διαπερατομέτρου σταθερού ή μεταβλητού υδραυλικού φορτίου. Κατά τις δυο εργαστηριακές δοκιμές αρχικά μορφώνεται το εδαφικό δοκίμιο. Έπειτα το δοκίμιο τοποθετείται μέσα στη συσκευή του διαπερατομέτρου όπως αυτή παρουσιάζεται στο σχήμα 3.5.4.1, όπου παρουσιάζεται ένα διαπερατόμετρο σταθερού υδραυλικού φορτίου.



**Σχήμα 3.5.4.1: Διαπερατόμετρο σταθερού υδραυλικού φορτίου**  
**Πηγή: [www.geo.auth.gr/758/PDF/2.pdf](http://www.geo.auth.gr/758/PDF/2.pdf)**

Κατά τη δοκιμή με σταθερό υδραυλικό φορτίο, η συσκευή τροφοδοτείται με σταθερή υδατική παροχή και με δεδομένα τη διαφορά του υδραυλικού ύψους, το μήκος και το εμβαδόν διατομής του εδαφικού δοκιμίου μετράται η διαπερατότητα  $k=(Q \cdot L)/(A \cdot \Delta h)$ . Κατά τη δοκιμή μεταβλητού υδραυλικού φορτίου η αρχή λειτουργίας είναι η ίδια με αυτή της δοκιμής του σταθερού υδραυλικού φορτίου όμως η παροχή  $Q$  και το υδραυλικό ύψος  $h$  είναι συνάρτηση του χρόνου (σχήμα 3.5.4.2).



**Σχήμα 3.5.4.2 : Διαπερατόμετρο μεταβλητού υδραυλικού φορτίου**  
**Πηγή: [www.geo.auth.gr/758/PDF/2.pdf](http://www.geo.auth.gr/758/PDF/2.pdf)**

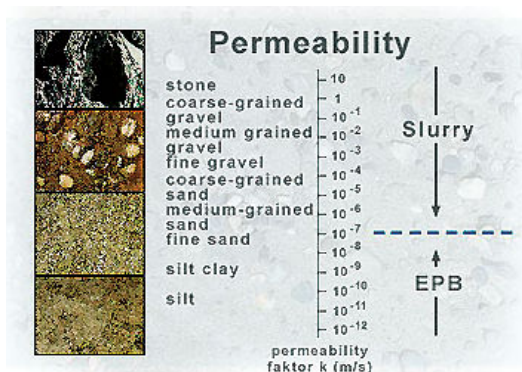
Η δοκιμή εισπίεσεων όπως αναφέρθηκε παραπάνω αποτελεί μία επί τόπου δοκιμή για το προσδιορισμό της διαπερατότητας ενός εδαφικού υλικού. Η διαπερατότητα του υλικού εκτιμάται από τη μέτρηση απορρόφησης νερού γύρω από μία γεώτρηση κατά την εισπίεση νερού στο εσωτερικό της. Εφαρμόζονται ευρύτατα σε μελέτες στεγανότητας υποβάθρου τεχνικών έργων και προβλήματα αποστραγγίσεων. Οι δοκιμές εισπίεσεων χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες οι οποίες είναι:

1. Δοκιμές σταθερού φορτίου όπου μετριέται η ποσότητα νερού που διοχετεύεται προκειμένου να διατηρηθεί κάποια σταθερή στάθμη (φόρτιση) πάνω από το δοκιμαζόμενο τμήμα της γεώτρησης (δοκιμή Lefranc-κατάσταση ισορροπίας).
2. Δοκιμές πίπτοντος ή μεταβλητού φορτίου όπου σε αυτές διοχετεύεται νερό μέσα στη γεώτρηση και μετριέται ο χρόνος που χρειάζεται για να κατέβει η νέα πιο ψηλή στάθμη που δημιουργήθηκε σε μια πιο χαμηλή θέση (δοκιμή Maag-κατάσταση μη ισορροπίας).
3. Δοκιμές αποστολής του νερού με πίεση σε τμήμα της γεώτρησης απομονωμένο μεταξύ παρεμβύσματος (racker) και πυθμένα ή μεταξύ δυο παρεμβυσμάτων. Μετριέται η ποσότητα νερού που απορροφάται σε συνάρτηση με τη πίεση εισπίεσεων του νερού (δοκιμή Lugeon).



Οι δυο πρώτες δοκιμές είναι καταλληλότερες για πετρώματα και ομοιογενή εδάφη με τη δεύτερη να χρησιμοποιείται συχνότερα σε εδάφη μικρής διαπερατότητας. Κυρίως χρησιμοποιούνται σε χαλαρά ή μικρής συνεκτικότητας εδάφη. Η δοκιμή Lugeon είναι καταλληλότερη για δοκιμές περατότητας σε βραχομαζες και εδάφη μεγάλης συνεκτικότητας όταν μπορούν να αντέξουν στις απαραίτητες πιέσεις της μεθόδου.

Από πλευράς διαπερατότητας, τα μηχανήματα Slurry Shield TBM θεωρούνται ως η καταλληλότερη λύση για εδαφικά υλικά διαπερατότητας μεγαλύτερης από  $1 \cdot 10^{-7}$  m/s. Για διαπερατότητες μικρότερες από αυτή τα συνιστώμενα μηχανήματα είναι τα EPB TBM βάσει του σχήματος 3.5.4.3 από την εταιρεία Herrenknecht.



**Σχήμα 3.5.4.3 :Πεδίο εφαρμογής των ασπιδοφόρων μηχανών Slurry και EPB σε σχέση με τη υδατοπερατότητα του εδάφους**  
**Πηγή: Herrenknecht (2001)**

### 3.5.5 Προσδιορισμός των ορίων Atterberg και του ποσοστού υγρασίας

Τα συνεκτικά υλικά μπορούν να διακριθούν σε τέσσερις καταστάσεις στις οποίες μπορούν να μεταπίπτουν ανάλογα με τη μείωση την αύξηση του ποσοστού υγρασίας :

1. Εύθρυπτο στερεό: Η συμπεριφορά του είναι ανάλογη με άλλα ψαθυρά υλικά
2. Ημιστερεό: Μεταβατική κατάσταση ανάμεσα στο εύθρυπτο στερεό και το πλάστιμο στερεό με ενδιάμεσα χαρακτηριστικά
3. Πλάστιμο στερεό: Το υλικό υφίσταται σημαντικές πλαστικές παραμορφώσεις χωρίς ρηγματώσεις και θραύση
4. Παχύρευστο υγρό: Το υλικό δε μπορεί να αναλάβει διατμητικές τάσεις χωρίς συνεχιζόμενη παραμόρφωση.

Τα ποσοστά υγρασίας που αντιστοιχούν στα όρια μεταξύ των παραπάνω τεσσάρων καταστάσεων ονομάζονται αντίστοιχα (σχήμα 3.5.5.1) :

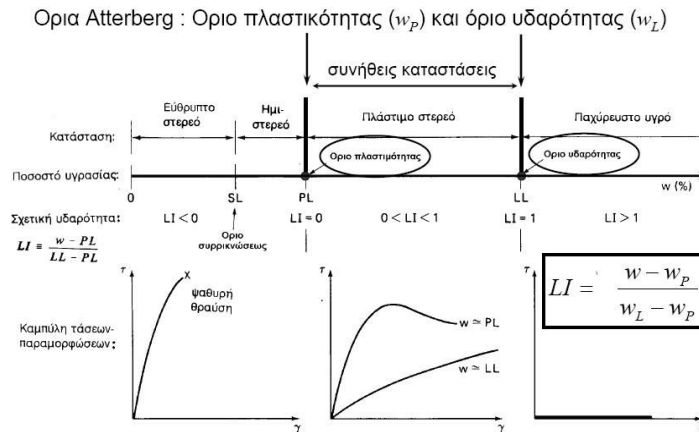
1. Όριο συρρίκνωσης SL
2. Όριο πλασιμότητας PL
3. Όριο υδαρότητας LL

και αποτελούν χαρακτηριστικές ιδιότητες κάθε συνεκτικού υλικού. Το όριο υδαρότητας ορίζεται ως το ποσοστό υγρασίας στο οποίο τα χείλη μια σχισμής που έχει δημιουργηθεί σε δείγμα του εδαφικού υλικού στη συσκευή του Casagrande (σχήμα 3.5.5.2) κλείνουν μετά από 25 πτώσεις της κάνας πάνω στην ειδική βάση. Το όριο πλασιμότητας ορίζεται ως το ποσοστό υγρασίας στο οποίο επιμήκη στοιχεία από το εδαφικό μας υλικό θρυμματίζονται όταν η διάμετρος τους γίνει 3 mm. Το όριο συρρίκνωσης ορίζεται ως το ποσοστό υγρασίας που αρκεί για να πληρώσει τα κενά του ξηρού εδαφικού υλικού, δηλαδή το ποσοστό υγρασίας του οποίου περεταίρω μείωση δεν οδηγεί σε μείωση του όγκου του εδαφικού υλικού.

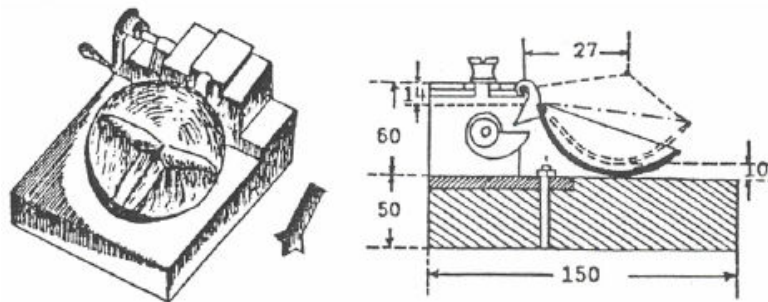
Βάσει των ανωτέρω ορίων ορίζονται και ο δείκτης πλασιμότητας που ορίζεται ως  $PI=LL-PL$  και εκφράζει το εύρος της πλάστιμης περιοχής στην οποία το εδαφικό υλικό συμπεριφέρεται σαν πλάστιμο στερεό και ο δείκτης σχετικής υδαρότητας που ορίζεται ως  $LI=(w-PL)/(LL-PL)$  που εκφράζει τη σχέση του πραγματικού ποσοστού υγρασίας ως προς το όριο υδαρότητας. Το ποσοστό υγρασίας ορίζεται ως ο λόγος της μάζας του νερού των πόρων

προς τη μάζα των στερεών κόκκων. Στο εργαστήριο προσδιορίζεται από ένα δείγμα εδάφους το οποίο ζυγίζεται στη φυσική του κατάσταση  $M_1$ . Εν συνεχεία και αφού ξηραθεί σε κατάλληλο κλίβανο, ώστε να εξατμισθεί το σύνολο του νερού των πόρων  $M_2$  το ποσοστό υγρασίας υπολογίζεται από τη σχέση

$$w = (M_1 - M_2) / M_2 * 100$$



Σχήμα 3.5.5.1 :Ορια Atterberg  
Πηγή: Στοιχεία Εδαφομηχανικής-Μ.Καββαδά



Σχήμα 3.5.5.2 : Η συσκευή του Casagrande για το προσδιορισμό του ορίου υδαρότητας  
Πηγή: [www.geo.auth.gr/758/PDF/2.pdf](http://www.geo.auth.gr/758/PDF/2.pdf)

Ο προσδιορισμός των ορίων Atterberg είναι καθοριστικής σημασίας για την εκλογή του κατάλληλου μηχανήματος εκσκαφής TBM όταν η σήραγγα πρόκειται να διανοιχτεί σε συνεκτικούς κυρίως εδαφικούς σχηματισμούς. Μεγάλος δείκτης πλασιμότητας PI σε αργιλικά εδάφη (κολλώδεις άργιλοι) μπορεί να προκαλέσει προσκόλληση του εδαφικού υλικού πάνω στη κοπτική κεφαλή του μηχανήματος κατά τη διάρκεια της εκσκαφής και αυξημένα προβλήματα κατά τη διάρκεια του διαχωρισμού του εδαφικού υλικού STBMs. Παρόμοιας φύσης προβλήματα ενδέχεται να δημιουργηθούν και σε EPBMs, όπου ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην επιλογή των κατάλληλων προσθέτων.

### 3.5.6 Προσδιορισμός των εκτιμώμενων καθιζήσεων

Τόσο τα EPB TBMs όσο και τα STBMs είναι εξίσου ικανά σε ότι αφορά τον έλεγχο των επιφανειακών καθιζήσεων και των μετακινήσεων του εδάφους στο εσωτερικό της σήραγγας. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της ελάχιστης διατάραξης που τα μηχανήματα αυτά επιβάλλουν στο εδαφικό υλικό κατά τη διάνοιξη της σήραγγας, με την προϋπόθεση ότι οι χειρισμοί που απαιτούνται κατά τη διάρκεια λειτουργίας τους είναι σωστοί ώστε να μην υπάρχει ο κίνδυνος μεγάλων συγκλίσεων και επιφανειακών υποχωρήσεων.

Η εκτίμηση των καθιζήσεων αυτών είναι πάρα πολύ σημαντική καθώς επηρεάζει άμεσα την ύπαρξη υφιστάμενων κατασκευών στην εδαφική επιφάνεια και τη σωστή λειτουργία του TBM, αλλά για το λόγο που αναφέρθηκε ο έλεγχος των καθιζήσεων μπορεί να μην είναι τόσο αποφασιστικός παράγοντας στην εκλογή του κατάλληλου μηχανήματος τόσο όσο το κόστος που σχετίζεται με την ελαχιστοποίηση των καθιζήσεων. Για παράδειγμα κατά τη διάνοιξη της σήραγγας σε κάποιο χαλαρό, κοκκώδες εδαφικό υλικό ενδέχεται να απαιτούνται μεγάλες ποσότητες πρόσθετων προκειμένου να μειωθεί ο κίνδυνος υπερεκσκαφής και ελέγχου των καθιζήσεων αν χρησιμοποιείται ένα EPB TBM.

Η εκτίμηση των καθιζήσεων γίνεται διαμέσου του προσδιορισμού των υπερκείμενων, επιβαλλόμενων φορτίων που δημιουργούν ένα εντατικό πεδίο στον άξονα της σήραγγας και των παραμέτρων παραμορφωσιμότητας του εδαφικού υλικού. Ο προσδιορισμός των υπερκείμενων φορτίων γίνεται μέσω του υπολογισμού της πυκνότητας (ξηρής και κορεσμένης) των εδαφικών υλικών του περιβάλλοντος της σήραγγας και του προσδιορισμού του ύψους των υπερκείμενων μέσω γεωτρήσεων. Ο προσδιορισμός της κορεσμένης και ξηρής πυκνότητας πραγματοποιείται με εργαστηριακές δοκιμές. Αρχικά προσδιορίζεται η πυκνότητα των στερεών κόκκων  $\rho_s$  που ορίζεται ως  $\rho_s = M_s/V_s$ , ο λόγος δηλαδή της μάζας των στερεών κόκκων προς τον όγκο των στερεών που μετράται έπειτα από ξήρανση του υλικού που έχει ληφθεί από τη δειγματοληπτική γεώτρηση ακολουθώντας της μεθόδους ανάλογα με τη φύση και σύσταση του εδαφικού μας υλικού. Οι κατηγορίες στις οποίες διαχωρίζονται είναι οι εξής τρεις:

- Λεπτόκοκκοι εδαφικοί σχηματισμοί, που περιλαμβάνουν αργιλοϊλυώδη εδάφη
- Χονδρόκοκκοι εδαφικοί σχηματισμοί αργιλοϊλυωδών άμμων
- Καθαρά αμμώδη ή αμμοχαλικώδη εδάφη, με λεπτούς χάλικες

Και αντίστοιχα οι μέθοδοι που εφαρμόζουμε είναι οι :

- Μέθοδος της μικρής φιάλης (bottle method)
- Μέθοδος της μεγάλης φιάλης (flask method)
- Μέθοδος πυκνόμετρου

Όταν το παραπάνω μέγεθος δε προσδιορίζεται πειραματικά τότε υπάρχει δυνατότητα να ληφθεί από εμπειρικούς πίνακες. Ταυτόχρονα υπάρχει η δυνατότητα να προσδιοριστεί και ο δείκτης πόρων καθώς μετράται ο όγκος των κενών και ο όγκος των στερεών κόκκων. Ο δείκτης πόρων ορίζεται ως ο λόγος των δυο μεγεθών  $e = V_v/V_s$ . Εργαστηριακά ο δείκτης πόρων προσδιορίζεται μετρώντας το ύψος  $h$  του υπό εξέταση δείγματος, το ύψος στερεών του δείγματος  $h_s$ , που ορίζεται ως το βάρος των στερεών κόκκων προς την επιφάνεια του δείγματος επί τη πυκνότητα των στερεών κόκκων, οπότε  $e = (h - h_s) / h_s$ . Με διαθέσιμους το δείκτη πόρων και τη πυκνότητα των στερεών κόκκων, από τις εργαστηριακές δοκιμές, προσδιορίζουμε τη ξηρή πυκνότητα του εδαφικού υλικού ως

$$\rho_d = \rho_s / (1 + e)$$

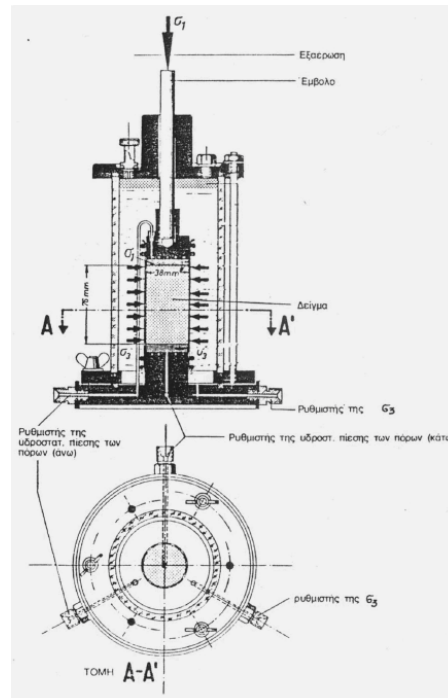
και η πυκνότητα του κορεσμένου εδαφικού υλικού ως

$$\rho_{sat} = (\rho_s + e * \rho_w) / (1 + e)$$

όπου  $\rho_w$  η πυκνότητα του νερού.

Το μέτρο ελαστικότητας ενός εδαφικού υλικού μπορεί να προσδιοριστεί είτε από δοκιμές στο εργαστήριο επί δειγμάτων από τις γεωτρήσεις είτε από επί τόπου (in situ) δοκιμές. Εργαστηριακές δοκιμές που συχνά εκτελούνται προς το προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας  $E$  και το λόγου του Poisson  $\nu$  είναι η δοκιμή απευθείας διάτμησης, η κυλινδρική αξονοσυμμετρική, υπό αστράγγιστες ή μη συνθήκες τριαξονική συμπίεση.

Η δοκιμή εκτελείται σε μια συσκευή κυλινδρικής τριαξονικής φόρτισης όπως αυτή που φαίνεται στο σχήμα 3.5.6.1 . Αρχικά μορφώνεται το δοκίμιο σε κυλινδρικό σχήμα με λόγο διαστάσεων ύψος προς διάμετρο από 2 μέχρι 3. Έπειτα το εδαφικό δοκίμιο περιβάλλεται από μία αδιαπέρατη, ελαστική μεμβράνη ενώ στη βάση και τη κεφαλή του τοποθετούνται άκαμπτοι, πορώδεις δίσκοι. Το δοκίμιο τοποθετείται μέσα στη κυψέλη της τριαξονικής συσκευής, η οποία στη συνέχεια πληρώνεται με νερό υπό ελεγχόμενη πίεση. Εν συνεχεία το κεντρικό έμβολο της κυψέλης μπορεί να κινηθεί κατά τη κατακόρυφη διεύθυνση και να συμπιέσει το δοκίμιο υπό την επίδραση εξωτερικού φορτίου επιβάλλοντας έτσι τελικά ένα εντατικό πεδίο στο υπό εξέταση δοκίμιο. Μέσω της βαλβίδας στράγγισης επιτυγχάνεται να έχουμε αστράγγιστες ή μη συνθήκες φόρτισης.



**Σχήμα 3.5.6.1 : Συσκευή δοκιμής τριαξονικής θλίψης**  
**Πηγή: [www.geo.auth.gr/758/PDF/2.pdf](http://www.geo.auth.gr/758/PDF/2.pdf)**

Με τον τρόπο αυτό από τις επιβαλλόμενες τάσεις και παραμορφώσεις, που καταγράφονται συνεχώς μέσω ειδικών οργάνων της συσκευής, λαμβάνονται οι αστράγγιστες και στραγγιζόμενες παράμετροι ελαστικότητας  $E$ ,  $\nu$  του υπό εξέταση εδαφικού υλικού μέσω των σχέσεων:

Στραγγισμένες δοκιμές:

$$dt/d\varepsilon_1 = E/2$$

όπου  $t = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$  η μέγιστη διατμητική τάση που ασκείται στο δοκίμιο (ακτίνα του κύκλου Mohr) και  $\sigma_1$  και  $\sigma_3$  η μέγιστη και ελάχιστη κύρια τάση.  $\varepsilon_1$  είναι η παραμόρφωση κατά το κατακόρυφο άξονα.

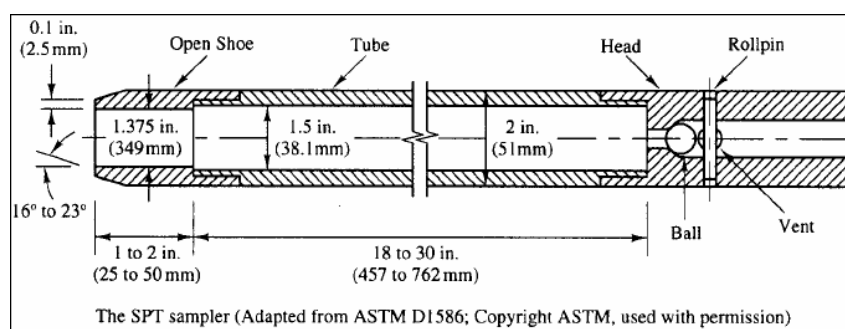
$$d\varepsilon_{vol} / d\varepsilon_1 = 1 - 2\nu$$

όπου  $\varepsilon_{vol}$  είναι η ογκομετρική παραμόρφωση του δοκιμίου.

Αστράγγιστες δοκιμές:

$dt/de_1 = E_u/2$  όπου  $E_u$  το αστράγγιστο μέτρο ελαστικότητας.

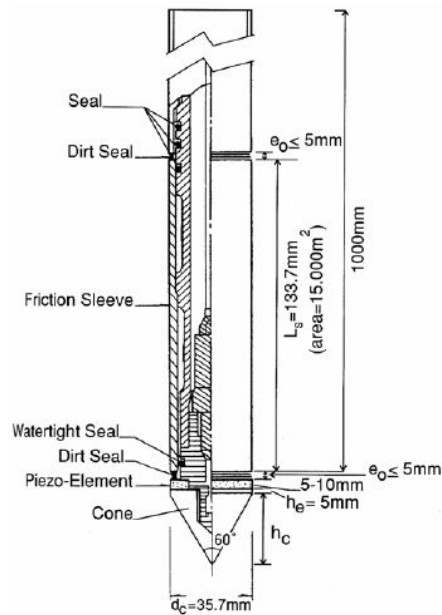
Πέρα από τις εργαστηριακές δοκιμές που εκτελούνται, πραγματοποιούνται και επί τόπου δοκιμές (in situ) στο χώρο που εκτελείται το τεχνικό έργο. Οι δοκιμές αυτές περιλαμβάνουν τη δοκιμή πρότυπης διείσδυσης (standard penetration test) SPT, τη δοκιμή διείσδυσης κώνου (cone penetration test) CPT, τη δοκιμή φορτίου επί πλάκας και δοκιμή πρεσσιόμετρου. Οι μέθοδοι αυτές ελέγχουν τις ιδιότητες του εδάφους στη φυσική του κατάσταση δίχως να παρεμβληθεί η διαδικασία της δειγματοληψίας, που διαταράσσει τη δομή του εδαφικού στοιχείου, ενώ υπάρχει έλεγχος των ιδιοτήτων του εδάφους με το βάθος μέσω συνεχόμενων καταγραφών. Βασικό μειονέκτημα των μεθόδων αυτών είναι το ανομοιογενές και πολλές φορές άγνωστο εντατικό πεδίο το οποίο επιβάλλουν. Αυτό κάνει την ερμηνεία των αποτελεσμάτων των δοκιμών αυτών δυσχερή και συνήθως βασίζεται σε εμπειρικές συσχετίσεις. Η πιο διαδεδομένη δοκιμή που πραγματοποιείται είναι η δοκιμή πρότυπης διείσδυσης SPT όχι τόσο για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων της όσο για το πλήθος των εμπειρικών συσχετίσεων που υπάρχουν μεταξύ των αποτελεσμάτων της δοκιμής με διάφορες μηχανικές ιδιότητες των εδαφικών υλικών. Η δοκιμή βασίζεται στη προχώρηση του ειδικού, διαιρετού δειγματολήπτη Terzaghi (σχήμα 3.5.6.2) με πτώση βάρους 63.5 Kg από ύψος 0.76m.



**Σχήμα 3.5.6.2 : Δειγματολήπτης Terzaghi**

**Πηγή: Notes on the STANDARD PENETRATION TEST-Advanced Engineering Geology & Geotechnics-Missouri University of Science and Technology**

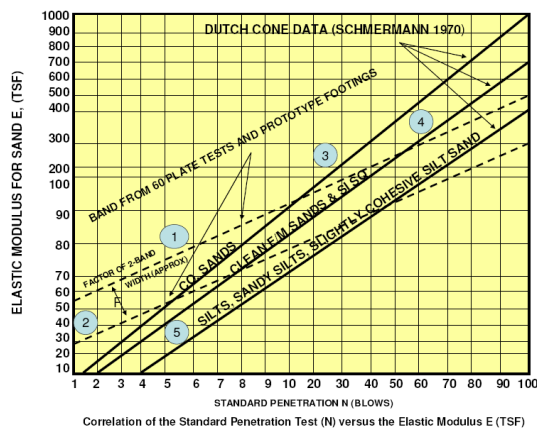
Κατά τη δοκιμή μετράται ο αριθμός των πτώσεων  $N$  που απαιτείται για τη προώθηση του δειγματολήπτη κατά 0.30m (μετά από μια αρχική προώθηση 0.15m που δε συνυπολογίζεται ο αριθμός πτώσεων). Μετά το τέλος της δοκιμής ανακτάται και διαταραγμένο εδαφικό δείγμα από το εσωτερικό του δειγματολήπτη. Από τον αριθμό πτώσεων μέσω εμπειρικών συσχετίσεων και πινάκων υπολογίζονται οι μηχανικές ιδιότητες του εδαφικού υλικού όπως είναι το μέτρο ελαστικότητας  $E$ , το μέτρο διατμήσεως  $G$  από την εμπειρική σχέση  $G/p_a = 120 \cdot N^{0.77}$  όπου  $p_a$  είναι η ατμοσφαιρική πίεση και άλλα. Μια άλλη επί τόπου δοκιμή είναι η δοκιμή διείσδυσης κώνου CPT ή δοκιμή Ολλανδικού πνετομέτρου (σχήμα 3.5.6.3).



**Σχήμα 3.5.6.3 : Ολλανδικό πενετόμετρο**

**Πηγή: Notes on the CONE PENETROMETER TEST-Advanced Engineering Geology & Geotechnics-Missuri University of Science and Technology**

Η δοκιμή εκτελείται με κώνους στους οποίους οι μετρήσεις λαμβάνονται με ειδικούς μετατροπείς. Η δοκιμή εκτελείται χωρίς δειγματοληψία και συνεπώς η στρωματογραφία του εδαφικού υλικού πρέπει να συναχθεί από τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Από εμπειρικές σχέσεις όπως αυτή του Schmertmann (1970) συνδέονται οι κτύποι της δοκιμής CPT με το μέτρο ελαστικότητας του εδαφικού υλικού  $E$  (σχήμα 3.5.6.4).

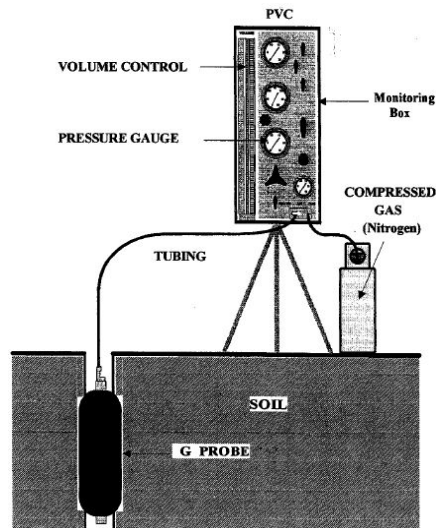


**Πίνακας 3.5.6.4 :**

**Συσχέτιση της δοκιμής πρότυπης διείσδυσης, διείσδυσης κώνου και του μέτρου ελαστικότητας  $E$**   
**Πηγή: GEG-4011 Geotechnical Engineering I-Lecture #28-Elastic Settlements-L.Prieto-Portar 2008**

Η δοκιμή δε μπορεί να εφαρμοστεί σε εδάφη με χάλικες ή σκληρές αργίλους λόγω αδυναμίας πρόωθησης του κώνου.

Μια άλλη επί τόπου δοκιμή είναι αυτή του πρεσσιόμετρου (PMT). Η δοκιμή βασίζεται στη διόγκωση ενός κυλινδρικού σάκου στο εσωτερικό μιας γεώτρησης και στη μέτρηση της πίεσης που απαιτείται για τη διόγκωση (σχήμα 3.5.6.5).



**Σχήμα 3.5.6.5 : Το πρεσσιόμετρο του Menard**  
 Πηγή: <http://www.bvfs.at/html/pub/download/pressuremeter.pdf>

### 3.5.7 Προσδιορισμός πιεζομετρικής γραμμής και στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα

Ο προσδιορισμός της πιεζομετρικής γραμμής και το ύψος της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα κατά μήκος της διεύθυνσης του άξονα της σήραγγας είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος για την εκλογή του κατάλληλου μηχανήματος TBM. Σε περιπτώσεις όπου υπάρχει ο συνδυασμός ενός υψηλής στάθμης υδροφόρου ορίζοντα και ενός ιδιαίτερα διαπερατού, εδαφικού υλικού, μπορεί να είναι δύσκολο να δημιουργηθεί επαρκής στεγανότητα στον ελικοειδή μετακομιστή (screw conveyor) ενός EPB TBM. Κάτω από τέτοιες συνθήκες ένα STBM αποτελεί καταλληλότερη επιλογή καθώς ο πολυφός μετεωρίτη βοηθά στο να σφραγιστεί το μέτωπο κατά τη διάρκεια παρεμβάσεων υπό συμπιεσμένο αέρα. Η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα προσδιορίζεται μέσω γεωτρήσεων επί τόπου σε κάποιες θέσεις και ο πλήρης καθορισμός της γίνεται μέσω αναλύσεων.

### 3.5.8 Προσδιορισμός της διογκωσιμότητας εδαφικού υλικού

Ορισμένα εδαφικά υλικά υπό το καθεστώς νερού έχουν την ιδιότητα να το απορροφούν και να διογκώνονται. Αυτό συμβαίνει σε εδαφικά υλικά που εμπεριέχουν άργιλο, της οποίας τα μόρια έλκουν τα μόρια του νερού τα εναποτίθενται στα διάκενα μεταξύ των κόκκων της άργιλου.

Ο όρος διογκωσιμότητα υποδηλώνει όχι μόνο την ιδιότητα του εδαφικού υλικού να διογκείται απορροφώντας νερό αλλά να συρρικνώνεται όταν αφαιρείται νερό από αυτό. Η ιδιότητα αυτή επίσης διόγκωσης του εδαφικού υλικού δε προκαλείται μόνο από τη παρουσία ή μη υπόγειου νερού αλλά και από την αποφόρτιση του γεωυλικού κατά τη διάνοιξη της σήραγγας. Ο συνδυασμός αυτών των δυο φαινομένων είναι ο πλέον συνήθης και συχνά υπάρχει αλληλοσυσχέτιση μεταξύ τους. Οι ικανότητα αυτή των αργιλικών, κυρίως, εδαφικών υλικών προκαλεί συνθήκες αστάθειας, μεγάλες παραμορφώσεις και τάσεις στο εσωτερικό της σήραγγας προκαλώντας προβλήματα στη σωστή λειτουργία του μηχανήματος, στη διαδικασία διάνοιξης της σήραγγας και στη διατήρηση της σωστής διεύθυνσης της σήραγγας. Ο προσδιορισμός κατά συνέπεια της διογκωσιμότητας των εδαφικών υλικών είναι πολύ σημαντικός.

Η εργαστηριακή δοκιμή που πραγματοποιείται είναι αυτή του συμπιεσομέτρου. Με τη μέθοδο αυτή προσδιορίζεται τόσο ο βαθμός στερεοποίησης όσο και η συμπιεστότητα του εδαφικού υλικού, όταν φορτίζεται και στραγγίζεται αξονικά και δε παραμορφώνεται πλευρικά. Η παραμόρφωση είναι ίση με τη μεταβολή του όγκου του δοκιμίου και συνδέεται

με τη μεταβολή του δείκτη πόρων. Η συσκευή με την οποία πραγματοποιείται η δοκιμή ονομάζεται οιδήμετρο (σχήμα 3.5.8.1).



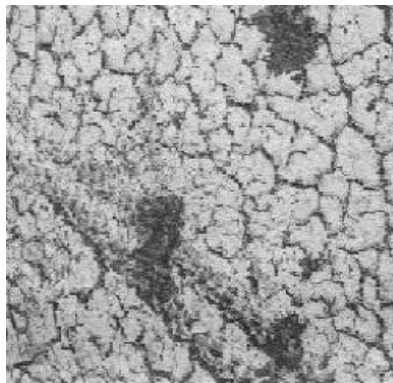
**Σχήμα 3.5.8.1: Οιδήμετρο**

**Πηγή: Εργαστήριο Εδαφομηχανικής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ**

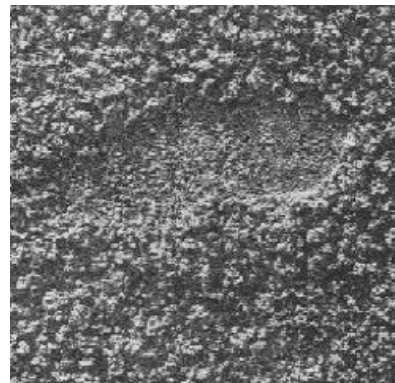
Για τη δοκιμή χρησιμοποιείται αδιατάρακτο δείγμα εδάφους. Το δοκίμιο μορφοποιείται σε δακτύλιο διαμέτρου 6.33cm, ζυγίζεται και τοποθετείται μέσα στο δακτύλιο ανάμεσα στα πορώδη φίλτρα. Γεμίζουμε το οιδήμετρο με αποσταγμένο νερό προσέχοντας να μην παραμείνουν φυσαλίδες αέρα κάτω από τα πορώδη φίλτρα. Το δοκίμιο φορτίζεται αξονικά με μια σειρά φορτίων διπλασιαζόμενης κάθε φορά πίεσης και η πίεση παραμένει σταθερή για 24h. Για κάθε βαθμίδα φόρτισης μετά από 24h παίρνουμε τη τελική μείωση του πάχους του δοκιμίου που προσδιορίζει και το σημείο της τελικής καθίζησης. Μετά το τέλος της δοκιμής αφαιρούμε σταδιακά τα φορτία και μετράμε την αποσυμπίεση του υλικού σε τακτά χρονικά διαστήματα καταγράφοντας τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

Η ικανότητα του εδαφικού υλικού να διογκείται ορίζεται ως το ποσοστό διόγκωσης του συμπιεσμένου εδαφικού υλικού όπως έχει συμπιεστεί μέσω της δοκιμής του οιδήμετρου στη μέγιστη πυκνότητα, στη βέλτιστη υγρασία υπό φορτίο 7 kPa πριν καταδυθεί σε νερό. Δυνητικά διογκούμενα εδάφη τυπικά επίσης αναγνωρίζονται εργαστηριακά μέσω των ορίων Atterberg. Άργιλοι, δίχως οργανικά στοιχεία, υψηλής πλασιμότητας συνήθως έχουν μεγάλη ικανότητα διογκωσιμότητας όταν το όριο υδαρότητας ξεπερνά το 50% και ο δείκτης πλασιμότητας τη τιμή 30.

Επίσης εργαστηριακή μέθοδος αποτελεί η διαμόρφωση κατάλληλου δοκιμίου και η καταβύθιση αυτού σε νερό, όπου μετρώντας τη μεταβολή του όγκου του προσδιορίζουμε και τη διογκωσιμότητα του. Επί τόπου διογκώσιμες άργιλοι αναγνωρίζονται μέσω της κολλώδους συμπεριφοράς τους όταν υγραθούν και χαρακτηρίζονται συνήθως από επιφανειακές ρωγμές (σχήμα 3.5.8.2) ή υφή τύπου popcorn όταν ξηρανθούν (σχήμα 3.5.8.3).



**Σχήμα 3.5.8.2 : Επιφανειακές ρωγμές σε αργιλικά εδάφη**



**Σχήμα 3.5.8.3 : υφή popcorn σε αργιλικά εδάφη**

**Πηγή: Swelling soil-Eng. Hussam Suhail Al Ghamdi**



### 3.5.9 Προσδιορισμός των διατμητικών παραμέτρων αντοχής και της ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής

Η ευστάθεια του μετώπου της σήραγγας κατά τη διάρκεια διάνοιξης της είναι μία άλλη σημαντική παράμετρος που λαμβάνεται υπόψη καθώς η δημιουργία ενός ευσταθούς μετώπου εκσκαφής διασφαλίζει την ασφάλεια του προσωπικού που εργάζονται στο μηχάνημα, τη σωστή λειτουργία αυτού και τη πρόοδο του έργου βάσει του σχεδιασμού και του προγραμματισμού (χρονικού και οικονομικού) που έχουν γίνει. Για το λόγο αυτό είναι πολύ σημαντικός ο προσδιορισμός των παραμέτρων αντοχής που πρόκειται να διανοιχτούν κατά τη προώθηση του μηχανήματος καθώς σε εδαφικά υλικά πτωχής ποιότητας και μειωμένων αντοχών ενδέχεται να κρίνεται αναγκαίο να εφαρμοστούν μέτρα για την ενίσχυση αυτών πριν από τη προώθηση του μηχανήματος και τη παράταιρη διάνοιξη της σήραγγας.

Οι διατμητικές παράμετροι αντοχής που προσδιορίζονται είναι η συνοχή  $c$ , η γωνία τριβής  $\varphi$  και η αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $C_u$ , που εφαρμόζεται στα αργιλικά εδάφη όταν εξετάζονται υπό αστράγγιστες συνθήκες. Η γωνία τριβής και η συνοχή των εδαφικών υλικών αποτελούν τις βασικές παραμέτρους διατμητικής αντοχής των εδαφικών υλικών. Τα εδάφη χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες τα συνεκτικά και τα μη συνεκτικά. Για τα μη συνεκτικά εδαφικά υλικά η παράμετρος της συνοχής δεν υπάρχει και η διατμητική τους αντοχή εξαρτάται από τη γωνία τριβής και από την επιβαλλόμενη ορθή τάση όπου σύμφωνα με το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb ισχύει

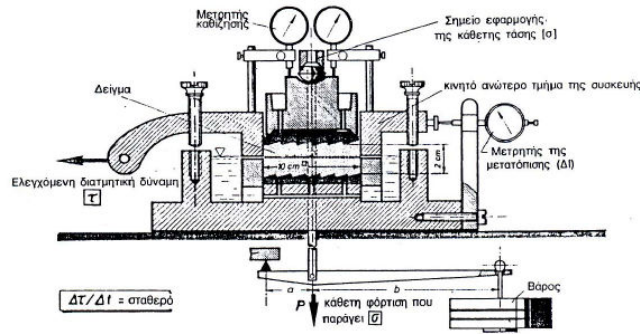
$$\tau = \sigma \tan \varphi$$

Για τα συνεκτικά εδάφη πέρα από τη γωνία τριβής απαραίτητο είναι να προσδιοριστεί και η παράμετρος της συνοχής οπότε το κριτήριο αστοχίας λαμβάνει τη γενικευμένη μορφή του

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi$$

Ανάλογα με το είδος του εδαφικού υλικού που εξετάζουμε απαραίτητο κρίνεται να προσδιοριστούν τόσο οι στραγγιζόμενες παράμετροι αντοχής όσο και οι αστράγγιστες όπως παραδείγματος χάρι σε μια πλήρως κορεσμένη άργιλο υπό αστράγγιστη φόρτιση όπου η ανάλυση κάνοντας χρήση των αστράγγιστων παραμέτρων είναι πολύ πιο εύκολη από την αντίστοιχη υπό στραγγιζόμενες συνθήκες προσέγγιση. Και οι δύο αυτές κατηγορίες παραμέτρων αντοχής προσδιορίζονται κυρίως από εργαστηριακές δοκιμές όπως είναι η τριαξονική δοκιμή, η δοκιμή απευθείας διάτμησης και η μη πλευρικά εμποδιζόμενη μονοαξονική θλίψη, που είναι μια παραλλαγή της τριαξονικής δοκιμής. Και για τις τρεις αυτές δοκιμές μορφώνουμε κατάλληλα το εδαφικό δοκίμιο από το υλικό της δειγματοληπτικής γεώτρησης και επιβάλλουμε σε αυτό συνθήκες φόρτισης και στράγγισης που να πλησιάζουν τις συνθήκες του υλικού στη φυσική του κατάσταση στο χώρο του έργου.

Η δοκιμή της απευθείας διάτμησης σε εδαφικό δοκίμιο πραγματοποιείται με την αντίστοιχη συσκευή που συνίσταται από ένα κουτί το οποίο είναι χωρισμένο σε δύο μέρη. Στη βάση και στο πάνω μέρος του εσωτερικού του κουτιού τοποθετείται ένας δίσκος από πορώδες υλικό. Το εδαφικό υλικό τοποθετείται μέσα στο κουτί και υπό την επιβολή ορθής δύναμης ασκείται οριζόντια/διατμητική δύναμη μέσω ενός κινούμενου ηλεκτρικά μοχλού κάνοντας το δοκίμιο να αστοχήσει σε μια προδιαγεγραμμένη επιφάνεια αστοχίας. Η συσκευή είναι συνδεδεμένη με ηλεκτρονικό υπολογιστή και οι καταγραφές κατά τη διάρκεια της δοκιμής είναι συνεχείς. Η συσκευή απευθείας διάτμησης φαίνεται στο σχήμα 3.5.9.1 .



**Σχήμα 3.5.9.1: Συσκευή απευθείας διάτμησης**  
**Πηγή: [www.geo.auth.gr/758/PDF/2.pdf](http://www.geo.auth.gr/758/PDF/2.pdf)**

Η τριαξονική δοκιμή πραγματοποιείται με τη συσκευή της τριαξονικής δοκιμής. Το πλεονέκτημα της έναντι της δοκιμής απευθείας διάτμησης είναι ότι η επιφάνεια αστοχίας δεν είναι προκαθορισμένη. Από το επιβαλλόμενο εντατικό φορτίο και τη μέγιστη και ελάχιστη κύρια τάση που επιβάλλουμε στο εδαφικό δοκίμιο προκύπτουν κύκλοι αστοχίας κατά το κριτήριο Mohr-Coulomb οπότε και προσδιορίζονται οι παράμετροι διατμητικής αντοχής  $c$  και  $\varphi$ .

Η δοκιμή της μη πλευρικά εμποδιζόμενης θλίψης είναι μια παραλλαγή της δοκιμής της τριαξονικής. Στο δοκίμιο δεν επιβάλλεται πλευρική τάση και τα λαμβανόμενα αποτελέσματα δίνουν ένα μέτρο για τη μη εμποδιζόμενη θλιπτική αντοχή του εδαφικού υλικού. Η δοκιμή είναι εφαρμόσιμη μόνο σε συνεκτικά εδάφη και μόνο όταν απαιτείται αποτέλεσμα ταχύτητα. Η δοκιμή πραγματοποιείται επιβάλλοντας θλιπτικό φορτίο στο εδαφικό δοκίμιο. Η παραμόρφωση μετράται μέσω μηκυνσιόμετρου και καταγράφεται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Από την εξαγωγή των αποτελεσμάτων της δοκιμής προσδιορίζονται οι παράμετροι διατμητικής αντοχής. Η συσκευή φαίνεται στο σχήμα 3.5.9.2 .



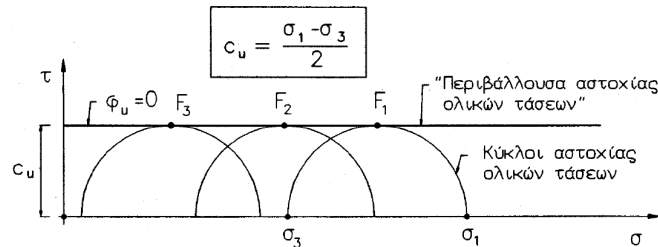
**Σχήμα 3.5.9.2 : Συσκευή ανεμπόδιστης, μονοαξονικής θλίψης**  
**Πηγή: <http://www.civil.ntua.gr/labs/foundation-eng>**

Η αστράγγιστη, διατμητική αντοχή που προκύπτει από όλες τις αστράγγιστες, κυλινδρικές, τριαξονικές δοκιμές σε όμοια δοκίμια ενός εδαφικού υλικού είναι η ίδια. Τα τελικά σημεία όλων των διαδρομών των ολικών τάσεων θα βρίσκονται σε μια οριζόντια ευθεία, τα οποία αποτελούν τις κορυφές των κύκλων Mohr των ολικών τάσεων. Κατά συνέπεια όλοι οι κύκλοι Mohr των ολικών τάσεων κατά την αστοχία υπό αστράγγιστες συνθήκες εφάπτονται σε μια οριζόντια ευθεία, η οποία θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως η περιβάλλουσα αστοχίας των ολικών τάσεων.

Οι τιμές των παραμέτρων της ευθείας αυτής είναι:

- $\varphi_u=0$
- $c_u=(\sigma_1-\sigma_3)/2=\tau_u/\cos\varphi$

όπου  $\tau_u$  είναι η διατμητική αντοχή και  $\varphi$  η γωνία τριβής του εδαφικού υλικού. Η παράμετρος  $c_u$  αποτελεί την αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδαφικού υλικού και θεωρείται σταθερή, είναι δηλαδή ιδιότητα του υλικού, και προσδιορίζεται έτσι μέσω της εργαστηριακής τριαξονικής δοκιμής υπό αστράγγιστες συνθήκες (σχήμα 3.5.9.3).



**Σχήμα 3.5.9.3 : Ανάλυση και περιβάλλουσα αστοχίας ολικών τάσεων**  
**Πηγή: Στοιχεία Εδαφομηχανικής-Μ.Καββαδά**

Η συνηθέστερη δοκιμή για το προσδιορισμό της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής είναι δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης, η οποία και είναι η απλούστερη αστράγγιστη κυλινδρική, τριαξονική δοκιμή. Κατά τη διάρκεια αυτής της δοκιμής το κυλινδρικό, εδαφικό δοκίμιο φορτίζεται με ταχύ ρυθμό κατά τη κατακόρυφη διεύθυνση χωρίς πλευρική ένταση ( $\sigma_3=0$ ) και χωρίς έλεγχο της πίεσης πόρων. Η δοκιμή αυτή εκτελείται με μία απλή διάταξη επιβολής κατακόρυφου φορτίου και επειδή η φόρτιση γίνεται με ταχύ ρυθμό και το δοκίμιο έχει σχετικά μεγάλες διαστάσεις μπορεί να θεωρηθεί ότι η δοκιμή πραγματοποιείται υπό αστράγγιστες συνθήκες οπότε πληρούνται οι προϋποθέσεις για την εκτίμηση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής η οποία είναι:

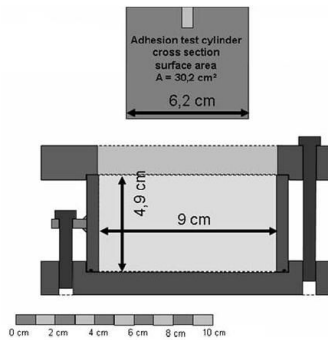
$c_u=q_u/2$  όπου  $q_u$  η τιμή της αξονικής, ολικής τάσης κατά την αστοχία.

### 3.5.10 Προσδιορισμός του κινδύνου απόφραξης (Clogging Risk)

Η διάνοιξη σηράγγων διαμέσου αργλικών εδαφών με χρήση ενός ασπιδοφόρου μηχανήματος ενδέχεται να ενέχει σημαντικό κίνδυνο απόφραξης του TBM μέσα στη σήραγγα, το οποίο κατά συνέπεια οδηγεί σε καθυστερήσεις στη κατασκευή και στη δημιουργία πρόσθετου κόστους. Ο προσδιορισμός της επικινδυνότητας αυτής είναι πολύ σημαντικός συνεπώς για τη σωστή λειτουργία του μηχανήματος και τη διασφάλιση της διάνοιξης σε κατασκευαστικό και οικονομικό επίπεδο.

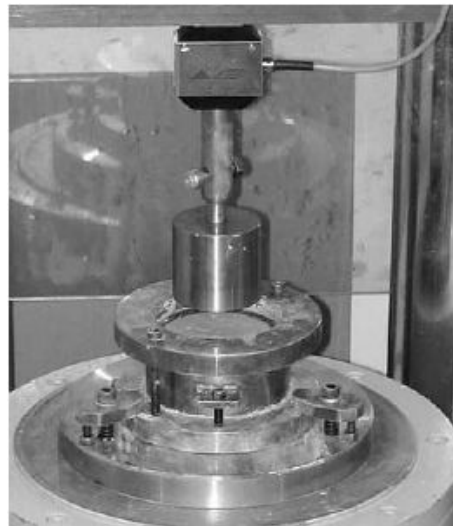
Μηχανήματα ιδιαίτερα που χρησιμοποιούν συστήματα υγρών στο μέτωπο εκσκαφής ή συστήματα πολφού ενδέχεται να έχουν αυξημένα προβλήματα κατά την εκσκαφή και προώθηση λόγω της υφιστάμενης παρεμπόδισης. Στην εμφάνιση αυτού του φαινομένου αποφασιστική επιρροή έχει η ανάπτυξη συνοχής μεταξύ των μορίων αργίλου και των μεταλλικών στοιχείων του μηχανήματος.

Μία εργαστηριακή δοκιμή έχει αναπτυχθεί με σκοπό να εκτιμηθεί η συνοχή μεταξύ του εδαφικού δείγματος και ενός μεταλλικού εμβόλου όταν αυτό τραβιέται κάθετα από το δείγμα. Η διαβροχή, με ένα υγρό παρόμοιας σύστασης με το υγρό που χρησιμοποιείται από το μηχανήμα για την υποστήριξη του μετώπου, είναι πολύ σημαντικό να πραγματοποιείται πριν από την επαφή του εδάφους με το μεταλλικό έμβολο. Η συσκευή που χρησιμοποιείται για τη διεξαγωγή της δοκιμής φαίνεται στο σχήμα 3.5.10.1 .



**Σχήμα 3.5.10.1 : Συσκευή προσδιορισμού της συνοχής (adhesion test device)**  
**Πηγή: A method for assessing adhesion of clays to tunneling machines-I.Sass, U.Burbaum**

Το εδαφικό υλικό τοποθετείται σε τρεις στρώσεις. Οι στρώσεις συμπυκνώνονται όπως και στη πρότυπη δοκιμή Proctor χρησιμοποιώντας το έμβολο βάρους 2.5kg. Μετά τη συμπύκνωση, η επιφάνεια του εδαφικού δείγματος οριζοντιοποιείται προσεκτικά και το δείγμα τοποθετείται στη συσκευή με το μεταλλικό, κυλινδρικό στέλεχος (σχήμα 3.5.10.2).



**Σχήμα 3.5.10.2 : Συσκευή προσδιορισμού της συνοχής (adhesion test device)**  
**Πηγή: A method for assessing adhesion of clays to tunneling machines-I.Sass, U.Burbaum**

Έπειτα η επιφάνεια του δείγματος διαβρέχεται με απιονισμένο νερό. Είναι απαραίτητο να χρησιμοποιείται απιονισμένο νερό για να αποφευχθεί μη ελεγχόμενη εξάτμιση, να παραχθεί μια συνεκτική ζώνη ανάμεσα στο μεταλλικό έμβολο και το εδαφικό δείγμα και να αποφευχθεί η ανταλλαγή ιόντων στο σώμα της αργίλου, αν και θεωρητικά είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν υγρά γεωτρήσεων ή των μηχανών TBM. Έπειτα το μεταλλικό στέλεχος πιέζεται κάθετα στο δείγμα υπό ελεγχόμενη δύναμη για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα οπότε και το μεταλλικό στέλεχος τραβιέται καταγράφοντας την επιβαλλόμενη δύναμη και ταχύτητα.

### 3.5.11 Διάνοιξη σήραγγας σε βραχώδη (σκληρό) σχηματισμό

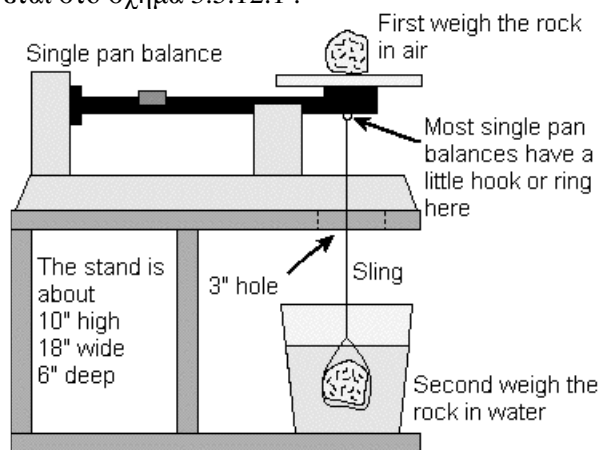
Στη περίπτωση σκληρών και συμπαγών πετρωμάτων (με αντοχή σε μονοαξονική θλίψη μεγαλύτερη των 110MPa) οι μηχανές ολομέτωπης κοπής ανοικτού τύπου είναι οι καταλληλότερες για τη διάνοιξη σηράγγων. Στη περίπτωση μικτών, γεωλογικών συνθηκών, όπου ο βραχώδης σχηματισμός δεν είναι ο μόνος που απαντάται κατά τη διάνοιξη της σήραγγας, είναι δυνατή και η χρήση μηχανημάτων μικτού τύπου ασπίδας (Mixshield TBM).

Τα χαρακτηριστικά της βραχώμαζας τα οποία πρέπει να προσδιοριστούν είναι:

- Η πυκνότητα του βράχου
- Η πετρογραφική και ορυκτολογική σύσταση του βράχου
- Η σκληρότητα και το περιεχόμενο ποσοστό σε χαλαζία
- Το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος του Poisson
- Η συνοχή
- Η διαπερατότητα
- Η γωνία τριβής
- Η ανεμπόδιση θλιπτική αντοχή
- Η εφελκυστική αντοχή
- Η τριαξονική αντοχή
- Η σχιστότητα και πτύχωση της βραχώμαζας
- Η βαθμός ρηγμάτωσης και το πλήθος των ασυνεχειών
- Η τιμή του RQD
- Η δυνατότητα διόγκωσης

### 3.5.12 Προσδιορισμός της πυκνότητας του βράχου

Για το προσδιορισμό της πυκνότητας  $d$  του βράχου μπορούν να πραγματοποιηθούν εργαστηριακές δοκιμές. Στο εργαστήριο η πυκνότητα του βράχου μπορεί να προσδιοριστεί με τη συσκευή που φαίνεται στο σχήμα 3.5.12.1 .



**Σχήμα 3.5.12.1 : Συσκευή προσδιορισμού της πυκνότητας βραχώδους υλικού**  
**Πηγή: Rock Rensity Lab-Kurt Hollocher, Geology Department, Union College, Schenectady, NY 12308**

Η διαδικασία που ακολουθείται αρχικά ορίζει να μετρηθεί το βάρος του δείγματος του βράχου στον αέρα  $w_a$  σε ένα ζυγό. Έπειτα η μέτρηση επαναλαμβάνεται κρεμώντας το δείγμα από το ζυγό και καταβυθίζοντας το σε νερό, οπότε παίρνουμε το βάρος του δείγματος μέσα στο νερό  $w_w$ . Η πυκνότητα υπολογίζεται βάσει της σχέσης  $d = w_a / (w_a - w_w)$  όπου το βάρος μετριέται σε γραμμάρια και η πυκνότητα προκύπτει σε γραμμάρια/κυβικό εκατοστό, οπότε και υπολογίζεται εργαστηριακά η πυκνότητα του βράχου.

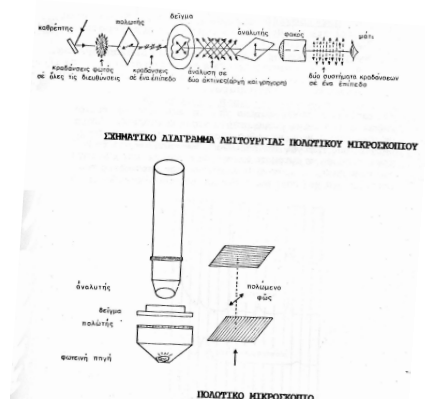
### 3.5.13 Προσδιορισμός της πετρογραφικής, ορυκτολογικής σύστασης του βράχου, της σκληρότητας και το περιεχόμενο ποσοστό χαλαζία

Λόγω της αυξανόμενης εφαρμογής της μηχανοποιημένης μεθόδου διάνοιξης σιηράγγων με TBM η γνώση για τη σκληρότητα του βράχου είναι πολύ σημαντική καθώς επηρεάζει την απόδοση των δίσκων κοπής του μηχανήματος, το ρυθμό αντικατάστασης και κατά συνέπεια το οικονομικό κόστος διάνοιξης. Οι βράχοι και τα εδαφικά υλικά συνίστανται από ορυκτά με

διακριτή σκληρότητα, για την οποία χρησιμοποιείται η σκληρότητα κατά Mosh ως κλίμακα αναφοράς.

Το ορυκτό που συνηθέστερα καθορίζει σε πολύ μεγάλο βαθμό το βαθμό φθορά των κοπτικών κεφαλών του μηχανήματος είναι το περιεχόμενο ποσοστό σε χαλαζία (quartz) με σκληρότητα από 7 έως 7.5 στη κλίμακα Mosh. Η διάρκεια ζωής των κοπτικών κεφαλών μπορεί να προσδιοριστεί από το ποσοστό των περιεχόμενων ορυκτών. Ο αρχικός προσδιορισμός των υλικών από τα οποία συντίθεται ένα στοιχείο βράχου είναι η επί τόπου παρατήρηση από τον εκάστοτε μελετητή.

Για λεπτομερέστερη ανάλυση μια μέθοδος η οποία χρησιμοποιείται είναι η εξέταση με πολωτικό μικροσκόπιο (σχήμα 3.5.13.1). Το δείγμα του υπό εξέταση πετρώματος επεξεργάζεται μέχρι να περιορισθεί σε μια πολύ λεπτή τομή πάχους 0.03mm περίπου και στη συνέχεια τοποθετείται ανάμεσα σε δυο γυάλινες πλάκες. Λόγω της λεπτότητας του δείγματος το φως μπορεί να διέλθει μέσω αυτού και να εξετασθούν έτσι οι αντιδράσεις των ορυκτών και η μέτρηση φυσικών ιδιοτήτων τους κάτω από το μικροσκόπιο. Το παρασκεύασμα αρχικά εξετάζεται αρχικά στο φυσικό φως, όπου εξετάζονται το σχήμα, το χρώμα, ο δείκτης διάθλασης και άλλα χαρακτηριστικά. Έπειτα εξετάζεται σε πολωμένο φως όπου προσδιορίζονται τα οπτικά χαρακτηριστικά του κάθε ορυκτού. Για αργιλικά ορυκτά και άλλα χαρακτηριστικά χρησιμοποιούνται ηλεκτρονικά μικροσκόπια ή μέθοδος της περιθλασης με ακτίνες X ή η διαφορική θερμική ανάλυση.

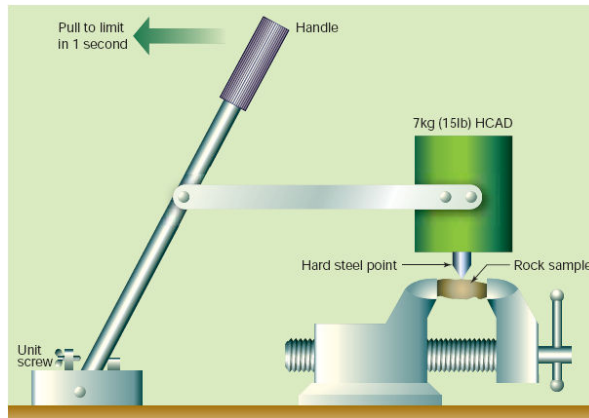


**Σχήμα 3.5.13.1 : Πολωτικό μικροσκόπιο**

**Πηγή: Κεφάλαια Γεωλογίας Μηχανικού-Βοήθημα για τη θεωρία-Παύλου Γ. Μαρίνου Καθηγητή ΕΜΠ, Αθήνα 1993**

Η ορυκτολογική περιγραφή αποτελεί όμως μόνο μια προκαταρκτική διερεύνηση και συμπληρώνεται από εργαστηριακές δοκιμές προκειμένου να προσδιοριστεί πλήρως η σκληρότητα του βραχώδους υλικού. Τρεις από τις συνηθέστερες μεθόδους για το προσδιορισμό της σκληρότητας είναι η δοκιμή Cerchar, η δοκιμή LCPC, που εφαρμόζεται για σκληρά εδαφικά υλικά, και η δοκιμή NTNU.

Η δοκιμή Cerchar προσδιορίζει τη σκληρότητα του φυσικού βράχου μετρώντας τη φθορά σε ένα ατσάλινο κώνο που προκαλείται ξύνοντας μια φρεσκοσπασμένη επιφάνεια στο βράχο. Ένας μεταλλικός κώνος υπό σταθερό φορτίο 7 kg ξύνει το βράχο για ένα μήκος 1cm. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται 6 φορές σε διάφορες διευθύνσεις αντίθετα της κύριας δομής του βράχου, χρησιμοποιώντας πάντα μια νέα μεταλλική άκρη. Η πλάτυνση που δημιουργείται κατά τη διάρκεια της δοκιμής στη κωνική, μεταλλική άκρη μετράται ως η διάμετρος της κωνικής, μη κοφτερής επιφάνειας. Η κλίμακα για τη δοκιμή Cerchar κυμαίνεται από 0 έως 6 και κάθε σημείο της αντιστοιχεί σε μία τέτοια επιφάνεια διαμέτρου 0.1mm. Η συσκευή που χρησιμοποιείται για τη δοκιμή φαίνεται στο σχήμα 3.5.13.2 .



**Σχήμα 3.5.13.2 : Συσκευή δοκιμής σκληρότητας Cerchar**  
**Πηγή: [http://folk.ntnu.no/bnilsen/T&Tpart2\\_0406.pdf](http://folk.ntnu.no/bnilsen/T&Tpart2_0406.pdf)**

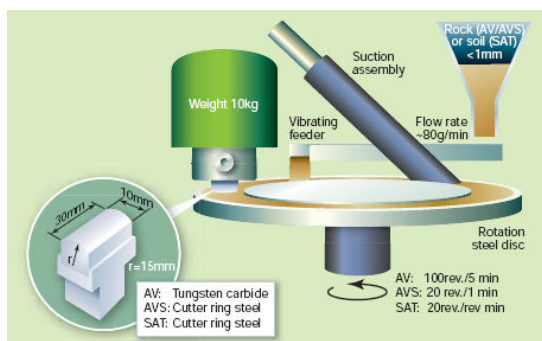
Η δοκιμή LCPC συντίθεται περιστρέφοντας μία μεταλλική προπέλα με ταχύτητα 4500 rpm για 5 min στο υλικό του δείγματος (σχήμα 3.5.13.3). Το υλικό συντρίβεται αρχικά και έπειτα κοσκινίζεται για να ληφθεί ένα δείγμα 500g του επιθυμητού κλάσματος των 4 έως 6.3 mm. Η δυνατότητα να σπάει το δείγμα καθορίζεται ως το βάρος των θραυσμάτων (<1.6 mm) που παράγονται ως ποσοστό του βάρους του αρχικού υλικού. Η κλίμακα της δοκιμής κυμαίνεται από το 0 για πολύ σκληρούς σχηματισμούς μέχρι 100 για πτωχής ποιότητας βράχους.



**Σχήμα 3.5.13.3 : Συσκευή δοκιμής σκληρότητας LCPC**  
**Πηγή: *New test methodology for estimating the abrasiveness of soils for TBM tunneling-B.Nilsen, F.Dahl, J.Holzhäuser, P.Raleigh***

Η δοκιμή NTNU πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας τη συσκευή που φαίνεται στο σχήμα 3.5.13.4 . Χρησιμοποιείται ένα αντιπροσωπευτικό δοκίμιο βράχου περίπου 2kg από το οποίο παράγεται η σκόνη για τη δοκιμή. Η θραύση του δοκιμίου πραγματοποιείται σε διαδοχικά βήματα προκειμένου να αποφευχθεί η υπερβολική παραγωγή σε πολύ μικρά κλάσματα. Το θραυσέν υλικό κοσκινίζεται σε τετραγωνικό κόσκινο οπής 1mm. Το μη διερχόμενο κλάσμα θραύεται ξανά μέχρις ότου η κατανομή του θραυσέντος κλάσματος να είναι 99% μικρότερη από 1mm και 70% με απόκλιση 5% μικρότερη από 0.5mm. Η σκόνη ανακατεύεται πριν εισαχθεί στο δονούμενο τροφοδότη της συσκευής σκληρότητας. Έπειτα αρχίζει η περιστροφή του μεταλλικού δίσκου και η προσαρμογή του δονούμενου τροφοδότη ώστε να δημιουργηθεί μια λεπτή και ενιαία στρώση σκόνης πάνω στο μεταλλικό δίσκο. Δύο έως τέσσερις μεταλλικές κεφαλές κοπής προετοιμάζονται εν συνεχεία για τη πραγματοποίηση της δοκιμής. Οι επιφάνειες των μεταλλικών κεφαλών εξετάζονται ώστε να είναι λείες και ευθείες καθώς και ξηρές και καθαρές. Έπειτα ένα από τα μεταλλικά στελέχη προσαρμόζεται κάτω από το επιβαλλόμενο φορτίο. Η δοκιμαστική επιφάνεια ευθυγραμμίζεται οριζοντίως σε σχέση με το

μεταλλικό δίσκο και η διάρκεια της δοκιμής είναι 5min ή 1min. Οι κεφαλές αποδεσμεύονται από τη συσκευή, ξεπλένονται και στραγγίζονται πριν ζυγιστούν. Ο δείκτης σκληρότητας AV (Abrasion Value) καθορίζεται από τη μετρούμενη απώλεια βάρους σε mg για δοκιμή διάρκειας 5min και ο δείκτης σκληρότητας AVS με την ίδια διαδικασία αλλά για δοκιμή διάρκειας 1min.



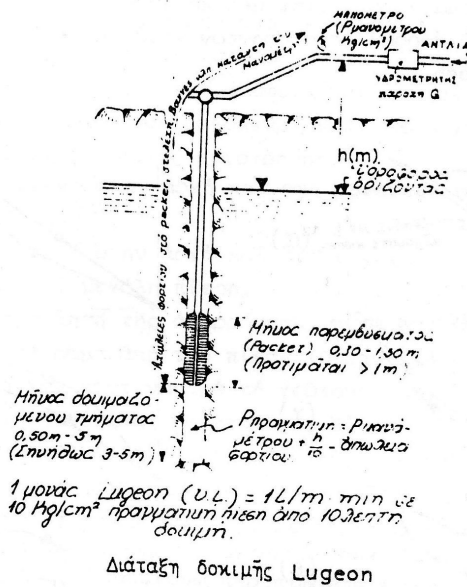
**Σχήμα 3.5.13.4 : Συσκευή δοκιμής σκληρότητας NTNU**  
Πηγή: [http://folk.ntnu.no/bnilsen/T&Tpart2\\_0406.pdf](http://folk.ntnu.no/bnilsen/T&Tpart2_0406.pdf)

Άλλες μέθοδοι προσδιορισμού της σκληρότητας είναι η δοκιμή κατά Vickers, η δοκιμή Los Angeles, η δοκιμή NBMT (Nordic Ball Mill Test) και η δοκιμή του Dorry, με τις τρεις τελευταίες να εφαρμόζονται σε εδαφικά υλικά.

### 3.5.14 Προσδιορισμός διαπερατότητας

Στη περίπτωση πετρωμάτων η δοκιμή που θεωρείται καταλληλότερη είναι η δοκιμή Lugeon. Η δοκιμή πραγματοποιείται με την εξέλιξη τη διατρήσεως. Το δοκιμαζόμενο τμήμα, που έχει συνήθως μήκος 3 έως 5m από το πυθμένα της γεωτρήσεως, απομονώνεται από πάνω μένα παρέμβυσμα (packer), το οποίο διογκούμενο με κατάλληλη τεχνική (υδραυλικά ή μηχανικά), εφάπτεται ερμητικά με τα τοιχώματα της γεωτρήσεως ώστε να μην επιτρέπονται διαφυγές νερού προς τα πάνω κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Η γενική διάταξη της δοκιμής φαίνεται στο σχήμα 3.5.14.1 . Μετά την απομόνωση εισπνέζεται νερό με τη βοήθεια αντλίας. Η διάταξη της δοκιμής επιτρέπει τη μέτρηση της ποσότητας νερού που απορροφήθηκε για κάθε πίεση που εφαρμόστηκε. Η δοκιμή εκτελείται κατά βαθμίδες πίεσης και για κάθε σταθερή πίεση που εφαρμόζεται, η ποσότητα που απορροφάται μετριέται σε μια διάρκεια 5 ή 10min. Στη συνέχεια η πίεση μεγαλώνει και μετριέται η νέα ποσότητα απορρόφησης. Η δοκιμή συνεχίζεται και με άλλες πιέσεις με αύξουσα σειρά μέχρι μια μέγιστη πίεση. Μετά από αυτή η δοκιμή συνεχίζεται για πιέσεις σε φθίνουσα σειρά μέχρι μια ελάχιστη πίεση. Ο αριθμός των ενδιάμεσων πιέσεων εξαρτάται από την κατάσταση των ρωγμών αλλά γενικότερα δε γίνεται να είναι λιγότερες από 3 έως 4 για κάθε σειρά.





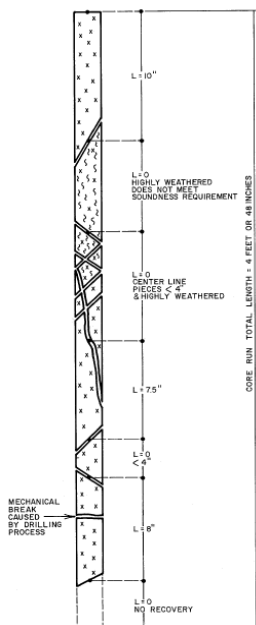
Σχήμα 3.5.14.1: Διάταξη δοκιμής Lugeon

Πηγή: Κεφάλαια Τεχνικής Γεωλογίας-Παύλου Γ. Μαρίνου Καθηγητή ΕΜΠ, Αθήνα 1998

### 3.5.15 Προσδιορισμός της τιμής του RQD

Είναι μέτρηση που πραγματοποιείται επί των δειγμάτων που λαμβάνονται μέσω γεωτρήσεων και συνθέτουν δείγμα της ποιότητας της βραχώμαζας (σχήμα 3.5.15.1). Από τα δείγματα που λαμβάνονται από τη γεώτρηση αθροίζονται τα μήκη των τμημάτων τα οποία έχουν μήκος ανώτερο από 10cm (4") ως προς το συνολικό μήκος της γεώτρησης εκφρασμένο σε ποσοστό επί τοις 100 (%). Η ποιότητα του πετρώματος βάσει του RQD παρουσιάζεται στο παρακάτω πίνακα.

RQD	Ποιότητα πετρώματος
0-25	πολύ πτωχή
25-50	πτωχή
50-75	μέτρια
75-90	καλή
90-100	εξαιρετική



Σχήμα 3.5.15.1 : Δειγματοληπτική γεώτρηση

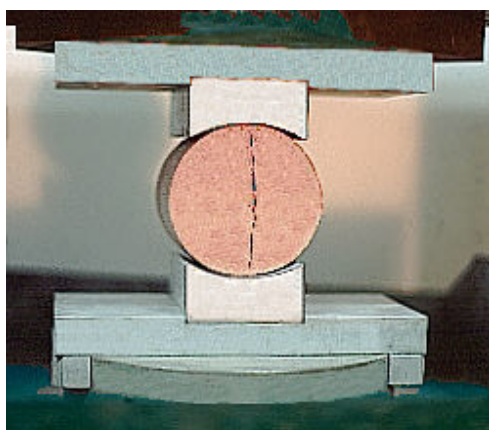
Πηγή: Geotechnical Investigations-US Army Corps of Engineers

### 3.5.16 Προσδιορισμός της εφελκυστικής αντοχής

Η εφελκυστική αντοχή άρρηκτου βράχου μπορεί να προσδιοριστεί μέσω εργαστηριακών μεθόδων που περιλαμβάνουν την άμεση δοκιμή σε εφελκυσμό και τις έμμεσες μεθόδους της δοκιμής κάμψης τριών σημείων δοκιμίου και τη δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης (Brazilian test).

Η πρώτη μέθοδος εφαρμόζεται σε κυλινδρικά δοκίμια άρρηκτου βράχου τα οποία και προσαρμόζονται στις αρπάγες της συσκευής εφελκυσμού. Μέσω των αρπάγων επιβάλλεται στο δοκίμιο εφελκυστικό, αξονικό φορτίο  $P$  και η αντοχή σε εφελκυσμό  $\sigma_t$  του δοκιμίου προκύπτει ως  $\sigma_t = P/A$  όπου  $A$  είναι το εμβαδόν της διατομής του δοκιμίου. Στη δοκιμή κάμψης μορφώνεται δοκίμιο ορθογωνικής διατομής διαστάσεων πλάτους  $b$  και ύψους  $h$  και μήκους  $L$ . Στο δοκίμιο, το οποίο εξασφαλίζεται μέσω στηρίξεων στα άκρα του ώστε να λειτουργεί ως αμφιέρειστη δοκός, επιβάλλεται σημειακό φορτίο  $P$ . Η εφελκυστική αντοχή από τη δοκιμή προκύπτει ως  $\sigma_t = (3*P*L)/(2*b*h^2)$ .

Η δοκιμή, που εφαρμόζεται και συχνότερα από τις προηγούμενες δυο, της αντιδιαμετρικής θλίψης βασίζεται στη δημιουργία εφελκυστικών τάσεων λόγω της θλίψης που επιβάλλεται από τη συσκευή της δοκιμής κατά μήκος της γενέτειρας στο μήκος του δοκιμίου. Η θλιπτική αυτή δύναμη  $P$  δημιουργεί καθεστώς εφελκυστικών τάσεων που διαρρηγνύουν κατακόρυφα το δοκίμιο. Η εφελκυστική αντοχή καθορίζεται από τη σχέση  $\sigma_t = P/(\pi*R*L)$  όπου  $R$  η ακτίνα της διατομής του κυλινδρικού δοκιμίου και  $L$  το μήκος του δοκιμίου (σχήμα 3.5.16.1).



Σχήμα 3.5.16.1 : Δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης (Brazilian test)  
Πηγή: [www.ibf.uni-karlsruhe.de](http://www.ibf.uni-karlsruhe.de)

### 3.5.17 Προσδιορισμός ανεμπόδιστης θλιπτικής αντοχής

Ο προσδιορισμός της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη άρρηκτου βράχου ( $\sigma_{c,i}$ ) πραγματοποιείται με τη δοκιμή αντοχής σε μονοαξονική ανεμπόδιστη θλίψη. Η δοκιμή συνίσταται στη βαθμιαία φόρτιση ενός κυλινδρικού δοκιμίου χωρίς πλευρικό προσδιορισμό ( $\sigma_3=0$ ) μέχρι τη θραύση του. Σαν αντοχή στην ανεμπόδιστη θλίψη ορίζεται η τάση στην οποία το δοκίμιο εμφανίζει:

1. Επιφάνεια θραύσης
2. Συνεχιζόμενη παραμόρφωση χωρίς την αύξηση του φορτίου

Το δοκίμιο δε πρέπει να έχει διάμετρο μικρότερη από 33mm με λόγο ύψους προς διάμετρο 2 έως 3. Η δοκιμή πραγματοποιείται με τη συσκευή μονοαξονικής θλίψης που φαίνεται στο σχήμα 3.5.17.1 όπου το δοκίμιο τοποθετείται στη μεταλλική πλάκα και φορτίζεται κατακόρυφα με θλιπτικό αξονικό φορτίο.



**Σχήμα 3.5.17.1 : Δοκιμή μονοαξονικής, ανεμπόδιστης θλίψης (uniaxial compression test)**  
**Πηγή: Νεώτερες απόψεις για τις παραμέτρους μηχανικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων- Γεώργιος Τσιαμπάος Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ, Αθήνα, Ιανουάριος 2009**

Με τη μεταφορά του φορτίου υπάρχει αυτόματη καταγραφή και της παραμόρφωσης του δοκιμίου μέχρι τη θραύση. Η δοκιμή διαρκεί περίπου 10min. Για το προσδιορισμό της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής μπορεί επίσης να εφαρμοστεί η επί τόπου δοκιμή αντοχής σε σημειακή φόρτιση (Point Load Test-Broch and Franklin,1972). Διεξάγεται και με φορητές συσκευές (σχήμα 3.5.17.2) στο ύπαιθρο και δεν απαιτεί προετοιμασία του δείγματος.



**Σχήμα 3.5.17.2 : Συσκευή δοκιμής σημειακής φόρτισης (Point load test)**  
**Πηγή: Νεώτερες απόψεις για τις παραμέτρους μηχανικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων- Γεώργιος Τσιαμπάος Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ, Αθήνα, Ιανουάριος 2009**

Στη συσκευή αυτή τα δείγματα υποβάλλονται σε αντιδιαμετρική και προσδιορίζονται ο δείκτης σημειακής φόρτισης  $I_s = P/D^2$ , όπου P το φορτίο σημειακής φόρτισης που προκάλεσε τη θραύση και D η διάμετρος του δοκιμίου, και ο δείκτης ανισοτροπίας αντοχής  $I_a$  που είναι η μέγιστη αντοχή σημειακής φόρτισης σε ισοδύναμη διάμετρο δείγματος 50mm. Τα δοκίμια που χρησιμοποιούνται μπορούν να είναι από δειγματοληπτικές γεωτρήσεις, τεμάχια με επίπεδες επιφάνειες ή να έχουν ακανόνιστο σχήμα. Η φόρτιση γίνεται βαθμιαία με σταθερή ταχύτητα μέχρι τη θραύση του δοκιμίου. Η σχέση που δίνει την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του υλικού είναι η  $\sigma_c = k \cdot I_s$  όπου το k είναι συντελεστής με τιμές που κυμαίνονται από 20-24 ( $k=24$ , Broch and Franklin, 1972- $k=20$  Franklin et al, 1972).

### **3.5.18 Προσδιορισμός της τριαξονικής αντοχής άρρηκτου βράχου**

Η δοκιμή που εφαρμόζεται είναι η δοκιμή αντοχής σε τριαξονική φόρτιση. Στόχος της δοκιμής είναι ο έλεγχος της εντατικής κατάστασης του βραχώδους υλικού με τον υπολογισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών αντοχής και παραμόρφωσης σε οποιοσδήποτε συνθήκες φόρτισης και αποστράγγισης. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής το δείγμα κυλινδρικού σχήματος

περιβάλλεται από υδατοστεγή ελαστική μεμβράνη και τοποθετείται στη κυψέλη της συσκευής τριαξονικής δοκιμής όπως και σε δείγμα από εδαφικό υλικό. Το δοκίμιο περιβάλλεται από το νερό και υποβάλλεται σε ολόπλευρη υδατική πίεση. Στη συνέχεια φορτίζεται αξονικά μέχρι τη θραύση του. Η δοκιμή, όπως και στα εδάφη, πραγματοποιείται κρατώντας σταθερή πάντα την υδατική πίεση  $\sigma_3$  και αυξάνοντας σταδιακά την αξονική  $\sigma_1$ .

Βάσει των παραπάνω παραμέτρων του δείκτη ποιότητας της βραχώμαζας RQD, της αντοχής σε μονοαξονική, ανεμπόδιστη θλίψη  $\sigma_c$  και της εφελκυστικής αντοχής  $\sigma_t$ , καθώς και άλλες παράμετροι που έχουν αναφερθεί παραπάνω, στο σχήμα 3.5.18.1 παρατηρείται το πεδίο εφαρμογής του εκάστοτε τύπου μηχανήματος TBM.

Γεωτεχνικές Παράμετροι	Σκληρό Πέτρωμα		Μαλακό Πέτρωμα/Έδαφος			
	Σταθερό	Ασταθές	Συνεκτικό-Σταθερό	Συνεκτικό-Μη σταθερό	Μικτά εδάφη	Μη συνεκτικό
Θλιπτική αντοχή $\sigma_c$ (MN/m <sup>2</sup> )	300+/- 50	50+/- 5	1.0	0.1		
Εφελκυστική αντοχή $\sigma_t$ (MN/m <sup>2</sup> )	25+/- 5	5+/- 0.5				
Δείκτης RQD (%)	100+/- 50	50+/- 10				
Απόσταση ασυνεχειών (m)	>2.0+/- 0.6	0.6+/- 0.06				
Συνοχή $C_u$ (kN/m <sup>2</sup> )			>30	30+/-5	30+/-5	
Κοκκομετρία	0.02(%)		30	30		10
	0.05(%)		>30	>30		
TBM (χωρίς ασπίδα)	o.W.					
	m.W.					
TBM-S (με ασπίδα)	o.W.					
	m.W.					
SM-V1 (χωρίς υποστήριξη μετώπου)	o.W.					
	m.W.					
SM-V2 (με μηχανική υποστήριξη μετώπου)	o.W.					
	m.W.					
SM-V3 (με πεπιεσμένο αέρα)	o.W.					
	m.W.					
SM-V4 (στήριξη μετώπου με πολφό)	o.W.					
	m.W.					
SM-V4 (με εξισορρόπηση της πίεσης του εδάφους)	o.W.					
	m.W.					

o.W.=χωρίς παρουσία υπόγειων νερών	
m.W.=Υπό τη παρουσία υπόγειων νερών	
Κύριο πεδίο εφαρμογής	
Πιθανή εφαρμογή	

**Σχήμα 3.5.18.1 : Επιλογή μηχανήματος ολομέτωπης κοπής συναρτήσει του εδαφικού τύπου**  
**Πηγή: Τύποι μηχανών ολομέτωπης κοπής-Εφαρμογές στον ελλαδικό χώρο-Παναγιώτης Σ. Ανδρέου, Παύλος Π. Νομικός**

### 3.5.19 Προσδιορισμός του μέτρου ελαστικότητας

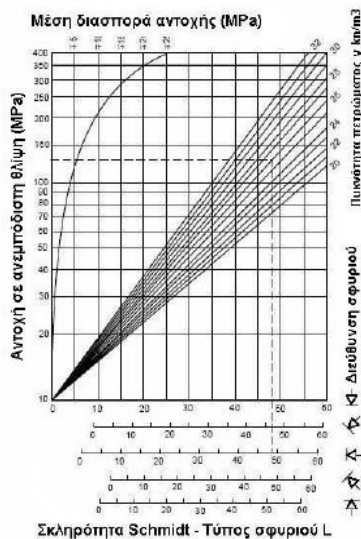
Για το προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας, όπως και στη περίπτωση εδαφικού υλικού, πραγματοποιούνται εργαστηριακές και επί τόπου δοκιμές. Οι δοκιμές που πραγματοποιούνται εργαστηριακά είναι η δοκιμή μονοαξονικής, ανεμπόδιστης θλίψης, η τριαξονική δοκιμή επί δοκιμίων άρρηκτου βράχου, η δοκιμή απευθείας διάτμησης, όπου τα ζητούμενα μεγέθη προσδιορίζονται με την ίδια διαδικασία που προσδιορίζονται στα εδαφικά υλικά, δοκιμή σημειακής φορτίσεως (point load test) και η δοκιμή αντοχής με τη σφύρα Schmidt. Η σφύρα Schmidt είναι φορητή συσκευή (σχήμα 3.5.19.1) που χρησιμοποιείται εκτός από το εργαστήριο και επί τόπου για τον υπολογισμό της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας βράχων μέτριας σκληρότητας.



**Σχήμα 3.5.19.1 : Σφυρί Schmidt τύπου L**

**Πηγή: Νεώτερες απόψεις για τις παραμέτρους μηχανικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων- Γεώργιος Τσιαμπάος Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ, Αθήνα, Ιανουάριος 2009**

Το έμβολο κατά τη διάρκεια πραγματοποίησης της δοκιμής τοποθετείται κάθετα στην επιφάνεια του πετρώματος, που πρέπει να είναι επίπεδη και ομαλή. Το έμβολο πιέζεται πάνω στην επιφάνεια μέχρι να απελευθερωθεί το ελατήριο αναπήδησης και να εκτινάξει την ασάλινη μάζα. Μετρίεται το ύψος αναπήδησης της μάζας και καταγράφεται. Οι κρούσεις που προκαλούν θραύση απορρίπτονται. Η θλιπτική μονοαξονική αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας του βράχου προκύπτουν από νομογράμματα και εμπειρικές συσχετίσεις όπως παρουσιάζεται παρακάτω στο σχήμα 3.5.19.2 .



(Deere & Miller, 1966)

Κάποιες! από τις προταθείσες συσχετίσεις μεταξύ των τιμών R του σφυριού Schmidt και της αντοχής  $\sigma_{ucs}$  (MPa) και του μέτρου ελαστικότητας  $E_t$  (GPa)

$$UCS = ae^{bR}, E_t = ce^{dR}$$

$$UCS = aR^b, E_t = cR^d$$

**Γενικευμένες συσχετίσεις**

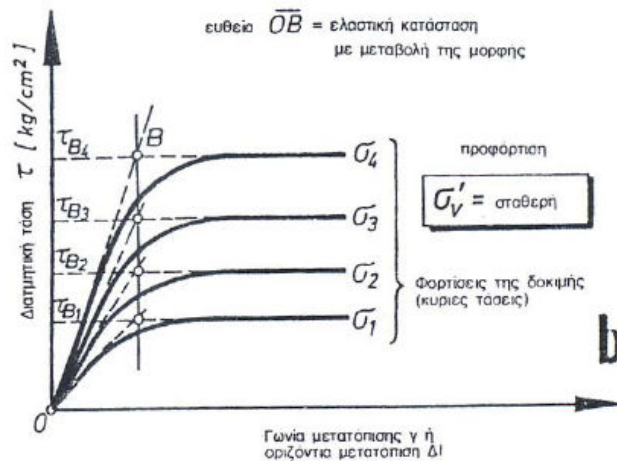
**a, b, c, d** θετικοί αριθμοί, εξαρτώμενοι από τον τύπο του πετρώματος, το μέγεθος των κόκκων, την αποσάθρωση, το ποσοστό υγρασίας.....

(Aydin, 2008, Aydin & Basu, 2005.)

**Σχήμα 3.5.19.2 : Νομόγραμμα κατά Deere & Miller και εμπειρικές συσχετίσεις**

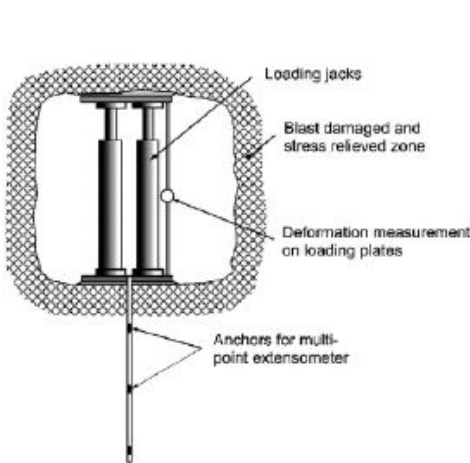
**Πηγή: Νεώτερες απόψεις για τις παραμέτρους μηχανικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων- Γεώργιος Τσιαμπάος Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ, Αθήνα, Ιανουάριος 2009**

Η δοκιμή απευθείας διάτμησης επίσης χρησιμοποιείται για το προσδιορισμό των μεγεθών παραμορφωσιμότητας του υλικού. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής υπάρχει συνεχής καταγραφή του επιβαλλόμενου φορτίου και της παραμόρφωσης που αυτό προκαλεί η οποία στη συνέχεια μας δίνει τη δυνατότητα προσδιορισμού των ζητούμενων μεγεθών όπως φαίνεται από το σχήμα 3.5.19.3 .

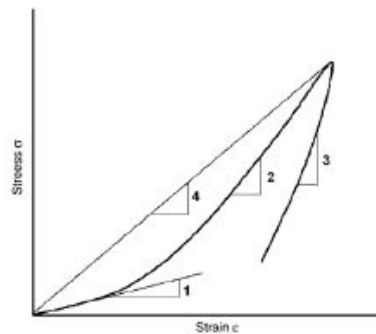


**Σχήμα 3.5.19.3 : Διάγραμμα διατμητικών τάσεων- παραμορφώσεων**  
 Πηγή: [www.geo.auth.gr/758/PDF/2.pdf](http://www.geo.auth.gr/758/PDF/2.pdf)

Επίσης εφαρμόζονται και επί τόπου (in situ) δοκιμές για το προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας. Αυτές περιλαμβάνουν διατάξεις επιβολής επί τόπου φορτίσεων. Η επιβολή των φορτίσεων γίνεται διαμέσου υψίκορμων ή πλακοειδών γρύλλων. Οι επιβαλλόμενες φορτίσεις μετριοούνται μέσω μανομέτρων ή δυναμόμετρων ενώ οι παραμορφώσεις μετριοούνται μέσω μηκυνσιομέτρων, οπτικών μεθόδων, εκτασιομέτρων βάθους ή αποκλινσιομέτρων συνεπώς μπορούμε να προσδιορίσουμε τις ελαστικές παραμέτρους παραμορφωσιμότητας του υλικού. Η δοκιμή που εφαρμόζεται συνηθέστερα είναι η δοκιμή φόρτισης πλάκας (σχήμα 3.5.19.4) όπου η παραμόρφωση είναι συνάρτηση του επιβαλλόμενου φορτίου  $P$ , του μέτρου ελαστικότητας  $E$ , του λόγου του Poisson  $\nu$  και της ακτίνας διατομής της πλάκας βάσει της σχέσης  $\epsilon = (P \cdot (1 - \nu^2)) / (2 \cdot E \cdot r)$ .



Δοκιμή φόρτισης πλάκας  
 (Plate jacking test, PJT)



1. Αρχικό εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας
2. Εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας
3. Μέτρο κατά την αποφόρτιση
4. Μέτρο παραμορφωσιμότητας

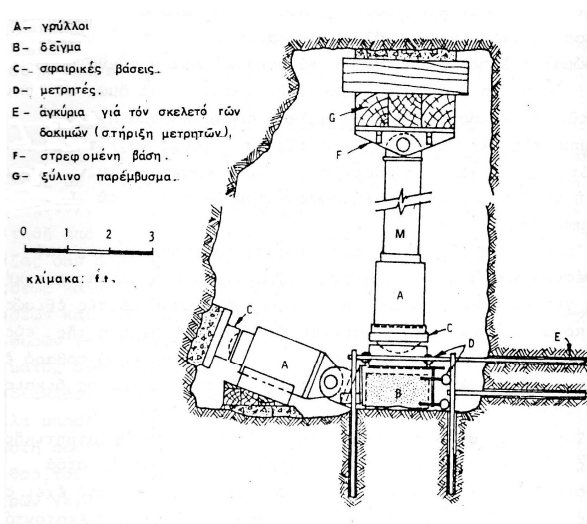
**Σχήμα 3.5.19.4 : Δοκιμή φόρτισης πλάκας (Plate jacking test)**

Πηγή: Νεώτερες απόψεις για τις παραμέτρους μηχανικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων- Γεώργιος Τσιαμπάος Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ, Αθήνα, Ιανουάριος 2009

### 3.5.20 Προσδιορισμός της γωνίας τριβής και της συνοχής βραχώδους υλικού

Όπως και στα εδαφικά υλικά ο προσδιορισμός των παραμέτρων διατμητικής αντοχής και στα βραχώδη υλικά μπορεί να πραγματοποιηθεί εργαστηριακά. Η δοκιμή της τριαξονικής θλίψης είναι μία από τις δοκιμές που εφαρμόζονται. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι όμοια με αυτή που ακολουθείται στα εδαφικά υλικά. Το δοκίμιο διαμορφώνεται και στη συνέχεια τοποθετείται στη συσκευή τριαξονικής δοκιμής όπου και πραγματοποιείται η δοκιμή. Η δοκιμή της απευθείας διάτμησης είναι μια ακόμη δοκιμή που εφαρμόζεται σε βραχώδη υλικά όπως και στα εδαφικά ακολουθώντας την ίδια διαδικασία. Πέρα από τις εργαστηριακές δοκιμές εφαρμόζονται και επί τόπου δοκιμές στο χώρο του τεχνικού έργου προκειμένου να προσδιοριστούν οι παράμετροι διατμητικής αντοχής του υπό εξέταση υλικού.

Η πιο συνηθισμένη επί τόπου δοκιμή είναι η δοκιμή απευθείας διάτμησης (σχήμα 3.5.20.1). Η βασική αρχή λειτουργίας της δοκιμής είναι η ίδια με αυτή της εργαστηριακής δοκιμής της απευθείας διάτμησης. Μέσω γρύλλου ασκείται στο υλικό μια ορθή, κάθετη δύναμη. Έπειτα με τη βοήθεια εμβόλου επιβάλλεται στο υλικό και η διατμητική δύναμη που οδηγεί τελικά με σταδιακή αύξηση στην αστοχία του βράχου. Η δυνατότητα καταγραφής του επιβαλλόμενου διατμητικού φορτίου υπό σταθερή ορθή δύναμη για διάφορους συνδυασμούς αστοχίας επιτρέπει τον υπολογισμό της συνοχής και της γωνίας τριβής του υλικού. Αδυναμία της μεθόδου αποτελεί η αστοχία του υλικού σε προδιαγεγραμμένη επιφάνεια.



Σχήμα 3.5.20.1 : Συσκευή επί τόπου δοκιμής απευθείας διάτμησης

Πηγή: Κεφάλαια Τεχνικής Γεωλογίας-Παύλου Γ. Μαρίνου Καθηγητή ΕΜΠ, Αθήνα 1998

### 3.5.21 Προσδιορισμός της δυνατότητας διόγκωσης βραχώδους υλικού

Ο μηχανισμός διόγκωσης προκύπτει κυρίως από συνδυασμό φυσικοχημικών αντιδράσεων, που περιλαμβάνουν την απορρόφηση νερού, και αποτόνωση των υφισταμένων τάσεων. Η πραγματοποίηση φυσικοχημικών αντιδράσεων είναι ο κύριος παράγοντας που συμβάλει στην εμφάνιση του φαινομένου αλλά μπορεί να λάβει χώρα μόνο ταυτόχρονα ή να ακολουθήσει έπειτα από την μεταβολή των τάσεων στο αρχικό εντατικό πεδίο. Οι συνέπειες παραμορφώσεων λόγω διόγκωσης σχετίζονται με προβλήματα αστοχίας του συστήματος αποστράγγισης, δυσκολία στις συνθήκες μετακίνησης του μηχανολογικού εξοπλισμού, αστοχία των μέτρων προσωρινής και μόνιμης υποστήριξης καθώς και την αστοχία του σιδηροδρομικού δικτύου μετά την έναρξη λειτουργίας του τεχνικού έργου. Για το προσδιορισμό της διογκωσιμότητας ενός βραχώδους υλικού χρησιμοποιείται όπως και στα εδαφικά υλικά η συσκευή του οιδήμετρου ακολουθώντας παρόμοια διαδικασία αφού η ικανότητα των υλικών αυτών να διογκώνονται υπό την επίδραση συνθηκών όπως αυτές αναφέρθηκαν παραπάνω με τη χρησιμοποίηση του συμπιεσομέτρου περιγράφονται από την ίδια αρχή.

## **Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 3**

### **Βιβλιογραφία υποκεφαλαίου 3.2**

- Τύποι μηχανών ολομέτωπης κοπής-Εφαρμογές στον Ελλαδικό Χώρο-Παναγιώτης Σ. Ανδρέου, Παύλος Π. Νομικός
- Από το γεωλογικό προσομοίωμα, στο προσομοίωμα της βραχώμαζας και το σχεδιασμό. Μεθοδολογία τεχνικό-γεωλογικής αξιολόγησης για τη διάνοιξη αστικής σήραγγας σε περιβάλλον δυσμενών γεωλογικών συνθηκών. Το παράδειγμα του Αττικό Μετρό, Τμήμα Βοτανικός-Άγιος Σάββας-Ρομοσιού Ν. Αναστασία (Διπλωματική Εργασία)
- Tunnel Construction Guidelines-Association of Geotechnical and Geoenvironmental Specialists (Hong Kong)
- Urban tunneling challenges and progress-Prof. Z. Eisenstein
- Tunnel Boring Machines-Solutions for hard rock-Aker Solutions
- Geological constraints and geotechnical issues in mechanized tunneling-Professor of National Technical University of Athens P. Marinos (Politecnico di Torino, Post Graduate Master: Tunneling and Tunnel Boring Machines)
- TBM and Lining Essential Interfaces-Nguyen Duc Toan (Politenico di Torino)
- Progress of Rail (Metro) Tunnel Construction in Singapore-Past, Present & Future-Chun Nam Ow, Ariaratnam Kulaindran, C.K. Knight-Hassell, Tiong Peng Seah
- Clogging of TBM drives in clay-Identification and mitigation of risks-M.Thewes, W.Burger
- TBM Tunneling-Nick Barton
- Closed Face Tunneling Machines and ground stability-British Tunneling Society
- [www.attikometro.gr](http://www.attikometro.gr)
- [www.lovat.com](http://www.lovat.com)

### **Βιβλιογραφία υποκεφαλαίου 3.3**

- Σημειώσεις Σχεδιασμού Υπογείων Έργων-Μ.Καββαδά (Μάρτιος 2005)

### **Βιβλιογραφία υποκεφαλαίου 3.4**

- Hoek-Brown Failure Criterion 2002 Edition-Evert Hoek, Carlos Carranza-Torres, Brent Corkum
- GSI : A Geological friendly tool for rock mass strength estimation-Paul Marinos, Evert Hoek
- Σημειώσεις Σχεδιασμού Υπογείων Έργων-Μ.Καββαδά (Μάρτιος 2005)
- Από το γεωλογικό προσομοίωμα, στο προσομοίωμα της βραχώμαζας και το σχεδιασμό. Μεθοδολογία τεχνικογεωλογικής αξιολόγησης για τη διάνοιξη αστικής σήραγγας σε περιβάλλον δυσμενών γεωλογικών συνθηκών-Ρομόσιου Ν. Αναστασία (Διπλωματική Εργασία)

### **Βιβλιογραφία υποκεφαλαίου 3.5**

- Κεφάλαια Τεχνικής Γεωλογίας-Παύλου Γ. Μαρίνου, Καθηγητή ΕΜΠ, Αθήνα 1998
- Κεφάλαια Γεωλογίας Μηχανικού-Παύλου Γ. Μαρίνου, Καθηγητή ΕΜΠ, Αθήνα 1993
- Σημειώσεις Τεχνικής Γεωλογίας-Π.Γ. Μαρίνου, Καθηγητή ΕΜΠ, Γ.Κ. Τσιαμπάου, Αν. Καθηγητή ΕΜΠ, Αθήνα 2005
- Στοιχεία Εδαφομηχανικής-Μηχαήλ Καββαδά, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ, Σεπτέμβριος 2007



- Σημειώσεις Εδαφομηχανικής-Γ. Γκαζέτα, Καθηγητή ΕΜΠ, Έκδοση 2.7, Αθήνα 2007
- Σημειώσεις Εδαφοδυναμικής-Γ. Γκαζέτα, Καθηγητή ΕΜΠ, Έκδοση 2007
- Ειδικά Θέματα Εδαφομηχανικής-Σημειώσεις-Β.Ν. Γεωργιάννου, Επικ. Καθηγήτρια ΕΜΠ, Αθήνα 2006
- Στοιχεία του μαθήματος «Βραχομηχανική-Σήραγγες»-Β.Παπαδόπουλου, Επίκουρου Καθηγητή ΕΜΠ, Αθήνα 2007
- Νεότερες απόψεις για τις παραμέτρους μηχανικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων-Γεώργιος Τσιαμπάος, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ, Αθήνα, Ιανουάριος 2009
- Τύποι μηχανών ολομέτωπης κοπής-Εφαρμογές στον ελλαδικό χώρο-Παναγιώτης Σ. Ανδρέου, Παύλος Π. Νομικός
- Smith's Elements of Soil Mechanics 8<sup>th</sup> Edition-Ian Smith, Napier University, Edinburgh, Blackwell Publishing
- Tunnel Construction Guidelines-01 TBM Selection-Association of Geotechnical and Geoenvironmental Specialists (Hong Kong)
- Specification and Guidelines for the use of specialist products for Mechanized Tunneling(TBM) in Soft Ground and Hard Rock-EFNARC, April 2005
- Geotechnical Investigations- US Army Corps of Engineers ENGINEERING DESIGN
- GEG-4011 Geotechnical Engineering I-Lecture #28-Elastic Settlements-L.Prieto-Portar 2008
- Notes on the STANDARD PENETRATION TEST-Advanced Engineering Geology & Geotechnics-Missouri University of Science and Technology
- Notes on the CONE PENETROMETER TEST-Advanced Engineering Geology & Geotechnics-Missouri University of Science and Technology
- Measuring the density of Rock, Sand, Till, etc-Greg Balco, University of Washington, November 2003
- Rock Density Lab-Kurt Hollocher, Geology Department, Union College, Schenectady, NY 12308
- New test methodology for estimating the abrasiveness of soils for TBM tunneling-B.Nilsen, F.Dahl, J.Holzhäuser, P.Raleigh
- Clogging of TBM drives in clay-identification and mitigation of risks-M.Thewes STUVA e.V., Cologne, Germany, W. Burger, Herrenknecht AG, Schwanau, Germany
- Closed face tunneling machines and ground stability-A guideline for best practice-British Tunneling Society, Institution of Civil Engineers
- Tunneling in difficult ground-Swelling behavior and identification of swelling rocks-H.H. Einstein, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, U.S.A.
- Rock abrasivity-Rock Mechanics Laboratory, École Polytechnique Fédérale de Lausanne
- TBM and Lining-Essential Interfaces-Nguyen Duc Toan, professor Daniele Peila, Dr. Harald Wagner
- A method for assessing adhesion of clays to tunneling machines-I.Sass, U.Burbaum
- Swelling soil-Eng. Hussam Suhail Al Ghamdi
- Urban Tunneling in soft ground using TBMs-Kalman Kovári, Marco Ramoni
- TBM selection and Specification-Bradford F. Townsend, Paul E. Jenkins
- [http://folk.ntnu.no/bnilsen/T&Tpart2\\_0406.pdf](http://folk.ntnu.no/bnilsen/T&Tpart2_0406.pdf)
- <http://www.geo.auth.gr/758/PDF/2.pdf>
- <http://www.bvfs.at/htm/pub/download/pressuremeter.pdf>

#### 4. Οι εκτιμώμενες Γεωλογικές συνθήκες κατά μήκος της χάραξης της σήραγγας επέκτασης του Μετρό της Θεσσαλονίκης προς Σταυρούπολη

##### 4.1 Γεωλογική σύσταση των γεωολικών

Η ευρύτερη περιοχή στην οποία αναμένεται να πραγματοποιηθεί η επέκταση του υπόγειου σιδηροδρόμου προς τη Σταυρούπολη απαντάται προς τα δυτικά-βορειοδυτικά του πολεοδομικού συγκροτήματος του δήμου Θεσσαλονίκης. Η γεωλογία της ευρύτερης αυτής περιοχής αποτελείται κυρίως από μεταμορφωμένους βραχώδεις σχηματισμούς (Πρασινοσχιστόλιθοι), που συνθέτουν το αλπικό υπόβαθρο αυτής, από τις Νεογενείς αποθέσεις ιζηματογενούς προελεύσεως, οι οποίες ανήκουν στο Μειόκαινο-Πλειόκαινο, και από τις Τεταρτογενείς αποθέσεις, οι οποίες ανήκουν στο Πλειστόκαινο - Ολόκαινο.

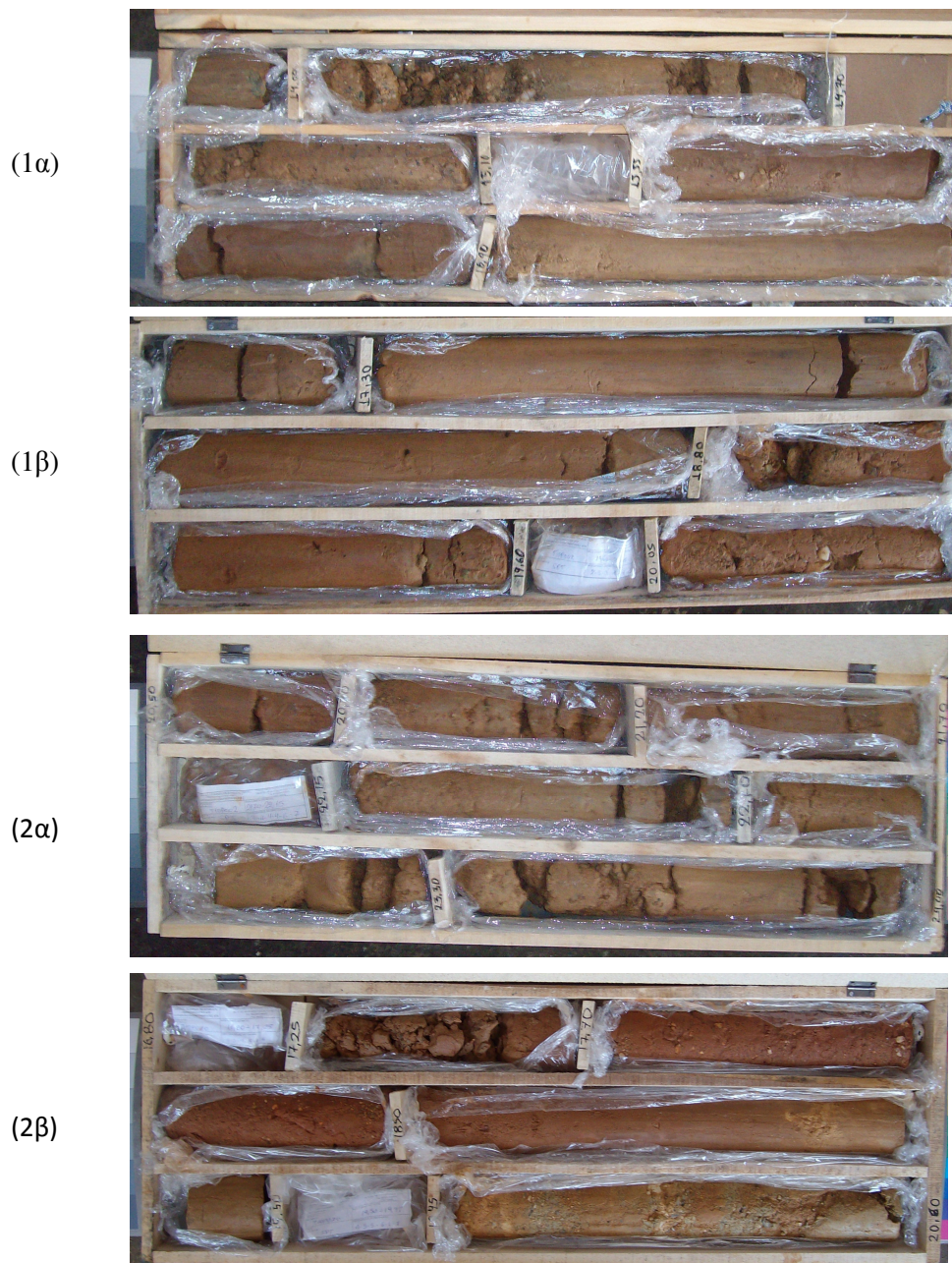
Η περιοχή προς Σταυρούπολη χαρακτηρίζεται από τη παρουσία του Αλπικού υποβάθρου και η εμφάνιση σε εκτεταμένο τμήμα και πολύ κοντά έως και την επιφάνεια των Νεογενών σχηματισμών, που υπόκεινται σε τμήματα περιορισμένου μήκους των Τεταρτογενών αποθέσεων. Ειδικότερα, και βάσει των γεωτρήσεων που πραγματοποιήθηκαν κατά μήκος της χάραξης της σήραγγας, μπορεί να γίνει σε μία πρώτη προσέγγιση ένας διαχωρισμός βάσει το γεωλογικό χαρακτήρα των γεωολικών και τη κατάταξη τμημάτων της σήραγγας σε γεωλογικές ομάδες. Από τη δημιουργία της γεωλογικής τομής, που στηρίζεται στα στοιχεία που ελήφθησαν από τις κατά μήκος της χάραξης γεωτρήσεις, καθίσταται δυνατό να γίνει αυτή η διακριτοποίηση της σήραγγας σε γεωλογικές ζώνες.

Από τη ζωνοποίηση αυτή (σχήμα 4.1.1) προκύπτει ότι στην είσοδο της σήραγγας και για τα πρώτα 50m περίπου το μέτωπο της σήραγγας θα βρίσκεται μέσα στο σχηματισμό της σειράς των Ερυθρών αργίλων. Στο συγκεκριμένο, αρχικό τμήμα της σήραγγας η σειρά των Ερυθρών αργίλων υπόκειται των Τεταρτογενών αποθέσεων και των τεχνητών επιχώσεων. Εν συνεχεία καθώς το μέτωπο της σήραγγας προωθείται από τη χιλιομετρική θέση 0+050 μέχρι και τη θέση 0+375 θα βρίσκεται μέσα στο γεωλογικό σχηματισμό των Τεταρτογενών αποθέσεων. Στη φωτογραφία 1 παρουσιάζεται η φύση των γεωολικών που θεωρείται αντιπροσωπευτική για τη φύση των προς εκσκαφή υλικών κατά τη διάνοιξη της σήραγγας στο βάθος εκσκαφής.



**Φωτογραφία 1**  
**Γεώτρηση T10P024 (βάθος 14.40-29.85m)**

Για το τμήμα της χάραξης από τη Χ.Θ. 0+375 έως και τη Χ.Θ. 0+600 απαντάται πάλι ο σχηματισμός των Νεογενών αποθέσεων. Οι Νεογενείς αποθέσεις υπόκεινται των Τεταρτογενών αποθέσεων και των τεχνητών επιχώσεων ενώ για το τμήμα της σήραγγας από τη Χ.Θ. 0+050 έως τη Χ.Θ. 0+375 τα υπερκείμενα φορτία στα οποία θα υπόκειται η σήραγγα αφορούν τις Τεταρτογενείς αποθέσεις και το στρώμα των τεχνητών επιχώσεων. Στο σύνολο φωτογραφιών 2 παρουσιάζεται η φύση των γεωυλικών που θεωρείται αντιπροσωπευτική για τη φύση των προς εκσκαφή υλικών κατά τη διάνοιξη της σήραγγας στο βάθος εκσκαφής.



**Σύνολο φωτογραφιών 2  
Γεώτρηση T10P020(1), T10P002(2) (βάθος 14.00-24.00m)**

Από τη Χ.Θ. 0+600 έως και τη Χ.Θ. 0+700 περίπου η σήραγγα αναμένεται να συναντήσει μικτές γεωλογικές συνθήκες περιορισμένης έκτασης στη στέψη κυρίως αυτής, καθώς λόγω της αναμενόμενης στρωματογραφίας στο συγκεκριμένο τμήμα και της χάραξης της σήραγγας, το μέτωπο εκσκαφής συναντά τόσο το αλπικό υπόβαθρο της περιοχής όσο και το σχηματισμό των Νεογενών αποθέσεων. Στο σύνολο φωτογραφιών 3 παρουσιάζεται η φύση

των γεωλικών που θεωρείται αντιπροσωπευτική για τη φύση των προς εκσκαφή υλικών κατά τη διάνοιξη της σήραγγας στο βάθος εκσκαφής.

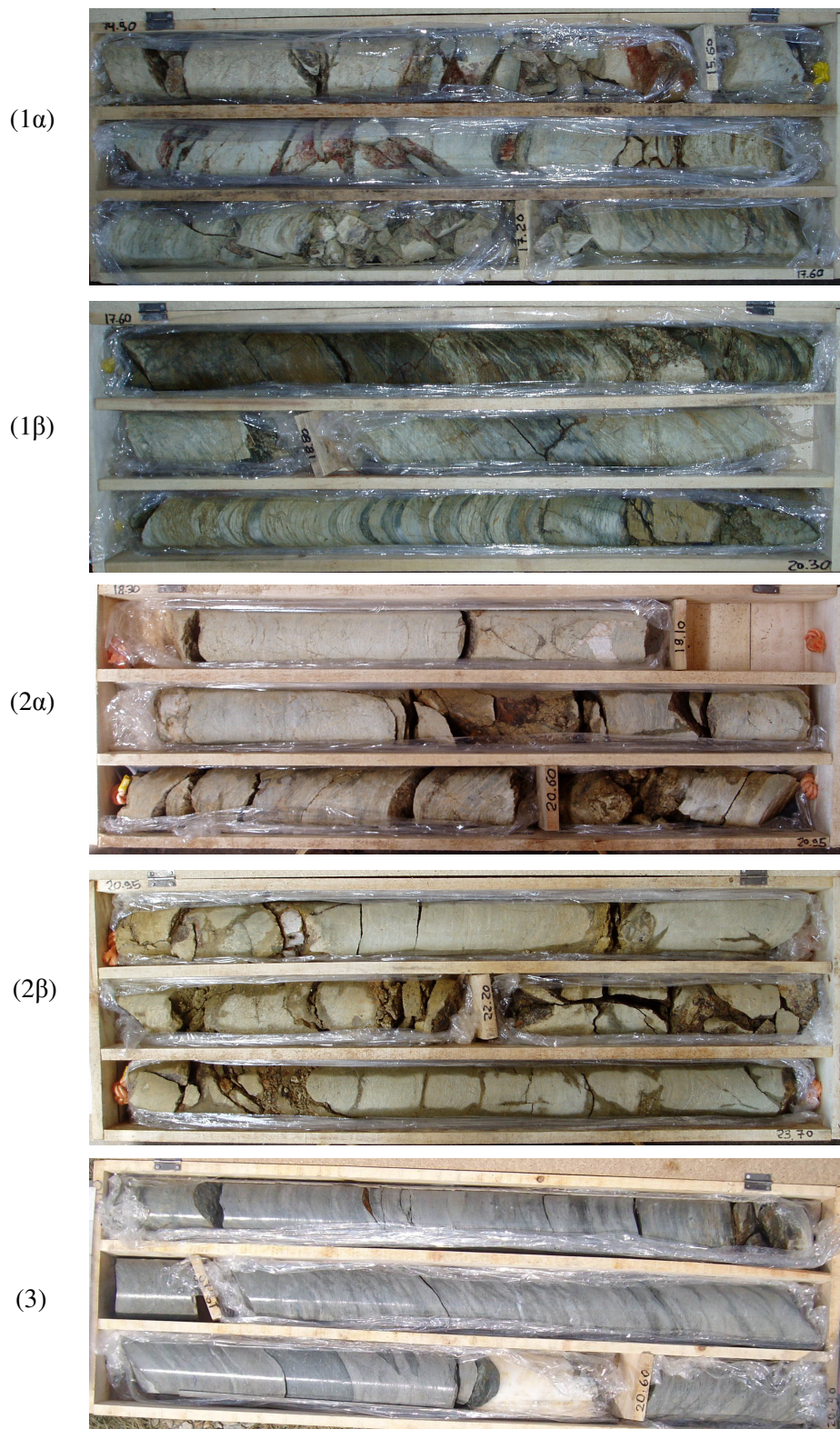


**Σύνολο φωτογραφιών 3  
Γεώτρηση T10P021(1), T10P025(2) (βάθος 13.75-20.00m)**

Από τη Χ.Θ. 0+700 και για απόσταση 1450m περίπου μέχρι τη Χ.Θ. 2+150 ο άξονας της σήραγγας βρίσκεται εξολοκλήρου μέσα στο βραχώδη σχηματισμό των Πρασινοσχιστόλιθων της ενότητας Χορτιάτη και κατά συνέπεια το μήκος μέσα σε αυτό το σκληρό σχηματισμό που αναμένεται να συναντήσει το μέτωπο εκσκαφής είναι αρκετά σημαντικό.

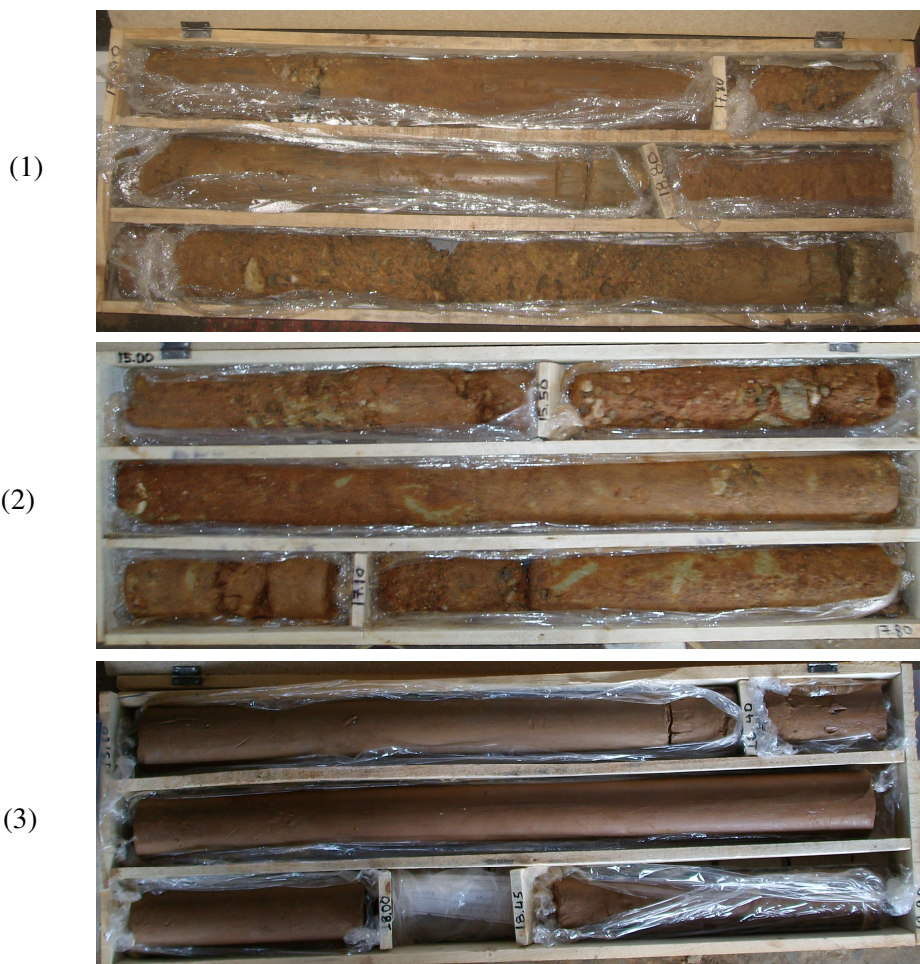
Στο αρχικό μήκος του συγκεκριμένου τμήματος τα υπερκείμενα φορτία οφείλονται στις Τεταρτογενείς αποθέσεις και στο αλπικό υπόβαθρο ενώ προς τα τελευταία μέτρα του τμήματος το βάρος των υπερκειμένων οφείλεται στη σειρά των Ερυθρών αργίλων, στις Τεταρτογενείς αποθέσεις και τις τεχνητές επιχώσεις. Στο κεντρικό κομμάτι του τμήματος τα υπερκείμενα φορτία οφείλονται στο βραχώδη σχηματισμό με το βάθος των τεχνητών επιχώσεων να είναι πάρα πολύ μικρό. Ενδεχομένως θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στη Χ.Θ. 1+950 έως και τη Χ.Θ. 2+050 καθώς στη στέψη της σήραγγας αναμένεται το

μηχάνημα εκσκαφής να συναντήσει τη σειρά των Ερυθρών αργίλων. Στο σύνολο φωτογραφιών 4 παρουσιάζεται η φύση των γεωλικών που θεωρείται αντιπροσωπευτική για τη φύση των προς εκσκαφή υλικών κατά τη διάνοιξη της σήραγγας στο βάθος εκσκαφής.



*Σύνολο φωτογραφιών 4  
Γεώτρηση T10P026(1), T10P022(2), T10P034(3) (βάθος 15.00-24.00m)*

Από τη Χ.Θ. 2+150 και για ένα πάρα πολύ μεγάλο μήκος της τάξης των 2250m έως τη Χ.Θ. 4+400 το μέτωπο εκσκαφής αναμένεται να συναντήσει τη σειρά των Ερυθρών αργίλων κυριαρχώντας στο κεντρικό τμήμα της επέκτασης της σήραγγας. Στο σύνολο φωτογραφιών 5 παρουσιάζεται η φύση των γεωλικών που θεωρείται αντιπροσωπευτική για τη φύση των προς εκσκαφή υλικών κατά τη διάνοιξη της σήραγγας στο βάθος εκσκαφής.



**Σύνολο φωτογραφιών 5  
Γεώτρηση T10P040(1), T10P012(2), T10P059(3) (βάθος 15.00-20.00m)**

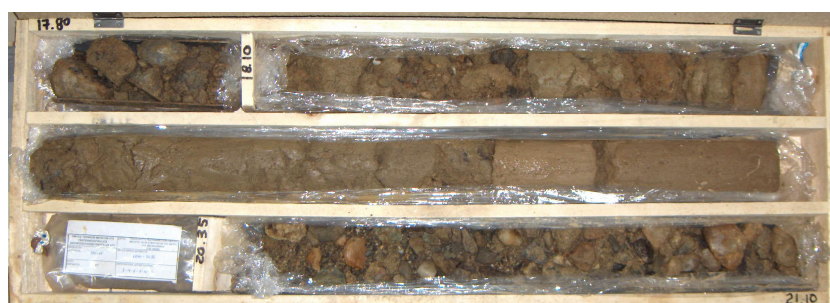
Αλλαγή του γεωλογικού χαρακτήρα του γεωλικού στη στέψη της σήραγγας ενδέχεται να υπάρχει και στο συγκεκριμένο τμήμα της σήραγγας όπως και στο προηγούμενο όπου κυριαρχεί το αλπικό υπόβαθρο. Στη συγκεκριμένη περίπτωση ενδεχομένως να πρέπει να δοθεί προσοχή καθώς για μια απόσταση 100m περίπου από τη Χ.Θ. 2+465 στη στέψη της σήραγγας η εκσκαφή συναντά το σχηματισμό των Τεταρτογενών αποθέσεων. Η σειρά των Ερυθρών αργίλων γενικώς υπόκειται των Τεταρτογενών αποθέσεων με αυτές να υπόκειται των τεχνητών επιχώσεων. Εξαιρέση αποτελούν συγκεκριμένα τμήματα όπου οι Νεογενείς αποθέσεις φτάνουν πολύ κοντά στην εδαφική επιφάνεια με τις τεχνητές επιχώσεις να υπέρκεινται αυτών.

Στο τελευταίο τμήμα της επέκτασης η εκσκαφή αναμένεται να συναντήσει το σχηματισμό των Τεταρτογενών αποθέσεων από τη Χ.Θ. 4+400 μέχρι και το τέλος της σήραγγας. Το βάρος των υπερκειμένων στο συγκεκριμένο τμήμα οφείλεται στις ίδιες τις Τεταρτογενείς αποθέσεις και στις περιορισμένου πάχους τεχνητές επιχώσεις. Στο σύνολο φωτογραφιών 6 παρουσιάζεται η φύση των γεωλικών που θεωρείται αντιπροσωπευτική για τη φύση των προς εκσκαφή υλικών κατά τη διάνοιξη της σήραγγας στο βάθος εκσκαφής.

(1)



(2)



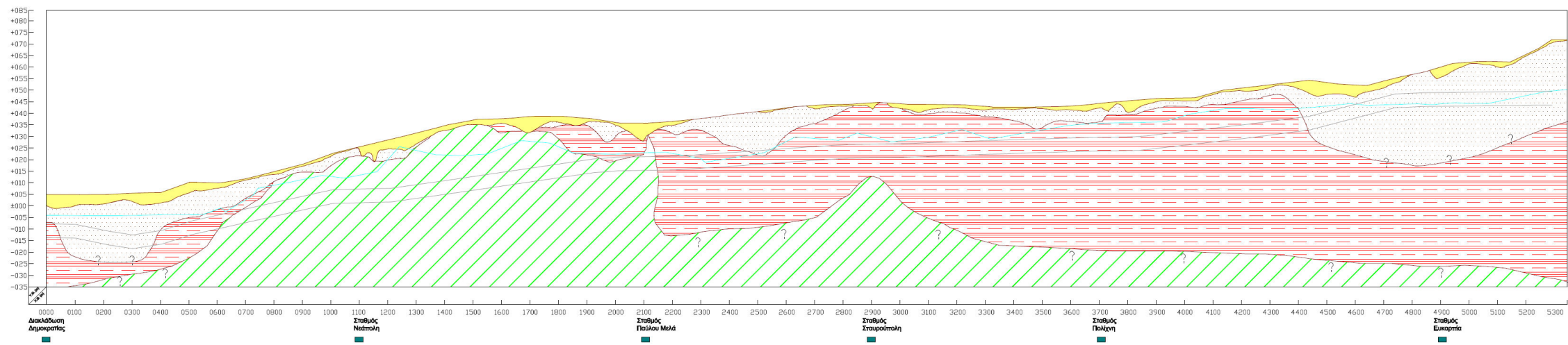
**Σύνολο φωτογραφιών 6  
Γεώτρηση T10P068(1), T10P065(2) (βάθος 15.00-29.40m)**

Συνοπτικότερα, βάσει όσων αναφέρθηκαν παραπάνω, η διακριτοποίηση σε ζώνες της σήραγγας βάσει του γεωλογικού χαρακτήρα των γεωυλικών παρουσιάζεται παρακάτω στο σχήμα 4.1.1.







Χιλιόμετρηση	Γεωλογικές ενότητες κατά μήκος της χάραξης
0+000-0+050	Νεογενείς αποθέσεις-Σειρά Ερυθρών αργίλων
0+050-0+375	Τεταρτογενείς αποθέσεις
0+375-0+600	Νεογενείς αποθέσεις-Σειρά Ερυθρών αργίλων
0+600-0+700	Νεογενείς αποθέσεις-Σειρά Ερυθρών αργίλων/Πρασινοσχιστόλιθοι Ενότητας Χορτιάτη
0+700-2+150	Πρασινοσχιστόλιθοι Ενότητας Χορτιάτη
2+150-4+400	Νεογενείς αποθέσεις-Σειρά Ερυθρών αργίλων
4+400-5+245	Τεταρτογενείς αποθέσεις

**Σχήμα 4.1.1  
Γεωλογικές ενότητες σχηματισμών κατά χιλιομετρική θέση κατά τη διεύθυνση του άξονα της σήραγγας εκσκαφής.**

Οι γεωλογικές ενότητες κατά μήκος της χάραξης παρουσιάζονται σε γεωλογική τομή κατά μήκος της χάραξης της σήραγγας στη τομή T1. Κυρίαρχη πληροφορία αποτέλεσαν οι πραγματοποιηθείσες γεωτρήσεις.

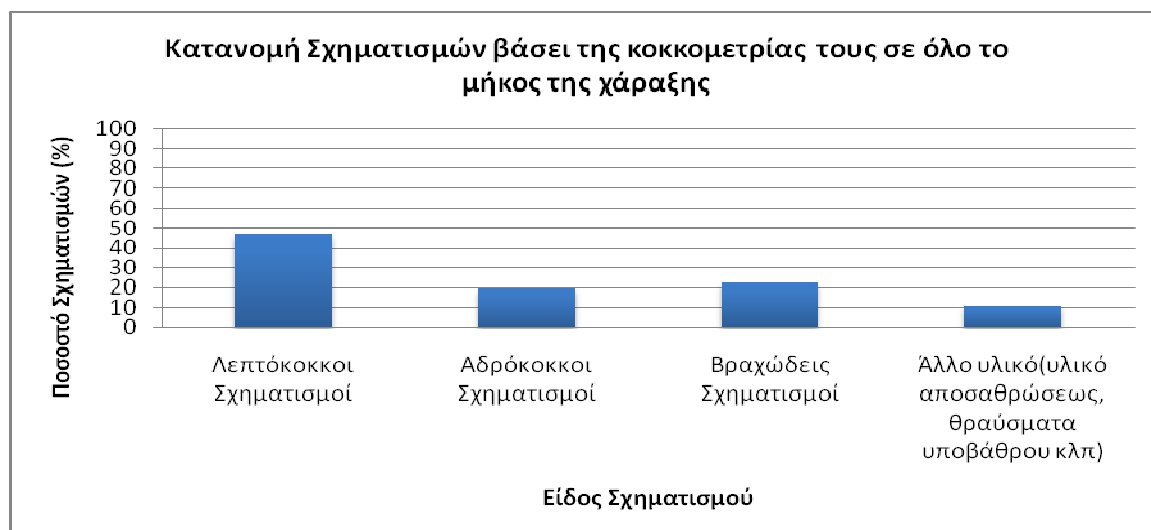


ΤΟΜΗ Τ1: ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΤΟΜΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΕΝΟΤΗΤΩΝ

ΥΠΟΜΝΗΜΑ-ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΕΝΟΤΗΤΕΣ	
	ΤΕΧΝΗΤΕΣ ΕΠΙΧΩΣΕΙΣ
	ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΙΣ ΑΠΟΘΕΣΕΙΣ
	ΝΕΟΓΕΝΕΙΣ ΑΠΟΘΕΣΕΙΣ-ΣΕΙΡΑ ΕΡΥΘΡΩΝ ΑΡΓΙΛΩΝ
	ΕΝΟΤΗΤΑ ΧΟΡΤΙΑΤΗ (Πρασνοχατάλιος)
	Στάθμη υπόγειων υδάτων ( Σεπτέμβριος 2009)
	Μόνος σιράγγας



Μετά την αρχική διάκριση των σχηματισμών από γεωλογικής σκοπιάς μία δεύτερη διακριτοποίηση που δύναται να πραγματοποιηθεί είναι βάσει της γενικής κοκκομετρίας των γεωυλικών. Ο χαρακτηρισμός των σχηματισμών γίνεται με βάση την επικράτηση των λεπτόκοκκων ή των αδρόκοκκων υλικών. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή μία γενική διάκριση της φύσης των υλικών στη περιοχή της σήραγγας. Στο σχήμα 4.1.2 που ακολουθεί παρουσιάζεται η κατανομή των σχηματισμών ως προς τη κοκκομετρική τους και φυσική τους σύσταση σε όλο το μήκος της χάραξης της σήραγγας.



**Σχήμα 4.1.2**

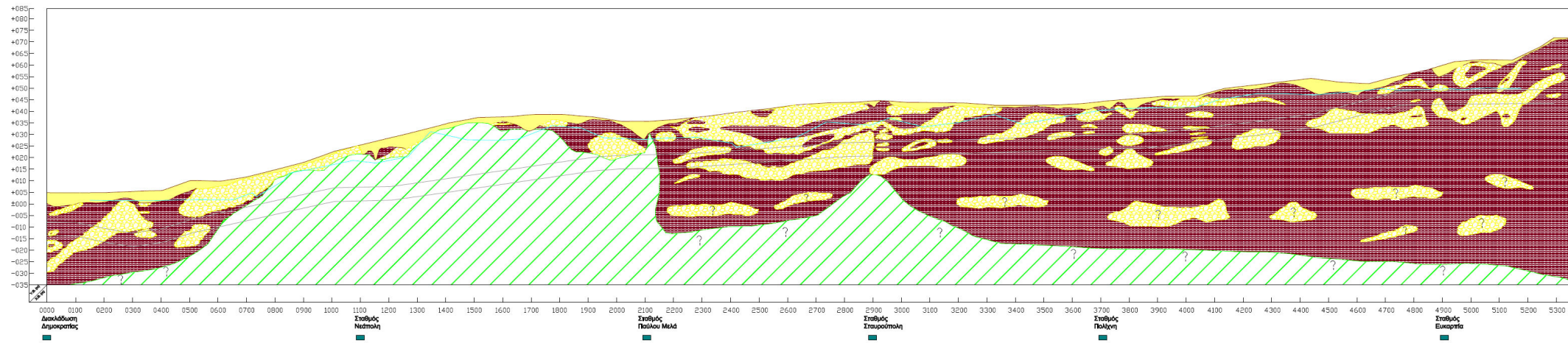
**Κατανομή των σχηματισμών σε όλο το μήκος της χάραξης του άξονα της σήραγγας.  
Παρατηρείται ότι κυριαρχούν οι εδαφικοί, λεπτόκοκκοι σχηματισμοί.**

Η συγκεκριμένη διακριτοποίηση είναι θεμελιώδους σημασίας για τη διάνοιξη της σήραγγας κάνοντας εφαρμογή της μηχανοποιημένης μεθόδου διάνοιξης, εφόσον αυτή επιλεγθεί, καθώς η κοκκομετρία των γεωυλικών αποτελεί κριτήριο και επηρεάζει την επιλογή του κατάλληλου μηχανήματος ολομέτωπης εκσκαφής TBM. Σε μια πρώτη προσέγγιση η κοκκομετρία των γεωυλικών παρουσιάζεται στη τομή στο σχήμα T2 όπου φαίνεται το υλικό των γεωτρήσεων βάσει της κοκκομετρικής τους ανάλυσης. Ο διαχωρισμός των γεωυλικών συνεπώς προχωρά πέρα από το αυτόν σε γεωλογικές ενότητες και στη κοκκομετρία τους συνθέτοντας τις ακόλουθες ομάδες:







- Λεπτόκοκκα γεωυλικά: καθαρή άργιλος ή σε προσμίξεις με άμμο ή χάλικες
- Αδρόκοκκα γεωυλικά: καθαρή άμμος, ιλυώδης άμμος, αργιλώδης άμμος ή με σποραδικούς χάλικες, καθαροί χάλικες ή με προσμίξεις αργίλου και άμμου, τρόχμαλοι, τεμάχη υποβάθρου

Η συγκεκριμένη διακριτοποίηση πραγματοποιείται μόνο για τα εδαφικά γεωυλικά του γεωλογικού υποβάθρου της ευρύτερης περιοχής της διάνοιξης της σήραγγας όπου η κοκκομετρική διαβάθμιση έχει νόημα. Μια πιο συγκεκριμένη εικόνα για το πώς αναμένεται να αναπτύσσονται οι εδαφικοί σχηματισμοί στο χώρο στη περιοχή διάνοιξης της σήραγγας φαίνεται στη τομή T2 όπου βάσει των ευρημάτων των υφιστάμενων γεωτρήσεων εκπονήθηκε η παρουσιασθείσα τομή με βάση την κοκκομετρική διαβάθμιση των εδαφικών γεωυλικών.

Μια άλλη πιο αναλυτική διακριτοποίηση πραγματοποιείται εδώ με βάση τη σύσταση των οριζόντων όπως προέκυψε από τις υφιστάμενες γεωτρήσεις. Η ομαδοποίηση αυτή των σχηματισμών στη περίπτωση αυτή γίνεται βάσει του κυρίαρχου γεωυλικού σύστασης των, όπως για παράδειγμα ο σχηματισμός «Αμμόδης άργιλος με χάλικες», «Χαλικώδης άργιλος με άμμο», «Άργιλος» κοκ ομαδοποιούνται και χαρακτηρίζονται ως «Αργιλικά εδάφη» αφού αυτό είναι το γεωυλικό που επικρατεί.



ΤΟΜΗ ΤΣ: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗΣ ΓΕΩΥΛΩΝ

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ	
	ΤΕΧΝΗΤΕΣ ΕΠΙΧΩΣΕΙΣ
	ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΑ ΓΕΩΥΛΩΝΑ (Καθαρή Άμμος ή σε προσιμίες με άμμο ή χάλικα)
	ΑΒΡΟΚΟΚΚΑ ΓΕΩΥΛΩΝΑ (Καθαρή Άμμος, Ηλεκδής Άμμος, Αργιλένης Άμμος ή με σπασμένους χάλικα, Καθαρά Χάλικα ή με προσιμίες αργίλου και άμμου, Τρόχιακα, πυρήνη υποδάστρου)
	ΛΙΠΙΚΟ ΥΠΟΔΑΣΤΡΟ (Προσιμιοεπιπέδους)
	Σταθμι υπογειων υδτων ( Σεπτέμβριος 2009)
	Άξονας οδού

Αντίστοιχα προχωρούμε και σε διάκριση για τους σχηματισμούς όπου κυριαρχούν στη σύσταση αυτών άλλα γεωυλικά όπως ιλύς, άμμος, και χάλικες. Η διακριτοποίηση αυτή παρουσιάζεται στο σύνολο της πιο αναλυτικά στο σχήμα 4.1.3 και από αυτή γίνεται δυνατή η διάκριση της φύσης των γεωυλικών και η επικράτηση αυτών βάσει των κυρίαρχων που είναι η άργιλος, η ιλύς, η άμμος και οι χάλικες.

Γεωλογικός χαρακτηρισμός με βάση την κοκκομετρία	Γεωλογική σύσταση βάσει του γεωυλικού που επικρατεί (Κατά χαρακτηρισμό) Γενικά	Γεωλογική σύσταση βάσει του γεωυλικού που επικρατεί (Κατά χαρακτηρισμό) Αναλυτικά
<b>Λεπτόκοκκοι Σχηματισμοί</b>	Αργιλικός Οριζοντας/Στρώση	Άργιλος
		Άργιλος με άμμο
		Άργιλος με χάλικες
		Αμμώδης Άργιλος
		Αμμώδης Άργιλος με χάλικες
		Χαλικώδης Άργιλος
		Χαλικώδης Άργιλος με άμμο
		Αμμώδης Άργιλος/Ιλύς
<b>Αδρόκοκκοι Σχηματισμοί</b>	Αμμώδης Οριζοντας/Στρώση	Άμμος
		Άμμος με χάλικες
		Αργιλώδης Άμμος
		Ιλυώδης Άμμος
		Αργιλώδης Άμμος με χάλικες
	Χαλικώδης Οριζοντας/Στρώση	Ιλυώδης Άμμος με χάλικες
		Χάλικες
		Αργιλώδεις Χάλικες
		Αργιλώδεις Χάλικες με άμμο
		Ιλυώδεις Χάλικες με άμμο
		Τρόχμαλοι, τεμάχη υποβάθρου

**Σχήμα 4.1.3**  
**Ομαδοποίηση σχηματισμών με βάση τη γενική κοκκομετρία και το συστατικό όπου επικρατεί.**

Τα στοιχεία του σχήματος 4.1.3 προέκυψαν από τις υφιστάμενες γεωτρήσεις όπου φαίνεται η αναμενόμενη επικράτηση στο χώρο της διεύθυνσης της σήραγγας των παραπάνω ομάδων όπου επικρατούν τα αργιλικά, τα αμμώδη και τα χαλικώδη γεωυλικά. Σημειώνεται δε ότι όπου αναφέρεται οριζοντας ή στρώση άμμου, κατά τη περιγραφή σε ένα γεωλογικό σχηματισμό, η άμμος αυτή παρουσιάζει σε κάποιο βαθμό συνεκτικότητα λόγω της παρουσίας συνεκτικού υλικού, είτε άργιλο είτε ιλύ, στο σχηματισμό.

Κατά μήκος της χάραξης λοιπόν από τη χιλιομετρική θέση 0+000 έως τη χιλιομετρική θέση 0+120 το μέτωπο της σήραγγας αναμένεται να συναντήσει λεπτόκοκκους σχηματισμούς όπου επικρατεί το αργιλικό στοιχείο. Εν συνεχεία από τη Χ.Θ. 0+120 και για μήκος 70m περίπου έως τη Χ.Θ. 0+190 το μέτωπο εκσκαφής αναμένεται να συναντήσει αδρόκοκκους σχηματισμούς αμμώδους φύσης ενώ από τη Χ.Θ. 0+190 έως τη Χ.Θ. 0+265 αναμένονται μικτές συνθήκες στο μέτωπο με παρουσία τόσο αδρόκοκκων όσο και λεπτόκοκκων σχηματισμών αμμώδους και αργιλικής φύσης αντίστοιχα. Από τη Χ.Θ. 0+265 έως και τη Χ.Θ. 0+600 ο άξονας της σήραγγας αναμένεται να συναντήσει καθ' όλο το συγκεκριμένο μήκος λεπτόκοκκους σχηματισμούς αργιλικής φύσης με παρουσία φακών αδρόκοκκων σχηματισμών.

Από τη Χ.Θ. 0+600 έως και τη Χ.Θ. 0+700 οι συνθήκες του μετώπου είναι μικτές έχοντας παρουσία υλικού αργιλικής σύστασης και εμφάνιση του αλπικού υποβάθρου. Από τη Χ.Θ. 0+700 έως και τη Χ.Θ. 2+150 ο άξονας της σήραγγας βρίσκεται αποκλειστικά μέσα στην ενότητα των Πρασινοσχιστόλιθων, με πιθανή παρουσία λεπτόκοκκου και αδρόκοκκου εδαφικού υλικού στη στέψη του μετώπου περί τη Χ.Θ. 2+000, ενώ από εκεί και μέχρι τη Χ.Θ. 3+300 αναμένονται συνεχείς εναλλαγές λεπτόκοκκων, αργιλικών γεωυλικών με αδρόκοκκους σχηματισμούς αμμώδους και χαλικώδους σύστασης.

Από τη Χ.Θ. 3+300 έως και τη Χ.Θ. 4+400 το επικρατών γεωυλικό είναι λεπτόκοκκοι σχηματισμοί αργιλικής φύσης με ταυτόχρονη παρουσία φακών αδρόκοκκων γεωυλικών ενώ από τη Χ.Θ. 4+400 μέχρι και το τέλος της σήραγγας αναμένονται πάλι εναλλαγές κυρίως αδρόκοκκων σχηματισμών, αμμώδους και χαλικώδους φύσης, με σχηματισμούς αργιλικών, εδαφικών υλικών. Τα παραπάνω παρατίθενται συγκεντρωτικά στο σχήμα 4.1.4 .

Χιλιόμετρηση	Διακριτοποίηση βάσει της κοκκομετρικής διαβάθμισης και της φύσης των γεωυλικών
0+000-0+120	Λεπτόκοκκοι σχηματισμοί αργιλικής φύσης
0+120-0+190	Αδρόκοκκοι σχηματισμοί αμμώδους φύσης
0+190-0+265	Μικτές συνθήκες αδρόκοκκων/λεπτόκοκκων σχηματισμών
0+265-0+600	Λεπτόκοκκοι σχηματισμοί αργιλικής φύσης με φακούς αμμώδων γεωυλικών
0+600-0+700	Μικτές συνθήκες αργιλικού υλικού/Αλπικού υποβάθρου Πρασινοσχιστόλιθων Ενότητας Χορτιάτη
0+700-2+150	Πρασινοσχιστόλιθοι Ενότητας Χορτιάτη
2+150-3+300	Εναλλαγές λεπτόκοκκων/αδρόκοκκων σχηματισμών
3+300-4+400	Λεπτόκοκκοι σχηματισμοί αργιλικής φύσης με φακούς αμμώδων γεωυλικών
4+400-5+245	Εναλλαγές λεπτόκοκκων/αδρόκοκκων σχηματισμών

**Σχήμα 4.1.4**  
*Διακριτοποίηση βάσει της κοκκομετρικής διαβάθμισης και της φύσης των γεωυλικών κατά χιλιομετρική θέση επί του άξονα της σήραγγας.*

## 4.2 Χαρακτηρισμός των εδαφικών υλικών βάσει της συνεκτικότητας, της πυκνότητας και της αντοχής των σχηματισμών

### 4.2.1 Λεπτόκοκκοι εδαφικοί σχηματισμοί

Οι λεπτόκοκκοι εδαφικοί σχηματισμοί των οποίων η σύσταση χαρακτηρίζεται ανάλογα με το επικρατών γεωυλικό, είτε αυτό είναι άργιλος είτε ιλύς, διακριτοποιούνται βάσει της συνεκτικότητας τους και κατατάσσονται στις παρακάτω κατηγορίες:

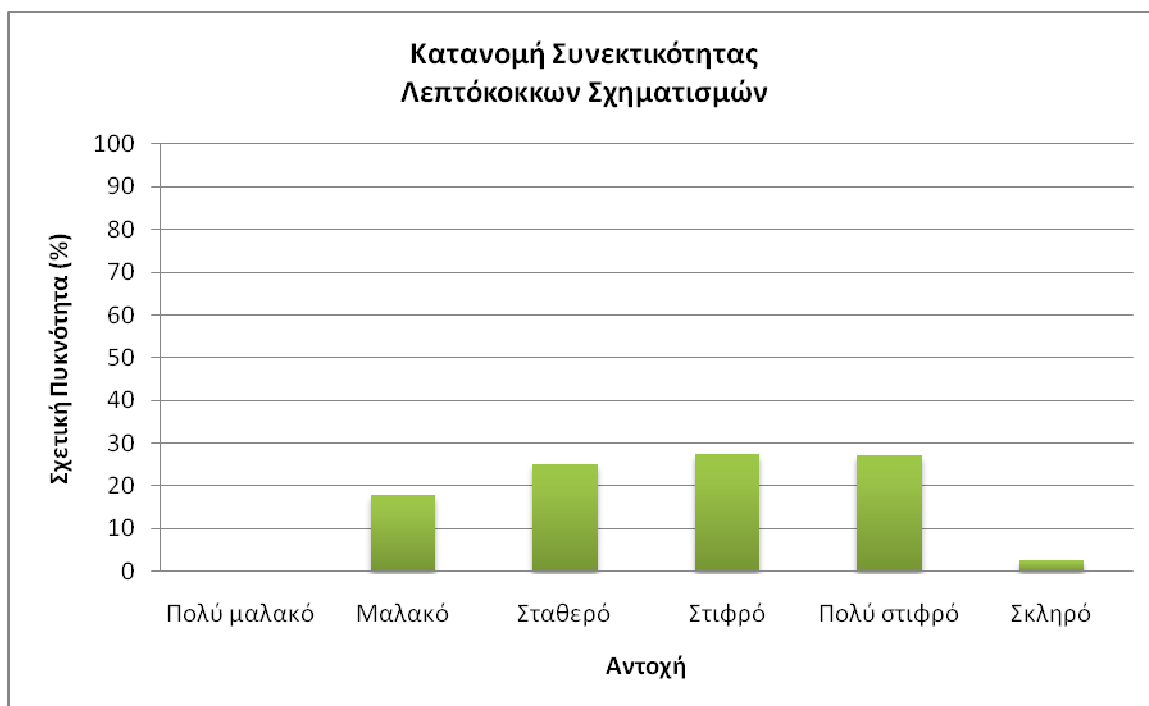
- Πολύ μαλακό
- Μαλακό
- Σταθερό
- Στιφρό
- Πολύ στιφρό
- Σκληρό

Κατηγοριοποίηση αυτή των λεπτόκοκκων γεωυλικών πραγματοποιήθηκε βάσει των υφιστάμενων γεωτρήσεων σε όλο το μήκος του άξονα της σήραγγας. Στις τομές T3' και T4'

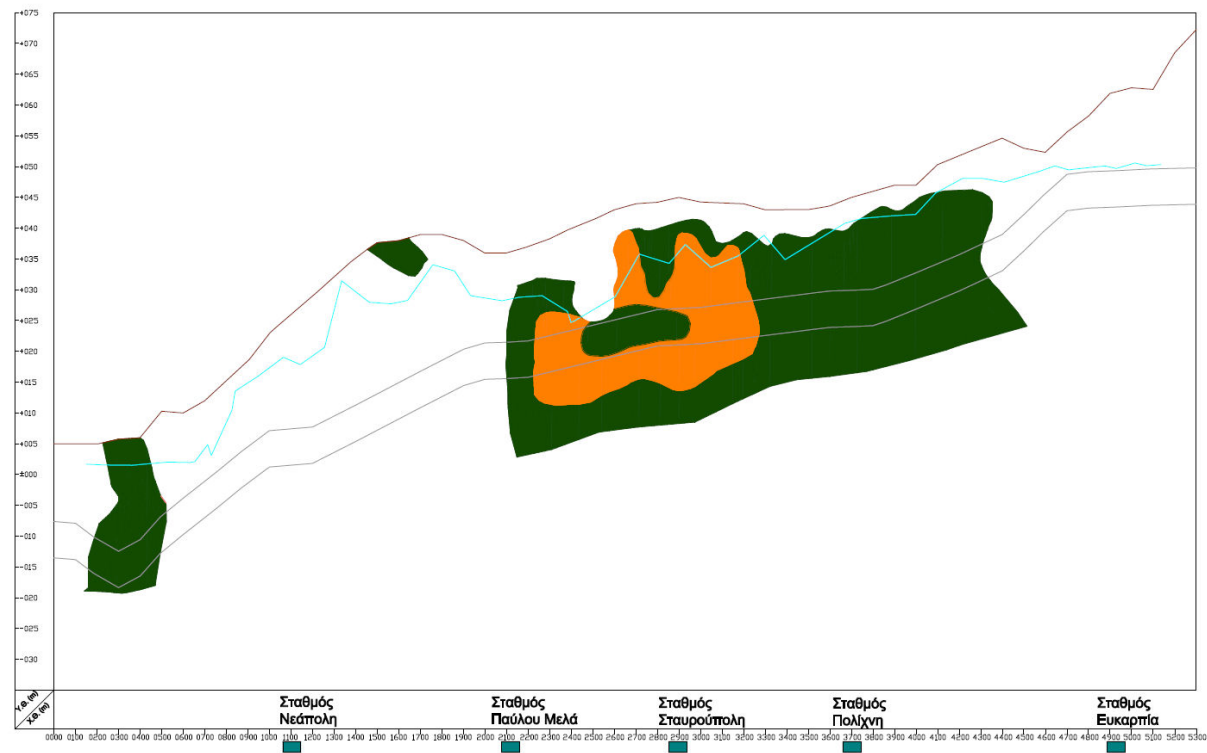
πραγματοποιείται διαχωρισμός και παρουσιάζονται ξεχωριστά τα λεπτόκοκκα γεωυλικά τα οποία χαρακτηρίζονται από καλή συνεκτικότητα και χαμηλή συνεκτικότητα αντιστοίχως. Στη τομή T5' παρουσιάζονται συγκεντρωτικά, βάσει τα στοιχεία των τομών T3' και T4' κατά την εκσκαφή του μετώπου καθώς αυτό προχωράει. Από τις παραπάνω προβολές περιγραφής συγκεκριμένων χαρακτηριστικών φαίνεται ότι κατά μήκος της χάραξης οι λεπτόκοκκοι σχηματισμοί χαρακτηρίζονται κυρίως ως μαλακοί έως πολύ στιφροί με ενδεχόμενες περιορισμένες εμφανίσεις πολύ μαλακών και σκληρών σχηματισμών.

Κυρίως από τη τομή T5' και τη τομή T2 μπορεί να γίνει σε κάποιο βαθμό διακριτοποίηση και ζωνοποίηση κατά τμήματα σε μήκος στον άξονα της σήραγγας όπου είναι χαρακτηριστική η επικράτηση των λεπτόκοκκων, αργιλικής φύσης γεωυλικών ενώ η επικράτηση τους αυτή στο περιβάλλον εκσκαφής της σήραγγας μπορεί να διακριθεί σε περιοχές επικράτησης μαλακών, σταθερών, στιφρών και πολύ στιφρών σχηματισμών όπως παρουσιάζεται στη τομή T5'.




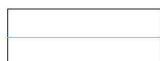
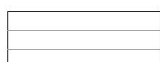
Οι σχηματισμοί των λεπτόκοκκων γεωυλικών αποτελούν μέρος των «Τεταρτογενών Αποθέσεων» στο αρχικό και τελικό τμήμα της σήραγγας ενώ στο υπόλοιπο τμήμα της σήραγγας που βρίσκεται εντός εδαφικού υλικού αποτελούν μέρος της σειράς των «Ερυθρών Αργίλων». Το μεγαλύτερο ποσοστό των λεπτόκοκκων γεωυλικών των «Τεταρτογενών Αποθέσεων» συνθέεται από μαλακούς έως σταθερούς σχηματισμούς και σε μικρότερο βαθμό στιφροί έως πολύ στιφροί, ενώ για τη «Σειρά των Ερυθρών Αργίλων» οι επικρατούντες λεπτόκοκκοι σχηματισμοί είναι οι στιφροί έως πολύ στιφροί όπως φαίνεται και από τη τομή T5'. Παρακάτω ακολουθούν οι κατανομές της συνεκτικότητας των στρώσεων ή οριζόντων σε μορφή ιστογράμματος στο σχήμα 4.2.1.1. Σημειώνεται ότι όπου δε παρατηρούνται στη τομή T5' προβολές χαρακτηρισμού της συνεκτικότητας των λεπτόκοκκων οριζόντων αυτό ενδεχομένως να προέρχεται είτε από απουσία τους στη συγκεκριμένη περιοχή είτε σε έλλειψη στοιχείων από τη εδαφογεωτεχνική έρευνα.

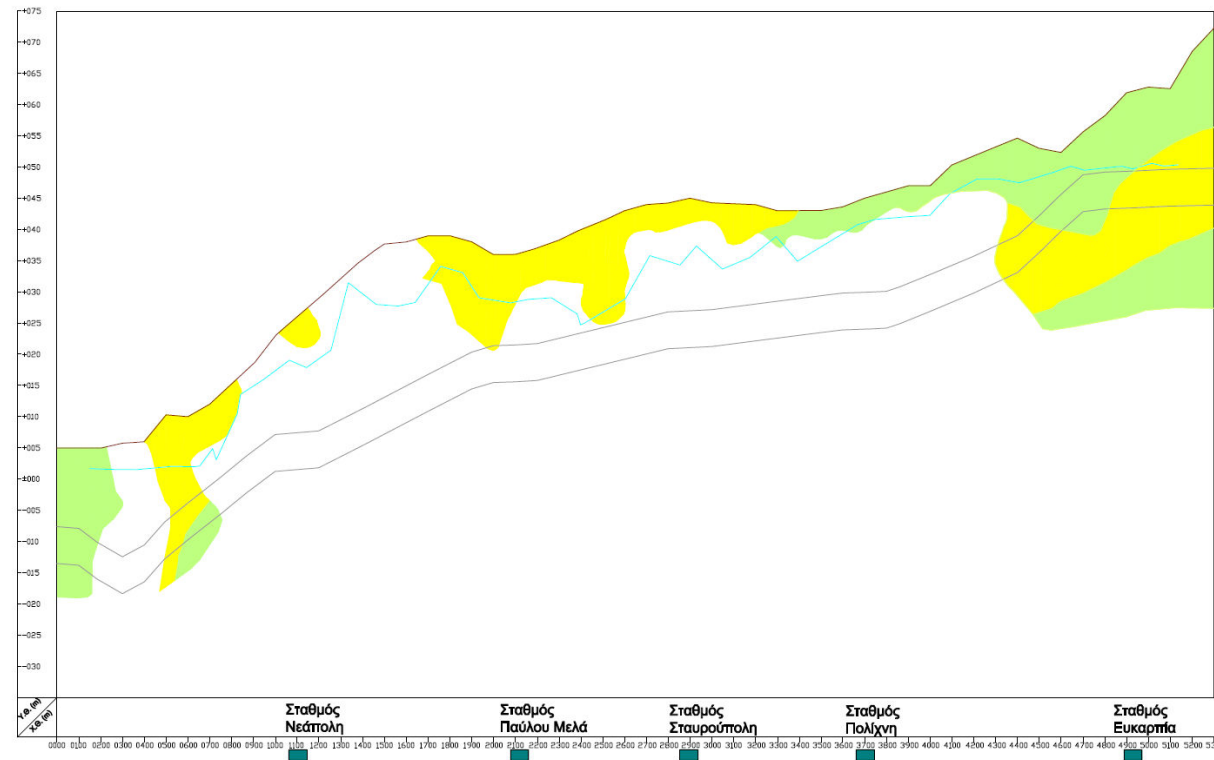


**Σχήμα 4.2.1.1**  
**Κατανομή της συνεκτικότητας των λεπτόκοκκων εδαφικών σχηματισμών στο σύνολο τους. Παρατηρείται ότι τα λεπτόκοκκα γεωυλικά καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα συνεκτικότητας.**




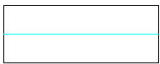



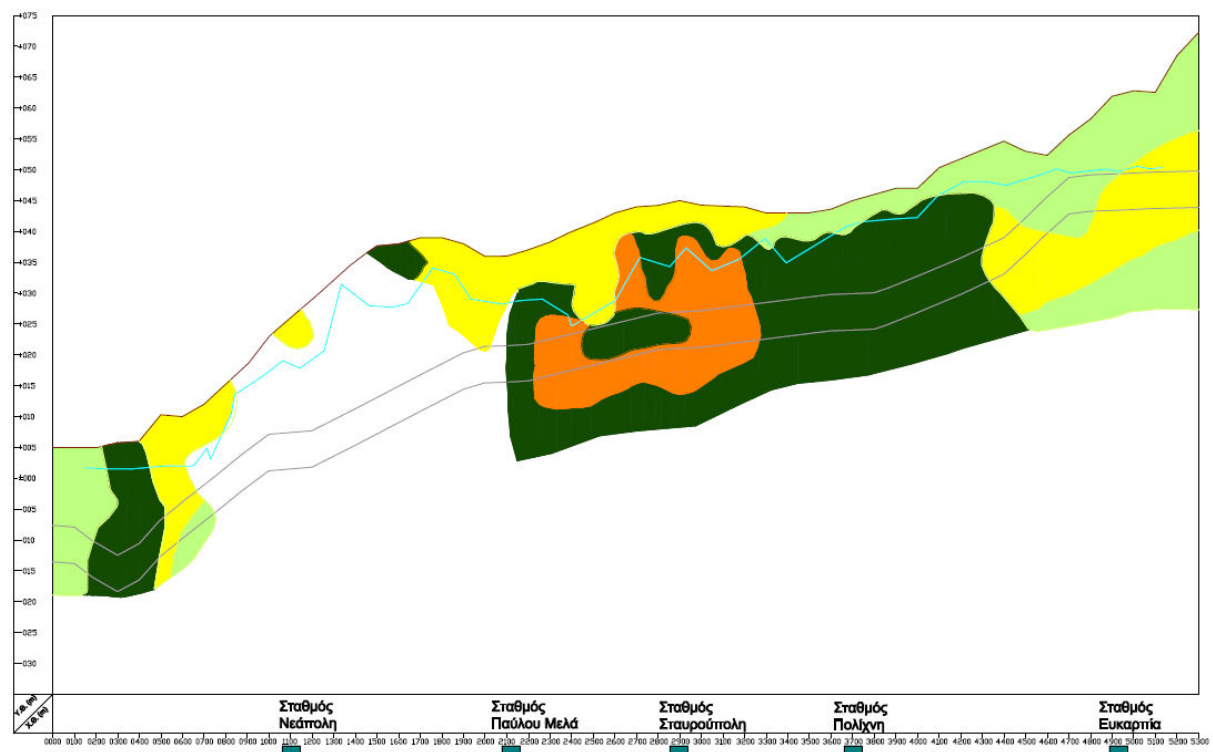
ΤΟΜΗ Τ3: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΑΔΡΟΚΟΚΚΩΝ ΚΑΙ ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΩΝ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΛΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ

ΥΠΟΜΝΗΜΑ-ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ	
	Σπφρά έως πολύ σπφρά λεπτόκοκκα γεωυλικά
	Πικνά έως πολύ πικνά αδρόκοκκα γεωυλικά
	Εδαφική επιφάνεια
	Στάθμη υπόγειων υδάτων ( Σεπτέμβριος 2009)
	Άξονας σήραγγας








ΤΟΜΗ Τ4: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΑΔΡΟΚΟΚΚΩΝ ΚΑΙ ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΩΝ ΓΕΩΥΛΙΚΩΝ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ

ΥΠΟΜΝΗΜΑ-ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ	
	Μολακά έως σταθερά λεπτόκοκκα γεωυλικά
	Χαλαρά ως μέτρια πικνά αδρόκοκκα γεωυλικά
	Εδαφική επιφάνεια
	Στάθμη υπόγειων υδάτων ( Σεπτέμβριος 2009)
	Άξονας σήραγγας



ΤΟΜΗ Τ5: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΑΔΡΟΚΟΚΚΩΝ ΚΑΙ ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΩΝ ΓΕΩΛΙΚΩΝ ΚΑΛΗΣ ΚΑΙ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ

ΥΠΟΜΝΗΜΑ-ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ			
	Σφερά έως πολύ σφερά λεπτόκοκκα γεωλικά		Πικνά έως πολύ πικνά αδρόκοκκα γεωλικά
	Μαλακά έως σταθερά λεπτόκοκκα γεωλικά		Χαλαρά ως μέτρια πικνά αδρόκοκκα γεωλικά
	Εδαφική επιφάνεια		
	Στάθμη υπόγειων υδάτων ( Σεπτέμβριος 2009)		
	Άξονας σήραγγας		



Παρουσιάζεται επίσης η ποσοστιαία κατανομή της συνεκτικότητας των λεπτόκοκκων γεωυλικών στο σύνολο της γεωλογικής ενότητας των «Τεταρτογενών Αποθέσεων» και των «Νεογενών Αποθέσεων-Σειρά Ερυθρών Αργίλων» στα σχήματα 4.2.1.2 και 4.2.1.3 που ακολουθούν.



**Σχήμα 4.2.1.2**  
*Κατανομή της συνεκτικότητας των λεπτόκοκκων εδαφικών σχηματισμών της γεωλογικής ενότητας των Τεταρτογενών Αποθέσεων. Οι λεπτόκοκκοι σχηματισμοί που επικρατούν είναι μαλακοί έως σταθεροί.*



**Σχήμα 4.2.1.3**  
*Κατανομή της συνεκτικότητας των λεπτόκοκκων εδαφικών σχηματισμών της γεωλογικής ενότητας των Νεογενών Αποθέσεων. Οι λεπτόκοκκοι σχηματισμοί που επικρατούν είναι στη πλειονότητα τους πολύ στιφροί.*

Επομένως κατά μήκος της χάραξης της σήραγγας οι καλύτερες συνθήκες σε ότι αφορά τα τμήματα εντός εδαφικών, κυρίως λεπτόκοκκων, γεωυλικών εντοπίζονται από τη χιλιομετρική

θέση 2+150 έως τη χιλιομετρική θέση 4+200 όπου η κύρια γεωλογική ενότητα είναι οι «Νεογενείς Αποθέσεις-Σειρά Ερυθρών Αργίλων» και οι κυρίαρχοι σχηματισμοί που τη συνθέτουν χαρακτηρίζονται από στιφροί έως πολύ στιφροί.

Μέσες συνθήκες σε ότι αφορά τη συνεκτικότητα αναμένονται από τη χιλιομετρική θέση 0+300 έως τη χιλιομετρική θέση 0+700 όπου επικρατεί η γεωλογική ενότητα των «Ερυθρών Αργίλων», πλησίον του αρχικού τμήματος της σήραγγας, όπου οι λεπτόκοκκοι σχηματισμοί χαρακτηρίζονται από σταθεροί έως στιφροί με σημειακές εμφανίσεις μαλακών και πολύ στιφρών.

Οι πτωχότερες συνθήκες κατά μήκος της χάραξης αναφορικά με τη συνεκτικότητα των λεπτόκοκκων σχηματισμών αναμένεται να παρουσιαστούν στο αρχικό τμήμα της σήραγγας από τη χιλιομετρική θέση 0+000 έως τη 0+300 όπου έχουμε επικράτηση κυρίως των «Τεταρτογενών Αποθέσεων». Από τις υφιστάμενες γεωτρήσεις η πληροφορία που προκύπτει για τους σχηματισμούς του συγκεκριμένου τμήματος είναι περιορισμένη και χαρακτηρίζει το σχηματισμό μαλακό έως στιφρό.

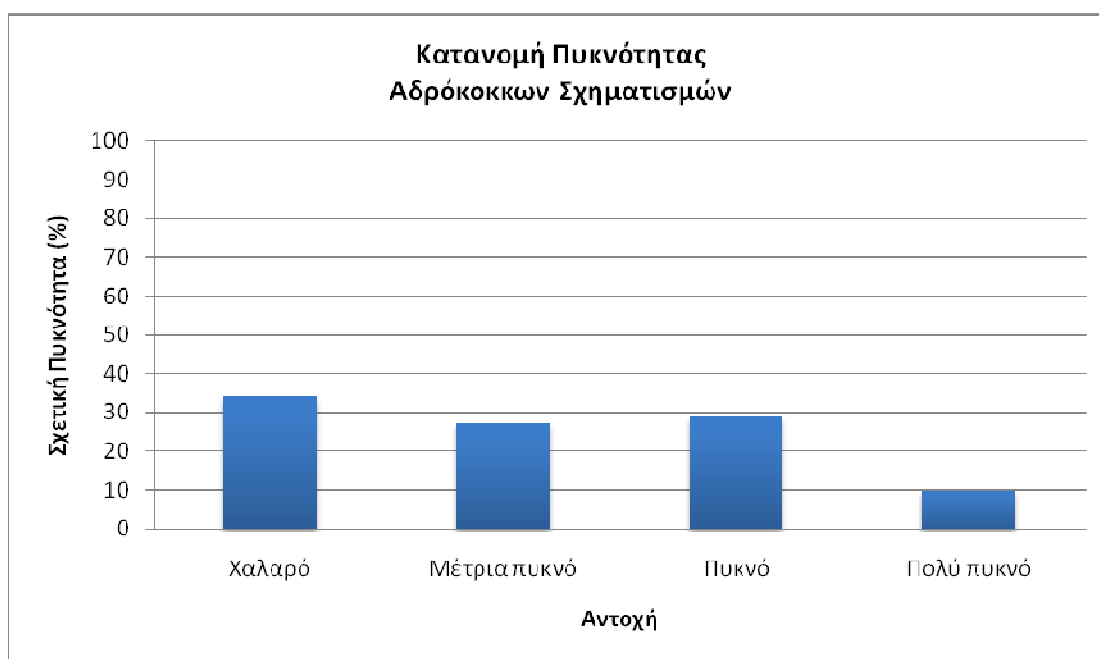
Το τελευταίο τμήμα της σήραγγας από τη χιλιομετρική θέση 4+200 έως το τέλος της χάραξης χαρακτηρίζεται κυρίως από τη γεωλογική ενότητα των «Τεταρτογενών Αποθέσεων» η οποία συνθέτεται από μαλακούς έως σταθερούς σχηματισμούς κυρίως οπότε ενδεχομένως να μπορεί να γίνει η υπόθεση ότι ανάλογες είναι οι συνθήκες που κυριαρχούν και για το αρχικό τμήμα της σήραγγας όπου η πληροφορία για τη συνεκτικότητα ήταν πιο περιορισμένη όπως έχει ήδη αναφερθεί.

## 4.2.2 Αδρόκοκκοι εδαφικοί σχηματισμοί

Αντίστοιχα και οι αδρόκοκκοι σχηματισμοί, των οποίων η σύσταση χαρακτηρίζεται από την επικράτηση αμμώδων ή χαλικώδων γεωυλικών, κατατάσσονται βάσει της πυκνότητας τους σε κατηγορίες ανάλογα με το πόσο πυκνό ή πόσο χαλαρό είναι το υπό εξέταση γεωυλικό. Κατά συνέπεια επομένως οι αδρόκοκκοι σχηματισμοί με βάση τη πυκνότητα τους κατατάσσονται στις εξής τέσσερις κατηγορίες:

- Χαλαρό
- Μέτρια πυκνό
- Πυκνό
- Πολύ πυκνό

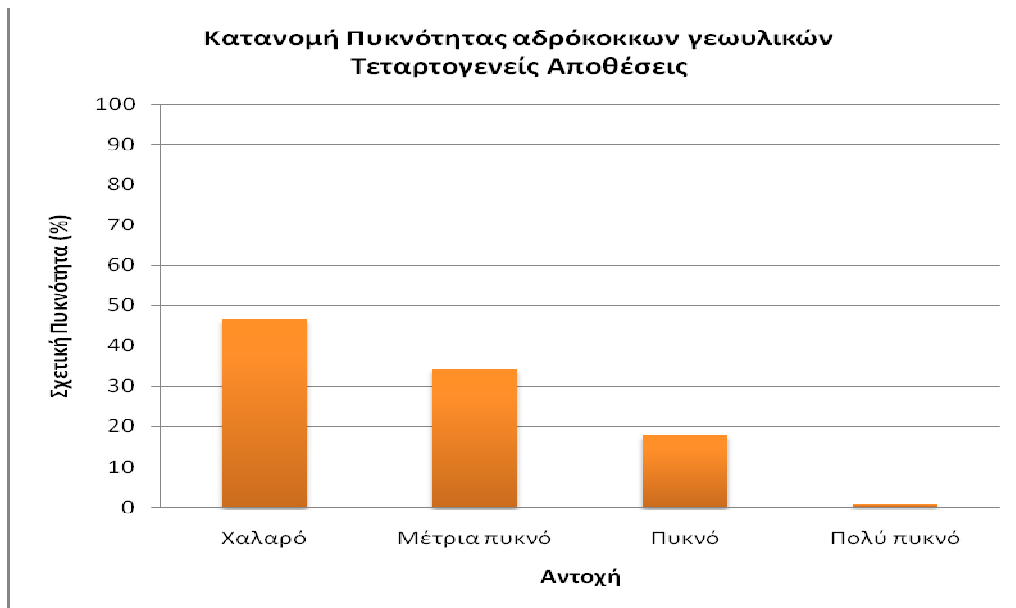
Στις τομές T3' και T4' παρουσιάζονται ξεχωριστά οι σχηματισμοί όπου επικρατούν τα πυκνότερα, αδρόκοκκα γεωυλικά και τα πιο χαλαρά αντίστοιχως. Από τις πληροφορίες που αντλούνται από τις παραπάνω προβολές, βάσει των υφιστάμενων γεωτρήσεων, η τομή T5' συμπληρώνεται και για τα αδρόκοκκα γεωυλικά και παρουσιάζονται οι θέσεις αυτών ανάλογα με τη πυκνότητα τους κατά τη προχώρηση του μετώπου εκσκαφής. Παρακάτω ακολουθούν οι κατανομές της πυκνότητας των στρώσεων ή οριζόντων σε μορφή ιστογράμματος στο σχήμα 4.2.2.1 .



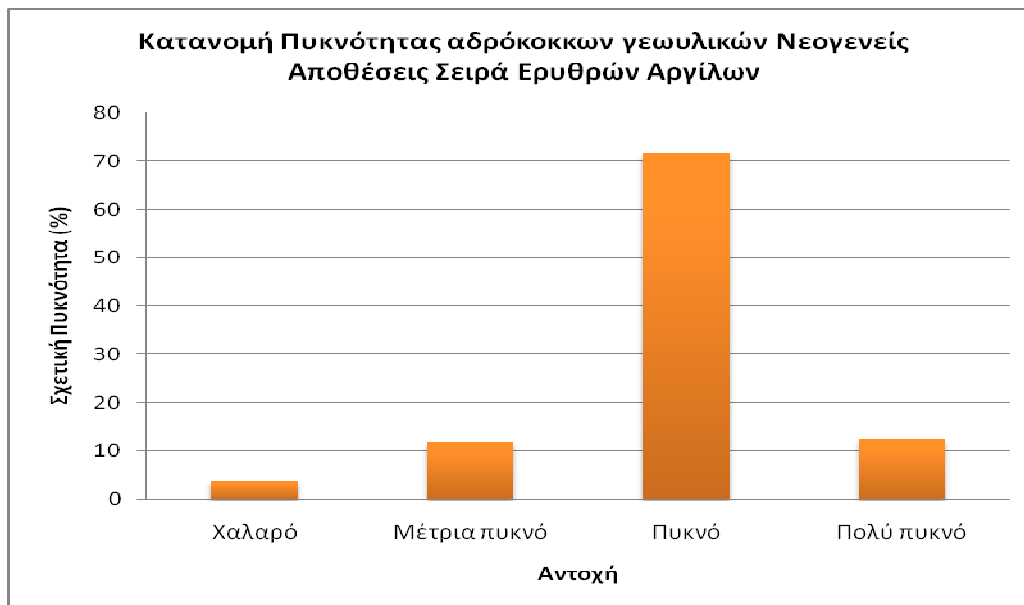
**Σχήμα 4.2.2.1**

**Κατανομή της πυκνότητας των αδρόκοκκων εδαφικών σχηματισμών στο σύνολο τους. Παρατηρείται ότι τα αδρόκοκκα γεωυλικά καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα συνεκτικότητας όπως και τα λεπτόκοκκα.**

Οι αδρόκοκκοι σχηματισμοί όπως και οι λεπτόκοκκοι αποτελούν μέρος των «Τεταρτογενών Αποθέσεων» και των «Νεογενών Αποθέσεων», των εδαφικών σχηματισμών δηλαδή κατά μήκος της χάραξης. Στα σχήματα 4.2.2.2 και 4.2.2.3 παρουσιάζονται οι ποσοστιαίες κατανομές της πυκνότητας των αδρόκοκκων γεωυλικών στην εκάστοτε γεωλογική ενότητα.



**Σχήμα 4.2.2.2**  
**Κατανομή της πυκνότητας των αδρόκοκκων εδαφικών σχηματισμών της γεωλογικής ενότητας των Τεταρτογενών Αποθέσεων. Οι λεπτόκοκκοι σχηματισμοί που επικρατούν είναι χαλαροί έως μέτρια πυκνοί.**



**Σχήμα 4.2.2.3**  
**Κατανομή της πυκνότητας των αδρόκοκκων εδαφικών σχηματισμών της γεωλογικής ενότητας των Νεογενών Αποθέσεων. Οι αδρόκοκκοι σχηματισμοί που επικρατούν είναι κυρίως πυκνοί.**

Πιο συγκεκριμένα οι καλύτερες συνθήκες από άποψη πυκνότητας των αδρόκοκκων γεωυλικών αναμένονται στο κεντρικό τμήμα της σήραγγας από τη χιλιομετρική θέση 2+200 έως τη χιλιομετρική θέση 3+100 όπου οι αναμενόμενοι αδρόκοκκοι σχηματισμοί είναι από πυκνοί έως πολύ πυκνοί στη περιοχή εκσκαφής της σήραγγας ενώ στο συγκεκριμένο τμήμα αποτελούν μέρος της «Σειράς των Ερυθρών Αργίλων».

Χειρότερες συνθήκες από άποψη πυκνότητας αναμένονται στο αρχικό και τελικό τμήμα της σήραγγας στα οποία είναι δυνατό να παρατηρηθεί βάσει των γεωτρήσεων ότι η ποιότητα της πυκνότητας των αδρόκοκκων σχηματισμών κυμαίνεται από χαλαρή έως μέτρια πυκνή.

Πιο συγκεκριμένα από τη χιλιομετρική θέση 0+300 έως τη χιλιομετρική θέση 0+700 όπου η σήραγγα βρίσκεται στη γεωλογική ενότητα των «Ερυθρών Αργίλων», υπάρχει επικράτηση κυρίως χαλαρού, αδρόκοκκου γεωλικού ενώ από τη χιλιομετρική θέση 4+200 έως το τέλος του άξονα της σήραγγας οι αδρόκοκκοι σχηματισμοί χαρακτηρίζονται από χαλαροί έως μέτρια πυκνοί, με το συγκεκριμένο τμήμα της σήραγγας να βρίσκεται σε «Νεογενείς» και «Τεταρτογενείς» Αποθέσεις. Για το τμήμα μεταξύ Χ.Θ. 3+100 έως Χ.Θ. 4+200 δεν υπάρχει πληροφορία από τις γεωλογικές τομές για τη σύσταση των αδρόκοκκων σχηματισμών.

Παρατηρείται ότι το μέτωπο εκσκαφής δεν αναμένεται να συναντήσει καθώς προχωράει εκτεταμένους αδρόκοκκους σχηματισμούς πέρα από φακούς των συγκεκριμένων γεωλικών πράγμα το οποίο δικαιολογεί σε κάποιο βαθμό την έλλειψη πληροφορίας στις γεωλογικές τομές αφού υπάρχει ενδεχόμενη απουσία υλικού ενώ η έλλειψη αυτή ενδεχομένως να οφείλεται και στην υφιστάμενη εδαφογεωτεχνική έρευνα.

#### **4.2.3 Συμπεράσματα επί της συνεκτικότητας και της πυκνότητας των εδαφικών σχηματισμών στο σύνολο τους**

Σε ότι αφορά τη συνεκτικότητα των λεπτόκοκκων γεωλικών, στη περιοχή της εκσκαφής της σήραγγας, στο σύνολο της μπορεί να χαρακτηριστεί ως στιφρή έως πολύ στιφρή για τα αργιλικής και ιλυώδης φύσης υλικά, ενώ σε ότι αφορά τα αδρόκοκκα και χαλικώδη γεωλικά η πυκνότητα αυτών μπορεί να χαρακτηριστεί ως μέτρια πυκνή έως πυκνή συνολικά. Ο γενικός αυτός χαρακτηρισμός των εδαφικών γεωλικών προκύπτει από τις ειδικές τομές όπου παρουσιάζονται συνολικά τα εδαφικά γεωλικά καθώς και ξεχωριστά ανάλογα με τη ποιότητα της συνεκτικότητας τα λεπτόκοκκα γεωλικά και της πυκνότητας τους τα αδρόκοκκα.

Σε ότι αφορά τους εδαφικούς σχηματισμούς οι παραπάνω διαπιστώσεις σχετικά με τη συνεκτικότητα και τη πυκνότητα των λεπτόκοκκων και αδρόκοκκων γεωλικών αντιστοίχως φαίνονται και από τη συνολική κατανομή των εδαφικών σχηματισμών της «Σειράς των Ερυθρών Αργίλων» και των «Τεταρτογενών Αποθέσεων» που παρουσιάζονται στη τομή T5'.

Από τα παραπάνω γίνεται κατά συνέπεια αντιληπτό ότι τα καλής ποιότητας λεπτόκοκκα και αδρόκοκκα γεωλικά εντοπίζονται κυρίως στο κεντρικό τμήμα της σήραγγας από τη χιλιομετρική θέση 2+150 έως 4+200 ενώ εμφάνιση καλής ποιότητας από άποψη συνεκτικότητας λεπτόκοκκων υπάρχει και στο αρχικό και τελικό τμήμα της σήραγγας σύμφωνα με τη τομή T3'.

Από την άλλη, τα πτωχής ποιότητας λεπτόκοκκα και αδρόκοκκα γεωλικά παρουσιάζονται στη τομή T4'. Από το σχήμα αυτό γίνεται αντιληπτό ότι τα τμήματα της σήραγγας που χαρακτηρίζονται από τα πτωχής ποιότητας υλικά εντοπίζονται στο αρχικό και τελικό τμήμα αυτής σε ότι αφορά τη χάραξη, όπου η σήραγγα βρίσκεται εντός της γεωλογικής ενότητας των «Τεταρτογενών Αποθέσεων», ενώ εκτός της περιοχής της εκσκαφής εντοπίζονται πάλι στις «Τεταρτογενείς Αποθέσεις» που υπέρκεινται της «Σειράς των Ερυθρών Αργίλων» στο κεντρικό τμήμα της σήραγγας καθώς και στα πιο χαλαρά και μαλακά επιφανειακά στρώματα.

Στο χαρακτηρισμό των παραπάνω σχηματισμών προφανώς δεν εμπίπτουν οι σκληροί, βραχώδεις σχηματισμοί της «Ενότητας Χορτιάτη» των «Πρασινοσχιστόλιθων» και οι «Τεχνητές Επιχώσεις». Για τη μεν παρουσία της εν λόγω βραχώμαζας, αυτή είναι καθορισμένη και επικρατεί σε συγκεκριμένο τμήμα της χάραξης του άξονα της σήραγγας και θα πραγματοποιηθεί παρακάτω εκτενέστερη ανάλυση, ενώ για τις «Τεχνητές Επιχώσεις» θα γίνει αναφορά κατά τμήμα.

#### **4.3 Γεωλογική και Τεχνικογεωλογική διακριτοποίηση σε ζώνες κατά μήκος της χάραξης του άξονα της σήραγγας**

Για τους κυρίαρχους σχηματισμούς που αναπτύσσονται στη περιοχή της εκσκαφής της σήραγγας, οι οποίοι εκτιμάται ότι θα συναντηθούν στο μέτωπο αυτής, έχει ήδη γίνει μια

πρώτη διακριτοποίηση παραπάνω βάσει των γεωλογικών ενοτήτων. Εν συνεχεία ακολουθεί μια εκτενέστερη διακριτοποίηση σε τμήματα βάσει των γεωλογικών συνθηκών κατά μήκος της χάραξης η οποία και παρουσιάζεται παρακάτω στο σχήμα 4.3.1, βασιζόμενη στα στοιχεία των γεωτρήσεων κατά μήκος της χάραξης.

Όπως είναι δυνατό να παρατηρηθεί από τις παρουσιασθείσες τομές και από τους πίνακες οι γεωλογικές συνθήκες, που συναντώνται κατά μήκος της χάραξης της σήραγγας, δε παρουσιάζουν συνέχεια και συστηματικότητα αλλά ποικίλουν και παρουσιάζουν εναλλαγές όπου σε συγκεκριμένα τμήματα της σήραγγας είναι ιδιαίτερος έντονος.

Παρόλα αυτά η διακριτοποίηση που έγινε παραπάνω είναι εφικτή καθώς ανά τμήματα, βάσει της γεωλογίας και της κοκκομετρίας της περιοχής, επικρατούν διαφορετικής φύσης γεωυλικά (άργιλος, άμμος, χάλικες, πρασινοσχιστόλιθος) που τα χαρακτηρίζουν. Εν συνεχεία θα ακολουθήσει εκτενέστερη και λεπτομερής περιγραφή για το κάθε ένα από τα παραπάνω τμήματα βάσει της ζωνοποίησης που πραγματοποιήθηκε. Αυτή θα περιλαμβάνει τόσο στοιχεία από τις υφιστάμενες γεωτρήσεις όσο και στοιχεία από τις επί τόπου (in situ) δοκιμές όπως αυτές της πρότυπης διείσδυσης SPT (Standard Penetration Test), δοκιμές διαπερατότητας πίπτοντος και σταθερού υδραυλικού φορτίου (permeability tests) κλπ και εργαστηριακές, όπως δοκιμές σε ανεμπόδιστη θλίψη (unconfined compression tests), προσδιορισμού ορίων Atterberg κλπ για τη καλύτερη εδαφογεωτεχνική αξιολόγηση των υλικών που αναμένεται να συναντηθούν από το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας.

Χιλιομέτρηση Τμήματος	Χαρακτηριστικά του Τμήματος	Κυρίαρχη Γεωλογική Σύσταση
0+000-0+050	Αρχή επέκτασης στο σταθμό Δημοκρατίας-Διακλάδωση Δημοκρατίας	Λεπτόκοκκοι σχηματισμοί που συνθέτονται από υλικό αργιλικής κυρίως φύσεως με ενδεχόμενες εμφανίσεις φακών αδρόκοκκων σχηματισμών στην αρχή της επέκτασης- "Νεογενείς Αποθέσεις"- "Σειρά Ερυθρών Αργίλων"
0+050-0+375	Διακλάδωση Δημοκρατίας	Μικτές συνθήκες μετώπου εκσκαφής αδρόκοκκων υλικών αμμώδους φύσης και λεπτόκοκκων υλικών αργιλικής κυρίως σύστασης- "Τεταρτογενείς Αποθέσεις"
0+375-0+600	Διακλάδωση Δημοκρατίας	Λεπτόκοκκοι σχηματισμοί αργιλικής κυρίως σύστασης με εμφανίσεις φακών αδρόκοκκων γεωυλικών- "Νεογενείς Αποθέσεις"- "Σειρά Ερυθρών Αργίλων"
0+600-0+700	Διακλάδωση Δημοκρατίας	Μικτές συνθήκες μετώπου εκσκαφής : "Νεογενείς Αποθέσεις- Σειρά Ερυθρών Αργίλων" : Ανάπτυξη λεπτόκοκκων σχηματισμών αργιλικής φύσης - "Ενότητα Χορτιάτη" : Αλλικό υπόβαθρο που συνίσταται από Πρασινοσχιστόλιθους
0+700-2+150	Τελικό τμήμα της διακλάδωσης Δημοκρατίας-Σταθμός Νεάπολη-Σταθμός Παύλου Μελά	Ανάπτυξη βραχώδους σχηματισμού Πρασινοσχιστολίθων- "Ενότητα Χορτιάτη"
2+150-3+300	Σταθμός Παύλου Μελά-Σταθμός Σταυρούπολη	Εναλλαγές λεπτόκοκκων/αδρόκοκκων γεωυλικών στο μέτωπο της εκσκαφής με τα λεπτόκοκκα γεωυλικά να είναι κυρίως αργιλικής φύσης ενώ τα αδρόκοκκα να συνίστανται από αμμώδη έως χαλικώδη γεωυλικά- "Νεογενείς Αποθέσεις"- "Σειρά Ερυθρών Αργίλων"
3+300-4+400	Σταθμός Πολίχνη	Επικράτηση λεπτόκοκκων σχηματισμών αργιλικής φύσης με μεμονωμένες εμφανίσεις αδρόκοκκων σχηματισμών χαλικώδους κυρίως φύσης- "Νεογενείς Αποθέσεις"- "Σειρά Ερυθρών Αργίλων"
4+400-5+245	Ενδιάμεσο σταθμού Πολίχνη-σταθμού Ευκαρπίας, Σταθμός Ευκαρπία-Τέλος χάραξης σήραγγας	Εναλλαγές λεπτόκοκκων/αδρόκοκκων γεωυλικών στο μέτωπο της εκσκαφής με τα λεπτόκοκκα γεωυλικά να είναι κυρίως αργιλικής φύσης ενώ τα αδρόκοκκα να συνίστανται από αμμώδη κυρίως γεωυλικά έως κατά τόπους χαλικώδη- "Τεταρτογενείς Αποθέσεις"

**Σχήμα 4.3.1**  
**Διακριτοποίηση βάσει της γεωλογίας και της κοκκομετρικής διαβάθμισης και της φύσης των γεωυλικών κατά χιλιομετρική θέση επί του άξονα της σήραγγας.**

Κατά μήκος της χάραξης επομένως αναμένονται οι παρακάτω γεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες:

- **Τμήμα Χ.Θ. 0+000 έως 0+050**

Το τμήμα αυτό αποτελεί την αφετηρία της επέκτασης του μετρό της Θεσσαλονίκης προς τη Σταυρούπολη από το σταθμό Δημοκρατίας και επεκτείνεται μέχρι τη χιλιομετρική θέση 0+050 με την οριοθέτηση του τμήματος να πραγματοποιείται λόγω αλλαγής των γεωλογικών συνθηκών. Η σήραγγα στο τμήμα ξεκινά από το Σταθμό Δημοκρατίας κάτω από την Εγνατία Οδό στη Πλατεία Δημοκρατίας. Η σήραγγα σε αυτό το πρώτο τμήμα της επέκτασης αναμένεται να συναντήσει τους εδαφικούς σχηματισμούς των Νεογενών Αποθέσεων της «Σειράς των Ερυθρών Αργίλων». Η διακύμανση του πάχους των υπερκειμένων στο τμήμα αυτό αναμένεται μεταξύ 12 και 13m.

Οι Νεογενείς Αποθέσεις εμφανίζονται με σημαντικό πάχος (βάσει και της γεώτρησης TBCP26) καλύπτοντας όλο το μέτωπο της σήραγγας ενώ οι υπερκείμενες στρώσεις των Τεταρτογενών Αποθέσεων δεν αναμένεται να έχουν πάχος της ίδιας τάξης μεγέθους (5-7m). Οι Τεχνητές Επιχώσεις αναμένεται να έχουν πάχος της τάξεως των 5m.

Οι Νεογενείς Αποθέσεις που αποτελούνται από τη «Σειρά των Ερυθρών Αργίλων» στο συγκεκριμένο τμήμα συνθέτονται κυρίως από λεπτόκοκκους σχηματισμούς αργιλικής κυρίως φύσεως με μεμονωμένες εμφανίσεις πιο αδρόκοκκων σχηματισμών αμμώδους κυρίως φύσης. Πιο συγκεκριμένα οι εδαφικοί αυτοί σχηματισμοί αναμένεται να αποτελούνται από Αμμώδεις Αργίλους με ή χωρίς χάλικες και Αργίλους με χάλικες, οι οποίοι θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν κυρίως ως στιφροί σχηματισμοί, με μεμονωμένες εμφανίσεις ενστρώσεων Αργιλώδους Άμμου με χάλικες έως Αργιλώδεις Χάλικες, οι οποίοι θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν ως χαλαροί έως μέτριας πυκνότητας σχηματισμοί. Τέτοιοι αδρόκοκκοι σχηματισμοί αναμένεται να εμφανιστούν μόνο στο αρχικό κομμάτι του συγκεκριμένου τμήματος όπως φαίνεται και από τη πληροφορία που παρέχεται από τη γεώτρηση TBCP26. Τα παραπάνω γεωυλικά είναι αυτά που αναμένεται να συναντηθούν με το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας.

Λόγω έλλειψης περεταίρω πληροφοριών από δοκιμές είτε εργαστηριακές είτε επί τόπου (in situ) δε γίνεται να εξαχθούν άλλα συμπεράσματα πέρα από αυτά που ήδη αναφέρθηκαν.

- **Τμήμα Χ.Θ. 0+050 έως 0+265**

Το τμήμα αυτό συνθέτει το κομμάτι της διακλάδωσης στη περιοχή Δημοκρατίας. Η οριοθέτηση του παρόντος τμήματος βασίστηκε στην αλλαγή της γεωλογικής ενότητας στη περιοχή της εκσκαφής της σήραγγας καθώς το μέτωπο εισέρχεται στις Τεταρτογενείς Αποθέσεις από τις Νεογενείς. Η σήραγγα, η οποία διαχωρίζεται σταδιακά σε δύο κλάδους, βρίσκεται κάτω από την Εγνατία Οδό στη περιοχή της Πλατείας Δημοκρατίας για να προχωρήσει κάτω από συγκροτήματα πολυκατοικιών καθώς προχωράει. Σε όλο το μήκος του συγκεκριμένου τμήματος η σήραγγα βρίσκεται μέσα στη γεωλογική ενότητα των Τεταρτογενών Αποθέσεων και το πάχος των υπερκειμένων κυμαίνεται από 12 έως 18m.

Οι Τεταρτογενείς Αποθέσεις στο συγκεκριμένο τμήμα εμφανίζεται να έχουν αρκετά σημαντικό πάχος όπως φαίνεται και από τη γεωλογική τομή T1. Οι Τεχνητές Επιχώσεις αναμένεται να έχουν πάχος από 2 έως 5m.

Η γεωλογική ενότητα των Τεταρτογενών Αποθέσεων στο τμήμα αυτό αναμένεται να αποτελείται από λεπτόκοκκο, αργιλικής φύσης υλικό. Πιο συγκεκριμένα αναμένεται να επικρατήσει Αμμώδης Άργιλος χαμηλής έως μέτριας συνεκτικότητας (μαλακοί έως σταθεροί σχηματισμοί) δίχως να φαίνεται από τη γεώτρηση ενδεχόμενη εμφάνιση αδρόκοκκων σχηματισμών. Το συγκεκριμένο λεπτόκοκκο γεωυλικό αναμένεται να αποτελέσει και σημαντικό μέρος της υπερκείμενης ζώνης αυτού του τμήματος (πάχος 6-8m).

Λόγω έλλειψης περεταίρω πληροφοριών από δοκιμές είτε εργαστηριακές είτε επί τόπου (in situ) δε γίνεται να εξαχθούν άλλα συμπεράσματα πέρα από αυτά που ήδη αναφέρθηκαν.

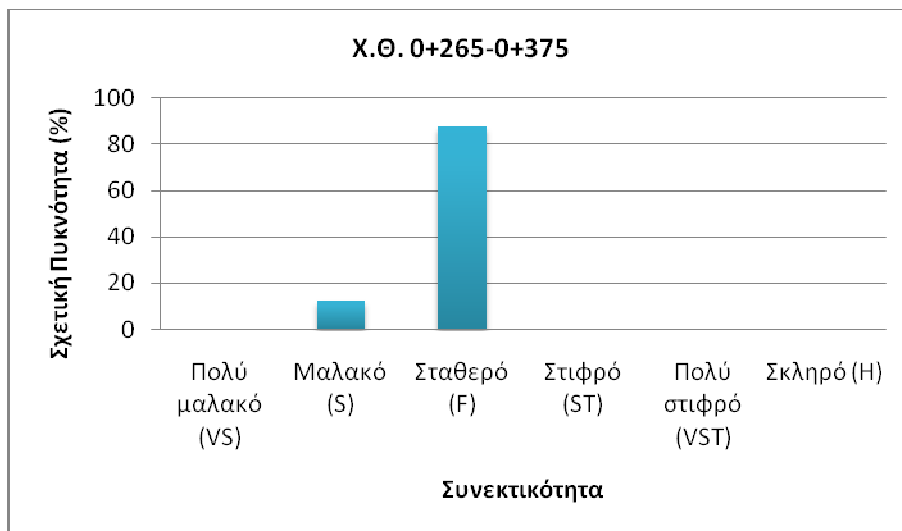
- **Τμήμα Χ.Θ. 0+265 έως 0+375**

Και το τμήμα αυτό αφορά τη διακλάδωση Δημοκρατίας. Η σήραγγα στο κομμάτι αυτό βρίσκεται κάτω από συγκρότημα πολυκατοικιών σε ότι αφορά και τους δύο κλάδους της. Ο άξονας της σήραγγας συνεχίζει και βρίσκεται μέσα στη γεωλογική ενότητα των πρόσφατων Τεταρτογενών Αποθέσεων με το πάχος των υπερκειμένων να κυμαίνεται μεταξύ 16 έως και 18m.

Το πάχος των Τεταρτογενών Αποθέσεων είναι σημαντικό στο αρχικό και ενδιάμεσο κομμάτι του τμήματος ενώ εκτιμάται να περιορίζεται προς το τέλος αυτού όπως φαίνεται και στη γεωλογική τομή T1 με ενδεχόμενη μεμονωμένη εμφάνιση του στρώματος των Νεογενών Αποθέσεων της Σειράς των Ερυθρών Αργίλων. Οι Τεχνητές Επιχώσεις εκτιμάται ότι θα έχουν πάχος που κυμαίνεται από 3 έως 5m.

Οι Τεταρτογενείς Αποθέσεις στο τμήμα αυτό αποτελούνται κυρίως από λεπτόκοκκους σχηματισμούς αργιλικής φύσεως με μεμονωμένες εμφανίσεις αδρόκοκκων σχηματισμών στη στέψη κυρίως του μετώπου εκσκαφής όπως φαίνεται και στη τομή T2. Πιο συγκεκριμένα τα γεωυλικά τα οποία αναμένεται να απαντηθούν κατά την εκσκαφή θα είναι μεμονωμένες εμφανίσεις Αργιλώδους Άμμου με χάλικες στη στέψη της σήραγγας στο ενδιάμεσο κομμάτι του τμήματος, με εκτιμώμενο πάχος περί τα 4 έως 5m, ενώ το επικρατών λεπτόκοκκο υλικό είναι Αμμώδης Άργιλος με χάλικες με την εμφάνιση χαλίκων να περιορίζεται προς το τέλος του τμήματος όπου αναμένεται Αμμώδης Άργιλος χωρίς χάλικες. Τα αδρόκοκκα γεωυλικά αναμένεται να είναι χαλαρά έως μέτριας πυκνότητας ενώ οι λεπτόκοκκοι σχηματισμοί χαρακτηρίζονται ως σταθεροί.

Γεώτρηση η οποία θεωρείται αντιπροσωπευτική σε ότι αφορά τα λεπτόκοκκα γεωυλικά, τα οποία πρόκειται να εκσκαφθούν και που επικρατούν στο συγκεκριμένο τμήμα, είναι η T10P024. Όπως έχει ήδη αναφερθεί οι λεπτόκοκκοι σχηματισμοί αποτελούνται από σταθερή καστανή Άργιλο έως Αμμώδη Άργιλο και καστανέρυθρη σταθερή Άργιλο έως Αμμώδη Άργιλο με χαλίκια. Οι κατανομές των σχηματισμών που προκύπτουν από τη γεώτρηση παρουσιάζονται παρακάτω στο σχήμα 4.3.2 .

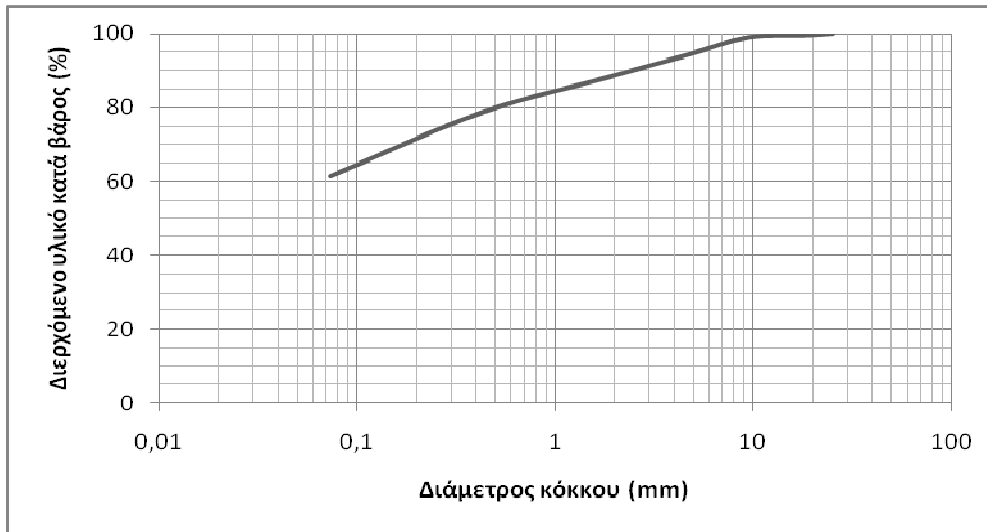


**Σχήμα XI**  
**Κατανομή της συνεκτικότητας των λεπτόκοκκων εδαφικών σχηματισμών με Χ.Θ. 0+265-0+375. Οι λεπτόκοκκοι σχηματισμοί που επικρατούν είναι σταθεροί.**

Από τη κοκκομετρική ανάλυση που έγινε με τις προδιαγραφές των αμερικάνικων κοσκίνων κατά ASTM προέκυψε η παρακάτω κοκκομετρική καμπύλη, που παρουσιάζεται στο σχήμα 4.3.3, για το συγκεκριμένο τμήμα. Από την ανάλυση αυτή επιβεβαιώνεται η επικράτηση των λεπτόκοκκων γεωυλικών αφού από το κόσκινο No200, που είναι το

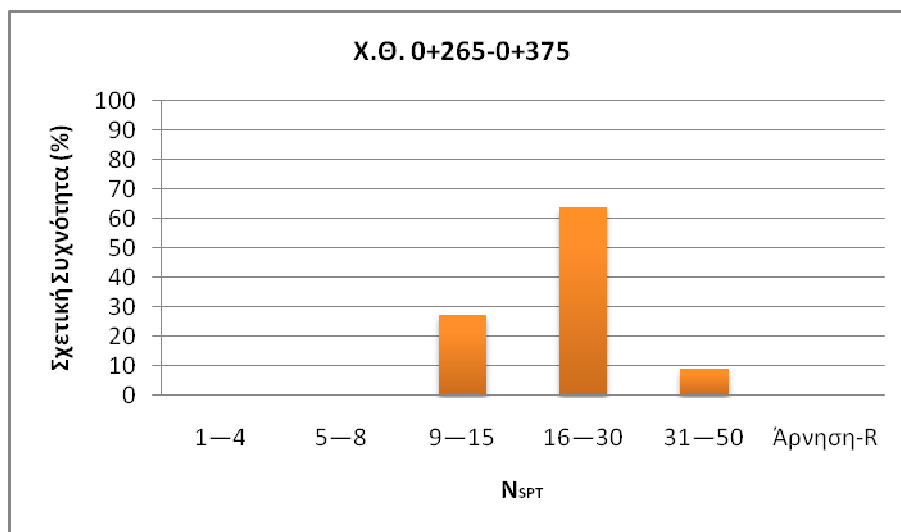


θεωρητικό όριο μεταξύ αδρόκοκκων και λεπτόκοκκων γεωλικών, διέρχεται παραπάνω από το 60% του υλικού. Για τη κατανομή των μικρότερων κόκκων δεν υπάρχει πληροφορία προκειμένου να συμπληρωθεί η καμπύλη.



**Σχήμα 4.3.3**  
Κοκκομετρική καμπύλη για τα γεωλικά από τη Χ.Θ. 0+265-0+375.

Οι τιμές της πρότυπης δοκιμής διείσδυσης (SPT) στο συγκεκριμένο τμήμα για τις Τεταρτογενείς Αποθέσεις έχουν υψηλή διακύμανση και κυμαίνονται από 10 έως 41 με τη μεγαλύτερη συγκέντρωση τιμών να παρουσιάζεται στο βάθος εκσκαφής της σήραγγας και να είναι στο διάστημα μεταξύ 16-30 όπως παρουσιάζεται και στην ακόλουθη κατανομή του σχήματος 4.3.4 . Ένα ενδιαφέρον συμπέρασμα το οποίο προκύπτει από τη δοκιμή SPT προέρχεται από την εμπειρική συσχέτιση του αριθμού  $N_{SPT}$  και της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής του υπό δοκιμή υλικού βάσει της εμπειρικής σχέσης του Terzaghi όπου  $C_u \approx 12.5 \cdot N_{SPT}$ . Από αυτή προκύπτει ότι η αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $C_u$  στο βάθος του μετώπου εκσκαφής εκτιμάται ότι θα είναι περί τα 250kPa.

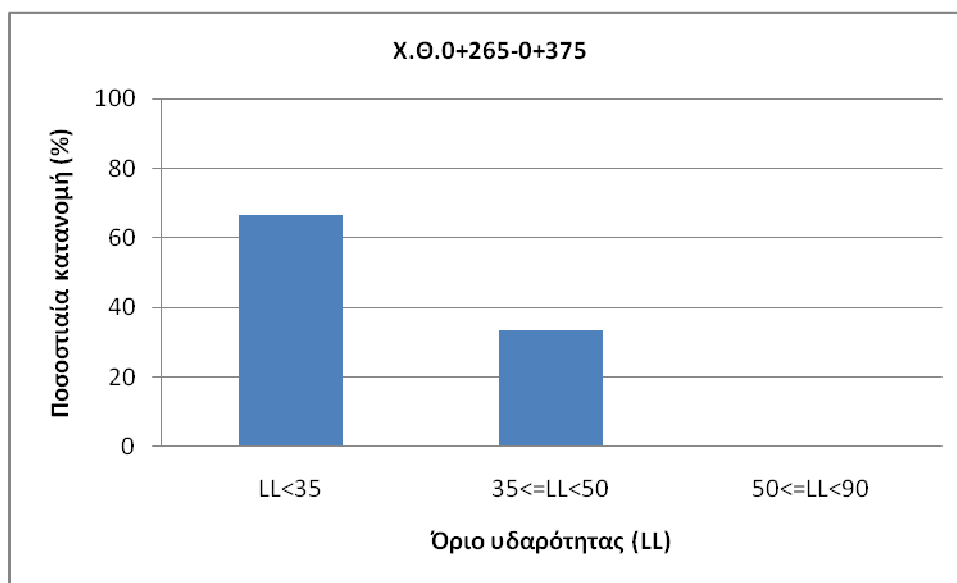


**Σχήμα 4.3.4**  
Κατανομή των τιμών SPT του τμήματος με Χ.Θ. 0+265-0+375.  
Οι επικρατούσες τιμές είναι σχετικά υψηλές και κυμαίνονται μεταξύ 16 έως 30.

Για τα γεωλικά τα οποία βρίσκονται στον άξονα της σήραγγας πραγματοποιήθηκαν επίσης δοκιμές προκειμένου να προσδιοριστούν τα όρια Atterberg και ο δείκτης πλασιμότητας. Από την άποψη του ορίου υδαρότητας (LL) τα αποτελέσματα που προέκυψαν χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες :

- $50 \leq LL < 90$ : παχιές έως πολύ παχιές άργιλοι (fat-very fat)
- $35 \leq LL < 50$ : ενδιάμεσες άργιλοι (intermediate)
- $LL < 35$ : ισχνές άργιλοι ή ιλυώδες υλικό (lean or silty)

Από τις δοκιμές συνεπώς προκύπτει ότι στο βάθος εκσκαφής της σήραγγας τα γεωλικά μας κατατάσσονται κυρίως στη τρίτη κατηγορία σε συγκεκριμένο τμήμα όπως προκύπτει και από τη ποσοστιαία κατανομή του ορίου υδαρότητας που παρουσιάζεται στο σχήμα 4.3.5 που ακολουθεί.

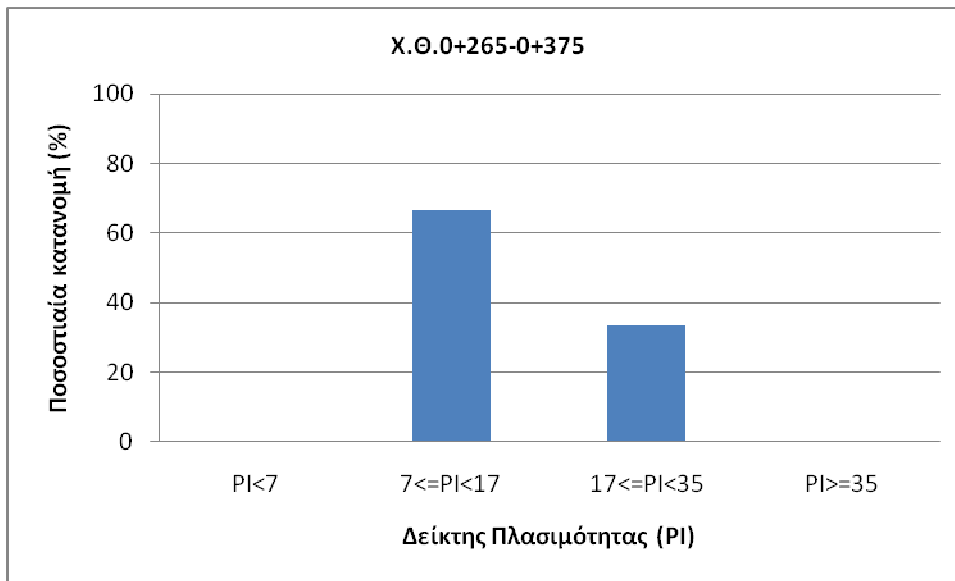


**Σχήμα 4.3.5**  
**Ποσοστιαία κατανομή του ορίου υδαρότητας για το τμήμα**  
**Χ.Θ. 0+265-0+375.**

Προσδιορίστηκε επίσης ο δείκτης πλασιμότητας (Plasticity Index) PI, όπως αυτός προκύπτει από το όριο υδαρότητας (LL) και το όριο πλασιμότητας (PL). Όπως και παραπάνω για το όριο υδαρότητας, σύμφωνα με το δείκτη πλασιμότητας τα γεωλικά θα χωριστούν σε τέσσερις κατηγορίες που περιλαμβάνουν:

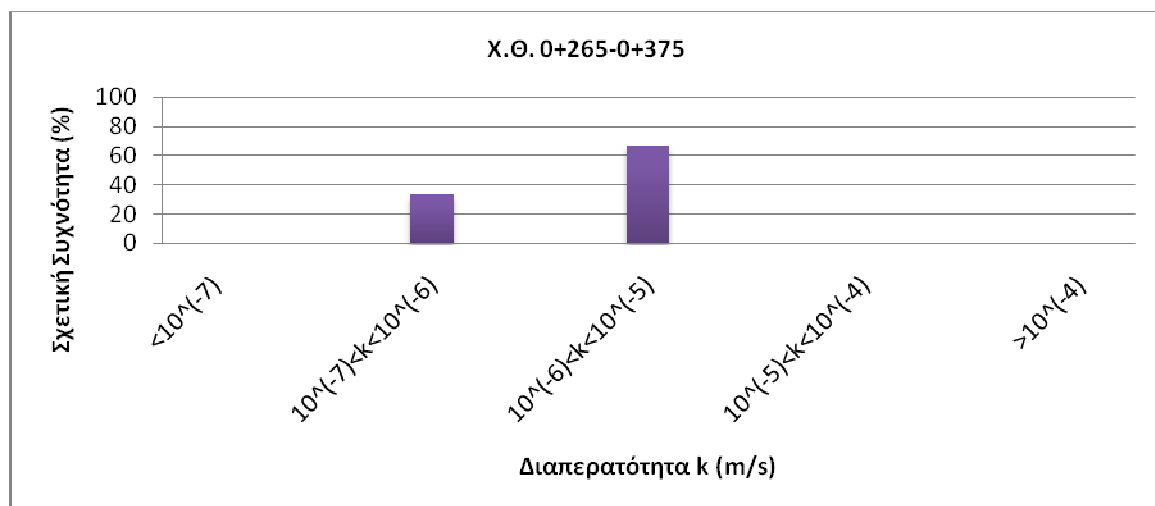
- $PI < 7$  : γεωλικά μηδαμινής έως ελάχιστης πλασιμότητας (non plastic-slightly plastic)
- $7 \leq PI < 17$  : γεωλικά ενδιάμεσης πλασιμότητας (moderately plastic)
- $17 \leq PI < 35$  : γεωλικά υψηλής πλασιμότητας (highly plastic)
- $PI \geq 35$  : γεωλικά εξαιρετικά υψηλής πλασιμότητας (extremely plastic)

Από τις δοκιμές προέκυψε ότι τα γεωλικά στο συγκεκριμένο τμήμα στο βάθος εκσκαφής της σήραγγας αναμένεται να είναι κυρίως μεσαίας πλασιμότητας, αφού η ποσοστιαία κατανομή αυτών ανέρχεται πάνω από το 60% των γεωλικών όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα 4.3.6 που ακολουθεί, με τα υλικά υψηλής πλασιμότητας όμως να διαθέτουν και αυτά αξιόλογο ποσοστό. Για το λόγο αυτό, σαν μια πρώτη εκτίμηση, δεν αναμένεται να αντιμετωπιστούν προβλήματα λόγω κολλώδους συμπεριφοράς (sticky behavior) του εδάφους αφού τέτοια συμπεριφορά εμφανίζουν συνήθως συνεκτικά εδάφη υψηλής πλασιμότητας.



**Σχήμα 4.3.6**  
**Ποσοστιαία κατανομή του δείκτη πλασιμότητας για το τμήμα**  
**X.Θ. 0+265-0+375.**

Η διαπερατότητα αυτών των λεπτόκοκκων, εδαφικών σχηματισμών στο συγκεκριμένο τμήμα λόγω και της εν μέρει αμμώδους φύσης του γεωυλικού είναι μικρή αλλά όχι τόσο όσο η διαπερατότητα αμιγών αργίλων. Πιο συγκεκριμένα η διαπερατότητα των σχηματισμών που προέκυψε από τη δοκιμή πίπτοντος (μεταβλητού) υδραυλικού φορτίου ήταν μεγαλύτερη από το θεωρητικό όριο των αργίλων που είναι  $k=10^{-7}$  m/s με τις τιμές να κυμαίνονται μεταξύ  $3 \cdot 10^{-7}$  m/s έως  $2 \cdot 10^{-6}$  m/s με τη διαπερατότητα να μειώνεται με το βάθος όπου επικρατούσε κυρίως η αργιλική φύση του υλικού. Η διαπερατότητα αναμένεται να αυξάνεται όπου το μέτωπο της εκσκαφής συναντά πιο αδρόκοκκους σχηματισμούς αλλά λόγω της έντονης παρουσίας του αργιλικού στοιχείου θα είναι γενικά χαμηλή. Η κατανομή της διαπερατότητας των εδαφικών σχηματισμών παρουσιάζεται παρακάτω στο σχήμα 4.3.7.



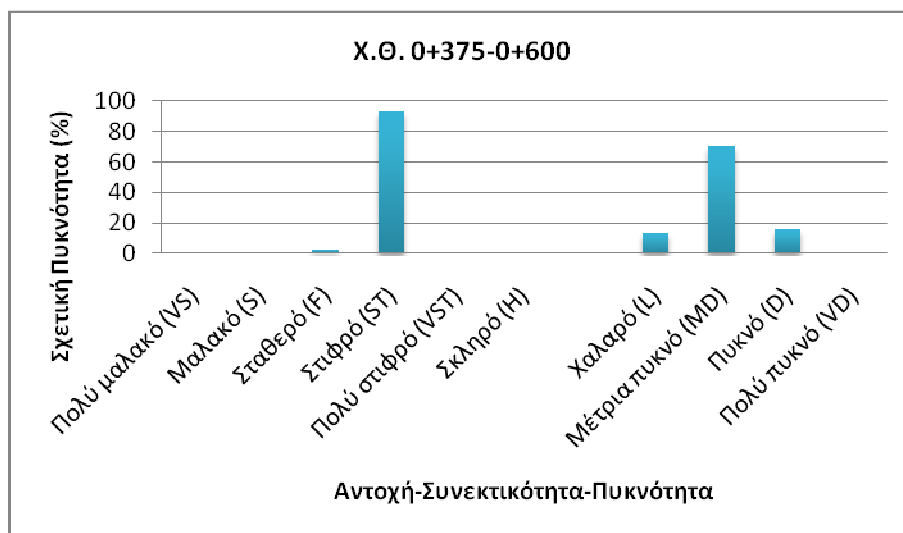
**Σχήμα 4.3.7**  
**Κατανομή των τιμών υδατοπερατότητας του τμήματος με**  
**X.Θ. 0+265-0+375. Η υδατοπερατότητα των σχηματισμών είναι μικρή**  
**με τιμές που κυμαίνονται από  $3.15 \cdot 10^{-7}$  m/s έως  $1.89 \cdot 10^{-6}$  m/s.**

• **Τμήμα Χ.Θ. 0+375 έως 0+600**

Στο τμήμα αυτό της χάραξης της σήραγγας συνεχίζει η διακλάδωση Δημοκρατίας με τον άξονα της σήραγγας να διέρχεται κάτω από πολυκατοικίες στην αρχή και το τέλος του συγκεκριμένου τμήματος ενώ στο ενδιάμεσο κομμάτι αυτού διέρχεται κάτω από το Σιδηροδρομικό Σταθμό Θεσσαλονίκης. Στο συγκεκριμένο τμήμα έχουμε αλλαγή των γεωλογικών συνθηκών καθώς η χάραξη περνά από τη περιοχή των Τεταρτογενών Αποθέσεων στη γεωλογική ενότητα των Νεογενών Αποθέσεων της «Σειράς των Ερυθρών Αργίλων». Το πάχος των υπερκειμένων στο συγκεκριμένο τμήμα κυμαίνεται από 14 έως 16m.

Το υπερκείμενο πάχος των πρόσφατων Τεταρτογενών Αποθέσεων εκτιμάται ότι κυμαίνεται από 9 έως 12m ενώ το πάχος των Τεχνητών Επιχώσεων εκτιμάται στα 3 έως 5 μέτρα. Οι Τεταρτογενείς Αποθέσεις περιορίζονται στο υπερκείμενο της σήραγγας στρώμα με τον άξονα της να βρίσκεται εξολοκλήρου στη γεωλογική ενότητα των Νεογενών Αποθέσεων σε όλο το μήκος και βάθος του τμήματος.

Το γεωυλικό το οποίο πρόκειται να εκσκαφθεί στο συγκεκριμένο τμήμα αναμένεται να είναι λεπτόκοκκης φύσης αργίλικής σύστασης, κυρίως στιφρής, καστανής έως καστανοκόκκινης, χαλικώδους έως αμμώδους Αργίλου με παρουσία χαλίκων προς το τελευταίο κομμάτι του τμήματος. Από τη χιλιομετρική θέση 0+465 έως τη χιλιομετρική θέση 0+570 εκτιμάται ότι θα υπάρξει παρουσία τόσο λεπτόκοκκου υλικού όσο και αδρόκοκκου κατά την εκσκαφή του μετώπου με επικράτηση μέτριας πυκνότητας καστανή έως ερυθρή Αργιλώδη Άμμο με χαλίκια έως Αργιλώδεις Χάλικες με άμμο στους αδρόκοκκους σχηματισμούς όπως προκύπτει και από τις γεωτρήσεις T10P002 και T10P020. Τα λεπτόκοκκης φύσης γεωυλικά όπως προαναφέρθηκε αναμένονται σταθερά έως κυρίως στιφρά ενώ οι αδρόκοκκοι σχηματισμοί αναμένονται κυρίως μέτρια πυκνοί. Οι κατανομές της σχετικής πυκνότητας των γεωυλικών φαίνεται στο σχήμα 4.3.8 που ακολουθεί.



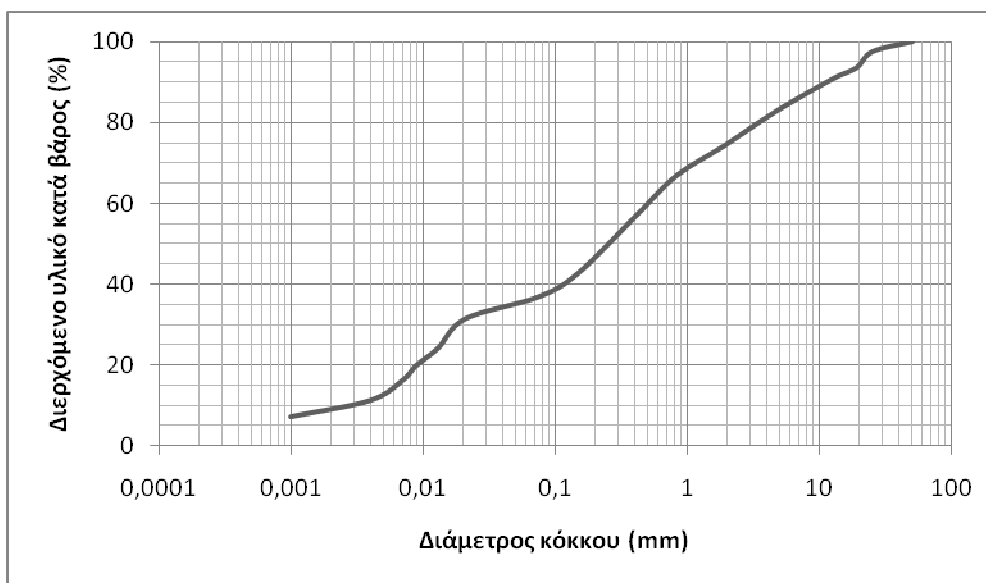
**Σχήμα 4.3.8**

**Κατανομή της συνεκτικότητας και πυκνότητας των λεπτόκοκκων και αδρόκοκκων εδαφικών σχηματισμών με Χ.Θ. 0+375-0+600.**

**Οι επικρατούντες λεπτόκοκκοι σχηματισμοί που είναι κυρίως στιφροί και οι αδρόκοκκοι είναι κυρίως μέτρια πυκνοί με κατά τόπους χαλαρά και πυκνά γεωυλικά.**

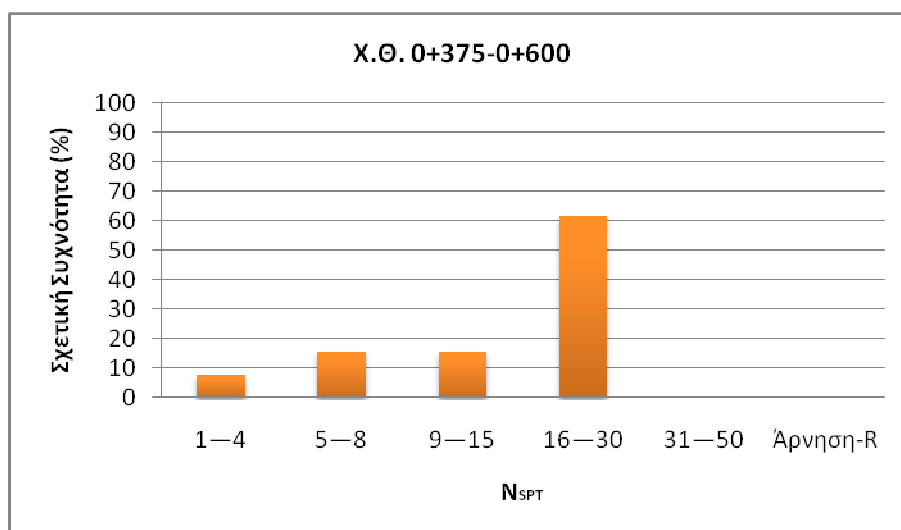
Από τη κοκκομετρική ανάλυση για το συγκεκριμένο τμήμα προκύπτει ότι το 40% των γεωυλικών στο μέτωπο της εκσκαφής διέρχεται από το κόσκινο Νο200 συνεπώς επιβεβαιώνεται το γεγονός ότι κατά τη διάνοιξη εκτός από τους λεπτόκοκκους σχηματισμούς θα απαντηθούν και αδρόκοκκοι σχηματισμοί με σημαντικό ποσοστό. Η κοκκομετρική

καμπύλη που προκύπτει από τις πληροφορίες των γεωτρήσεων παρουσιάζεται στο σχήμα 4.3.9 που ακολουθεί.



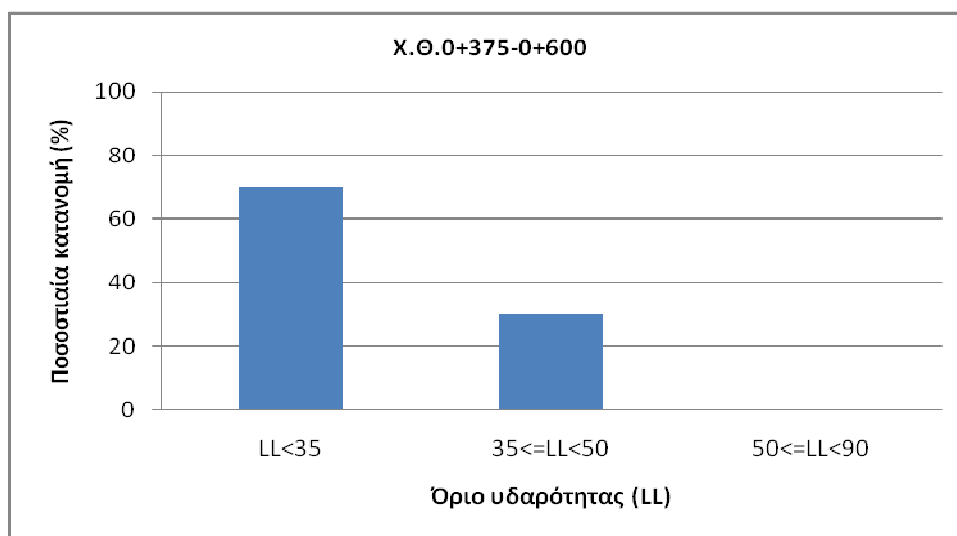
**Σημά 4.3.9**  
Κοκκομετρική καμπύλη για τα γεωλικά από τη Χ.Θ. 0+375-0+600.

Από τις δοκιμές SPT που πραγματοποιήθηκαν στις γεωτρήσεις T10P002 και T10P020, οι οποίες βρίσκονται εντός του υπό εξέταση τμήματος της σήραγγας για τις Νεογενείς Αποθέσεις (Σειρά Ερυθρών Αργίλων), οι τιμές N οι οποίες προκύπτουν κυμαίνονται σε σχετικά υψηλές τιμές από 16 έως 30 με τις χαμηλότερες τιμές SPT να συγκεντρώνονται στα υπερκείμενα στρώματα πάνω από το επίπεδο της σήραγγας. Η κατανομή των τιμών N της δοκιμής SPT παρουσιάζεται στο σχήμα 4.3.10 που ακολουθεί. Από την εμπειρική σχέση του Terzaghi προκύπτει ότι η αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $C_u$  στο βάθος του μετώπου εκσκαφής θα κυμαίνεται μεταξύ 200 kPa και 375 kPa.



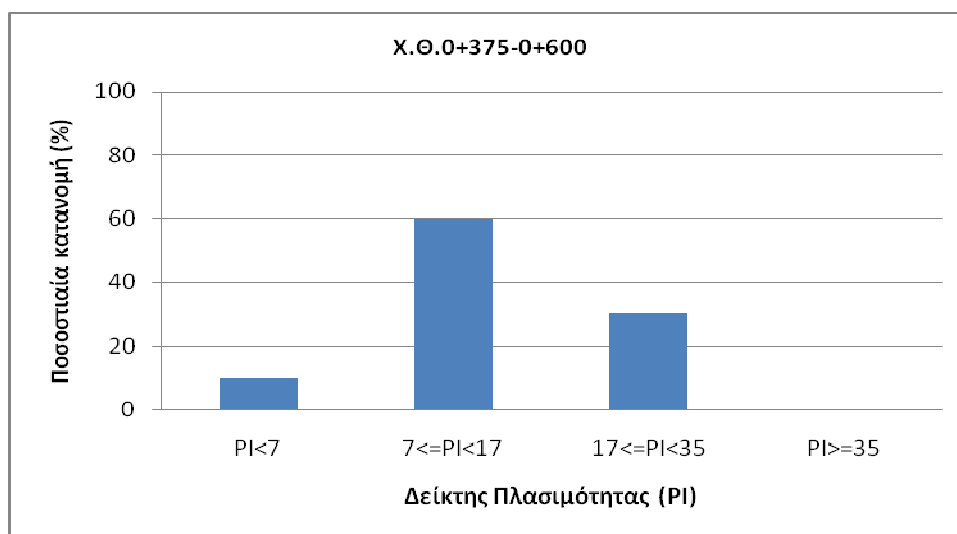
**Σημά 4.3.10**  
Κατανομή των τιμών SPT του τμήματος με Χ.Θ. 0+375-0+600.  
Οι επικρατούσες τιμές είναι αρκετά υψηλές και κομούνται μεταξύ 16 έως 30.

Από τον προσδιορισμό των ορίων Atterberg για τα γεωλικά του συγκεκριμένου τμήματος προκύπτει ότι εντάσσονται κυρίως στη κατηγορία των ισχνών αργίλων καθώς το 70% των γεωλικών που αναμένεται να εκσκαφτούν έχει όριο υδαρότητας μικρότερο του 35 όπως παρουσιάζεται και παρακάτω στο σχήμα 4.3.11 .



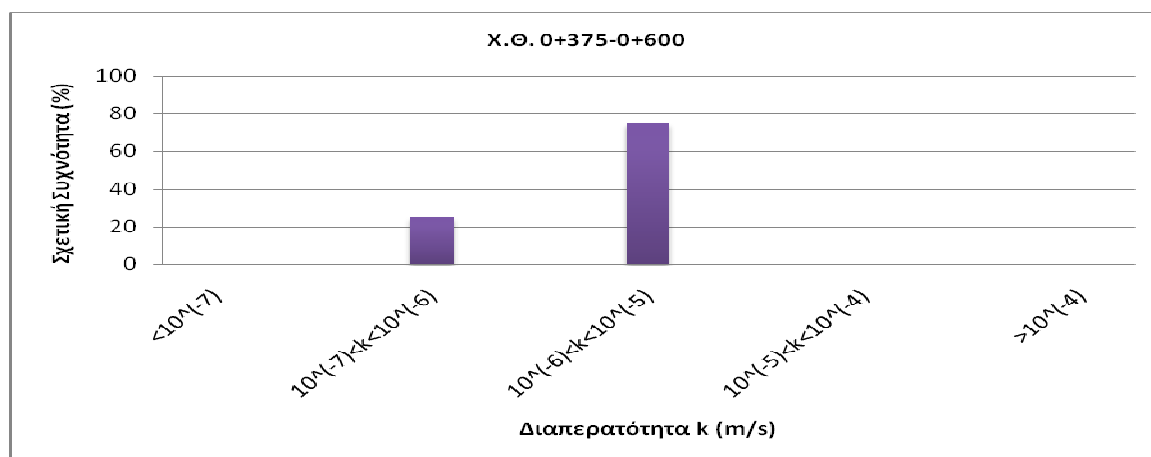
**Σχήμα 4.3.11**  
**Ποσοστιαία κατανομή του ορίου υδαρότητας για το τμήμα**  
**Χ.Θ. 0+375-0+600.**

Επίσης προσδιορίστηκε και ο δείκτης πλασιμότητας για το συγκεκριμένο τμήμα. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι τα γεωλικά που θα συναντήσει το μέτωπο της εκσκαφής καθώς προχωράει θα είναι κυρίως ενδιάμεσης πλασιμότητας, καθώς ο δείκτης πλασιμότητας PI κυμαίνεται μεταξύ 7 και 17 για το 60% των γεωλικών που προέκυψαν από τις γεωτρήσεις. Η ποσοστιαία κατανομή του δείκτη πλασιμότητας για το συγκεκριμένο τμήμα παρουσιάζεται στο σχήμα 4.3.12 που ακολουθεί. Και σε αυτό το τμήμα μια πρώτη εκτίμηση βάσει του δείκτη πλασιμότητας είναι ότι δε θα υπάρξουν προβλήματα λόγω κολλώδους συμπεριφοράς των εδαφικών υλικών που θα καθυστερήσουν τη προώθηση του μηχανήματος εκσκαφής.



**Σχήμα 4.3.12**  
**Ποσοστιαία κατανομή του δείκτη πλασιμότητας για το τμήμα**  
**Χ.Θ. 0+375-0+600.**

Η διαπερατότητα των σχηματισμών στο συγκεκριμένο τμήμα εκτιμάται ότι θα έχει κυρίως μια διακύμανση από περίπου  $10^{-6}$  m/s έως  $4 \cdot 10^{-6}$  m/s με κατά τόπους μικρότερη διαπερατότητα και ενδεχομένως μεγαλύτερη όπου έχουμε επικράτηση αδρόκοκκων περισσότερο υλικών. Γενικότερα αυτές οι τιμές διαπερατότητας είναι σχετικά μικρές ακόμα και στις περιοχές που αναπτύσσονται αδρόκοκκοι σχηματισμοί λόγω της παρουσίας του αργιλικού συνδετικού υλικού που συμβάλλει σημαντικά στη μείωση αυτής. Η κατανομή της διαπερατότητας όπως προέκυψε από αποτελέσματα που προέκυψαν από τη δοκιμή διαπερατότητας πίπτοντος (μεταβλητού) υδραυλικού φορτίου στις γεωτρήσεις T10P002 και T10P020 παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα 4.3.13 .



**Σχήμα 4.3.13**  
Κατανομή των τιμών υδατοπερατότητας του τμήματος με Χ.Θ. 0+375-0+600. Η υδατοπερατότητα των σχηματισμών είναι μικρή με τιμές που κυμαίνονται από  $9.80 \cdot 10^{-7}$  m/s έως  $3.65 \cdot 10^{-6}$  m/s.

- **Τμήμα Χ.Θ. 0+600 έως 0+700**

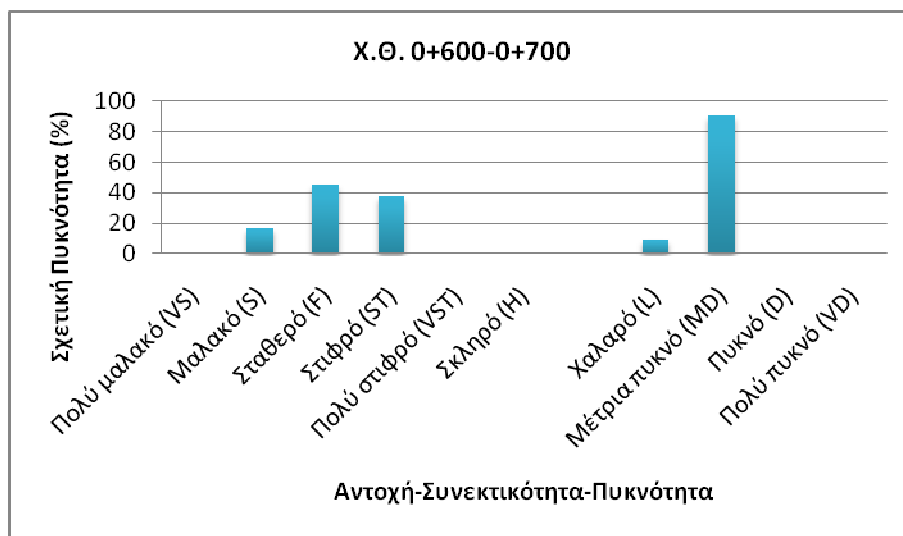
Το συγκεκριμένο τμήμα της χάραξης συναντάται προς το τελευταίο τμήμα της διακλάδωσης Δημοκρατίας με τον άξονα αυτής να περνάει κάτω από δύο οικοδομικά τετράγωνα πολυκατοικιών πλησίον του Σιδηροδρομικού Σταθμού Θεσσαλονίκης. Το μέτωπο της σήραγγας χαρακτηρίζεται από τις μικτές συνθήκες εκσκαφής καθώς λόγω της ανομοιομορφίας των γεωλογικών ενοτήτων απαντώνται τόσο οι Νεογενείς Αποθέσεις-Σειρά Ερυθρών Αργίλων όσο και ο βραχώδης σχηματισμός της Ενότητας Χορτιάτη που συνθέτεται από Πρασινοσχιστόλιθους. Το πάχος των υπερκειμένων στο συγκεκριμένο τμήμα κυμαίνεται μεταξύ των 12 έως 14m.

Όπως προαναφέρθηκε το μέτωπο εκσκαφής αναμένεται να συναντήσει δυο γεωλογικές ενότητες στο συγκεκριμένο τμήμα. Η πρώτη γεωλογική ενότητα είναι αυτή των Νεογενών Αποθέσεων η οποία προοδευτικά με τη προχώρηση του μετώπου περιορίζεται στη στέψη της σήραγγας με τους Πρασινοσχιστόλιθους να την αντικαθιστούν. Η Σειρά των Ερυθρών Αργίλων στο παρόν τμήμα αποτελείται από γεωυλικά λεπτόκοκκης, όπως φαίνεται και από τη τομή T2, αργιλικής κυρίως σύστασης αποτελούμενη από σταθερή έως στιφρή καστανή έως καστανέρυθη Αργίλο με ενστρώσεις Αργιλώδους Άμμου και κατά τόπους παρουσία χαλίκων. Της Σειράς των Ερυθρών Αργίλων υπέρκειται η γεωλογική ενότητα των Τεταρτογενών Αποθέσεων με πάχος το οποίο εκτιμάται ότι θα κυμαίνεται από 8 έως 10m αποτελούμενη από Αργιλώδη Άμμο με χάλικες έως Αμμώδη Αργίλο με χάλικες. Των Τεταρτογενών Αποθέσεων υπέρκειται Τεχνητές Επιχώσεις με το πάχος αυτών στο συγκεκριμένο τμήμα να κυμαίνεται από 1 έως 2m.

Στο συγκεκριμένο τμήμα όπως προαναφέρθηκε παρουσιάζεται για πρώτη φορά στη συγκεκριμένη επέκταση το αλπικό υπόβαθρο της ευρύτερης περιοχής της Θεσσαλονίκης. Το μέτωπο της εκσκαφής της σήραγγας συναντά την Ενότητα Χορτιάτη στην αρχή του τμήματος στο πυθμένα της σήραγγας ενώ όπως το μέτωπο προχωρά προοδευτικά καλύπτει το

μεγαλύτερο ποσοστό αυτού. Ο Πρασινοσχιστόλιθος από τον οποίο συνθέτεται ο βραχώδης αυτός σχηματισμός παρουσιάζεται στο συγκεκριμένο τμήμα της σήραγγας από ασθενής έως κατά τόπους μετρίως ισχυρός με λεπτή έως πυκνή φολίωση. Ο σχηματισμός παρουσιάζεται ελαφρά έως μέτρια αποσαθρωμένος.

Σε ότι αφορά τους εδαφικούς σχηματισμούς τους οποίους θα συναντήσει το μέτωπο εκσκαφής όπως προαναφέρθηκε θα είναι σταθεροί έως στιφροί με τους μαλακούς σχηματισμούς να περιορίζονται στα υπερκείμενα στρώματα της σήραγγας στο αρχικό κυρίως κομμάτι του συγκεκριμένου τμήματος. Οι μεμονωμένες εμφάνισης αδρόκοκκοι σχηματισμοί στο συγκεκριμένο τμήμα παρουσιάζονται χαλαροί έως κυρίως μέτρια πυκνοί. Οι κατανομές της συνεκτικότητας των λεπτόκοκκων και της πυκνότητας των αδρόκοκκων σχηματισμών παρουσιάζονται στο σχήμα 4.3.14 παρακάτω.



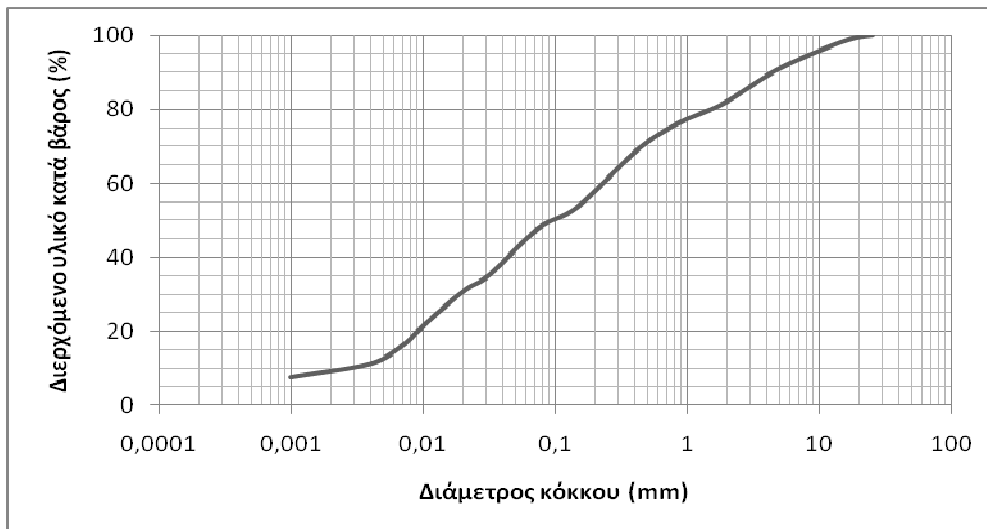
**Σχήμα 4.3.14**

**Κατανομή της συνεκτικότητας και πυκνότητας των λεπτόκοκκων και αδρόκοκκων εδαφικών σχηματισμών με Χ.Θ. 0+600-0+700.**

**Οι επικρατούντες λεπτόκοκκοι σχηματισμοί χαρακτηρίζονται από σταθεροί έως στιφροί και οι αδρόκοκκοι είναι μέτρια πυκνοί με κατά τόπους χαλαρά γεωυλικά.**

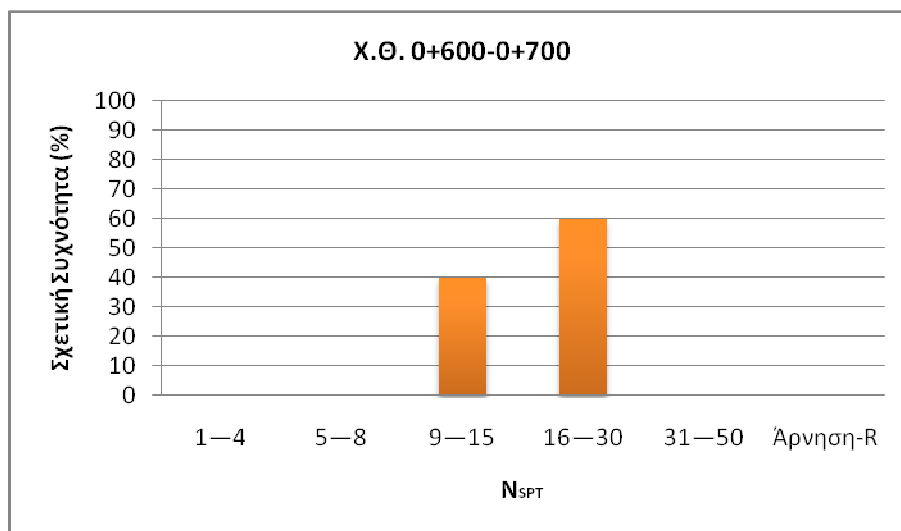
Από τη κοκκομετρική ανάλυση που προέκυψε από τα γεωυλικά, που προήλθαν από τις υφιστάμενες γεωτρήσεις και που αναμένεται να βρεθούν κυρίως στη στέψη του μετώπου εκσκαφής της σήραγγας, οι λεπτόκοκκοι σχηματισμοί, οι διερχόμενοι δηλαδή από το κόσκινο Νο200, φτάνουν σε ένα ποσοστό κοντά στο 50%. Η κοκκομετρική καμπύλη αυτών παρουσιάζεται στο σχήμα 4.3.15 που ακολουθεί. Το αυξημένο ποσοστό των αδρόκοκκων οφείλεται στο ότι κάποια από τις γεωτρήσεις ενδεχομένως βρήκε κάποιων από τους φακούς αυτών πράγμα το οποίο αντικατοπτρίζεται στη κοκκομετρική καμπύλη, αφού γίνεται προσπάθεια για γενίκευση των αποτελεσμάτων.





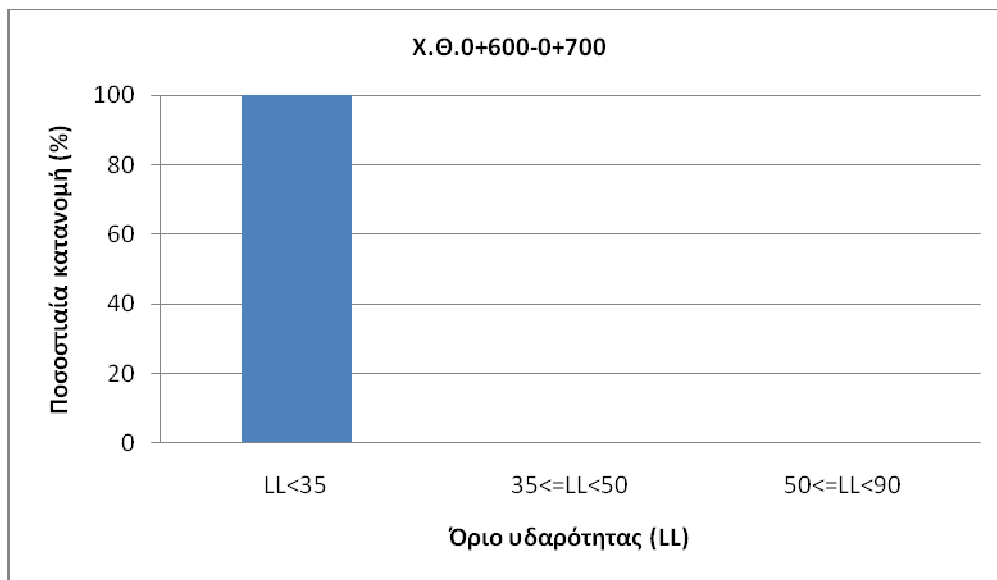
**Σχήμα 4.3.15**  
**Κοκκομετρική καμπύλη για τα γεωυλικά από τη**  
**Χ.Θ. 0+600-0+700.**

Από τις δοκιμές SPT που πραγματοποιήθηκαν στις γεωτρήσεις T10P025 και T10P021 που βρίσκονται εντός του εξεταζόμενου τμήματος οι τιμές N της δοκιμής κυμαίνονται από 13 έως 17 για τους υπό εξέταση εδαφικούς σχηματισμούς με τη δοκιμή στη γεώτρηση T10P025 να αναφέρεται στη Σειρά των Ερυθρών Αργίλων, όπου εστιάζεται το μεγαλύτερο ενδιαφέρον καθώς αυτή είναι η γεωλογική ενότητα την οποία συναντά το μέτωπο εκσκαφής, λαμβάνοντας τιμές που κυμαίνονται από 15 έως 17. Η κατανομή των τιμών N της δοκιμής SPT παρουσιάζεται στο σχήμα 4.3.16 παρακάτω. Από την εμπειρική σχέση του Terzaghi προκύπτει ότι η αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $C_u$  για τους σχηματισμούς που παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον θα κυμαίνεται μεταξύ 190 kPa και 215 kPa.



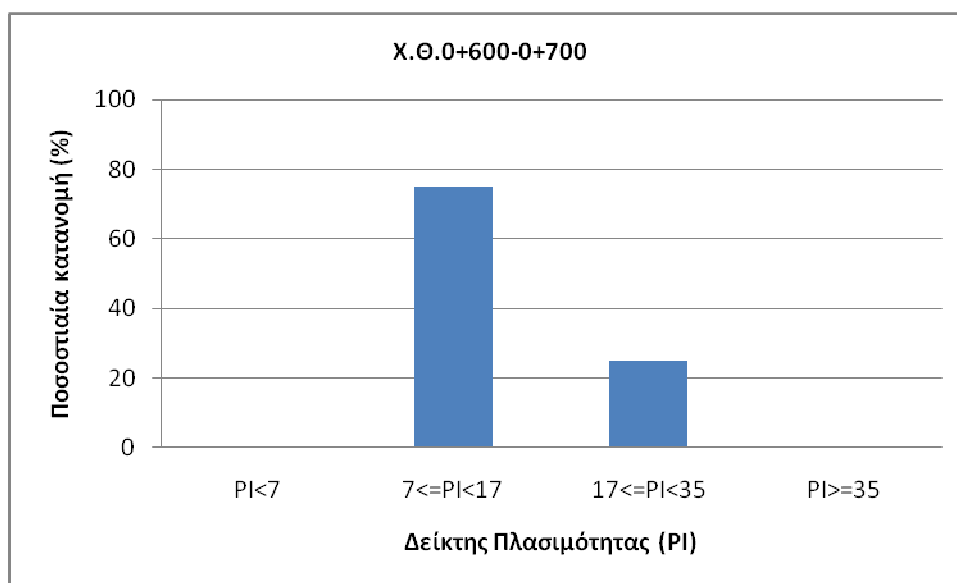
**Σχήμα 4.3.16**  
**Κατανομή των τιμών SPT του τμήματος με Χ.Θ. 0+600-0+700.**  
**Οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 13 έως 17.**

Από το προσδιορισμό του ορίου υδαρότητας για τους εδαφικούς σχηματισμούς του συγκεκριμένου τμήματος, που αναμένεται να συναντήσει το μέτωπο εκσκαφής, προκύπτει ότι στο σύνολο τους ανήκουν στη κατηγορία των ισχών σχηματισμών καθώς το όριο υδαρότητας LL βρίσκεται κάτω από τη τιμή 35 όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.3.17 που ακολουθεί.



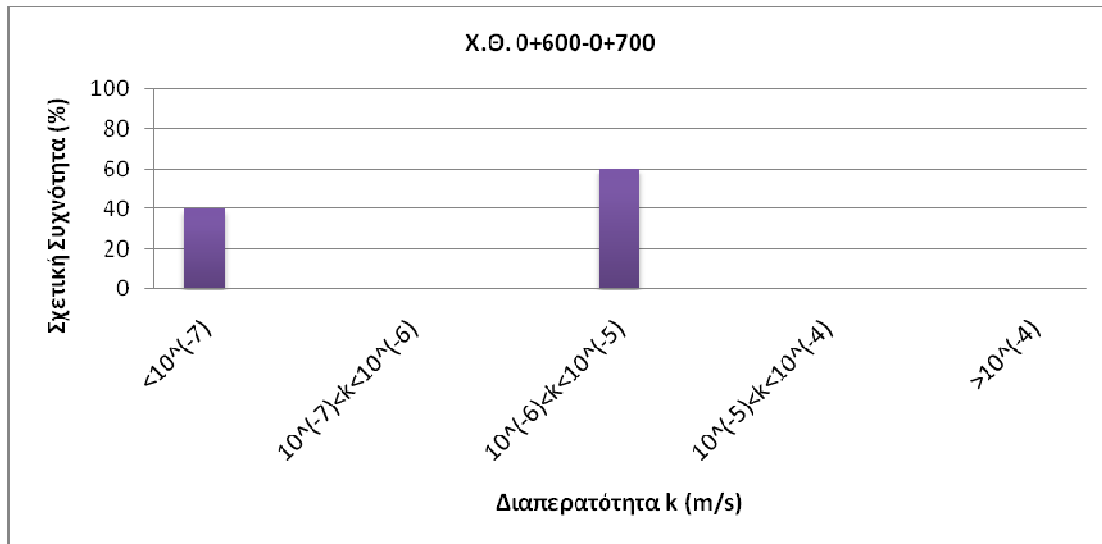
**Σχήμα 4.3.17**  
**Ποσοστιαία κατανομή του ορίου υδαρότητας για το τμήμα**  
**Χ.Θ. 0+600-0+700.**

Εν συνεχεία από το προσδιορισμό του δείκτη πλασιμότητας PI και στο συγκεκριμένο τμήμα οι εδαφικοί σχηματισμοί που αναμένεται να απατηθούν κατά τη διάνοιξη της σήραγγας στο μεγαλύτερο ποσοστό τους (75%) είναι σχηματισμοί ενδιάμεσης πλασιμότητας, όπως και στα τμήματα που έχουν προηγηθεί. Η ποσοστιαία κατανομή αυτού παρουσιάζεται στο σχήμα 4.3.18 που ακολουθεί.



**Σχήμα 4.3.18**  
**Ποσοστιαία κατανομή του δείκτη πλασιμότητας για το τμήμα**  
**Χ.Θ. 0+600-0+700.**

Σε ότι αφορά την υδατοπερατότητα των εδαφικών σχηματισμών πραγματοποιήθηκαν δοκιμές πίπτοντος (μεταβλητού) υδραυλικού φορτίου στις γεωτρήσεις T10P025 και T10P021 οι οποίες δείχνουν ότι λόγω της παρουσίας του αργίλικού στοιχείου η διαπερατότητα των σχηματισμών είναι πάρα πολύ μικρή με τις τιμές αυτής να κυμαίνονται από  $k=10^{-6}$  m/s έως  $k=3*10^{-6}$  m/s. Πραγματοποιήθηκαν επίσης δοκιμές σταθερού υδραυλικού φορτίου σε σημεία όπου αναπτύσσονται οι βραχώδεις σχηματισμοί της Ενότητας Χορτιάτη. Από τις δοκιμές προκύπτει ότι οι σχηματισμοί αυτοί έχουν εξαιρετικά μικρή υδατοπερατότητα με τιμές  $k$  μικρότερες του  $k=10^{-7}$  m/s με αυτές να κυμαίνονται περί τα  $9*10^{-8}$  m/s. Η κατανομή της υδατοπερατότητας των σχηματισμών στο σύνολο τους παρουσιάζεται στο σχήμα 4.3.19 που ακολουθεί.



Σχήμα 4.3.19

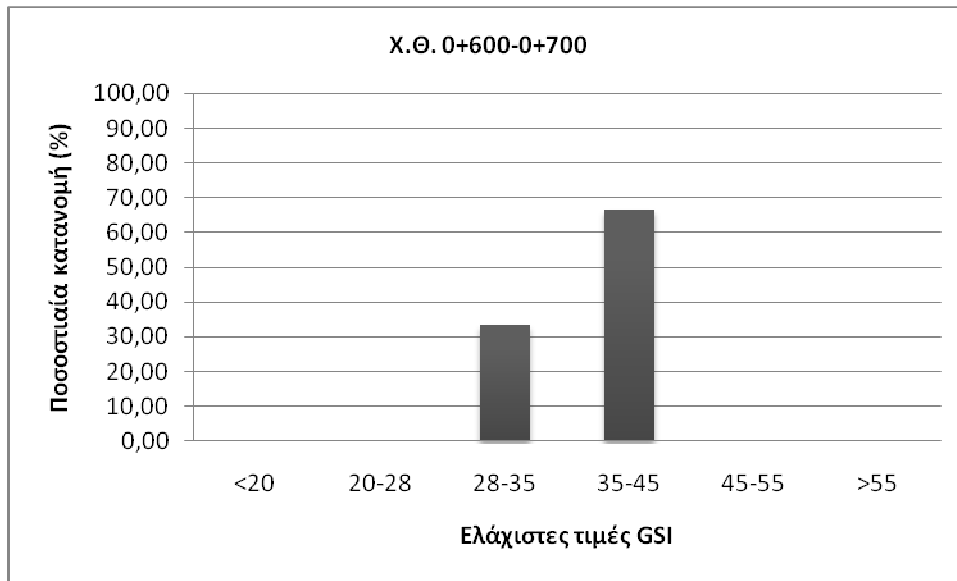
**Κατανομή των τιμών υδατοπερατότητας του τμήματος με Χ.Θ. 0+600-0+700.  
 . Η υδατοπερατότητα των σχηματισμών στο σύνολο τους είναι ιδιαίτερα μικρή.**

Η ιδιαιτερότητα του συγκεκριμένου τμήματος είναι ότι για τη συγκεκριμένη επέκταση το μέτωπο της σήραγγας έρχεται σε επαφή με το αλπικό υπόβαθρο της ευρύτερης περιοχής για πρώτη φορά. Παραπάνω έγινε μια πρώτη αναφορά σε ότι αφορά το ποιοτικό χαρακτηρισμό της βραχώμαζας ως προς το πόσο ισχυρή είναι στο συγκεκριμένο τμήμα. Παρακάτω ακολουθεί ποσοτική και ποιοτική περιγραφή της βραχώμαζας από τα στοιχεία που ελήφθησαν από τις γεωτρήσεις T10P025 και T10P021.

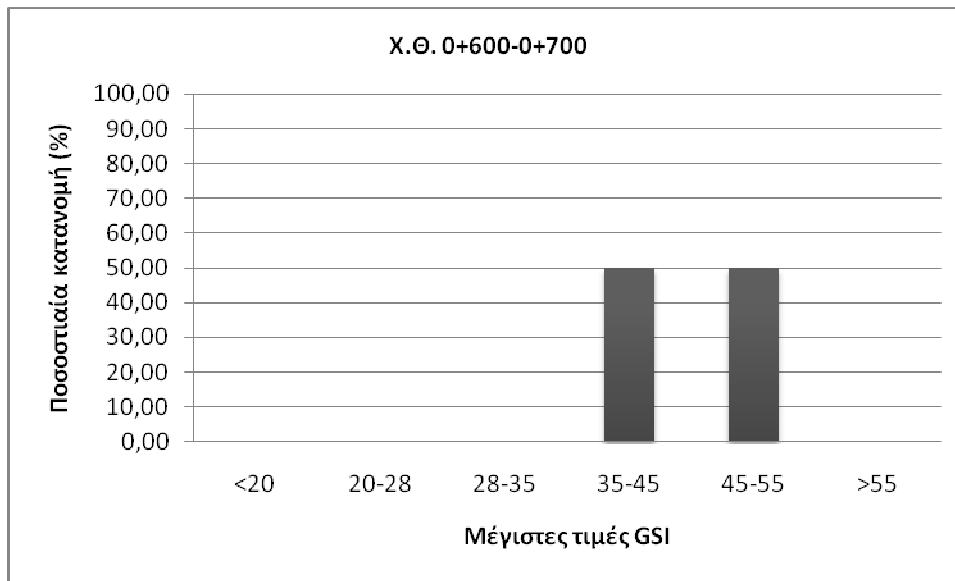
Από το εκσκαφέν υλικό των γεωτρήσεων ο Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής (GSI) εκτιμάται ότι κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 30 έως 45. Πρόκειται για πτωχής έως μέτριας ποιότητας βραχώμαζα η οποία μπορεί να χαρακτηριστεί ως πολύ τεμαχισμένη (very blocky) με ποιότητα επιφάνειας ασυνεχειών μέτρια (fair), με λείες, μετρίως αποσπασθωμένες ή εξαλλοιωμένες επιφάνειες, έως πτωχή (poor), με ολισθηρές επιφάνειες, πολύ αποσπασθωμένες πληρωμένες με οξείδια ή χαλαζιτικό υλικό ασυνέχειες όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα 4.3.20, ενώ η ποσοστιαία κατανομή του GSI (με τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές τις οποίες λαμβάνει) παρουσιάζεται στα σχήματα 4.3.21 και 4.3.22 .

GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000)		SURFACE CONDITIONS				
<p>From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. <b>Note that the table does not apply to structurally controlled failures.</b> Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.</p>		SURFACE CONDITIONS				
		VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces	GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces	POOR Stickered, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments	VERY POOR Stickered, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY →				
INTERLOCKING OF ROCK PIECES		DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES ↓				
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90			N/A	N/A
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets	80	70			
	VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets			50		
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity			40		
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces				30	
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes					20
		N/A	N/A			10

**Σχήμα 4.3.20**  
**Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής (GSI) του τμήματος με Χ.Θ. 0+600-0+700.**  
**Πτωχής έως μέτριας ποιότητας βραχώμαζα με μέτρια έως πτωχή επιφάνεια ασυνεχιών**

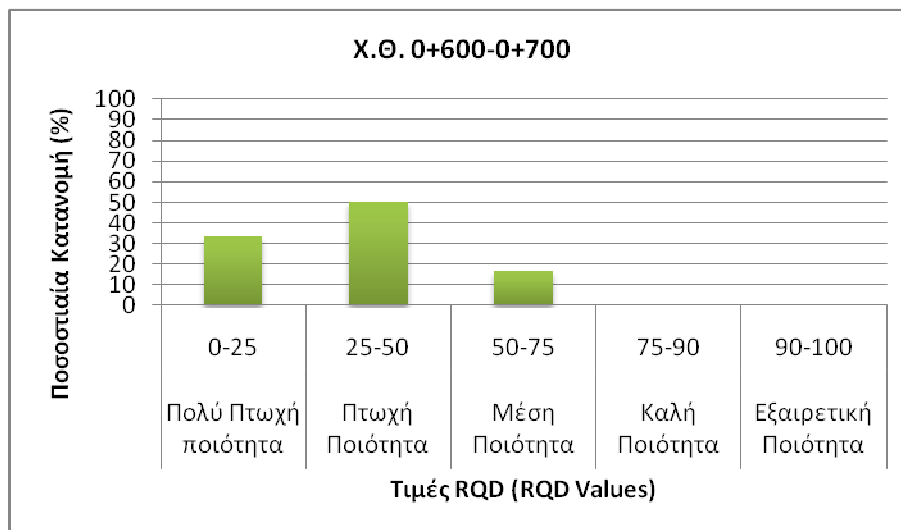


**Σχήμα 4.3.21**  
**Ποσοστιαία κατανομή των ελάχιστων τιμών**  
**του Γεωλογικού Δείκτη Αντοχής (GSI) του τμήματος με Χ.Θ. 0+600-0+700.**



**Σχήμα 4.3.22**  
**Ποσοστιαία κατανομή των μέγιστων τιμών**  
**του Γεωλογικού Δείκτη Αντοχής (GSI) του τμήματος με Χ.Θ. 0+600-0+700.**

Από τους πυρήνες των γεωτρήσεων στο βραχώδη σχηματισμό επίσης εκτιμήθηκαν οι τιμές RQD για τη βραχώμαζα οι οποίες στο συγκεκριμένο τμήμα κυμαίνονται από 0 έως 57. Οι χαμηλότερες τιμές RQD παρατηρούνται στους σχηματισμούς που βρίσκονται κυρίως κοντά στα επιφανειακά στρώματα, όπου η βραχώμαζα έρχεται σε επαφή με τα εδαφικά υλικά και συνθέτουν μια ζώνη αποσάθρωσης, με τις τιμές να αυξάνονται με το βάθος. Στο βάθος στο οποίο αναμένεται να περάσει το μέτωπο εκσκαφής οι τιμές κυμαίνονται από 0 έως 50 οπότε πρόκειται για βραχώμαζα πολύ πτωχής έως πτωχής/μέτριας ποιότητας. Στο ακόλουθο σχήμα 4.3.23 φαίνεται η κατανομή των τιμών RQD στο συγκεκριμένο τμήμα.



**Σχήμα 4.3.23**  
**Τιμές RQD του τμήματος με Χ.Θ. 0+600-0+700.**  
**Πολύ πτωχής ποιότητας βραχώμαζα έως κυρίως πτωχή με σχετικά χαμηλές τιμές RQD.**

- **Τμήμα Χ.Θ. 0+700 έως 2+150**

Η οριοθέτηση του συγκεκριμένου τμήματος της χάραξης της σήραγγας χαρακτηρίζεται από το γεγονός ότι η σήραγγα βρίσκεται μέσα στη γεωλογική ενότητα του Χορτιάτη, εντός του βραχώδους υπόβαθρου της ευρύτερης περιοχής της Θεσσαλονίκης. Η σήραγγα συνθέεται από το τελευταίο τμήμα της Διακλάδωσης Δημοκρατίας και περιλαμβάνει τους σταθμούς Νεάπολη και Παύλου Μελά. Η σήραγγα διέρχεται από τη χιλιομετρική θέση 0+700 έως 1+000 κάτω από οικοδομικά τετράγωνα όπου έχουν δομηθεί πολυκατοικίες ενώ από τη χιλιομετρική θέση 1+000 έως 2+150 ο άξονας της σήραγγας διέρχεται κάτω από τον οδικό άξονα της Λεωφόρου Λαγκαδά. Το μέτωπο της σήραγγας όπως προαναφέρθηκε συναντά το αλπικό υπόβαθρο το οποίο αποτελείται από Πρασινοσχιστόλιθους. Το πάχος των υπερκειμένων στο συγκεκριμένο τμήμα κυμαίνεται από 14 έως 24m. Πιο συγκεκριμένα από τη χιλιομετρική θέση 0+700 έως 1+500 το πάχος των υπερκειμένων σταδιακά αυξάνεται από τα 14 στα 24m ενώ από τη χιλιομετρική θέση 1+500 έως τη χιλιομετρική θέση 2+150 το πάχος των υπερκειμένων μειώνεται από τα 24 στα 16m.

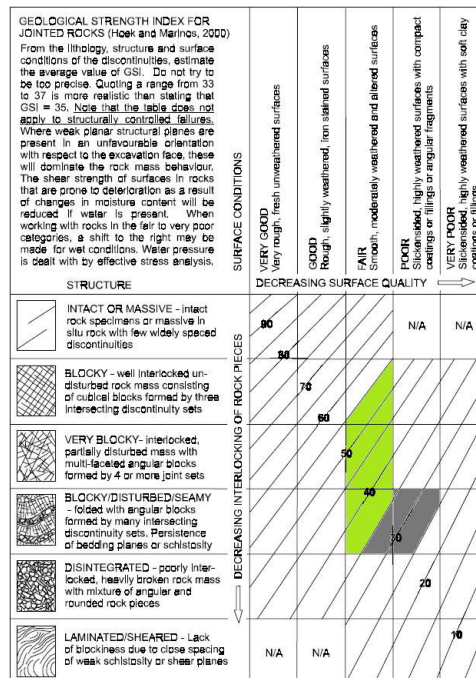
Το μέτωπο εκσκαφής συναντά αποκλειστικά βραχώδεις σχηματισμούς στο συγκεκριμένο τμήμα οι οποίοι όμως παρουσιάζουν μια σχετική μεταβολή ως προς τη ποιότητα της βραχώμαζας όπως θα παρουσιαστεί παρακάτω. Στα ανώτερα στρώματα, τα οποία υπέρκεινται της κυρίαρχης γεωλογικής ενότητας του Χορτιάτη φαίνεται ότι έχουμε εμφάνιση τόσο των Νεογενών Αποθέσεων (Σειρά Ερυθρών Αργίλων) όσο και των Τεταρτογενών Αποθέσεων και των Τεχνητών. Πιο συγκεκριμένα από τη Χ.Θ. 0+700 έως 0+800 αναμένεται των Πρασινοσχιστόλιθων να υπέρκεινται η γεωλογική ενότητα των Νεογενών Αποθέσεων, με πάχος που εκτιμάται ότι θα κυμαίνεται από 4m έως τη προοδευτική εξαφάνιση αυτών. Οι Νεογενείς Αποθέσεις υπόκεινται των Τεταρτογενών Αποθέσεων, οι οποίες εκτιμάται ότι θα έχουν πάχος από 3m έως 8.50m. Οι Τεχνητές Επιχώσεις εκτιμάται ότι θα έχουν πάχος από 1m έως 1.50m. Από τη Χ.Θ. 0+800 έως 1+070 οι Νεογενείς Αποθέσεις απουσιάζουν σε γεωλογική ενότητα. Οι Τεταρτογενείς Αποθέσεις που υπέρκεινται της Ενότητας του Χορτιάτη εκτιμάται ότι θα έχουν πάχος που θα κυμαίνεται από τα 3m έως 4m ενώ οι Τεχνητές Επιχώσεις αναμένεται να έχουν πάχος περίπου 1m. Από τη Χ.Θ. 1+070 έως τη Χ.Θ. 1+200 οι Τεταρτογενείς Αποθέσεις αναμένεται να έχουν πάχος μικρότερο από 1m έως 5m ενώ οι Τεχνητές Επιχώσεις από 4m έως 9m. Τα γεωυλικά των υπερκειμένων στρωμάτων των Τεταρτογενών Αποθέσεων αναμένεται να είναι αδρόκοκκης, αμμώδους κυρίως φύσης. Από τη Χ.Θ. 1+200 έως τη Χ.Θ. 1+550 των Πρασινοσχιστόλιθων υπέρκεινται μόνο Τεχνητές Επιχώσεις με πάχος 1m έως περίπου 4m. Από τη Χ.Θ. 1+550 έως τη Χ.Θ. 1+850 της Ενότητας Χορτιάτη υπέρκεινται η Σειρά των Ερυθρών Αργίλων με πάχος που εκτιμάται ότι κυμαίνεται από 5m έως 13m και τις Τεχνητές Επιχώσεις να υπέρκεινται της Σειράς των Ερυθρών Αργίλων με πάχος από 2m έως 8m. Από τη Χ.Θ. 1+850 έως τη Χ.Θ. 2+150 των Πρασινοσχιστόλιθων υπέρκεινται Νεογενείς Αποθέσεις με πάχος που αναμένεται να κυμαίνεται από 10m έως 14m, οι Τεταρτογενείς Αποθέσεις να υπέρκεινται των Νεογενών με πάχος που εκτιμάται από 2m έως 9m ενώ οι Τεχνητές Επιχώσεις αναμένεται να έχουν πάχος από 1m έως 9m. Τα παραπάνω παρουσιάζονται εποπτικότερα στη γεωλογική τομή T1. Οι υπερκείμενοι σχηματισμοί αναμένεται να είναι λεπτόκοκκης, αργιλικής κυρίως φύσης με μεμονωμένες εμφανίσεις αδρόκοκκων σχηματισμών όπως παρουσιάζεται και στη τομή T2.

Αρχικά εξετάζεται το υπό-τμήμα του παρόντος κομματιού του άξονα της σήραγγας από τη χιλιομετρική θέση 0+700 έως τη χιλιομετρική θέση 1+300. Από τις υφιστάμενες γεωτρήσεις ( T10P026, T10P022, T10P027, T10P023, T10P003, T10P028, T10H004, T10H029, T10P005, T10P031) ο βραχώδης σχηματισμός ο οποίος αναπτύσσεται θα μπορούσε να χαρακτηριστεί κυρίως μετρίως ασθενής έως μετρίως ισχυρός, έχοντας υποστεί αποσάθρωση σε μικρό έως μέσο βαθμό, ενώ παρατηρήθηκαν ζώνες όπου τα γεωυλικά φαίνονται εντόνως καταπονημένα γεωλογικά.

Στην αρχή του συγκεκριμένου τμήματος, το οποίο τίθεται ως τμήμα Χ.Θ. 0+700-1+300Α και αναφέρεται στη Χ.Θ.0+700-0+800, αναμένεται ότι οι σχηματισμοί που θα συναντήσει το μέτωπο εκσκαφής θα είναι πολύ ασθενείς έως ασθενείς, έντονα αποσαθρωμένη. Οι ασυνέχειες της βραχώμαζας στα ασθενή τμήματα αυτής εμφανίζονται πληρωμένες με υλικό,

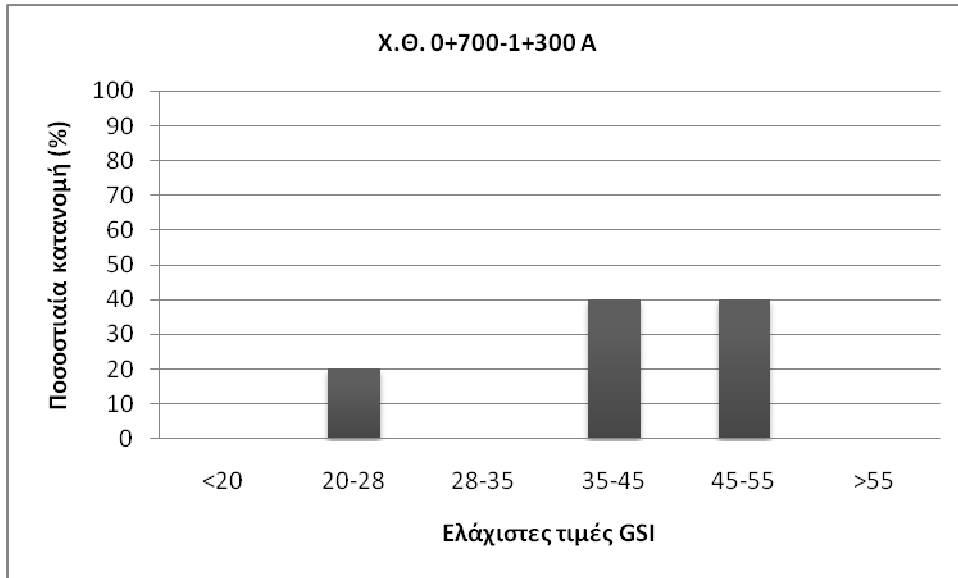
το οποίο έχει προκύψει ενδεχομένως από την αποσάθρωση των Πρασινοσχιστολίθων. Με το βάθος οι σχηματισμοί αναμένεται να είναι μέτρια ισχυροί με μέτριο βαθμό αποσάθρωσης, ενώ οι ασυνέχειες της βραχώμαζας εμφανίζεται να τραχείες με ορισμένες να έχουν υλικό πληρώσεως. Κατά συνέπεια στο μέτωπο εκσκαφής θα συναντήσουμε μικτές συνθήκες βραχώμαζας από πολύ ασθενή έως μέτρια ισχυρή. Από τα γεωλικά που εμφανίστηκαν από τις υφιστάμενες γεωτρήσεις T10P026 και T10P022 χαρακτηριστικό αποτελεί το γεγονός ότι εμφανίστηκαν ζώνες υλικών έντονα καταπονημένες και κερματισμένες, οι οποίες πιθανώς να αποτελούν ζώνες ρήγματος. Ακολουθεί ποσοτική περιγραφή των παραπάνω.

Από το Γεωλογικό Δείκτη Αντοχής (GSI), που προέκυψε από το παρατηρούμενο γεωλικό των γεωτρήσεων, εκτιμάται ότι κυμαίνεται από 25 έως και 55. Η διακύμανση του GSI είναι πολύ μεγάλη και αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι οι βραχώμαζα είναι από τεμαχισμένη (blocky), πολύ τεμαχισμένη (very blocky) έως και κερματισμένη (blocky/disturbed) κατά τύπους όπως προαναφέραμε με επιφάνειες ασυνεχειών μέτρια εξαλλωμένες ή αποσαθρωμένες (fair) με κάποιες να έχουν υλικό πληρώσεως (poor) όπως παρουσιάζεται και στο παρακάτω σχήμα 4.3.24. Στα σχήματα αντίστοιχα 4.3.25 και 4.3.26 παρουσιάζεται η ποσοστιαία κατανομή του GSI στο συγκεκριμένο τμήμα.

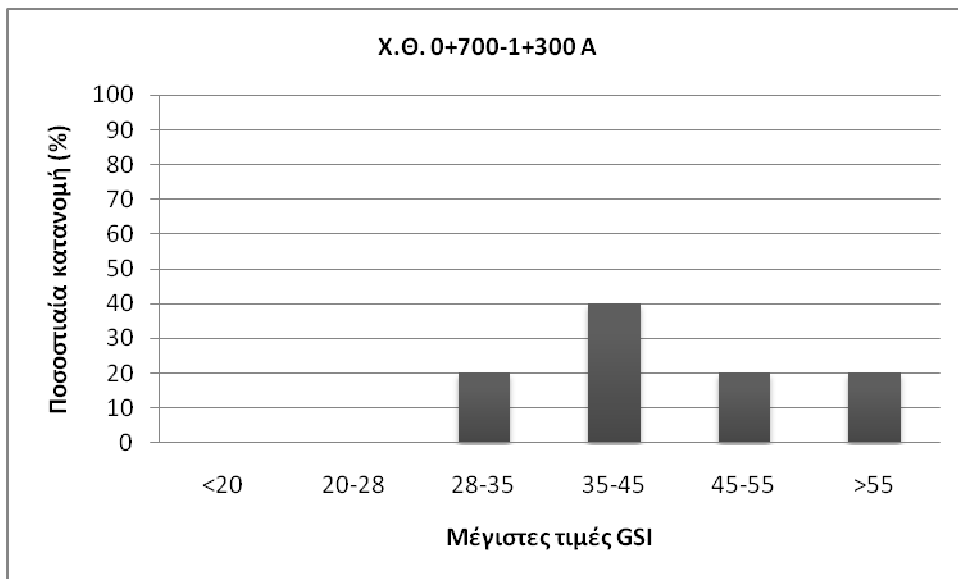


**Σχήμα 4.3.24**

**Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής (GSI) του αρχικού τμήματος με Χ.Θ. 0+700-1+300 Α. Κυρίως μέτριας ποιότητας βραχώμαζα με μέτρια έως πτωχή επιφάνεια ασυνεχειών.**



**Σχήμα 4.3.25**  
**Ποσοστιαία κατανομή των ελάχιστων τιμών**  
**του Γεωλογικού Δείκτη Αντοχής (GSI) του τμήματος με Χ.Θ. 0+700-1+300 Α.**

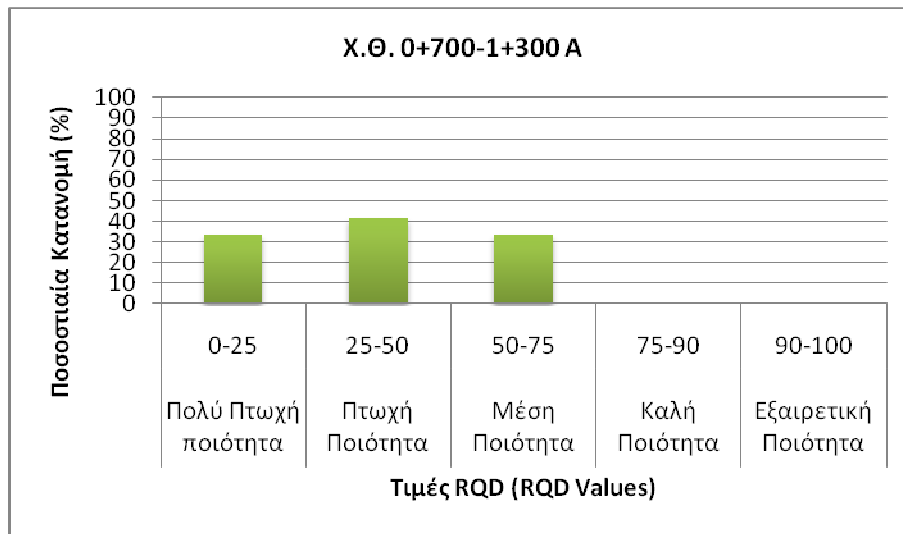


**Σχήμα 4.3.26**  
**Ποσοστιαία κατανομή των μέγιστων τιμών**  
**του Γεωλογικού Δείκτη Αντοχής (GSI) του τμήματος με Χ.Θ. 0+700-1+300 Α.**

Από τους πυρήνες των γεωτρήσεων που ελήφθησαν από το βραχώδη σχηματισμό υπολογίστηκαν οι τιμές του RQD με τις τιμές αυτού να κυμαίνονται από 6 έως και 73 με τις τιμές αυτές να αντιπροσωπεύουν και τα RQD των σχηματισμών στο βάθος του μετώπου εκσκαφής. Το εύρος των τιμών είναι πολύ μεγάλο, όπως γίνεται αντιληπτό και από τη περιγραφή των σχηματισμών παραπάνω, με τη ποιότητα της βραχώμαζας να είναι από πολύ πτωχή έως μέση με τις χαμηλές τιμές να εντοπίζονται ακόμα και σε μεγάλο βάθος από όπου

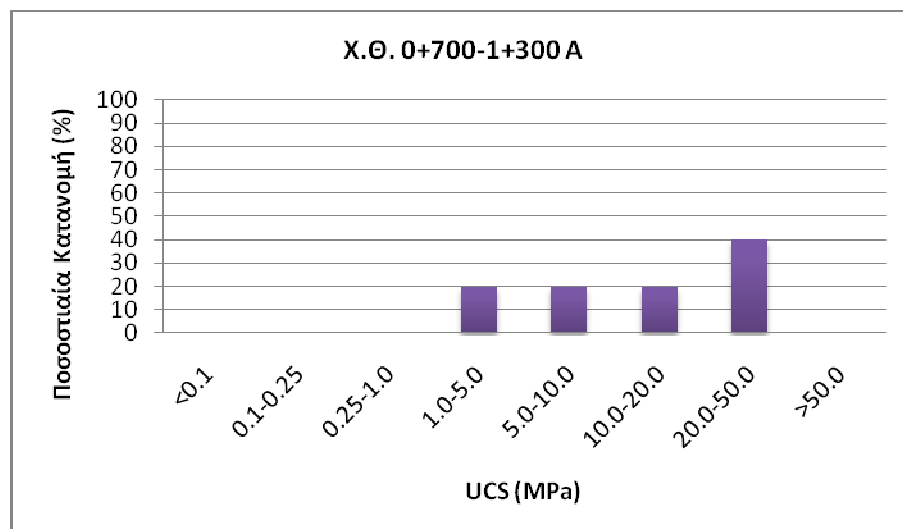


αναμένεται να περνάει και ο άξονας της σήραγγας. Στο ακόλουθο σχήμα 4.3.27 φαίνεται η κατανομή των τιμών RQD στο συγκεκριμένο, αρχικό κομμάτι του τμήματος.



**Σχήμα 4.3.27**  
**Τιμές RQD του τμήματος με Χ.Θ. 0+700-1+300 Α.**  
**Κυρίως πτωχής έως μέσης ποιότητας βραχόμαζα.**

Μια εκτενέστερη ποσοτική περιγραφή της βραχόμαζας προκύπτει από τη δοκιμή σε ανεμπόδιστη θλίψη από την οποία προκύπτει η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη (UCS). Από δοκιμές που εκτελέστηκαν σε δοκίμια κυλινδρικού σχήματος. Παρατηρείται ότι η αντοχή της βραχόμαζας δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλη στην αρχή του τμήματος. Οι τιμές που προκύπτουν από τη δοκιμή UCS είναι σχετικά μικρές, οι οποίες κυμαίνονται από 5MPa έως 6MPa, όμως όσο προχωράει το μέτωπο εκσκαφής, παραμένοντας σε αυτό το αρχικό κομμάτι, οι σχηματισμοί αποκτούν μεγαλύτερη αντοχή με τιμές UCS που κυμαίνονται από 10 έως 25MPa. Παρακάτω στο σχήμα 4.3.28 παρουσιάζεται η κατανομή των αντοχών των βραχωδών σχηματισμών όπως προέκυψαν από τη δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης.

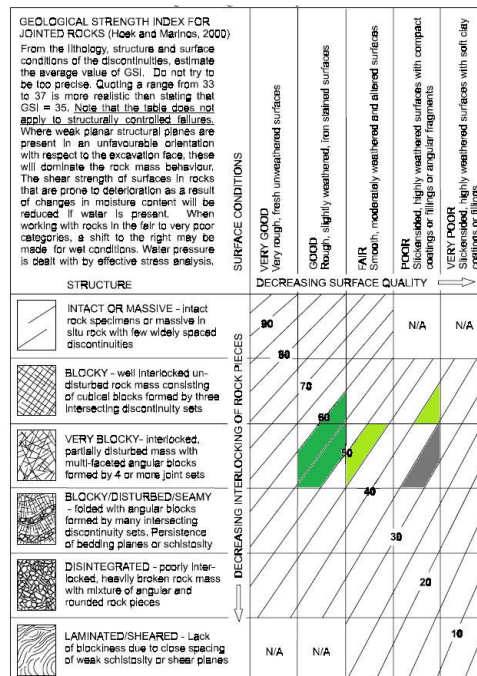


**Σχήμα 4.3.28**  
**Τιμές UCS του τμήματος Χ.Θ. 0+700-1+300 Α.**  
**Παρατηρείται ότι το γεωολικό είναι μέτριας έως υψηλής αντοχής.**  
**Οι σχηματισμοί αποκτούν αντοχή καθώς το μέτωπο προχωράει.**

Από τη δοκιμή σε ανεμπόδιστη θλίψη UCS και από το προσδιορισμό του δείκτη GSI μπορεί να γίνει εφαρμογή του κριτηρίου Hoek-Brown για το προσδιορισμό αντοχής της βραχώμαζας  $\sigma_{cm}$ . Από τις μέσες τιμές των παραπάνω μεγεθών προκύπτει ότι για αυτό το κομμάτι της σήραγγας, κάνοντας χρήση του προγράμματος Rocklab, η αντοχή της βραχώμαζας εκτιμάται στα  $\sigma_{cm} = 1.95$  MPa, η οποία είναι σχετικά χαμηλή αντικατοπτρίζοντας την εν γένει χαμηλή έως μέτρια ποιότητα της βραχώμαζας όπως προαναφέρθηκε. Τα πλήρη στοιχεία που προκύπτουν από το πρόγραμμα Rocklab και τα εισαγωγικά δεδομένα παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β.

Εν συνεχεία, από τις πληροφορίες που έχουν αντληθεί από τις υπόλοιπες γεωτρήσεις, και οι οποίες αναφέρονται στο υπόλοιπο κομμάτι που τίθενται ως X.Θ.0+700-1+300B, οι βραχώδεις σχηματισμοί που αναπτύσσονται στο σύνολο τους χαρακτηρίζονται από μέτρια ασθενείς έως κυρίως μέτρια ισχυροί έως ισχυροί ενώ ο βαθμός αποσάθρωσης της βραχώμαζας είναι μικρός έως μέτριος. Το σύστημα ασυνεχειών της βραχώμαζας εκτιμάται ότι θα είναι πυκνό, με τραχιές επιφάνειες με ορισμένες ελαφρά οξειδωμένες και ορισμένες με χαλαζιακό υλικό πληρώσεως. Χαρακτηριστικό αποτελεί η εύρεση και σε αυτό το κομμάτι του τμήματος (τμήμα: X.Θ. 0+800 έως 1+300) ζωνών εντόνως καταπονημένων (ζώνες έντονου κερματισμού και ζώνες έντονης αποσάθρωσης). Τη παραπάνω ποιοτική περιγραφή ακολουθεί η παρουσίαση των αντίστοιχων για τη βραχώμαζα ποσοτικών μεγεθών.

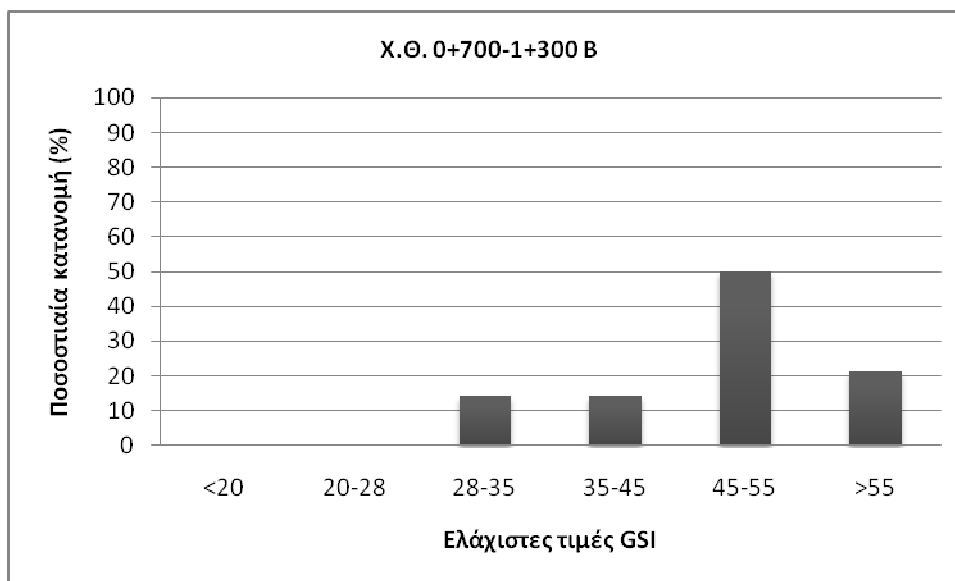
Από το Γεωλογικό Δείκτη Αντοχής (GSI), από τις γεωτρήσεις T10P027, T10P023, T10P003, T10P028 και T10H004, παρατηρείται ότι κυμαίνεται μεταξύ ενός εύρους 30 έως 60. Ο χαρακτηρισμός των βραχωδών σχηματισμών γενικά εκτιμά μια βραχώμαζα τεμαχισμένη (blocky) έως πολύ τεμαχισμένη (very blocky) με τη κατάσταση των ασυνεχειών να είναι από καλή (good), μέτρια (fair) έως πτωχή (poor). Πιο συγκεκριμένα στο βάθος όπου βρίσκεται το μέτωπο εκσκαφής η βραχώμαζα εκτιμάται ότι θα είναι πολύ τεμαχισμένη με μέτρια κυρίως επιφάνεια ασυνεχειών (GSI≈45 έως 55). Η κατανομή του Γεωλογικού Δείκτη Αντοχής (GSI) του συγκεκριμένου κομματιού παρουσιάζεται στο σχήμα 4.3.29 που ακολουθεί, ενώ στα σχήματα 4.3.30 και 4.3.31 παρουσιάζεται η ποσοστιαία κατανομή των τιμών αυτού.



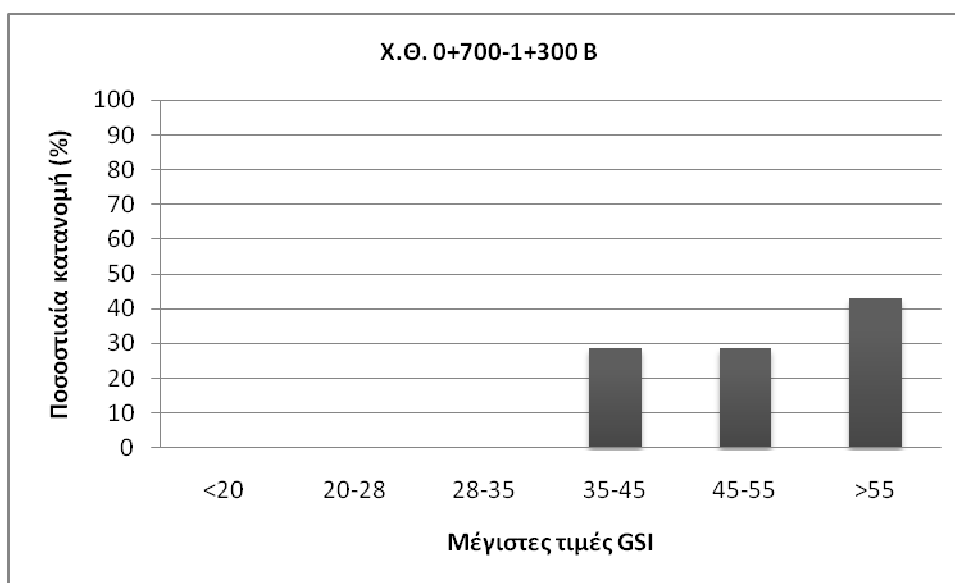
Σχήμα 4.3.29

Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής (GSI) του δεύτερου κομματιού του τμήματος με X.Θ. 0+700-1+300 B.

Στη περιοχή του μετώπου αναμένονται συνθήκες πολύ τεμαχισμένης βραχώμαζας με μέτρια κατάσταση ασυνεχειών.



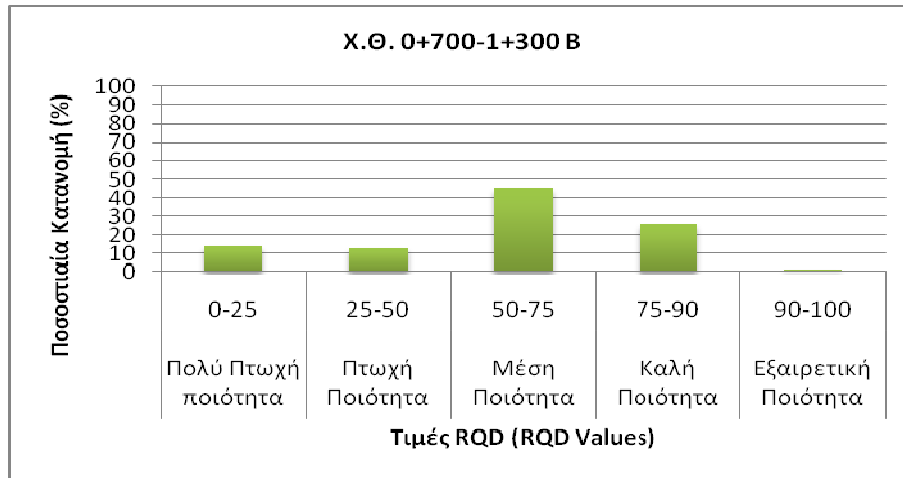
**Σχήμα 4.3.30**  
**Ποσοστιαία κατανομή των ελάχιστων τιμών**  
**του Γεωλογικού Δείκτη Αντοχής (GSI) του τμήματος με Χ.Θ. 0+700-1+300 Β.**



**Σχήμα 4.3.31**  
**Ποσοστιαία κατανομή των μέγιστων τιμών**  
**του Γεωλογικού Δείκτη Αντοχής (GSI) του τμήματος με Χ.Θ. 0+700-1+300 Β.**

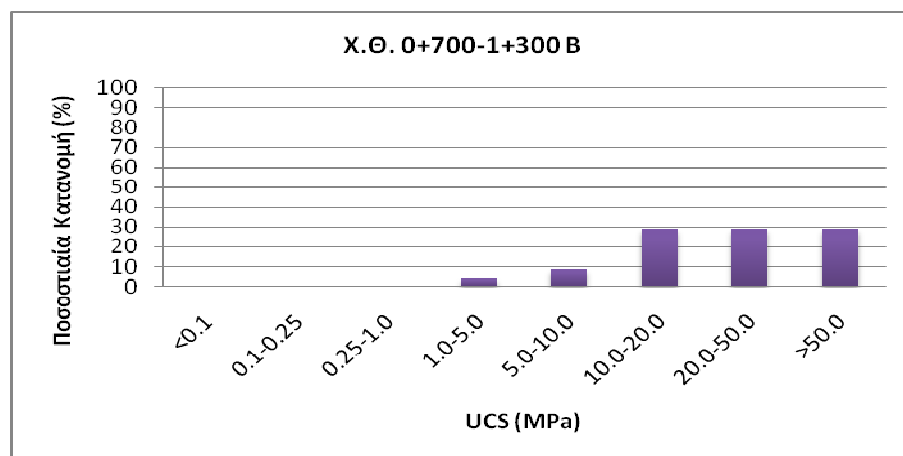
Στη συνέχεια εξετάζονται οι πυρήνες που ελήφθησαν από τις γεωτρήσεις. Από το προσδιορισμό του δείκτη RQD προκύπτει ότι οι εκτιμώμενες τιμές αυτού θα κυμαίνονται από 0 έως 100 δηλαδή τα εκσκαφέντα γεωλικά εκ των γεωτρήσεων καλύπτουν όλο το εύρος του προσδιορισμού της ποιότητας βάσει του δείκτη RQD. Στο βάθος του μετώπου εκσκαφής αναμένεται να αναπτύσσονται σχηματισμοί των οποίων το εύρος των τιμών τους θα κυμαίνεται από 50 έως 85, δηλαδή θα έχουμε βραχόμαζα κάνοντας χρήση του RQD μέσης έως καλής ποιότητας, γεγονός το οποίο επιβεβαιώνεται και από την αξιολόγηση της βραχόμαζας κάνοντας εφαρμογή του Γεωλογικού Δείκτη Αντοχής (GSI). Οι χαμηλές τιμές του RQD απαντώνται στα σημεία όπου οι γεωτρήσεις συνάντησα κερματισμένα και καταπονημένα γεωλογικώς υλικά, δηλαδή ασθενείς ζώνες πολύ μικρής αντοχής λόγω

κερματισμού ή εντόνως αποσαθρωμένες. Στο σχήμα 4.3.32 που ακολουθεί παρουσιάζεται η κατανομή του RQD από το σύνολο των βραχωδών σχηματισμών του κομματιού του συγκεκριμένου τμήματος.



**Σχήμα 4.3.32**  
**Τιμές RQD του τμήματος με Χ.Θ. 0+700-1+300 Β.**  
**Κορίως μέσης έως καλής ποιότητας βραχώμαζα.**

Επιπλέον εξετάζονται οι δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης σε κυλινδρικά δοκίμια, μορφωμένα από τα γεωλικά των γεωτρήσεων. Από τα αποτελέσματα των δοκιμών η αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη (UCS) κυμαίνεται από 3.50 MPa έως 93 MPa. Το εύρος διακύμανσης της τιμής UCS συνεπώς είναι πάρα πολύ μεγάλο παρουσιάζοντας μας τη ποικιλία των αντοχών της βραχώμαζας σε βάθος. Πιο συγκεκριμένα στο βάθος του μετώπου εκσκαφής η αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη εκτιμάται ότι κυμαίνεται από 10 έως 50 MPa, βραχώδεις σχηματισμοί δηλαδή με σχετικά υψηλές αντοχές. Παρατηρείται επίσης ότι χαμηλές τιμές UCS αναμένεται να υπάρχουν στις ζώνες αδυναμίας της βραχώμαζας (ζώνες κερματισμού και ζώνες αποσαθρώσεως) όπου αναμενόμενη είναι η χαμηλή αντοχή των σχηματισμών αυτών. Παρακάτω στο σχήμα 4.3.33 παρουσιάζεται η κατανομή των αντοχών στο σύνολο των σχηματισμών σε δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης.



**Σχήμα 4.3.33**  
**Τιμές UCS του τμήματος Χ.Θ. 0+700-1+300 Β.**  
**Παρατηρείται ότι το γεωλικό είναι κορίως σχετικά υψηλής αντοχής σχεδόν σε όλο το βάθος του συγκεκριμένου κομματιού του συγκεκριμένου τμήματος.**

Από τη δοκιμή σε ανεμπόδιστη θλίψη UCS και από το προσδιορισμό του δείκτη GSI κάνοντας εφαρμογή του κριτηρίου Hoek-Brown για το προσδιορισμό αντοχής της βραχώμαζας  $\sigma_{cm}$ , από τις μέσες τιμές των παραπάνω μεγεθών προκύπτει ότι για αυτό το κομμάτι της σήραγγας, κάνοντας χρήση του προγράμματος Rocklab, η αντοχή της βραχώμαζας εκτιμάται στα  $\sigma_{cm} = 5.71$  MPa, η οποία είναι σχετικά χαμηλή έως μέτρια αντικατοπτρίζοντας την εν γένει μέτρια ποιότητα της βραχώμαζας, ενώ παρατηρείται αύξηση της αντοχής σε σχέση με το προηγούμενο κομμάτι, πράγμα αναμενόμενο αφού βελτιώνεται η ποιότητα της βραχώμαζας καθώς απομακρύνεται το μέτωπο από της πλησίον στην επιφάνεια αποσαθρωμένες και ασθενείς ζώνες. Τα πλήρη στοιχεία που προκύπτουν από το πρόγραμμα Rocklab και τα εισαγωγικά δεδομένα παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β.

Στη συνέχεια εξετάζεται το δεύτερο τμήμα από τη Χ.Θ. 1+300 έως τη Χ.Θ. 2+150. Οι γεωτρήσεις οι οποίες πραγματοποιήθηκαν εντός του συγκεκριμένου τμήματος είναι οι T10P032, T10P033, T10P034, T10P006, T10P035, T10P036, T10P037, T10H038, T10P007, T10R039 και T10P040. Η οριοθέτηση του παρόντος κομματιού από το προηγούμενο έγινε με βάση της εύρεσης έντονα καταπονημένων γεωλογικά σχηματισμών κυρίως στη γεώτρηση T10P032, οι οποίοι κάνουν την εμφάνισή τους και σε άλλες γεωτρήσεις. Αμελώντας προς στιγμήν την ύπαρξη αυτών των σχηματισμών, οι οποίοι σχηματίζουν ζώνες χαμηλής αντοχής και κακής ποιότητας βραχώμαζα, εν γένει στους υπόλοιπους βραχώδεις σχηματισμούς που αναπτύσσονται, η ποιότητα της βραχώμαζας στο βάθος εκσκαφής του μετώπου της σήραγγας και στο περιβάλλον αυτής είναι βραχώμαζα σχετικά καλής ποιότητας σχηματισμών κυρίως μετριώς ισχυρών έως ισχυρών με ελαφρύ έως μέτριο βαθμό αποσάθρωσης. Βάσει των πληροφοριών που έχουν προκύψει από τις υφιστάμενες γεωτρήσεις ακολουθεί ποσοτική περιγραφή των παραπάνω.

Όπως και το προηγούμενο τμήμα θα το διαιρέσουμε σε δύο υπό-τμήματα προκειμένου να διευκολυνθεί η εξέταση και η ανάλυση των αποτελεσμάτων για το κομμάτι του άξονα της σήραγγας από τη Χ.Θ. 1+300 έως 2+150. Το πρώτο αυτό υπό-τμήμα θα περιλαμβάνει τις γεωτρήσεις T10P032, T10P033, T10P034 και T10P006. Από τα γεωυλικά που προέκυψαν από τις συγκεκριμένες γεωτρήσεις αρχικά εξετάζεται ο Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής (GSI), ο οποίος εκτιμάται ότι κυμαίνεται εντός ενός εύρους από 12 έως 68. Στην αρχή του τμήματος, το οποίο τέθηκε ως Χ.Θ. 1+300-2+150Α περί τη χιλιομετρική θέση 1+300 έως 1+640, η ποιότητα της βραχώμαζας είναι σχετικά χαμηλή όπως υποδεικνύει και το GSI που εκτιμήθηκε από τη γεώτρηση T10P032 στο βάθος του μετώπου εκσκαφής. Οι σχηματισμοί που προκύπτουν είναι από τεμαχισμένοι (blocky) έως κερματισμένοι/διαταραγμένοι (blocky/disturbed) με επιφάνειες ασυνεχειών ποιότητας μέτριας (fair) έως πτωχής (poor). Στα ανώτερα στρώματα οι σχηματισμοί εκτιμάται ότι θα είναι μέτρια ισχυροί, με πλήρως αποσαθρωμένους σχηματισμούς στα ανώτερα στρώματα και ελαφριά αποσαθρωμένους με το βάθος. Το GSI αυτών των σχηματισμών κυμαίνεται από 20 έως 30 στους πλησίον των επιφανειακών στρωμάτων αυξανόμενο με το βάθος από 35 έως 45. Πάνω από τον άξονα της σήραγγας ο σχηματισμός των Πρασινοσχιστολίθων ο Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής εκτιμάται από 60 έως 65 με τους σχηματισμούς αυτούς μάλιστα να αναμένονται και στο μέτωπο εκσκαφής στο συγκεκριμένο κομμάτι. Αναμένονται δηλαδή σχηματισμοί σχετικά καλής ποιότητας βραχώμαζας, μέτρια ισχυροί έως ισχυροί, τεμαχισμένοι με τραχείες έως εξαλλοιωμένες επιφάνειες ασυνεχειών, ελαφριά έως μέτρια αποσαθρωμένες. Παρόλα αυτά στην αρχή του συγκεκριμένου υπό-τμήματος και περί τη χιλιομετρική θέση 1+335 το μέτωπο εκσκαφής αναμένεται να συναντήσει σχηματισμούς μέτρια ισχυρούς κερματισμένους/διαταραγμένους, με πυκνά συστήματα ασυνεχειών και επιφάνειες πτωχής ποιότητας, οξειδωμένες. Αυτού του διαταραγμένου στρώματος πολύ κοντά στον άξονα της σήραγγας εμφανίζονται από τη γεώτρηση ζώνες διαμήσεως πάχους 0.40 και 2.10m πάνω και κάτω από αυτόν αντίστοιχα. Το GSI αυτών κυμαίνεται από 12 έως 16 κάνοντας αισθητή ποσοτικά τη διατημένη και πτωχή ποιότητα του γεωυλικού. Στο ακόλουθο σχήμα 4.3.34 παρουσιάζεται ποιες περιοχές καλύπτει το εύρος του Γεωλογικού Δείκτη Αντοχής στους παραπάνω σχηματισμούς. Στα σχήματα 4.3.35 και 4.3.36 παρουσιάζεται η ποσοστιαία κατανομή των τιμών του GSI.

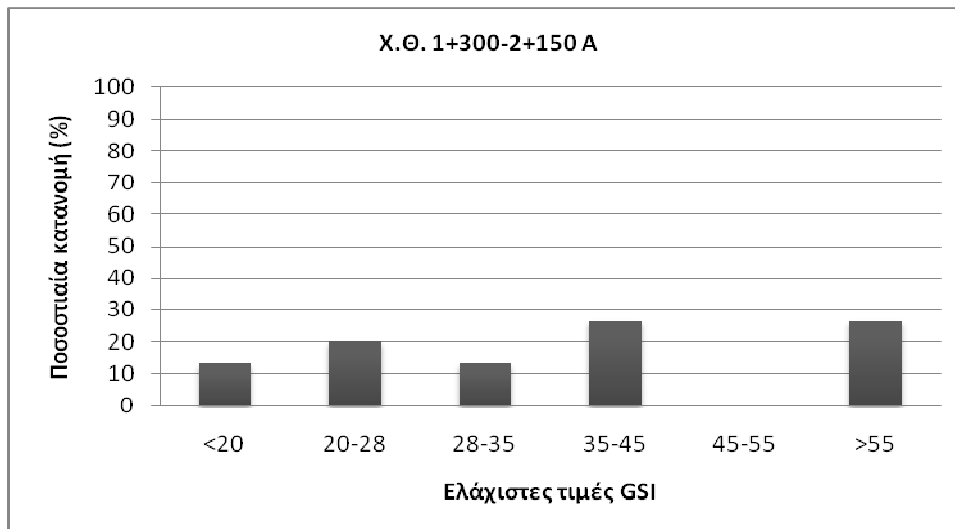
**GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000)**

From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.

STRUCTURE	SURFACE CONDITIONS	VERY GOOD Very rough, fresh, unweathered surfaces	GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	FAIR Smooth, moderately weathered and stained surfaces	POOR Sticksided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments	VERY POOR Sticksided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
 INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES ↓	90			N/A	N/A
 BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets		80	70			
 VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets			60	50		
 BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity				40	30	
 DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces					20	
 LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes		N/A	N/A			10

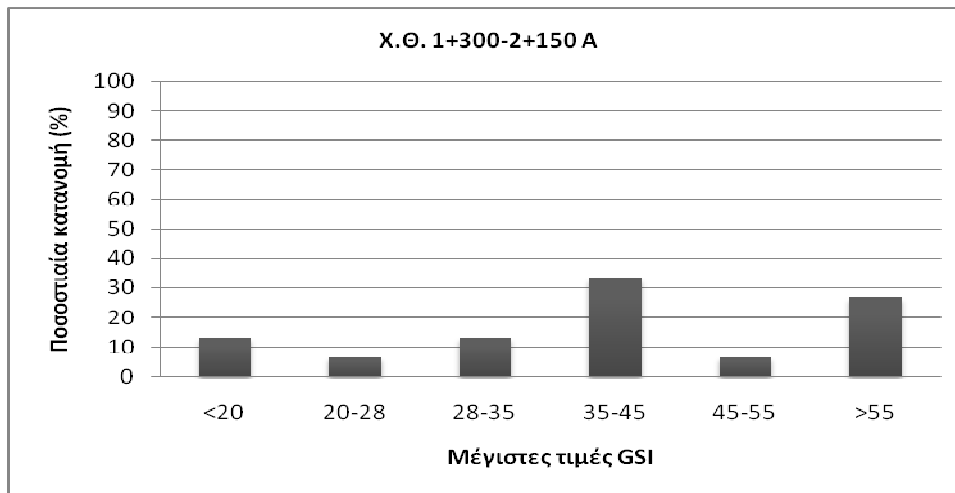
Σχήμα 4.3.34

Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής (GSI) του πρώτου κομματιού του τμήματος με Χ.Θ. 1+300-2+150 Α. Στη περιοχή του μετώπου αναμένονται συνθήκες τεμαχισμένης βραχώμαζας μέτρια ισχυρής έως ισχυρής με το μέτωπο στην αρχή του κομματιού να συναντά κερματισμένη/διαταραγμένη βραχώμαζα χαμηλής ποιότητας. Οι πολύ χαμηλές τιμές GSI (GSI<20) αναφέρονται σε ζώνες διατμήσεως που εντοπίστηκαν κατά την εκτέλεση των γεωτρήσεων.



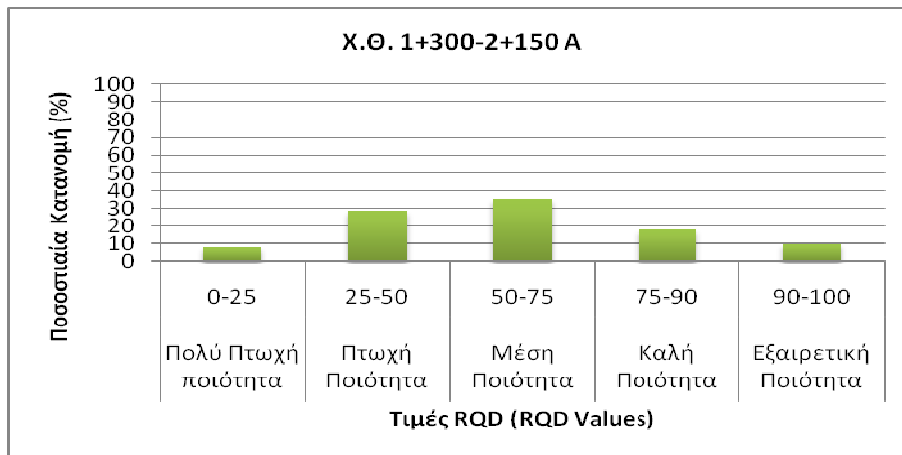
Σχήμα 4.3.35

Ποσοστιαία κατανομή των ελάχιστων τιμών του Γεωλογικού Δείκτη Αντοχής (GSI) του τμήματος με Χ.Θ. 1+300-2+150 Α.



**Σχήμα 4.3.36**  
**Ποσοστιαία κατανομή των μέγιστων τιμών**  
**του Γεωλογικού Δείκτη Αντοχής (GSI) του τμήματος με Χ.Θ. 1+300-2+150 Α.**

Εν συνεχεία εξετάζονται οι πυρήνες που ελήφθησαν από τις παραπάνω γεωτρήσεις. Από τους πυρήνες αυτούς προσδιορίστηκαν οι τιμές RQD από τα γεωλικά τα οποία εκσκάφηκαν. Οι τιμές RQD κυμαίνονται εντός ενός εύρους από 6 έως 100 παρατηρώντας το σύνολο των συγκεκριμένων γεωτρήσεων σε όλο τους το βάθος τους. Στο βάθος εκσκαφής του μετώπου παρατηρούνται στο αρχικό κομμάτι του υπό-τμήματος, όπου το μέτωπο εκσκαφής συναντά τις ζώνες διατμήσεως και το τεμαχισμένο/διαταραγμένο Πρασινοσχιστόλιθο, ιδιαίτερα χαμηλές τιμές RQD οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ 6 έως 8, δηλαδή κατά τη σχετική βαθμονόμηση της βραχόμαζας επί τόπου αναμένονται σχηματισμοί πολύ πτωχής ποιότητας. Οι τιμές του RQD επαληθεύουν συνεπώς και τη βαθμονόμηση της βραχόμαζας κατά GSI στο συγκεκριμένο κομμάτι περί τη χιλιομετρική θέση 1+335 ενώ κατά τη προχώρηση του μετώπου ο δείκτης RQD βελτιώνεται σημαντικά και αποκτά μεγαλύτερες τιμές που κυμαίνονται κυρίως από 50 έως 80, οι οποίες αντιπροσωπεύουν μέσης έως καλής ποιότητας βραχόμαζα. Μικρές τιμές RQD εμφανίζονται σε ζώνες όπου το γεωλικό είναι κερματισμένο ή/και αποσαθρωμένο, σε ζώνες δηλαδή μειωμένης αντοχής, όπως έχει φανεί από τις γεωτρήσεις που εκτελέστηκαν. Στο σχήμα 4.3.37 που ακολουθεί παρουσιάζεται το πώς κατανέμεται ο δείκτης RQD στο σύνολο των σχηματισμών καθ' όλο το βάθος για το συγκεκριμένο κομμάτι.



**Σχήμα 4.3.37**

**Τιμές RQD του τμήματος με Χ.Θ. 1+300-2+150 Α.**

**Παρατηρείται ότι οι επικρατούντες σχηματισμοί είναι βραχόμαζα πτωχής έως κυρίως μέσης ποιότητας στο σύνολο αυτών με τους μέσης έως καλής ποιότητας σχηματισμούς να εμφανίζονται στο βάθος του μετώπου εκσκαφής (με εξαίρεση το αρχικό κομμάτι όπου εμφανίζονται ζώνες διατμήσεως).**

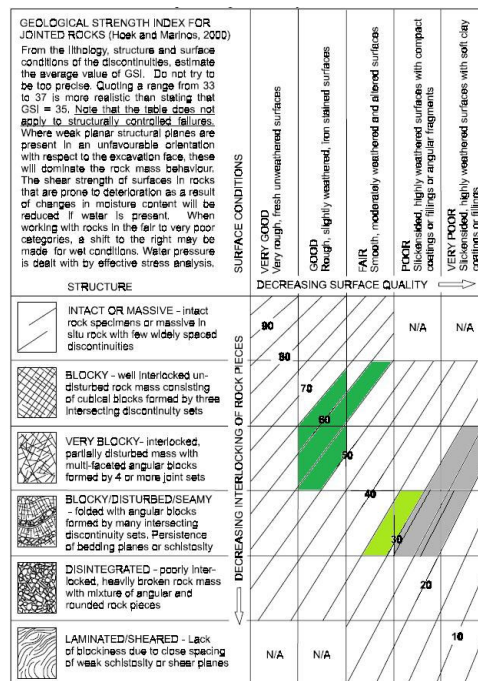
Στις γεωτρήσεις που εξετάστηκαν για το συγκεκριμένο κομμάτι της σήραγγας ενδεχομένως δε πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε ανεμπόδιση θλίψη καθώς υπάρχει απουσία της συγκεκριμένης πληροφορίας από τη βάση δεδομένων αυτών. Εκτιμάται παρόλα αυτά ότι στην αρχή του τμήματος, όπου εμφανίζονται οι πτωχής ποιότητας σχηματισμοί βραχόμαζας, οι αντοχές αυτών θα είναι ιδιαίτερα χαμηλές με την αντοχή να αυξάνει με τη προχώρηση του μετώπου, όπου έχουμε βελτίωση της ποιότητας αυτής.

Στο δεύτερο υπό-τμήμα του υπό εξέταση τμήματος, το οποίο τέθηκε ως Χ.Θ.1+300-2+150B, από τη χιλιομετρική θέση 1+640 έως τη χιλιομετρική θέση 2+150, περιλαμβάνονται οι γεωτρήσεις T10P035, T10P036, T10P037, T10H038, T10P007, T10R039 και T10P040. Από τα υλικά που εκσκάφθηκαν από τις παραπάνω γεωτρήσεις, όπως και στα προηγούμενα τμήματα, εξετάζονται ο Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής (GSI), οι πυρήνες που ελήφθησαν όπου μετρήθηκε ο δείκτης RQD και η αντοχή σε δοκιμή μονοαξονικής ανεμπόδιστης θλίψης (UCS).

Το GSI, στο παρόν υπό-τμήμα, εκτιμάται ότι κυμαίνεται μεταξύ ενός εύρους από τη τιμή 20 έως 65. Οι αναπτυσσόμενοι σχηματισμοί στο αρχικό κομμάτι του τμήματος, περί τη χιλιομετρική θέση 1+760, στο βάθος του μετώπου εκσκαφής αναμένεται να κυμαίνονται στη πλειοψηφία τους από 55 έως 60. Η υψηλή αυτή τιμή του GSI υποδεικνύει μια καλής ποιότητας βραχόμαζα. Οι βραχώδεις σχηματισμοί αναμένεται να είναι τεμαχισμένοι έως πολύ τεμαχισμένοι (blocky/very blocky), μέτρια ισχυροί έως ισχυροί με λεπτή σχιστότητα, με κατάσταση επιφάνειας ασυνεχειών μέτρια έως καλή (fair/good) τραχείες έως ομαλές με οξείδια. Παρόλα αυτά εντός του εύρους του μετώπου εμφανίζεται και μια ζώνη αδυναμίας της βραχόμαζας όπου ο αναπτυσσόμενος σχηματισμός παρουσιάζεται κερματισμένος/διαταραγμένος (blocky/disturbed) με επιφάνεια ασυνεχειών μέτρια έως πτωχή (fair/poor) και το GSI κυμαίνεται από 30 έως 35. Προχωρώντας το μέτωπο εκσκαφής αναμένεται να συναντήσει επίσης σχετικά κακής ποιότητας βραχόμαζα στο σύνολο της, από τη χιλιομετρική θέση 1+800 έως τη χιλιομετρική θέση 1+900. Οι σχηματισμοί που αναπτύσσονται εμφανίζονται πολύ τεμαχισμένοι (very blocky), μέτρια ισχυροί με λεπτή σχιστότητα και μέτρια αποσαθρωμένοι με μέτρια έως πτωχή (fair/poor) ποιότητα ασυνεχειών. Με το βάθος η ποιότητα της βραχόμαζας αναμένεται να μειώνεται η ποιότητα της, όπως έδειξε η γεώτρηση T10P036. Η βραχόμαζα εμφανίζεται κερματισμένη/διαταραγμένη (blocky/disturbed), ασθενής έως μέτρια ασθενής, έντονα τεκτονισμένη με πτωχή έως πολύ πτωχή (poor/very poor) επιφάνεια ασυνεχειών, οι οποίες πληρώνονται με υλικό που προέρχεται από την αποσάθρωση του σχηματισμού και παρουσιάζουν οξείδωση. Το GSI στις ζώνες αυτές του μετώπου παρουσιάζεται σημαντικά μειωμένο και κυμαίνεται από 38 έως 42

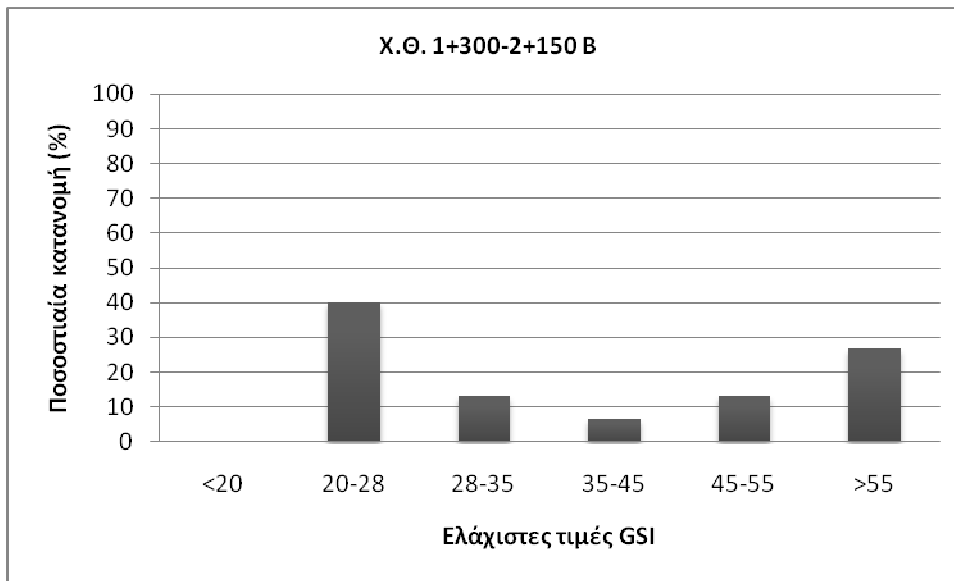


και στην έντονα καταπονημένη τεκτονικά ζώνη από 24 έως 28. Στα κατώτερα σημεία του μετώπου η ποιότητα της βραχώμαζας αναμένεται να βελτιώνεται σημαντικά. Οι σχηματισμοί που αναπτύσσονται είναι ισχυροί έως πολύ ισχυροί, με λεπτή έως μέση σχιστότητα, τεμαχισμένοι (blocky) με καλή (good) κατάσταση επιφάνειας ασυνεχειών. Οι τιμές του GSI κυμαίνονται από 60 έως 65. Προχωρώντας το μέτωπο αναμένεται να συναντήσει βραχώδεις σχηματισμούς μέτρια ισχυρούς με πυκνά συστήματα τραχειών ασυνεχειών, πολύ τεμαχισμένους έως τεμαχισμένους (very blocky/blocky) ελαφρά αποσαθρωμένους, με καλή (good) επιφάνεια ασυνεχειών, με εμφάνιση μεμονωμένων ζωνών κερματισμού και έντονης αποσάθρωσης. Οι τιμές GSI εκτιμώνται από 50 έως 65. Οι βραχώδεις σχηματισμοί που αναμένονται προς το τέλος του τμήματος, από τη χιλιομετρική θέση 2+070 έως περίπου τη χιλιομετρική θέση 2+150, εκτιμάται ότι θα απαρτίζονται από δυο κατηγορίες ποιότητας βραχώμαζας. Στα ανώτερα τμήματα του μετώπου η βραχώμαζα αναμένεται να είναι ασθενής πολύ αποσαθρωμένη (ο άξονας της σήραγγας πλησιάζει τα ανώτερα στρώματα του υπεδάφους όπου οι συνθήκες αποσάθρωσης γίνονται πιο έντονες), τεμαχισμένη (blocky) με πτωχή έως πολύ πτωχή ποιότητα (poor/very poor) ασυνεχειών με τις τιμές του GSI να είναι μειωμένες κυμαινόμενες από 20 έως 30. Στα κατώτερα τμήματα του μετώπου εκσκαφής αναμένεται πιο καλής ποιότητας βραχώμαζα, μέτρια ισχυρή και ελαφρά αποσαθρωμένη, πολύ τεμαχισμένη (very blocky) με καλής (good) ποιότητας επιφάνειες συνεχειών με τις τιμές GSI να κυμαίνονται από 50 έως 55. Στο ακόλουθο σχήμα 4.3.38 παρουσιάζεται ποιες περιοχές καλύπτει το εύρος του Γεωλογικού Δείκτη Αντοχής στους παραπάνω σχηματισμούς ενώ στα σχήματα 4.3.39 και 4.3.40 παρουσιάζεται η ποσοστιαία κατανομή των τιμών αυτού.

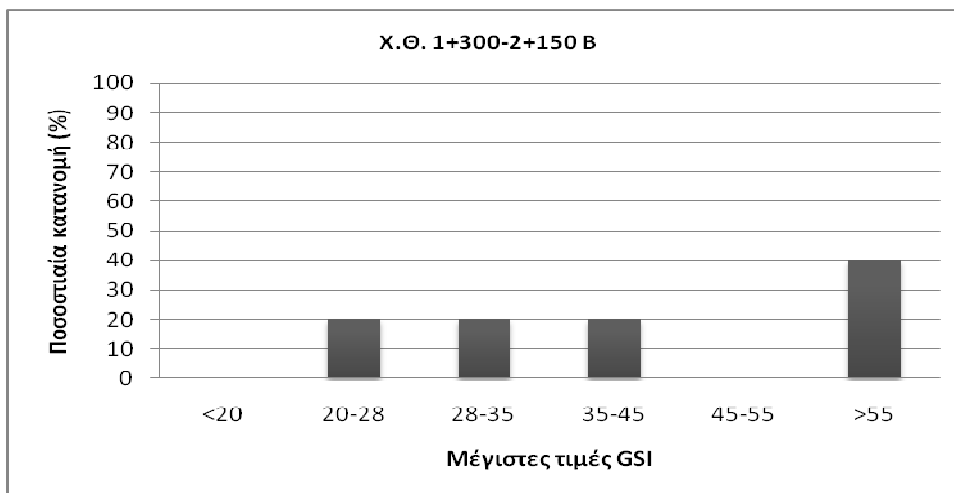


Σχήμα 4.3.38

**Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής (GSI) του δευτέρου κομματιού του τμήματος με Χ.Θ. 1+300-2+150 Β. Παρατηρείται ότι εμφανίζονται σχηματισμοί σχετικά καλής έως κακής ποιότητας βραχώμαζας, οι οποίες εκτιμάται να παρουσιάζονται και ταυτόχρονα στο μέτωπο κατά την εκσκαφή της σήραγγας.**



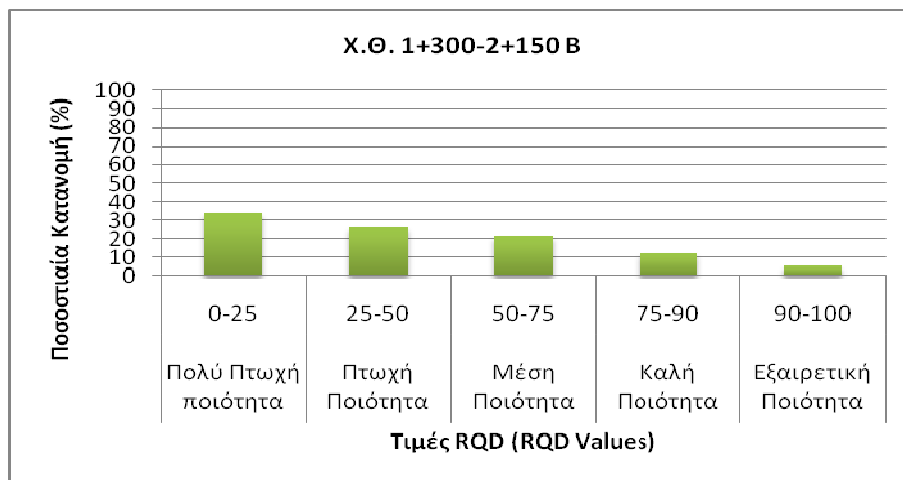
**Σχήμα 4.3.39**  
**Ποσοστιαία κατανομή των ελάχιστων τιμών**  
**του Γεωλογικού Δείκτη Αντοχής (GSI) του τμήματος με Χ.Θ. 1+300-2+150 Β.**



**Σχήμα 4.3.40**  
**Ποσοστιαία κατανομή των μέγιστων τιμών**  
**του Γεωλογικού Δείκτη Αντοχής (GSI) του τμήματος με Χ.Θ. 1+300-2+150 Β.**

Εν συνεχεία εξετάζονται οι πυρήνες που ελήφθησαν από τις παραπάνω γεωτρήσεις. Από τους πυρήνες αυτούς προσδιορίστηκαν οι τιμές RQD από τα γεωυλικά τα οποία εκσκάφηκαν. Οι τιμές RQD κυμαίνονται εντός ενός εύρους από 6 έως 100 παρατηρώντας το σύνολο των συγκεκριμένων γεωτρήσεων σε όλο τους το βάθος τους. Στο βάθος εκσκαφής του μετώπου παρατηρούνται στο αρχικό κομμάτι του υπό-τμήματος, όπου το μέτωπο εκσκαφής συναντά τις ζώνες διατμήσεως και το τεμαχισμένο/διαταραγμένο Πρασινοσχιστόλιθο, ιδιαίτερα χαμηλές τιμές RQD οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ 6 έως 8, δηλαδή κατά τη σχετική βαθμονόμηση της βραχώμαζας επί τόπου αναμένονται σχηματισμοί πολύ πτωχής ποιότητας. Οι τιμές του RQD επαληθεύουν συνεπώς και τη βαθμονόμηση της βραχώμαζας κατά GSI στο συγκεκριμένο κομμάτι περί τη χιλιομετρική θέση 1+335 ενώ κατά τη προχώρηση του μετώπου ο δείκτης RQD βελτιώνεται σημαντικά και αποκτά μεγαλύτερες τιμές που κυμαίνονται κυρίως από 50 έως 80, οι οποίες αντιπροσωπεύουν μέσης έως καλής ποιότητας βραχώμαζα. Μικρές τιμές RQD εμφανίζονται σε ζώνες όπου το γεωυλικό είναι κερματισμένο ή/και αποσασθρωμένο, σε ζώνες δηλαδή μειωμένης αντοχής, όπως έχει φανεί

από τις γεωτρήσεις που εκτελέστηκαν. Στο σχήμα 4.3.41 που ακολουθεί παρουσιάζεται το πώς κατανέμεται ο δείκτης RQD στο σύνολο των σχηματισμών καθ' όλο το βάθος για το συγκεκριμένο κομμάτι.

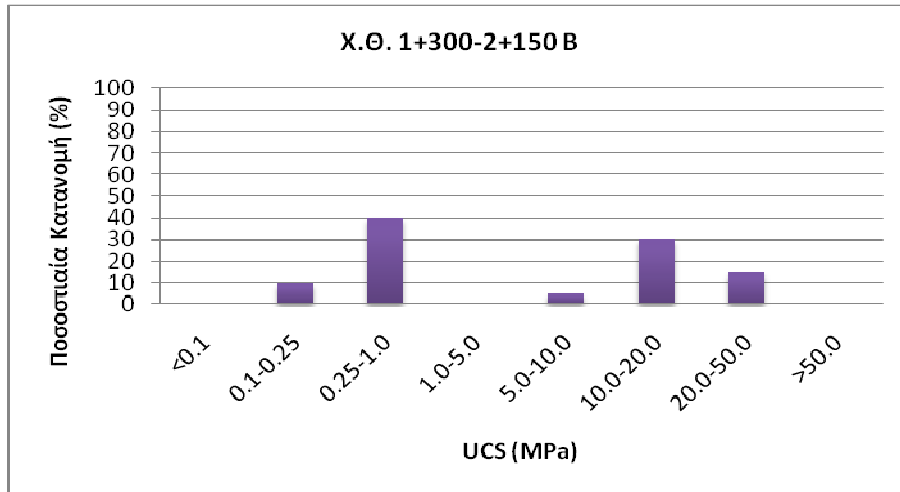


**Σχήμα 4.3.41**

**Τιμές RQD του τμήματος με X.Θ. 1+300-2+150 B.**

*Παρατηρείται ότι οι επικρατούντες σχηματισμοί είναι βραχώμαζα πολύ πτωχής έως μέσης ποιότητας στο σύνολο αυτών με τους μέσης έως καλής ποιότητας σχηματισμούς να εμφανίζονται στο βάθος του μετώπου εκσκαφής όσο αυτό προχωράει προς το τέλος του τμήματος και τους πολύ πτωχής σε ζώνες αδυναμίας της βραχώμαζας.*

Εν συνεχεία εξετάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη δοκιμή σε ανεμπόδιστη θλίψη δοκιμίων, τα οποία μορφώθηκαν από τα γεωυλικά των γεωτρήσεων. Δοκιμές δεν έγιναν στα γεωυλικά όλων των γεωτρήσεων αλλά τα αποτελέσματα περιορίζονται εντός του τμήματος το οποίο περιλαμβάνει τις γεωτρήσεις T10P035, T10P036 και T10P037. Οι αντοχές σε ανεμπόδιστη θλίψη (UCS) της βραχώμαζας προσδιορίστηκε ότι κυμαίνονται από 0.150 MPa έως 46 MPa για το σύνολο των σχηματισμών. Χαρακτηριστικό των γεωυλικών αποτελεί η βελτίωση της ποιότητας τους με το βάθος. Τα γεωυλικά στα ανώτερα στρώματα διαθέτουν ιδιαίτερα μικρές αντοχές UCS ενώ η βραχώμαζα σε βάθος αποκτάει μεγάλες αντοχές. Ιδιαίτερα στο βάθος του μετώπου εκσκαφής η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη εκτιμάται ότι κυμαίνεται εντός ενός εύρους των 9 MPa έως 16 MPa, δηλαδή σχηματισμών μέτριας έως καλής αντοχής. Οι χαμηλές τιμές που προέκυψαν από τις δοκιμές εμφανίζονται, όπως προαναφέρθηκε, στα ανώτερα στρώματα του υπεδάφους όπου παρατηρούνται πιο ασθενείς σχηματισμοί, οι οποίοι κατά συνέπεια έχουν και μικρότερη αντοχή. Παρακάτω στο σχήμα 4.3.42 παρουσιάζεται η κατανομή των αντοχών στο σύνολο των σχηματισμών σε δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης.



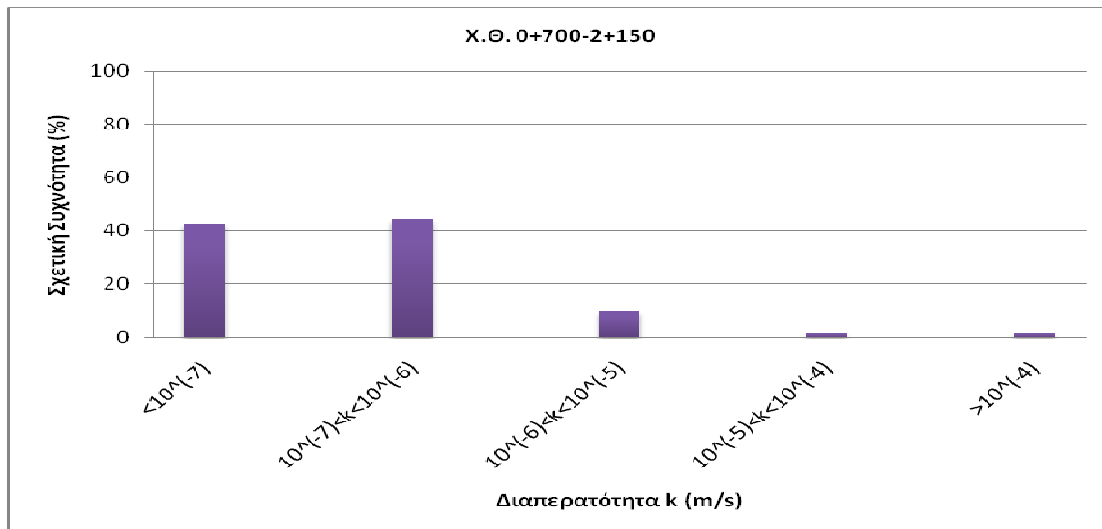
**Σχήμα 4.3.42**

**Τιμές UCS του τμήματος Χ.Θ. 1+300-2+150 Β.**

**Παρατηρείται ότι στα γεωλικά κυριαρχούν τόσο σχηματισμοί υψηλής αντοχής όσο και χαμηλής. Η διαφορά έγκειται κυρίως στη διαφορά της φύσης των υλικών και του βάθους όπου αυτοί επικρατούν.**

Από τη δοκιμή σε ανεμπόδιστη θλίψη UCS και από το προσδιορισμό του δείκτη GSI με την εφαρμογή του κριτηρίου Hoek-Brown για το προσδιορισμό αντοχής της βραχώμαζας  $\sigma_{cm}$ , από τις μέσες τιμές των παραπάνω μεγεθών προκύπτει ότι για αυτό το κομμάτι της σήραγγας, κάνοντας χρήση του προγράμματος Rocklab, η αντοχή της βραχώμαζας εκτιμάται στα  $\sigma_{cm} = 1.40$  MPa, η οποία είναι σχετικά χαμηλή αντικατοπτρίζοντας την εν γένει χαμηλή ποιότητα της βραχώμαζας, όπως παρουσιάζεται και από τα παραπάνω στοιχεία. Τα πλήρη στοιχεία που προκύπτουν από το πρόγραμμα Rocklab και τα εισαγωγικά δεδομένα παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β.

Σε ότι αφορά την υδατοπερατότητα των Πρασινοσχιστόλιθων στο σύνολο του τμήματος, όπου επικρατεί η Ενότητα του Χορτιάτη, οι βραχώδεις σχηματισμοί που αναπτύσσονται εμφανίζονται ότι διαθέτουν πολύ μικρή διαπερατότητα. Πιο συγκεκριμένα από τις δοκιμές διαπερατότητας που πραγματοποιήθηκαν, μεταβλητού (πίπτοντος) και σταθερού υδραυλικού φορτίου, οι τιμές διαπερατότητας που προσδιορίστηκαν βρίσκονται εντός ενός εύρους το οποίο κυμαίνεται από  $k=10^{-9}$  m/s έως  $k=10^{-5}$  m/s. Το συγκεκριμένο εύρος τιμών είναι αρκετά μεγάλο καθώς η διαπερατότητα διαφέρει κατά τάξης μεγέθους. Ιδιαίτερα για το βάθος του μετώπου εκσκαφής καθώς και του περιβάλλοντος της σήραγγας, όπου ενδιαφέρει περισσότερο η δυνατότητα και ευκολία της διέλευσης υπόγειων υδάτων, η υδατοπερατότητα των σχηματισμών κυμαίνεται κυρίως από  $k=2.5 \cdot 10^{-8}$  m/s έως  $k=3 \cdot 10^{-7}$  m/s σε όλο το μήκος του τμήματος από τη χιλιομετρική θέση 0+700 έως τη χιλιομετρική θέση 2+150, όπου πρακτικά πρόκειται για στεγανά γεωλικά τα οποία δεν αναμένεται να προκαλέσουν προβλήματα λόγω εισροής υδάτων. Επίσης παρατηρείται ότι ακόμα και ο κατά τόπους έντονος κερματισμός της βραχώμαζας λόγω του υλικού πληρώσεως, το οποίο προέρχεται από την αποσάθρωση των σχηματισμών, δε προκαλεί προβλήματα σε ότι αφορά τη διαπερατότητα. Η κατανομή της υδατοπερατότητας των σχηματισμών στο σύνολο τους παρουσιάζεται στο σχήμα 4.3.43 που ακολουθεί.



**Σχήμα 4.3.43**

**Κατανομή των τιμών υδατοπερατότητας του τμήματος με X.Θ. 0+700-2+150.**

*Η υδατοπερατότητα των σχηματισμών είναι ιδιαίτερα περιορισμένη με τις επικρατούσες τιμές να είναι μικρότερες από  $k=10^{-6}$  m/s και με σημαντικό ποσοστό μικρότερο από  $k=10^{-7}$  m/s.*

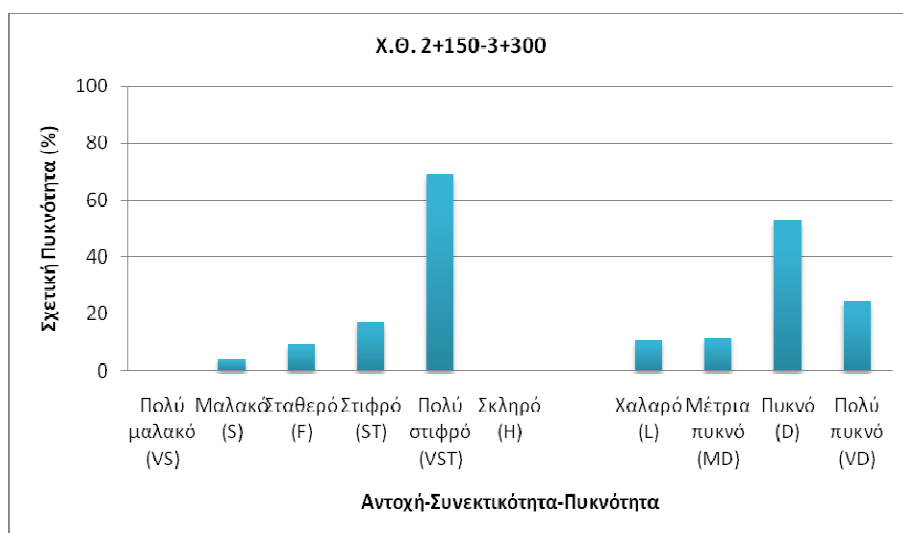
- **Τμήμα X.Θ. 2+150 έως 3+300**

Το παρόν τμήμα της σήραγγας περιλαμβάνει το σταθμό Παύλου Μελά, το σταθμό Σταυρούπολη και το ενδιάμεσο τμήμα της σήραγγας καθώς και τμήμα αυτής μεταξύ των σταθμών Σταυρουπόλεως και Πολίχνης. Ο άξονας της σήραγγας συνεχίζει και διέρχεται κάτω από τον οδικό άξονα της Λεωφόρου Λαγκαδά σε όλο το μήκος του τμήματος. Η οριοθέτηση του συγκεκριμένου τμήματος πραγματοποιήθηκε με κριτήριο την αλλαγή των γεωλογικών συνθηκών στο περιβάλλον της σήραγγας καθώς η εκσκαφή μεταβαίνει από το βραχώδη σχηματισμό της Ενότητας του Χορτιάτη στην ενότητα των Νεογενών Αποθέσεων (Σειρά Ερυθρών Αργίλων). Το πάχος των υπερκειμένων στο συγκεκριμένο τμήμα της σήραγγας κυμαίνεται μεταξύ των 14m έως 16m.

Οι εδαφικοί σχηματισμοί οι οποίοι αναπτύσσονται όπως προαναφέρθηκε ανήκουν στη Σειρά των Ερυθρών Αργίλων στο βάθος του μετώπου εκσκαφής της σήραγγας. Των Νεογενών Αποθέσεων υπέρκειται τόσο η γεωλογική ενότητα των Τεταρτογενών Αποθέσεων όσο και οι Τεχνητές Επιχώσεις. Πιο συγκεκριμένα από τη χιλιομετρική θέση 2+150 έως τη χιλιομετρική θέση 2+800 υπέρκειται της Σειράς των Ερυθρών Αργίλων κυρίως η ενότητα των Τεταρτογενών Αποθέσεων με πάχος το οποίο εκτιμάται ότι κυμαίνεται από 5m έως 20m, με τις Τεχνητές Επιχώσεις όπου εμφανίζονται να έχουν πάχος από 0 έως 2m. Από τη χιλιομετρική θέση 2+800 έως και τη χιλιομετρική θέση 3+000 αναμένεται ότι των Νεογενών Αποθέσεων θα υπέρκειται Τεχνητές Επιχώσεις με εκτιμώμενο πάχος από 0 έως 2m ενώ από τη X.Θ. 3+000 έως τη X.Θ. 3+300 των Νεογενών Αποθέσεων αναμένεται να υπέρκειται τόσο οι Τεταρτογενείς Αποθέσεις, με πάχος που εκτιμάται μεταξύ 1m έως 9m, όσο και Τεχνητές Επιχώσεις, με εκτιμώμενο πάχος από 1 έως 4m.

Εντός του εξεταζόμενου τμήματος οι γεωτρήσεις οι οποίες έχουν πραγματοποιηθεί είναι οι T10P040, T10P008, T10P041, T10P042, T10P009, T10P043, T10P044, T10R045, T10H010, T10P046, T10P011, T10H047, T10P048, T10P049 και T10P012. Από τις γεωτρήσεις αυτές εκτιμάται ότι στο συγκεκριμένο κομμάτι της Σειράς των Ερυθρών Αργίλων θα παρουσιαστούν τόσο λεπτόκοκκοι σχηματισμοί, αργλικής κυρίως φύσης, όσο και αδρόκοκκοι σχηματισμοί, αμμώδους έως χαλικώδους φύσης, σε εναλλαγές. Οι Τεταρτογενείς Αποθέσεις, οι οποίες υπέρκειται των Νεογενών όπου εμφανίζονται συνθέτονται τόσο από λεπτόκοκκους όσο και από αδρόκοκκους σχηματισμούς, με τους τελευταίους να εκτιμάται ότι επικρατούν έναντι των λεπτόκοκκων γεωυλικών. Οι λεπτόκοκκοι σχηματισμοί εκτιμάται ότι συνθέτονται κυρίως από Άργιλο έως Αμμώδη Άργιλο με χάλικες ενώ πρόκειται κυρίως για

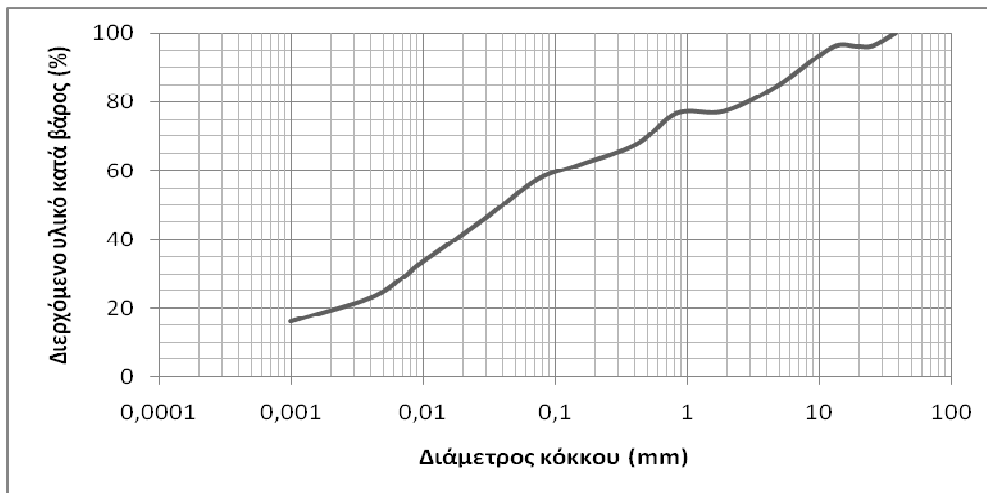
σταθερούς έως στιφρούς σχηματισμούς με μαλακότερους εξ αυτών να εμφανίζονται κυρίως στα επιφανειακά, εδαφικά στρώματα. Οι αδρόκοκκοι σχηματισμοί αναμένεται να συνθέτονται κυρίως από Αργιλώδη Άμμο με χάλικες έως κατά τόπους Ιλυώδη Άμμο με χάλικες και Χάλικες με παρουσία λεπτόκοκκων γεωλικών όπως ιλύ και άργιλο δημιουργώντας σχηματισμούς όπως Ιλυώδεις Χάλικες με άμμο ή Αργιλώδεις Χάλικες. Σε ότι αφορά τις Νεογενείς Αποθέσεις, οι οποίες συγκεντρώνουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον καθώς το μέτωπο εκσκαφής αναμένεται να συναντήσει εξ ολοκλήρου το συγκεκριμένο σχηματισμό, εκτιμάται ότι θα απαρτίζονται τόσο από αδρόκοκκα γεωλικά όσο και λεπτόκοκκα, όπως ήδη προαναφέρθηκε. Η φύση των λεπτόκοκκων γεωλικών συνθέεται κυρίως από αργιλικής φύσης υλικά όπως Αμμώδη Άργιλο, με εμφάνιση ενίοτε χαλικών, έως Άργιλο με άμμο, με ή χωρίς την εμφάνιση χαλικών, ενώ οι λεπτόκοκκοι αυτοί σχηματισμοί χαρακτηρίζονται κυρίως ως στιφροί έως πολύ στιφροί στο σύνολο τους. Η φύση των αδρόκοκκων γεωλικών συνθέεται από αμμώδεις και χαλικώδεις σχηματισμούς με παρουσία λεπτόκοκκων γεωλικών, όπως Αργιλώδη Άμμο με ή χωρίς χάλικες έως Αργιλώδεις ή Ιλυώδεις Χάλικες με ή χωρίς παρουσία άμμου. Οι αδρόκοκκοι σχηματισμοί στο σύνολο τους παρουσιάζονται πυκνοί έως κατά τόπους πολύ πυκνοί. Πέρα από τις εναλλαγές των παραπάνω γεωλικών στις γεωτρήσεις εμφανίζεται και κατά τόπους ένας σχηματισμός χαλικοπαγούς ισχυρά συγκολλημένο με αργιλοαμμώδους φύσης συνδετικό υλικό. Οι κατανομές της σχετικής πυκνότητας των γεωλικών φαίνεται στο σχήμα 4.3.44 που ακολουθεί.



**Σχήμα 4.3.44**

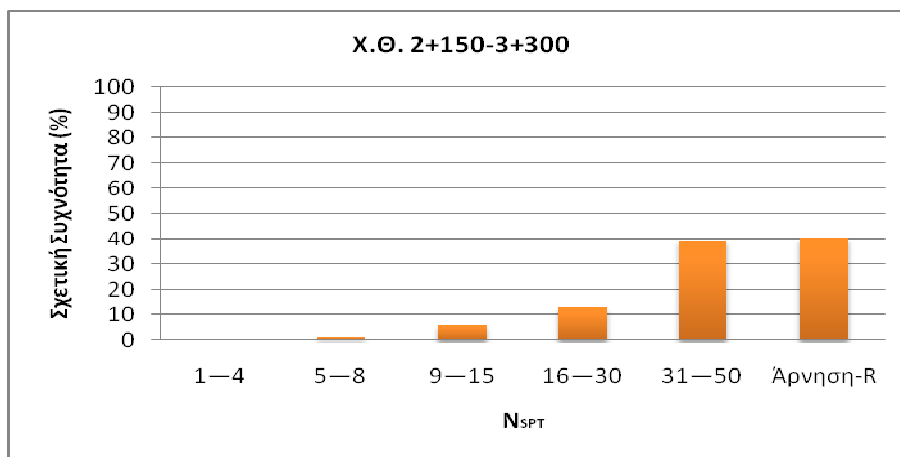
**Κατανομή της συνεκτικότητας και πυκνότητας των λεπτόκοκκων και αδρόκοκκων εδαφικών σχηματισμών με Χ.Θ. 2+150-3+300. Οι πιο χαλαροί σχηματισμοί είναι γεωλικά που εμφανίζονται στις Τεταρτογενείς Αποθέσεις. Οι στιφροί και πυκνοί σχηματισμοί είναι τα επικροτούμενα γεωλικά της Σειράς των Ερυθρών Αργίλων.**

Από τη κοκκομετρική ανάλυση των γεωλικών, που προέκυψαν από τις γεωτρήσεις στο βάθος εκσκαφής του μετώπου της σήραγγας, περίπου το 60% των εδαφικών σχηματισμών διέρχεται από το κόσκινο Νο200 συνεπώς το επικρατών γεωλικό είναι κυρίως λεπτόκοκκο όπως παρουσιάζεται και από τη κοκκομετρική καμπύλη στο σχήμα 4.3.45.



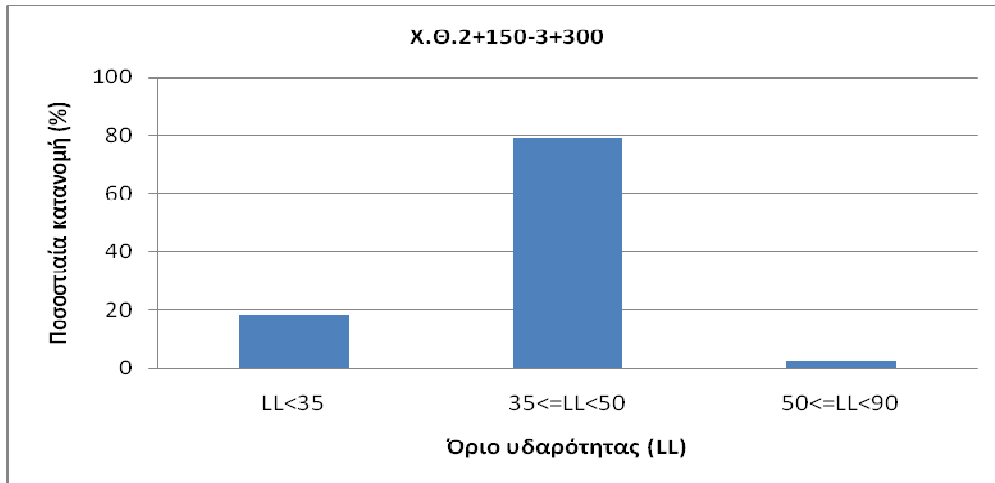
**Σχήμα 4.3.45**  
**Κοκκομετρική καμπύλη για τα γεωλικά από τη**  
**Χ.Θ. 2+150-3+300.**

Εν συνεχεία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν από τη πραγματοποίηση πρότυπων δοκιμών διείσδυσης (SPT) στις γεωτρήσεις που έγιναν εντός του συγκεκριμένου τμήματος. Οι χαμηλότερες τιμές που προέκυψαν από τις δοκιμές SPT συγκεντρώνονται στα ανώτερα στρώματα του υπεδάφους όπου βρίσκεται κυρίως η γεωλογική ενότητα των Τεταρτογενών Αποθέσεων, με αυτές να κυμαίνονται από 7 έως 17. Η Σειρά των Ερυθρών Αργίλων των Νεογενών Αποθέσεων, μέσα στην οποία γεωλογική ενότητα θα βρίσκεται και το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας, παρουσιάζει σχετικά υψηλές τιμές SPT ενώ χαρακτηριστικό είναι ότι υπάρχει αύξηση αυτών με το βάθος σε αρκετές περιπτώσεις, με περιορισμένες χαμηλές τιμές τοπικά. Παρατηρείται επιπλέον ότι υπάρχουν αρκετές Αρνήσεις, οι οποίες εμφανίζονται σε μικρά αλλά κυρίως σε μεγάλα βάθη. Όπως γίνεται αντιληπτό και από το ακόλουθο ιστόγραμμα 4.3.46 οι επικρατούσες τιμές SPT είναι ιδιαίτερα υψηλές καθώς και το ποσοστό των Αρνήσεων όπως προαναφέραμε. Από την εμπειρική σχέση του Terzaghi εκτιμάται ότι η αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $C_u$  για τους σχηματισμούς στο μέτωπο της εκσκαφής θα υπερβαίνει τα 400kPa.



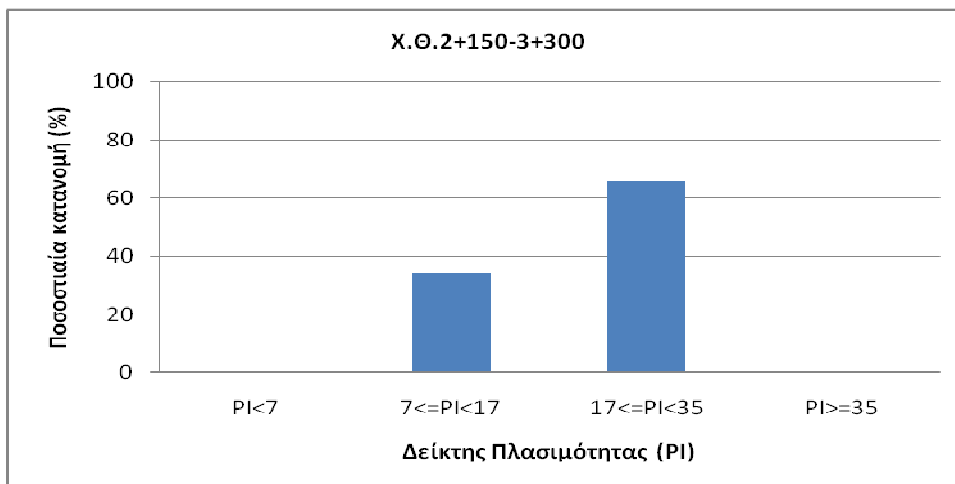
**Σχήμα 4.3.46**  
**Κατανομή των τιμών SPT του τμήματος με Χ.Θ. 2+150-3+300.**  
**Από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν μέσω των γεωτρήσεων οι επικρατούσες**  
**τιμές είναι ιδιαίτερα υψηλές, με επίσης μεγάλο ποσοστό αρνήσεων, και αναφέρονται**  
**στη συντριπτική τους πλειοψηφία στη γεωλογική ενότητα των Νεογενών Αποθέσεων.**

Επίσης προσδιορίστηκαν τα όρια Atterberg για τα εδαφικά υλικά που πρόκειται να εκσκαφτούν. Από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν προκύπτει ότι περίπου το 80% των γεωυλικών που αναμένεται να απαντηθούν κατά τη διάνοιξη της σήραγγας έχουν όριο υδαρότητας  $35 \leq LL < 50$  κατατάσσονται στη κατηγορία των ενδιάμεσων αργίλων. Η ποσοστιαία κατανομή του ορίου υδαρότητας για το συγκεκριμένο τμήμα παρουσιάζεται στο σχήμα 4.3.47 που ακολουθεί.



**Σχήμα 4.3.47**  
**Ποσοστιαία κατανομή του ορίου υδαρότητας για το τμήμα**  
**Χ.Θ. 2+150-3+300.**

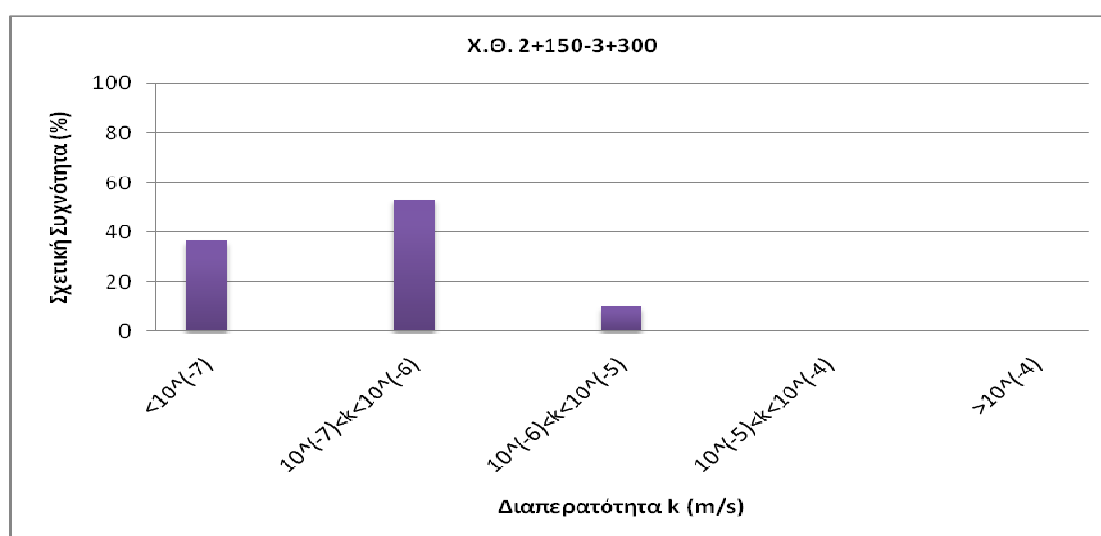
Βάσει των ορίων Atterberg στη συνέχεια υπολογίστηκε ο δείκτης πλασιμότητας PI για το συγκεκριμένο τμήμα. Τα γεωυλικά που αναμένεται να βρίσκονται στο βάθος εκσκαφής του μετώπου της σήραγγας εκτιμάται ότι θα είναι κυρίως σχηματισμοί υψηλής πλασιμότητας καθώς το ποσοστό των γεωυλικών με δείκτη πλασιμότητας μεταξύ  $17 \leq PI < 35$  πλησιάζει το 70% όπως παρουσιάζεται και από το σχήμα 4.3.48 που ακολουθεί. Βάσει του υψηλού δείκτη πλασιμότητας μπορεί να πραγματοποιηθεί μια πρώτη εκτίμηση ως προς το κίνδυνο εμφάνισης κολλώδους συμπεριφοράς των εδαφών. Ενδεχομένως να εμφανιστούν τέτοια προβλήματα καθώς υψηλά πλάσιμες άργιλοι έχουν τη τάση να δημιουργούν φαινόμενα κολλώδους συμπεριφοράς και συνεπώς χρειάζεται περισσότερη διερεύνηση προκειμένου να μη δημιουργηθούν προβλήματα κατά την εκσκαφή.



**Σχήμα 4.3.48**  
**Ποσοστιαία κατανομή του δείκτη πλασιμότητας για το τμήμα**  
**Χ.Θ. 2+150-3+300.**



Στη συνέχεια εξετάζεται η υδατοπερατότητα των σχηματισμών του συγκεκριμένου τμήματος. Από τις δοκιμές διαπερατότητας μεταβλητού (πίπτοντος) υδραυλικού φορτίου παρατηρείται ότι όλα τα γεωυλικά, σε όλα τα βάθη των γεωτρήσεων συνθέτουν ιδιαίτερα μη-διαπερατους σχηματισμούς με τις τιμές του δείκτη διαπερατότητας να κυμαίνεται εντός του εύρους  $k=3 \cdot 10^{-8}$  m/s έως  $k=3 \cdot 10^{-6}$  m/s. Η μεγαλύτερη δυνατότητα διέλευσης υπογείων υδάτων, συγκριτικά με τους υπόλοιπους σχηματισμούς, παρουσιάζεται σε βάθη κοντά στα επιφανειακά στρώματα όπου παρουσιάζονται οι χαλαροί σχηματισμοί των Τεταρτογενών Αποθέσεων. Οι τιμές διαπερατότητας που προέκυψαν από τις πραγματοποιηθείσες δοκιμές σε μεγαλύτερα βάθη, που κυριαρχεί η γεωλογική ενότητα των Νεογενών Αποθέσεων, και ιδιαίτερα στο βάθος του μετώπου εκσκαφής είναι πολύ μικρές, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι πρακτικά γίνεται λόγος για αδιαπέρατους σχηματισμούς. Αυτό οφείλεται στην έντονη παρουσία υλικών αργιλικής φύσεως, ακόμα και στους αδρόκοκκους σχηματισμούς, ενώ οι τιμές του δείκτη διαπερατότητας κυμαίνονται από  $k=3 \cdot 10^{-8}$  m/s έως  $k=9 \cdot 10^{-7}$  m/s. Η κατανομή του δείκτη υδατοπερατότητας των σχηματισμών στο σύνολο τους παρουσιάζεται στο σχήμα 4.3.49 που ακολουθεί.



Σχήμα 4.3.49

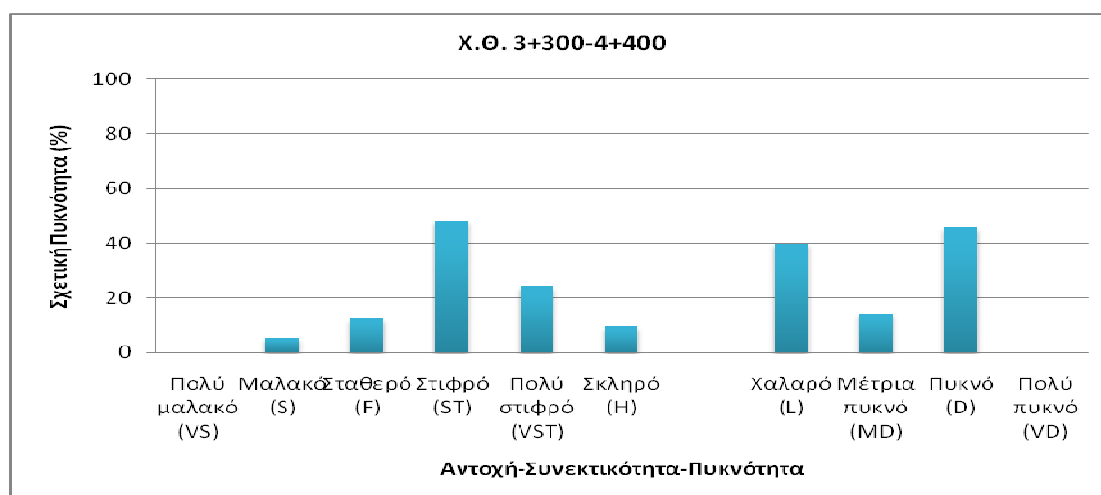
**Κατανομή των τιμών υδατοπερατότητας του τμήματος με Χ.Θ. 2+150-3+300.**  
*Η υδατοπερατότητα των σχηματισμών είναι ιδιαίτερα μικρή με τις επικρατούσες τιμές να είναι μικρότερες από  $k=10^{-6}$  m/s και με σημαντικό ποσοστό μικρότερο από  $k=10^{-7}$  m/s. Αυτοί οι πρακτικώς αδιαπέρατοι σχηματισμοί συναντούν το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας σε όλο το μήκος του συγκεκριμένου τμήματος του άξονα.*

- **Τμήμα Χ.Θ. 3+300 έως 4+400**

Στο συγκεκριμένο τμήμα της σήραγγας περιλαμβάνεται το υπόλοιπο κομμάτι του άξονα της σήραγγας μεταξύ των σταθμών Σταυρουπόλεως και Πολίχνης από τη χιλιομετρική θέση 3+300 έως τη χιλιομετρική θέση 3+700, όπου και η σήραγγα διέρχεται κάτω από τον οδικό άξονα της Λεωφόρου Λαγκαδά, ο σταθμός Πολίχνη και το τμήμα από τη χιλιομετρική θέση 3+700 έως και τη χιλιομετρική θέση 4+400, όπου ο άξονας της σήραγγας ξεφεύγει από την ευθυγραμμία της Λεωφόρου Λαγκαδά με τον άξονα της σήραγγας να καμπυλώνεται προς τα βορειοδυτικά και να διέρχεται κάτω από οικοδομικά τετράγωνα πολυκατοικιών παράλληλα στη Λεωφόρο Λαγκαδά. Η οριοθέτηση του παρόντος τμήματος πραγματοποιήθηκε με κριτήριο την αλλαγή της φύσης των επικρατούντων γεωυλικών, που θα συναντήσει το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας, καθώς εκτιμάται ότι θα απαντηθούν κυρίως λεπτόκοκκοι σχηματισμοί αργιλικής φύσεως. Η κυρίαρχη γεωλογική ενότητα και στο συγκεκριμένο τμήμα είναι αυτή των Νεογενών Αποθέσεων (Σειρά Ερυθρών Αργίλων). Το πάχος των υπερκειμένων πάνω από το επίπεδο του άξονα της σήραγγας κυμαίνεται μεταξύ των 14m και 16m.

Το μέτωπο εκσκαφής καθώς προχωράει στο συγκεκριμένο τμήμα συναντά τους εδαφικούς σχηματισμούς της Σειράς των Ερυθρών Αργίλων όπως προαναφέρθηκε. Των Νεογενών Αποθέσεων και στο παρόν τμήμα υπέρκειται τόσο η γεωλογική ενότητα των Τεταρτογενών Αποθέσεων όσο και το στρώμα των Τεχνητών Επιχώσεων πάνω από αυτές. Η διάταξη αυτή των στρωμάτων διατηρείται σε όλο το μήκος του τμήματος. Το πάχος του στρώματος των Τεταρτογενών Αποθέσεων εκτιμάται ότι κυμαίνεται από 1m έως 9m ενώ το πάχος των Τεχνητών Επιχώσεων από 0.50m έως 5m.

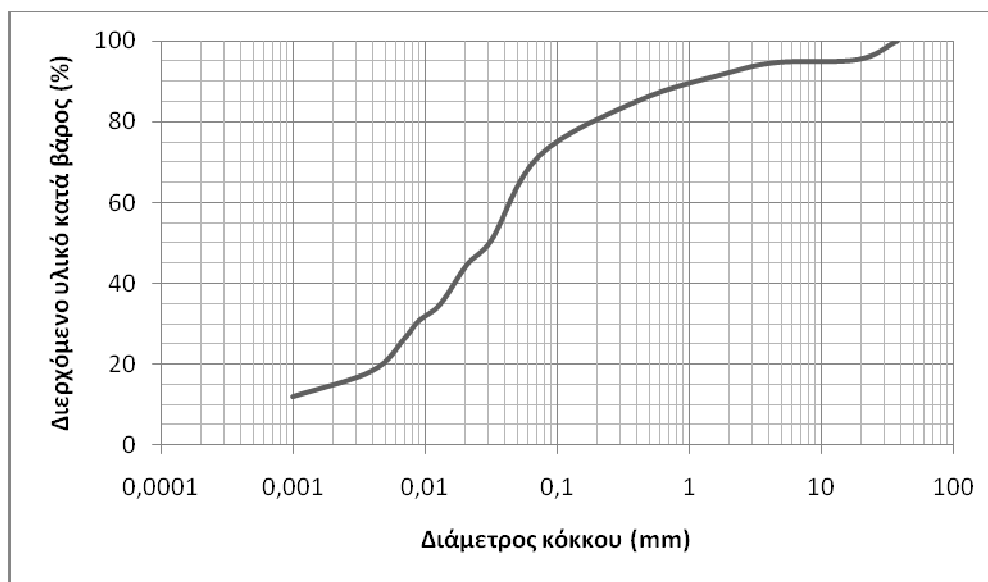
Στο υπό εξέταση τμήμα η παρεχόμενη πληροφορία για τα γεωυλικά αυτού παρέχονται από τις γεωτρήσεις T10P050, T10P051, T10H052, T10P013, T10H053, T10P055, T10H014, T10R054, T10P056, T10P057, T10P015, T10P058 και T10P059. Από το σύνολο των παραπάνω γεωτρήσεων αναμένεται να επικρατήσουν στο συγκεκριμένο τμήμα λεπτόκοκκοι σχηματισμοί κυρίως αργιλικής φύσεως με μεμονωμένες εμφανίσεις αδρόκοκκων, χαλικώδους κυρίως φύσης, γεωυλικών. Οι Τεταρτογενείς Αποθέσεις, οι οποίες υπέρκειται της Σειράς των Ερυθρών Αργίλων σε όλο το μήκος του παρόντος τμήματος όπως προαναφέρθηκε, εκτιμάται ότι αποτελούνται τόσο από αδρόκοκκους όσο και από λεπτόκοκκους σχηματισμούς. Οι λεπτόκοκκοι σχηματισμοί εκτιμάται ότι συνθέτονται από Άργιλο ως Αμμώδη Άργιλο με χάλικες έως κατά τόπους Άργιλο με άμμο, με τους σχηματισμούς αυτούς να είναι κυρίως από μαλακοί έως σταθεροί έως κατά τόπους στιφροί. Οι αδρόκοκκοι σχηματισμοί αναμένεται, όπως προαναφέρθηκε, να είναι κυρίως χαλικώδους φύσης με αυτούς να εκτιμάται ότι αποτελούνται από Αργιλώδεις Χάλικες έως Αργιλώδη Άμμο και Χαλικώδη Άμμο. Οι αδρόκοκκοι σχηματισμοί αναμένεται να είναι από μέτρια πυκνοί έως πυκνοί όπου αυτοί εμφανίζονται. Εν συνεχεία εξετάζοντας τη γεωλογική ενότητα των Νεογενών Αποθέσεων, εντός τη οποίας βρίσκεται και το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας, εκτιμάται ότι οι επικρατούντες σχηματισμοί είναι λεπτόκοκκους, αργιλικής κυρίως φύσης όπως προαναφέρθηκε. Τα λεπτόκοκκα γεωυλικά, τα οποία προέκυψαν από τις υφιστάμενες γεωτρήσεις, εμφανίζονται ως στιφροί έως πολύ στιφροί και κατά τόπους σκληροί σχηματισμοί Αμμώδους Αργίλου έως Άργιλο με άμμο σποραδικά με χάλικες, Χαλικώδους Αργίλου και μεμονωμένες εμφανίσεις Χαλικοπαγούς, ισχυρά συγκολλημένου με αργιλοαμμώδες υλικό, μέσα στο αργιλικό κυρίως υλικό. Οι αδρόκοκκοι σχηματισμοί όπου εμφανίζονται συνθέτονται κυρίως από Άμμο έως Αργιλώδη Άμμο με χάλικες και Αργιλώδες Αμμοχάλικο, Χαλικώδη Άμμο και Αργιλώδεις Χάλικες, με αυτούς να χαρακτηρίζονται κυρίως ως πυκνοί. Οι κατανομές της σχετικής πυκνότητας των γεωυλικών φαίνεται στο σχήμα 4.3.50 που ακολουθεί.



**Σχήμα 4.3.50**

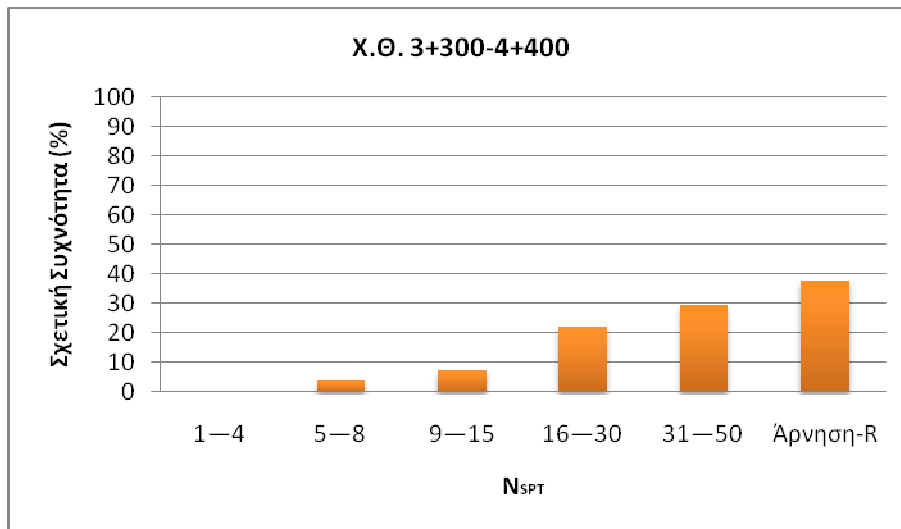
**Κατανομή της συνεκτικότητας και πυκνότητας των λεπτόκοκκων και αδρόκοκκων εδαφικών σχηματισμών με Χ.Θ. 3+300-4+400. Οι πιο χαλαροί σχηματισμοί είναι γεωυλικά που εμφανίζονται στις Τεταρτογενείς Αποθέσεις. Οι στιφροί και πυκνοί σχηματισμοί είναι τα επικρατούντα γεωυλικά της Σειράς των Ερυθρών Αργίλων και σε αυτό το τμήμα όπως φαίνεται από το παραπάνω σχήμα.**

Από τη κοκκομετρική ανάλυση των γεωλικών που αναμένεται να απαντηθούν στο βάθος του μετώπου εκσκαφής γίνεται αντιληπτό ότι οι επικρατούντες σχηματισμοί αναμένεται να είναι λεπτόκοκκοι, πράγμα το οποίο επιβεβαιώνει τα παραπάνω, με τα γεωλικά που διέρχονται από το κόσκινο Νο200 να ξεπερνούν το 70% κατά βάρος, όπως φαίνεται και στη κοκκομετρική καμπύλη που ακολουθεί στο σχήμα 4.3.51 .



**Σχήμα 4.3.51**  
**Κοκκομετρική καμπύλη για τα γεωλικά από τη**  
**Χ.Θ. 3+300-4+400.**

Στη συνέχεια εξετάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις δοκιμές SPT που πραγματοποιήθηκαν στα γεωλικά των γεωτρήσεων που συμπεριλαμβάνονται στο συγκεκριμένο τμήμα. Στο σύνολο τους οι τιμές SPT είναι σχετικά υψηλές τόσο στη γεωλογική ενότητα των Τεταρτογενών Αποθέσεων όσο και στη γεωλογική ενότητα των Νεογενών Αποθέσεων. Οι χαμηλές τιμές SPT είναι σχετικά περιορισμένες και εμφανίζονται κυρίως σε στρώματα κοντά στην εδαφική επιφάνεια με ελάχιστες να είναι σε μεγάλα βάθη. Το συνολικό εύρος τιμών SPT για το συγκεκριμένο τμήμα κυμαίνεται από 6 έως 50 με τις τιμές των Τεταρτογενών Αποθέσεων να κυμαίνονται από 7 έως 37, με τις περισσότερες τιμές πιο κοντά στη μεγαλύτερη, ενώ οι Νεογενείς Αποθέσεις καλύπτουν επίσης το εύρος του συνόλου με τις χαμηλές τιμές να είναι μεμονωμένες μεταξύ των σχετικά υψηλών τιμών. Χαρακτηριστικό επίσης αποτελεί και το μεγάλο ποσοστό Αρνήσεων, με αυτές να εμφανίζονται κυρίως σε μεγάλα βάθη γεώτρησης. Οι τιμές SPT των γεωλικών που αναμένεται να απαντήσει το μέτωπο εκσκαφής συγκεντρώνονται στη πλειοψηφία τους πάνω από το 30 ενώ η δοκιμή σε τέτοια βάθη παρουσίασε και αρκετές Αρνήσεις. Γίνεται αντιληπτό συνεπώς και από το ακόλουθο ιστόγραμμα 4.3.52 οι επικρατούσες τιμές SPT είναι ιδιαίτερα υψηλές καθώς και το ποσοστό των Αρνήσεων όπως προαναφέραμε. Από την εμπειρική σχέση του Terzaghi εκτιμάται ότι η αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $C_u$  για τους σχηματισμούς στο μέτωπο της εκσκαφής θα υπερβαίνει τα 400kPa, όπως και στο προηγούμενο τμήμα της σήραγγας.

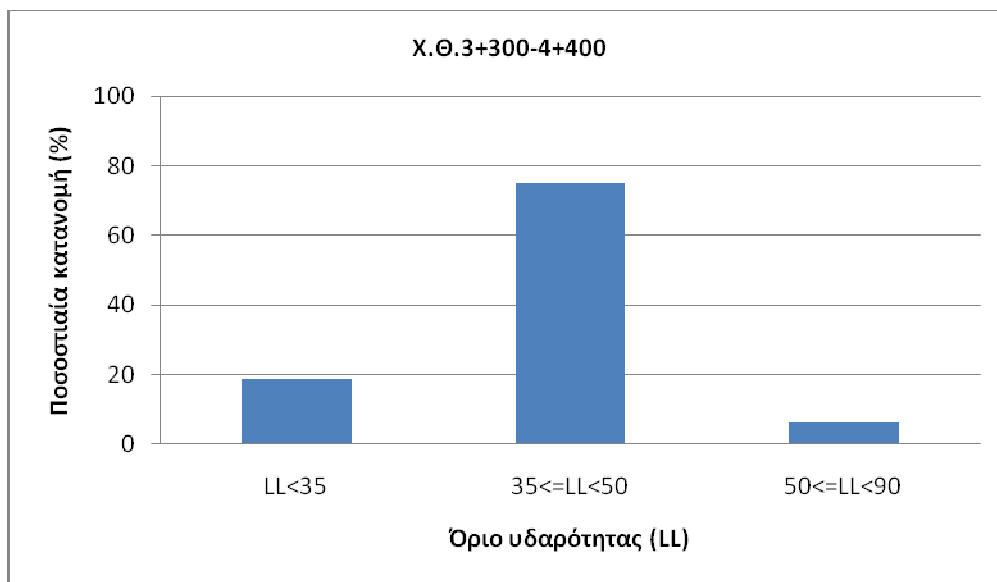


**Σχήμα 4.3.52**

**Κατανομή των τιμών SPT του τμήματος με Χ.Θ. 3+300-4+400.**

*Από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν μέσω των γεωτρήσεων οι επικρατούσες τιμές είναι ιδιαίτερα υψηλές, με το μεγαλύτερο ποσοστό να είναι Άρνήσεις της δοκιμής, και αναφέρονται στη πλειοψηφία τους στη γεωλογική ενότητα των Νεογενών Αποθέσεων με μεμονωμένες χαμηλές τιμές.*

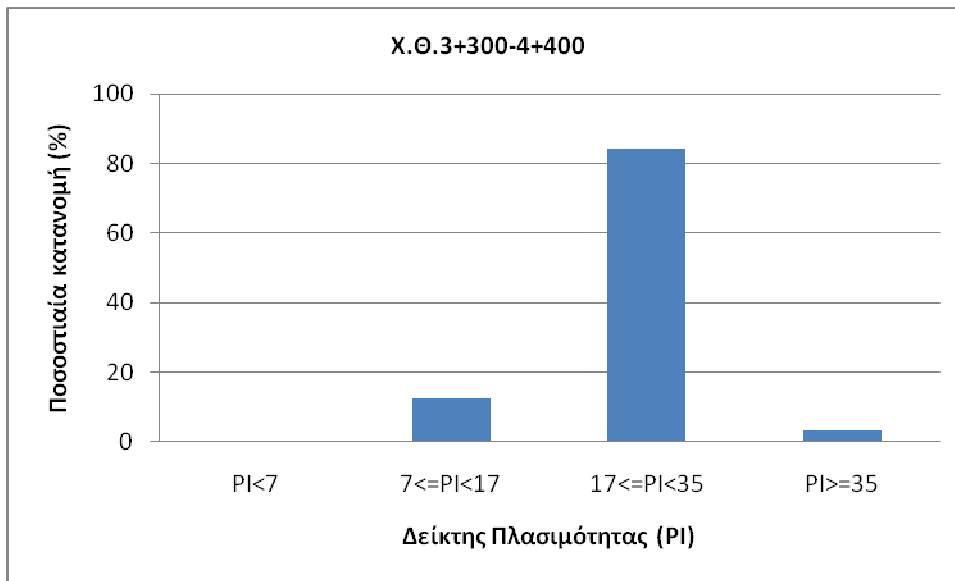
Από τον προσδιορισμό των ορίων Atterberg για τα γεωυλικά στο βάθος του μετώπου εκσκαφής αναμένεται να ανήκουν στη κατηγορία των ενδιάμεσων αργίλων, καθώς το ποσοστό του ορίου υδαρότητας LL το οποίο κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 35 και 50 φτάνει το 75% των παρατηρήσεων όπως φαίνεται και παρακάτω στο σχήμα 4.3.53.



**Σχήμα 4.3.53**

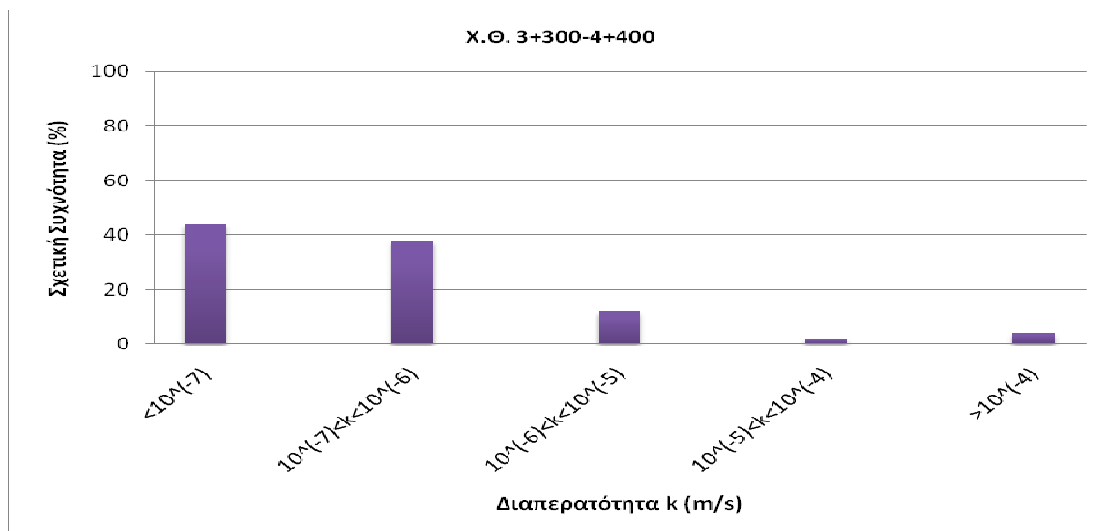
**Ποσοστιαία κατανομή του ορίου υδαρότητας για το τμήμα Χ.Θ. 3+300-4+400.**

Εν συνεχεία προσδιορίστηκε ο δείκτης πλασιμότητας των αναμενόμενων σχηματισμών στο βάθος του μετώπου εκσκαφής, με τα γεωυλικά να χαρακτηρίζονται και σε αυτό το τμήμα της σήραγγας ως υψηλής πλασιμότητας καθώς για τα επικρατούντα γεωυλικά (ποσοστό μεγαλύτερο του 80%) προκύπτει ότι ο δείκτης πλασιμότητας βρίσκεται μεταξύ των τιμών 17 και 35 όπως φαίνεται από το σχήμα 4.3.54 που ακολουθεί.



**Σχήμα 4.3.54**  
**Ποσοστιαία κατανομή του δείκτη πλασιμότητας για το τμήμα**  
**Χ.Ο. 3+300-4+400.**

Επιπλέον εξετάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις δοκιμές διαπερατότητας στις παραπάνω γεωτρήσεις. Οι δοκιμές διαπερατότητας που πραγματοποιήθηκαν ήταν μεταβλητού (πίπτοντος) υδραυλικού φορτίου με εξαίρεση δυο δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν με σταθερό υδραυλικό φορτίο στη γεώτρηση T10H053 σε βάθος 4.3m και 7m. Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν υποδεικνύουν σχηματισμούς κυρίως αδιαπέρατης φύσης. Οι τιμές του δείκτη διαπερατότητας, που υπολογίστηκαν, κυμαίνονται από  $k=0$  έως  $k=3 \cdot 10^{-2}$  m/s παρουσιάζοντας ένα ιδιαίτερα μεγάλο εύρος. Οι πραγματοποιηθείσες δοκιμές αναφέρονται σε διάφορα βάθη γεώτρησης με το παραπάνω εύρος να αντιπροσωπεύει αυτό το σύνολο, όμως στα βάθη από τα οποία αναμένεται να διέλθει το μέτωπο εκσκαφής η υδατοπερατότητα των αναπτυσσόμενων, εδαφικών σχηματισμών των Νεογενών Αποθέσεων εκτιμάται ότι θα κυμαίνεται κυρίως από  $k=1.50 \cdot 10^{-8}$  m/s έως  $k=7 \cdot 10^{-7}$  m/s με ελαφρά πιο διαπερατούς σχηματισμούς περί τη χιλιομετρική θέση 4+090, κάνοντας λόγο πρακτικά για αδιαπέρατους σχηματισμούς στο σύνολο τους στο αναμενόμενο μέτωπο της εκσκαφής της σήραγγας. Αυτές οι μικρές τιμές διαπερατότητας εκτιμάται ότι οφείλονται τόσο στον αργιλικό χαρακτήρα των επικρατούντων λεπτόκοκκων σχηματισμών όσο και στη παρουσία αργιλικού υλικού ακόμα και στους αδρόκοκκους σχηματισμούς. Η κατανομή του δείκτη υδατοπερατότητας των σχηματισμών στο σύνολο τους παρουσιάζεται στο σχήμα 4.3.55 που ακολουθεί.



Σχήμα 4.3.55

Κατανομή των τιμών υδατοπερατότητας του τμήματος με X.Θ. 3+300-4+400.

Η υδατοπερατότητα των σχηματισμών είναι ιδιαίτερα μικρή με τις επικρατούσες τιμές να είναι μικρότερες από  $k=10^{-6}$  m/s και με το μεγαλύτερο ποσοστό των σχηματισμών μικρότερο από  $k=10^{-7}$  m/s. Αυτοί οι πρακτικώς αδιαπέρατοι σχηματισμοί συναντούν το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας σε όλο το μήκος του συγκεκριμένου τμήματος του άξονα.

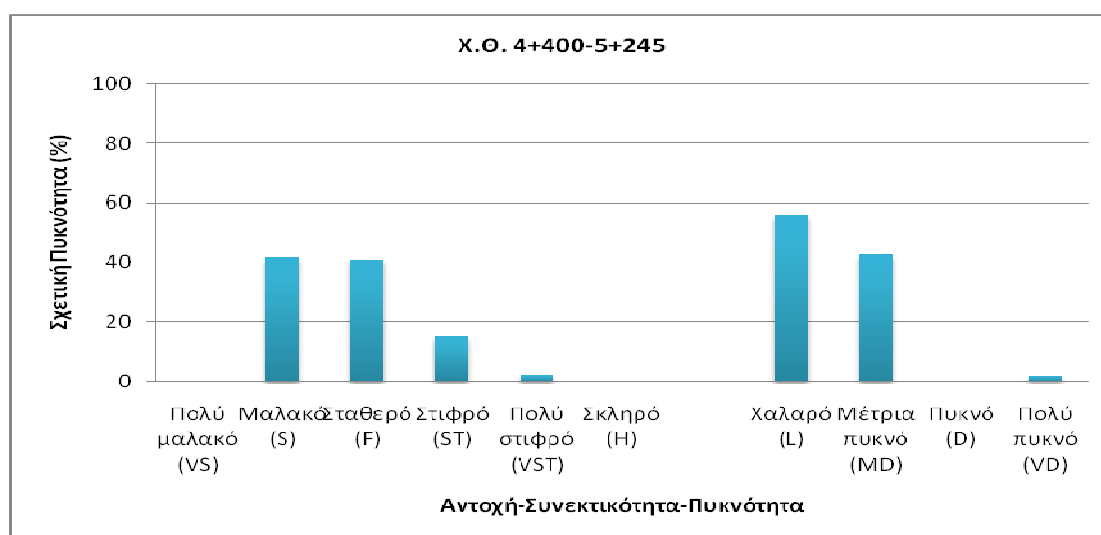
- Τμήμα X.Θ. 4+400 έως 5+245

Το συγκεκριμένο τμήμα αποτελεί το τελευταίο κομμάτι της σήραγγας της επέκτασης του μετρο της Θεσσαλονίκης προς Σταυρούπολη το οποίο περιλαμβάνει το υπόλοιπο κομμάτι του άξονα μεταξύ των σταθμών Πολίχνης και Ευκαρπίας καθώς και το σταθμό Ευκαρπία. Ο άξονας της σήραγγας στο παρόν τμήμα διέρχεται κάτω από την Λεωφόρο Λαγκαδά τέμνοντας την και ακολουθεί τον οδικό άξονα της Περιφερειακής Οδού της Θεσσαλονίκης από τη χιλιομετρική θέση 4+400 έως τη χιλιομετρική θέση 5+000, όπου τελειώνει ο σταθμός Ευκαρπία, ενώ για τα υπόλοιπα 245m μέχρι το τέλος της χάραξης ο άξονας της σήραγγας διέρχεται κάτω από οικοδομικά τετράγωνα πολυκατοικιών ακολουθώντας περίπου παράλληλα τη Περιφερειακή Οδό με μια μικρή απόκλιση προς τα Βορειοδυτικά, διατηρώντας μια σχετική ευθυγραμμία κατά μήκος. Η οριοθέτηση του υπό εξέταση τμήματος πραγματοποιήθηκε με κριτήριο την αλλαγή της επικρατούσας γεωλογικής ενότητας στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας. Πιο συγκεκριμένα από τη χιλιομετρική θέση 4+400 έως και το τέλος της χάραξης η σήραγγα με τη προχώρηση της αναμένεται να συναντήσει, όπως και στο αρχικό κομμάτι της, εξολοκλήρου τη γεωλογική ενότητα των Τεταρτογενών Αποθέσεων με τις Τεχνητές Επιχώσεις να υπέρκειται αυτών στο μεγαλύτερο κομμάτι του τμήματος. Το πάχος των υπερκειμένων πάνω από το επίπεδο του άξονα της σήραγγας κυμαίνεται μεταξύ των 14m και 6m από τη χιλιομετρική θέση 4+400 έως τη χιλιομετρική θέση 4+700, μεταξύ 6m και 14m από τη X.Θ. 4+700 έως τη X.Θ. 5+100 και από τη X.Θ. 5+100 έως τη 5+245 από τα 14m έως τα 22m.

Κατά τη προχώρηση της σήραγγας κατά το τελευταίο κομμάτι του άξονα της συναντά εδαφικούς σχηματισμούς που αναπτύσσονται στη γεωλογική ενότητα των Τεταρτογενών Αποθέσεων, όπως προαναφέρθηκε με τις Τεχνητές Επιχώσεις να βρίσκονται στα ανώτερα επιφανειακά, εδαφικά στρώματα. Το πάχος των Τεχνητών Επιχώσεων κατά μήκος της σήραγγας εκτιμάται ότι θα κυμανθεί από 0 έως 6.50m ενώ το πάχος των Τεταρτογενών Αποθέσεων δεν είναι δυνατό να εκτιμηθεί επαρκώς καθώς οι γεωτρήσεις που περιλαμβάνονται στο εξεταζόμενο τμήμα σταμάτησαν σε βάθος μικρότερο από αυτό των σχηματισμών που υπόκεινται των Τεταρτογενών Αποθέσεων, όπως παρουσιάζεται και στη τομή T1.

Οι πληροφορίες που διατίθενται για τα γεωυλικά του παρόντος τμήματος της σήραγγας προέρχονται από τις γεωτρήσεις T10P060, T10P061, T10P062, T10H016, T10P063,

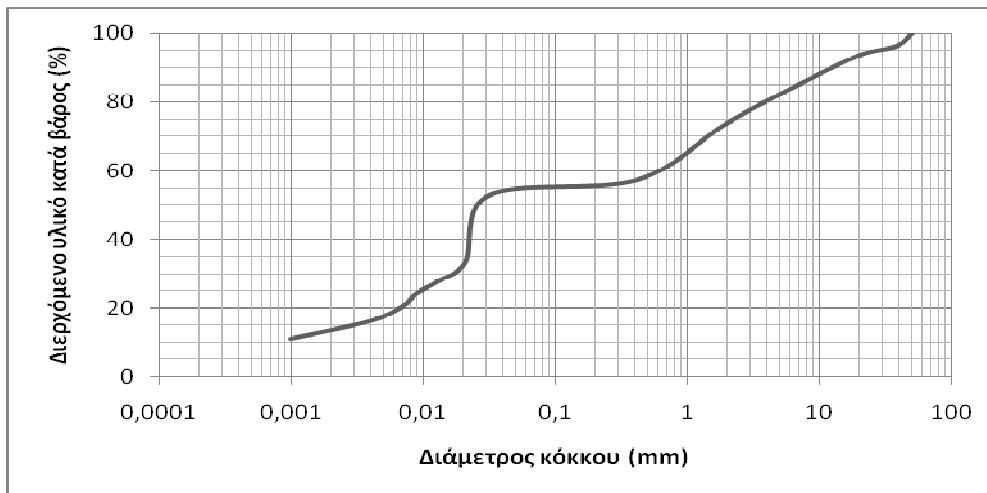
T10P070, T10H017, T10P018, T10R067, T10P068, T10P071, T10H064, T10P069, T10P072, T10P065 και T10H066. Από το σύνολο των παραπάνω γεωτρήσεων λαμβάνονται πληροφορίες αποκλειστικά για τη γεωλογική ενότητα των Τεταρτογενών Αποθέσεων, καθώς όπως αναφέρθηκε παραπάνω δεν υπάρχουν γεωλικά άλλων γεωλογικών ενοτήτων σε αυτές, και από αυτές παρατηρείται ότι στο μέτωπο εκσκαφής καθώς αυτό προχωράει θα συναντήσει εναλλαγές λεπτόκοκκων με αδρόκοκκους σχηματισμούς, με τα λεπτόκοκκα γεωλικά να είναι κυρίως αργιλικής φύσης και τα αδρόκοκκα αμμώδους έως χαλικώδους φύσης. Πιο συγκεκριμένα αναμένονται Αμμώδεις Αργίλοι με ή χωρίς τη παρουσία χαλίκων έως Χαλικώδεις Αργίλους, με τους λεπτόκοκκους αυτούς σχηματισμούς να είναι από μαλακοί έως κυρίως σταθεροί και κατά τύπους στιφροί, ενώ οι αδρόκοκκοι περιλαμβάνουν σχηματισμούς όπως κυρίως Αργιλώδεις Άμμους (κατά τύπους Αργιλώδεις/Πλυώδεις Άμμους) με ή χωρίς χαλίκια έως Χαλικώδεις Άμμους, Αργιλώδη Αμμοχάλικα και Αργιλώδεις Χάλικες με ή χωρίς τη παρουσία άμμου, με αυτούς να είναι κυρίως χαλαροί έως μέτρια πυκνοί και το σύνολο των παραπάνω σχηματισμών να απαντάται με εναλλαγές στο μέτωπο εκσκαφής καθώς η σήραγγα προχωράει. Οι κατανομές της σχετικής πυκνότητας των γεωλικών φαίνεται στο σχήμα 4.3.56 που ακολουθεί.



**Σχήμα 4.3.56**

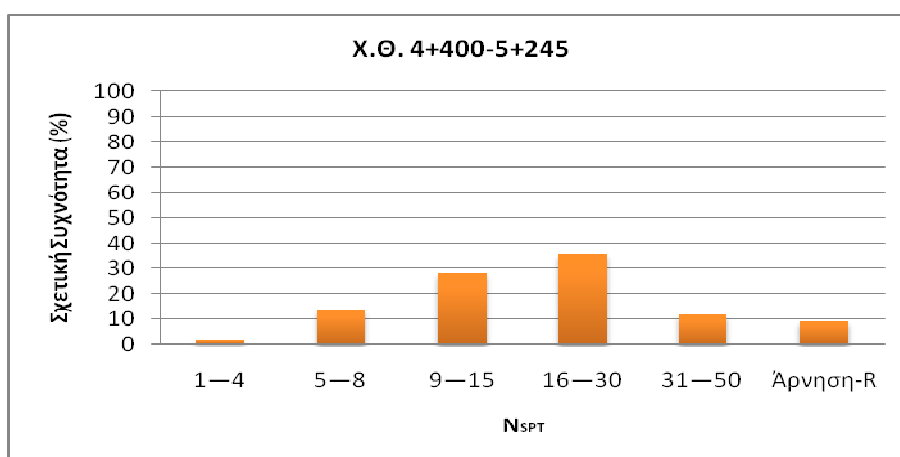
**Κατανομή της συνεκτικότητας και πυκνότητας των λεπτόκοκκων και αδρόκοκκων εδαφικών σχηματισμών με Χ.Θ. 4+400-5+245. Το σύνολο των γεωλικών ανήκει στη γεωλογική ενότητα των Τεταρτογενών Αποθέσεων. Στο μέτωπο εκσκαφής αναμένονται τόσο λεπτόκοκκοι, κυρίως μαλακοί έως σταθεροί σχηματισμοί όσο και αδρόκοκκοι, κυρίως χαλαροί έως μέτρια πυκνοί.**

Από τη κοκκομετρική ανάλυση των γεωλικών που αναμένεται να εκσκαφτούν επιβεβαιώνεται το γεγονός ότι στο συγκεκριμένο τμήμα υπάρχει τόσο η παρουσία λεπτόκοκκων όσο και αδρόκοκκων σχηματισμών, καθώς το ποσοστό του διερχόμενου υλικού από το κόσκινο Νο200 που αποτελεί το θεωρητικό και συμβατικό όριο μεταξύ αυτών πλησιάζει το 50% όπως παρουσιάζεται στη καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης του σχήματος 4.3.57 .



**Σχήμα 4.3.57**  
**Κοκκομετρική καμπύλη για τα γεωλικά από τη**  
**Χ.Θ. 4+400-5+245.**

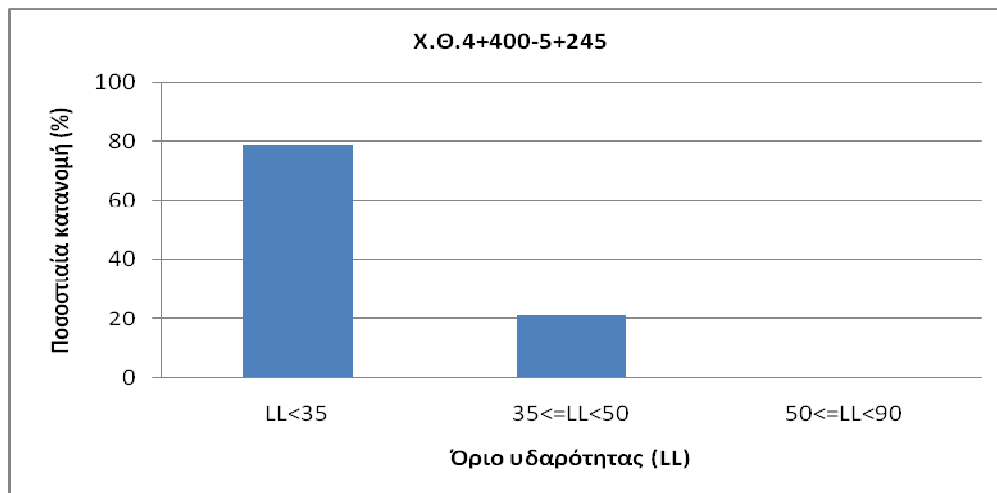
Στις γεωτρήσεις, τις οποίες έγιναν και σε αυτό το τμήμα, πραγματοποιήθηκαν επίσης δοκιμές πρότυπης διεισδύσεως (SPT). Από τα δεδομένα τα οποία προέκυψαν από τις δοκιμές αυτές παρατηρείται ότι το εύρος των τιμών SPT για τους συγκεκριμένους εδαφικούς σχηματισμούς κυμαίνεται από 4 έως 49. Το εύρος της διακύμανσης είναι ιδιαίτερα μεγάλο με τις τιμές να συγκεντρώνονται κυρίως γύρω από το διάστημα 9 έως 30 για το σύνολο των σχηματισμών, συνεπώς γίνεται λόγος για γεωλικά με σχετικά μέτριες τιμές SPT, οι οποίες αντιπροσωπεύουν και τα γεωλικά που βρίσκονται στο βάθος του μετώπου εκσκαφής παρουσιάζοντας σχετικά μεγάλες διακυμάνσεις κυρίως με το βάθος. Χαμηλές τιμές παρουσιάζονται τόσο στους σχηματισμούς κοντά στα επιφανειακά στρώματα όσο και σε βαθύτερα μέσα στο έδαφος σημεία. Οι υψηλότερες τιμές SPT είναι περιορισμένες όπως φαίνεται και από το μικρό ποσοστό που προκύπτει για αυτές ενώ μικρό είναι και το ποσοστό των Αρνήσεων της δοκιμής. Στο ακόλουθο σχήμα 4.3.58 παρουσιάζεται η κατανομή των τιμών που προέκυψαν από τη δοκιμή SPT. Από την εμπειρική σχέση του Terzaghi εκτιμάται ότι η αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $C_u$  για τους σχηματισμούς στο μέτωπο της εκσκαφής θα κυμανθεί περί τα 250 kPa.



**Σχήμα 4.3.59**  
**Κατανομή των τιμών SPT του τμήματος με Χ.Θ. 4+400-5+245.**  
**Από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν μέσω των γεωτρήσεων**  
**οι επικρατούσες τιμές είναι σχετικά μέτριες, με το μεγαλύτερο ποσοστό**  
**να κυμαίνεται από 16 έως 30 στο σύνολο των σχηματισμών.**

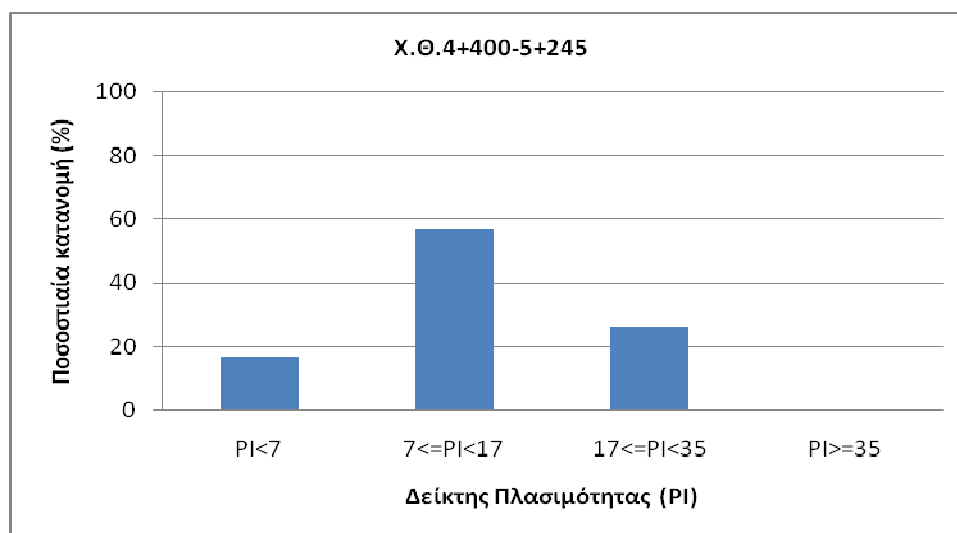


Από το προσδιορισμό του ορίου υδαρότητας για τα γεωλικά στο βάθος του μέτωπου εκσκαφής προκύπτει ότι για το συγκεκριμένο τμήμα οι επικρατούντες σχηματισμοί ανήκουν στη κατηγορία των ισχνών αργίλων καθώς, σε ποσοστό που πλησιάζει το 80% αυτών, το όριο υδαρότητας τους είναι μικρότερο από τη τιμή 35 όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.3.60 που ακολουθεί.



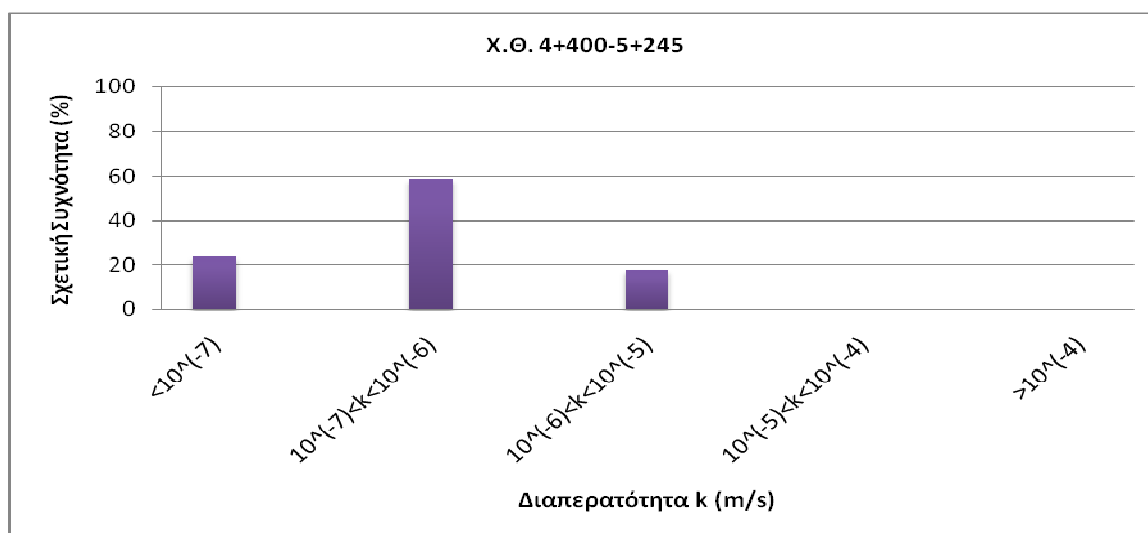
**Σχήμα 4.3.60**  
**Ποσοστιαία κατανομή του ορίου υδαρότητας για το τμήμα**  
**Χ.Θ. 4+400-5+245.**

Εν συνεχεία από τον προσδιορισμό των ορίων Atterberg, μέσω δοκιμών, προσδιορίστηκε ο δείκτης πλασιμότητας των εδαφικών σχηματισμών που αναμένεται να βρεθούν στο μέτωπο εκσκαφής κατά τη διάνοιξη της σήραγγας. Από την ανάλυση αυτή προκύπτει ότι οι επικρατούντες σχηματισμοί είναι ενδιάμεσης πλασιμότητας, καθώς σε ποσοστό που πλησιάζει το 60% των γεωλικών οι τιμές του δείκτη πλασιμότητας PI που τα χαρακτηρίζουν κυμαίνεται μεταξύ του εύρους  $7 \leq PI < 17$ , όπως φαίνεται και από το σχήμα 4.3.61 που ακολουθεί.



**Σχήμα 4.3.61**  
**Ποσοστιαία κατανομή του δείκτη πλασιμότητας για το τμήμα**  
**Χ.Θ. 4+400-5+245.**

Επίσης εξετάζονται τα αποτελέσματα τα οποία ελήφθησαν από τη πραγματοποίηση δοκιμών υδατοπερατότητας στους παραπάνω εδαφικούς σχηματισμούς της γεωλογικής ενότητας των Τεταρτογενών Αποθέσεων. Οι δοκιμές διαπερατότητας οι οποίες πραγματοποιήθηκαν ήταν μεταβλητού (πίπτοντος) υδραυλικού φορτίου σε όλες τις γεωτρήσεις που περιλαμβάνονται στο υπό εξέταση τμήμα. Τα βάθη στα οποία έγιναν οι δοκιμές είναι αντιπροσωπεύουν κυρίως αυτό του μετώπου εκσκαφής της σήραγγας με μεμονωμένο αριθμό αυτών να γίνεται σε ανώτερα εδαφικά στρώματα. Το μεγαλύτερο ποσοστό των εδαφικών σχηματισμών παρουσιάζει διαπερατότητες μικρότερες από  $k=10^{-6}$  m/s, κυρίως στο βάθος του μετώπου εκσκαφής, με περιορισμένες δοκιμές να δίνουν δείκτες διαπερατότητας μεγαλύτερους από τη συγκεκριμένη τιμή, κατά συνέπεια οι εδαφικοί σχηματισμοί πρακτικώς είναι αδιαπέρατοι, χαρακτήρας που προσδίδεται σε αυτούς από το σε μεγάλο ποσοστό αργιλικού υλικού που υπάρχει ακόμα και στους αδρόκοκκους σχηματισμούς. Μεγαλύτερες τιμές υδατοπερατότητας, σε σχέση με τις υπόλοιπες που έχουν υπολογιστεί, αναμένονται περί τη χιλιομετρική θέση 5+000 όπου αναμένονται αδρόκοκκοι, χαλαροί σχηματισμοί ενώ σε όλο το μήκος του τμήματος ενδεχομένως να υπάρχουν και άλλες τέτοιες θέσεις, όπου επικρατούν κυρίως αδρόκοκκοι σχηματισμοί, με αυτές όμως να είναι μεμονωμένες. Η κατανομή του δείκτη υδατοπερατότητας των σχηματισμών στο σύνολο τους παρουσιάζεται στο σχήμα 4.3.62 που ακολουθεί.

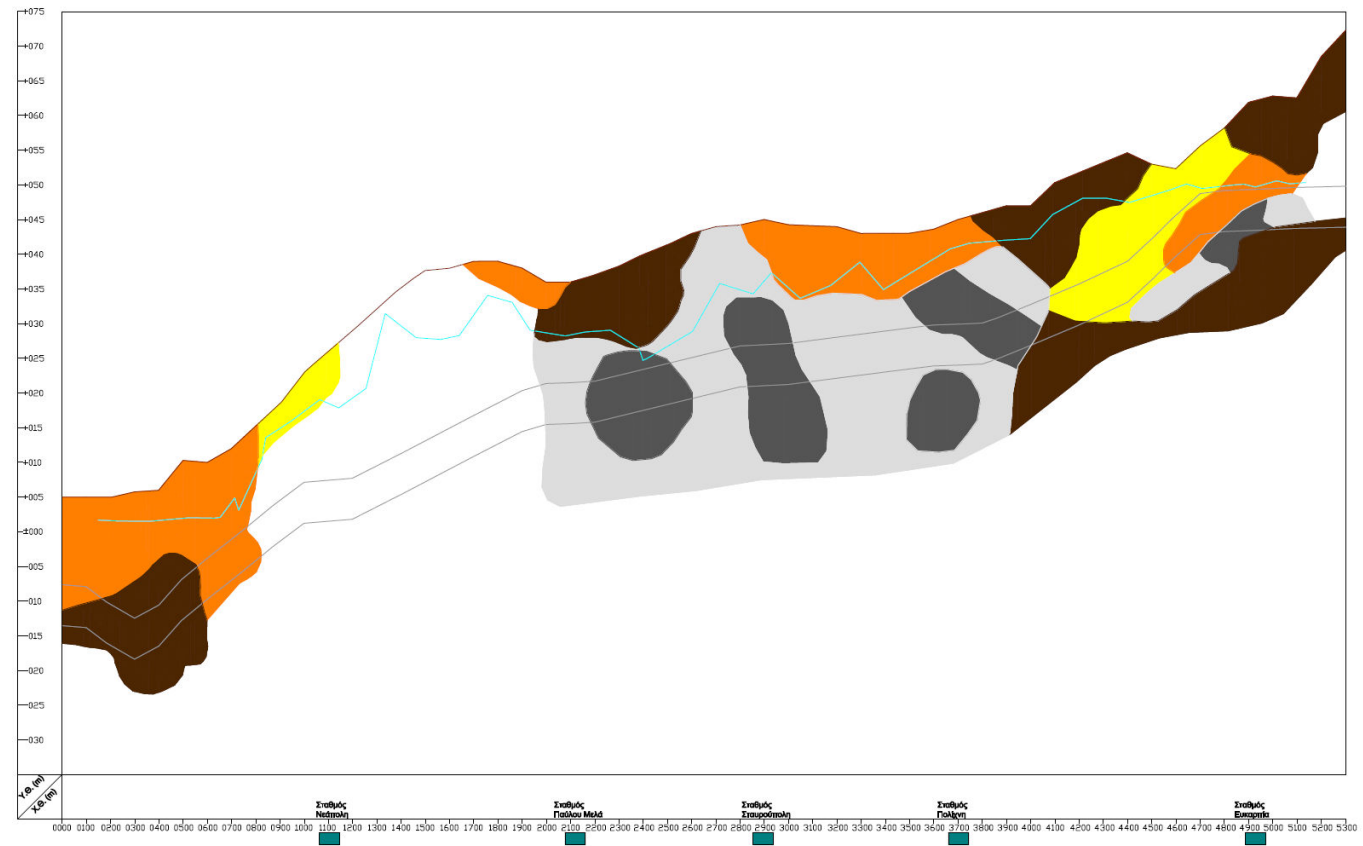


Σχήμα 4.3.62










**Κατανομή των τιμών υδατοπερατότητας του τμήματος με Χ.Θ. 4+400-5+245.**

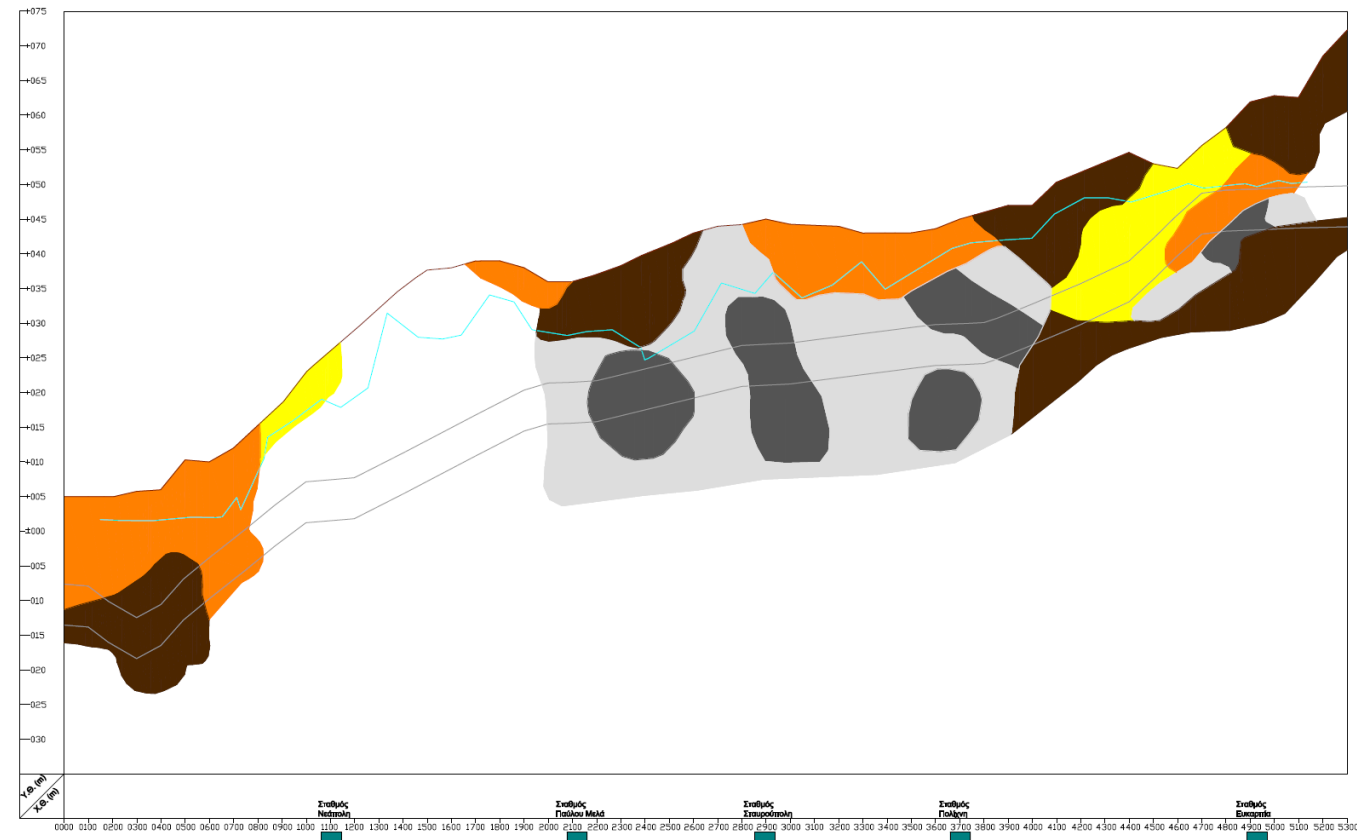
**Η υδατοπερατότητα των σχηματισμών είναι ιδιαίτερα μικρή με τις επικρατούσες τιμές να είναι μικρότερες από  $k=10^{-6}$  m/s και με το μεγαλύτερο ποσοστό των σχηματισμών να κυμαίνεται από  $k=10^{-7}$  m/s έως  $k=10^{-6}$  m/s. Αυτοί οι πρακτικώς αδιαπέρατοι σχηματισμοί συναντούν το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας σε όλο το μήκος του συγκεκριμένου τμήματος του άξονα.**

Εν συνεχεία παρουσιάζονται οι προβολές των μεγεθών που εξετάστηκαν παραπάνω και περιλαμβάνουν για τους εδαφικούς σχηματισμούς το όριο υδαρότητας, το δείκτη πλασιμότητας, το δείκτη συνεκτικότητας, τη ποιότητα των γεωλικών και τις τιμές από τη δοκιμή SPT και την εκτιμώμενη αστράγγιστη διατμητική αντοχή, για τους βραχώδεις ο δείκτης GSI ενώ για το σύνολο των γεωλικών παρουσιάζονται η διαπερατότητα τους και η αντοχή τους σε ανεμπόδιστη θλίψη. Στο παράρτημα Α παρουσιάζονται οι παρατηρήσεις από τις οποίες προέρχονται οι παρακάτω προβολές, έπειτα από ομαδοποίηση αυτών, ενώ στο παράρτημα Γ παρουσιάζεται περεταίρω φωτογραφικό υλικό από τις γεωτρήσεις.








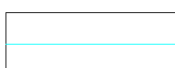



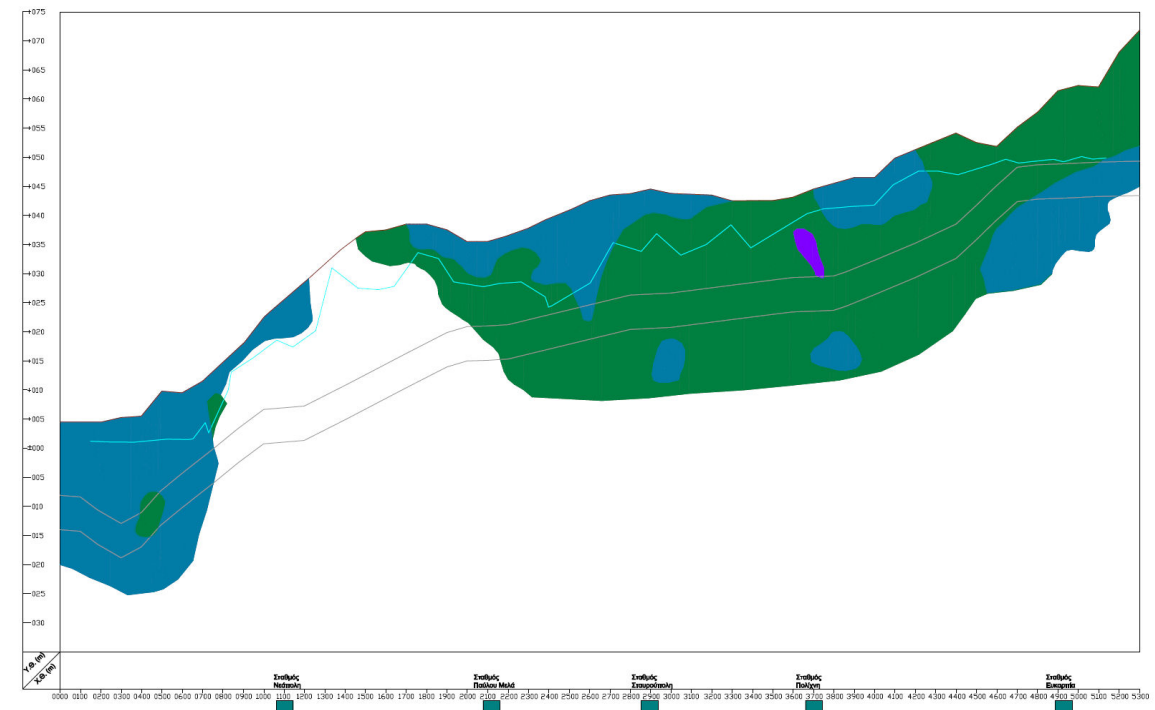
ΤΟΜΗ Τ6: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ SPT ΤΩΝ ΓΕΩΥΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΧΑΡΑΞΗΣ

ΥΠΟΜΝΗΜΑ-ΤΙΜΕΣ SPT			
	SPT 1-4		SPT 16-30
	SPT 5-8		SPT 31-50
	SPT 9-15		ΑΡΝΗΣΗ
	Εδαφική επιφάνεια		
	Στάθμη υπόγειων υδάτων ( Σεπτέμβριος 2009)		
	Άξονας σήραγγας		





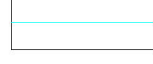
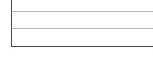


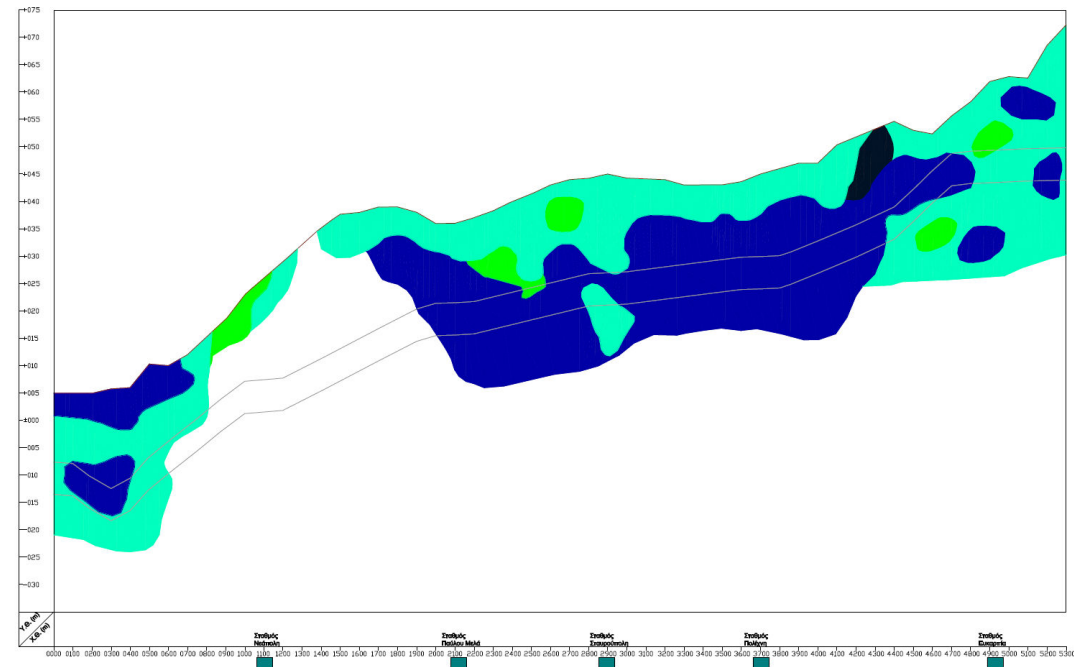
ΤΟΜΗ Τ7: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΕΚΤΙΜΟΥΜΕΝΩΝ ΤΙΜΩΝ Cu ΤΩΝ ΓΕΩΥΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΧΑΡΑΞΗΣ

ΥΠΟΜΝΗΜΑ-ΤΙΜΕΣ Cu			
	<50 kPa		200-400 kPa
	50-100 kPa		400-600 kPa
	100-200 kPa		>600 kPa
	Εδαφική επιφάνεια		
	Στάθμη υπόγειων υδάτων ( Σεπτέμβριος 2009)		
	Άξονας σήραγγας		










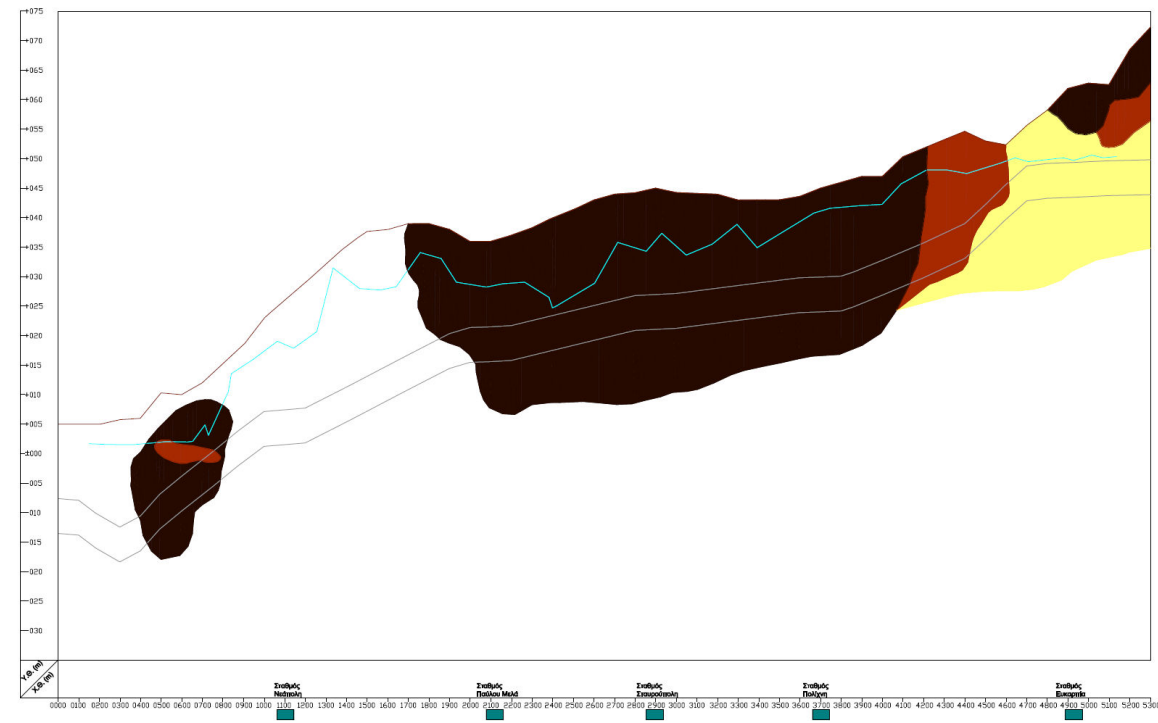
ΤΟΜΗ Τ8: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΟΡΙΟΥ ΥΔΑΡΟΤΗΤΑΣ (LL) ΤΩΝ ΓΕΩΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΧΑΡΑΞΗΣ

ΥΠΟΜΝΗΜΑ-ΤΟ ΟΡΙΟ ΥΔΑΡΟΤΗΤΑΣ (LL)	
	LL<35 (Ισχνές ή ιλυώδεις άργιλοι)
	35<=LL<50 (Ενδιάμεσες άργιλοι)
	50<=LL<90 (Παχιές έως πολύ παχιές άργιλοι)
	Εδαφική επιφάνεια
	Στάθμη υπόγειων υδάτων ( Σεπτέμβριος 2009)
	Άξονας σήραγγας









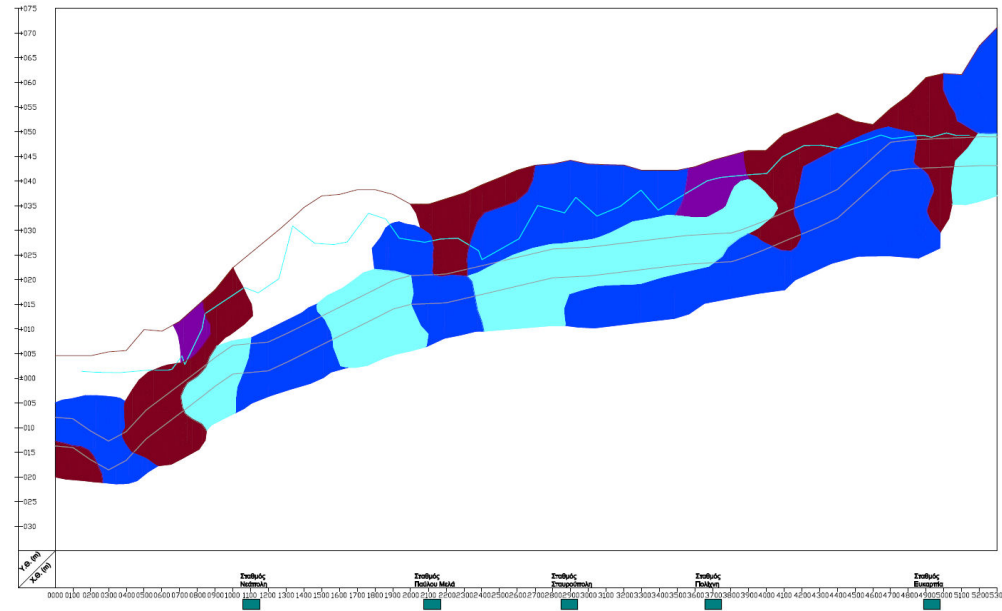
ΤΟΜΗ Τ9: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΠΛΑΣΙΜΟΤΗΤΑΣ (PI) ΤΩΝ ΓΕΩΥΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΧΑΡΑΞΗΣ

ΥΠΟΜΝΗΜΑ-ΔΕΙΚΤΗΣ ΠΛΑΣΙΜΟΤΗΤΑΣ (PI)	
	PI<7 (καθόλου πλάσιμο-ελάχιστα πλάσιμο)
	7<=PI<17 (ενδιάμεσα πλάσιμο)
	17<=PI<35 (υψηλά πλάσιμο)
	PI<=35 (υπερβολικά πλάσιμο)
	Εδαφική επιφάνεια
	Στάθμη υπόγειων υδάτων ( Σεπτέμβριος 2009)
	Άξονας σήραγγας




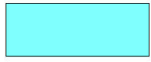

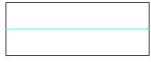



ΤΟΜΗ Τ10: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΣΥΝΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (Ic) ΤΩΝ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΧΑΡΑΞΗΣ

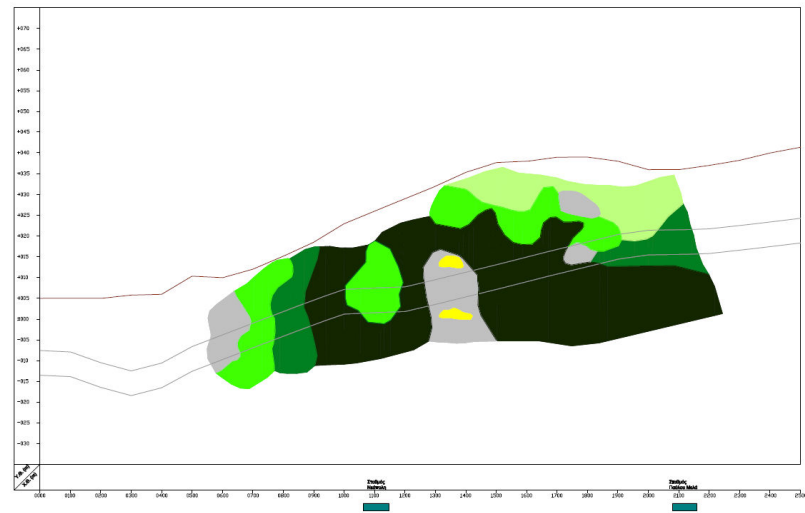
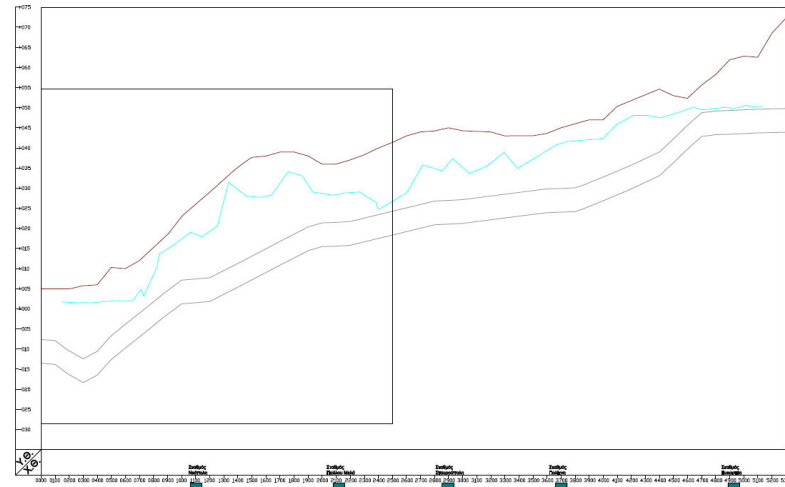
ΥΠΟΜΝΗΜΑ-ΔΕΙΚΤΗΣ ΣΥΝΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (Ic)	
	0.50<=Ic<0.75 (σταθερό)
	0.75<=Ic<1.00 (σπέρο)
	Ic>=1.00 (πολύ σπέρο έως σκληρό)
	Εδαφική επιφάνεια
	Στάθμη υπόγειων υδάτων ( Σεπτέμβριος 2009)
	Άξονας σήραγγας











ΤΟΜΗ Τ11: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΓΕΩΛΟΓΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΧΑΡΑΞΗΣ

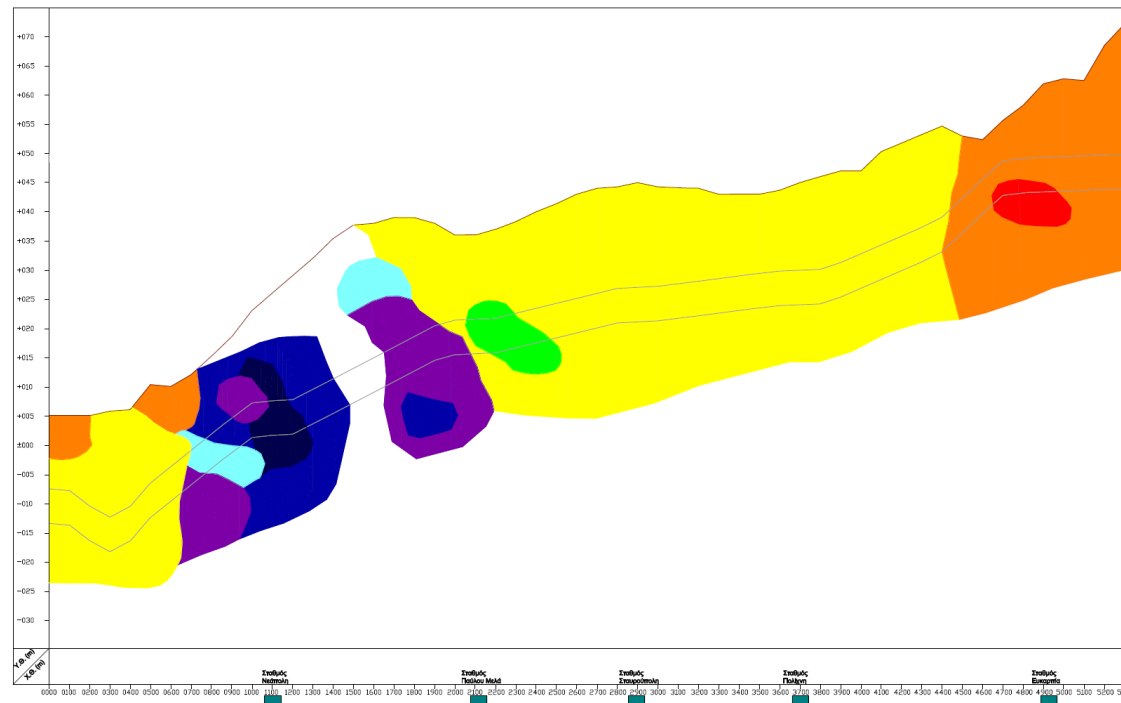
ΥΠΟΜΗΝΗΜΑ-ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ k	
	$1E-5 \leq k < 1E-4 \text{ m/sec}$
	$1E-6 \leq k < 1E-5 \text{ m/sec}$
	$1E-7 \leq k < 1E-6 \text{ m/sec}$
	$k < 1E-7 \text{ m/sec}$
	Εδαφική επιφάνεια
	Στάθμη υπόγειων υδάτων ( Σεπτέμβριος 2009)
	Άξονας σήραγγας




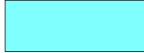










ΤΟΜΗΤ12: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ GSI ΤΩΝ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΧΑΡΑΞΗΣ

ΥΠΟΜΟΝΗΜΑ-ΤΙΜΕΣ GSI			
	GSI<20		35<GSI<45
	20<GSI<28		45<GSI<55
	28<GSI<35		GSI>55
	Εξωτερή επιφάνεια		Άξονας στήριξης



ΤΟΜΗ Τ13: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ UCS ΤΩΝ ΓΕΩΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΧΑΡΑΞΗΣ

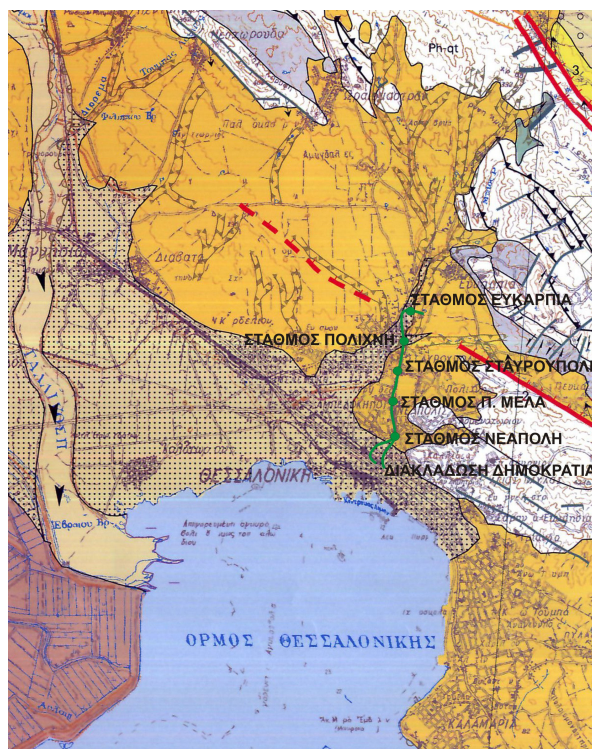
ΥΠΟΜΝΗΜΑ-ΤΙΜΕΣ UCS			
	<math>< 0.1 \text{ MPa}</math>		5-10 MPa
	0.1-0.25 MPa		10-20 MPa
	0.25-1 MPa		20-50 MPa
	1-5 MPa		>50 MPa
	Εδαφική επιφάνεια		
	Άξονας στήραγας		

## 4.4 Η τεκτονική κατά μήκος της χάραξης της επέκτασης του Μετρό της Θεσσαλονίκης προς Σταυρούπολη

### 4.4.1 Τεκτονική-Σεισμοτεκτονική (Ενεργά Ρήγματα)

Οι κυριότερες ρηξιγενείς δομές που εμφανίζονται στη πόλη της Θεσσαλονίκης είναι εφελκυστικές και έχουν διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ και σύμφωνα με νεοτεκτονικές μελέτες της ευρύτερης περιοχής (Μουντράκης et al 1997, Mercier et al 1989, Παυλίδης 1990, Tranos et al 2003) είναι γενικά δομές που δραστηριοποιήθηκαν κυρίως κατά το Πλειόκαινο-Κατώτερο Πλειστόκαινο. Οι εφελκυστικές δομές με διευθύνσεις ΔΒΔ-ΑΝΑ πιστεύεται ότι είναι παλαιότερες και έδρασαν κατά το Ανώτερο Μειόκαινο (Μουντράκης et al. 1997, Mercier et al. 1989), ενώ τα κανονικά ρήγματα με διεύθυνση Β-Ν που παρατηρούνται θεωρούνται μη ενεργά (Pavlidis et al. 1988).

Η περιοχή, στην ευρύτερη θεώρηση, είναι ενεργή τεκτονικά καθώς κατά το νεοτεκτονικό στάδιο (από το Νεογενές και κυρίως Τεταρτογενές) δημιουργήθηκαν μεγάλα τεκτονικά βυθίσματα και λεκάνες (Αξιού, Ανθεμόντα, Μυγδονίας) αποτέλεσμα του εφελκυστικού πεδίου από το μέσο-ανώτερο Μειόκαινο έως σήμερα. Ο εφελκυσμός είχε διεύθυνση ΔΒΔ-ΑΝΑ κατά το Μειόκαινο (ρήγματα ΒΑ-ΝΔ κανονικά με αριστερόστροφη συνιστώσα), ΒΑ-ΝΔ κατά το Πλειόκαινο – Κ. Πλειστόκαινο (ρήγματα ΒΔ-ΝΑ κανονικά) και Β-Ν με μικρές αποκλίσεις έχει από το Μέσο Πλειστόκαινο έως σήμερα (ρήγματα Α-Δ με επαναδραστηριοποίηση παλαιότερων τα οποία εμφανίζουν οριζόντια συνιστώσα). Συνεπώς, τα ενεργά ρήγματα που είναι δυνατόν να δράσουν σήμερα είναι τα κανονικά με διεύθυνση Α-Δ, (Σπ.Παυλίδης, Τεχν.Εκθεση 2004). Οι νεοτεκτονικές συνθήκες αποτυπώνονται στο Νεοτεκτονικό χάρτη της Θεσσαλονίκης (Φύλλο Θεσσαλονίκης, ΟΑΣΠ, 1996) όπως φαίνεται στο σχήμα 4.4.1.1, όπου διακρίνεται η επέκταση της γραμμής του Μετρό προς Σταυρούπολη. Το κυριότερο ρήγμα που χαρακτηρίζεται ως πιθανά ενεργό και τέμνει την χάραξη της επέκτασης προς Σταυρούπολη είναι το ρήγμα Ασβεστοχωρίου.



Σχήμα 4.4.1.1 : Νεοτεκτονικός χάρτης Θεσσαλονίκης με τη σχεδιαζόμενη επέκταση του Μετρό προς Σταυρούπολη  
Πηγή: ΟΑΣΠ-Φύλλο Θεσσαλονίκης(1996)

#### 4.4.2 Κατηγορίες εδάφους κατά τον ΕΑΚ κατά μήκος του άξονα χάραξης της σήραγγας

Η περιοχή της Σταυρούπολης αποτελείται κυρίως από βραχώδεις σχηματισμούς (Πρασινοσχιστόλιθους), νεογενείς ιζηματογενείς σχηματισμούς οι οποίοι ανήκουν τόσο στο Μειόκαινο, όσο και στο Πλειόκαινο και κατά θέσεις από τεταρτογενείς (Πλειστόκαινο-Ολόκαινο). Οι νεογενείς σχηματισμοί, οι οποίοι εκφράζονται εδώ με τη Σειρά των Ερυθρών Αργίλων, αποτελούνται κυρίως από αργιλώδεις ορίζοντες με ακατάστατες στρώσεις χαλικώδων και αμμώδων σχηματισμών. Οι λεπτόκοκκοι σχηματισμοί, από αργιλικό ή ιλυώδες υλικό, είναι στιφροί έως πολύ στιφροί ενώ οι αδρόκοκκοι, από αμμώδες και χαλικώδες υλικό, είναι πυκνοί έως πολύ πυκνοί. Κατά τον ΕΑΚ 2000 (Σχήμα 4.4.2.1) το συγκεκριμένο εδαφικό υλικό κατατάσσεται στη κατηγορία Β. Οι Τεταρτογενείς αποθέσεις είναι Μαλακές έως Στιφροί Αργίλοι με παρουσία άμμου ή και χαλίκων αλλά και Χαλαροί έως Μέτρια Πυκνοί αργιλώδεις/ιλυώδεις άμμοι-χάλικες και κατατάσσονται στη κατηγορία Γ. Οι βραχώδεις σχηματισμοί του αλπικού υποβάθρου κατατάσσονται στη κατηγορία Α.

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
A	Βραχώδεις ή ημιβραχώδεις σχηματισμοί εκτεινόμενοι σε αρκετή έκταση και βάθος, με τη προϋπόθεση ότι δεν παρουσιάζουν έντονη αποσάθρωση Στρώσεις πυκνού κοκκώδους υλικού με μικρό ποσοστό ιλυοαργιλικών προσμίξεων, πάχους μικρότερου των 70μ. Στρώσεις πολύ σκληρής προσυμπιεσμένης αργίλου πάχους μικρότερου των 70μ.
B	Εντόνως αποσαθρωμένα βραχώδη ή εδάφη που από μηχανική άποψη μπορούν να εξομοιωθούν με κοκκώδη. Στρώσεις κοκκώδους υλικού μέσης πυκνότητας πάχους μεγαλύτερου των 5μ. ή μεγάλης πυκνότητας πάχους μεγαλύτερου των 70μ. Στρώσεις σκληρής προσυμπιεσμένης αργίλου πάχους μεγαλύτερου των 70μ.
Γ	Στρώσεις κοκκώδους υλικού μικρής σχετικής πυκνότητας πάχους μεγαλύτερου των 5μ. ή μέσης πυκνότητας πάχους μεγαλύτερου των 70μ. Ιλυοαργιλικά εδάφη μικρής αντοχής σε πάχος μεγαλύτερο των 5μ.
Δ	Έδαφος με μαλακές αργίλους υψηλού δείκτη πλασιμότητας ( $I_p > 50$ ) συνολικού πάχους μεγαλύτερου των 10μ.
X	Χαλαρά λεπτόκοκκα αμμοίλιωδη εδάφη υπό τον υδάτινο ορίζοντα, που ενδέχεται να ρευστοποιηθούν (εκτός αν ειδική μελέτη αποκλείσει τέτοιο κίνδυνο, ή γίνει βελτίωση των μηχανικών τους ιδιοτήτων) Εδάφη που βρίσκονται δίπλα σε εμφανή τεκτονικά ρήγματα. (Βλπ. και παρ. 5.1[3]). Απότομες κλιτείς καλυπτόμενες με προϊόντα χαλαρών πλευρικών κορημάτων. Χαλαρά κοκκώδη ή μαλακά ιλυοαργιλικά εδάφη, εφόσον έχει αποδειχθεί ότι είναι επικίνδυνα από άποψη δυναμικής συμπεκνώσεως ή απώλειας αντοχής. Πρόσφατες χαλαρές επιχωματώσεις (μπάζα). Οργανικά εδάφη. Εδάφη κατηγορίας Γ με επικινδύνως μεγάλη κλίση.

Σχήμα 4.4.2.1 : Πίνακας κατηγοριών εδάφους κατά τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό  
Πηγή: ΕΑΚ 2000



## **5. Ζώνες Γεωλογικής Επικινδυνότητας κατά μήκος της χάραξης της επέκτασης του Μετρό της Θεσσαλονίκης προς Σταυρούπολη**

Προκειμένου να εκτιμηθούν οι ζώνες γεωλογικής επικινδυνότητας, όπου αναμένεται να απαντηθούν κατά τη διάνοιξη της σήραγγας κατά μήκος της χάραξης αυτής, θα καθοριστούν κάποια κριτήρια ώστε αυτό να γίνει εφικτό. Τα κριτήρια αυτά, βάσει των γεωλογικών συνθηκών όπως αυτές αναπτύσσονται κατά μήκος του άξονα της σήραγγας, καθορίζονται παρακάτω:

- Παρουσία Μαλακών Λεπτόκοκκων ή Χαλαρών Αδρόκοκκων γεωυλικών, δηλαδή υλικά χαμηλής συνεκτικότητας ή πυκνότητας
- Παρουσία γεωυλικών μέτριας συνεκτικότητας ή πυκνότητας σε περιβάλλον όπου το βάθος των υπερκειμένων είναι περιορισμένο, όπως Σταθερή έως Μέτρια Στιφρή Άργιλος/Πλύς ή Μέτρια Πυκνή Άμμο
- Μεγάλο πάχος Τεχνητών Επιχώσεων, το οποίο υπέρκειται γεωλογικών οριζόντων και σχηματισμών χαμηλής έως μέτριας συμπύκνωσης
- Σχηματισμοί γεωυλικών υψηλής υδατοπερατότητας, οι οποίοι παρουσιάζονται σε κάποιο τμήμα κατά μήκος του άξονα εκσκαφής
- Ύπαρξη ενεργών ρηγμάτων

Βάσει των παραπάνω κριτηρίων, τα οποία τέθηκαν κατά μήκος της χάραξης, κάτωθι προσδιορίζονται ζώνες οι οποίες χρίζουν ιδιαίτερης προσοχής κατά τη διάνοιξη της σήραγγας:

### **Παρουσία Μαλακών Λεπτόκοκκων ή Χαλαρών Αδρόκοκκων γεωυλικών, δηλαδή υλικά χαμηλής συνεκτικότητας ή πυκνότητας**

Από τη χιλιομετρική θέση 0+050 έως και τη χιλιομετρική θέση 0+375, στο αρχικό κομμάτι της σήραγγας, όπως και από τη χιλιομετρική θέση 4+400 έως 5+245, στο τελικό τμήμα αυτής, κατά τη διάνοιξη στο μέτωπο εκσκαφής αναμένεται να απαντηθεί η γεωλογική ενότητα των Τεταρτογενών Αποθέσεων. Τα γεωυλικά τα οποία τη συνθέτουν χαρακτηρίζονται ως χαμηλής συνεκτικότητας, όπου επικρατούν οι λεπτόκοκκοι σχηματισμοί με αυτούς να είναι κυρίως μαλακοί έως σταθεροί, και χαλαροί, έως μέτρια πυκνοί κατά τόπους, όπου επικρατούν οι αδρόκοκκοι. Η παρουσία αυτών των ιδιαίτερα πτωχής ποιότητας γεωυλικών στα παραπάνω τμήματα προσδίδουν σε αυτά το χαρακτήρα ζωνών γεωλογικής επικινδυνότητας και χρίζουν ιδιαίτερης προσοχής. Παρόμοιες πτωχές γεωλογικές συνθήκες ενδεχομένως να εμφανίζονται και περί τη χιλιομετρική θέση 2+500 και πιο συγκεκριμένα από τη Χ.Θ. 2+450 έως τη Χ.Θ. 2+540 όπου στη στέψη του μετώπου εκσκαφής της σήραγγας απαντάται η συγκεκριμένη γεωλογική ενότητα.

### **Παρουσία γεωυλικών μέτριας συνεκτικότητας ή πυκνότητας σε περιβάλλον όπου το βάθος των υπερκειμένων είναι περιορισμένο, όπως Σταθερή έως Μέτρια Στιφρή Άργιλος/Πλύς ή Μέτρια Πυκνή Άμμο**

Τμήματα τα οποία χρίζουν ιδιαίτερης προσοχής είναι το αρχικό κομμάτι της σήραγγας, από τη χιλιομετρική θέση 0+000 έως 0+375, καθώς και το τελικό, από τη χιλιομετρική θέση 4+400 έως 5+245. Από τη χιλιομετρική θέση 0+000 έως τη χιλιομετρική θέση 0+050 το μέτωπο εκσκαφής αναμένεται να απαντήσει τη γεωλογική ενότητα των Νεογενών Αποθέσεων, η οποία απαρτίζεται κυρίως από μέτρια στιφρούς σχηματισμούς ενώ το βάθος των υπερκειμένων είναι μικρό, με αυτό να κυμαίνεται από 12 έως 13m, συνεπώς ο παραπάνω συνδυασμός γεωλογικών συνθηκών αποτελεί ενδεχόμενη ζώνη επικινδυνότητας κατά τη διάνοιξη της σήραγγας. Παρόμοιες συνθήκες επίσης εμφανίζονται και από τη χιλιομετρική θέση 0+050 έως τη χιλιομετρική θέση 0+120. Με το μέτωπο της σήραγγας να απαντά πλέον τη γεωλογική ενότητα των Τεταρτογενών Αποθέσεων, οι σχηματισμοί που συναντώνται

χαρακτηρίζονται από μαλακοί έως σταθεροί με μικρό πάχος υπερκειμένων το οποίο κυμαίνεται από 12 έως 14m, καθιστώντας το συγκεκριμένο τμήμα ζώνη γεωλογικής επικινδυνότητας. Το τμήμα της σήραγγας από τη χιλιομετρική θέση 0+600 έως τη χιλιομετρική θέση 0+700 επίσης αποτελεί ζώνη γεωλογικής επικινδυνότητας καθώς συνθέεται από χαμηλής συνεκτικότητας-πυκνότητας γεωυλικά της γεωλογικής ενότητας των Νεογενών Αποθέσεων σε περιβάλλον χαμηλών υπερκειμένων τα οποία κυμαίνονται από 12 έως 14m.

### **Μεγάλο πάχος Τεχνητών Επιχώσεων, το οποίο υπέρκειται γεωλογικών οριζόντων και σχηματισμών χαμηλής έως μέτριας συμπίκνωσης**

Το πάχος των Τεχνητών Επιχώσεων κατά μήκος της χάραξης της σήραγγας εν γένει είναι σχετικά μικρό με αυτό να κυμαίνεται κυρίως από 2 έως 5m. Παρόλα αυτά δύο τμήματα της σήραγγας βάσει του τέταρτου κριτηρίου γεωλογικής επικινδυνότητας, που ορίστηκε παραπάνω, χρίζουν ιδιαίτερης προσοχής. Από τη χιλιομετρική θέση 0+000 έως τη χιλιομετρική θέση 0+100 το πάχος των Τεχνητών Επιχώσεων εκτιμάται ότι κυμαίνεται από 5 έως 6m με το πάχος των υπερκειμένων, εκτός του πάχους των Τεχνητών Επιχώσεων, από τη στέψη της σήραγγας να εκτιμάται στα 6.50m, τα οποία συνθέτονται από γεωυλικά πτωχής ποιότητας της γεωλογικής ενότητας των Τεταρτογενών Αποθέσεων. Επίσης από τη χιλιομετρική θέση 4+450 έως τη χιλιομετρική θέση 4+750 το πάχος των Τεχνητών Επιχώσεων αναμένεται να κυμαίνεται από 7 έως 5m, με το πάχος αυτών να περιορίζεται στα 2 έως 3m προς το τέλος του τμήματος, με το πάχος των εδαφικών σχηματισμών από τη στέψη της σήραγγας να ξεκινά από τα 7m και να μειώνεται μέχρι και τα 4m, με αυτούς να συνθέτονται από γεωυλικά χαμηλής συμπίκνωσης της γεωλογικής ενότητας των Τεταρτογενών Αποθέσεων. Συνεπώς λόγω του σχετικά μεγάλου πάχους των Τεχνητών Επιχώσεων σε σχέση με το πάχος των εδαφικών σχηματισμών που υπέρκειται της στέψης της σήραγγας και της κακής ποιότητας των γεωυλικών που τους συνθέτουν, βάσει του τέταρτου κατά σειρά κριτηρίου γεωλογικής επικινδυνότητας, το οποίο ορίστηκε παραπάνω, τα δύο συγκεκριμένα τμήματα κρίνονται ως ζώνες γεωλογικής επικινδυνότητας.

### **Σχηματισμοί γεωυλικών υψηλής υδατοπερατότητας, οι οποίοι παρουσιάζονται σε κάποιο τμήμα κατά μήκος του άξονα εκσκαφής**

Στη περιοχή της χάραξης της σήραγγας δεν αναμένεται εν γένει να απαντηθούν σχηματισμοί με ιδιαίτερα μεγάλες υδατοπερατότητες ( $k > 10^{-5}$  m/s). Παρόλα αυτά εμφανίζονται δύο κυρίως τμήματα τα οποία χαρακτηρίζονται από μέτριας υδατοπερατότητας γεωυλικά ( $10^{-6}$  m/s  $< k < 10^{-5}$  m/s). Τα τμήματα αυτά εμφανίζονται από τη χιλιομετρική θέση 0+265 έως 0+700 (ενδεχομένως και νωρίτερα καθώς λόγω του μειωμένου αριθμού δοκιμών υδατοπερατότητας στις αρχικές χιλιομετρικές θέσεις δεν υπάρχει επαρκής πληροφορία), όπου επικρατούν χαλαροί, χαμηλής συμπίκνωσης σχηματισμοί, τόσο της γεωλογικής ενότητας των Τεταρτογενών όσο και των Νεογενών Αποθέσεων, καθώς και από τη χιλιομετρική θέση 4+400 έως 5+245 όπου υπάρχουν εμφανίσεις σχηματισμών μέτριας διαπερατότητας της γεωλογικής ενότητας των Τεταρτογενών Αποθέσεων. Οι διαπερατότητες αυτές παρόλα αυτά δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλες ώστε να αναφερθέντα τμήματα να χαρακτηριστούν ως ζώνες γεωλογικής επικινδυνότητας, με το κριτήριο της διαπερατότητας των γεωυλικών να μην αποκτάει χαρακτήρα γεωλογικής επικινδυνότητας για την εκσκαφή της σήραγγας.

## **6. Η συμπεριφορά των γεωυλικών κατά μήκος του άξονα της σήραγγας έναντι μηχανοποιημένων μεθόδων εκσκαφής-Εκλογή του κατάλληλου τύπου μηχανήματος**

### **6.1 Εισαγωγή**

Με τη πραγματοποίηση του τεχνικογεωλογικού-γεωτεχνικού χαρακτηρισμού της ποιότητας των σχηματισμών που αναμένεται να συναντηθούν κατά τη διάνοιξη της σήραγγας, κατά μήκος της προτεινόμενης χάραξης του τεχνικού έργου, είναι δυνατό να εκτιμηθεί αντίστοιχα η συμπεριφορά αυτών κατά την εκσκαφή εφαρμόζοντας μηχανοποιημένες μεθόδους διάνοιξης κάνοντας χρήση μηχανημάτων TBM. Στη παρούσα εργασία η συμπεριφορά των σχηματισμών έναντι συμβατικών μεθόδων εκσκαφής δεν αξιολογείται, καθώς η απαίτηση για γρήγορη περάτωση του έργου και αυξημένους ρυθμούς παραγωγής οδηγεί στην επιλογή μηχανοποιημένων μεθόδων. Στην αξιολόγηση που ακολουθεί εξετάζονται οι παρακάτω τύποι μηχανήματος TBM ώστε να γίνει εκλογή του καταλληλότερου για την εκσκαφή:

- TBM με μηχανική υποστήριξη του μετώπου (TBM βράχου-Rock TBM)
- Μηχάνημα ανοικτού μετώπου με ασπίδα (Open Face Shield-OFS)
- Μηχάνημα πολφού μπετονίτη με ασπίδα (Slurry Shield TBM-SS TBM)
- Μηχάνημα εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης (Earth Pressure Balance TBM-EPB)

Το κυριότερο κριτήριο για τον έλεγχο των παραπάνω τύπων μηχανημάτων, και την εκλογή του πλέον κατάλληλου για τις εδαφικές συνθήκες της επέκτασης του Μετρό της Θεσσαλονίκης προς Σταυρούπολη, αποτελεί ο περιορισμός και η ελαχιστοποίηση, στα πλαίσια των απαιτήσεων αυτής της κατηγορίας των τεχνικών έργων, των καθιζήσεων και η πιθανότητα κατάρρευσης, ακόμα και με επιφανειακές εμφανίσεις. Παράγοντες που οδηγούν στην εμφάνιση τέτοιων προβλημάτων αποτελούν η εκδήλωση φαινομένων υπερεκσκαφών και καταρροής εδαφικού υλικού από το μέτωπο της σήραγγας.

Η καταρροή γεωυλικών είναι δυνατό να εκδηλωθεί σε χαλαρούς εδαφικούς σχηματισμούς και σε βραχώμαζες πτωχών ιδιοτήτων και ποιότητας. Αυτή εμφανίζεται είτε με τη μορφή άμεσης κατάρρευσης θόλου είτε με τη μορφή μικροολισθήσεων στο μέτωπο εκσκαφής παράλληλα σε επιφάνειες διατμήσεως, των οποίων η εξέλιξη οδηγεί σε κατάρρευση θόλου.

Δεδομένων συνεπώς των παραπάνω μηχανισμών αστοχίας εκτιμάται παρακάτω η συμπεριφορά των γεωυλικών, τα οποία αναμένεται να απαντηθούν κατά τη διάνοιξη της σήραγγας σύμφωνα και με την ανάλυση που προηγήθηκε, έναντι της πιθανότητας εκδήλωσης τέτοιων φαινομένων βάσει του εκάστοτε τύπου μηχανήματος που εξετάζεται ως προς τη δυνατότητα εφαρμογής του.

Η δυνατότητα εφαρμογής των μηχανημάτων διακρίθηκε σε κατηγορίες. Οι δύο ακραίες κατηγορίες αφορούν η μία στην αδυναμία του εκάστοτε τύπου μηχανήματος, η οποία παρουσιάζεται με κόκκινο χρώμα στο σχήμα 6 και στη τομή TM1, και υποδεικνύει μεγάλη πιθανότητα αστοχιών, και η άλλη στην εφαρμογή του μηχανήματος η οποία δε θα παρουσιάσει ιδιαίτερα προβλήματα, η οποία παρουσιάζεται με πράσινο χρώμα και υποδεικνύει ελάχιστη πιθανότητα αστοχιών. Ανάμεσα σε αυτές τις δύο κατηγορίες παρουσιάζεται μία τρίτη ως ενδιάμεση, η οποία παρουσιάζεται με μπλε χρώμα και αναφέρεται στην πιθανότητα εμφάνισης αστοχιών τοπικά, και κατά συνέπεια τη πιθανή ανάγκη για βελτίωση του υπεδάφους πριν τη διέλευση του μηχανήματος, παρά την ικανοποιητική σχετικά ποιότητα των γεωυλικών. Παρακάτω αναφέρονται λεπτομέρειες για το κάθε τύπο μηχανήματος, που σκοπό έχουν να καλύψουν την εισαγωγή που έχει γίνει πρωτύτερα, και ακολουθεί ανάλυση αυτών ως προς την εφαρμοσιμότητα τους στο συγκεκριμένο τεχνικό έργο.

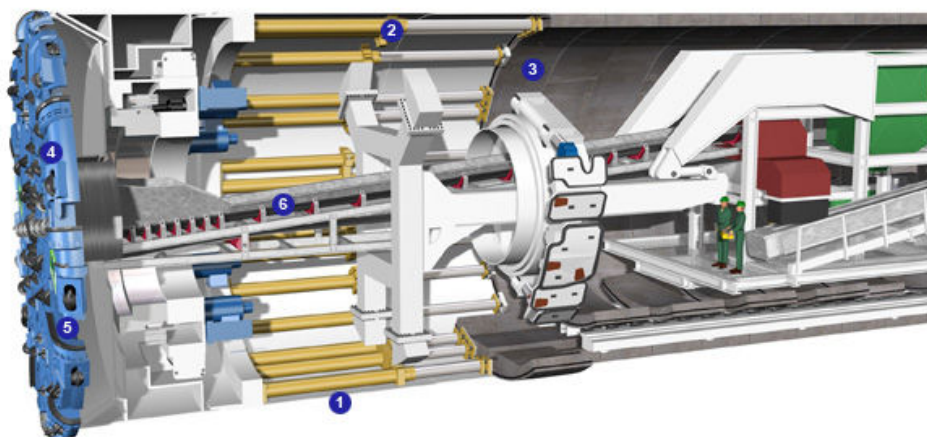


## 6.2 Μηχάνημα με μηχανική υποστήριξη του μετώπου (TBM βράχου-Rock TBM)

### 6.2.1 Γενικά

Ένα μηχάνημα TBM βράχου με μονή ασπίδα (Single Shield) ανήκει στη κατηγορία μηχανών διάνοιξης σήραγγων που περιγράφονται ως ανοικτές ασπίδες (Open Shields) και είναι μηχανήματα που δε διαθέτουν κλειστό σύστημα για να εξισορροπήσουν τη πίεση στο μέτωπο εκσκαφής. Με άλλα λόγια, δεν ορίζεται θάλαμος εκσκαφής, όπως γίνεται στα μηχανήματα κλειστού μετώπου που περιλαμβάνονται τα μηχανήματα πολφού μετεωρίτη με ασπίδα και εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης. Ο συγκεκριμένος τύπος TBM που διαθέτει ασπίδα χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου το προς εκσκαφή γεωλικό είναι κερματισμένο (τεμαχισμένες ή κερματισμένες βραχώμαζες) ή αποτελείται από μαλακούς, βραχώδεις σχηματισμούς. Παρότι προορίζονται κυρίως για ασθενείς βραχώμαζες, όπως συμπεραίνεται, διαθέτουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογής και σε ισχυρούς βραχώδεις σχηματισμούς.

Ένα μηχάνημα TBM βράχου με μονή ασπίδα παρουσιάζεται στο σχήμα 6.2.1.1. Προστατευμένη από την ασπίδα (shield-1), που είναι μία κυλινδρική, μεταλλική κατασκευή με διάμετρο λίγο μικρότερη από τη διάμετρο της σήραγγας, η μηχανή εκσκαφής προεκτείνεται και προωθείται προς τα εμπρός πρακτικώς αυτόματα. Με σκοπό να προωθηθεί το μηχάνημα προς τα εμπρός, το μηχάνημα TBM μονής ασπίδας διαθέτει υδραυλικούς κυλίνδρους ωθήσεως (hydraulic thrust cylinders-2), οι οποίοι εναποτίθενται πάνω στο τελευταία τοποθετημένο δακτύλιο σκυροδέματος της διατομής της σήραγγας (segment ring-3) και στηριζόμενοι σε αυτό δίνουν την απαραίτητη ώθηση. Η κεφαλή κοπής (cutting wheel-4), η οποία έχει διάμετρο ίση με την επιθυμητή διάμετρο της διατομής της σήραγγας, διαθέτει δίσκους κοπής για σκληρά πετρώματα, με μέγεθος που κυμαίνεται από 11 έως 20 ίντσες σε διάμετρο, και με τη μετάδοση υψηλής ώθησης μέσω αυτών δημιουργεί ρωγμές στο πέτρωμα προκαλώντας σε τεμάχια μικρού μεγέθους (chips) να αποσπαστούν από το μέτωπο εκσκαφής. Η επίπεδη, χαμηλού προφίλ κεφαλή κοπής ελαχιστοποιεί τη διαταραχή κατά την εκσκαφή στο μέτωπο και προλαμβάνει τη κατάρρευση μεγάλων τεμαχίων και τη πρόκληση μεγάλων τάσεων κατά την εκσκαφή. Το υλικό που αποσπάται από το μέτωπο μέσω κιβωτιοειδών χειλών (muck bucket lips-5), τα οποία είναι τοποθετημένα σε κάποια απόσταση από τους κοπτικούς δίσκους, κουβαλούν το εκσκαφέν υλικό πίσω από τη κεφαλή κοπής και στη συνέχεια μεταφέρεται εκτός του εργοταξιακού χώρου μέσω ενός μεταφορικού συστήματος (conveyers-6). Η εκσκαφή κατά τη διάνοιξη και η εγκατάσταση των προκατασκευασμένων στοιχείων της διατομής της σήραγγας πραγματοποιούνται διαδοχικά. Προκειμένου να στρίψει το μηχάνημα και να αλλάξει διεύθυνση ώστε να ακολουθήσει τη σχεδιασθείσα χάραξη, οι κύλινδροι ώθησης προσανατολίζουν κατάλληλα την αρθρωτή κεφαλή κοπής.



Σχήμα 6.2.1.1: Μηχάνημα TBM βράχου με ασπίδα  
Πηγή : [www.herrenknecht.com](http://www.herrenknecht.com)

Η απαιτούμενη ροπή της κεφαλής κοπής ενός μηχανήματος TBM βράχου με μονή ασπίδα είναι δυνατό να υπολογιστεί με ακρίβεια σε αντίθεση με άλλα μηχανήματα πλήρους μετώπου. Επιπρόσθετα σε πολλές άλλες παραμέτρους, η ροπή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το βαθμό διεισδύσεως των κοπτικών δίσκων και τη πίεση επαφής που ασκούν στο γεωυλικό.

### **6.2.2 Η εκτιμώμενη συμπεριφορά του μηχανήματος Rock TBM έναντι των τεχνικογεωλογικών συνθηκών του τεχνικού έργου**

Το παραπάνω μηχάνημα του συγκεκριμένου τύπου (Rock TBM) έχει ως κύριο πεδίο εφαρμογής μαλακούς ή κερματισμένους βραχώδεις σχηματισμούς. Παρόλα αυτά εφαρμογή του συγκεκριμένου τύπου σε εδαφικά υλικά αποκλείεται, ακόμα και όταν αυτά είναι σχετικά συμπαγή, καθώς λόγω της φύσης των γεωυλικών, για το συγκεκριμένο μηχάνημα, κατά την εκσκαφή πιθανότατα δεν είναι δυνατό σε εδαφικούς σχηματισμούς να αναπτυχθεί η απαιτούμενη πίεση κεφαλής πράγμα το οποίο μπορεί να οδηγήσει τα κοπτικά εργαλεία σε ανεξέλεγκτη συμπεριφορά που υποβαθμίζει περαιτέρω τη ποιότητα του υλικού που εκσκάπτεται ενώ φαινόμενα υπερεκσκαφών είναι πολύ πιθανά ανεξάρτητα από τα παραπάνω σε εδαφικούς σχηματισμούς, οδηγώντας σε ενδεχομένως μεγάλες επιφανειακές καθιζήσεις ενώ δεν αποκλείονται και γενικευμένα φαινόμενα καταρρεύσεων. Λόγω των παραπάνω η εκλογή ενός μηχανήματος βράχου απορρίπτεται για το μεγαλύτερο μέρος της επέκτασης προς Σταυρούπολη της σήραγγας του Μετρό της Θεσσαλονίκης, αφού το συγκεκριμένο μηχάνημα προορίζεται για βραχώδη γεωυλικά και όχι για εδαφικά, οπότε η συμπεριφορά του μηχανήματος έναντι της εκσκαφής κρίνεται ως υψηλής επικινδυνότητας. Για το λόγο αυτό δε θα γίνει εκτενέστερη αναφορά για κάθε ένα από τα τμήμα στα οποία έχει διακριτοποιηθεί η σήραγγα, βάσει της τεχνικογεωλογικής ανάλυσης του Κεφαλαίου 4, παρά μόνο για το τμήμα από τη χιλιομετρική θέση 0+700-2+150 όπου πρόκειται να εκσκαφτούν βραχώδη γεωυλικά.

#### **Τμήμα Χ.Θ. 0+700 έως 2+150**

Στο συγκεκριμένο τμήμα το μηχάνημα εκσκαφής θα απαντήσει τους βραχώδεις σχηματισμούς των Πρασινοσχιστολίθων της Ενότητας του Χορτιάτη, όπως έχει ήδη αναφερθεί στο Κεφάλαιο 4. Οι σχηματισμοί οποίοι αναμένεται να εκσκαφτούν, όπως προαναφέρθηκε, στο σύνολο τους συνθέτονται από βραχώμαζα μέτριας ποιότητας όπως προκύπτει από τις τιμές RQD και τις τιμές GSI που τη χαρακτηρίζουν, ενώ και οι τιμές που προέκυψαν σε δοκίμια άρρηκτου βράχου σε ανεμπόδιση θλίψη κυμαίνονται κυρίως κάτω από τα 50 MPa. Έχοντας συνεπώς εφαρμόσει τη σχέση των Hoek και Brown προκύπτει ότι η αντοχή της βραχώμαζας είναι σχετικά χαμηλή έως μέτρια και κατά συνέπεια έχουμε ένα μέτριας ποιότητας σχηματισμό (Κεφάλαιο 4/Παράρτημα Β). Επιπλέον στα παραπάνω πρέπει να προστεθεί το γεγονός ότι εντός της βραχώμαζας υφίστανται ασθενείς ζώνες, όπως έδειξε η γεωλογική και γεωτεχνική έρευνα, που ελέγχουν την εν γένει συμπεριφορά της βραχώμαζας ενώ ένα ακόμα αρνητικό στοιχείο κατά τη διάνοιξη της σήραγγας στο παρόν τμήμα με ένα μηχάνημα TBM βράχου είναι η πιθανότητα εμφάνισης υπερεκσκαφών μπροστά και πάνω από τη κοπτική κεφαλή ακόμα και σε σημεία όπου η βραχώμαζα παρουσιάζει καλύτερες ιδιότητες λόγω κερματισμού. Το γεγονός αυτό ενδεχομένως να δημιουργήσει δυσκολίες και καθυστερήσεις κατά τη προχώρηση του μηχανήματος και καθιζήσεις λόγω των κενών που πιθανόν να δημιουργηθούν, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι θα πρέπει να υπάρξει βελτίωση των γεωυλικών για να αποφευχθούν τα παραπάνω φαινόμενα. Βάσει των παραπάνω στοιχείων συνεπώς, η εκλογή ενός TBM βράχου για το βραχώδες τμήμα της χάραξης της σήραγγας κρίνεται κατάλληλο, αλλά κατά τμήματα εφόσον ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα βελτίωσης των προς εκσκαφή γεωυλικών.

### 6.2.3 Συμπεράσματα

Σε ότι αφορά το TBM βράχου (Rock TBM), οι παρατηρήσεις που συνηγορούν σε ευνοϊκές συνθήκες ή υπό προϋποθέσεις ευνοϊκές αντιστοιχούν στο 28% επί του συνόλου των παρατηρήσεων (σχήμα 6/Τομή TM1). Η έστω και κατά 40% παρουσία του μη φιλικού υλικού είναι ικανή να χαρακτηρίσει όλη τη διαδρομή ως υψηλής επικινδυνότητας, συνεπώς για το συγκεκριμένο τύπο μηχανήματος γίνεται αντιληπτό ότι η διαδρομή είναι πολύ υψηλής επικινδυνότητας καθώς το 72% επί του συνόλου των παρατηρήσεων υλικό είναι μη φιλικό έναντι της εκσκαφής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την απόρριψη του συγκεκριμένου μηχανήματος για τη διάνοιξη της επέκτασης της σήραγγας του Μετρό της Θεσσαλονίκης προς Σταυρούπολη.

## 6.3 Μηχάνημα ανοικτού μετώπου με ασπίδα (Open Face Shield-OFS)

### 6.3.1 Γενικά

Ένα μεγάλο ποσοστό σηράγγων μεγάλης διατομής έχουν εκσκαφτεί τα τελευταία χρόνια σε με ασπιδοφόρα μηχανήματα ολομέτωπης κοπής, με τη σύγχρονη τοποθέτηση των στοιχείων επένδυσης από σκυρόδεμα (segments). Ο συγκεκριμένος τύπος μηχανής μπορεί να χρησιμοποιηθεί υπό προϋποθέσεις και σε βραχώδεις σχηματισμούς χαμηλής σκληρότητας.

Η εκσκαφή και η αντιστήριξη της σήραγγας κατά τη διάνοιξη πραγματοποιείται μέσα στη προστατευμένη από την ασπίδα περιοχή. Η αντιστήριξη των τοιχωμάτων της σήραγγας εξασφαλίζεται με τη τοποθέτηση των προκατασκευασμένων στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα σε σχήμα δακτυλίου. Οι δακτύλιοι μπορούν να σχεδιαστούν με τέτοιο τρόπο ώστε να αποτελέσουν τη τελική επένδυση της σήραγγας ή να χρησιμοποιηθούν ως μέτρα προσωρινής υποστήριξης μέχρι να μπει η τελική επένδυση.

Μια εναλλακτική μορφή αυτού του τύπου είναι η μηχανή με διπλή, τηλεσκοπική ασπίδα η οποία επιτρέπει τη προχώρηση της κεφαλής με ή χωρίς τη σύγχρονη τοποθέτηση των σπονδυλωτών δακτυλίων. Το μήκος του συγκεκριμένου τύπου μηχανήματος είναι μεγαλύτερο σε σχέση με αυτό της μονής ασπίδας. Το λειτουργικό φάσμα του μηχανήματος αυτού είναι μεγαλύτερη σε σχέση με αυτό της απλής ασπίδας καθώς έχει τη δυνατότητα να διατρήσει και σκληρότερους σχηματισμούς. Επίσης παρέχει ταυτόχρονα τη δυνατότητα συνεχούς λειτουργίας χωρίς διακοπή για τη τοποθέτηση των δακτυλίων αντιστήριξης.

Για την αποφυγή του κινδύνου σφηνώσεως ή μεγάλων παραμορφώσεων της ασπίδας του μηχανήματος, κάτι που μπορεί να οφείλεται σε μεγάλο βάρος υπερκειμένων, καθώς και για τη βελτίωση της κατευθυντικότητας του μηχανήματος, το μήκος της ασπίδας πρέπει να είναι όσο το δυνατό πιο μικρό γίνεται.

Οι κενοί χώροι που δημιουργούνται πίσω από τους προκατασκευασμένους δακτυλίους πληρώνονται με ειδικό ένεμα (grouting) ώστε να διασφαλίζεται η πρόσφυση μεταξύ δακτυλίου-υπεδάφους. Για τη παρεμπόδιση της εισροής υπογείων υδάτων ή του υλικού πληρώσεως μέσα στη σήραγγα, λόγω της υψηλότερης πίεσης στην επαφή εδάφους-δακτυλίου από αυτή στο εσωτερικό της σήραγγας, το μηχάνημα είναι εφοδιασμένο με παράλληλες σειρές διαφραγμάτων συρματόβουρτσας (wire brush) που βρίσκονται κάτω από την ουρά της ασπίδας.

Οι φάσεις λειτουργίας του μηχανήματος (σχήμα 6.3.1.1) ανά κύκλο κατά τη διάρκεια της διάνοιξης ακολουθούν τη παρακάτω σειρά: Με τη περιστροφή της κοπτικής κεφαλής, η οποία εδράζεται μέσα στην εμπρόσθια ασπίδα, κόβεται το υλικό και καταπίπτει στο πυθμένα της ασπίδας. Η απαραίτητη για τη διεύθυνση ώθηση αναπτύσσεται από τους κυλίνδρους προώθησης, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι περιφερειακά μέσα στην ασπίδα και στηρίζονται στον τελευταίο προς το μέτωπο δακτύλιο. Συνήθως μεταξύ του δακτυλίου και των εμβόλων ώθησης παρεμβάλλεται ένας μεταλλικός δακτύλιος, για τη προστασία του πρώτου από φθορές καθώς και ομοιόμορφη άσκηση πίεσης στο δεύτερο. Κατά τη διάρκεια της φάσης εκσκαφής η ασπίδα προωθείται κατά διάστημα ίσο με το πλάτος του δακτυλίου υποστήριξης

(συνήθως 0.6 έως 1.5m μήκος). Η ουρά της ασπίδας, η οποία είναι ενωμένη με τη κύρια ασπίδα ελευθερώνει κατά τη προώθηση το χώρο μεταξύ των τοποθετημένων δακτυλίων και του γεωλικού και ο χώρος αυτός γεμίζει με το υλικό πληρώσεως. Όταν εξαντληθεί η διαδρομή των εμβόλων ώθησης, συμπύσσονται τα έμβολα μαζί με το μεταλλικό δακτύλιο και ελευθερώνεται ο χώρος για τη τοποθέτηση των δακτυλίων. Κάτω από τη προστασία του οπίσθιου τμήματος της ασπίδας τοποθετούνται με τη βοήθεια ανυψωτή τα στοιχεία του νέου δακτυλίου. Ο δακτύλιος πίεσης ασκείται πάνω στο νέο δακτύλιο αντιστήριξης και επαναλαμβάνεται έτσι η νέα φάση εκσκαφής.



*Σχήμα 6.3.1.1: Μηχάνημα ανοικτού μετώπου με ασπίδα (OFS)  
Πηγή : [www.ametro.gr](http://www.ametro.gr)*

### **6.3.2 Η εκτιμώμενη συμπεριφορά του μηχανήματος OFS έναντι των τεχνικογεωλογικών συνθηκών του τεχνικού έργου**

Ο συγκεκριμένος τύπος μηχανήματος ανοικτού μετώπου με ασπίδα (OFS-TBM) έχει κύριο πεδίο εφαρμογής σε βραχώδεις σχηματισμούς μέτριας ποιότητας, μαλακά πετρώματα και συμπαγείς εδαφικούς σχηματισμούς, σε αντίθεση με χαλαρούς εδαφικούς σχηματισμούς και ασθενείς ή πολύ αποσαθρωμένες βραχώμαζες καθώς και πολύ ισχυρές βραχώμαζες όπου το συγκεκριμένο μηχάνημα αντιμετωπίζει εν γένει δυσκολίες κατά τη διάνοιξη. Προκειμένου να διαπιστωθεί η αποδοτικότητα του μηχανήματος και η καταλληλότητα αυτού για να χρησιμοποιηθεί για τη διάνοιξη της σήραγγας της επέκτασης του Μετρό της Θεσσαλονίκης προς Σταυρούπολη θα εξετασθεί κάθε τμήμα της σήραγγας ξεχωριστά και βάσει της τεχνικογεωλογικής ανάλυσης των αναμενόμενων προς εκσκαφή σχηματισμών, η οποία έχει προηγηθεί, θα οριστεί η καταλληλότητα ή μη του μηχανήματος και σε ποια τμήματα.

Η καταλληλότητα εν γένει του μηχανήματος αναμένεται να κατατάσσεται σε τρεις κατηγορίες :

- Φιλική συμπεριφορά του μηχανήματος έναντι εκσκαφής
- Φιλική συμπεριφορά του μηχανήματος έναντι εκσκαφής με περιστασιακά προβλήματα και τοπικές ενδεχομένως αστοχίες λόγω υπερεκσκαφών
- Υψηλή επικινδυνότητα λόγω υπερεκσκαφών, αυξημένων καθιζήσεων και παραμορφώσεων και εμφάνιση γενικευμένων αστοχιών

Στη πρώτη κατηγορία εν γένει δεν αναμένονται προβλήματα κατά την εκσκαφή και το μηχάνημα κρίνεται ως κατάλληλο για τη διάνοιξη. Στη δεύτερη κατηγορία η συμπεριφορά του μηχανήματος έναντι της εκσκαφής είναι εν γένει καλή, με τη πιθανότητα εμφάνισης αστοχιών να είναι σχετικά μειωμένη αλλά κατά τόπους να εμφανίζονται προβλήματα

κάνοντας απαραίτητη τη τοπική βελτίωση των γεωυλικών για να αποφευχθούν. Στη τρίτη κατηγορία το μηχάνημα έχει μεγάλη πιθανότητα να αντιμετωπίσει προβλήματα αστοχιών και κρίνεται εν γένει ως ακατάλληλο για την εκσκαφή.

Πιο συγκεκριμένα :

- Κατά τη διάνοιξη σε μέτριας ποιότητας βραχώμαζα ή/και σε συμπαγείς εδαφικούς σχηματισμούς
  - Απαραίτητος ο ικανός χρόνος αυτοϋποστήριξης του μετώπου
  - Άμεση αντιμετώπιση μικροκαταπτώσεων
  - Δυνατότητα επέμβασης στο μέτωπο και τοπικής βελτίωσης του γεωυλικού
- Κατά τη διάνοιξη σε ασθενή ή/και πολύ αποσθρωμένη βραχώμαζα ή/και σε χαλαρούς εδαφικούς σχηματισμούς
  - Προβλήματα λόγω μικρού χρόνου αυτοϋποστήριξης
  - Κίνδυνος μεγάλων υπερεκσκαφών, αύξηση καθιζήσεων ή και ολική κατάρρευση
  - Ανάγκη γενικότερης εκ των προτέρων βελτίωσης του υλικού από την επιφάνεια

Παρακάτω ακολουθεί ανάλυση για κάθε ένα από τα τμήματα στα οποία διακριτοποιήθηκε η σήραγγα κατά μήκος της χάραξης αυτής βάσει των γεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών που επικρατούν σε αυτά.

#### **Τμήμα Χ.Θ. 0+000 έως 0+050**

Στο συγκεκριμένο τμήμα η σήραγγα, όπως έχει ήδη αναφερθεί στο Κεφάλαιο 4, θα βρίσκεται μέσα στη γεωλογική ενότητα των «Νεογενών Αποθέσεων». Οι σχηματισμοί που αναμένεται να συναντήσει το μέτωπο της εκσκαφής κατά τη διάνοιξη της σήραγγας εκτιμάται ότι θα είναι κυρίως χαλαροί, βάσει της τεχνικογεωλογικής ανάλυσης που έχει προηγηθεί, κατά συνέπεια ενδέχεται να εμφανιστούν φαινόμενα υπερεκσκαφών τα οποία ενδέχεται να δημιουργήσουν παραμορφώσεις που θα απειλήσουν την ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής και το ίδιο το μηχάνημα δημιουργώντας πιθανά προβλήματα σφηνώσεως. Επιπλέον όπως παρουσιάζεται από τη τομή T1 η στέψη του μετώπου εκσκαφής βρίσκεται πολύ κοντά στη γεωλογική ενότητα των «Τεταρτογενών Αποθέσεων» που χαρακτηρίζεται και αυτή από χαλαρούς σχηματισμούς. Το πάχος της υπερκείμενης ζώνης που αφορά τη συγκεκριμένη γεωλογική ενότητα είναι σχετικά μικρό (5-7m) ενώ το πάχος των Τεχνητών Επιχώσεων που υπέρκειται αυτών είναι της τάξης των 5m. Από τα παραπάνω οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι επειδή η ζώνη πάνω από τη στέψη χαρακτηρίζεται από χαλαρά γεωυλικά και σχετικά μικρά βάθη, φαινόμενα υπερεκσκαφών ενδεχομένως να οδηγήσουν σε αστοχίες που θα προκαλέσουν επιφανειακές καθιζήσεις ενώ και ο κίνδυνος για ολική κατάρρευση είναι πολύ πιθανός. Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι ο συγκεκριμένος τύπος μηχανήματος δεν κρίνεται κατάλληλος για αυτό το τμήμα της σήραγγας.

**Σημείωση :** Τα παραπάνω συμπεράσματα οφείλονται σε ποιοτικές μόνο περιγραφές καθώς η παρεχόμενη πληροφορία είναι περιορισμένη και απαιτείται περισσότερη διερεύνηση

#### **Τμήμα Χ.Θ. 0+050 έως 0+375**

Το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας στο συγκεκριμένο τμήμα αναμένεται να απαντήσει τη γεωλογική ενότητα των «Τεταρτογενών Αποθέσεων» όπως έχει προκύψει από τη γεωλογική έρευνα, ενώ χαρακτηριστικά αναφέρεται και στο Κεφάλαιο 6 ως ζώνη γεωλογικής επικινδυνότητας. Οι εδαφικοί σχηματισμοί οι οποίοι αναμένεται να εκσκαφτούν εκτιμάται ότι συνίστανται κυρίως από λεπτόκοκκα γεωυλικά μαλακής έως κυρίως σταθερής φύσης, όπως υποδεικνύουν οι περιγραφές των γεωυλικών, ενώ οι ενδεχόμενες εμφανίσεις αδρόκοκκων γεωυλικών εκτιμάται ότι θα συνίστανται από χαλαρούς έως μέτριας πυκνότητας σχηματισμούς. Οι εδαφικοί σχηματισμοί συνεπώς που αναμένεται να εκσκαφτούν δεν είναι

συμπαγείς και πιθανότατα θα παρουσιαστούν αρκετά μεγάλες παραμορφώσεις στο εσωτερικό της σήραγγας, οι οποίες ενδεχομένως να οδηγήσουν σε φαινόμενα σφήνωσης του μηχανήματος TBM και σε απώλεια ευστάθειας του μετώπου. Οι μεγάλες παραμορφώσεις επίσης ενδέχεται να έχουν και επιφανειακές εμφανίσεις με την εμφάνιση καθιζήσεων καθώς η υπερκείμενη ζώνη πάνω από το επίπεδο της σήραγγας εκτιμάται ότι διαθέτει και αυτή πτωχής ποιότητας γεωλικά, βάσει της τεχνικογεωλογικής έρευνας και ανάλυσης. Η πιθανότητα επίσης ενδεχόμενων υπερεκσκαφών με περεταίρω εμφάνιση προβλημάτων, φύσης ίδιας με αυτών που αναφέρθηκαν παραπάνω, είναι και αυτή σημαντική καθώς μαλακοί σχηματισμοί δεν αποκλείεται να βρίσκονται εντός των σταθερών. Από τα παραπάνω προκύπτει το συμπέρασμα ότι το μηχάνημα ανοικτού μετώπου με ασπίδα δεν είναι κατάλληλο για την εκσκαφή του συγκεκριμένου τμήματος.

### **Τμήμα Χ.Θ. 0+375 έως 0+600**

Στο συγκεκριμένο τμήμα το μέτωπο της εκσκαφής της σήραγγας αναμένεται να απαντήσει τη γεωλογική ενότητα των «Νεογενών Αποθέσεων», με το πάχος των υπερκείμενων να είναι σχετικά μεγάλο, καθώς κυμαίνεται μεταξύ των 14m και 16m, και το μεγαλύτερο ποσοστό αυτών να συνθέτεται από γεωλικά της γεωλογικής ενότητας των «Τεταρτογενών Αποθέσεων». Οι εδαφικοί σχηματισμοί οποίοι αναμένεται να εκσκαφτούν, όπως προέκυψε από τις δοκιμές (κοκκομετρική ανάλυση και επί τόπου δοκιμές SPT) που πραγματοποιήθηκαν επί των γεωλικών τους, εκτιμάται ότι θα συνθέτονται τόσο από λεπτόκοκκα όσο και από αδρόκοκκα γεωλικά. Οι λεπτόκοκκοι σχηματισμοί θα είναι κυρίως στιφροί (stiff) με τις τιμές της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής να εκτιμάται ότι κυμαίνονται μεταξύ των 200 και 400 kPa περίπου. Από αυτό συμπεραίνεται ότι τα λεπτόκοκκα γεωλικά πιθανότατα είναι σχετικά καλής ποιότητας και δε θα δημιουργήσουν σοβαρά προβλήματα. Παρόλα αυτά, μέσα σε αυτά τα καλής σχετικά ποιότητας γεωλικά θα βρίσκονται και αδρόκοκκοι σχηματισμοί οι οποίοι είναι χαλαροί έως κυρίως μέτριας πυκνότητας που ενδέχεται να δημιουργήσουν προβλήματα ευστάθειας του μετώπου κατά την εκσκαφή και κατά συνέπεια θα πρέπει να υπάρχει δυνατότητα επέμβασης σε αυτό και βελτίωσης των γεωλικών. Επίσης λόγω του μικρού πάχους των «Νεογενών Αποθέσεων» που μεσολαβεί από τη στέψη της σήραγγας και της εκτιμώμενης επαφής μεταξύ αυτών και των χαλαρών σχηματισμών των «Τεταρτογενών Αποθέσεων» δημιουργία παραμορφώσεων λόγω των όχι καλής ποιότητας κατά τόπους γεωλικών μπορεί να οδηγήσει σε επιφανειακές καθιζήσεις και για το λόγο αυτό ενδεχομένως να κρίνεται απαραίτητο να πραγματοποιηθεί βελτίωση αυτών εκ των προτέρων από την επιφάνεια. Για τους παραπάνω λόγους κρίνεται ότι το μηχάνημα OFS θα μπορούσε εκσκάψει το συγκεκριμένο τμήμα αλλά περιστασιακά θα αντιμετωπίζει πιθανότατα προβλήματα που θα πρέπει να αντιμετωπιστούν με βελτίωση των εδαφικών συνθηκών πριν από την εκσκαφή.

### **Τμήμα Χ.Θ. 0+600 έως 0+700**

Στο συγκεκριμένο τμήμα, όπως έχει ήδη αναφερθεί στο Κεφάλαιο 4, το μηχάνημα εκσκαφής αναμένεται να συναντήσει μικτές συνθήκες μετώπου καθώς κατά τη διάνοιξη απαντώνται τόσο η γεωλογική ενότητα των «Νεογενών Αποθέσεων» όσο και το βραχώδες υπόβαθρο των Πρασινοσχιστόλιθων της «Ενότητας Χορτιάτη». Τα επικρατούντα γεωλικά των εδαφικών σχηματισμών είναι κυρίως λεπτόκοκκης φύσης, όπως προκύπτει από τη κοκκομετρική ανάλυση αυτών, παρουσιάζοντας κυρίως σταθερή συμπεριφορά, με μαλακούς σχηματισμούς να υπέρκεινται αυτών. Αδρόκοκκοι σχηματισμοί εμφανίζονται μεμονωμένα και είναι κυρίως μέτριας πυκνότητας. Συνεπώς τα εδαφικά υλικά στο συγκεκριμένο κομμάτι της σήραγγας παρουσιάζουν μίας μέτριας προς χαμηλής ποιότητας εικόνα ιδιαίτερα πλησίον της ζώνης της στέψης της σήραγγας όπου ενδεχομένως να εμφανίζονται φαινόμενα υπερεκσκαφών και μεγάλες παραμορφώσεις κατά την εκσκαφή, λόγω και του μικρού πάχους που μεσολαβεί ανάμεσα στη στέψη της σήραγγας και στην επαφή της «Σειράς των Ερυθρών Αργίλων» με τις «Τεταρτογενείς Αποθέσεις». Η προς εκσκαφή βραχώμαζα επίσης χαρακτηρίζεται ως ένα χαμηλής ποιότητας υλικό, πτωχών μηχανικών ιδιοτήτων, όπως

υποδεικνύουν τόσο οι τιμές του GSI όσο και οι τιμές RQD πράγμα το οποίο οφείλεται σε έντονη αποσάθρωση του βραχώδους σχηματισμού πλησιάζοντας προς τις ανώτερες εδαφικές ζώνες, συνεπώς ενδέχεται να εμφανιστούν προβλήματα λόγω του πιθανώς μικρού χρόνου αυτούποστήριξης της βραχόμαζας και πιθανότατα εκτεταμένων καταπτώσεων υλικού και υπερεκσκαφών, που θα οδηγήσουν ενδεχομένως και σε επιφανειακές καθιζήσεις, λόγω και της πτωχής ποιότητας γεωυλικών των υπερκείμενων στρωμάτων. Για τους παραπάνω λόγους το μηχάνημα OFS κρίνεται ακατάλληλο για τη διάνοιξη του συγκεκριμένου τμήματος.

### **Τμήμα Χ.Θ. 0+700 έως 2+150**

Για τα περίπου 1.5km του συγκεκριμένου τμήματος το μηχάνημα εκσκαφής να βρίσκεται εξολοκλήρου μέσα τη γεωλογική ενότητα του Χορτιάτη που συνθέτει το αλπικό υπόβαθρο της περιοχής της Θεσσαλονίκης. Το πάχος των υπερκείμενων είναι σχετικά μεγάλο και κυμαίνεται μεταξύ 14 και 24m με το μεγαλύτερο ποσοστό αυτών να οφείλεται κυρίως σε υλικό ίδιας φύσης με το υλικό που πρόκειται να εκσκαφτεί. Από το προσδιορισμό του Δείκτη Γεωλογικής Αντοχής (GSI) και από τις τιμές RQD, που ελήφθησαν από τις δειγματοληπτικές γεωτρήσεις, η βραχόμαζα που αναμένεται να εκσκαφτεί είναι κυρίως μέτριας ποιότητας στο σύνολο της. Επιπλέον από τις δοκιμές σε ανεμπόδιση θλίψη άρρηκτων δοκιμίων βράχου σε σχέση με το προσδιορισμό του GSI και το προσδιορισμό της αντοχής της βραχόμαζας  $\sigma_{cm}$  σε σχέση με το βάρος των υπερκείμενων δεν αναμένονται προβλήματα συγκλίσεων, ώστε να απειληθεί το μηχάνημα (φαινόμενα σφηνώσεως (squeezing ground conditions)) (Παράρτημα Β) ή να εμφανιστούν προβλήματα καθιζήσεων στις επιφανειακές στρώσεις όπου τα γεωυλικά είναι πτωχότερων ιδιοτήτων. Παρόλα αυτά υπάρχουν μεμονωμένες ζώνες όπου η ποιότητα της βραχόμαζας αναμένεται να δημιουργήσει προβλήματα κατά την εκσκαφή, καθώς όπως έχει φανεί από την τεχνικογεωλογική ανάλυση, είναι ιδιαίτερα χαμηλή λόγω είτε έντονης αποσάθρωσης του βραχώδους υλικού είτε λόγω τεκτονισμού όπου το υλικό παρουσιάζεται έντονα διατμημένο και κερματισμένο. Ενδεχόμενες αστοχίες επίσης μπορεί να οφείλονται σε καταπτώσεις υλικών λόγω των ασυνεχειών (προσανατολισμό, τραχύτητα, υλικό πλήρωσεως κλπ) οι οποίες θα πρέπει να ελεγχθούν. Για το λόγω αυτό πρέπει να υπάρχει δυνατότητα επέμβασης στο μέτωπο ώστε να βελτιωθούν οι ιδιότητες του υλικού τοπικά προκειμένου να μην εμφανιστούν φαινόμενα υπερεκσκαφών και καταπτώσεων υλικού. Από τα παραπάνω συνεπώς το μηχάνημα OFS είναι κατάλληλο για εκσκαφή στο συγκεκριμένο τμήμα όμως σε μεμονωμένες ζώνες θα πρέπει να βελτιωθεί το προς εκσκαφή υλικό τοπικά προκειμένου να αποφευχθούν πιθανά προβλήματα.

### **Τμήμα Χ.Θ. 2+150 έως 3+300**

Από τη χιλιομετρική θέση 2+150 έως τη χιλιομετρική θέση 3+300 τα γεωυλικά τα οποία πρόκειται να εκσκαφτούν ανήκουν στη γεωλογική ενότητα των «Νεογενών Αποθέσεων» και το πάχος των υπερκείμενων γαιών κυμαίνεται μεταξύ των 14 και 16m. Οι σχηματισμοί οι οποίοι βρίσκονται στο βάθος του μετώπου εκσκαφής συνίστανται κυρίως από καλής ποιότητας λεπτόκοκκα γεωυλικά, τα οποία χαρακτηρίζονται κυρίως πολύ σφιγρά, όπως φαίνεται και από τις πραγματοποιηθείσες δοκιμές, ενώ βάσει των υψηλών τιμών της δοκιμής SPT από την εμπειρική σχέση του Terzaghi προκύπτει ότι τα γεωυλικά αυτά διαθέτουν επίσης υψηλές τιμές αστράγγιστης διατμητικής αντοχής. Πρόκειται συνεπώς για συμπαγείς εδαφικούς σχηματισμούς ενώ και πιο αδρόκοκκοι σχηματισμοί όπου εμφανίζονται είναι και αυτοί πυκνοί έως πολύ πυκνοί. Προβλήματα ενδέχεται να εμφανιστούν πιθανότατα μόνο περί τη χιλιομετρική θέση 2+400-2+700 όπου το πάχος μεταξύ της στέψης της σήραγγας και των χαλαρών σχηματισμών των «Τεταρτογενών Αποθέσεων» είναι σχετικά μικρό και μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα λόγω παραμορφώσεων, όπως καθιζήσεις στα επιφανειακά στρώματα, αν δε πραγματοποιηθεί τοπικά βελτίωση των εδαφικών συνθηκών. Ο συγκεκριμένος τύπος μηχανήματος συνεπώς κρίνεται κατάλληλος για τη διάνοιξη της σήραγγας σε αυτό το τμήμα με εμφάνιση προβλημάτων σε μεμονωμένες θέσεις.

### **Τμήμα Χ.Θ. 3+300 έως 4+400**

Στο συγκεκριμένο τμήμα της χάραξης της σήραγγας εμφανίζονται κυρίως λεπτόκοκκοι σχηματισμοί που ανήκουν στη γεωλογική ενότητα των «Νεογενών Αποθέσεων». Οι σχηματισμοί αυτοί χαρακτηρίζονται από υψηλές τιμές SPT, και κατά συνέπεια από υψηλές τιμές αστράγγιστης διατμητικής αντοχής όπως προέκυψε από τη γεωτεχνική ανάλυση στο Κεφάλαιο 4, και είναι κυρίως στιφρής έως πολύ στιφρής φύσης. Μεμονωμένες εμφανίσεις φακών αδρόκοκκων υλικών δεν επηρεάζουν δυσμενώς τη συνολική συμπεριφορά των προς εκσκαφή σχηματισμών καθώς χαρακτηρίζονται και αυτοί από μεγάλη σχετικά πυκνότητα με χαλαρότερους σχηματισμούς να εντοπίζονται εκτός του βάθους εκσκαφής στα ανώτερα εδαφικά στρώματα. Επιπλέον το πάχος των υπερκειμένων μεταξύ της στέψης της σήραγγας και των χαλαρότερων γεωυλικών των «Τεταρτογενών Αποθέσεων» είναι σχετικά μεγάλο και εκτιμάται ότι δε θα υπάρξουν προβλήματα λόγω αυτών κατά την εκσκαφή. Συνεπώς από τα παραπάνω κρίνεται ότι η συμπεριφορά του μηχανήματος έναντι της εκσκαφής θα είναι φιλική.

### **Τμήμα Χ.Θ. 4+400 έως 5+245**

Στο τελευταίο κομμάτι της χάραξης τα προς εκσκαφή γεωυλικά ανήκουν στη γεωλογική ενότητα των «Τεταρτογενών Αποθέσεων». Όπως και τα αρχικά τμήματα της σήραγγας έτσι και αυτό βρίσκεται σε χαμηλής ποιότητας γεωυλικά, τόσο λεπτόκοκκης όσο και αδρόκοκκης, πτωχών μηχανικών ιδιοτήτων, τα οποία χαρακτηρίζονται από μαλακούς έως σταθερούς λεπτόκοκκους σχηματισμούς και από χαλαρούς έως μέτρια πυκνούς αδρόκοκκους. Τα υπερκείμενα συνίστανται από παρόμοιας φύσης γεωυλικά. Κατά συνέπεια, το μηχάνημα κατά τη διάνοιξη πιθανότατα θα αντιμετωπίσει προβλήματα υπερεκσκαφών λόγω του χαλαρού χαρακτήρα των γεωυλικών καθώς και μεγάλες παραμορφώσεις λόγω των πτωχών, μηχανικών τους ιδιοτήτων πράγμα το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλες επιφανειακές καθιζήσεις και ενδεχομένως εκτεταμένης έκτασης καταρρεύσεις όπου το βάθος εκσκαφής πλησιάζει τα επιφανειακά στρώματα. Ο συγκεκριμένος τύπος μηχανήματος συνεπώς κρίνεται ακατάλληλος για την εκσκαφή της σήραγγας.

### **6.3.3 Συμπεράσματα**

Το μηχάνημα με ασπίδα ανοικτού μετώπου (OFS) παρουσιάζει εν γένει το πλεονέκτημα ότι παρέχει τη δυνατότητα για άμεσες επεμβάσεις στο μέτωπο εκσκαφής. Παρόλα αυτά έχει το μειονέκτημα ότι δε μπορεί να καλύψει όλες τις περιπτώσεις ασθενών εδαφικών συνθηκών, όπου θα υπάρχει μεγάλη πιθανότητα άμεσης κατάρρευσης του μετώπου. Από το σύνολο των παρατηρήσεων κρίνεται ότι ο συγκεκριμένος τύπος μηχανήματος μπορεί να ανταποκριθεί ικανοποιητικά έναντι της εκσκαφής στο 70% της διαδρομής. Το τμήμα αυτό της χάραξης της σήραγγας εντοπίζεται στα καλής ποιότητας γεωυλικά των Νεογενών Αποθέσεων στο κεντρικό τμήμα της σήραγγας. Από τα υπόλοιπα τμήματα το 25% της διαδρομής τα γεωυλικά που πρόκειται να εκσκαφτούν κρίνονται ως μη φιλικά έναντι της εκσκαφής, και εντοπίζονται κυρίως στα αρχικό και τελικό τμήμα της σήραγγας, ενώ σε ποσοστό περίπου 5% κρίνεται ότι θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί η εκσκαφή αλλά έπειτα από βελτίωση των συνθηκών πριν από τη διάνοιξη. Αν και το ποσοστό όπου το μηχάνημα ανοικτού μετώπου με ασπίδα αναμένεται να παρουσιάσει μη φιλική συμπεριφορά έναντι της εκσκαφής είναι μικρό (25% επί του συνόλου της διαδρομής) παρόλα αυτά είναι αρκετά σημαντικό ώστε ο συγκεκριμένος τύπος μηχανήματος να μη κρίνεται κατάλληλος για τη διάνοιξη της σήραγγας επέκτασης(σχήμα 6/Τομή TM1).

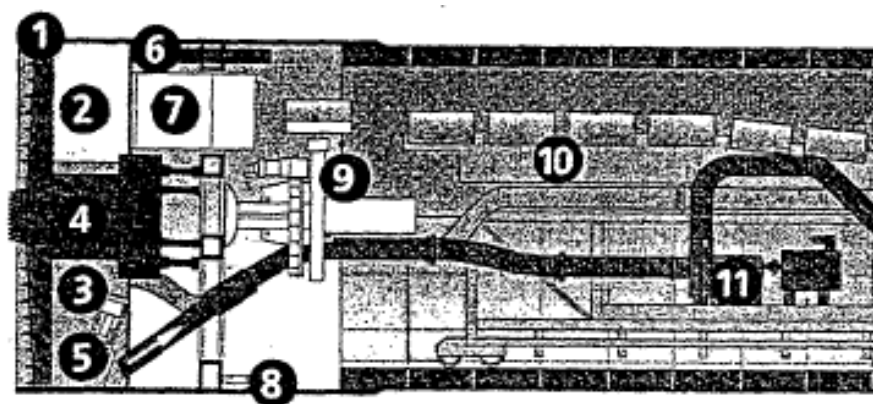


#### 6.4 Μηχάνημα πολφού μπετονίτη με ασπίδα (Slurry Shield TBM-SS TBM)

Οι μηχανές συμπιεσμένου πολφού μπετονίτη με ασπίδα (Slurry Shield TBM) λειτουργούν βάσει της αρχής της εισπίεσης πολφού μπετονίτη στο χώρο του μετώπου. Με τον τρόπο αυτό το έδαφος του μετώπου διαποτίζεται από το πολφό και στερεοποιείται επαρκώς ενώ ταυτόχρονα υποστηρίζεται από τη πίεση του πολφού. Οι ιδιότητες του πολφού και η πίεση που ασκεί στο μέτωπο εξισορροπούν τη πίεση του νερού και του εδάφους. Ταυτόχρονα το έδαφος εκσκάπτεται από τη περιστρεφόμενη κοπτική κεφαλή καθώς η ασπίδα του μηχανήματος προχωράει προς τα εμπρός.

Τα συγκεκριμένα μηχανήματα είναι κατάλληλα για διηθούμενες άμμους και αμμοχάλικα ακόμα και κάτω από υψηλές υδροστατικές πιέσεις. Η χρήση τους δεν ενδείκνυται για εδάφη που περιέχουν άργιλο, ιλύ ή λεπτόκοκκη άμμο καθώς σε αυτές τις περιπτώσεις το ιδιαίτερα ασταθές ή ρέον μέτωπο αντιμετωπίζεται με μεγαλύτερη ευχέρεια από ένα μηχάνημα εξισορρόπησης της πίεσης του εδάφους EPB. Συνεπώς οι μηχανές πολφού είναι κατάλληλες για κοκκομετρική σύσταση εδάφους με ποσοστό αμμοχάλικου μεγαλύτερου του 60%, ποσοστό αργίλου και ιλύος μικρότερο από 10% και ποσοστό νερού μικρότερου από 18%. Ο συντελεστής διαπερατότητας του εδαφικού υλικού πρέπει να είναι μεγαλύτερος από  $10^{-2}$  cm/s.

Τα μηχανήματα πολφού μπετονίτη με ασπίδα αποτελούνται κυρίως από τη κοπτική κεφαλή (1-cutting wheel), όπως φαίνεται στο σχήμα 6.4.1, και το θάλαμο εκσκαφής που βρίσκεται ακριβώς από πίσω, ο οποίος περιέχει το αιώρημα του μπετονιτικού πολφού (3-bentonite suspension). Η μονάδα κίνησης (4-drive unit) βρίσκεται πίσω από το κέντρο της κοπτικής κεφαλής ενώ στο κάτω μέρος του θαλάμου ανάμιξης του εδάφους με το μπετονίτη βρίσκεται σπαστήρας (5-stone crusher) για τεμάχια πετρώματος που έχουν μέγεθος μεγαλύτερο από το επιτρεπτό όριο λειτουργίας του μηχανήματος. Το μέτωπο εκσκαφής διαποτίζεται από το μπετονίτη ενώ σε περίπτωση επισκευής-συντήρησης της κοπτικής κεφαλής ο θάλαμος του αέρα (2-air bubble) μπορεί να διοχετεύσει αέρα υπό πίεση στο μέτωπο ώστε να διατηρηθεί η ευστάθεια του μετώπου και μέσω της αεροθυρίδας (7-air lock) να επιτραπεί η είσοδος στο τεχνικό προσωπικό. Η αεροθυρίδα βρίσκεται πίσω από το θάλαμο του αέρα ενώ το εκσκαμμένο υλικό, που αποτελείται από 10% στερεά και 90% υγρά, αντλείται υδραυλικά στην επιφάνεια με κατάλληλες διατάξεις άντλησης (11-slurry pump). Σε ειδικό χώρο του εργοταξίου γίνεται ο διαχωρισμός του μπετονίτη για την ανακύκλωση του. Η τοποθέτηση των δακτυλίων (rings) από προκατασκευασμένα στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος (segments), που φτάνουν στο σημείο τοποθέτησης τους με μεταφορική ταινία (10-segment conveyor), γίνεται με ειδική διάταξη ανυψωτή (9-erector). Η προώθηση γίνεται με ειδικούς κυλίνδρους ώθησης (6-push cylinders) επί της ήδη τοποθετημένης επένδυσης. Ο κύλινδρος κατευθύνσεως της ουράς της ασπίδας (8-steer cylinder/shield tail) διακρίνεται επίσης στο σχήμα 6.4.1 .



Σχήμα 6.4.1: Μηχάνημα πολφού μπετονίτη με ασπίδα (Slurry Shield)  
Πηγή : Herrenknecht

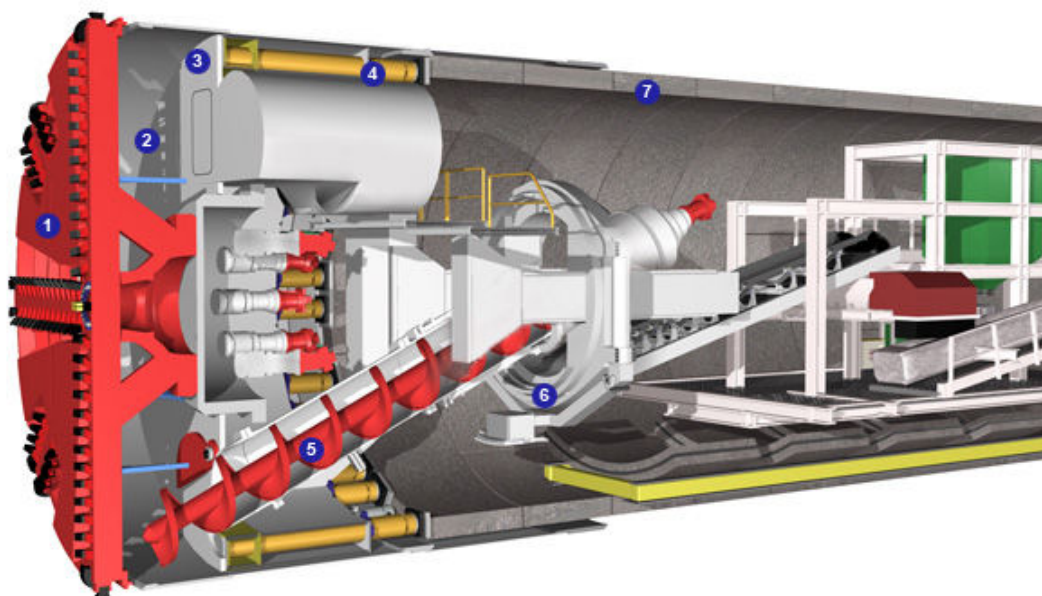
Βασικό μειονέκτημα ενός μηχανήματος πολφού μπετονίτη με ασπίδα είναι ότι σε περίπτωση συνάντησης υπογείου κενού προκαλείται κατάπτωση του εδάφους και εμπλοκή της κεφαλής. Επίσης στη περίπτωση που ασκηθεί στο μέτωπο πίεση μεγαλύτερη από την απαιτούμενη για τη διατήρηση της ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής, υπάρχει ο κίνδυνος εκτόνωσης προς την επιφάνεια, ειδικότερα σε μικρά υπερκείμενα. Τα μεγάλης διαμέτρου μηχανήματα απαιτούν μεγάλα και σύνθετα συγκροτήματα διαχωρισμού μπετονίτη, με αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις, που προκαλούν συνήθως σημαντική χρονική καθυστέρηση και περιβαλλοντικά προβλήματα.

### 6.5 Μηχάνημα εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης (Earth Pressure Balance TBM-EPB)

Τα μηχανήματα με ασπίδα εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης (Earth Pressure Balance-EPB) αναπτύχθηκαν με ραγδαίους ρυθμούς τα τελευταία 20 χρόνια και έφεραν την επανάσταση στη διάνοιξη σιηράγγων σε συνεκτικούς και μαλακούς εδαφικούς σχηματισμούς και σε μαλακά πετρώματα. Το έδαφος δε χαλαρώνεται μηχανικά, αλλά πιέζεται μέσα από τη σιηραγγα μέσω ενός ή περισσότερων ανοιγμάτων που βρίσκονται στο διάφραγμα πίεσης. Η τεχνική αυτή επιτρέπει τη κατασκευή σιηράγγων κοντά στην εδαφική επιφάνεια, με ελάχιστη επιφανειακή διατάραξη. Για το λόγο αυτό οι μηχανές αυτές έδωσαν νέες ευκαιρίες στη κατασκευή σιηράγγων σε πυκνοκατοικημένες περιοχές.

Κατά τη λειτουργία του μηχανήματος το εκσκαφέν υλικό υποστηρίζει το μέτωπο. Το υλικό αυτό πρέπει να είναι εύπλαστο και όπου χρειάζεται εισάγονται κατάλληλα στις γεωλογικές συνθήκες πρόσθετα. Τα πρόσθετα αυτά κρίνονται απαραίτητα στη πλειοψηφία των περιπτώσεων. Για παράδειγμα με τη χρήση ειδικού αφρού, τα μη συνεκτικά εδάφη (λεπτόκοκκη άμμος ή ακόμα και χονδρομερές χαλίκι) μπορεί να μετατραπεί σε συνεκτικό. Οι φυσαλίδες που δημιουργούνται λόγω του αφρού λειτουργούν σαν ελαστικό «μαξιλάρι» μέσα στους πόρους του εδάφους. Μειώνεται με αυτό τον τρόπο η πυκνότητα του όπως επίσης και η εσωτερική του τριβή και δημιουργείται ένας εδαφικός πολφός με ιδανική πλασιμότητα που ταυτόχρονα επιτρέπει καλύτερο έλεγχο της πίεσης συγκράτησης του μετώπου.

Σε γενικές γραμμές, ο σχεδιασμός των EPB είναι ιδανικός για διάνοιξη σιηράγγων σε συνεκτικά, μαλακά εδάφη με χαμηλή τιμή εσωτερικής τριβής και μικρή διαπερατότητα. Εδάφη με υψηλό ποσοστό ιλύος ή αργίλου θεωρούνται τα πλέον ιδανικά.

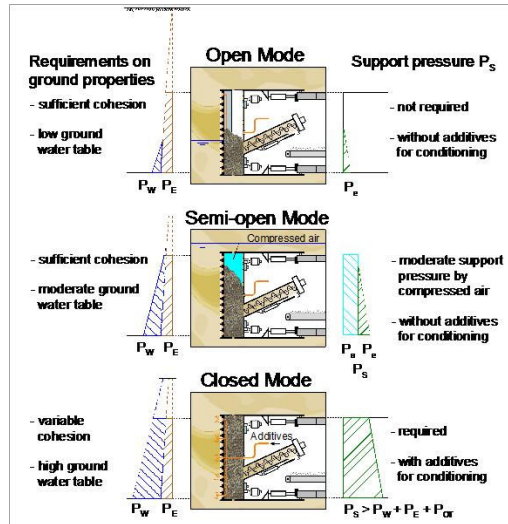


Σχήμα 6.5.1: Μηχάνημα εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης (EPB)  
Πηγή : Herrenknecht

Το μηχάνημα εκσκάπτει το έδαφος από το μέτωπο (working face) με τα εργαλεία που βρίσκονται πάνω στη περιστρεφόμενη κοπτική κεφαλή (1-cutting wheel), όπως φαίνεται στο σχήμα 6.5.1. Το έδαφος στη συνέχεια εισέρχεται, μέσω των κενών της κοπτικής κεφαλής στο θάλαμο εκσκαφής (2-excavation chamber). Εκεί γίνεται η ανάμιξη του με πρόσθετα, εφόσον υπάρχει τέτοια απαίτηση, που είναι ήδη διαθέσιμα και έτσι το έδαφος μετατρέπεται σε ένα εδαφικό, πλάσιμο υλικό. Η δύναμη ώθησης μεταφέρεται από τον αέρα προς το εδαφικό υλικό μέσω του τοιχώματος πίεσης (3-pressure wall) και έτσι εμποδίζεται η μη ελεγχόμενη εισροή εδάφους από το μέτωπο στο θάλαμο εκσκαφής. Η συνθήκη ισορροπίας επιτυγχάνεται όταν το εδαφικό υλικό στο θάλαμο εκσκαφής δε μπορεί να υπερνικηθεί από την υπάρχουσα πίεση του νερού και του εδάφους στο μέτωπο εκσκαφής. Το εκσκαφέν υλικό μεταφέρεται μέσω ενός ατέρμονα κοχλία (5-screw conveyor) από το θάλαμο εκσκαφής που βρίσκεται υπό πίεση προς το εξωτερικό μέρος της σήραγγας, όπου επικρατούν συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης. Στα μηχανήματα αυτά το εκσκαφέν υλικό, αποτελούμενο από 70% στερεά και 30% υγρά, μεταφέρεται διαμέσου της σήραγγας και για το λόγο αυτό δεν υπάρχει η ανάγκη για εγκαταστάσεις διαχωρισμού, ούτε υπάρχει η απαίτηση για άντληση και βελτίωση των γεωυλικών κάνοντας χρήση πολφού μπετονίτη. Η επένδυση της σήραγγας συνθέτεται από προκατασκευασμένα στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος, τα οποία τοποθετούνται αμέσως πίσω από την ασπίδα με τη βοήθεια ενός ανυψωτή (6-erector). Με τον ανυψωτή τα προκατασκευασμένα στοιχεία (7-segments) αναρτώνται υπό κενό αέρος και στη συνέχεια τοποθετούνται με μεγάλη ακρίβεια. Για να προχωρήσει προς τα εμπρός το μηχάνημα, υδραυλικοί γρύλοι (4-tunneling jacks) πιέζουν το τελευταίο εγκατεστημένο δακτύλιο (ring).

Μια ακόμα ιδιαίτερα χρήσιμη λειτουργία των μηχανημάτων αυτών είναι ο ανοικτός (Open mode operation), ο κλειστός (Closed mode operation) και ο ημίκλειστος (Semi-open mode operation) τύπος λειτουργίας. Η φυσική πίεση του εδάφους ποικίλει και εξαρτάται κυρίως από τα υπερκείμενα και τον υδροφόρο ορίζοντα. Η εξισορρόπηση του μετώπου καθώς το μηχάνημα προωθείται επιτυγχάνεται κρατώντας το θάλαμο της κοπτικής κεφαλής, μπροστά από το κλειστό διάφραγμα και τον ατέρμονα κοχλία μεταφοράς των εκσκαφέντων υλικών, γεμάτο από υλικό. Από τη μέση και κάτω του θαλάμου εκσκαφής διατηρείται σχεδόν πάντα μια πίεση λειτουργίας. Εάν οι γεωλογικές συνθήκες επιτρέπουν την ομαλή λειτουργία του TBM και δεν προκαλούν διατάραξη του προς εκσκαφή υλικού, τότε δεν απαιτείται επιπλέον άσκηση πίεσης από τη μέση και πάνω του μηχανήματος, όπου επικρατεί πίεση 1 bar. Αντίθετα, ασκείται πίεση και στο άνω μισό του θαλάμου εκσκαφής (κλειστή λειτουργία) όταν δε διατηρείται η ευστάθεια του μετώπου και επιδιώκεται η σταθεροποίηση του για να αποφευχθούν τυχόν χαλαρώσεις της γειτονικής περιοχής ή ακόμα και επιφανειακές καθιζήσεις. Η δυνατότητα αυτή παρέχεται από το θάλαμο αέρα (air bubble) που βρίσκεται στο πάνω μέρος του διαφράγματος πίεσης.

Η αρχή λειτουργίας των μηχανημάτων αυτών σε ασταθείς εδαφικές καταστάσεις είναι η ελαχιστοποίηση των επιφανειακών καθιζήσεων, μέσω του ελέγχου εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης στο μέτωπο της σήραγγας, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.5.2 όπου παρουσιάζονται και οι τύποι λειτουργίας του μηχανήματος, όπως αναφέρθηκαν παραπάνω .



Σχήμα 6.5.2: Οι τύποι λειτουργίας ενός μηχανήματος EPB

Πηγή : Babendererde et al. 2004 (Geological constraints and geotechnical issues in mechanized tunneling-P. Marinos, Torino2009)

Η πίεση εξισορρόπησης πρέπει να είναι ίση ή ελάχιστα υψηλότερη από τη πίεση του εδάφους και του νερού για να αντισταθεί στις μετακινήσεις και τη δυναμική εισροή νερού. Για το λόγο αυτό σε ασταθή εδάφη πρέπει να εφαρμόζεται μία δύναμη υποστήριξης στο μέτωπο εκσκαφής. Η απαιτούμενη πίεση στο θάλαμο εκσκαφής επηρεάζεται από τη ταχύτητα διάνοιξης, το ποσοστό εκσκαπόμενου υλικού και τα πρόσθετα που χρησιμοποιούνται. Η συνήθης μέθοδος ελέγχου της πίεσης ισορροπίας κατά τη διάνοιξη είναι η αλλαγή ταχύτητας περιστροφής του κοχλία, η οποία όταν αυξάνει το έδαφος εκσκάπτεται γρηγορότερα και η πίεση του εδάφους μπροστά από το μέτωπο μειώνεται ενώ σε αργή περιστροφή του κοχλία η πίεση αυτή αυξάνεται.

## 6.6 Η εκτιμώμενη συμπεριφορά των μηχανημάτων STM και EPB έναντι των τεχνικογεωλογικών συνθηκών του τεχνικού έργου

Οι προαναφερθέντες τύποι μηχανών, της εδαφικής εξισορρόπησης του εδάφους (EPB) και του πολφού μπετονίτη με ασπίδα (Slurry Shield TBM), ανήκουν στη κατηγορία κλειστού μετώπου εκσκαφής και είναι εξίσου αποτελεσματικά στο να ελέγχουν τις εδαφικές παραμορφώσεις και τις επιφανειακές καθιζήσεις, ασκώντας ελεγχόμενη πίεση στο μέτωπο εκσκαφής που μειώνει τη πιθανότητα εκδήλωσης αστάθειας και υπερεκσκαφών. Για το λόγο αυτό η καταλληλότητα του εκάστοτε τύπου κρίθηκε βάσει των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών παραμέτρων των προς εκσκαφή σχηματισμών, όπως παρουσιάζεται παρακάτω με ταυτόχρονη σύγκριση αυτών.

Τα κυριότερα κριτήρια τα οποία τέθηκαν προκειμένου να πραγματοποιηθεί η σύγκριση μεταξύ αυτών των δύο τύπων μηχανημάτων περιλαμβάνουν:

- Τη κοκκομετρική διαβάθμιση των προς εκσκαφή εδαφικών σχηματισμών κατά μήκος της χάραξης της σήραγγας
- Τη διαπερατότητα των σχηματισμών που θα εκσκαφθούν
- Τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα πάνω από το επίπεδο του άξονα της σήραγγας
- Το όριο υδαρότητας (LL), ο δείκτης πλασιμότητας (PI) και ο δείκτης συνεκτικότητας ( $I_c$ ) των γεωυλικών

Το κάθε ένα από τα παραπάνω κριτήρια εξετάζεται παρακάτω για κάθε ένα από τα τμήματα στα οποία έχει ήδη χωριστεί η σήραγγα.

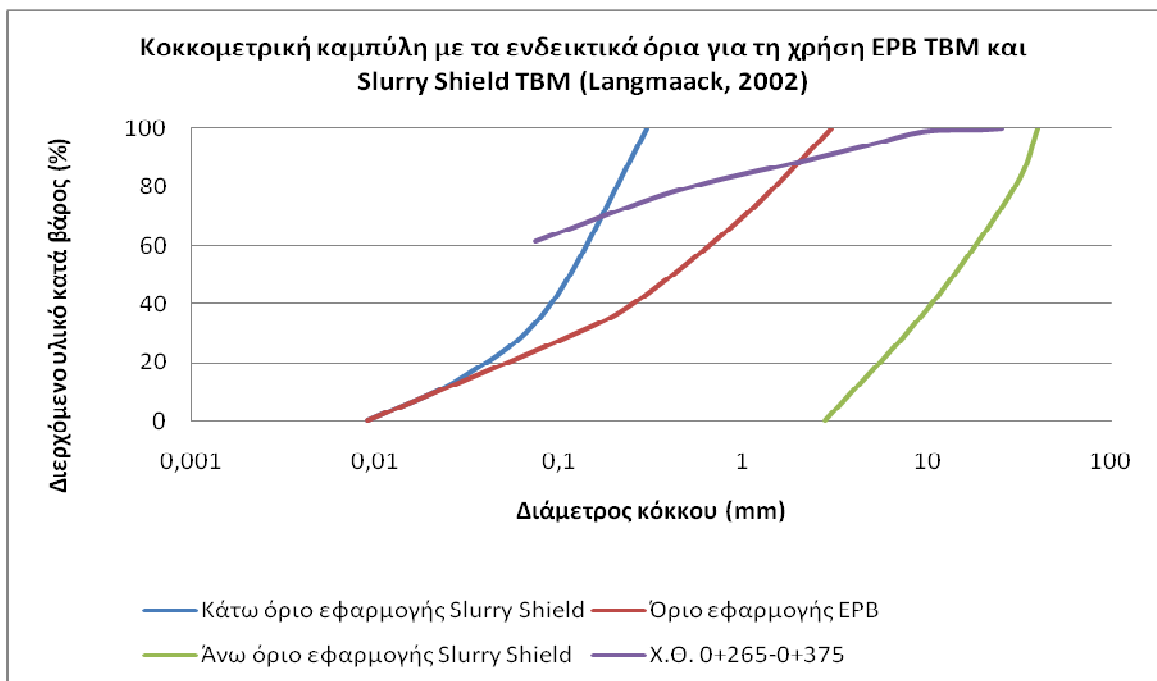
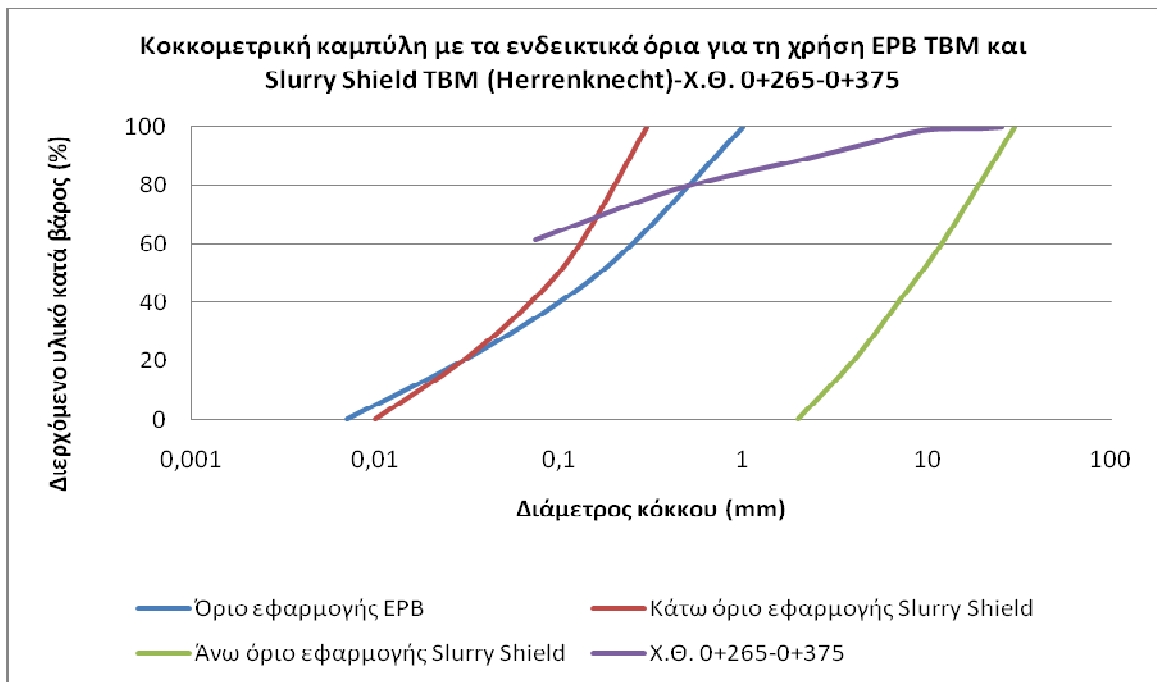
### 6.6.1 Κοκκομετρική διαβάθμιση των προς εκσκαφή εδαφικών σχηματισμών κατά μήκος της χάραξης της σήραγγας

Σύμφωνα με τις οδηγίες της Βρετανικής Κοινότητας Σηράγγων (British Tunneling Society) για τη διάνοιξη σηράγγων με μηχανές κλειστού μετώπου, αν το ποσοστό λεπτόκοκκων γεωυλικών (το ποσοστό δηλαδή αυτών που έχει τη δυνατότητα να διέλθει από το κόσκινο No200) είναι μεγαλύτερο από το 20% η χρήση ενός STM γίνεται αμφισβητήσιμη, αν και δεν απορρίπτεται, καθώς είναι δύσκολο να διαχωριστεί ο πολφός μπετονίτη από το εκσκαφέν υλικό. Αντιθέτως ένα μηχάνημα EPB θα είναι αποδοτικότερο όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό των λεπτόκοκκων γεωυλικών, ενώ για ποσοστό σε λεπτόκοκκα γεωυλικά μικρότερο του 10% η χρήση ενός EPB δεν ενδείκνυται καθώς απαιτείται μεγάλη ποσότητα πρόσθετων για τη βελτίωση του εδάφους.

Εκτός από τις οδηγίες της BTS έχουν οριστεί και ενδεικτικές κοκκομετρικές καμπύλες, όπως αυτές κατά την εταιρεία Herrenknecht (2001) και κατά τον Langmaack (2002) βάσει των οποίων και θα καθοριστεί η καταλληλότητα των μηχανημάτων βάσει της κοκκομετρίας των γεωυλικών για κάθε ένα τμήμα, όπου πρόκειται να εκσκαφτούν εδαφικά υλικά.

#### Τμήμα Χ.Θ. 0+050 έως 0+375

Για το συγκεκριμένο τμήμα η πληροφορία που αφορά στη κοκκομετρία αυτού είναι περιορισμένη καθώς δεν υπήρχαν αρκετά στοιχεία. Για το λόγο αυτό, χονδροειδώς, γενικεύθηκαν τα στοιχεία του τμήματος από τη Χ.Θ. 0+265-0+375 για όλο το τμήμα. Από τα στοιχεία αυτά προκύπτει η παρακάτω κοκκομετρική διαβάθμιση, όπως αυτή έχει παρουσιαστεί αρχικά στο Κεφάλαιο 4, σε σχέση με τα ενδεικτικά όρια για το πεδίο εφαρμογής του κάθε μηχανήματος, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 6.6.1.1 που ακολουθεί.

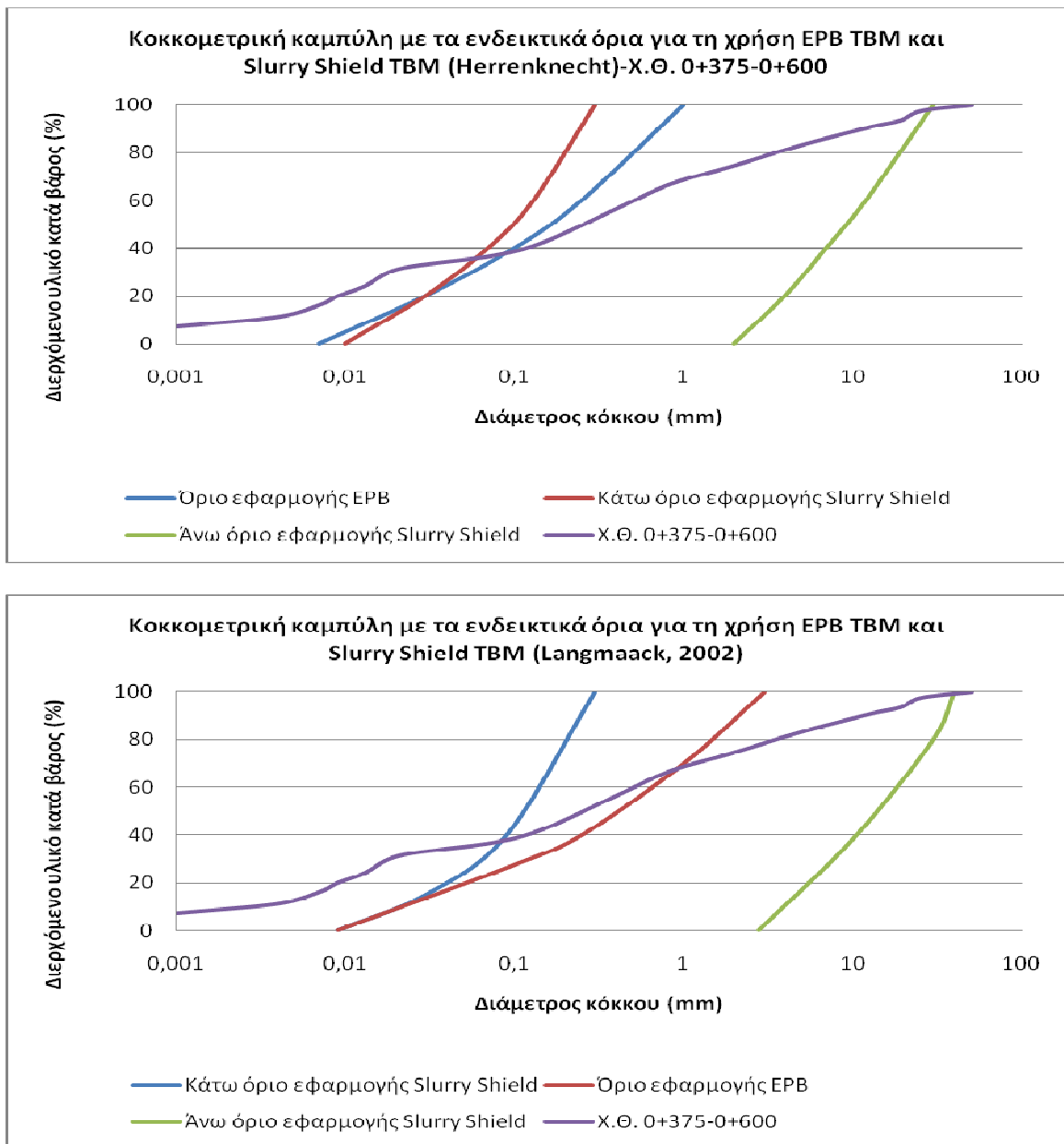


**Σχήμα 6.6.1.1**  
**Ενδεικτικά όρια κοκκομετρικών καμπυλών κατά Herrenknecht και κατά Langmaack για τη X.Θ. 0+265-0+375**

Και από τα δύο γραφήματα προκύπτει ότι το καταλληλότερο μηχάνημα για την εκσκαφή βάσει της κοκκομετρικής διαβάθμισης των υλικών είναι ένα μηχάνημα EPB, καθώς το ποσοστό λεπτόκοκκων γεωυλικών είναι κοντά στο 60%, ενώ στο πεδίο εφαρμογής ενός μηχανήματος EPB, τόσο κατά Herrenknecht όσο και κατά Langmaack, ανήκει το 80% των γεωυλικών.

## Τμήμα Χ.Θ. 0+375 έως 0+600

Για το συγκεκριμένο τμήμα η κοκκομετρική διαβάθμιση των γεωλικών των «Νεογενών Αποθέσεων» παρουσιάζεται στο σχήμα 6.6.1.2 που ακολουθεί.

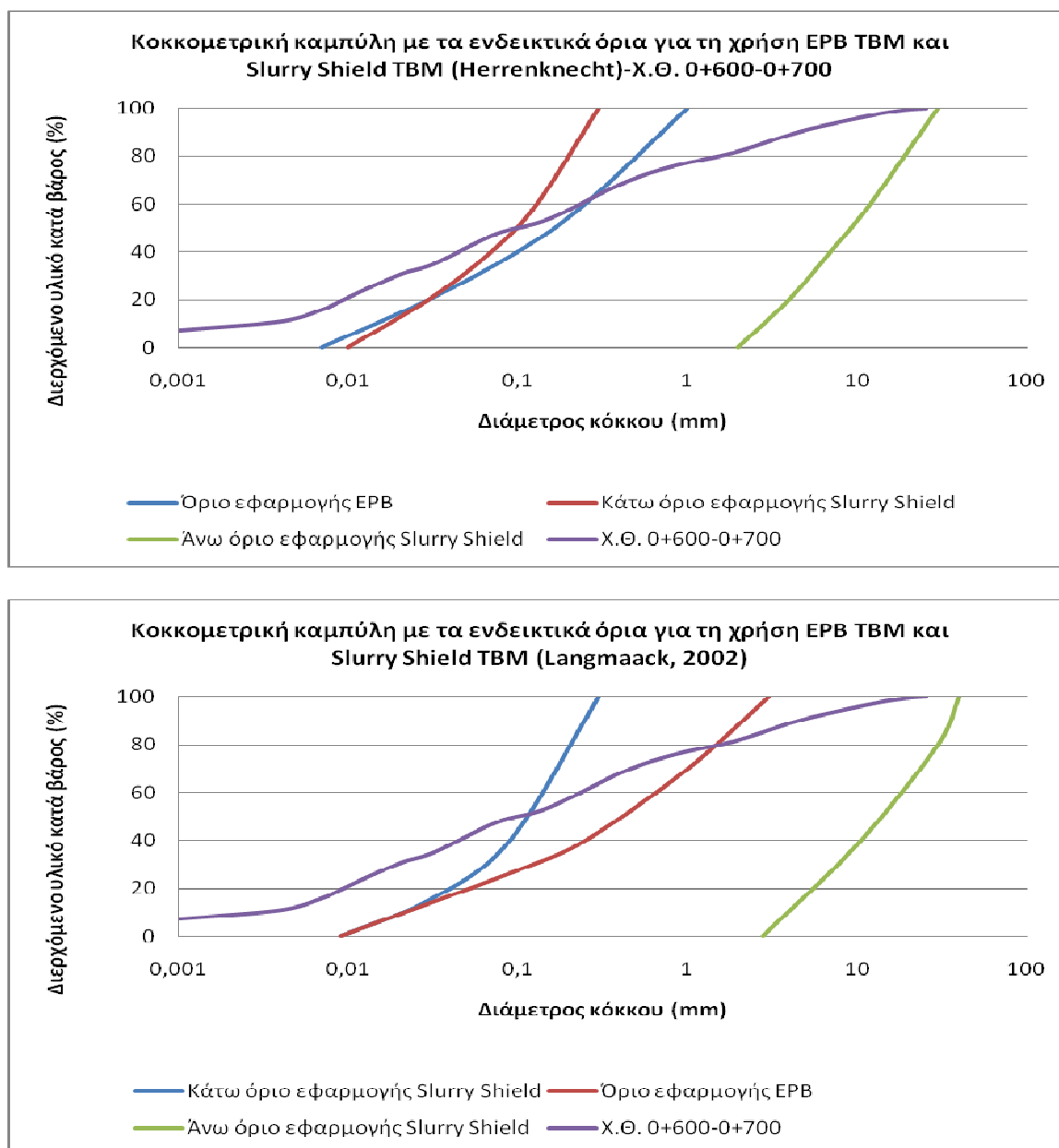


**Σχήμα 6.6.1.2**  
**Ενδεικτικά όρια κοκκομετρικών καμπυλών κατά Herrenknecht και κατά Langmaack για τη Χ.Θ. 0+375-0+600**

Από τα όρια τα οποία τίθενται από την εταιρεία Herrenknecht ένα μηχάνημα EPB και σε συνδυασμό με τις οδηγίες της BTS είναι κατάλληλο, καθώς πάνω από το 20% του ποσοστού των γεωλικών ανήκουν σε λεπτόκοκκους σχηματισμούς, παρά το μεγάλο ποσοστό αδρόκοκκων γεωλικών που ενδεχομένως μπορεί να συναντήσει το μέτωπο εκσκαφής. Κατά τον Langmaack επίσης το EPB θεωρείται κατάλληλο βάσει της κοκκομετρικής διαβάθμισης των υλικών, καθώς στο πεδίο εφαρμογής του συγκεκριμένου τύπου μηχανήματος ανήκει περίπου το 70% των γεωλικών. Βάσει των παραπάνω καταλληλότερο, βάσει της κοκκομετρίας, κρίνεται ένα μηχάνημα EPB.

### Τμήμα Χ.Θ. 0+600 έως 0+700

Για το συγκεκριμένο τμήμα αξιολογείται το εδαφικό υλικό το οποίο θα συναντήσει το μέτωπο της εκσκαφής της σήραγγας, πριν εισέλθει στο βραχώδη σχηματισμό της Ενότητας του Χορτιάτη. Στο σχήμα 6.6.1.3 που ακολουθεί παρουσιάζεται η κοκκομετρική διαβάθμιση των υλικών.



**Σχήμα 6.6.1.3**  
**Ενδεικτικά όρια κοκκομετρικών καμπυλών κατά Herrenknecht και κατά Langmaack για τη Χ.Θ. 0+375-0+600**

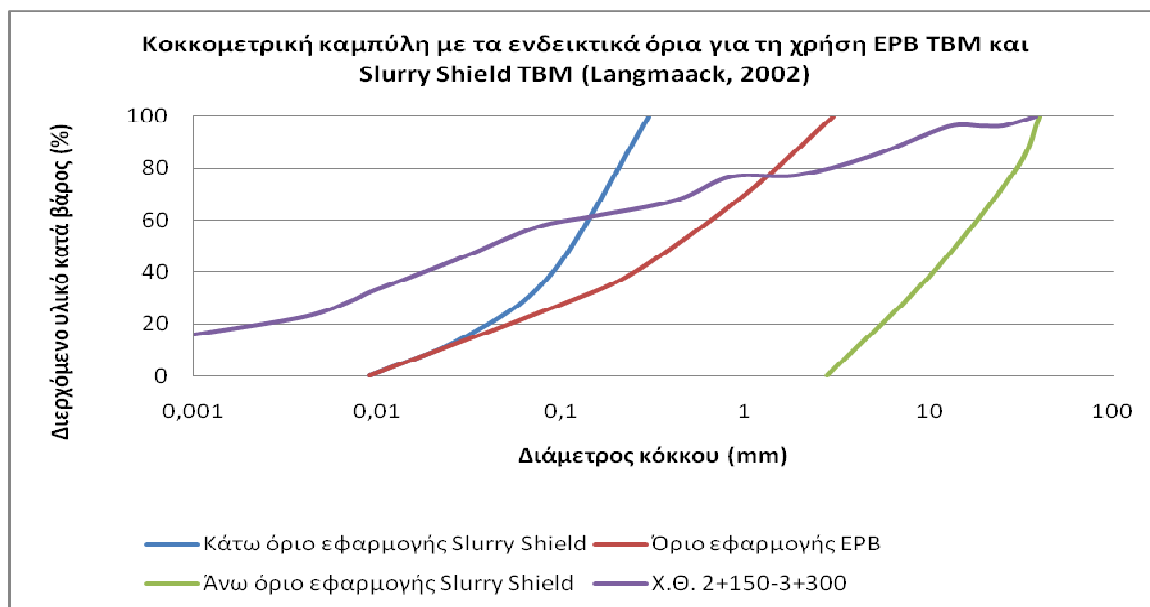
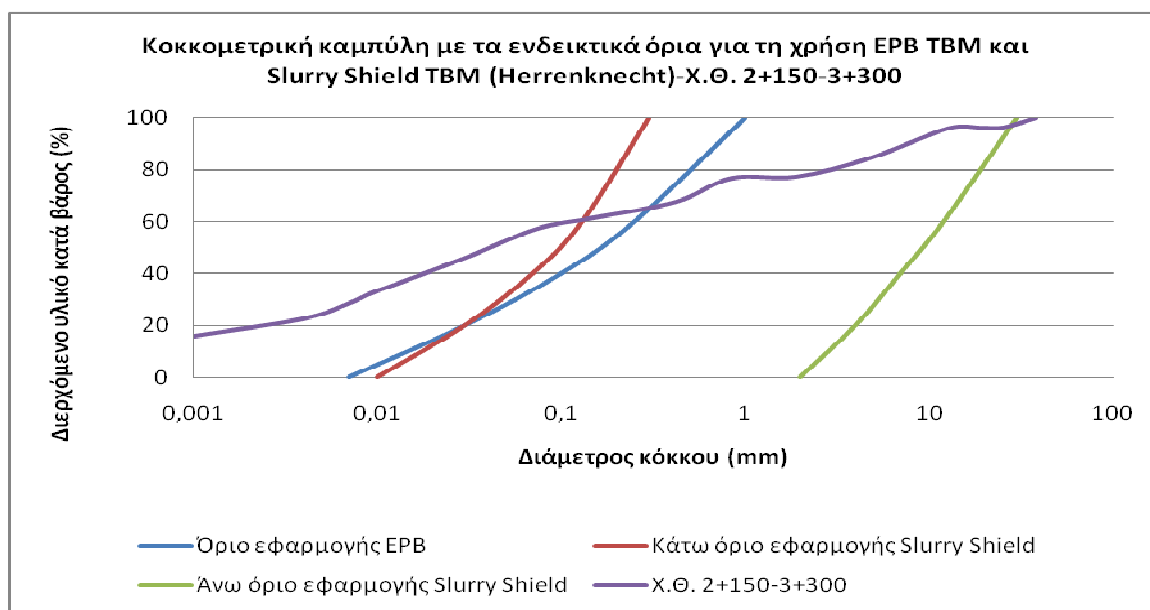
Από τη κοκκομετρική καμπύλη των γεωυλικών, όπως έχει αναφερθεί και στο Κεφάλαιο 4, το 50% του ποσοστού αυτών διέρχεται από το κόσκινο Νο200. Βάσει των ορίων που έχουν οριστεί από τη Herrenknecht περίπου το 60% των γεωυλικών βρίσκεται εντός του πεδίου εφαρμογής ενός μηχανήματος EPB ενώ κατά Langmaack το 80% των γεωυλικών. Σε



συνδυασμό με τις οδηγίες της BTS το μηχάνημα EPB κρίνεται ως το πιο κατάλληλο και για το τμήμα αυτό.

### Τμήμα Χ.Θ. 2+150 έως 3+300

Η «Σειρά των Ερυθρών Αργίλων» των «Νεογενών Αποθέσεων» στο παρόν τμήμα συνίσταται κυρίως από λεπτόκοκκα γεωυλικά καθώς, όπως έχει παρουσιαστεί στο Κεφάλαιο 4, το ποσοστό αυτών ανέρχεται στο 60%. Η κοκκομετρική καμπύλη αυτών παρουσιάζεται στο σχήμα 6.6.1.4 που ακολουθεί.



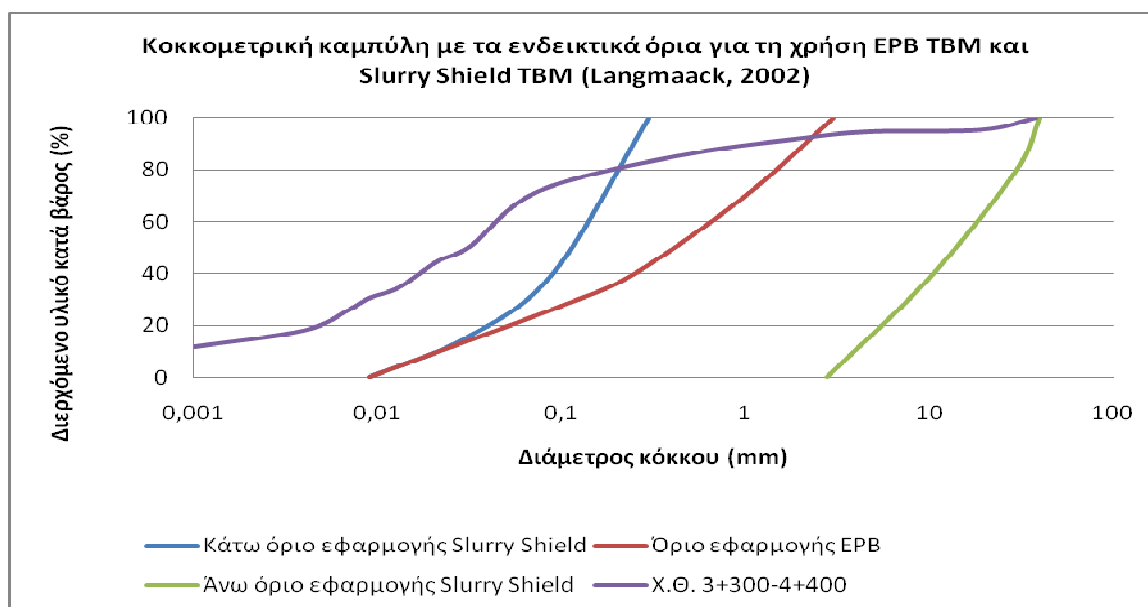
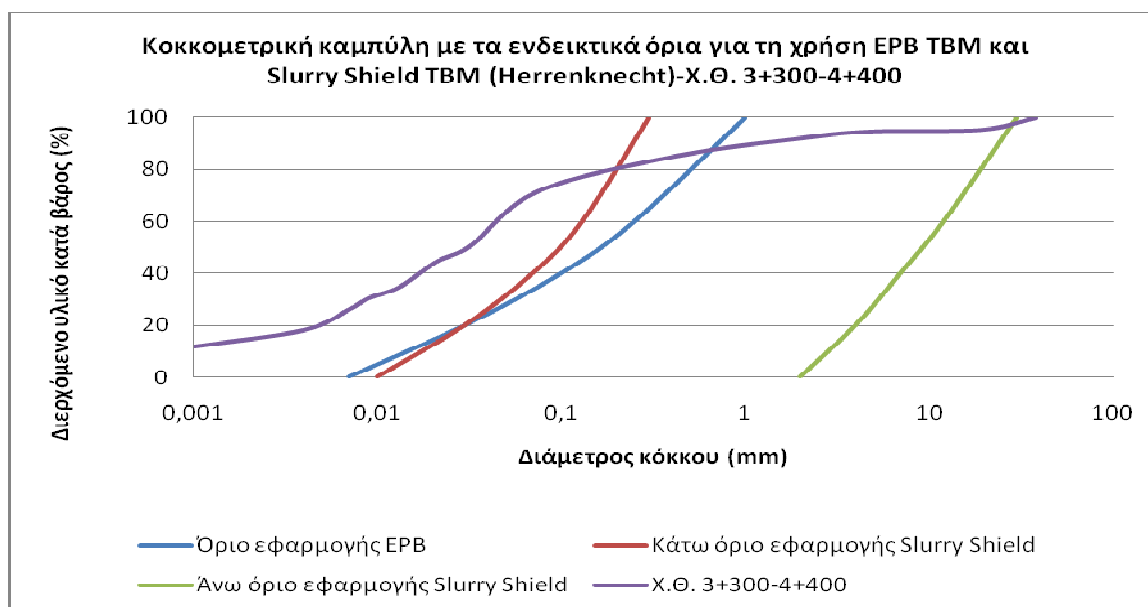
**Σχήμα 6.6.1.4**  
**Ενδεικτικά όρια κοκκομετρικών καμπυλών κατά Herrenknecht και κατά Langmaack για τη Χ.Θ. 2+150-3+300**

Από τις οριακές κοκκομετρικές καμπύλες με την εφαρμοσιμότητα του καθενός από τους δύο τύπους μηχανημάτων, τα γεωυλικά από 60% (κατά Herrenknecht) έως 80% (κατά Langmaack) ανήκουν στο πεδίο εφαρμογής του μηχανήματος EPB, με μικρότερο ποσοστό να

ανήκει στο πεδίο εφαρμογής του STM. Κατά συνέπεια, καταλληλότερο κρίνεται το μηχάνημα EPB για το συγκεκριμένο τμήμα.

### Τμήμα Χ.Θ. 3+300 έως 4+400

Και το παρόν τμήμα ανήκει στη γεωλογική ενότητα των «Νεογενών Αποθέσεων», όπως έχει προαναφερθεί, με τα επικρατούντα γεωυλικά να είναι λεπτόκοκκης φύσης καθώς σε ποσοστό 70% κατά βάρος τα γεωυλικά διέρχονται από το κόσκινο Νο200. Στο ακόλουθο σχήμα 6.6.1.5 παρουσιάζεται η κοκκομετρική διαβάθμιση των υλικών μαζί με τα θεωρητικά όρια του πεδίου εφαρμογής των μηχανημάτων EPB και STM.



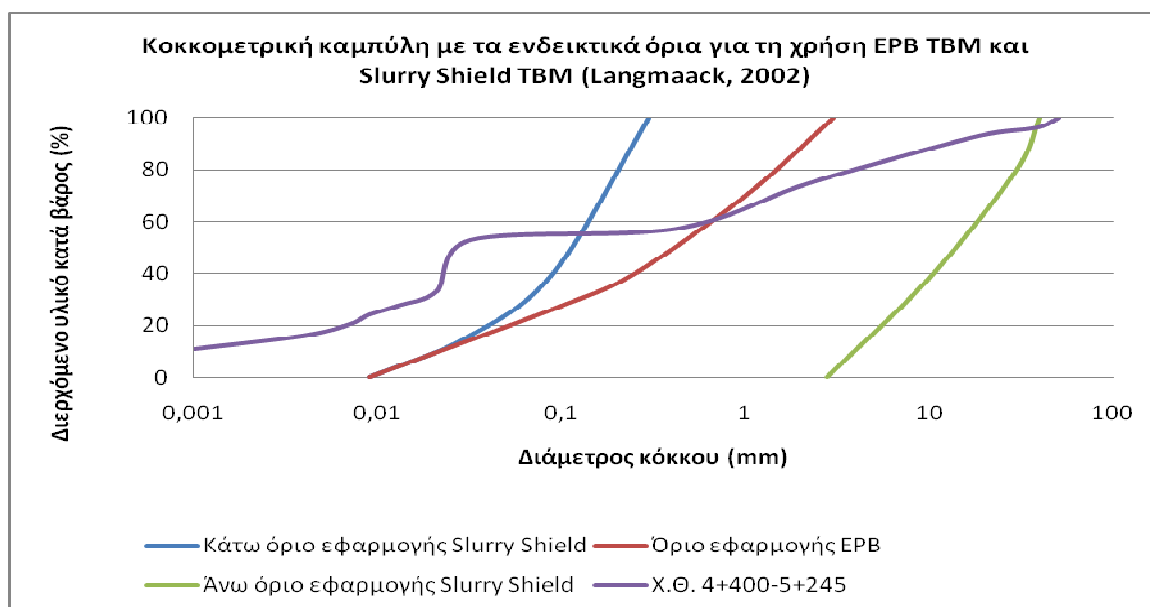
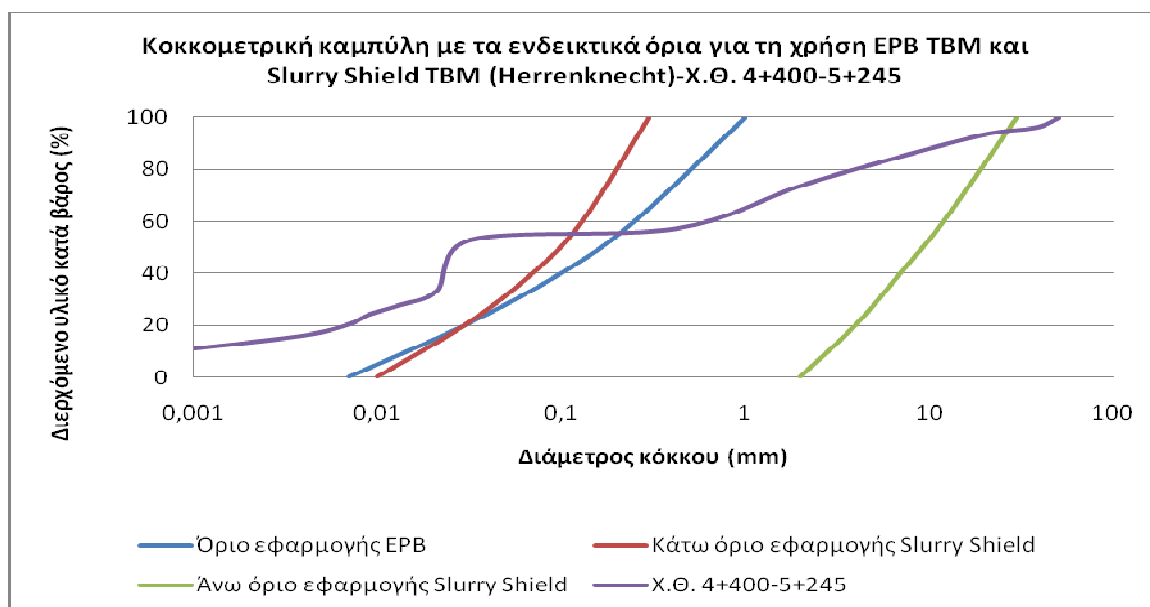
**Σχήμα 6.6.1.5**  
**Ενδεικτικά όρια κοκκομετρικών καμπυλών κατά Herrenknecht και κατά Langmaack για τη Χ.Θ. 3+300-4+400**

Τόσο κατά την εταιρεία Herrenknecht όσο και κατά τον Langmaack το ποσοστό του υλικού που εντοπίζεται στο πεδίο εφαρμογής του EPB πλησιάζει το 90% του διερχόμενου

κατά βάρος γεωυλικού, σε αντίθεση με το αντίστοιχο ποσοστό για το μηχάνημα STM, και κατά συνέπεια το EPB κρίνεται καταλληλότερο ως τύπος μηχανήματος.

### Τμήμα Χ.Θ. 4+400 έως 5+245

Το τελευταίο τμήμα της σήραγγας απαρτίζεται από τα χαλαρά γεωυλικά των «Τεταρτογενών Αποθέσεων» με παρουσία τόσο αδρόκοκκων σχηματισμών όσο και λεπτόκοκκων αφού περίπου το 50% του ποσοστού των γεωυλικών διέρχεται από το κόσκινο Νο200. Ακολουθεί το σχήμα 6.6.1.6 με τη κοκκομετρική διαβάθμιση των γεωυλικών και τα ενδεικτικά όρια για τον εκάστοτε τύπο μηχανήματος.

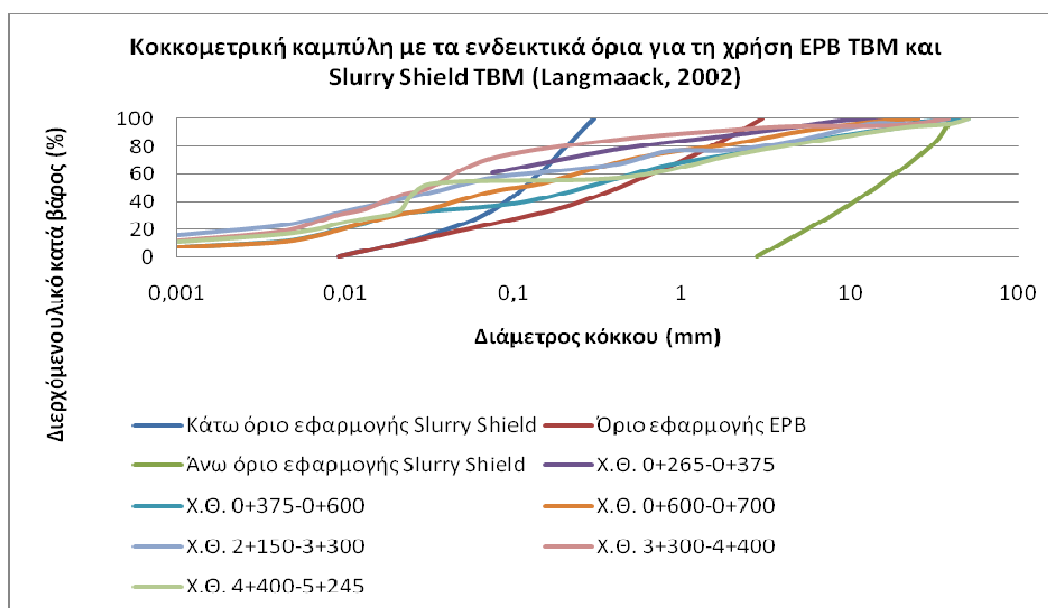
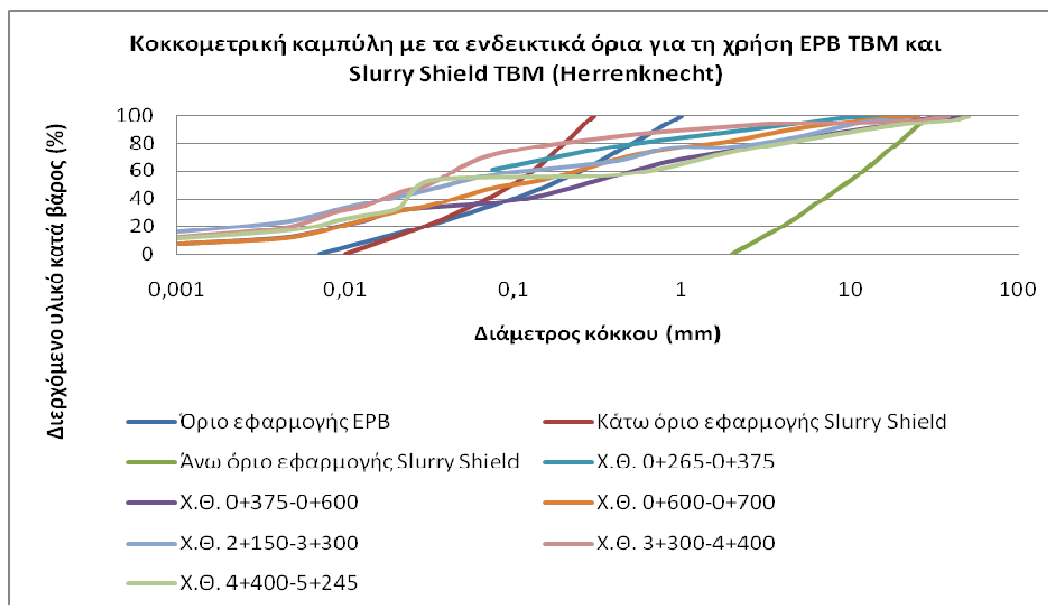


**Σχήμα 6.6.1.6**  
**Ενδεικτικά όρια κοκκομετρικών καμπυλών κατά Herrenknecht και κατά Langmaack για τη Χ.Θ. 4+400-5+245**

Σύμφωνα με τη BTS το ποσοστό των λεπτόκοκκων γεωυλικών που αναμένεται να εκσκαφτούν οδηγεί προς την επιλογή ενός μηχανήματος EPB. Σύμφωνα με τα όρια που

ορίζουν οι κοκκομετρικές καμπύλες της Herrenknecht περίπου το 60% του ποσοστού των γεωυλικών εντοπίζεται εντός του πεδίου εφαρμογής των μηχανημάτων EPB καθώς και κατά τον Langmaack. Με τα επικρατούντα γεωυλικά συνεπώς να εντοπίζονται σε αυτή τη περιοχή εφαρμογής των διαγραμμάτων καταλληλότερο κρίνεται το μηχάνημα EPB.

Συγκεντρωτικά οι κοκκομετρικές καμπύλες όλων των τμημάτων παρουσιάζονται στο σχήμα 6.6.1.7 που ακολουθεί.



**Σχήμα 6.6.1.7**  
**Ενδεικτικά όρια κοκκομετρικών καμπυλών κατά Herrenknecht και κατά Langmaack για το σύνολο του μήκους της σήραγγας**

Όπως παρατηρήθηκε από κάθε τμήμα ξεχωριστά, έτσι και από το συγκεντρωτικό σχήμα παραπάνω φαίνεται ότι βάσει της κοκκομετρίας των γεωυλικών ο τύπος μηχανήματος EPB αποτελεί καταλληλότερη επιλογή από ένα μηχάνημα STM καθώς οι κοκκομετρικές καμπύλες καλύπτουν περισσότερο το πεδίο εφαρμογής των μηχανημάτων EPB τόσο κατά την Herrenknecht όσο και κατά τον Langmaack.

## 6.6.2 Η διαπερατότητα των εδαφικών σχηματισμών

Η διαπερατότητα των εδαφικών σχηματισμών οι οποίοι αναμένεται να απαντηθούν στο μέτωπο της διάνοιξης της σήραγγας κατά την εκσκαφή είναι γενικώς μικρή, κυρίως όπου απαντώνται οι σχηματισμοί της «Σειράς των Ερυθρών Αργίλων», όπως διαπιστώθηκε από τη τεχνικογεωλογική-γεωτεχνική έρευνα, βάσει δοκιμών πίπτοντος (μεταβλητού) και σταθερού υδραυλικού φορτίου, με τα χαλαρότερα γεωυλικά των «Τεταρτογενών Αποθέσεων» να χαρακτηρίζονται από σχετικά μεγαλύτερες διαπερατότητες. Η καταλληλότητα των δύο τύπων μηχανημάτων σε ότι αφορά τη διαπερατότητα κρίνεται βάσει του νομογραφήματος της εταιρείας Herrenknecht (σχήμα 3.5.4.3) και των οδηγιών για τη διάνοιξη σηράγγων με μηχανές κλειστού μετώπου της Βρετανικής Κοινότητας Σηράγγων (British Tunneling Society-BTS) για κάθε ένα από τα τμήματα της σήραγγας, όπως αυτά προέκυψαν από τη ζωνοποίηση (Κεφάλαιο 4).

### Τμήμα Χ.Θ. 0+050 έως 0+375

Όπως και για την ανάλυση που προηγήθηκε βάσει της κοκκομετρικής φύσης των γεωυλικών, έτσι και για την υδατοπερατότητα του τμήματος οι πληροφορίες ήταν περιορισμένες. Κατά συνέπεια τα συμπεράσματα για το συγκεκριμένο τμήμα προκύπτουν από τη γενίκευση των αποτελεσμάτων των δοκιμών στο τμήμα με Χ.Θ. 0+265-0+375. Από τα στοιχεία για τα γεωυλικά στο βάθος εκσκαφής (Κεφάλαιο 4) προκύπτει ότι η υδατοπερατότητα αυτών κυμαίνεται μεταξύ  $k=3 \cdot 10^{-7}$ - $2 \cdot 10^{-6}$  m/s. Βάσει του νομογραφήματος της Herrenknecht το εύρος αυτό των τιμών της διαπερατότητας βρίσκεται στο όριο εφαρμογής μεταξύ ενός μηχανήματος EPB και ενός STM. Βάσει των οδηγιών της BTS, η διαπερατότητα που θεωρείται ως το όριο εφαρμογής μεταξύ αυτών των δύο τύπων μηχανών αποτελεί η τιμή  $k=10^{-5}$  m/s με τα EPB να χρησιμοποιούνται για υδατοπερατότητες μικρότερες από αυτές. Κατά συνέπεια βάσει των παραπάνω, καταλληλότερο μηχανήμα κρίνεται ο τύπος του EPB TBM για το παρόν κομμάτι.

### Τμήμα Χ.Θ. 0+375 έως 0+600

Η διαπερατότητα των υλικών που αναμένεται να εκσκαφτούν στο συγκεκριμένο τμήμα εκτιμάται ότι θα κυμαίνεται μεταξύ  $k=10^{-6}$ - $4 \cdot 10^{-6}$  m/s (Κεφάλαιο 4). Κατά το νομογράφημα της Herrenknecht οι τιμές της διαπερατότητας κινούνται γύρω από το όριο εφαρμογής των δύο τύπων μηχανημάτων ενώ κατά τις Βρετανικές οδηγίες το εύρος τους κινείται στο πεδίο εφαρμογής των μηχανημάτων EPB. Κατά συνέπεια το καταλληλότερο μηχανήμα για την εκσκαφή των γεωυλικών του τμήματος θα είναι τύπου EPB.

### Τμήμα Χ.Θ. 0+600 έως 0+700

Η διαπερατότητα των εδαφικών σχηματισμών που πρόκειται να εκσκαφθούν στο συγκεκριμένο τμήμα, πριν το μηχανήμα εκσκαφής συναντήσει τους βραχώδεις σχηματισμούς της Ενότητας του Χορτιάτη, κυμαίνεται από  $k=10^{-6}$ - $3 \cdot 10^{-6}$  m/s (Κεφάλαιο 4). Και σε αυτό το τμήμα το νομογράφημα της Herrenknecht υποδεικνύει ότι οι τιμές της διαπερατότητας κινούνται γύρω από το όριο εφαρμογής των δύο τύπων μηχανημάτων. Κατά τις οδηγίες της BTS οι τιμές της διαπερατότητας των γεωυλικών είναι μικρότερες από τη τιμή  $k=10^{-5}$  m/s και κατά συνέπεια βρίσκονται στις τιμές του πεδίου εφαρμογής των EPB, το οποίο και είναι το καταλληλότερο μηχανήμα.

### **Τμήμα Χ.Θ. 2+150 έως 3+300**

Οι εδαφικοί σχηματισμοί της «Σειράς των Ερυθρών Αργίλων», οι οποίοι πρόκειται να εκσκαφτούν, χαρακτηρίζονται και σε αυτό το τμήμα από χαμηλής υδατοπερατότητας γεωλικά με τιμές οι οποίες κυμαίνονται από  $k=3 \cdot 10^{-8}$ - $9 \cdot 10^{-7}$  m/s (Κεφάλαιο 4). Από το νομογράφημα της Herrenknecht προκύπτει ότι οι τιμές της διαπερατότητας των γεωλικών εντοπίζονται στις τιμές του πεδίου εφαρμογής της μηχανής EPB, όπως και για τις οδηγίες της BTS αφού οι τιμές της διαπερατότητας είναι μικρότερες από τη τιμή  $k=10^{-5}$  m/s. Συνεπώς το καταλληλότερο μηχάνημα για την εκσκαφή του συγκεκριμένου τμήματος είναι το μηχάνημα EPB.

### **Τμήμα Χ.Θ. 3+300 έως 4+400**

Οι τιμές της διαπερατότητας για τα προς εκσκαφή γεωλικά του συγκεκριμένου τμήματος, έπειτα από τις δοκιμές υδατοπερατότητας που πραγματοποιήθηκαν, βρίσκονται εντός ενός εύρους μεταξύ των τιμών  $k=1.5 \cdot 10^{-8}$ - $7 \cdot 10^{-7}$  m/s (Κεφάλαιο 4). Από το νομογράφημα της Herrenknecht, όπως και για το προηγούμενο τμήμα, προκύπτει ότι οι τιμές της διαπερατότητας των γεωλικών εντοπίζονται στις τιμές του πεδίου εφαρμογής της μηχανής EPB, όπως και για τις οδηγίες της BTS αφού οι τιμές της διαπερατότητας είναι μικρότερες από τη τιμή  $k=10^{-5}$  m/s. Συνεπώς το καταλληλότερο μηχάνημα για την εκσκαφή του συγκεκριμένου τμήματος είναι το μηχάνημα EPB.

### **Τμήμα Χ.Θ. 4+400 έως 5+245**

Οι εδαφικοί σχηματισμοί των «Τεταρτογενών Αποθέσεων» του τελευταίου τμήματος της χάραξης της σήραγγας συνθέτονται και αυτοί από γεωλικά μικρής διαπερατότητας με τιμές  $k < 10^{-6}$  m/s (Κεφάλαιο 4), και κατά συνέπεια βάσει του νομογραφήματος της Herrenknecht, ακολουθούν τις τιμές του πεδίου εφαρμογής των μηχανημάτων EPB. Βάσει των Βρετανικών οδηγιών το εύρο των τιμών επίσης εντοπίζεται στο πεδίο εφαρμογής των μηχανημάτων EPB. Συνεπώς, το καταλληλότερο μηχάνημα για την εκσκαφή του τμήματος θα είναι ένα μηχάνημα τύπου EPB.

Από τα παραπάνω συνεπώς κρίνεται ότι σε όλα τα τμήματα οι τιμές της διαπερατότητας διαθέτουν τέτοιο εύρος ώστε το καταλληλότερο μηχάνημα εκσκαφής να είναι τύπου EPB.

### **6.6.3 Η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα πάνω από το επίπεδο του άξονα της σήραγγας όπου αναπτύσσονται εδαφικοί σχηματισμοί**

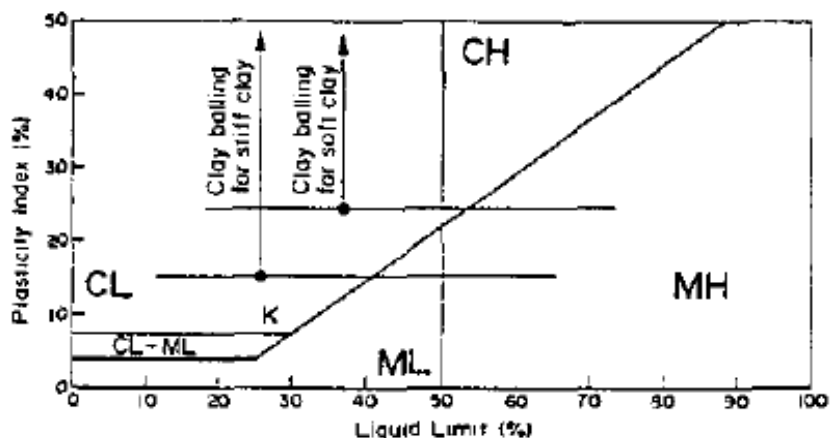
Υψηλή στάθμη υδροφόρου ορίζοντα σε σχέση με το επίπεδο της σήραγγας σημαίνει ανάπτυξη υψηλών υδροστατικών πιέσεων στο μέτωπο αυτής κατά την εκσκαφή και η πίεση αυτή πρέπει να αντιμετωπιστεί. Σε περιπτώσεις όπου επικρατούν υψηλές υδροστατικές πιέσεις σε συνδυασμό με υψηλές διαπερατότητες κατά τις οδηγίες της Βρετανικής Κοινότητας Σηράγγων ενδεχομένως να είναι δύσκολο να δημιουργηθεί ικανό «βούλωμα (plug)» στον ατέρμονα κοχλία ενός EPB TBM. Κάτω από τέτοιες συνθήκες ένα STM θεωρείται καλύτερη λύση καθώς ο πολφός μπετονίτη βοηθάει στο να σφραγιστεί το μέτωπο κατά τη διάρκεια παρεμβάσεων κάτω από το καθεστώς συμπιεσμένου αέρα. Παρόλα αυτά στο συγκεκριμένο τεχνικό έργο, όπως φαίνεται και στη τομή T1, η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα δεν είναι αρκετά υψηλή (2.50-14m) ώστε να αναπτυχθούν σημαντικές υδροστατικές πιέσεις στο μέτωπο κατά την εκσκαφή, ενώ και οι εδαφικοί σχηματισμοί είναι πολύ μικρής διαπερατότητας, όπως προαναφέρθηκε, συνεπώς η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα δεν αποτελεί σημαντικό κριτήριο στην επιλογή του κατάλληλου μηχανήματος. Σύμφωνα με τις Βρετανικές οδηγίες όμως ένα μηχάνημα τύπου EPB δεν αναμένεται να αντιμετωπίσει προβλήματα λόγω του υδροφόρου ορίζοντα.

#### 6.6.4 Το όριο υδαρότητας (LL), ο δείκτης πλασιμότητας (PI) και ο δείκτης συνεκτικότητας (Ic) των γεωυλικών

Προκειμένου να εκτιμηθεί επαρκώς η φύση των γεωυλικών πραγματοποιήθηκαν δοκιμές προσδιορισμού των ορίων Atterberg (Κεφάλαιο 4), από τα οποία και προκύπτει ο δείκτης πλασιμότητας (PI) και ο δείκτης συνεκτικότητας (Ic), μεγέθη σημαντικά για τα εδαφικά υλικά προκειμένου να διαπιστωθεί η καταλληλότητα ενός μηχανήματος TBM για τη διάνοιξη σηράγγων. Παρακάτω ακολουθούν ανά τμήμα τα παραπάνω μεγέθη ώστε να γίνει η εκλογή του κατάλληλου μηχανήματος.

##### Τμήμα Χ.Θ. 0+050 έως 0+375

Όπως και για την ανάλυση που προηγήθηκε βάσει της κοκκομετρικής φύσης των γεωυλικών και της υδατοπερατότητας έτσι για τα όρια Atterberg του τμήματος οι πληροφορίες ήταν περιορισμένες. Κατά συνέπεια τα συμπεράσματα για το συγκεκριμένο τμήμα προκύπτουν από τη γενίκευση των αποτελεσμάτων των δοκιμών στο τμήμα με Χ.Θ. 0+265-0+375. Από τα στοιχεία που προέκυψαν (Κεφάλαιο 4) οι επικρατούσες τιμές του ορίου υδαρότητας LL είναι μικρότερες από τη τιμή 35 (ισχνές άργιλοι) ενώ ο δείκτης πλασιμότητας που προκύπτει κυμαίνεται κυρίως μεταξύ των τιμών  $7 \leq PI < 17$  υποδεικνύοντας γεωυλικά ενδιάμεσης πλασιμότητας. Κατά συνέπεια τα γεωυλικά των «Τεταρτογενών Αποθέσεων» δε χαρακτηρίζονται από μεγάλη πλασιμότητα, που ενδεχομένως να υποδεικνύει κολλώδη συμπεριφορά (sticky behavior) αυτών έναντι του μηχανήματος, οπότε και δεν αναμένονται προβλήματα λόγω εμπλοκής (clogging) της κεφαλής κοπής, του θαλάμου εργασίας και του ατέρμονου κοχλία καθώς και εμπόδιση του μηχανήματος κατά τη προώθηση του λόγω της αναπτυσσόμενης τριβής. Επίσης δεν αναμένονται προβλήματα δημιουργίας σβώλων υλικού, κατά τη BTS και κατά το σχήμα 6.6.4.1 (Leshchinsky et al. 1992), συνεπώς ένα STM δε θα αντιμετωπίσει προβλήματα στην εγκατάσταση διαχωρισμού του πολφού από το εδαφικό υλικό αλλά ούτε και το EPB κάνοντας χρήση ειδικών χημικών πρόσθετων που θα βελτιώσουν το όριο υδαρότητας. Συνεπώς και οι δύο τύποι μηχανήματος κρίνονται κατάλληλοι βάσει του παραπάνω κριτηρίου.



Σχήμα 6.6.4.1 : Τα όρια Atterberg σε σχέση με τη δημιουργία σβώλων υλικού  
Πηγή : Criteria for selecting mechanised tunnelling systems  
in soft ground-Walter Steiner

##### Τμήμα Χ.Θ. 0+375 έως 0+600

Από τα στοιχεία τα οποία ελήφθησαν (Κεφάλαιο 4), όπως και στο προηγούμενο τμήμα, τα γεωυλικά των «Νεογενών Αποθέσεων» παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά στο συγκεκριμένο κομμάτι με αυτά των «Τεταρτογενών Αποθέσεων» σε ότι αφορά τα όρια Atterberg και τα σχετιζόμενα με αυτά μεγέθη καθώς οι επικρατούσες τιμές του ορίου

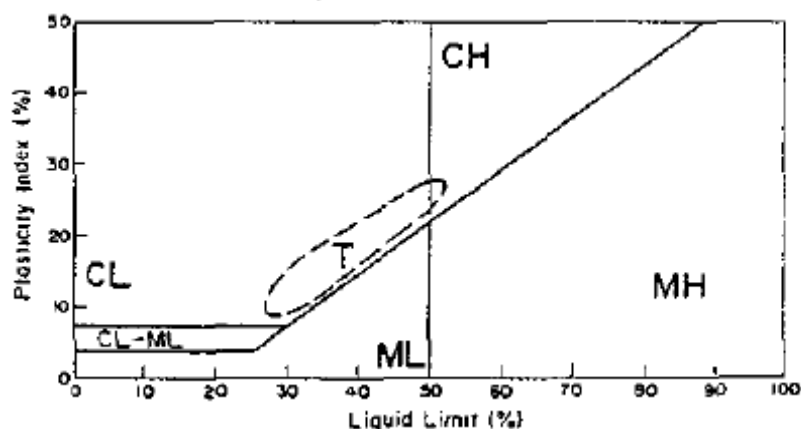
υδαρότητας LL είναι μικρότερες από τη τιμή 35 (ισχνές άργιλοι) ενώ ο δείκτης πλασιμότητας που προκύπτει κυμαίνεται κυρίως μεταξύ των τιμών  $7 \leq PI < 17$  υποδεικνύοντας γεωλικά ενδιάμεσης πλασιμότητας, συνεπώς δεν αναμένονται παρόμοια φύσης προβλήματα με αυτά που αναφέρθηκαν παραπάνω για τους δύο τύπους μηχανημάτων. Ένα STM κάνοντας χρήση του πολφού μετονίτη βελτιώνει τις συνθήκες εκσκαφής. Ένα EPB, σύμφωνα με την εμπειρία που έχει αποκτηθεί από διάφορα τεχνικά έργα ανά τον κόσμο, θα πρέπει να αυξήσει το όριο υδαρότητας του προς εκσκαφή εδαφικού υλικού με χρήση χημικών πρόσθετων ώστε να δημιουργηθούν οι κατάλληλες συνθήκες εκσκαφής. Συνεπώς και οι δύο τύποι μηχανήματος κρίνονται κατάλληλοι βάσει του παραπάνω κριτηρίου.

#### Τμήμα Χ.Θ. 0+600 έως 0+700

Από τη τεχνικογεωλογική/γεωτεχνική έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί και τα αποτελέσματα αυτής (Κεφάλαιο 4), προκύπτει ότι στο σύνολο τους οι εδαφικοί σχηματισμοί προς εκσκαφή χαρακτηρίζονται από χαμηλό όριο υδαρότητας ( $LL < 35$ ) ενώ ο δείκτης πλασιμότητας κυμαίνεται κυρίως μεταξύ των τιμών  $7 \leq PI < 17$  υποδεικνύοντας ενδιάμεσης πλασιμότητας γεωλικά. Εκτιμάται ότι δεν αναμένονται προβλήματα λόγω κολλώδους συμπεριφοράς των γεωλικών, αφού η πλασιμότητα αυτών δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλη, όπως και προβλήματα λόγω «σβώλωσης (balling)» αυτών λόγω της ενδιάμεσης πλασιμότητας αυτών, κατά τη BTS και το σχήμα 6.6.4.1 (Leshchinsky et al. 1992). Η συμπεριφορά των δύο τύπων μηχανών εκτιμάται ότι θα είναι παρόμοια με τη συμπεριφορά αυτών στα προηγούμενα τμήματα, όπως περιγράφηκε παραπάνω, συνεπώς και οι δύο τύποι μηχανών βάσει του ορίου υδαρότητας και του δείκτη πλασιμότητας είναι σε θέση να εκσκάψουν τα γεωλικά που αναμένονται στο μέτωπο της εκσκαφής.

#### Τμήμα Χ.Θ. 2+150 έως 3+300

Από τα στοιχεία που προέκυψαν (Κεφάλαιο 4) από τις υφιστάμενες γεωτρήσεις και τις πραγματοποιηθείσες δοκιμές προκύπτει ότι για το συγκεκριμένο τμήμα τα επικρατούντα γεωλικά της «Σειράς των Ερυθρών Αργίλων» χαρακτηρίζονται από όριο υδαρότητας το οποίο κινείται εντός ενός εύρους μεταξύ  $35 \leq LL < 50$ , ενώ ο δείκτης πλασιμότητας αυτών κινείται μεταξύ των τιμών  $17 \leq PI < 35$  χαρακτηρίζοντας τα προς εκσκαφή γεωλικά ως υψηλής πλασιμότητας. Ο δείκτης συνεκτικότητας, όπως φαίνεται και στη τομή T10, για το συγκεκριμένο τμήμα χαρακτηρίζεται από τιμές  $I_c \geq 1$ , υποδεικνύοντας γεωλικά πολύ στιφρά έως σκληρά. Από τα παραπάνω στοιχεία παρατηρείται ότι το όριο υδαρότητας ξεπερνά το 30% και σε σχέση με το δείκτη πλασιμότητας από το χάρτη πλασιμότητας του Casagrande (σχήμα 6.6.4.2) προκύπτει ότι τα γεωλικά εντοπίζονται πάνω από τη γραμμή-A όπου συνιστάται η εφαρμογή μηχανημάτων EPB.

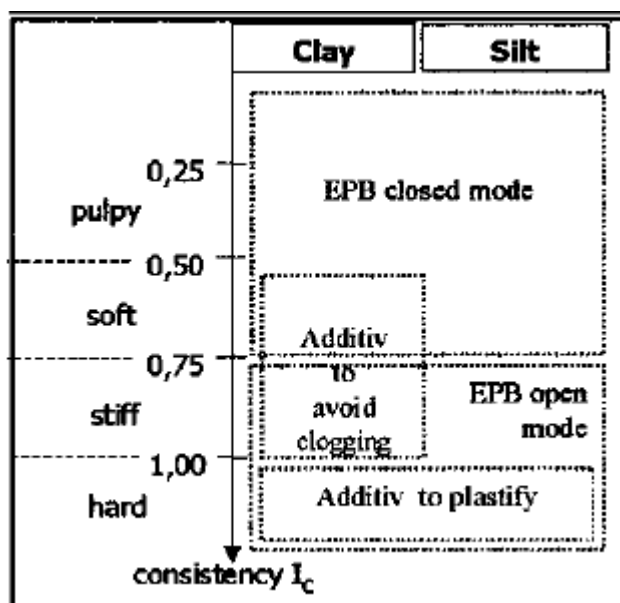


Σχήμα 6.6.4.2 : Ο χάρτης πλασιμότητας του Casagrande. Με T παρουσιάζεται η περιοχή του διαγράμματος με υλικά κατάλληλα για το μηχανήμα EPB

Πηγή : Criteria for selecting mechanised tunnelling systems in soft ground-Walter Steiner



Παρόλα αυτά, τα γεωυλικά βρίσκονται επίσης σε μία περιοχή όπου είναι δυνατό να δημιουργηθούν προβλήματα λόγω «σβώλωσης (balling)», καθώς αυτά χαρακτηρίζονται από υψηλό δείκτη πλασιμότητας, όπως υποδεικνύεται από τη BTS και από το σχήμα 6.6.4.1 (Leshchinsky et al. 1992), δημιουργώντας δύσκολες συνθήκες εκσκαφής για ένα μηχάνημα τύπου STM, αλλά και για μηχανήματα EPB όπου απαιτούνται ειδικά πρόσθετα για τη βελτίωση των συνθηκών εκσκαφής. Επίσης λόγω του υψηλού δείκτη συνεκτικότητας  $I_c$  για να χρησιμοποιηθεί ένα μηχάνημα EPB προσθέτει ένα ακόμα λόγο για τη χρήση χημικών πρόσθετων (σχήμα 6.6.4.3).



**Σχήμα 6.6.4.3 : Εδαφικά μηχανικά κριτήρια για διάφορους τύπους λειτουργίας**

**Πηγή : Earth Pressure Balanced Shield Technology-Dr. Martin Herrenknecht, Dr. Ulrich Rehm**

Συνεπώς ένα STM θα αντιμετωπίσει δυσκολίες, λόγω του σχετικά υψηλού δείκτη πλασιμότητας, στην εγκατάσταση διαχωρισμού του πολφού μετονίτη από το εκσκαφέν υλικό αλλά ένα EPB, με τη χρήση χημικών πρόσθετων, είναι πιο κατάλληλο για τη διάνοιξη της σήραγγας στο συγκεκριμένο τμήμα. Προβλήματα λόγω κολλώδους συμπεριφοράς (sticky behavior) των εδαφικών υλικών αναμένεται να προκύψουν, καθώς χαρακτηρίζονται κυρίως από υψηλό δείκτη πλασιμότητας, και ο κίνδυνος για την εμφάνιση εμπλοκής (clogging) είναι μέτριος ως υψηλός κατά Thewes και Burger (2004) (Παράρτημα Β), πράγμα το οποίο προσθέτει ένα ακόμα λόγο για τη χρήση χημικών ώστε να αποφευχθούν τέτοια προβλήματα (σχήμα 6.6.4.3).

### **Τμήμα Χ.Θ. 3+300 έως 4+400**

Τα γεωυλικά, που αναμένεται να εκσκαφτούν σε αυτό το τμήμα της σήραγγας, από τα στοιχεία που έχουν προκύψει σε ότι αφορά το προσδιορισμό των ορίων Atterberg, του δείκτη πλασιμότητας (Κεφάλαιο 4) και του δείκτη συνεκτικότητας (τομή T10) παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά με το παραπάνω τμήμα από τη χιλιομετρική θέση 2+150 έως τη χιλιομετρική θέση 3+300, καθώς συνθέτεται από εδαφικούς σχηματισμούς των «Νεογενών Αποθέσεων». Λόγω των παραπάνω συνεπώς, το συμπέρασμα που προκύπτει για το συγκεκριμένο τμήμα είναι ότι ένα μηχάνημα STM θα αντιμετωπίσει προβλήματα λόγω του σχετικά υψηλού δείκτη πλασιμότητας ενώ ένα EPB TBM θα είναι καταλληλότερο για την εκσκαφή, κάνοντας όμως χρήση χημικών πρόσθετων για τη βελτίωση των συνθηκών αυτής.

### **Τμήμα Χ.Θ. 4+400 έως 5+245**

Στο τελευταίο τμήμα της σήραγγας το μέτωπο εκσκαφής αναμένεται να απαντήσει τους εδαφικούς σχηματισμούς που απαρτίζουν τις «Τεταρτογενείς Αποθέσεις». Όπως έχει παρουσιαστεί στο Κεφάλαιο 4, οι τιμές του ορίου υδαρότητας που χαρακτηρίζουν τα γεωλικά του μετώπου εκσκαφής είναι πάλι μικρότερες από το 35% ενώ και ο δείκτης πλασιμότητας κυμαίνεται εντός ενός εύρους κυρίως από  $7 \leq PI < 17$  με τα γεωλικά να χαρακτηρίζονται ως ενδιάμεσα πλάσιμα. Από το προσδιορισθέντα δείκτη συνεκτικότητας (τομή T10) αυτός κυμαίνεται κυρίως από  $0.50 \leq Ic < 0.75$  στο συγκεκριμένο τμήμα χαρακτηρίζοντας το υλικό κυρίως ως σταθερό. Ο δείκτης πλασιμότητας δεν είναι υψηλός τόσο ώστε να δημιουργήσει προβλήματα λόγω «σβόλοσης (balling)» των γεωλικών, σε σχέση και με το όριο υδαρότητας (σχήμα 6.6.4.1-Leshchinsky et al. 1992) και όπως υποδεικνύεται από τη BTS, ενώ δεν αναμένονται και προβλήματα λόγω κολλώδους συμπεριφοράς (sticky behavior) των εδαφικών σχηματισμών και ο κίνδυνος για την εμφάνιση εμπλοκής (clogging) ελάχιστος έως μέτριος κατά Thewes και Burger (2004) (Παράρτημα Β) και μπορεί να αποφευχθεί με χρήση χημικών προσθέτων (σχήμα 6.6.4.3). Όπως και στο τμήμα από τη Χ.Θ.0+050 έως τη Χ.Θ. 0+375 οι δύο τύποι μηχανήματος κρίνονται και οι δύο κατάλληλοι για την εκσκαφή αυτού.

Από το σύνολο συνεπώς των παραπάνω κρίνεται ότι το καταλληλότερο μηχανήμα μεταξύ ενός μηχανήματος πολφού μπετονίτη και ενός εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης είναι το δεύτερο καθώς αναμένεται να ανταποκριθεί καλύτερα στο μεγαλύτερο μήκος της χάραξης της σήραγγας κατά την εκσκαφή βάσει του συγκεκριμένου κριτηρίου.

### **Τμήμα Χ.Θ. 0+700 έως 2+150**

Παραπάνω επιτηδευμένα δεν αναφέρθηκε το συγκεκριμένο τμήμα, καθώς για το 1.5km του κομματιού αυτού το μηχανήμα εκσκαφής, το οποίο πρόκειται να επιλεγεί, θα συναντήσει κατά την εκσκαφή τους βραχώδεις σχηματισμούς της Ενότητας του Χορτιάτη. Όπως προέκυψε από τη τεχνικογεωλογική-γεωτεχνική έρευνα και ανάλυση (Κεφάλαιο 4) πρόκειται για μία μέτριας ποιότητας βραχώμαζα, όπου επίσης παρουσιάζονται και ασθενείς ζώνες όπου το υλικό εμφανίζεται αποσαθρωμένο, καθώς και ζώνες όπου το πέτρωμα είναι έντονα κερματισμένο από τις τεκτονικές δράσεις στη περιοχή. Τόσο ένα μηχανήμα πολφού όσο και ένα μηχανήμα εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης δε θα έχει την ίδια λειτουργία όπως όταν εκσκάπτονται εδαφικοί σχηματισμοί. Λόγω αλλαγής στη σκληρότητα των σχηματισμών θα πρέπει να γίνουν αλλαγές των κοπτικών εργαλείων και τα δύο μηχανήματα θα πρέπει να παρέχουν τη δυνατότητα για επεμβάσεις του εργατικού προσωπικού στο μέτωπο, ενώ όπου το υλικό είναι πολύ ασθενές έως ασθενές (κυρίως στις ζώνες αδυναμίας) θα πρέπει ασκείται η απαραίτητη πίεση στο μέτωπο ώστε να αποφευχθούν καταπτώσεις βραχωδών υλικών. Από τις δοκιμές σε ανεμπόδιση θλίψη άρρηκτων δοκιμίων βράχου σε σχέση με το προσδιορισμό του GSI και το προσδιορισμό της αντοχής της βραχώμαζας  $\sigma_{cm}$  σε σχέση με το βάρος των υπερκειμένων δεν αναμένονται προβλήματα συγκλίσεων, ώστε να απειληθεί το μηχανήμα (φαινόμενα σφηνώσεως (squeezing ground conditions)) (Παράρτημα Β) λόγω της ασπίδας αλλά ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δοθεί στις ασθενείς ζώνες, όπως προαναφέρθηκε προς αποφυγή προβλημάτων, αφού ενδεχόμενες αστοχίες θα ελέγχονται από τις εκάστοτε ασυνέχειες (προσανατολισμό, τραχύτητα, υλικό πληρώσεως κλπ) και το βαθμό κερματισμού της βραχώμαζας. Σημαντική πληροφορία επίσης συνθέτει η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα στο συγκεκριμένο τμήμα, η οποία κυμαίνεται από 10m έως 23m και ενδεχομένως να δημιουργεί κατά τόπους πεδίο υψηλών πιέσεων. Παρόλα αυτά, οι βραχώδεις σχηματισμοί της ενότητας του Χορτιάτη δε παρουσιάζουν μεγάλες διαπερατότητες (Κεφάλαιο 4-τομή T11), ακόμα και στις έντονα καταπονημένες ζώνες λόγω της ύπαρξης υλικού πληρώσεως αργιλικής κυρίως φύσης, συνεπώς η εφαρμογή ενός STM, που ανταποκρίνεται καλύτερα σε περιβάλλον υψηλών υδροστατικών πιέσεων, εκτιμάται ότι δεν είναι απαραίτητη και ένα μηχανήμα EPB θα μπορέσει να ανταπεξέλθει στις αναμενόμενες συνθήκες εκσκαφής.

### 6.6.5 Συμπεράσματα

Όπως έχει ήδη αναφερθεί παραπάνω και οι δύο, συγκεκριμένοι τύποι μηχανημάτων εκσκαφής ανήκουν στη κατηγορία κλειστού μετώπου εκσκαφής και σε ότι αφορά το συγκεκριμένο τεχνικό έργο της επέκτασης του Μετρό της Θεσσαλονίκης αποτελούν και τα δύο εξίσου ικανοποιητική επιλογή για τη διάνοιξη της σήραγγας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός της ικανότητας και των δύο τύπων μηχανών να ασκούν ελεγχόμενη πίεση στο μέτωπο κατά τη διάρκεια της εκσκαφής και συνεπώς τη μικρή πιθανότητα εκδήλωσης αστάθειας του μετώπου ή υπερεκσκαφών που ενδεχομένως να οδηγήσουν σε φαινόμενα μεγάλων παραμορφώσεων, καθιζήσεων ή και καταρρεύσεων.

Παρόλα αυτά, λειτουργικά μεταξύ των δύο το μηχάνημα εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης (EPB) κρίνεται ως καταλληλότερο, καθώς η εκτενής παρουσία λεπτόκοκκων γεωυλικών, που επικρατούν κατά μήκος της χάραξης της σήραγγας έναντι των αδρόκοκκων σχηματισμών, δημιουργεί πλεονεκτήματα για τη χρήση του και μειονεκτήματα για την εφαρμογή μηχανήματος πολφού μπετονίτη με ασπίδα (Slurry Shield).

Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο πολφός μπετονίτη που χρησιμοποιεί ένα STM διαχωρίζεται και ανακυκλώνεται προκειμένου να επαναχρησιμοποιηθεί από το μηχάνημα. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται εύκολα σε αδρόκοκκους σχηματισμούς, σε λεπτόκοκκους όμως γίνεται πάρα πολύ δύσκολα και απαιτεί σύνθετες μηχανολογικές διατάξεις προκειμένου να επιτευχθεί. Αντίθετα με αυτό, ένα μηχάνημα EPB υπερτερεί καθώς το λεπτόκοκκο εδαφικό υλικό στη περίπτωση αυτή βοηθάει στη δημιουργία στεγανών συνθηκών στον ελικοειδή μετακομιστή (screw conveyor) οπότε και στον έλεγχο των εισροών υπόγειων νερών. Η παρουσία επίσης έντονα αδρόκοκκων σχηματισμών δεν αναμένεται να είναι εκτεταμένη, όπως προκύπτει από τη τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική έρευνα, και εκτιμάται ότι θα αντιμετωπιστεί εύκολα με χρήση ειδικών χημικών προσθέτων.

Η διαπερατότητα επίσης των σχηματισμών είναι σχετικά μικρή, ακόμα και στις περιοχές όπου εμφανίζονται πιο αδρόκοκκοι σχηματισμοί λόγω της έντονης παρουσίας υλικών αργιλικής φύσεως. Συνεπώς δεν απαιτείται εφαρμογή του μηχανήματος πολφού, το οποίο αντιμετωπίζει σχηματισμούς μεγάλης διαπερατότητας ευχερέστερα από ένα μηχάνημα EPB λόγω της χρήσης του πολφού μπετονίτη, λαμβάνοντας υπόψη και τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα όπου στο συγκεκριμένο τεχνικό έργο δεν αναμένεται να δημιουργήσει προβλήματα.

Επιπλέον, από τον προσδιορισμό των ορίων Atterberg και του δείκτη πλασιμότητας και του δείκτη συνεκτικότητας ένα μηχάνημα STM σε κάποια τμήματα αναμένεται να αντιμετωπίσει προβλήματα στην εγκατάσταση διαχωρισμού του πολφού από το εκσκαφέν υλικό, όπως διαπιστώθηκε από την ανάλυση παραπάνω, ενώ και ένα μηχάνημα EPB μπορεί να αντιμετωπίσει προβλήματα τα οποία όμως δύναται να ξεπεραστούν κάνοντας χρήση χημικών πρόσθετων. Λειτουργικά συνεπώς ένα μηχάνημα εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης EPB κρίνεται ως καταλληλότερο για τη διάνοιξη της σήραγγας επέκτασης του Μετρό της Θεσσαλονίκης προς Σταυρούπολη.

### 6.6.6 Εξέταση του μηχανήματος εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης (EPB) ως προς τον τρόπο λειτουργίας του

Ο τρόπος λειτουργίας ενός μηχανήματος EPB, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ορίζεται ως ανοικτός τύπος λειτουργίας (Open Mode Operation), όπου ο θάλαμος πίσω από τη κοπτική κεφαλή είναι κενός χωρίς άσκηση πίεσης ενώ η αποκομιδή των υλικών πραγματοποιείται με χρήση μεταφορικής ταινίας, ημίκλειστος (Semi-Closed Mode Operation), όπου ο θάλαμος είναι μερικώς πληρωμένος και υπό πίεση, και κλειστός (Closed Mode Operation), όπου ο θάλαμος είναι πληρωμένος και υπό πίεση και η αποκομιδή των υλικών εκσκαφής πραγματοποιείται με τη χρήση του ατέρμονα κοχλία. Ο προτιμώμενος, κατά περίπτωση, τρόπος λειτουργίας επιλέγεται με κριτήρια την ελαχιστοποίηση των αστοχιών και το βέλτιστο ρυθμό παραγωγής. Ο τρόπος λειτουργίας που εκτιμάται ότι θα πρέπει να εφαρμοστεί παρουσιάζεται παρακάτω ενώ εμφανίζεται και στη τομή TM1 και στο σχήμα 6.

### **Τμήμα Χ.Θ. 0+050 έως 0+375**

Στο συγκεκριμένο τμήμα, όπως έχει διαπιστωθεί από τη τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική ανάλυση που έχει προηγηθεί, εκτιμάται ότι τα γεωλικά που πρόκειται να εκσκαφτούν είναι εν γένει χαμηλής ποιότητας. Τα υπερκείμενα επίσης γεωλικά από το βάθος εκσκαφής της σήραγγας παρουσιάζουν πτωχές μηχανικές ιδιότητες. Ο υδροφόρος ορίζοντας επίσης στο συγκεκριμένο τμήμα αναμένεται να δημιουργεί υδροστατικές πιέσεις στη στέψη της σήραγγας από 40kPa έως 90 kPa. Προκειμένου συνεπώς να αποφευχθούν αστάθειες στο μέτωπο κατά την εκσκαφή λόγω των πτωχής ποιότητας γεωλικών και να εξισορροπηθούν οι εδαφικές και υδροστατικές πιέσεις εκτιμάται ότι το μηχάνημα EPB θα έχει κλειστού τύπου λειτουργία στο συγκεκριμένο τμήμα.

### **Τμήμα Χ.Θ. 0+375 έως 0+600**

Στο συγκεκριμένο τμήμα αναμένεται μία περιοχή όπου τα προς εκσκαφή γεωλικά είναι σχετικά καλής ποιότητας στο αρχικό κομμάτι αυτού. Παρόλα αυτά, η ποιότητα των γεωλικών γίνεται χαμηλή όπως προχωράει το μέτωπο της εκσκαφής, με τα υπερκείμενα να είναι επίσης υλικά πτωχών μηχανικών ιδιοτήτων, τα οποία ενδεχομένως να επηρεάσουν δυσμενώς τα επιφανειακά στρώματα. Ο υδροφόρος ορίζοντας αν και είναι σχετικά υψηλός στο αρχικό κομμάτι του τμήματος καθώς προχωράει το μέτωπο έρχεται πιο κοντά στη στέψη της σήραγγας και κατά συνέπεια δεν αναμένεται επιβάρυνση λόγω υψηλών υδροστατικών πιέσεων. Παρόλα αυτά, λόγω της ύπαρξης πτωχής ποιότητας γεωλικών κοντά σχετικά στη στέψη της σήραγγας συνιστάται να ασκηθεί επαρκής πίεση εξισορρόπησης από το μηχάνημα προκειμένου να αποφευχθούν φαινόμενα αστάθειας του μετώπου, οπότε το μηχάνημα θα πρέπει να λειτουργήσει σε κλειστό τύπο λειτουργίας.

### **Τμήμα Χ.Θ. 0+600 έως 0+700**

Στο τμήμα αυτό αναμένονται μικτές συνθήκες μετώπου όπως έχει ήδη αναφερθεί, καθώς το μέτωπο της εκσκαφής απαντά για πρώτη φορά τους βραχώδεις σχηματισμούς της Ενότητας του Χορτιάτη. Οι εδαφικοί σχηματισμοί που αναμένεται να απαντηθούν είναι κυρίως σταθεροί, λεπτόκοκκοι σχηματισμοί με τους υπερκείμενους σχηματισμούς πάνω από τη στέψη να είναι παρόμοιων ή και πτωχότερων ιδιοτήτων. Η βραχώμαζα που αναμένεται να εκσκαφτεί, βρίσκεται πολύ κοντά στα επιφανειακά στρώματα και είναι σχετικά ασθενής δημιουργώντας μια ζώνη αποσάθρωσης. Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι και σε αυτό το τμήμα η ποιότητα των γεωλικών δεν επιτρέπει να μειωθεί η ασκούμενη από το μηχάνημα πίεση στο μέτωπο της εκσκαφής συνεπώς συνιστάται το μηχάνημα EPB να διατηρήσει τη κλειστού τύπου λειτουργία του και σε αυτό το τμήμα.

### **Τμήμα Χ.Θ. 0+700 έως 2+150**

Στο συγκεκριμένο κομμάτι η διάνοιξη της σήραγγας αναμένεται να πραγματοποιηθεί εξολοκλήρου στους βραχώδεις σχηματισμούς της ενότητας του Χορτιάτη. Η βραχώμαζα εν γένει δείχνει να είναι κυρίως μέτριας ποιότητας ενώ εκτιμάται ότι θα παρουσιάσει αντοχή επαρκή έναντι των φορτίων λόγω υπερκείμενων. Παρόλα αυτά, από τη τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε γίνεται εμφανές ότι μέσα στη βραχώμαζα εμφανίζονται ζώνες αδυναμίας, όπου ο βραχώδης σχηματισμός εμφανίζει πτωχές ιδιότητες.

Πιο συγκεκριμένα από τη χιλιομετρική θέση 0+700-0+800 η βραχώμαζα εμφανίζεται καταπονημένη και αποσαθρωμένη, καθώς έρχεται σε επαφή με τα εδαφικά στρώματα. Για να μην υπάρξουν συνεπώς φαινόμενα αστάθειας του μετώπου το μηχάνημα θα τεθεί σε λειτουργία κλειστού τύπου.

Από τη χιλιομετρική θέση 0+800-1+300 οι ιδιότητες της βραχώμαζας βελτιώνονται, όμως και εντός αυτού του κομματιού εμφανίζονται ζώνες σχετικά υψηλού κερματισμού, συνεπώς προκειμένου να αποφευχθούν αστάθεια στο μέτωπο ή προβλήματα υπερεκσκαφών στις ασθενείς ζώνες συνιστάται η εφαρμογή ημίκλειστου τύπου λειτουργίας.

Από τη χιλιομετρική θέση 1+300-1+640 η βραχόμαζα εμφανίζεται πάλι σχετικά ασθενής και σχετικά πτωχών ιδιοτήτων λόγω του υψηλού βαθμού κερματισμού με τη ποιότητα του να βελτιώνεται καθώς το μέτωπο εκσκαφής προχωράει. Αυτό έχει σα συνέπεια να υπάρχει πιθανότητα εν δυνάμει να δημιουργηθούν φαινόμενα αστάθειας του μετώπου και υπερεκσκαφών. Για το λόγο αυτό η λειτουργία του μηχανήματος συνιστάται να αλλάξει από αυτή του ημίκλειστου τύπου σε αυτή του κλειστού για τα πρώτα 200m του συγκεκριμένου κομματιού και έπειτα να αλλάξει και πάλι σε ημίκλειστου τύπου λειτουργία.

Από τη χιλιομετρική θέση 1+640-1+800 το μέτωπο της εκσκαφής αναμένεται να συναντήσει βραχώδεις σχηματισμούς σχετικά καλής ποιότητας (υψηλός δείκτης GSI) οι οποίοι δεν αναμένεται να δημιουργήσουν προβλήματα κατά την εκσκαφή. Συνεπώς για το συγκεκριμένο τμήμα η λειτουργία του μηχανήματος σε ανοικτού τύπου είναι δυνατή.

Από τη χιλιομετρική θέση 1+800-1+900 εμφανίζονται ζώνες όπου το γεωυλικό είναι ασθενές, με υψηλού βαθμού κερματισμό, μέτρια αποσαθρωμένο. Η κακή ποιότητα του υλικού υποδεικνύει ότι α πρέπει να ασκηθεί πίεση από το μηχάνημα ικανή να διατηρήσει την ευστάθεια του μετώπου προκειμένου να αποφευχθούν φαινόμενα αστοχιών και υπερεκσκαφών, συνεπώς το μηχάνημα EPB θα πρέπει να λειτουργήσει με κλειστού τύπου λειτουργία.

Τέλος από τη χιλιομετρική θέση 1+900-2+150 οι βραχώδεις σχηματισμοί που αναμένεται να εκσκαφτούν εκτιμάται ότι μπορούν να διαχωριστούν σε δύο κατηγορίες βάσει της ποιότητας τους, με τα καλής ποιότητας υλικά να βρίσκονται στο πυθμένα έως το μέσο της διατομής της σήραγγας και τα κακής ποιότητας να βρίσκονται στο άνω μισό της διατομής και στη στέψη αυτής. Η συμπεριφορά συνεπώς του μηχανήματος κατά την εκσκαφή ελέγχεται από το σχετικά χαμηλής ποιότητας γεωυλικό που εντοπίζεται στη στέψη του μετώπου της σήραγγας και προκειμένου να αποφευχθούν προβλήματα αστοχιών συνιστάται το μηχάνημα να χρησιμοποιηθεί με κλειστό τύπο λειτουργίας.

#### **Τμήμα Χ.Θ. 2+150 έως 4+400**

Στο συγκεκριμένο τμήμα, όπου το μέτωπο της εκσκαφής θα απαντήσει τη γεωλογική ενότητα των Νεογενών Αποθέσεων, τα προς εκσκαφή γεωυλικά που αναμένεται να εκσκαφτούν χαρακτηρίζονται από καλή ποιότητα, με τα λεπτόκοκκης φύσης να χαρακτηρίζονται από στιφρά έως κυρίως στιφρά και τα αδρόκοκκα, όπου αυτά εμφανίζονται να είναι πυκνά έως πολύ πυκνά. Οι εκτιμώμενες υδροστατικές πιέσεις στη στέψη της σήραγγας θα κυμαίνονται από 0 έως 90kPa περίπου, συνεπώς δημιουργείται ένα πεδίο πιέσεων με μία ακραία τιμή που συνιστάται να μην αγνοηθεί. Οι εκτιμώμενες υδροστατικές πιέσεις και η καλή συμπεριφορά έναντι της εκσκαφής των εδαφικών σχηματισμών του συγκεκριμένου τμήματος μπορούν να αντιμετωπιστούν από το μηχάνημα με ημίκλειστου τύπου λειτουργία. Εξαιρέση αποτελεί το κομμάτι από τη χιλιομετρική θέση 2+400-2+700 όπου η επαφή των καλών γεωυλικών της Σειράς των Ερυθρών Αργίλων με τα χαλαρότερα γεωυλικά των Τεταρτογενών Αποθέσεων έρχεται πολύ κοντά στη στέψη της σήραγγας και ενδεχόμενες αστάθειες πιθανότατα θα δημιουργήσουν προβλήματα, οπότε συνιστάται η λειτουργία του μηχανήματος να είναι κλειστού τύπου.

#### **Τμήμα Χ.Θ. 4+400 έως 5+245**

Στο τελευταίο τμήμα της σήραγγας το μέτωπο της εκσκαφής θα απαντήσει τα χαλαρά και κακής ποιότητας γεωυλικά των Τεταρτογενών Αποθέσεων. Τα γεωυλικά στο συγκεκριμένο τμήμα αναμένεται λόγω των πτωχών τους ιδιοτήτων να προκαλέσουν ποικίλα προβλήματα (υπερεκσκαφές, μεγάλες παραμορφώσεις) τα οποία λόγω της κακής ποιότητας και των υπερεκείμενων στρωμάτων να έχουν πιθανότατα επιφανειακές εμφανίσεις όπως εκτεταμένες καθιζήσεις, διαφορικές καθιζήσεις κατασκευών, φαινόμενα καταρρεύσεων κοκ, αν δεν υπάρξει επαρκής πίεση στο μέτωπο της εκσκαφής από το μηχάνημα EPB. Για το λόγο αυτό στο μηχάνημα θα πρέπει να εφαρμοστεί λειτουργία κλειστού τύπου, ώστε να αποφευχθούν πιθανά προβλήματα κατά την εκσκαφή.

Από τα παραπάνω συνεπώς συμπεραίνεται ότι επί του συνόλου της διαδρομής του μηχανήματος το 48% της διαδρομής εκτιμάται ότι θα εκσκαφτεί με το μηχάνημα EPB να είναι σε κλειστού τύπου λειτουργία, το 49% σε ημίκλειστου τύπου λειτουργία και μόλις το 3% σε ανοικτού τύπου λειτουργία. Είναι σαφές συνεπώς ότι το συντριπτικό ποσοστό της διαδρομής θα διανοιχτεί με το μηχάνημα να λειτουργεί με ολικώς ή μερικώς πληρωμένο το θάλαμο εκσκαφής, με τη λειτουργία κλειστού τύπου να εφαρμόζεται στα τμήματα όπου εμφανίζονται τα ασθενέστερα και πτωχότερης ποιότητας γεωυλικά ενώ όπου υπάρχουν καλύτερης ποιότητας γεωυλικά επικρατεί η λειτουργία ημίκλειστου τύπου.

## **Σημείωση**

Αν και η λειτουργία ενός μηχανήματος EPB σε λειτουργική κατάσταση κλειστού τύπου ασκεί στα κοπτικά μέσα ιδιαίτερη καταπόνηση και φθορά (Babendererde et al 2004), παρόλα αυτά είναι ο τύπος λειτουργίας ο οποίος είναι ο προσφορότερος από άποψη ασφαλείας. Σε ένα βαριά αστικό περιβάλλον, όπως σε αυτό μίας μεγάλης πόλης όπως η Θεσσαλονίκη, η απαίτηση για όσο το δυνατό μικρότερη διαταραχή του υπεδάφους είναι καταλυτικής σημασίας καθώς η επιφανειακή εμφάνιση προβλημάτων που μπορούν να προκληθούν από κάθε είδους αστοχίες κατά τη διάνοιξη της σήραγγας (μεγάλες παραμορφώσεις, υπερεκσκαφές κλπ), υπό τη μορφή καθιζήσεων, διαφορικών καθιζήσεων σε κατασκευές και πρόκληση ζημιών σε αυτές ή γενικευμένες καταρρεύσεις, δεν είναι ανεκτή. Παράδειγμα αποτελεί η βασική γραμμή του Μετρό της Θεσσαλονίκης όπου το μηχάνημα EPB αν και θεωρητικά μπορούσε να λειτουργήσει σε κάποια τμήματα δίχως να ήταν σε λειτουργική κατάσταση κλειστού τύπου, εντούτοις για λόγους ασφαλείας κατά μήκος όλης της χάραξης το μηχάνημα χρησιμοποιήθηκε με κλειστού τύπου λειτουργία προς αποφυγή δυσμενών καταστάσεων. Χαρακτηριστικό αποτελεί ότι ακόμα και με τη λειτουργία κλειστού τύπου το μηχάνημα είναι ικανό να διατηρήσει υψηλούς ρυθμούς αποδοτικότητας. Συνεπώς το ίδιο ισχύει και για την επέκταση προς Σταυρούπολη όπου το μηχάνημα EPB θα είναι πρακτικώς καλύτερο να χρησιμοποιηθεί με κλειστού τύπου λειτουργία, καθώς περνά κάτω από μια πλήρως δομημένη περιοχή με την ύπαρξη συνεχούς ανθρώπινης δραστηριότητας στην εδαφική επιφάνεια.

	Rock TBM	OFS	Slurry Shield	EPBM
Τμήμα Χάραξης-Χ.Θ.	Εφαρμοσιμότητα TBM κατά μήκος	Εφαρμοσιμότητα TBM κατά μήκος	Εφαρμοσιμότητα TBM κατά μήκος	Εφαρμοσιμότητα TBM κατά μήκος
0+000-0+050				
0+050-0+375				
0+375-0+600				
0+600-0+700				
0+700-2+150				
2+150-3+300				
3+300-4+400				
4+400-5+245				

	Rock TBM		OFS		Slurry Shield TBM		EPBM	
Συνολικό μήκος χάραξης		72		25		0		0
		0		5		0		0
		28		70		100		100

Τμήμα Χάραξης-Χ.Θ.	Τύπος λειτουργίας EPB
0+000-0+800	
0+800-1+300	
1+300-1+500	
1+500-1+640	
1+640-1+800	
1+800-2+150	
2+150-2+400	
2+400-2+700	
2+700-4+400	
4+400-5+245	

	EPBM	
Συνολικό μήκος χάραξης		3
		49
		48

Υπόμνημα	
	Υψηλή επικινδυνότητα
	Μικρή έως μέση επικινδυνότητα. Πιθανή απαίτηση μέτρων βελτίωσης του υπεδάφους
	Φιλική συμπεριφορά του γεωλικού έναντι του μηχανήματος (από άποψη ευστάθειας)
	Διάνοιξη με εφαρμογή μόνο μηχανικής πίεσης επί του μετώπου εκσκαφής (Open mode)
	Διάνοιξη με την εφαρμογή πεπιεσμένου αέρα και μερικής εδαφικής εξισορροπητικής πίεσης στο μέτωπο εκσκαφής (Semi-closed mode)
	Διάνοιξη με την εφαρμογή πλήρους εδαφικής εξισορροπητικής πίεσης στο μέτωπο της εκσκαφής και χρήση ρυθμιστών εδάφους (Closed mode)

**Σημείωση:** Το μηχάνημα πολφού μπετονίτη από άποψη ευστάθειας του μετώπου είναι το ίδιο ικανό να ανταποκριθεί στην εκσκαφή με το μηχάνημα εδαφικής εξισορρόπησης. Λειτουργικά όμως το μηχάνημα EPB είναι καταλληλότερο λόγω του υψηλού ποσοστού σε λεπτόκοκκα κατά μήκος της χάραξης, όπου εμφανίζονται εδαφικοί σχηματισμοί. Επίσης όπως έχει αναφερθεί στο TBM βράχου και στο μηχάνημα με ασπίδα ανοικτού μετώπου κάποιες ζώνες εντός της βραχώμαζας της Ενότητας του Χορτιάτη είναι ασθενείς και θα χρειαστεί να υπάρξει βελτίωση αυτών. Στο σχήμα 6 παρουσιάζεται μόνο η γενική συμπεριφορά των μηχανών έναντι της εκσκαφής, ενώ τα τμήματα που χρίζουν βελτίωσης φαίνονται στη τομή TM1.

**Σχήμα 6 : Συνοπτικός πίνακας εφαρμοσιμότητας μεθόδων μηχανοποιημένης διάνοιξης για την επέκταση του Μετρό της Θεσσαλονίκης προς Σταυρούπολη**





## Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 6

- Τύποι μηχανών ολομέτωπης κοπής-Εφαρμογές στον ελλαδικό χώρο-Παναγιώτης Ανδρέου, Πάυλος Νομικός
- Geological constraints and geotechnical issues in mechanized tunneling- P. Marinos(Torino2009)
- Earth Pressure Balanced Shield Technology-Dr. Martin Herrenknecht, Dr. Ulrich
- Closed-face tunnelling machines and ground stability-A guideline for best practise-The British Tunnelling Society
- Criteria for selecting mechanised tunnelling systems in soft ground-Walter Steiner
- Ground Information and Selection of TBM for the Thessaloniki Metro, Greece-P.G. Marinos, M. Novack, M. Benissi, M. Panteliadou, D. Papouli, G. Stoumpos, V. Marinos, M. Korkaris
- Assessment of ground information for the construction of the Thessaloniki Metro, Greece-P.G. Marinos, M. Novack, M. Benissi, M. Panteliadou, D. Papouli, G. Stoumpos, V. Marinos, M. Korkaris
- Clogging of TBM drives in clay-identification and mitigation of risks-M. Thewes, W.Burger
- Assessment of ground conditions with respect to mechanized tunneling for the construction of the extension of the Athens Metro to the city of Peiraeus-P.G. Marinos, M. Novack, M. Benissi, G. Stoumpos, D. Papouli, M. Panteliadou, V. Marinos, K. Boronkay, M. Korkaris
- Urban tunneling in soft ground using TBM-Kalman Kovari, Marco Ramoni
- Specification and Guidelines for the use of specialist products for Mechanized Tunnelling (TBM) in soft ground and hard rock-EFNARC (April 2005)
- [www.herrenknecht.com](http://www.herrenknecht.com)
- [www.robbinstbm.com](http://www.robbinstbm.com)

## 7. Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στην αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη μηχανοποιημένη διάνοιξη σηράγγων. Αναφορικά σε αυτό εξετάζεται το παράδειγμα γραμμής επέκτασης του Μετρό της Θεσσαλονίκης προς τη Σταυρούπολη. Κύριο αντικείμενο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας αποτελεί η εξέταση της γεωλογίας της περιοχής, όπου αναμένεται να κατασκευαστεί η σήραγγα επέκτασης, καθώς και τα τεχνικογεωλογικά και γεωτεχνικά στοιχεία των προς εκσκαφή σχηματισμών που αναμένονται κατά μήκος της χάραξης της σήραγγας. Εν συνεχεία και από την ανάλυση που έχει προηγηθεί εξετάζεται η καταλληλότητα τεσσάρων μηχανοποιημένων μεθόδων εκσκαφής που περιλαμβάνουν διάνοιξη σηράγγων με TBM βράχου με μηχανική υποστήριξη του μετώπου (Rock TBM), με μηχανήματα ανοικτού μετώπου με ασπίδα (OFS), με μηχανήματα κλειστού μετώπου πολφού μπετονίτη με ασπίδα (Slurry Shield TBM) και με μηχανήματα εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης (EPB Machine) προκειμένου να εκσκαφτεί η σήραγγα. Αναλυτικά τα συμπεράσματα της εργασίας είναι τα κάτωθι:

### Γενικά συμπεράσματα

- Οι τύποι των μηχανημάτων εκσκαφής TBM, εφαρμόζοντας μηχανοποιημένες μεθόδους διάνοιξης σηράγγων, διακρίνονται ανάλογα με το προς εκσκαφή γεωυλικό στις παρακάτω κατηγορίες και υποκατηγορίες:
  - Ανοικτού τύπου TBM βράχου, για σκληρούς βράχους και βραχώμαζες μεγάλης αντοχής
  - Μηχανήματα με ασπίδα για ασθενείς βραχώμαζες και εδαφικούς σχηματισμούςΤα μηχανήματα με ασπίδα χωρίζονται περαιτέρω σε δύο υποκατηγορίες:
  - Μηχανήματα ανοικτού μετώπου, με συμβατικές μεθόδους υποστήριξης του μετώπου εκσκαφής, που περιλαμβάνουν μηχανήματα μονής και διπλής ασπίδας για την εκσκαφή ασθενών βραχομαζών και μαλακών βράχων
  - Μηχανήματα κλειστού μετώπου, με άσκηση πίεσης στο μέτωπο εκσκαφής, για εδαφικούς σχηματισμούς που περιλαμβάνουν μηχανήματα πολφού μπετονίτη, για εφαρμογή σε κυρίως αδρόκοκκους και υψηλής διαπερατότητας σχηματισμούς, και εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης, για εφαρμογή σε κυρίως λεπτόκοκκους και χαμηλής διαπερατότητας σχηματισμούς.
- Για την εκλογή του κατάλληλου μηχανήματος εκσκαφής απαραίτητος κρίνεται ο πλήρης, όσο το δυνατό, προσδιορισμός των εδαφικών παραμέτρων και των παραμέτρων της βραχώμαζας μέσω δοκιμών (επί τόπου και εργαστηριακών), οι οποίοι παρουσιάζονται στο παρακάτω πίνακα :

Εδαφικοί σχηματισμοί	Βραχώδεις σχηματισμοί
Κοκκομετρική διαβάθμιση	Τιμή RQD
Δείκτης πόρων	Δείκτης GSI (ή RMR ή Q)
Όρια Atterberg	Αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη
Ποσοστό φυσικής υγρασίας	Εφελκυστική αντοχή
Συνοχή και γωνία τριβής	Συνοχή και γωνία τριβής
Αστράγγιστη διατμητική αντοχή	Σκληρότητα και ποσοστό χαλαζία
Διαπερατότητα	Διαπερατότητα
Διογκωσιμότητα	Διογκωσιμότητα
Μέτρο ελαστικότητας	Μέτρο ελαστικότητας
Λόγος Poisson	Λόγος Poisson
Στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα	Στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα

- Κατά το σχεδιασμό και τη κατασκευή σηράγγων (ιδιαίτερα αβαθών) πρέπει να λαμβάνονται υπόψη παράγοντες, οι οποίοι είναι δυνητικά πηγή προβλημάτων κατά τη διάνοιξη, και περιλαμβάνουν :

Γεωλογικοί και γεωτεχνικοί παράγοντες	Άλλοι παράγοντες
Ασθενή και χαμηλής ποιότητας εδάφη	Μικρό βάθος υπερκειμένων
Συνεχώς μεταβαλλόμενες γεωλογικές συνθήκες	Ύπαρξη κατασκευών πλησίον της εκσκαφής
Κολλώδης συμπεριφορά εδαφών	Χωρικοί περιορισμοί
Αυξημένη διαπερατότητα σε συνδυασμό με υψηλή στάθμη υπογείων νερών	Ύπαρξη ξένων σωμάτων εντός των προς εκσκαφή σχηματισμών
Ζώνες βραχομαζών υψηλού κερματισμού	Οπτική παρουσία ζημιών
Ύπαρξη καρστικών εγκοίλων	
Μεγάλο ποσοστό χαλαζιακού υλικού	
Πολύ ισχυρές ή πολύ ασθενείς βραχώμαζες	
Ενεργά ρήγματα	

## Ειδικά συμπεράσματα για το παράδειγμα της γραμμής Μετρό της Θεσσαλονίκης

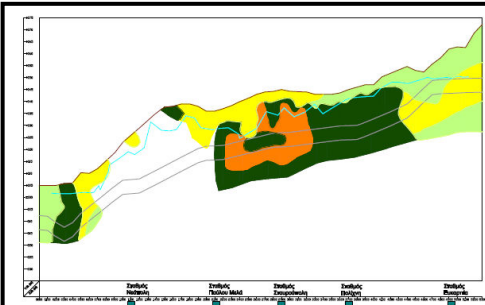
### Γεωλογικές συνθήκες κατά μήκος της χάραξης

- Οι σχηματισμοί που αναμένεται να απαντηθούν από τη σήραγγα, περιλαμβάνοντας μέσα σε αυτούς τα προς εκσκαφή γεωλικά και τα υλικά που συνθέτουν τα υπερκείμενα της σήραγγας, είναι :
  - Μεταμορφωμένοι βραχώδεις σχηματισμοί (Πρασινοσχιστόλιθοι), που συνθέτουν το αλπικό υπόβαθρο της περιοχής (Ενότητα Χορτιάτη) και εντοπίζονται ως γεωλικά προς εκσκαφή κατά μήκος της χάραξης της σήραγγας κυρίως από τη χιλιομετρική θέση 0+700-2+150.
  - Νεογενείς αποθέσεις ιζηματογενούς προελεύσεως, Μειοκαινικής-Πλειοκαινικής ηλικίας. Οι Νεογενείς αποθέσεις συνθέτονται από τη Σειρά των Ερυθρών Αργίλων και καλύπτουν κατά μήκος της σήραγγας χιλιομετρική απόσταση 2250m κυρίως από τη χιλιομετρική θέση 2+150-4+400.
  - Τεταρτογενείς αποθέσεις, που συνθέτονται από ποταμοχειμάρριες αποθέσεις προερχόμενες από τους νεογενείς σχηματισμούς και το βραχώδες υπόβαθρο της περιοχής, Πλειστοκαινικής-Ολοκαινικής ηλικίας. Οι Τεταρτογενείς αποθέσεις γενικώς υπέρκεινται των Νεογενών αποθέσεων ενώ απαντώνται κυρίως στο αρχικό κομμάτι της σήραγγας (χιλιομετρική θέση 0+050-0+375) και στο τελικό (χιλιομετρική θέση 4+400-5+245).
  - Τεχνητές ανθρωπογενείς επιχώσεις που εντοπίζονται στα επιφανειακά στρώματα με πάχος που κυμαίνεται από 2 έως 5m και εκτείνονται εν γένει σε όλο το μήκος της χάραξης της σήραγγας.
- Οι Τεταρτογενείς σχηματισμοί αποτελούνται τόσο από αδρόκοκκα όσο και από λεπτόκοκκα γεωλικά, από τα οποία τα μεν λεπτόκοκκα χαρακτηρίζονται κυρίως ως μαλακά έως σταθερά (ποσοστό 70% επί των συγκεκριμένων παρατηρήσεων) ενώ τα αδρόκοκκα υλικά χαρακτηρίζονται ως χαλαρά έως μέτρια πυκνά (ποσοστό 80% επί των συγκεκριμένων παρατηρήσεων). Οι Νεογενείς σχηματισμοί αποτελούνται κυρίως από λεπτόκοκκα γεωλικά, τα οποία χαρακτηρίζονται κυρίως πολύ στιφρά (ποσοστό 60% επί των συγκεκριμένων παρατηρήσεων) ενώ οι αδρόκοκκοι σχηματισμοί που εμφανίζονται χαρακτηρίζονται κυρίως ως πυκνοί (ποσοστό 70% επί των συγκεκριμένων παρατηρήσεων). Η Ενότητα του Χορτιάτη αποτελείται από μεταμορφωμένους βραχώδεις σχηματισμούς (Πρασινοσχιστόλιθοι) κυρίως μέτριας έως καλής.
- Τα λεπτόκοκκα γεωλικά τα οποία αναμένεται να απαντηθούν κατά την εκσκαφή βάσει της τεχνικογεωλογικής και γεωτεχνικής έρευνας αποτελούνται κυρίως από υλικό αργιλικής φύσεως σε καθαρή μορφή ή σε προσμίξεις με άμμο ή χάλικες. Τα αδρόκοκκα γεωλικά αποτελούνται από καθαρή άμμο, ιλυώδη άμμο, αργιλώδη άμμο ή σποραδικούς χάλικες, καθαρούς χάλικες ή με προσμίξεις αργίλου και άμμου.
- Κατά μήκος του άξονα της σήραγγας πραγματοποιήθηκε διακριτοποίηση αυτού σε τμήματα με κριτήριο τη γεωλογική ενότητα και τη κοκκομετρική διαβάθμιση των προς εκσκαφή γεωλικών. Από τη «ζωνοποίηση» αυτή προέκυψαν οκτώ (8) τμήματα, στα οποία και χωρίστηκε η σήραγγα προκειμένου να πραγματοποιηθεί η τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική ανάλυση. Επίσης πραγματοποιήθηκαν τομές (T1 και T2) όπου παρουσιάζονται τόσο η γεωλογία όσο και η κοκκομετρική διαβάθμιση των σχηματισμών, καθώς και η επικράτηση των αργιλικών, χαλικώδων και αμμώδων σχηματισμών (T14).



## Γεωτεχνικές παράμετροι των γεωυλικών κατά μήκος της χάραξης

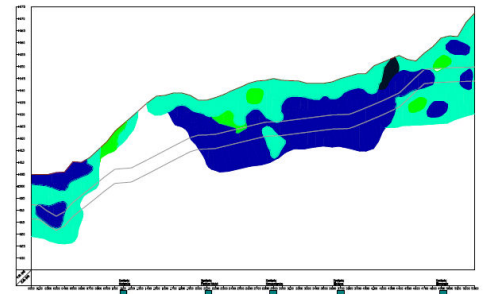
- Από τη διάκριση των εδαφικών γεωυλικών βάσει των αντοχών τους προκύπτει ότι οι καλής συνεκτικότητας σχηματισμοί εντοπίζονται κυρίως στο κεντρικό τμήμα της σήραγγας, όπου εμφανίζονται οι Νεογενείς αποθέσεις. Χαμηλής συνεκτικότητας σχηματισμοί εντοπίζονται στο αρχικό και τελικό τμήμα της σήραγγας όπου και εμφανίζονται οι Τεταρτογενείς αποθέσεις. Στη τομή T5 παρουσιάζεται η αντοχή των γεωυλικών επί του συνόλου των εδαφικών σχηματισμών με πρόσθετο κριτήριο τη κοκκομετρική τους διαβάθμιση. Διακριτοποιήθηκαν επίσης τα εδαφικά γεωυλικά κατά μήκος της χάραξης βάσει της πλασιμότητάς τους, όπως παρουσιάζεται στη τομή T9. Υψηλής πλασιμότητας γεωυλικά εμφανίζονται κυρίως στο κεντρικό τμήμα της σήραγγας, όπου εμφανίζονται οι Νεογενείς αποθέσεις ενώ ενδιάμεσης πλασιμότητας γεωυλικά εμφανίζονται κυρίως όπου παρουσιάζεται η γεωλογική ενότητα των Τεταρτογενών αποθέσεων ενώ ελάχιστης πλασιμότητας γεωυλικά εμφανίζονται μεμονωμένα υπό μορφή φακών.
- Οι μεταμορφωμένοι Πρασινοσχιστόλιθοι, που ανήκουν την Ενότητα του Χορτιάτη, συνθέτουν μία βραχώμαζα κυρίως μέτριας έως καλής αντοχής. Η ποιότητα της βραχώμαζας προσδιορίστηκε από τις τιμές του GSI, RQD και των τιμών αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη άρρηκτου βράχου κατά μήκος του κομματιού που εμφανίζονται οι συγκεκριμένοι σχηματισμοί. Ενδεικτικά οι τιμές του GSI κυμαίνονται κυρίως εντός ενός εύρους 45 έως 55. Προφανώς υπάρχουν ζώνες όπου η βραχώμαζα χαρακτηρίζεται από υψηλές τιμές αλλά και από ασθενείς ζώνες όπου η τιμή του GSI μειώνεται δραματικά. Η κυρίως μέτρια επίσης ποιότητα της βραχώμαζας δικαιολογείται και από το επικρατών εύρος των τιμών RQD, οι οποίες κυμαίνονται από 50 έως 75. Από το προσδιορισμό, κατά μήκος του τμήματος, της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη προκύπτει ότι το εύρος τιμών που αντιπροσωπεύει εν γένει το βράχο κυμαίνεται από 10 έως 50 MPa συνεπώς πρόκειται να εκσκαφτεί ένας σχετικά μαλακός βράχος. Οι τιμές του GSI και της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη παρουσιάζονται στις τομές T12 και T13.



YOMI 17: ΕΠΙΦΕΡΑΣΤΗ ΣΜΑΝΕΙΣ ΑΠΟΡΡΙΣΤΗΡΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΡΡΙΣΤΗΡΙΑ ΕΣΤΙΩΝ ΚΑΙ ΚΑΙ ΜΑΒΙΣ Ε ΒΙΟΒΙΤΗΣ

ΥΠΟΜΗΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑ ΕΔΡΑΤΩΝ

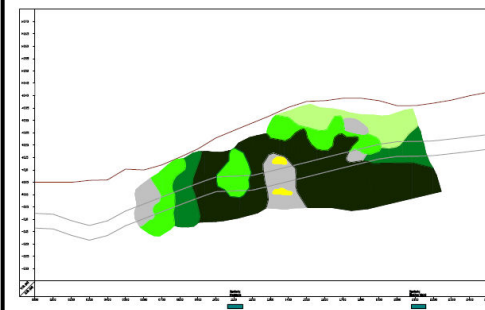
	Ζρubiak (dark green)		Πielis (orange)
	Πielis (light green)		Πielis (yellow)



YOMI 18: ΕΠΙΦΕΡΑΣΤΗ ΚΥΒΙΣΜΟΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ (P) ΕΝ ΕΣΤΙΩΝ ΚΑΤΑ ΜΕΡΟΣ ΤΗΣ ΑΡΧΗΣ

ΥΠΟΜΗΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑ ΗΛΕΚΤΡΩΣΕΩΝ (P)

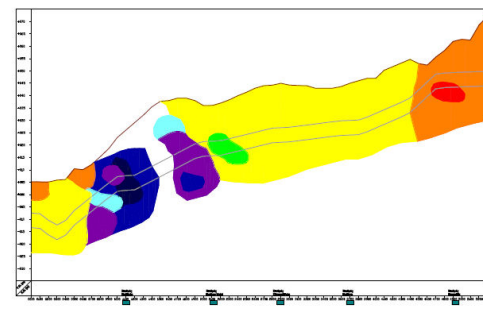
	P1-7 (dark blue)		P2-6 (light blue)
	P2-6 (light blue)		P3-5 (black)



YOMI 19: ΕΠΙΦΕΡΑΣΤΗ ΤΟΝ ΤΙΜΗΝ ΟΙ ΤΟΝ ΒΡΑΧΙΩΝ ΕΔΡΑΤΩΝ ΚΑΤΑ ΜΕΡΟΣ ΤΗΣ ΑΡΧΗΣ

ΥΠΟΜΗΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑ ΟΙ

	00-00		20-00-40
	20-00-00		40-00-00
	20-00-00		00-00



YOMI 20: ΕΠΙΦΕΡΑΣΤΗ ΤΟΝ ΤΙΜΗΝ ΟΙ ΤΟΝ ΒΡΑΧΙΩΝ ΚΑΤΑ ΜΕΡΟΣ ΤΗΣ ΑΡΧΗΣ

ΥΠΟΜΗΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑ ΟΙ

	<1 MPa		5-10 MPa
	1-1.25 MPa		10-20 MPa
	1.25-1 MPa		20-30 MPa
	1-2 MPa		>30 MPa

- Ο υδροφόρος ορίζοντας δεν αναμένεται να προξενήσει προβλήματα κατά τη διάνοιξη της σήραγγας. Αυτό οφείλεται σε δύο παραμέτρους. Η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα γενικώς δε βρίσκεται αρκετά ψηλά σε σχέση με το επίπεδο της εκσκαφής της σήραγγας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μη δημιουργούνται αξιόλογες υδροστατικές πιέσεις σχεδόν σε όλο το μήκος της διαδρομής. Στο μοναδικό τμήμα όπου αναμένεται να υπάρχουν υψηλές υδροστατικές πιέσεις είναι μόνο στο τμήμα όπου επικρατεί η Ενότητα του Χορτιάτη. Παρόλα αυτά, η διαπερατότητα των βραχωδών σχηματισμών είναι πολύ μικρή συνεπώς ο υδροφόρος ορίζοντας αν και έχει υψηλή στάθμη στο συγκεκριμένο τμήμα δεν αναμένεται να δημιουργήσει προβλήματα. Στα υπόλοιπα τμήματα ο συνδυασμός όχι ιδιαίτερα υψηλής στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα και σχηματισμών μικρής υδατοπερατότητας δε καθιστά τον υδροφόρο ορίζοντα επικίνδυνο για το τεχνικό έργο (πχ εισροή υδάτων στη σήραγγα και καταβίβασμό του υπόγειου υδροφορέα τοπικά που μπορεί να οδηγήσει σε παραμορφώσεις και καθιζήσεις).
- Εκτιμήθηκαν ζώνες γεωλογικής επικινδυνότητας κατά μήκος της χάραξης βάσει τεσσάρων (4) κριτηρίων ανάλογα με τις τεχνικογεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες κατά μήκος της χάραξης. Αυτά τα κριτήρια περιλαμβάνουν α. τη παρουσία μαλακών και χαλαρών σχηματισμών, β. παρουσία γεωυλικών πτωχών ιδιοτήτων σε περιβάλλον μικρού βάθους υπερκειμένων, γ. μεγάλο πάχος τεχνητών επιχώσεων υπερκειμένων χαμηλής ποιότητας υλικών και δ. παρουσία γεωυλικών υψηλής διαπερατότητας. Από την αξιολόγηση της τεχνικογεωλογικής και γεωτεχνικής πληροφορίας εντοπίστηκαν τέτοιες ζώνες υψηλής επικινδυνότητας οι οποίες εντοπίζονται κυρίως στις περιοχές όπου αναπτύσσονται Τεταρτογενείς σχηματισμοί, στο αρχικό και τελικό κομμάτι της σήραγγας.

### **Η εκτίμηση και αξιολόγηση της τεχνικογεωλογικής και γεωτεχνικής πληροφορίας για την εκλογή του κατάλληλου μηχανήματος**

- Για τη διάνοιξη της σήραγγας επέκτασης εξετάστηκαν τέσσερις (4) τύποι μηχανών εκσκαφής με ασπίδα οι οποίοι περιλαμβάνουν α. μηχανήμα TBM βράχου με ασπίδα (Rock TB), β. μηχανήμα με ασπίδα ανοικτού μετώπου (OFS), γ. μηχανήμα πολφού μετονίτη με ασπίδα (Slurry Shield) και δ. μηχανήμα εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης (EPB).

Σε ότι αφορά το **TBM βράχου (Rock TBM)**, οι παρατηρήσεις που συνηγορούν σε υπό προϋποθέσεις ευνοϊκές συνθήκες αντιστοιχούν στο 28% επί του συνόλου των παρατηρήσεων. Η έστω και κατά 40% παρουσία του μη φιλικού υλικού είναι ικανή να χαρακτηρίσει όλη τη διαδρομή ως υψηλής επικινδυνότητας, συνεπώς για το συγκεκριμένο τύπο μηχανήματος γίνεται αντιληπτό ότι η διαδρομή είναι πολύ υψηλής επικινδυνότητας καθώς το 72% επί του συνόλου των παρατηρήσεων υλικό είναι μη φιλικό έναντι της εκσκαφής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την απόρριψη του συγκεκριμένου μηχανήματος για τη διάνοιξη.

Το **μηχανήμα με ασπίδα ανοικτού μετώπου (OFS)** από το σύνολο των παρατηρήσεων κρίνεται ότι μπορεί να ανταποκριθεί ικανοποιητικά έναντι της εκσκαφής στο 70% της διαδρομής. Το τμήμα αυτό της χάραξης της σήραγγας εντοπίζεται στα καλής συνεκτικότητας γεωυλικά των Νεογενών Αποθέσεων στο κεντρικό τμήμα της σήραγγας και στους βραχώδεις σχηματισμούς της Ενότητας του Χορτιάτη. Από τα υπόλοιπα τμήματα το 25% της διαδρομής τα γεωυλικά που πρόκειται να εκσκαφτούν κρίνονται ως μη φιλικά έναντι της εκσκαφής, και εντοπίζονται κυρίως στα αρχικό και τελικό τμήμα της σήραγγας, ενώ σε ποσοστό 5% κρίνεται ότι θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί η εκσκαφή αλλά έπειτα από

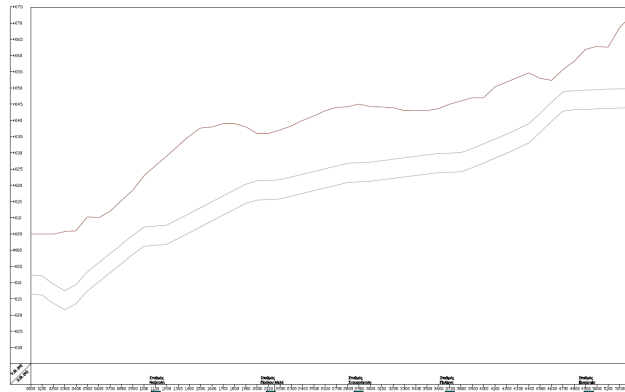




























































































βελτίωση των συνθηκών πριν από τη διάνοιξη. Αν και το καθαρά μη φιλικό υλικό καλύπτει μικρό ποσοστό της διαδρομής, εντούτοις είναι αρκετό για να χαρακτηρίσει το μηχάνημα ως μη κατάλληλο.

Μεταξύ του **μηχανήματος πολφού μπετονίτη με ασπίδα (Slurry Shield)** και του **μηχανήματος εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης (EPB)**, από την άποψη της ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής και το περιορισμό πιθανών αστοχιών και παραμορφώσεων, αποτελούν τη καταλληλότερη επιλογή μηχανήματος για τη διάνοιξη της σήραγγας επέκτασης. Παρόλα αυτά, για λειτουργικούς κυρίως λόγους, λόγω του υψηλού ποσοστού σε λεπτόκοκκα των εδαφικών σχηματισμών και της χαμηλής υδατοπερατότητας αυτών, καταλληλότερη κρίνεται η επιλογή του μηχανήματος εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης, το οποίο υπερτερεί έναντι του μηχανήματος πολφού μπετονίτη. Αυτό συμβαίνει διότι ο πολφός μπετονίτη που χρησιμοποιεί ένα STM διαχωρίζεται και ανακυκλώνεται προκειμένου να επαναχρησιμοποιηθεί από το μηχάνημα. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται εύκολα σε αδρόκοκκους σχηματισμούς, σε λεπτόκοκκους όμως γίνεται πάρα πολύ δύσκολα και απαιτεί σύνθετες μηχανολογικές διατάξεις προκειμένου να επιτευχθεί. Αντίθετα με αυτό, ένα μηχάνημα EPB υπερτερεί καθώς το λεπτόκοκκο εδαφικό υλικό στη περίπτωση αυτή βοηθάει στη δημιουργία στεγανών συνθηκών στον ελικοειδή μετακομιστή (screw conveyor) οπότε και στον έλεγχο των εισροών υπόγειων νερών. Η διαπερατότητα επίσης των σχηματισμών είναι σχετικά μικρή, ακόμα και στις περιοχές όπου εμφανίζονται πιο αδρόκοκκοι σχηματισμοί λόγω της έντονης παρουσίας υλικών αργιλικής φύσεως. Συνεπώς δεν απαιτείται εφαρμογή του μηχανήματος πολφού, το οποίο αντιμετωπίζει σχηματισμούς μεγάλης διαπερατότητας ευχερέστερα από ένα μηχάνημα EPB. Η εφαρμοσιμότητα κάθε τύπου μηχανήματος παρουσιάζεται στη τομή TM1.







- Η λειτουργία του μηχανήματος EPB ελέγχεται από τη ποιότητα των γεωυλικών και κινείται κυρίως γύρω από τη κλειστού και την ημίκλειστου τύπου λειτουργία στη συγκεκριμένη περίπτωση. Σε θεωρητικό επίπεδο η κλειστού τύπου λειτουργία εφαρμόζεται στις περιοχές όπου τα γεωυλικά αναμένεται να έχουν πτωχές ιδιότητες (κυρίως όπου εμφανίζονται οι Τεταρτογενείς αποθέσεις και οι ασθενείς ζώνες της βραχώμαζας), καθώς υπό τέτοιες γεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες απαιτείται πλήρης πίεση επί του μετώπου προκειμένου να μην υπάρχει πρόβλημα ευστάθειας αυτού. Του ημίκλειστου τύπου λειτουργία εφαρμόζεται όπου υπάρχει βελτίωση των γεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών (κυρίως όπου παρουσιάζονται οι Νεογενείς αποθέσεις και η καλής ποιότητας βραχώμαζα), όπου δεν απαιτείται να ασκείται πλήρης πίεση. Πρακτικά όμως, λόγω του έντονα αστικού περιβάλλοντος της πόλης της Θεσσαλονίκης, το μηχάνημα θα χρησιμοποιηθεί με λειτουργία κλειστού τύπου ώστε να αποφευχθούν μη αναμενόμενα προβλήματα, ακόμα και στις περιοχές όπου επικρατούν καλής ποιότητας γεωυλικά. Επιπλέον η αποδοτικότητα του μηχανήματος ακόμα και στη κλειστού τύπου λειτουργία είναι αρκετά ικανοποιητική. Η εκτιμώμενη (θεωρητική) κατάσταση λειτουργίας του μηχανήματος κατά μήκος της διαδρομής παρουσιάζεται στη τομή TM1.

ΤΟΜΗ ΤΜ1: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΛΗΜΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ ΤΒΜ ΚΑΤΑ ΜΙΚΡΟΣ ΤΗΣ ΧΑΡΑΞΗΣ



	TBM βράχου με μηχανική υποστήριξη μετώπου (Rock TBM)																	
	Μηχάνημα ανοικτού μετώπου με ασπίδα (Open Face Shield-TFS)																	
	Μηχάνημα πολυκασοί υποστηρίξη με ασπίδα (Slurry Shield TBM)																	
	Μηχάνημα εξορυκτικής της εδαφικής πίεσης (EPB Machine)																	
	Μηχάνημα εξορυκτικής της εδαφικής πίεσης (EPB Machine) τύπος κατασφάγισης																	

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

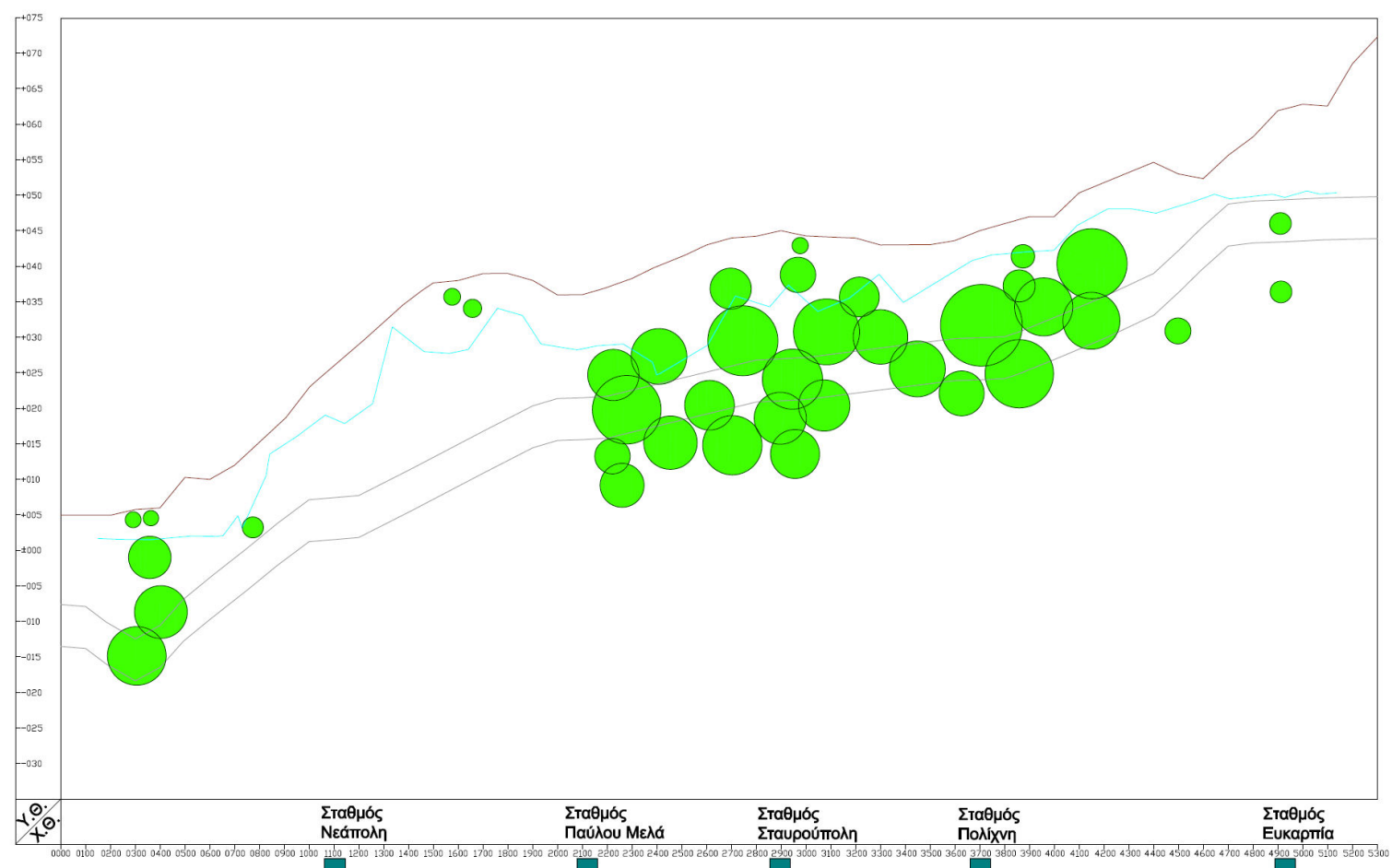
	Υψηλή επεκτατικότητα λόγω υπερκατακρήσεων, αυξημένων καθύψεων και παραμορφώσεων και εμφανή γενικευμένα φαινόμενα αστάθειας		Λειτουργία με επεκτατική μηχανική πίεση επί του μετώπου εκσκαφής (Open mode)
	Φαινεί συμπεριφορά που μηχανήματα είναι εκσκαφής με περιστασιακά προβλήματα και τοπικές ενδεχόμενες αστάθεις λόγω υπερκατακρήσεων		Λειτουργία με την εφαρμογή υπερκατακρήσεων αέρα και μηχανική εδαφική εξορυκτική πίεση στο μέτωπο εκσκαφής (Semi-closed mode)
	Φαινεί συμπεριφορά που μηχανήματα είναι της εκσκαφής		Λειτουργία με την εφαρμογή μηχανικής εδαφικής εξορυκτικής πίεσης στο μέτωπο της εκσκαφής και χρήση κατασφάγισης (Closed mode)

Σημείωση: Το μηχανήματα πολυκασοί μετώπου από άμεση επεξεργασία του μετώπου είναι το ίδιο σαν να κατασκευάζει στην εκσκαφή με το μηχανήματα εξορυκτικής της εδαφικής πίεσης. Αποκλειστικά όμως το μηχανήματα EPB είναι κατασκευασμένα λόγω του μηχανικού κατασφάγισης να λειτουργούν κατά μέρος της χημικής, όπου εμφανίζονται φαινόμενα αστάθειας.




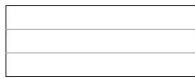


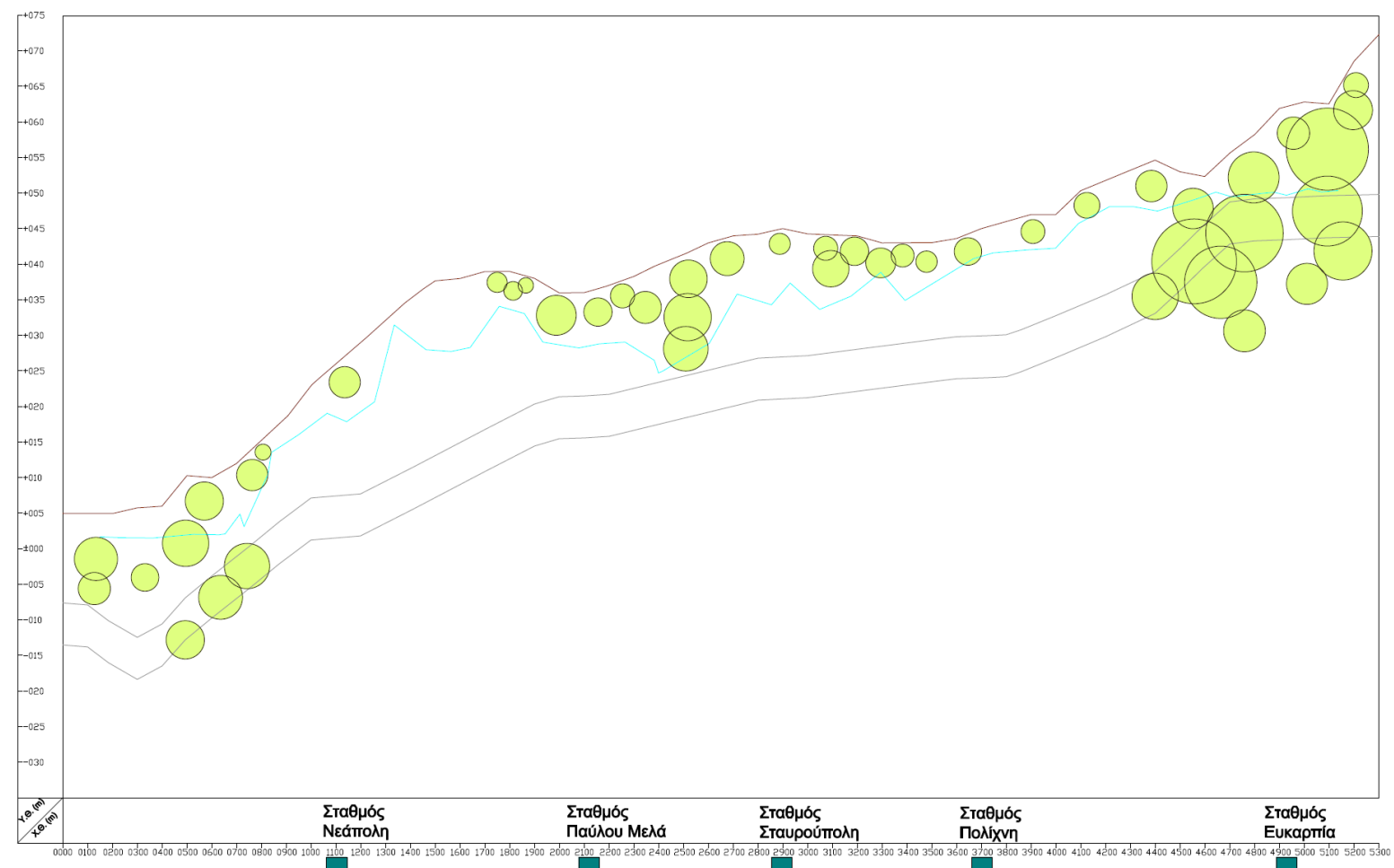
## **Παράρτημα Α :**

**Προβολές αναφορικά με τα  
γεωλογικά και γεωτεχνικά στοιχεία  
της περιοχής της χάραξης της σήραγγας**



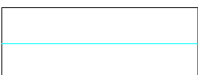



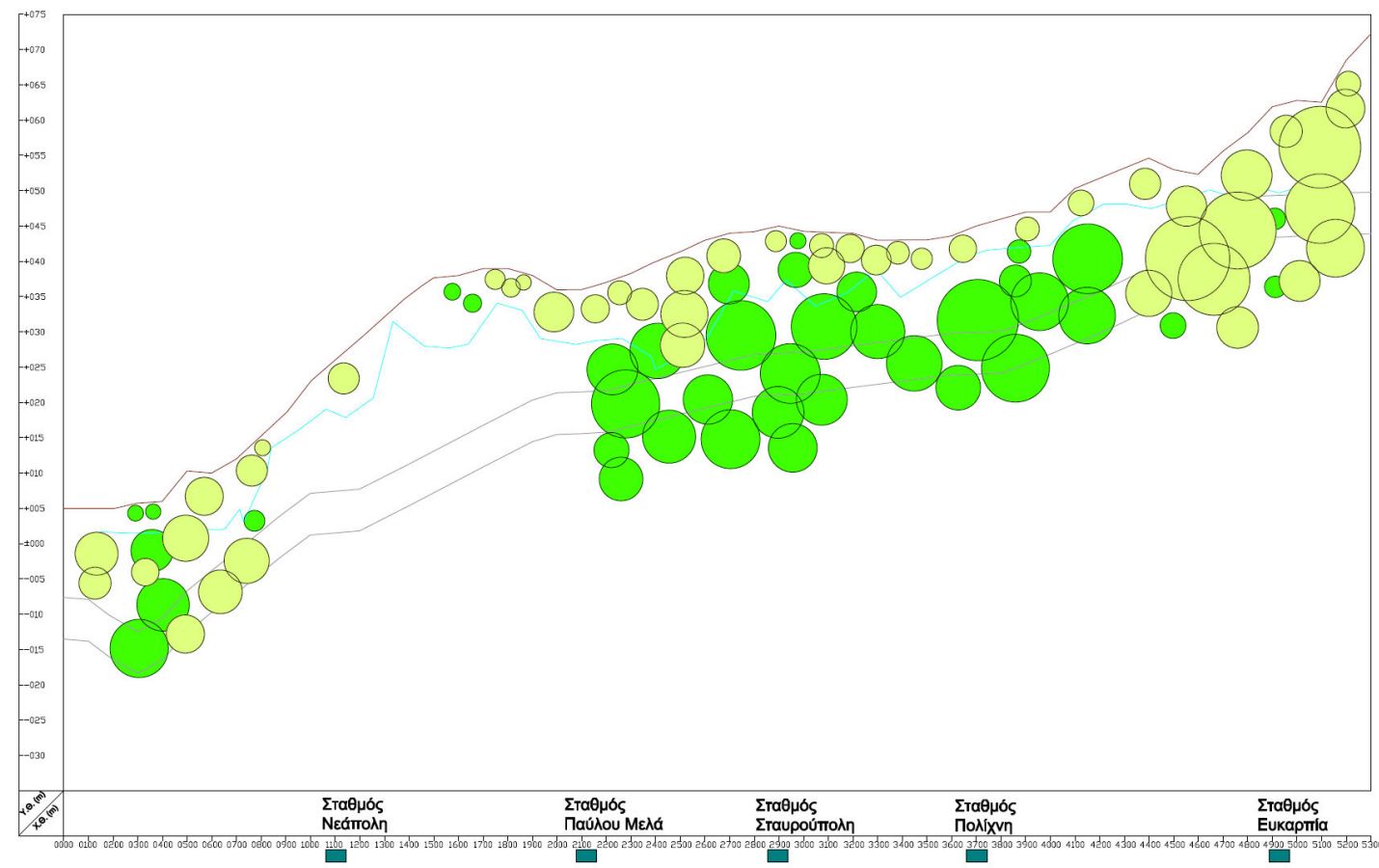
**ΤΟΜΗ Τ3: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΑΔΡΟΚΟΚΚΩΝ ΚΑΙ ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΩΝ ΓΕΩΥΛΙΚΩΝ ΚΑΛΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ**

ΥΠΟΜΝΗΜΑ-ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ	
	Σπφρά έως πολύ σπφρά λεπτόκοκκα γεωυλικά/Πυκνά έως πολύ πυκνά αδρόκοκκα γεωυλικά
	Εδαφική επιφάνεια
	Στάθμη υπόγειων υδάτων ( Σεπτέμβριος 2009)
	Άξονας σήραγγας

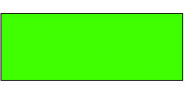
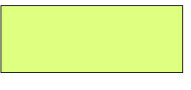

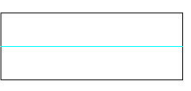
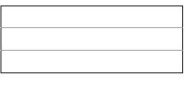


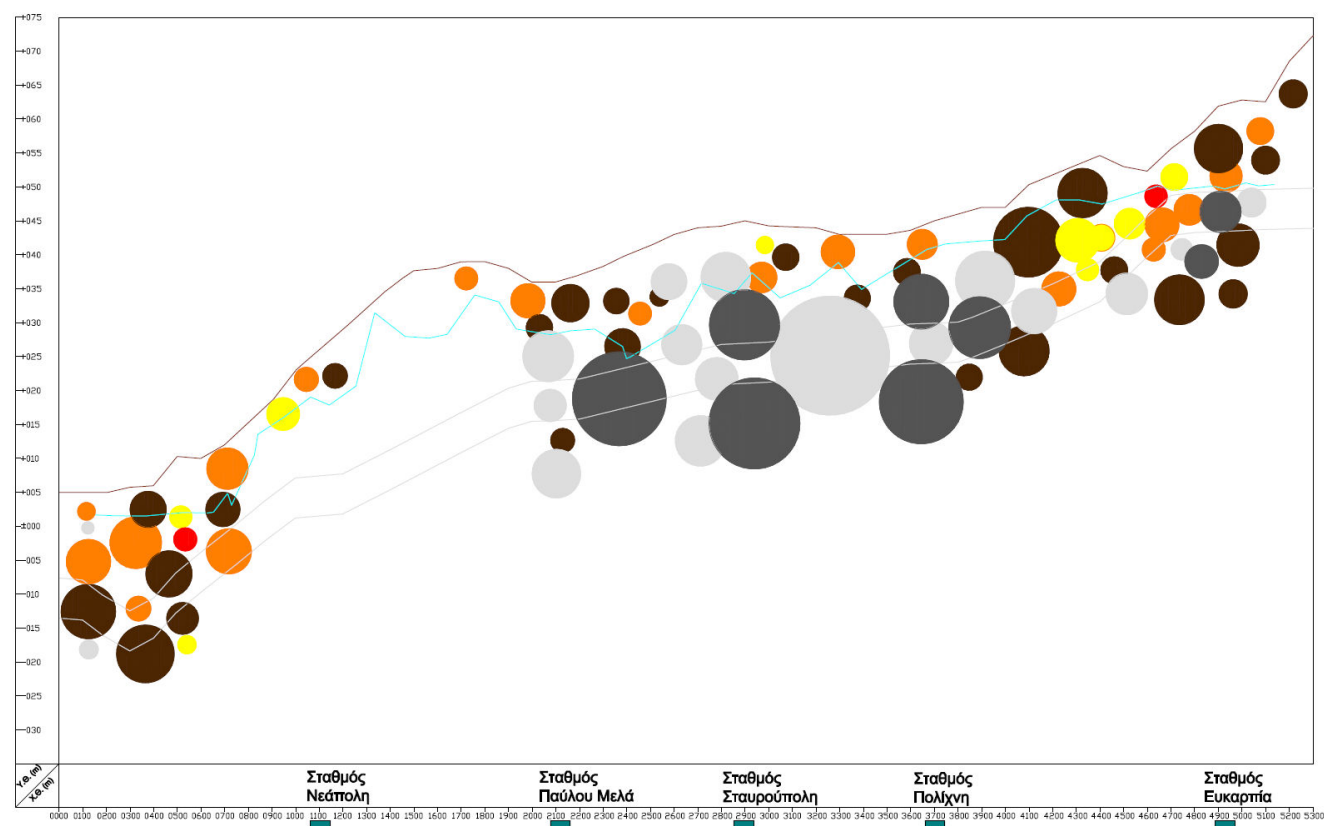
**ΤΟΜΗ Τ4: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΑΔΡΟΚΟΚΚΩΝ ΚΑΙ ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΩΝ ΓΕΩΥΛΙΚΩΝ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ**

ΥΠΟΜΝΗΜΑ-ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ	
	Μαλακά έως σταθερά λεπτόκοκκα γεωυλικά/Χαλαρά έως μέτρια πυκνά αδρόκοκκα γεωυλικά
	Εδαφική επιφάνεια
	Στάθμη υπόγειων υδάτων ( Σεπτέμβριος 2009)
	Άξονας σήραγγας












**ΤΟΜΗ Τ5: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΑΔΡΟΚΟΚΚΩΝ ΚΑΙ ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΩΝ ΓΕΩΥΛΙΚΩΝ ΚΑΛΗΣ ΚΑΙ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ**

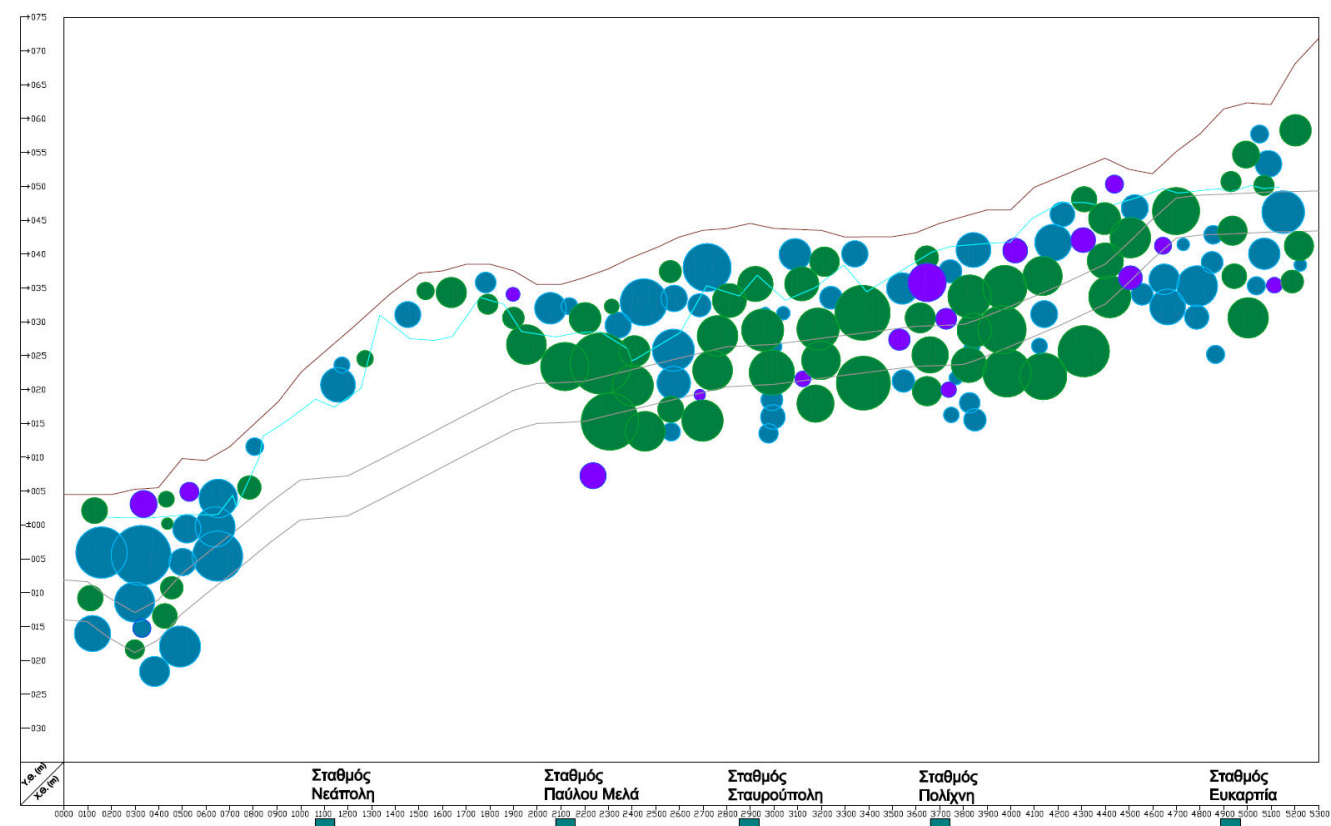
ΥΠΟΜΝΗΜΑ-ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ	
	Σφραρά έως πολύ σφραρά λεπτόκοκκα γεωυλικά/Πυκνά έως πολύ πυκνά αδρόκοκκα γεωυλικά
	Μαλακά έως σταθερά λεπτόκοκκα γεωυλικά/Χαλαρά έως μέτρια πυκνά αδρόκοκκα γεωυλικά
	Εδαφική επιφάνεια
	Στάθμη υπόγειων υδάτων ( Σεπτέμβριος 2009)
	Άξονας σήραγγας








ΤΟΜΗ Τ6: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ SPT ΤΩΝ ΓΕΩΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΧΑΡΑΞΗΣ

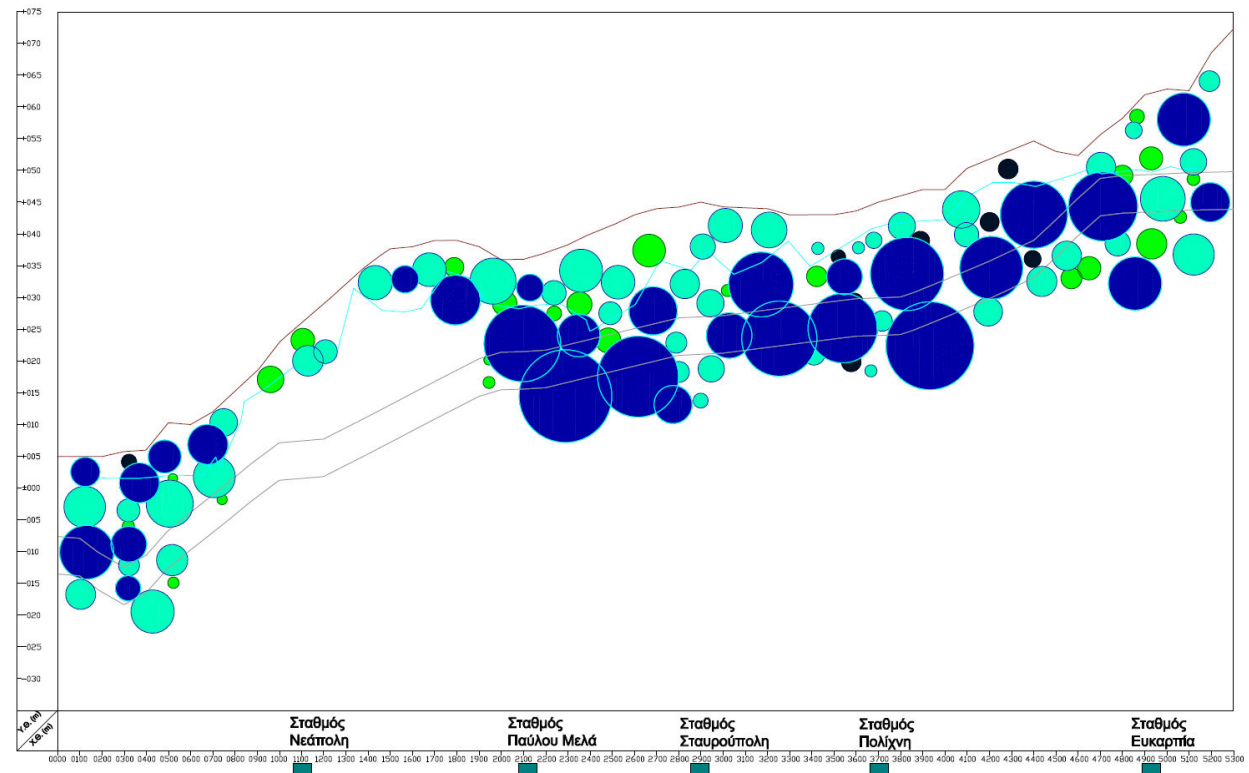
ΥΠΟΜΝΗΜΑ-ΤΙΜΕΣ SPT			
	SPT 1-4		SPT 16-30
	SPT 5-8		SPT 31-50
	SPT 9-15		ΑΡΝΗΣΗ
	Εδαφική επιφάνεια		
	Στάθμη υπόγειων υδάτων ( Σεπτέμβριος 2009)		
	Άξονας σήραγγας		








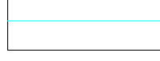
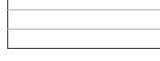


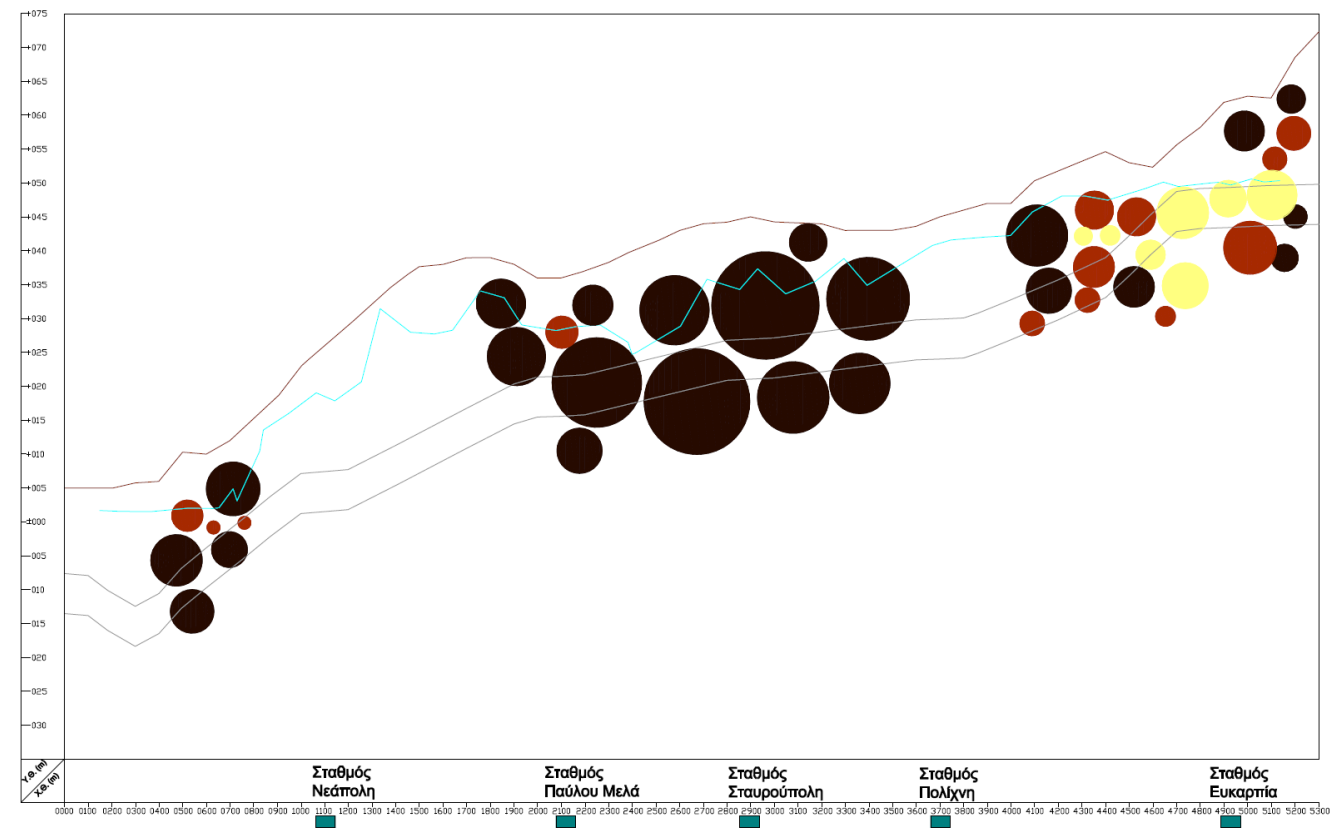
ΤΟΜΗ Τ8: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΟΡΙΟΥ ΥΔΑΡΟΤΗΤΑΣ (LL) ΤΩΝ ΓΕΩΛΟΓΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΧΑΡΑΞΗΣ

ΥΠΟΜΝΗΜΑ-ΤΟ ΟΡΙΟ ΥΔΑΡΟΤΗΤΑΣ (LL)	
	LL<35 (Ισχνές ή ιλιώδεις άργιλοι)
	35<=LL<50 (Ενδιάμεσες άργιλοι)
	50<=LL<90 (Παχιές έως πολύ παχιές άργιλοι)
	Εδαφική επιφάνεια
	Στάθμη υπόγειων υδάτων ( Σεπτέμβριος 2009)
	Άξονας σήραγγας





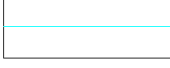
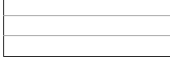


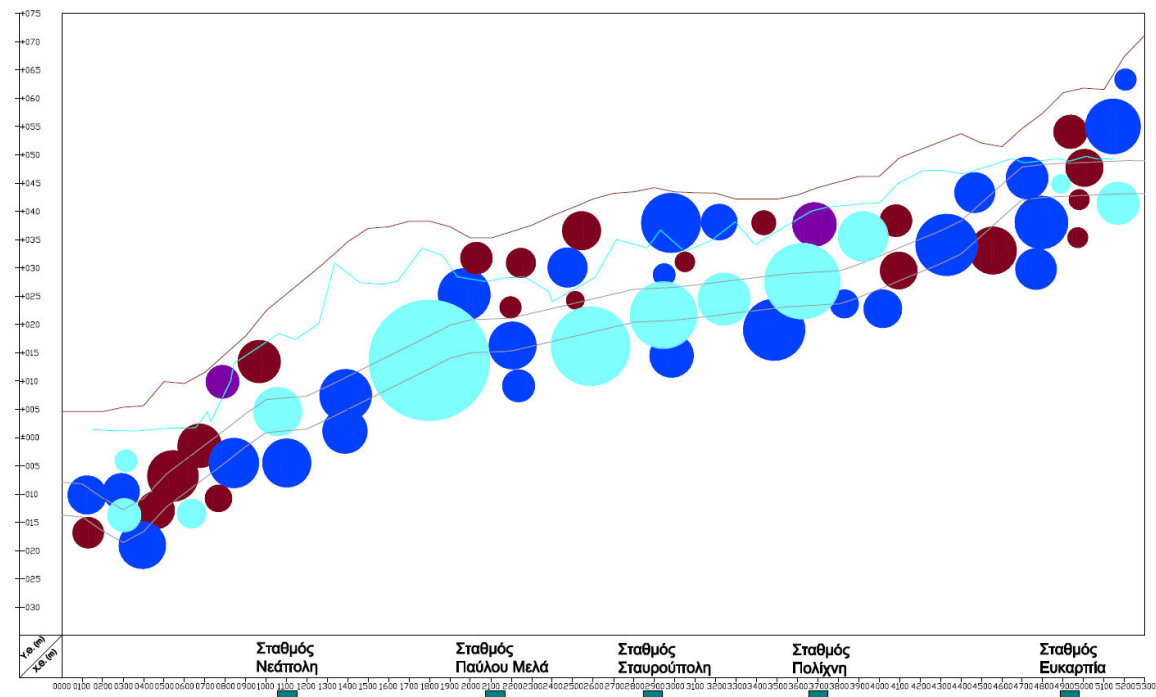
ΤΟΜΗ Τ9: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΠΛΑΣΙΜΟΤΗΤΑΣ (PI) ΤΩΝ ΓΕΩΥΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΧΑΡΑΞΗΣ

ΥΠΟΜΝΗΜΑ-ΔΕΙΚΤΗΣ ΠΛΑΣΙΜΟΤΗΤΑΣ (PI)	
	PI<7 (καθόλου πλάσιμο-ελάχιστο πλάσιμο)
	7<=PI<17 (ενδιάμεσα πλάσιμο)
	17<=PI<35 (υψηλά πλάσιμο)
	PI<=35 (υπερβολικά πλάσιμο)
	Εδαφική επιφάνεια
	Στάθμη υπόγειων υδάτων ( Σεπτέμβριος 2009)
	Άξονας σήραγγας







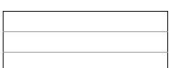


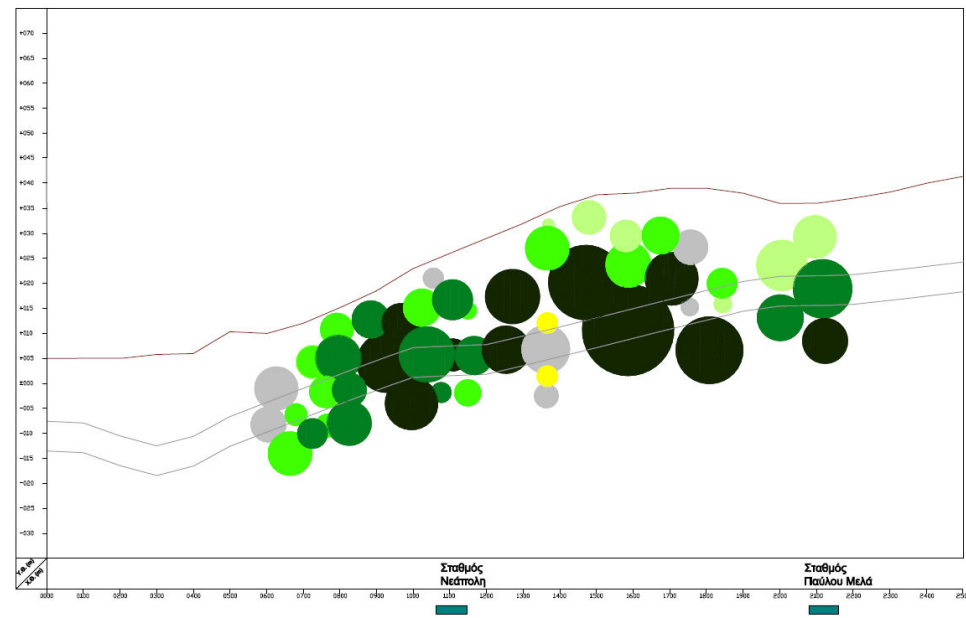
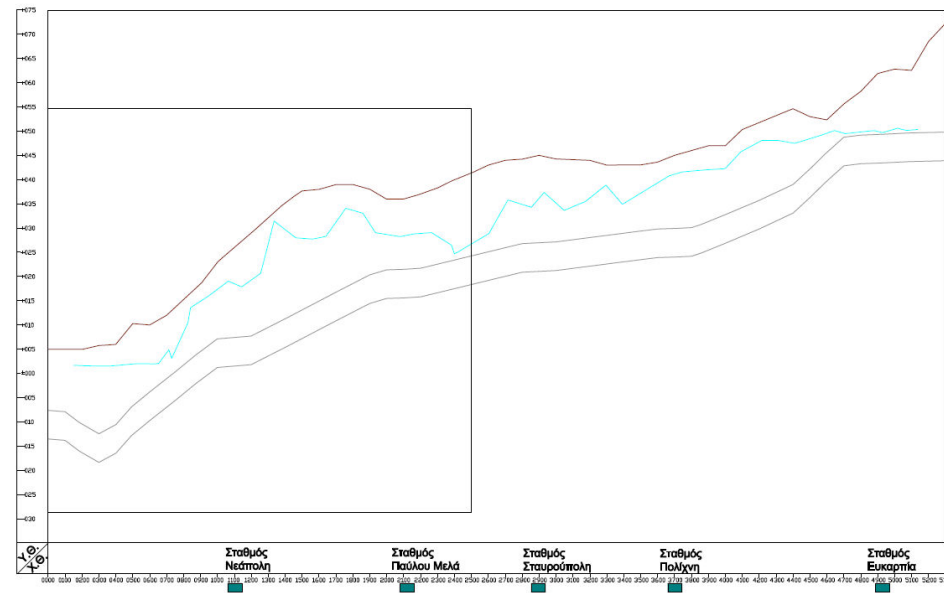
ΤΟΜΗ Τ10: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΣΥΝΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ( $I_c$ ) ΤΩΝ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΧΑΡΑΞΗΣ

ΥΠΟΜΝΗΜΑ-ΔΕΙΚΤΗΣ ΣΥΝΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ( $I_c$ )	
	$0.50 \leq I_c < 0.75$ (σταθερό)
	$0.75 \leq I_c < 1.00$ (σφιφό)
	$I_c \geq 1.00$ (πολύ σφιφό έως σκληρό)
	Εδαφική επιφάνεια
	Στάθμη υπόγειων υδάτων ( Σεπτέμβριος 2009)
	Άξονας σήραγγας











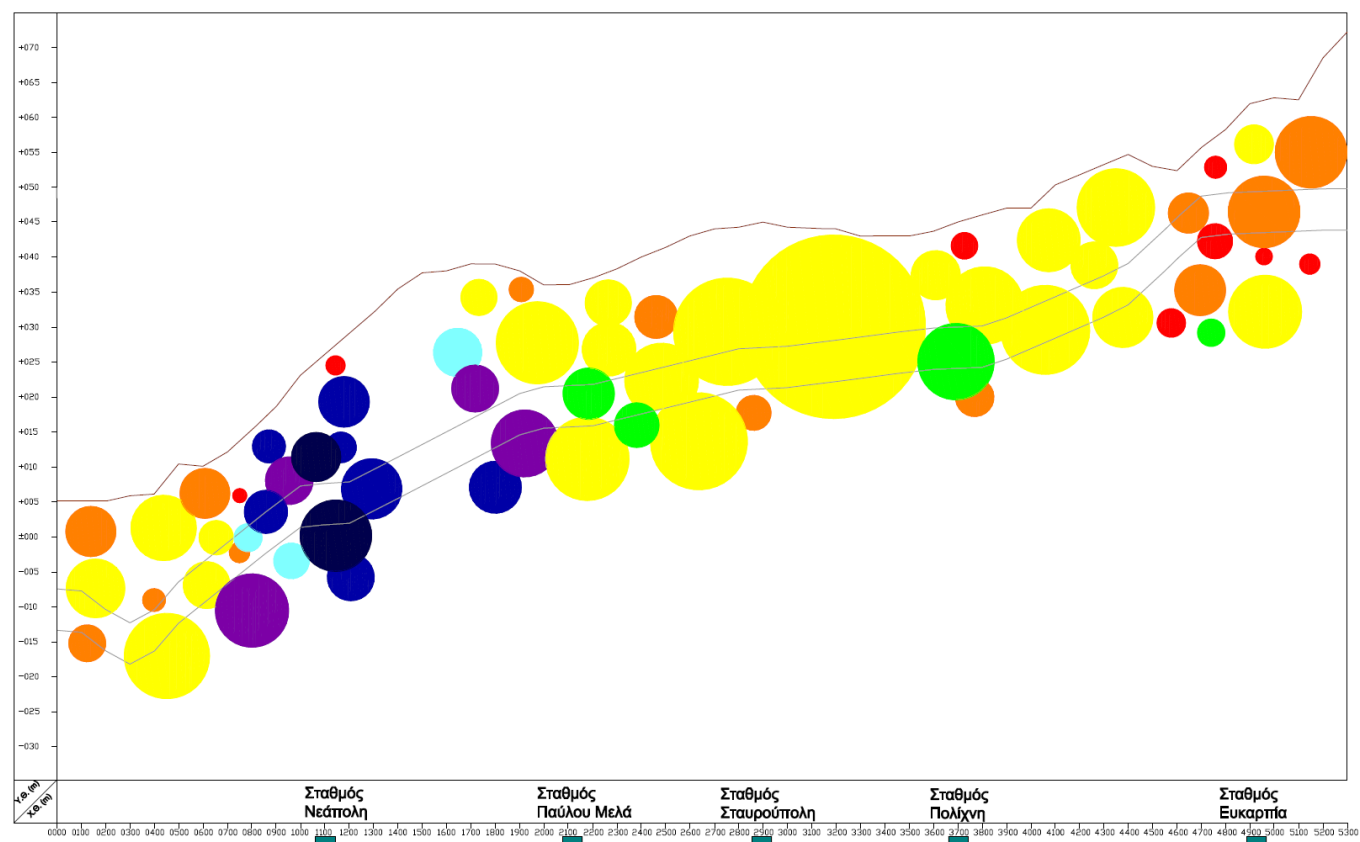
ΤΟΜΗ Τ11: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΓΕΩΥΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΧΑΡΑΞΗΣ

ΥΠΟΜΝΗΜΑ-ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ k	
	$1E-5 \leq k < 1E-4$ m/sec
	$1E-6 \leq k < 1E-5$ m/sec
	$1E-7 \leq k < 1E-6$ m/sec
	$k < 1E-7$ m/sec
	Εδαφική επιφάνεια
	Στάθμη υπόγειων υδάτων ( Σεπτέμβριος 2009)
	Άξονας σήραγγας













ΤΟΜΗ Τ12: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ GSI ΤΩΝ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΧΑΡΑΞΗΣ

ΥΠΟΜΝΗΜΑ-ΤΙΜΕΣ GSI			
	GSI<20		35<GSI<45
	20<GSI<28		45<GSI<55
	28<GSI<35		GSI>55
	Εδαφική εμφάνιση		Άξονας στήριξης



ΤΟΜΗ T13: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ UCS ΤΩΝ ΓΕΩΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΧΑΡΑΞΗΣ

ΥΠΟΜΝΗΜΑ-ΤΙΜΕΣ UCS			
	<0.1 MPa		5-10 MPa
	0.1-0.25 MPa		10-20 MPa
	0.25-1 MPa		20-50 MPa
	1-5 MPa		>50 MPa
	Εδαφική επιφάνεια		
	Άξονας σήραγγας		

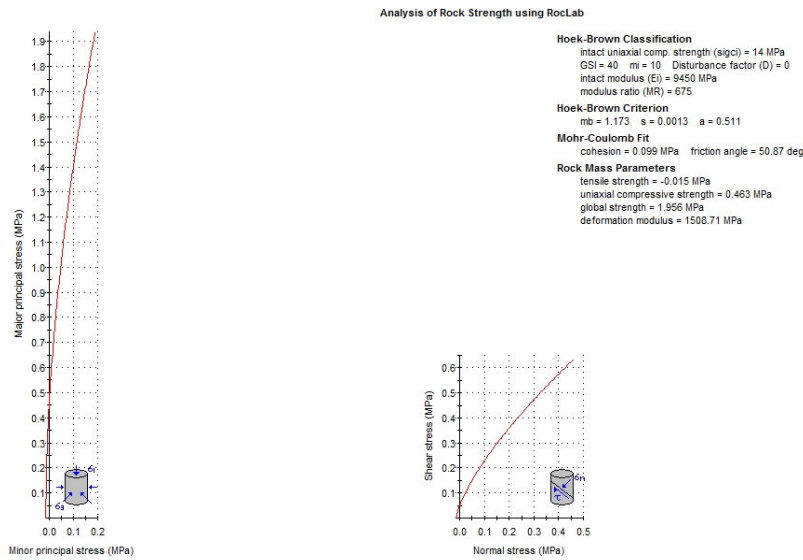


## **Παράρτημα Β:**

**Αποτελέσματα αντοχής της βραχόμαζας  
κάνοντας εφαρμογή του  
προγράμματος Rocklab, Διαγράμματα κινδύνου  
αποφράξεως  
(Clogging Risk) κατά M.Thewes,  
W. Burger(2004)**

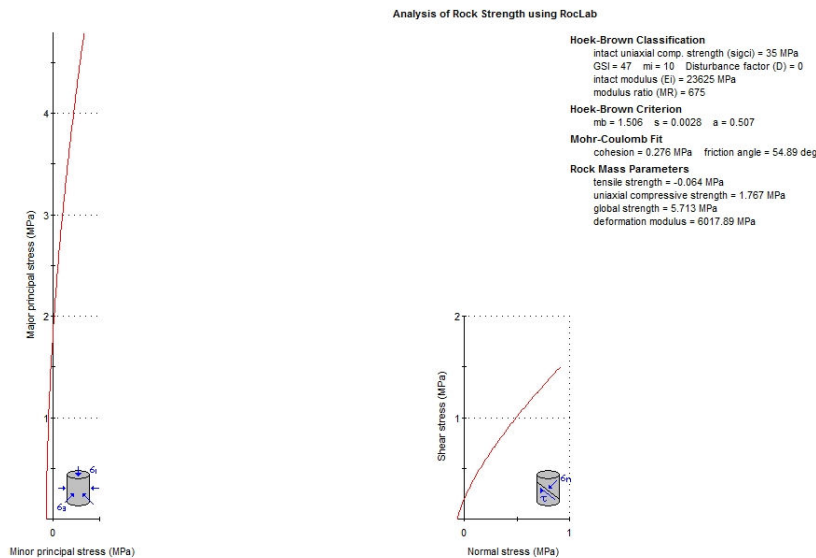


## Αποτελέσματα αντοχής της βραχώδους κώνοντας εφαρμογή του προγράμματος Roclab



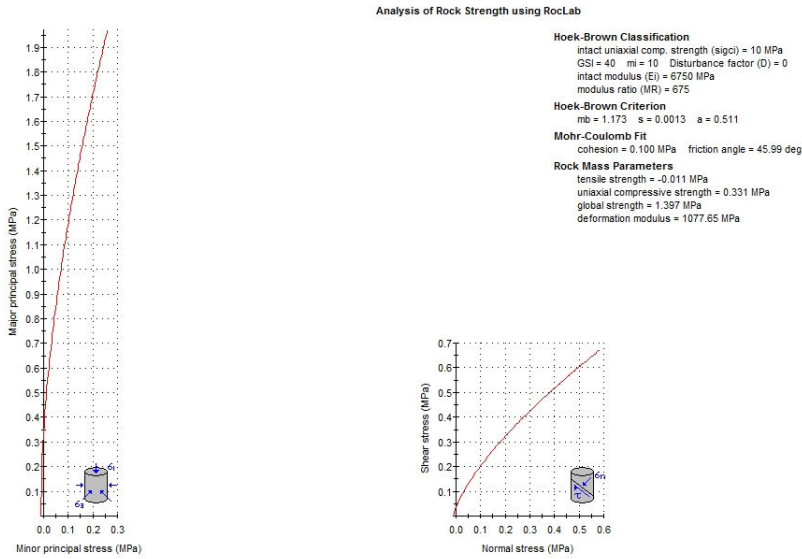
### X.Θ. 0+700-1+300A

Τα δεδομένα που εισήχθησαν στο πρόγραμμα παρουσιάζονται στη πάνω δεξιά γωνία του σχήματος, ενώ η περιβάλλουσα αστοχίας που διακρίνεται στα δύο γραφήματα δημιουργήθηκε με κριτήριο την εφαρμογή των δεδομένων σε σήραγγα βάθους 14m και ειδικό βάρος υπερκειμένων  $\gamma = 0.026 \text{ MN/m}^3$  για το συγκεκριμένο τμήμα.



### X.Θ. 0+700-1+300B

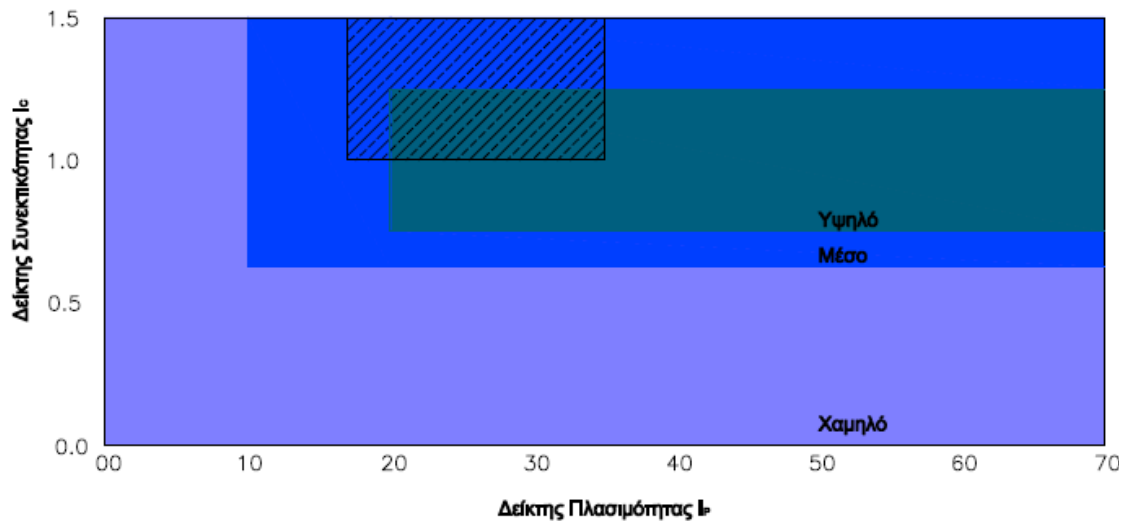
Τα δεδομένα που εισήχθησαν στο πρόγραμμα παρουσιάζονται στη πάνω δεξιά γωνία του σχήματος, ενώ η περιβάλλουσα αστοχίας που διακρίνεται στα δύο γραφήματα δημιουργήθηκε με κριτήριο την εφαρμογή των δεδομένων σε σήραγγα βάθους 24m και ειδικό βάρος υπερκειμένων  $\gamma = 0.026 \text{ MN/m}^3$  για το συγκεκριμένο τμήμα.



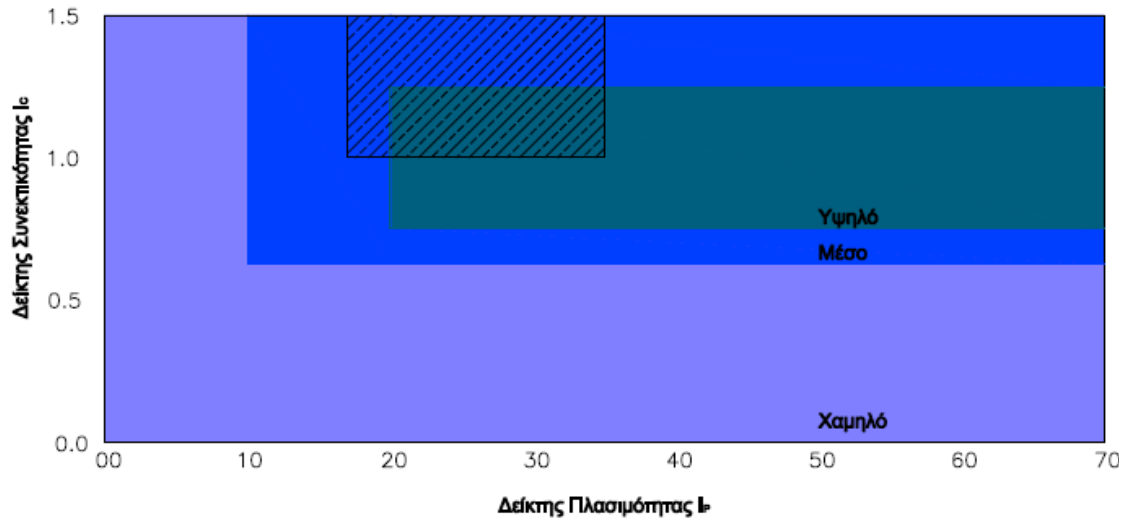
### X.Θ. 1+300-2+150B

Τα δεδομένα που εισήχθησαν στο πρόγραμμα παρουσιάζονται στη πάνω δεξιά γωνία του σχήματος, ενώ η περιβάλλουσα αστοχίας που διακρίνεται στα δύο γραφήματα δημιουργήθηκε με κριτήριο την εφαρμογή των δεδομένων σε σήραγγα βάθους 20m και ειδικό βάρος υπερκειμένων  $\gamma = 0.026 \text{ MN/m}^3$  για το συγκεκριμένο τμήμα.

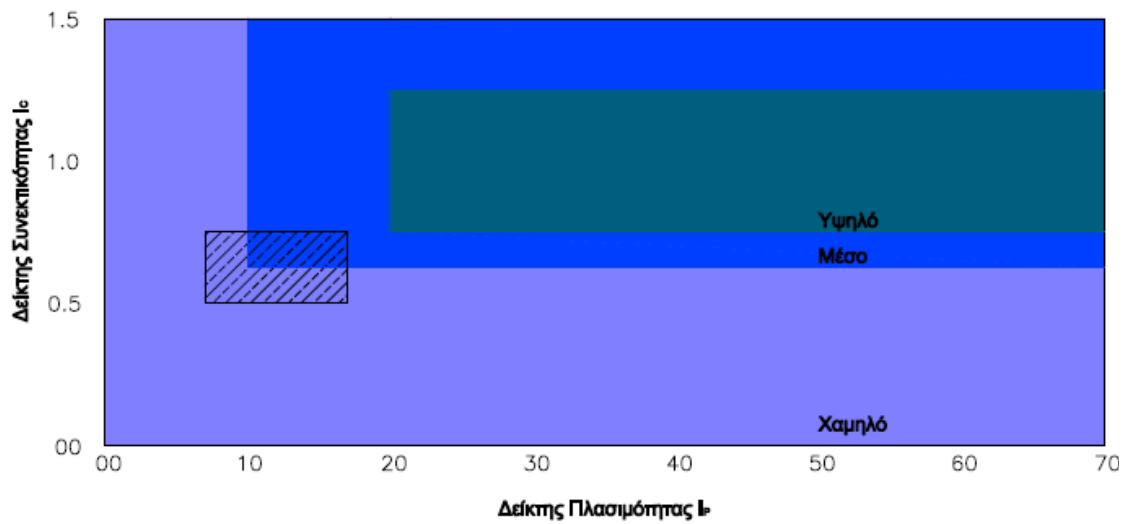
### Διαγράμματα κινδύνου αποφράξεως (Clogging Risk) κατά M.Thewes, W. Burger (2004)



**X.Θ. 2+150-3+300 :** Επισημαίνεται η περιοχή όπου ανήκουν οι τιμές του δείκτη πλασιμότητας σε σχέση με το δείκτη συνεπικότητας



**Χ.Θ. 3+300-4+400 :** Επισημαίνεται η περιοχή όπου ανήκουν οι τιμές του δείκτη πλασιμότητας σε σχέση με το δείκτη συνεκτικότητας

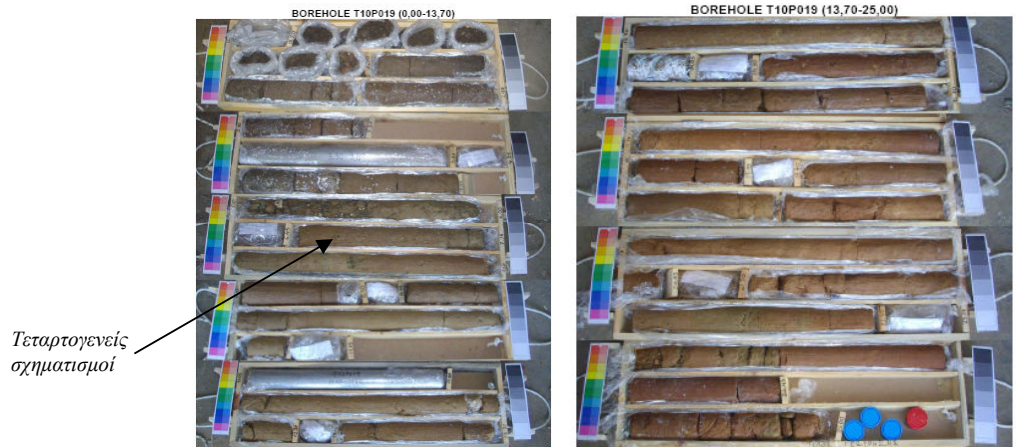


**Χ.Θ. 4+400-5+245 :** Επισημαίνεται η περιοχή όπου ανήκουν οι τιμές του δείκτη πλασιμότητας σε σχέση με το δείκτη συνεκτικότητας

## **Παράρτημα Γ:**

**Φωτογραφικό υλικό από τα γεωυλικά των  
γεωτρήσεων κατά  
μήκος της χάραξης της σήραγγας επέκταση**

**Δεγματοληπτική γεώτρηση T10P019 (X.Θ. 0+150)**



**Δεγματοληπτική γεώτρηση T10P025 (X.Θ. 0+635)**



Σειρά Ερυθρών Αργίλων

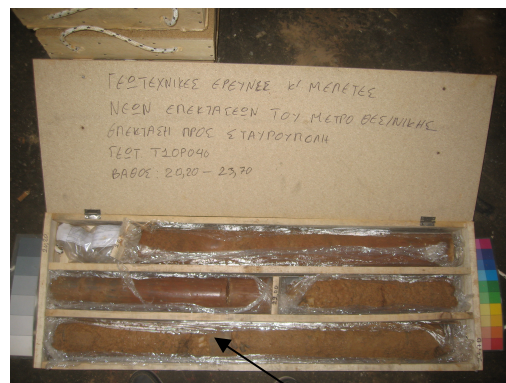
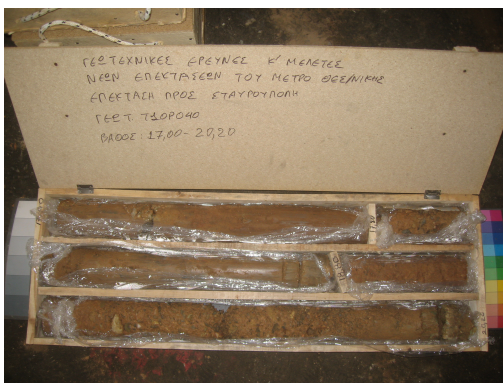
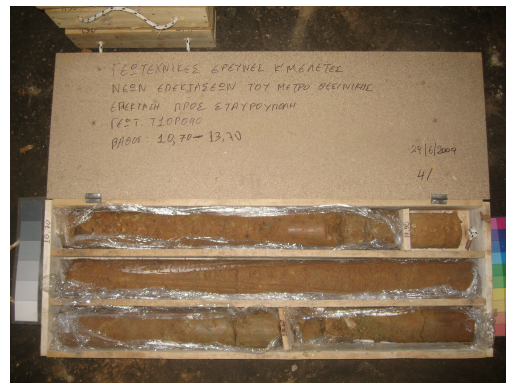
Πρασινοσχιστόλιθος

**Δειγματοληπτική γεώτρηση T10P031 (X.Θ. 1+258)**



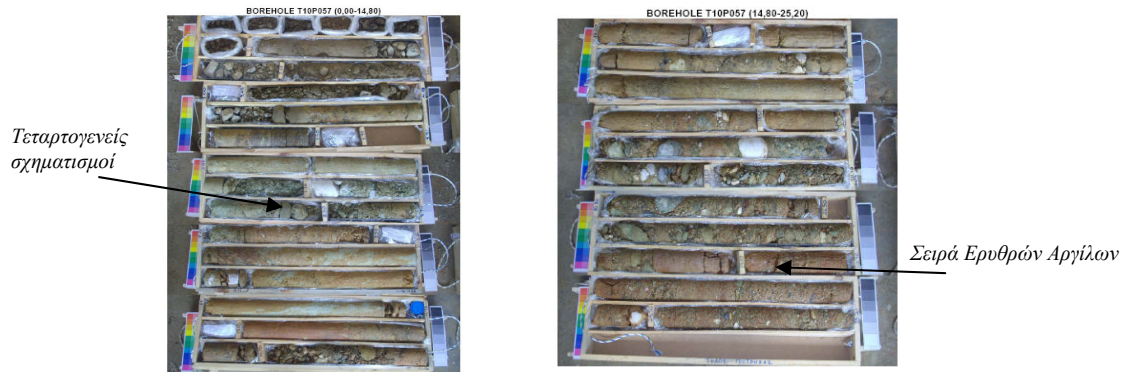
Πρασινοσχιστόλιθος

**Δειγματοληπτική γεώτρηση T10P040 (X.Θ. 2+143)**



Σειρά Ερυθρών Αργίλων

**Δειγματοληπτική γεώτρηση T10P057 (X.Θ. 4+000)**



**Δειγματοληπτική γεώτρηση T10P059 (X.Θ. 4+305)**



**Δειγματοληπτική γεώτρηση T10P069 (X.Θ. 5+015)**

