ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

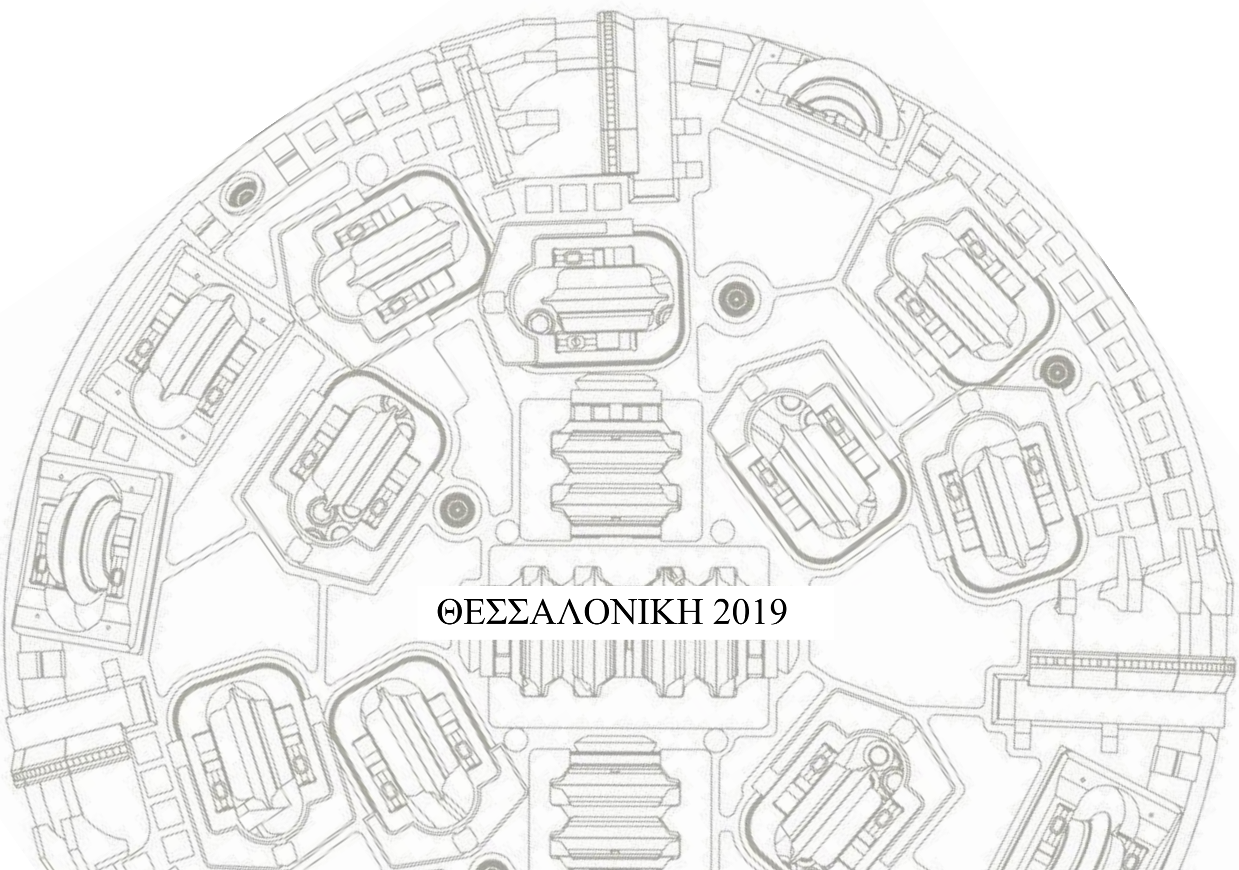
ΜΑΡΙΑ ΤΑΦΤΣΟΓΛΟΥ

Πτυχιούχος Γεωλόγος

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΟΡΥΞΗΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ : ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΓΕΩΛΟΓΙΑ
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ: ΤΕΧΝΙΚΗ ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2019

Στον αδερφό μου, που φέτος δίνει

Πανελλήνιες

και προσπαθεί να πετύχει

τους στόχους του

ΜΑΡΙΑ ΤΑΦΤΣΟΓΛΟΥ
Πτυχιούχος Γεωλόγος

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΟΡΥΞΗΣ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Γεωλογία»,
Κατεύθυνση «Τεχνική Γεωλογία»
Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης: 13/06/2019

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Καθηγητής Μαρίνος Βασίλης, Επιβλέπων
Καθηγητής Μακεδών Θωμάς, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής
Καθηγητής Χρηστάρας Βασίλης Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΟΡΥΞΗΣ – *Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία*

ASSESSMENT ON THE ENGINEERING GEOLOGICAL BEHAVIOR OF ROCKMASSES IN MECHANIZED TUNNELING – *Master Thesis*

Citation:

Ταφτσόγλου Μ., 2019. – Εκτίμηση της τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς βραχομαζών κατά τη διάνοιξη σηράγγων με τη μέθοδο της μηχανοποιημένης όρυξης– Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ.,

Taftsoglou M., 2019 – Assessment on the engineering geological behavior of rockmasses in mechanized tunneling. Master Thesis, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki, 85 pp.

Εικόνα Εξωφύλλου: https://www.tunnel-online.info/en/artikel/tunnel_Mechanized_Excavation_for_the_Chute_de_Gavet_Hydropower_Project_in_France_1706498.html

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής αυτής εργασίας κύριο Βασίλη Μαρίνο, καθώς επίσης και τους καθηγητές Θωμά Μακεδών και Βασίλη Χρηστάρα,, της Σχολής Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου της Θεσσαλονίκης, που μου έδωσαν την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα πολύ σημαντικό θέμα, που αποτελεί πρόκληση για έναν τεχνικό γεωλόγο και στο οποίο κατάφερα να εφαρμόσω τις γνώσεις που απέκτησα από το Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών «Τεχνική Γεωλογία».

Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω τον κύριο Γεώργιο Στούμπο Τεχνικό Γεωλόγο (MSc) του τμήματος Τεχνικής Γεωλογίας (Αττικό Μετρό Α.Ε)., για την ιδιαίτερη ενασχόληση του με την παρούσα διπλωματική, την παράθεση των απαραίτητων στοιχείων, την επιστημονική του καθοδήγηση με γνώσεις και οδηγίες για την οργάνωση και την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο την αξιολόγηση της τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς των βραχομαζών κατά την μηχανοποιημένη όρυξη και συγκεκριμένα τους γεωλογικούς παράγοντες που καθορίζουν την συμπεριφορά των γεωυλικών κατά την μηχανοποιημένη εκσκαφή.. Με βάση την ανάλυση αυτή προέκυψε η διαδικασία επιλογής του καταλληλότερου μηχανήματος διάνοιξης σηράγγων (TBM), ανά τύπο βραχομάζας και αναμενόμενης τεχνικογεωλογικής .συμπεριφοράς. Σημειώνεται ότι η διπλωματική εργασία επικεντρώνεται κυρίως σε αστικές σήραγγες, χωρίς όμως να μην αναλύονται και περιπτώσεις μη αστικών σηράγγων..

Αρχικά, γίνεται μια αναφορά της μηχανικής συμπεριφοράς του βραχώδους υλικού, με τις φυσικές και δυναμικές παραμέτρους του και την παραμορφωσιμότητα και υδροπερατότητά του. Στην συνέχεια, αναλύεται η έννοια της βραχόμαζας, οι αντίστοιχες παράμετροί της, τα συστήματα με τα οποία ταξινομείται (Δείκτης Γεωλογικής αντοχής- Geological Strength Index, Σύστημα ταξινόμησης Bieniawski-Rock Mass Rating, Σύστημα Q, Δείκτης Βραχόμαζας-Rock Mass index) και προσδιορίζεται η ποιότητά της (Rock Quality Designation) και τέλος τα κριτήρια θραύσης που εφαρμόζονται (Mohr-Coulomb, Hoek-Brown, Griffith, Goodman)

Ακολούθως, παρουσιάζονται οι μέθοδοι εκτίμησης της τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς της βραχόμαζας. Συγκεκριμένα, αναλύεται το διάγραμμα εκτίμησης της τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς βραχομαζών συμβατικής διάνοιξης (Tunnel Behaviour Chart), από το οποίο μπορούν να προκύψουν και τα αντίστοιχα μέτρα υποστήριξης και σχεδιασμού των διατομών της σήραγγας, μία μέθοδος χαρακτηρισμού των γεωυλικών των σηράγγων και τέλος μεθοδολογίες που προσδιορίζουν τους γεωτεχνικούς κινδύνους της μηχανοποιημένης διάνοιξης (Βοήθημα αποφάσεων που αφορούν την μηχανοποιημένη διάνοιξη-Decision Aids for Tunnelling, Δείκτης Q_{TBM}, Δείκτης Τρωτότητας-VI index).

Στην συνέχεια, αναλύονται οι τύποι των μηχανημάτων εκσκαφής με βάση την υποστήριξη που ασκούν στο μέτωπο. Διακρίνονται σε TBM χωρίς ασπίδα και TBM με ασπίδα, στο οποίο ανήκουν οι υποκατηγορίες ενεργητικής και παθητικής υποστήριξης και μικτής ασπίδας. Παρουσιάζονται επίσης οι πιθανοί κίνδυνοι αστοχιών σε μια μηχανοποιημένη διάνοιξη, με τους παράγοντες της αντοχής του πετρώματος, των ασυνεχειών του, το ύψος των υπερκείμενων στρωμάτων της σήραγγας, της υδροπερατότητας των σχηματισμών και της παρουσίας έγκοιλων να καθορίζουν την συμπεριφορά των γεωυλικών κατά την λειτουργία του TBM. Με βάση αυτούς τους κινδύνους γίνεται μια αναφορά σε ορισμένα παραδείγματα

σηράγγων που κατασκευάστηκαν με μηχανοποιημένη μέθοδο και παρουσίασαν αστοχίες που οφείλονταν σε αυτούς τους παράγοντες.

Στο επόμενο κεφάλαιο αναλύονται δύο επεκτάσεις των γραμμών του μετρό της Αθήνας, η επέκταση «Αγ.Δημήτριος-Ελληνικό» και «Χαϊδάρι-Ευαγγελίστρια». Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι γεωλογικές και τεχνικογεωλογικές συνθήκες των γραμμών και κατασκευάζονται πίνακες κατά μήκος των τομών με παραμέτρους τον τύπο αστοχίας, το ύψος των υπερκειμένων και την αντοχή της βραχόμαζας στοχεύοντας στην επιλογή ενός μηχανήματος διάνοιξης με τις μικρότερες πιθανότητες εμφάνισης αστοχιών.

Τέλος, συνθέτοντας τα δεδομένα των επεκτάσεων της Αθήνας και αυτά των παραδειγμάτων μηχανοποιημένων ορύξεων από βιβλιογραφικές πηγές, προέκυψε ένα ευρύτερο διάγραμμα συμπεριφοράς των σηράγγων που αφορά ωστόσο την μηχανοποιημένη διάνοιξη.

ABSTRACT

The present thesis focuses on the assessment of the engineering geological behavior of rockmasses in mechanized tunneling and concludes to the process of selecting the most suitable Tunnel Boring Machine for every rock-mass and it's behavior. It is worth to mention that it specifies mostly in examples of urban tunneling, analyzing however and cases of non-urban tunnels

Initially, the mechanical behaviour of the rock material, its physical and dynamic parameters and deformability and permeability factors are described.

The context of the rock mass, the systems with which it is classified (Geological Strength Index, Rock Mass Rating system, Q system, Rock Mass index), its quality determination (Rock Quality Designation system), the application of fracture criteria (Mohr-Coulomb, Hoek-Brown, Griffith, Goodman) and the methods of estimating the engineering geological behavior of the rock mass are presented next. In particular, the Tunnel Behaviour Chart system is analyzed, with which the corresponding tunnel support and the tunnel design measures can be derived. Finally, the methodologies that identify the geotechnical risks of mechanized drilling are numerated (Decision Aids for Tunnelling system, Q_{TBM}, VI index).

Subsequently, the types of excavation machines are analyzed, based on the support they exert on the face of the tunnel. They are distinguished by TBMs with or without shield. Shielded TBMs include the categories of active face support, passive face support and mixed type. The potential risks of failures in mechanized tunneling are also presented. The factors of rock strength, discontinuities, cover of overlying layers, water permeability and presence of voids, define the behavior of the geological materials during the mechanized excavation. Based on these factors, examples of mechanized tunnels encountering failures, are presented.

The next chapter specifies in two extensions of metropolitan subway of Athens, the "Aghios Dimitrios-Elliniko" and "Haidari-Evangelistria. The geological and engineering-geological sections and tables with parameters of failure types, depths of the excavation and strength of rockmasses of each extension are presented, having as a purpose the selection of the most appropriate TBM machine with the minimum failure percentage.

In conclusion, following Athens extensions data, a tunnel behavior chart is created, concerning the excavation by tunnel boring machines.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΓΙΑ ΜΗΧΑΝΟΠΟΙΗΜΕΝΕΣ ΣΗΡΑΓΓΕΣ

Η συνεχής αστικοποίηση που εξελίχθηκε κυρίως τις τελευταίες δεκαετίες του 20^{ου} αιώνα στην Ευρώπη, έφτασε μέχρι τον Ελλαδικό χώρο, επηρεάζοντας την πολεοδομική της ανάπτυξη. Οι αυξημένοι ρυθμοί ζωής και η αύξηση του πληθυσμού οδήγησε στην διεύρυνση των αστικών περιοχών προκειμένου να καλύπτονται οι ανάγκες των ανθρώπων. Ως επακόλουθο, η ζήτηση για τις μετακινήσεις απέκτησε ανοδική πορεία, με την κυκλοφοριακή συμφόρηση των οδικών αξόνων να είναι όλο και πιο συχνή. Κρίθηκε λοιπόν απαραίτητη η ανάγκη της κατασκευής υπόγειων οδικών αξόνων που θα επέτρεπαν την ευκολότερη και ασφαλέστερη μετακίνηση και επικοινωνία του πληθυσμού ακόμη και σε πιο δυσπρόσιτες περιοχές.

Ένας υπόγειος οδικός άξονας είναι η σήραγγα. Πρόκειται για ένα έργο που απαιτεί τον συνδυασμό επιστημών όπως πολιτικών μηχανικών, γεωλόγων, τεχνικών γεωλόγων κ.λ.π με σκοπό την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των εδαφικών και βραχωδών σχηματισμών. Απαραίτητη προϋπόθεση για τον ασφαλή και οικονομικό σχεδιασμό μιας σήραγγας είναι η κατασκευή ενός αξιόπιστου γεωλογικού και τεχνικογεωλογικού μοντέλου και ο γεωτεχνικός χαρακτηρισμός της βραχόμαζας για την όσο το δυνατόν καλύτερη προσομοίωση των συνθηκών εκσκαφής.

Η ανάγκη εκτίμησης της τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς των βραχομάζων αποτέλεσε αιτία της δημιουργίας ενός συστήματος που μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα μεγάλο εύρος γεωλογικών καταστάσεων. Πρόκειται για το διάγραμμα TBC, το οποίο προέκυψε ύστερα από την συλλογή ενός εύρους δεδομένων 62 σηράγγων της Εγνατίας οδού. Αποτέλεσε ένα πολύ σημαντικό βήμα για την δημιουργία μιας « παγκόσμιας κοινής διαλέκτου » για την εκτίμηση της συμπεριφοράς της βραχόμαζας, αλλά και για την πρωταρχική προσέγγιση των κατάλληλων μέτρων υποστήριξης σε πιθανές αστοχίες. Πρόκειται ωστόσο για ένα διάγραμμα που μπορεί να εφαρμοστεί σε σήραγγες που κατασκευάζονται με συμβατική εκσκαφή.

Οι σήραγγες που βρίσκονται κάτω από αστικό ιστό, κατασκευάζονται με τη χρήση μηχανημάτων εκσκαφής (TBM). Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι τα μηχανήματα αυτά επιτρέπουν την κατασκευή του έργου, χωρίς να μεταβάλλουν τόσο το καθεστώς των τάσεων που επικρατούν υπόγεια και επίγεια, ενώ η ταχύτητα κατασκευής του έργου είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με την συμβατική διάνοιξη. Η τεχνικογεωλογική αξιολόγηση κατά μήκος μιας τέτοιας σήραγγας επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την επιλογή του κατάλληλου μηχανήματος εκσκαφής. Και αυτό συμβαίνει διότι μεταβάλλονται οι συνθήκες που αυτό βάλλεται να αντιμετωπίσει καθώς την διανοίγει. Έτσι λοιπόν κρίνεται αναγκαία η σωστή εκτίμηση των πιθανών αστοχιών κατά μήκος του έργου, προκειμένου να επιλεχθεί εκείνο το μηχάνημα διάνοιξης που θα λειτουργήσει χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα..

Η περίπτωση της Ελλάδας παρουσιάζει μία ιδιαιτερότητα και ένα ενδιαφέρον ως προς την κατασκευή των υπόγειων έργων. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο πλούσιο ανάγλυφό της, με την παρουσία και τις εναλλαγές διαφόρων πετρωμάτων και την έντονη τεκτονική της. Παρατηρείται λοιπόν μια ετερογένεια και ποικιλία ως προς την σύσταση και την αντοχή των πετρωμάτων της, γεγονός που καθιστά δυσκολότερη την πρόβλεψη των γεωλογικών συνθηκών της και την τεχνικογεωλογική αξιολόγηση των πετρωμάτων της. Έτσι σήραγγες όπως το μετρό των Αθηνών και της Θεσσαλονίκης, αντιμετώπισαν και αντιμετωπίζουν πολύπλοκες τεχνικογεωλογικές συνθήκες ως προς την διάνοιξή τους. Πρόκειται για σήραγγες που κατασκευάζονται με την χρήση μηχανημάτων εκσκαφής (TBM). Επομένως είναι ιδιαίτερα σημαντική η αξιόπιστη τεχνικογεωλογική αξιολόγηση των σχηματισμών προκειμένου να επιλεχθεί το κατάλληλο μηχάνημα για την διάνοιξή τους.

1.2 ΤΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ Η ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥΣ

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας αξιοποιήθηκαν δεδομένα από την γεωλογική και γεωτεχνική έρευνα που διενεργήθηκε για τις ανάγκες των επεκτάσεων «Άγιος Δημήτριος-Ελληνικό» και «Χαϊδάρι-Πειραιάς» της Αθήνας.

Αρχικά αναπτύχθηκε βιβλιογραφική ανάλυση των τεχνικογεωλογικών στοιχείων, στην οποία περιλαμβάνονται πληροφορίες για το βραχώδες υλικό, την βραχόμαζα και τον χαρακτηρισμό της, την ταξινόμησή της, καθώς επίσης και ιδιότητες, συσχετιζόμενα μεγέθη και δοκιμές των εδαφικών σχηματισμών. Ακόμη μελετήθηκαν βιβλιογραφικά και επιπλέον περιπτώσεις σηράγγων που παρουσιάζουν διαφορετικά χαρακτηριστικά από αυτές της Αθήνας με σκοπό την συλλογή δεδομένων για ένα πιο αξιόπιστο αποτέλεσμα.

Τα μηχανήματα εκσκαφής (TBM) διακρίθηκαν βάσει του τρόπου υποστήριξης του μετώπου, σε TBM χωρίς ασπίδα και TBM με ασπίδα, με τη δεύτερη κατηγορία να διακρίνεται σε TBM με ενεργητική υποστήριξη μετώπου, με παθητική υποστήριξη μετώπου και με μικτή ασπίδα.

Στην συνέχεια από τις γεωτρήσεις και των δύο επεκτάσεων της Αθήνας, εξετάστηκαν οι σχηματισμοί στο βάθος της διατομής της σήραγγας για κάθε γεώτρηση. Λήφθηκε υπόψη η δομή τους και εκτιμήθηκε μέσω των μητρώων των γεωτρήσεων αλλά και της εικόνας τους από τις γεωτρήσεις, ο γεωλογικός δείκτης αντοχής τους. Έπειτα, μέσω των αποτελεσμάτων των εργαστηριακών δοκιμών, έγινε μια ταξινόμηση των σχηματισμών με βάση την αντοχή τους σ_{ci} (MPa). Εκτιμήθηκε το ύψος των υπερκειμένων, το οποίο παρουσιάζει μικρές τιμές και στις δύο επεκτάσεις, ενώ λήφθηκαν υπόψη και τα επίπεδα υδροπερατότητας . Τέλος εξετάστηκε για κάθε περίπτωση, η καταλληλότητα συγκεκριμένων μηχανημάτων εκσκαφής.

Κατασκευάστηκαν λοιπόν πίνακες κατά μήκος των τεχνικογεωλογικών τομών της κάθε επέκτασης, στους οποίους εκτιμήθηκαν οι δυνητικές αστοχίες που θα αντιμετωπίσει το TBM σε κάθε γεώτρηση, καθώς επίσης και πίνακες εκτίμησης του καταλληλότερου μηχανήματος διάνοιξης για κάθε περίπτωση.

1.3 ΣΚΟΠΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Το κύριο αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της συμπεριφοράς των βραχομαζών κατά μήκος μιας σήραγγας που κατασκευάζεται με μηχάνημα TBM και η επιλογή του κατάλληλου μηχανήματος διάνοιξης.

Η διάνοιξη με TBM στοχεύει στην γρηγορότερη περάτωση του έργου και στην όσο πιο δυνατόν περιορισμένη διατάραξη των τάσεων κατά μήκος του. Το γεγονός αυτό το καθιστά καταλληλότερο για αστικές σήραγγες, αφού παρέχει πιο ασφαλείς συνθήκες κατά τη εφαρμογή του τόσο υπόγεια όσο και υπέργεια. Τεχνικά έργα, όπως το μετρό των Αθηνών, των οποίων η μελέτη κρίνει απαραίτητη την εκσκαφή με την χρήση ενός μηχανήματος TBM, παρουσιάζουν μια μεγαλύτερη πολυπλοκότητα. Και αυτό διότι οι γεωλογικοί παράγοντες κατά μήκος του έργου που καθορίζουν την εμφάνιση πιθανών αστοχιών, επηρεάζουν επίσης και την λειτουργία του μηχανήματος διάνοιξης.

Έτσι λοιπόν ο προσδιορισμός της τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς των σχηματισμών, αποτελεί το πρωταρχικό και πιο σημαντικό βήμα για την αντιμετώπιση πιθανών αστοχιών στην σήραγγα. Η σωστή εκτίμησή τους βασίζεται στον προσδιορισμό των παραμέτρων της βραχόμαζας, οι οποίες σε συνδυασμό με τις εκάστοτε συνθήκες μπορεί να οδηγήσουν σε διαφορετικές αστοχίες. Η επιλογή ενός μηχανήματος διάνοιξης που θα μπορέσει να λειτουργήσει στις αντίστοιχες γεωλογικές συνθήκες και στα αντίστοιχα φαινόμενα αστοχιών είναι το αμέσως επόμενο βήμα. Η έλλειψη ωστόσο ενός μέσου εκτίμησης του καταλληλότερου TBM καθιστά την διαδικασία αυτή δύσκολη. Κρίνεται λοιπόν αναγκαία η εφαρμογή ενός συστήματος, μέσω του οποίου θα εκτιμάται με μεγαλύτερη ευκολία το TBM το οποίο θα υλοποιήσει ένα έργο με ασφάλεια και εντός χρονικού, σύμφωνα με την μελέτη, πλαισίου. Ως απώτερος λοιπόν σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η πρόταση μιας συγκεκριμένης μεθοδολογίας και η κατασκευή ενός συγκεκριμένου διαγράμματος για την επιλογή του καταλληλότερου TBM, προκειμένου να βελτιωθεί η κατάσταση αυτή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΤΑ ΠΟΙΟΤΙΚΑ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΑΚΕΡΑΙΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ ΚΑΙ Η ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΟΥ

Για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς της βραχομάζας σε συνθήκες κατασκευής ενός έργου, υπόγειου ή επιφανειακου, απαιτείται η γνώση των παραμέτρων τόσο του ακέραιου πετρώματος όσο και των ασυνεχειών. Έτσι λοιπόν αρχικός στόχος μιας τεχνικογεωλογικής μελέτης είναι ο προσδιορισμός των ιδιοτήτων του ακέραιου πετρώματος από πετρογραφική αρχικά άποψη και στην συνέχεια από άποψη μηχανικής συμπεριφοράς. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να προσδιοριστεί πιο αξιόπιστα η συμπεριφορά του πετρώματος σε κάθε έργο και επομένως σαν επόμενο βήμα να αξιολογηθεί και ο καταλληλότερος τύπος μηχανήματος διάνοιξης.

Με τον όρο ακέραιο πέτρωμα νοείται αυτό που δεν παρουσιάζει ασυνέχειες μεγάλης κλίμακας, αλλά μπορεί να περιέχει ασυνέχειες μικρής κλίμακας όπως η σχιστότητα. Αποτελεί ένα πολυκρυσταλλικό συνεχές ορυκτό στερεό σώμα με σύνηθες μέγεθος αντίστοιχο με αυτό μιας πυρηνοληψίας γεώτρησης και μπορεί να εξεταστεί εργαστηριακά.

Σύμφωνα με τον Πίνακας 1 οι παράμετροι του βραχώδους υλικού που κρίνονται απαραίτητοι για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς του ανήκουν σε 3 ομάδες. Η πρώτη ομάδα προσδιορίζεται από την γεωλογική παρατήρηση και είναι ιδιότητες καθαρά περιγραφικές. Η δεύτερη ομάδα προσδιορίζεται με απλές δοκιμές ταξινομήσεως χωρίς απαραίτητη την εφαρμογή εργαστηριακών δοκιμών, από την οποία προκύπτουν δείκτες με ημι-ποσοτική έκφραση. Τέλος η τρίτη ομάδα είναι αυτή που κρίνεται απαραίτητη για τον σχεδιασμό των τεχνικών έργων και αποτελείται από ποσοτικές ιδιότητες, που προσδιορίζονται με εργαστηριακές δοκιμές (π.χ αντοχή σε μοναξονική θλίψη).

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί αναλύονται οι ομάδες παραμέτρων των πετρωμάτων που είναι απαραίτητες για τον καθορισμό των ιδιοτήτων τους, ενώ στο τέλος παρουσιάζονται τα μηχανικά εκείνα χαρακτηριστικά, τα οποία καθορίζουν την τεχνικογεωλογική συμπεριφορά του πετρώματος. Τέλος αναλύονται οι δοκιμές που εφαρμόζονται για τον προσδιορισμό των τασικών και υδρογεωλογικών συνθηκών που αναπτύσσονται στο εκάστοτε έργο. Σκοπός είναι η δημιουργία ενός ολοκληρωμένου γεωλογικού υποβάθρου για την σωστή αξιολόγηση της τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς των σχηματισμών.

Πίνακας 1: Οι ομάδες των παραμέτρων του βραχώδους υλικού (Τεχνική Ομάδα Εργασίας της Γεωλογικής Εταιρείας της Αγγλιας, 1977)

ΟΜΑΔΑ I	ΟΜΑΔΑ II	ΟΜΑΔΑ III
Τύπος Χρώμα Μέγεθος κόκκων Δομή και ιστός Αποσάθρωση Εξαλλοίωση Αντοχή	Σκληρότητα Ανθεκτικότητα Πορώδες Πυκνότητα Αντοχή Ταχύτητα διάδοσης κυμάτων	Αντοχή Μέτρο ελαστικότητας Λόγος Poisson Πρωτογενής υδροπερατότητα

2.1 ΠΟΙΟΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΚΕΡΑΙΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ

2.1.1 ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ

Η γένεση των πετρωμάτων δημιουργεί τρείς κατηγορίες, τα πυριγενή, τα ιζηματογενή και τα μεταμορφωμένα. Πυριγενή πετρώματα είναι εκείνα τα οποία δημιουργούνται μετά από τις ηφαιστειακές εκρήξεις και την στερεοποίηση του μάγματος. Η στερεοποίηση του μάγματος μέσα στον φλοιό και σε μεγάλο βάθος οδηγεί στον σχηματισμό των πλουτωνιτων, ενώ στην αντίθετη περίπτωση της στερεοποίησης του μάγματος στην επιφάνεια σχηματίζονται οι ηφαιστίτες (Πίνακας 2). Τέλος όταν το μάγμα εισχωρήσει μέσα σε μεγάλα ρήγματα ή ανοίγματα δημιουργούνται τα φλεβικά πετρώματα Διακρίνονται σε όξινα, ενδιάμεσα και βασικά πυριγενή ανάλογα με το ποσοστό SiO2, το οποίο περιλαμβάνουν στην σύστασή τους. Ιζηματογενή πετρώματα είναι εκείνα τα πετρώματα, που σχηματίζονται, αρχικά λόγω απόθεσης ή καταβύθισης υλικών που αιωρούνται ή διαλύονται μέσα σε ένα ρευστό μέσο (νερό ή αέρας) και στην συνέχεια συγκολλούνται με τα υλικά που αποτέθηκαν. Χαρακτηριστικό τους είναι οι στρώσεις ή εναλλαγές των στρωμάτων τους και η παρουσία απολιθωμάτων. Διακρίνονται σε κλαστικά και μη κλαστικά (χημικά και βιογενή), ανάλογα με το αν προκύπτουν από απόθεση υλικών αποσάθρωσης, που αιωρούνται στο νερό ή στον αέρα, ή όχι (Πίνακας 3). Τα Μεταμορφωμένα πετρώματα προκύπτουν από άλλα προϋπάρχοντα, αφού υποστούν ιστολογικές, ορυκτολογικές και χημικές μεταβολές χωρίς όμως να περάσουν από το στάδιο της τήξης. Η μεταμόρφωση διακρίνεται σε τρία είδη, της γενική, την δυναμική και την μεταμόρφωση επαφής, ανάλογα με την θερμοκρασία, την πίεση και τα ρευστά διαλύματα που παρατηρούνται. Ο βαθμός μεταμόρφωσης μπορεί να είναι χαμηλός, υψηλός ή μέσος ανάλογα με τις τιμές των μεταμορφικών παραγόντων (Πίνακας 4).

Ο καθορισμός του πετρογραφικού τύπου είναι ιδιαίτερα σημαντικός για τον ορθό σχεδιασμό των τεχνικών έργων. Και αυτό διότι ανάμεσα στα πετρώματα και στα μηχανικά τους χαρακτηριστικά αναπτύσσεται μία σχέση με την οποία μπορεί το πέτρωμα ανάλογα με τον τύπου του να λάβει κάποια εύρη τιμών που είναι κοινώς αποδεκτά. Για παράδειγμα η σκληρότητα του χαλαζίτη είναι μεγάλη και σταθερή, του ψαμμίτη εξαρτάται από την ποιότητα του συγκολλητικού υλικού κ.τ.λ. Επιπλέον ανάλογα τον τύπο του πετρώματος παρατηρούνται και συγκεκριμένη ιστοί, δομή και ανισοτροπία του. Τα πυριγενή πετρώματα, πλην επιφανειακών εκχύσεων, δεν παρουσιάζουν ανισοτροπία, ενώ τα μεταμορφωμένα τις περισσότερες φορές παρουσιάζουν μεγάλη ανισοτροπία ως προς την δομή και την αντοχή τους (π. γνέυσιοι, σχιστόλιθοι) με εξαιρέσεις όπως το μάρμαρο και τον χαλαζίτη που συνήθως εντοπιζονται πιο μαζώδη και ομοιογενή. Το σημαντικότερο όμως για τα τεχνικά έργα είναι ότι ο τύπος του πετρώματος μπορεί να παρέχει πληροφορίες για τις ευρύτερες γεωλογικές συνθήκες ενός έργου. Για παράδειγμα η παρουσία γύψου ή ασβεστολίθων μπορεί να προμηνύει την εμφάνιση καρστικών εγκοίλων, τα πυριγενή πετρώματα συχνά συνδέονται με δίκτυα στηλοειδών διακλάσεων, ενώ οι αργιλικοί σχιστόλιθοι έχουν ως χαρακτηριστικό την διόγκωση και την χαλάρωσή τους με τις αλλαγές του περιβάλλοντος.

Πίνακας 2: Πυριγενή πετρώματα

Όξινα	Ενδιάμεσα	Βασικά	Σχηματισμοί	Κοκκομετρία
Ρυόλιθος	Ανδεσίτης	Βασάλτης	Ηφαιστίτες	Λεπτόκοκκα
Πορφυρίτης	-	Δολερίτης	Φλεβικά	Ενδιάμεσοι κόκκοι
Γρανίτης	Διορίτης	Γάββρος	Πλουτωνίτες	Αδρόκοκκα

Πίνακας 3: Ιζηματογενή πετρώματα

<table>
<tr><th colspan="2">Κλαστικά ιζηματογενή πετρώματα</th><th colspan="2">Μη κλαστικά ιζηματογενή πετρώματα</th></tr>
<tr><td>Κροκαλοπαγή</td><td rowspan="2">Η συγκολλητική ύλη είναι συνήθως ασβεστιτική ή χαλαζιακή</td><td>Ασβεστόλιθος</td><td>Αποτελείται κυρίως από ασβεστίτη</td></tr>
<tr><td>Λατυποπαγή</td><td>Τραβερτίνης</td><td>Ανθρακικό πέτρωμα με χαρακτηριστική πορώδη υφή</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Ψαμμίτες</td><td rowspan="2">Προκύπτουν από διαγένεση της άμμου. Το συνδετικό τους υλικό μπορεί να είναι χαλαζιακό, ασβεστιτικό, αργιλικό</td><td>Κρητίς</td><td>Σχηματίζεται από λείψανα τρηματοφόρων.</td></tr>
<tr><td>Δολομίτης</td><td>Σχηματίζεται από διαγένεση ή υδροθερμική μετασωμάτωση ασβεστίτη σε</td></tr>
</table>

			υπεραλατούχες ιζηματογενείς αποθέσεις
Ιλυόλιθος	Αποτελείται κυρίως από ιλύ και άργιλο	Κερατόλιθος	Υλικό οργανικής ή ανόργανης προέλευσης
Αργιλόλιθος	Αποτελέιται από ορυκτά της αργίλου (καολινίτης, μοντμοριλλονίτης, ιλλίτης)	Ορυκτοί άνθρακες	Τύρφη, Λιγνίτης, Λιθάνθρακας, Ανθρακίτης
Πηλόλιθος	Αποτελείται από αργιλικά ορυκτά, χαλαζία, αστρίους, ασβεστίτη και οργανική ύλη		
Μάργα	Η σύστασή της κυμαίνεται μεταξύ ασβεστολίθου και αργίλου		
Φλύσχης	Εναλλαγές μαργών, ασβεστολίθων, κροκαλοπαγών, αδρόκοκκων ψαμμιτών. Είναι συνορογενετικό ίζημα		
Μολάσσα	Εναλλαγές μαργών, ασβεστολίθων, κροκαλοπαγών, αδρόκοκκων ψαμμιτών. Είναι μεταορογενετικό ίζημα		
Λατερίτης και Βωξίτης	Είναι προϊόντα έντονης αποσάθρωσης γάββρων, γρανιτών, γνευσίων και άλλων, σε τροπικά μέχρι εύκρατα κλίματα.		
Τόφφοι	Σχηματίζονται από την καθίζηση υλικών, που εκτινάσσονται από διάφορα ηφαίστεια		

Πίνακας 4: Μεταμορφωμένα πετρώματα

Πέτρωμα	Προέλευση
Φυλλίτης	Προέρχεται από μεταμόρφωση αργιλοπηλιτικών ή μαργαικών ιζημάτων Παρουσιάζει χαρακτηριστική έντονη σχιστότητα
Μαρμαρυγιακός σχιστόλιθος	Σχηματίζεται από αργιλοπηλιτικά και μαργαϊκά ιζήματα. Παρουσιάζει καλή σχιστότητα
Γνεύσιος	Χαρακτηρίζεται από τη σχιστότητα και τη γνευσιοειδή υφή. Μπορεί να έχει ορθο- ή παρα- προέλευση
Πρασινοσχιστόλιθος	Είναι χαρακτηριστικό πέτρωμα της πρασινοσχιστολιθικής φάσης και προέρχεται από βασικά πυριγενή (γάββροι, βασάλτες, δολερίτες) ή ακόμη και από ανάδρομη μεταμόρφωση βιοτιτικών σχιστολίθων και αμφιβολιτών.
Χαλαζίτης	Προέρχεται από ψαμμίτες ή από χαλαζιακές φλέβες.
Αμφιβολίτης	Προκύπτει από μέσου βαθμού μεταμόρφωση γαββρικών πετρωμάτων και ασβεστομαγνησιούχων αργιλικών ιζημάτων

Αμφιβολιτικός σχιστόλιθος	Προέρχεται από γαββρικά πετρώματα, από μαγνησιούχες μάργες ή ασβεστοδολομιτικά ιζήματα.
Σερπεντινίτης	Είναι προϊόν της διαδικασίας της σερπεντινίωσης των περιδοτιτών
Εκλογίτης	ίναι πέτρωμα μεταμόρφωσης υψηλής πίεσης και ποικίλης θερμοκρασίας, αρχικών βασικών πυριγενών πετρωμάτων.
Γλαυκοφανιτικός σχιστόλιθος	Προκύπτει από κυρίως γαββρικά πετρώματα σε περιοχές μεγάλης πίεσης και μικρής θερμοκρασίας
Μάρμαρο	Το μάρμαρο είναι μονόμεικτο πέτρωμα, αποτελούμενο μόνο από ασβεστίτη, προϊόν ανακρυστάλλωσης των ασβεστολίθων.
Κερατίτης	Είναι προϊόν θερμομεταμόρφωσης επαφής

2.1.2 ΧΡΩΜΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ

Το χρώμα ενός πετρώματος είναι δύσκολο να καθοριστεί και βασίζεται πολλές φορές στην υποκειμενική κρίση. Ωστόσο υπάρχουν αντίστοιχοι πίνακες με τα ενδεικτικά χρώματα. Ο χαρακτηρισμός του χρώματος αποσκοπεί κυρίως για τον προσδιορισμό της ορυκτολογικής σύστασης του πετρώματος και τον βαθμό που μπορεί αυτό να έχει αποσαθρωθεί ή εξαλλοιωθεί. Ο χρωματισμός του προσδιορίζεται ανάλογα με την φωτεινότητα, την απόχρωση και το κυρίως χρώμα του, ενώ ως προς τον βαθμό αποσάθρωσής του μπορεί να χαρακτηριστεί γενικά ως υγιές, αποχρωματισμένο, θρυμματισμένο και αποσυνθεμένο (ISRM, 1981 και BS 5930, 1981, από Κούκης και Σαμπατακάκης, 2002)

2.1.3 ΜΕΓΕΘΟΣ ΚΟΚΚΩΝ

Το μέγεθος των κόκκων είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την μηχανική συμπεριφορά του πετρώματος (Πίνακας 5). Συγκεκριμένα όσο μειώνεται το μέγεθος των κόκκων τόσο αυξάνεται η επιφάνεια επαφής τους και οι μεταξύ τους δεσμοί με αποτέλεσμα να παρατηρείται μεγαλύτερη αντοχή και συνεκτικότητα. Αντίθετα σε πιο αδροκοκκους σχηματισμούς, με μεγαλύτερους κρυστάλλους, οι δεσμοί είναι πιο ασθενείς με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται μικρορωγμές.

Πίνακας 5: Ταξινομηση πετρωμάτων ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων κατά IAEG (1981)

ΠΟΙΟΤΙΚΑ	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ	ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΙΑ ΜΕ ΕΔΑΦΙΚΑ ΥΛΙΚΑ
Πολύ χονδρόκοκκο	>60mm	Ογκόλιθοι και κροκάλες
Χονδρόκοκκο	60mm-2mm	Χαλίκια
Μεσόκοκκο	2mm-60μ	Άμμος
Λεπτόκοκκο	60μ-2μ	Ιλύς
Πολύ λεπτόκοκκο	<2μ	Άργιλος

2.1.4 ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΙΣΤΟΣ

Η δομή του πετρώματος αναφέρεται στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των κόκκων του πετρώματος και στις σχέσεις που υπάρχουν μεταξύ τους, ενώ ο ιστός στην διάταξη των κόκκων μέσα στον χώρο. Ανάλογα με τον προσανατολισμό των ορυκτών στον χώρο αυτά χαρακτηρίζονται ως ισότροπα ή ανισότροπα.

2.1.5 ΑΠΟΣΑΘΡΩΣΗ ΚΑΙ ΕΞΑΛΛΟΙΩΣΗ

Η αποσάθρωση του πετρώματος προκύπτει από τους ατμοσφαιρικούς παράγοντες στην επιφάνεια ή κοντά σε αυτήν δημιουργώντας στην θέση του πετρώματος έναν μανδύα από τα υλικά αποσάθρωσης. Διακρίνεται σε μηχανική και χημική.

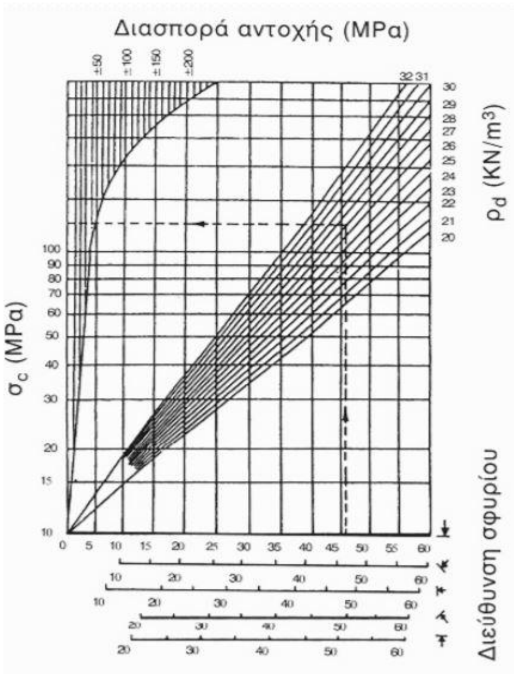
Το ακέραιο πέτρωμα όταν υπόκεινται σε αποσάθρωση ή εξαλλοίωση μειώνεται η αντοχή του, ενώ αυξάνεται το πορώδες του. Επιπλέον παρατηρούνται συχνότερες ρωγμές. Έτσι η αποσάθρωση είναι ένας παράγοντας που μπορεί να επηρεάσει σε μεγάλο βαθμο την συμπεριφορά των σχηματισμών στα τεχνικά έργα.

2.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΑΚΕΡΑΙΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ, ΒΑΣΗ ΕΠΙΤΌΠΟΥ ΚΑΙ ΑΠΛΩΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΕΩΝ

2.2.1 ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ

Η σκληρότητα του ακέραιου πετρώματος εξαρτάται από το είδος και τη ποσοστιαία αναλογία των ορυκτών που το συνιστούν καθώς και από το είδος και την αντοχή των δεσμών που υπάρχουν μεταξύ των ορυκτών αυτών. Για τον προσδιορισμό της σκληρότητας ενός ορυκτού χρησιμοποιείται η εμπειρική κλίμακα Mohs. Ένα ακέραιο πέτρωμα που αποτελείται από διαφορετικής σκληρότητας ορυκτά, προσμετράτε ως προς την σκληρότητά του με την σφύρα Schmidt σε επιτόπου δοκιμές. Προτάθηκε έτσι από τους Deere and Miller (1996) ο έμμεσος προσδιορισμός της αντοχής σε μοναξονική θλίψη του ακέραιου πετρώματος από την τιμή της σκληρότητας του που προσδιορίζεται με την σφύρα Schmidt και την χρήση ενός νομογράμματος (Πίνακας 6).

Πίνακας 6: Ταξινόμηση του ακέραιου πετρώματος ανάλογα με την σκληρότητά του σύφμωνα με Κούκη και Σαμπατακάκη (2002)

ΥΛΙΚΟ	ΑΝΤΟΧΗ SHV	ΝΟΜΟΓΡΑΜΜΑ
Πολύ μαλακό	<10 MPa	
Μαλακό	10-20MPa	
Μέτριο	20-50 MPa	
Σκληρό	50-60 MPa	
Πολύ σκληρό	>60 MPa	

2.2.2 ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΧΑΛΑΡΩΣΗ

Η ανθεκτικότητα του ακέραιου πετρώματος στις διεργασίες της αποσαθρώσεως ή η γρήγορη χαλάρωσή του και το σπάσιμο των δεσμών των συστατικών του προσδιορίζονται με τη δοκιμή χαλαρώσεως (Τσιαμπάος 1984). Μέσω της δοκιμής χαλάρωσης του Franklin and Chandra (1972) προσμετράτε η απώλεια βάρους των κόκκων μετά από δύο κύκλους ξήρανσης και διαποτισμού τριβής (Πίνακας 7). Προκύπτει λοιπόν ένας δείκτης χαλάρωσης I_{d2}, το μέγεθος του οποίου υποδηλώνει την ανθεκτικότητα του πετρώματος. Συνίσταται στα αργιλικής σύστασης πετρώματα.

Πίνακας 7: Ταξινόμηση πετρωμάτων με βάση την ανθεκτικότητα που παρουσιάζουν στην δοκιμή χαλαρώσεως κατά Franklin and Chandra (1972)

Περιγραφή	Δείκτης Χαλαρώσεως Ια (%)
Πολύ υψηλή ανθεκτικότητα	100-98
Υψηλή ανθεκτικότητα	95-98
Μέτρια υψηλή ανθεκτικότητα	85-95
Μέτρια ανθεκτικότητα	60-85
Χαμηλή ανθεκτικότητα	30-60
Πολύ χαμηλή ανθεκτικότητα	~30

2.2.3 ΠΟΡΩΔΕΣ ΚΑΙ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ

Πρόκειται για το μέτρο των διακένων που υπάρχουν σε ένα πέτρωμα (n) και εκφράζεται με τον λόγο του συνολικού όγκου διακένων (Vκ) προς τον συνολικό όγκο του πετρώματος ($V_{ΟΛ}$), σε ποσοστό της 100. Είναι η ιδιότητα του πετρώματος να αποθηκεύει και να επιτρέπει την κίνηση του νερού στο εσωτερικό του. Το πορώδες διακρίνεται στο πρωτογενές όταν πρόκειται για τα διάκενα που δημιουργήθηκαν κατά την διάρκεια σχηματισμού του πετρώματος και το δευτερογενές όταν πρόκειται για διάκενα που οφείλονται σε τεκτονισμό, αποσάθρωση ή διάλυση, ενώ δεν αποκλείεται ορισμένα πετρώματα να παρουσιάζουν και τα δύο είδη πορώδους (διπλό πορώδες). Γενικά τα πυριγενή και μεταμορφωμένα πετρώματα, όταν βρίσκονται σε υγιή μορφή θεωρούνται συμπαγή και πρακτικά αδιαπέρατα. Μπορεί να παρουσιάζουν δευτερογενές πορώδες στην περίπτωση που έχουν υποστεί οποιαδήποτε καταπόνηση. Αντίθετα τα ιζηματογενή, εκτός αυτών που αποτελούνται σε μεγάλο βαθμό από ιλύ και άργιλο που έχουν την ικανότητα να προσροφούν νερό χωρίς να το αποδεσμεύουν, παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές πορώδους.

Η μεταβολή του πορώδους μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τα μηχανικά χαρακτηριστικά του ακέραιου πετρώματος. Συγκεκριμένα αύξηση του πορώδους του πετρώματος οδηγεί σε μείωση της αντοχής του και αύξηση της παραμορφωσιμότητάς του.

Ως πυκνότητα ορίζεται ο λόγος της μάζας του πετρώματος προς τον συνολικό όγκο. Μετράται σε Mg/m3 . Ανάλογα με τον βαθμό κορεσμού του πετρώματος μπορεί να υπολογιστεί η κορεσμένη πυκνότητα ρ_{sat} και η ξηρή πυκνότητα ρ_d .

Η διακύμανση της πυκνότητας του πετρώματος έχει εξίσου σημαντικό ρόλο στις μηχανικές του ιδιότητες. Συγκεκριμένα, η αύξηση της πυκνότητας του πετρώματος, οδηγεί σε αύξηση της αντοχής του σε μοναξονική θλίψη και ανθεκτικότητα στους παράγοντες αποσάθρωσης.

Πίνακας 8: Ενδεικτικές τιμές πυκνότητας και πορώδους από πετρώματα του Ελληνικού χώρου, σύμφωνα με Κούκη και Σαμπατακάκη (2002)

ΠΕΤΡΩΜΑ	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ (Kgr/m^3)	ΠΟΡΩΔΕΣ (%)
Ασβεστόλιθος	24-27	0-3
Κρυσταλλικός συμπαγής ασβεστόλιθος	26-27	0-1
Δολομιτιωμένος ασβεστόλιθος	15-27,5	3-38
Μαργαϊκος ασβεστόλιος	16.5-26	6-40
Μαργόλιθος,Ιλυόλιθος	17.5-26	5-40
Ψαμμίτης	15-26.5	0.5-30
Μάρμαρο	26.5-28.5	0-1
Σχιστόλιθος	22-27.5	0-3
Ανδεσίτης	21.5-23	10-40

2.2.4 ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΗΧΗΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

Οι ταχύτητες των εγκάρσιων (S) και επιμηκών (P) κυμάτων εξαρτώνται από τις ελαστικές σταθερές του πετρώματος, την πυκνότητα, το πορώδες του και τον κερματισμό του.

Για τον προσδιορισμό των ταχυτήτων των κυμάτων τοποθετείται πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος στο ένα άκρο του πυρήνα του πετρώματος, δημιουργώντας ηχητικά κύματα, τα οποία λαμβάνονται από έναν δέκτη στο άλλο άκρο του πετρώματος. Μετράται ο χρόνος διαδρομής των εγκαρσίων και επιμηκών κυμάτων και στην συνέχεια προσδιορίζονται τα δυναμικά μέτρα διάτμησης (G), ελαστικότητας (E) και ο λόγος Poisson (v). Οι αντίστοιχοι τύποι είναι:

- $G = \rho V_S^2 \quad (GPa)$
- $v(ή\ \sigma) = \dfrac{{V_P}^2/{V_S}^2 - 2}{2\left({V_P}^2/{V_S}^2 - 1\right)}$

- $E = 2G(1+\nu) = \rho V_S^{\,2} \dfrac{3V_P^{\,2} - 4V_S^{\,2}}{\left(V_P^{\,2} - V_S^{\,2}\right)}$ (GPa)

Αξίζει να σημειωθεί ότι το μέτρο ελαστικότητας Ε που υπολογίζεται με αυτή την μέθοδο, διαφέρει από το μέτρο ελαστικότητας του ακέραιου πετρώματος που προσδιορίζεται εργαστηριακά. Κάποιες ενδεικτικές τιμές των πετρωμάτων και των αντίστοιχων ταχυτήτων τους παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 9: Διακυμάνσεις των τιμών Vp και Vs για διάφορες κατηγορίες πετρωμάτων του Ελληνικο΄χώρου σύμφωνα με Κούκη και Σαμπατακάκη (2002)

ΠΕΤΡΩΜΑ	Vp (m/sec)	Vs (m/sec)
Ασβεστόλιθοι	2550-6500	1700-4000
Κρυσταλλικοί.συμπαγείς ασβεστόλιθοι	4800-6500	2800-4000
Μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι	1700-5600	1200-3300
Ψαμμίτες	1900-6000	1100-3500
Γνεύσιοι-Σχίστολιθοι	2300-5900	1400-3600

Η ταχύτητα των ηχητικών κυμάτων των πετρωμάτων είναι ιδιαίτερα σημαντική για μετρήσεις γεωφυσικής φύσης, οι οποίες μπορούν να εφαρμοστούν προκειμένου να προσδιοριστούν με μεγαλύτερη ακρίβεια τα γεωλογικά και τεχνικογεωλογικά μοντέλα και επομένως να επιτευχθεί ακριβέστερη τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της συμπεριφοράς των σχηματισμών. Ακόμη είναι ιδιαίτερα σημαντική για την επιλογή του καταλληλότερου αντισεισμικού σχεδιασμού ενός έργου.

2.3 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ ΒΑΣΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

2.3.1 ΑΝΤΟΧΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ

Για την περιγρφή και την ταξινόμηση ακέραιου πετρώματος είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τα όρια μέσα στα οποία αυτή κυμαίνεται και όχι απαραίτητα την ακριβή τιμή της. Ο προσδιορισμός της αντοχής του ακέραιου πετρώματος είναι εξίσου σημαντικός με αυτόν της βραχομαζας, καθώς συμβάλει στην γεωτεχνική ταξινόμησή της. Ως αντοχή του ακέραιου πετρώματος ορίζεται η τάση που εφαρμόζεται σε αυτό μέχρι την αστοχία του. Διακρίνεται σε συμπιεστική αντοχή, διατμητική και εφελκυστική, ανάλογα με τον τύπο της τάσης που θα εφαρμοστεί στο δείγμα του βραχώδους υλικού. Η θραύση του μπορεί να συμβεί είτε με διάτμηση είτε με επέκταση της επιφάνειας θραύσης.

Η συμπιεστική αντοχή αποτελεί την πιο σημαντική παράμετρο του ακέραιου πετρώματος και μπορεί να υπολογιστεί με την δοκιμή αντοχής σε μοναξονική θλίψη, με την δοκιμή σημειακής φόρτισης και έμμεσα με τον προσδιορισμό της σκληρότητας του βράχου , ενώ η εφελκυστική με την δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης.

«Προσδιορισμός ανεμπόδιστης θλιπτικής αντοχής σ_c»

Η δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της μοναξονικής θλιπτικής αντοχής σc (uniaxial compressive strength UCS), των ελαστικών σταθερών, δηλαδή της παραμορφωσιμότητας Ε και λόγου Poisson ν του άρρηκτου πετρώματος και της σταδιακής φθοράς των πετρωμάτων λόγω της διάδοσης μικρορωγμών. Η τιμή της σc εξαρτάται από την περιεκτικότητα του πετρώματος σε νερό, το πορώδες του, τον βαθμό στον οποίο έχει αποσαθρωθεί, τον κερματισμό του και τις συνθήκες εκτέλεσης της δοκιμής και διαμόρφωσης των δειγμάτων. Είναι λοιπόν δυνατόν να μεταβάλλεται σε διαφορετικά δοκίμια ίδιας ορυκτολογικής σύστασης.

Η δοκιμή μοναξονικής θλίψης πραγματοποιείται σε δοκίμια που κατασκευάζονται από το άρρηκτο πέτρωμα, στα οποία ασκείται μοναξονική κατακόρυφη φόρτιση με σκοπό την επιβολή μοναξονικής εντατικής κατάστασης στο δοκίμιο, δηλαδή $\sigma_2=\sigma_3=0$, $\sigma_1=\sigma$, από δύο παράλληλες κυλινδρικές πλάκες με κατάλληλη μηχανή φόρτισης. Το φορτίο ασκείται συνεχώς στο δοκίμιο, παράλληλα με τον άξονα αυτού, και αυξάνεται βαθμιαία με σταθερό ρυθμό μέχρι την αστοχία του δοκιμίου. Η αξονική τάση στο δοκίμιο θεωρείται ομοιόμορφη και υπολογίζεται από τον λόγο του φορτίου συμπίεσης προς τη επιφάνεια του κυλινδρικού δοκιμίου, δηλαδή:

$$\sigma = \frac{P}{S} \text{ (MPa)}$$

Η αξονική τάση στην οποία το πέτρωμα αστοχεί είναι γνωστή ως ανεμπόδιστη ή μονοαξονική θλιπτική αντοχή του πετρώματος

Η δοκιμή μοναξονικής θλίψης επιπλέον επιτρέπει την διεξαγωγή μετρήσεων ταχύτητας διάδοσης των ελαστικών κυμάτων, ακουστικής εκπομπής[1] του πετρώματος και αξονικής και πλευρικής τροπής (ορθή και διατμητική ανηγμένη παραμόρφωση).

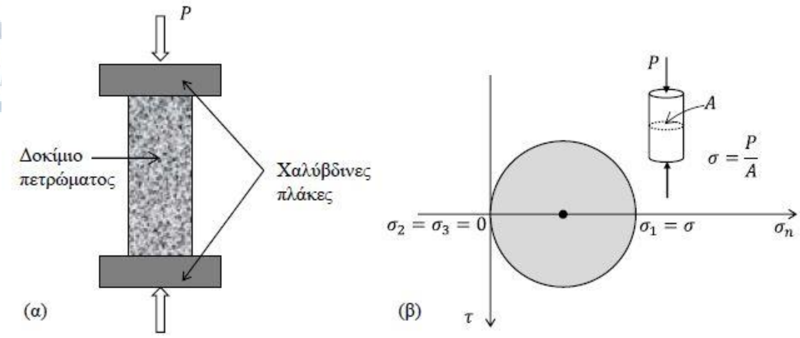
[1] Ως Ακουστική Εκπομπή (Acoustic Emission, AE) χαρακτηρίζονται τα μεταβατικά ελαστικά κύματα που δημιουργούνται με την ταχεία απελευθέρωση ενέργειας από τοπικές πηγές στο εσωτερικό κάποιου υλικού. Η προέλευση της AE στα πετρώματα σχετίζεται με την ολίσθηση μεταξύ των κόκκων

Ανάλογα με την αντοχή σε μοναξονική θλίψη έχει κατασκευαστεί μια κατάταξη σύμφωνα με την ISRM, 1981, η οποία παρουσιάζεται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 10: Τιμές ανεμπόδιστης θλίψης σci (UCS) από Hoek & Marinos (2000) και RocData

ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ	ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΜΟΝΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ (MPa)	ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ ΕΚΤΙΜΗΣΗ	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ
Εξαιρετικά υψηλής αντοχής	>250	Ο πυρήνας δεν σπάζει με το γεωλογικό σφυρί	Χαλαζίτης, Δολερίτης, Γάββρος, Βασάλτης
Πολύ υψηλής αντοχής	100-250	Για να σπάσει ο πυρήνας χρειάζονται πολλά χτυπήματα με το γεωλογικό σφυρί	Αμφιβολίτης, Ψαμμίτης, Βασάλτης, Γάββρος, Γνεύσιος, Γρανοδιορίτης, Μάρμαρο, Ρυόλιθος, Τόφφος, Ασβεστόλιθος
Υψηλής αντοχής	50-100	Για να σπάσει ο πυρήνας χρειάζονται περισσότερα από ένα χτυπήματα	Ασβεστόλιθος, Μάρμαρο, Φυλλίτης, Ψαμμίτης, Μαρμαρυγιακός Σχιστόλιθος, Μαργαϊκός σχιστόλιθος
Μέσης αντοχής	25-50	Ο πυρήνας χαράσσεται με μαχαιρίδιο και μπορεί να σπάσει με ένα χτύπημα του γεωλογικού σφυριού.	Αργιλόλιθος, Σχιστόλιθος, Αργιλικός σχιστόλιθος
Χαμηλής αντοχής	<5-25	Ο πυρήνας σπάει σε πολλά κομμάτια με ένα χτύπημα με το γεωλογικό σφυρί και χαράσσεται εύκολα με το μαχαιρίδιο	Ιλυόλιθος, Αργιλικός σχιστόλιθος, Κρητίς, Ορυκτό αλάτι, Αποσαθρωμένα πετρώματα
Πολύ χαμηλής αντοχής	1-5	Ο πυρήνας σπάει σε πολλά κομμάτια με ένα χτύπημα με το γεωλογικό σφυρί και χαράσσεται εύκολα με το μαχαιρίδιο	Μαλακοί βράχοι, Πολύ αποσαθρωμένα πετρώματα
Εξαιρετικά χαμηλής αντοχής	0.25-1	Ο πυρήνας χαράσσεται εύκολα με το νύχι του αντίχειρα.	Έδαφος

του πετρώματος ή με την έναρξη και διάδοση μικρορωγμών στη δομή του, όταν αυτό βρίσκεται υπό ένταση. Το παραγόμενο σήμα προέρχεται από το ίδιο το πέτρωμα ενώ χωρίς φόρτιση δεν παρατηρείται ακουστική εκπομπή (ISRM, 2002).

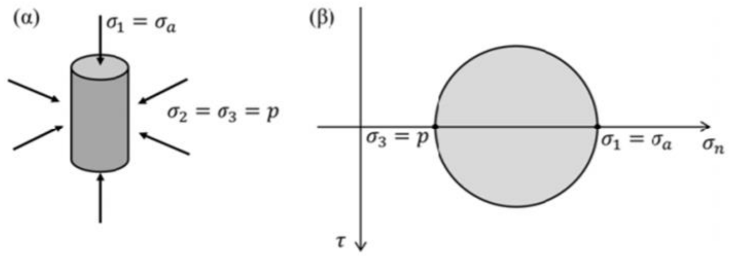


Εικόνα 1: α) Μονοαξονική θλίψη δοκιμίου άρρηκτου πετρώματος, (β) κύκλος Mohr της θεωρητικής εντατικής κατάστασης του δοκιμίου από Νομικό (2015)

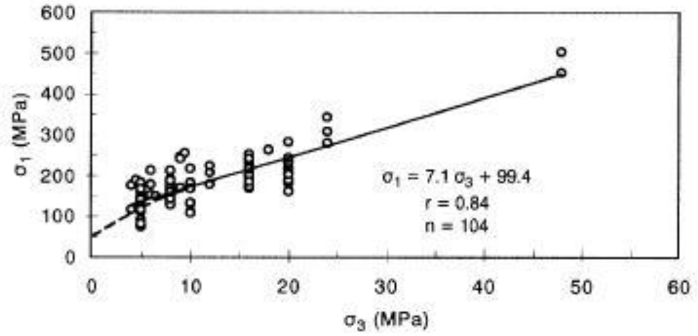
«Προσδιορισμός τριαξονικής αντοχής άρρηκτου βράχου»

Για την επίτευξη της τριαξονικής δοκιμής το δοκίμιο τοποθετείται μέσα σε ειδικό κελί μέσω του οποίου ασκούνται πλευρικές κύριες τάσεις ίσες μεταξύ τους και με την πλευρική υδραυλική πίεση (σ_2=σ_3=p). Επιπλέον ασκείται μία αξονική μέγιστη τάση σ1=σα , η οποία διέρχεται μέσα από το κελί, με σκοπό να υπολογιστεί κάθε φορά η αντοχή του πετρώματος σε αξονική θλίψη για δεδομένη τιμή πλευρικής πίεσης.

Σκοπός της δοκιμής είναι ο προσδιορισμός της αντοχής σε τριαξονική θλίψη δοκιμίων πετρωμάτων ορθού κυλινδρικού σχήματος. Η δοκιμή αυτή δίνει τα απαραίτητα στοιχεία για τον υπολογισμό της γωνίας εσωτερικής τριβής φ και της συνοχής c του πετρώματος και επομένως τον προσδιορισμό της περιβάλλουσας θραύσης.



Εικόνα 2: (α) Συμβατική τριαξονική θλίψη δοκιμίου άρρηκτου πετρώματος, (β) κύκλος Mohr της θεωρητικής κατάστασης του δοκιμίου από Νομικό (2015)



Διάγραμμα 1: Σχέση μεταξύ αξονικής τάσης σ_1 και πλευρικής πίεσης σ_3 για πλήθος τριαξονικών δοκιμών που έχουν πραγματοποιηθεί σε δείγματα του Ελληνικού χώρου από Κούκης και Σαμπατακάκης(2002)

«Αντοχή σε σημειακή φόρτιση Is»

Στην δοκιμή σημειακής φόρτισης, τα κατάλληλα διαμορφωμένα δοκίμια του πετρώματος φορτίζονται σημειακά μέχρι την θραύση τους από ένα ζεύγος κώνων με στρογγυλεμένες κορυφές. Η δοκιμή εκτελείται επιτόπου στην ύπαιθρο ή εργαστηριακά. Η φόρτιση εκτελείται είτε παράλληλα στην διάμετρο της κυκλικής διατομής είτε παράλληλα προς τον άξονα των κώνων. Η δοκιμή θεωρείται αποδεκτή εάν η επιφάνεια της θραύσης διέρχεται και από τα δύο σημεία φόρτισης.

Υπολογίζεται ο δείκτης αντοχής Is σύμφωνα με την σχέση:

$$Is=\frac{P}{D_e^2}$$

Όπου P είναι το φορτίο φόρτισης και D η διάμετρος του δοκιμίου σε περίπτωση διαμετρικής (De=D) ή αξονικής (De=$\sqrt{(\frac{4WD}{\pi})}$ όπου W το πλάτος της διατομής και D η απόσταση των ακμών φόρτισης) δοκιμής. Σε περίπτωση που η δοκιμή δεν γίνεται σε δοκίμιο διαμέτρου 50mm, τότε η τιμή Is επιδέχεται μια διόρθωση I50 σύμφωνα με τον τύπο:

$$I_{50}=F \times I_s$$

Όπου F ο συντελεστής διόρθωσης ο οποίος δίνεται από την σχέση: $F= (D_e/50)^{0.45}$

Για την συσχέτιση του δείκτη αντοχής σημειακής φόρτισης με την αντοχή του πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη έχουν προταθεί σχέσεις της μορφής:

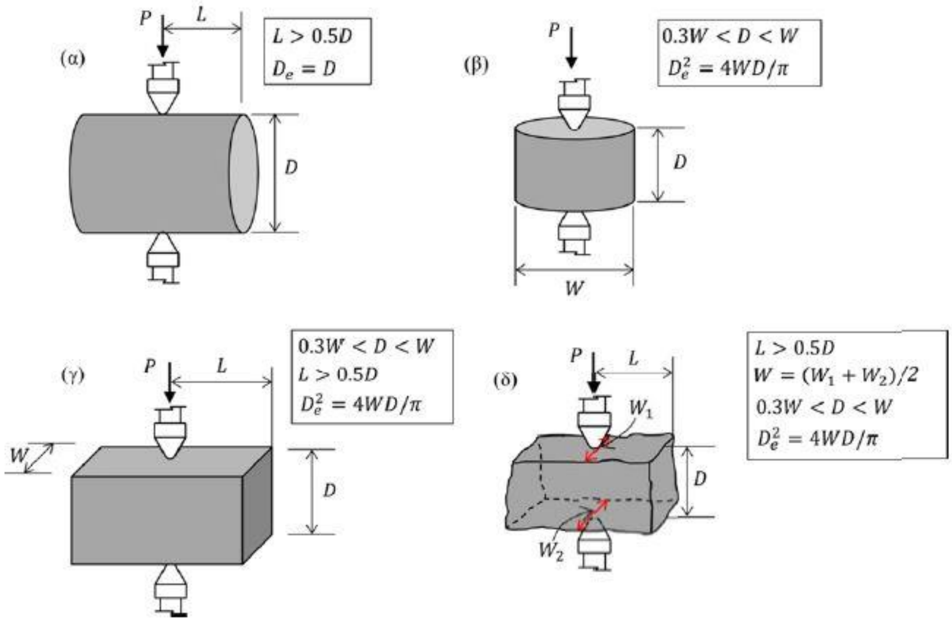
$$\sigma_c=K \times I_{s(50)}$$

όπου K η σταθερά συσχέτισης η οποία εξαρτάται από το πέτρωμα και τον βαθμό αποσάθρωσής του.

Ανάλογα με τον δείκτη σημειακής φόρτισης τα πετρώματα μπορεί να χαρακτηριστούν σύμφωνα με τον BIENIAWSKI, 1975 σε :

- Πολύ υψηλής αντοχής: $I_{S(50)}$ >8
- Υψηλής αντοχής: $I_{S(50)}$=4-8
- Μέσης αντοχής: $I_{S(50)}$=2-4

- Χαμηλής αντοχής: $I_{S(50)}$=1-2
- Πολύ χαμηλής αντοχής: Η δοκιμή δεν θεωρείται κατάλληλη



Εικόνα 3: Τύποι δοκιμής σημειακής φόρτισης σε κυλινδρικά-πρισματικά-ακανονιστής μορφής με σημειωμένες τις απαιτούμενες διαστάσεις δοκιμίων σύμφωνα με την προδιαγραφή ISRM (1985): (α) διαμετρική δοκιμή, (β) αξονική δοκιμή, (γ) δοκιμή πρισματικού δοκιμίου, (δ) δοκιμή ακανόνιστης μορφής δοκιμίου.

Πίνακας 11: Χαρακτηριστικές τιμές του δείκτη σημειακής φόρτισης για διάφορα υλικά κατά Goodman (1989)

ΠΕΤΡΩΜΑ	$I_{s(50)}$
Ψαμμίτες-Ιλυόλιθοι Τεταρτογενούς	0.05-1
Asβεστόλιθοι	0.25-8
Ιλυόλιθοι	0.2-8
Ηφαιστειακά πετρώματα	3-15
Δολομίτης	6-11

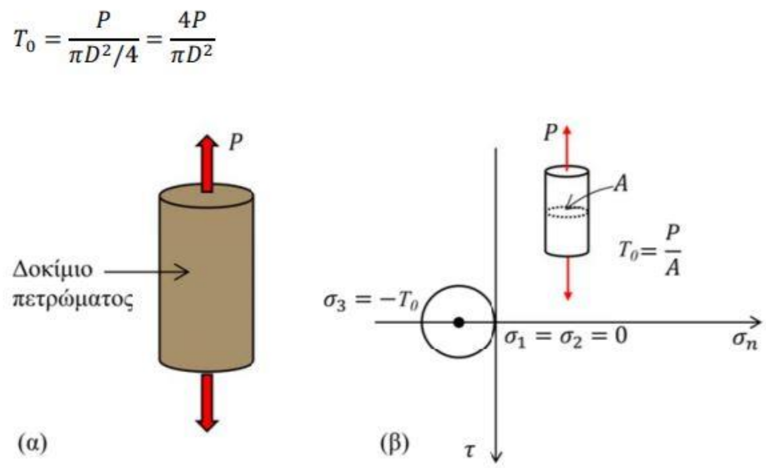
«Δοκιμή άμεσου εφελκυσμού To»

Στη δοκιμή άμεσου εφελκυσμού (direct tensile test) ένας ορθός κύλινδρος πετρώματος φορτίζεται εφελκυστικά παράλληλα προς τον άξονά του. Με τη δοκιμή επιδιώκεται η επιβολή μονοαξονικής εντατικής κατάστασης στο δοκίμιο, δηλαδή σ_1=σ_2=0, σ_3=-σ. Το φορτίο ασκείται συνεχώς στο δοκίμιο και αυξάνεται βαθμιαία με σταθερό ρυθμό μέχρι την αστοχία του δοκιμίου. Η αξονική τάση στο δοκίμιο θεωρείται ομοιόμορφη και υπολογίζεται από τον λόγο του ασκούμενου φορτίου προς το εμβαδόν της εγκάρσιας διατομής του κυλινδρικού δοκιμίου. Η αξονική τάση στην οποία το πέτρωμα αστοχεί είναι γνωστή ως μονοαξονική εφελκυστική αντοχή T_0 και είναι ίση με:

$$T_0 = \frac{P}{\pi \cdot D^2/_4} = \frac{4 \cdot P}{\pi \cdot D^2}$$

Όπου P το φορτίο συμπίεσης, D η διάμετρος του κυλίνδρου και π~3,14

Η πραγματοποίηση αυτής της δοκιμής παρουσιάζει δυσκολίες στην συγκράτηση του δοκιμίου από τους υποδοχείς της μηχανής, προκειμένου να μην καταστρέφεται η επιφάνεια του δοκιμίου και αφετέρου η δύναμη που εφαρμόζεται να είναι παράλληλη προς τον άξονα του δοκιμίου για να ασκείται καθαρός εφελκυσμός (Τσουτρέλης, 1985). Η κατάσταση αυτή αντιμετωπίζεται σε έναν βαθμό με την συγκόλληση των βάσεων σε μεταλλικούς υποδοχείς με την χρήση ρητίνης υψηλής αντοχής σε εφελκυσμό.



Εικόνα 4: (α) Μονοαξονικός εφελκυσμός δοκιμίου άρρηκτου πετρώματος, (β) κύκλος Mohr της θεωρητικης εντατικής κατάστασης του δοκιμίου από Νομικό (2015)

«Δοκιμή Αντιδιαμετρικής Θλίψης σ_t (Βραζιλιανή δοκιμή)

Η δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης βασίζεται στην ικανότητα των πετρωμάτων, που βρίσκονται σε εντατικά πεδία δύο διαστάσεων, να αστοχούν σε εφελκυσμό, όταν δεχθούν δύο κύριες τάσεις εκ των οποίων η μία είναι θλιπτική και η δεύτερη εφελκυστικη και μεγαλύτερη κατά 1/3 της θλιπτικής. Κατά την δοκιμή αυτή, κυλινδρικό δοκίμιο υποβάλλεται σε διαμετρική θλίψη (κατά τη γενέτειρα του κυλίνδρου) μέχρι την θραύση του και η τάση εφελκυσμού που οδήγησε σε αυτή την θραύση θεωρείται ότι αντιστοιχεί στην αντοχή του δοκιμίου σε μοναξονικό εφελκυσμό.

Η εφελκυστική αυτή τάση δίνεται από τη σχέση :

$$\sigma_t = -\frac{P}{\pi \cdot R \cdot t} \cdot \{\frac{sin2\theta}{\theta} - 1\}$$

όπου: P = επιβαλλόμενη δύναμη τη στιγμή της αστοχίας.

R = ακτίνα του μορφής δίσκου δοκιμίου.

t = πάχος του μορφής δίσκου δοκιμίου.

2θ = τόξο γωνίας στο οποίο δρα ομοιόμορφα η δύναμη P επί του δοκιμίου.

Σε περίπτωση που οι γωνίες 2θ είναι μικρές η παραπάνω σχέση μετατρέπεται σε :

$$\sigma_t = -\frac{2P}{\pi \cdot D \cdot t}$$

Πίνακας 12: Εύρος τιμών των παραμέτρων αντοχής για πετρώματα του Ελληνικού χώρου σύμφωνα με Κούκης και Σαμπατακάκης (2002)

ΠΕΤΡΩΜΑ	ΣΦΥΡΑ SCHMIDT (SHV)	ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΣΗΜΕΙΑΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ (Is) MPa	ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΜΟΝΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ (σc) MPa	ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ (σ_t) MPa
Ασβεστόλιθος	20-55	2-75	20-200	2-15
Μικροκρυσταλλικός συμπαγής ασβεστόλιθος	35-55	4-7.5	80-200	7-15
Δολομιτιωμένος ασβεστόλιθος	15-45	1-6	10-100	1-10
Μαργαϊκός ασβεστόλιθος	10-35	<1-6	5-60	<1-6
Μαργόλιθος-Ιλυολιθος	<10-30	<1-3	<1-40	<1-3
Ψαμμίτης	10-50	<1-5	<1-80	<1-8
Μάρμαρο	30-60	3-9	50-250	5-20
Σχιστόλιθος	10-45	<1-7	2-80	<1-6

2.3.2 ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΜΟΤΗΤΑ ΒΡΑΧΩΔΟΥΣ ΥΛΙΚΟΥ-ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ YOUNG-ΛΟΓΟΣ POISSON

Ως παραμορφωσιμότητα ορίζεται η συμπεριφορά των πετρωμάτων όταν σε αυτά ασκείται κάποια εξωτερική τάση, η ικανότητά τους δηλαδή να παραμορφώνονται κάτω από φόρτιση ή αποφόρτιση. Διαχωρίζεται σε τρείς μορφές, την ελαστική, την πλαστική και ερπυστική ή ιξώδη παραμορφωσιμότητα. Στην ελαστική το υλικό επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση μετά την απομάκρυνση της εφαρμοζόμενης τάσης και η ορθή τάση είναι ανάλογη της πλευρικής παραμόρφωσης (Νόμος Hooke). Στην πλαστική το υλικό δεν επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση και συνεχίζεται χωρίς να σημειωθεί αστοχία, ενώ ο ερπυσμός αφορά την παραμόρφωση που επηρεάζεται από τον παράγοντα του χρόνου. Δηλαδή για ένα μακρύ χρονικό διάστημα στο οποίο ο ρυθμός παραμόρφωσης είναι ανάλογος της εφαρμοζόμενης βαθμίδας τάσης το υλικό συμπεριφέρεται πλαστικά.

Τα πετρώματα δεν είναι εντελώς ελαστικά σώματα, αφού δεν είναι απόλυτα ομοιογενή, ισότροπα ή συνεχή. Για τον λόγο αυτό προκειμένου να περιγραφεί η ελαστική τους συμπεριφορά προσδιορίζονται οι ελαστικές σταθερές τους, δηλαδή το μέτρο ελαστικότητας E και ο λόγος Poisson v.

Ως μέτρο ελαστικότητας E ορίζεται ο λόγος της αξονικής τάσης προς την αξονική παραμόρφωση. Πρόκειται για το μέτρο δυσκαμψίας του πετρώματος και έχει ως μονάδα μέτρησης MPa ή GPa.. Εκφράζεται από τον τύπο:

Μέτρο ελαστικότητας ή μέτρο του Young : $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$

Όπου:

σ: η συμπιεστική τάση

ε: η ανηγμένη παραμόρφωση

Μερικά πυριγενή και μεταμορφωμένα πετρώματα μεγάλης αντοχής συμπεριφέρονται ως ψαθυρά ελαστικά μέσα όταν υποβληθούν σε αξονική θλίψη ή εφελκυσμό. Παρουσιάζουν οριακά μια γραμμικής μορφής σχέση της εφαρμοσμένης τάσης και της παραμόρφωση: Τα πετρώματα αυτά καλούνται σχεδόν ελαστικά πετρώματα.

Τα μικρότερης αντοχής πετρώματα παρουσιάζουν συνήθως μη γραμμική σχέση τάσης-παραμόρφωσης, λόγω του κλείσιμου των ρωγμών από την φόρτιση και λόγω της πλαστικης στο όριο θραύσης συμπεριφοράς.Τα πετρώματα αυτά καλούνται ημι-ελαστικά.

Ως μη ελαστικά πετρώματα καλούνται αυτά με μεγάλο πορώδες ή πολύ χαμηλές αντοχές και παρουσιάζουν μια πλαστική συμπεριφορά

Ο λόγος Poisson v από την άλλη ορίζεται ως ο λόγος πλευρικής προς αξονικής παραμόρφωσης του υλικού. Πρόκειται για καθαρό αριθμό που παίρνει τιμές από 0-0.5. Αρνητικό πρόσημο υποδηλώνει ότι το υλικό διαστέλλεται πλευρικά και συγχρόνως συστέλλεται αξονικά.

2.3.3 ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ ΑΚΕΡΑΙΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ

Όταν αναφερόμαστε στην διαπερατότητα του ακέραιου πετρώματος, αναφερόμαστε ουσιαστικά στην πρωτογενή διαπερατότητα. Πρόκειται για την πιθανή επικοινωνία των πόρων και των μικρορωγμων μεταξύ τους. Αποτελεί έναν πολύ σημαντικό παράγοντα για τα τεχνικά έργα, καθώς επηρεάζει την στεγανότητά τους, τα επίπεδα των τάσεων τους, αλλά και την ποιότητα των σχηματισμών. Ο συντελεστής διαπερατότητας έχεο διαστάσεις ταχύτητας (cm/sec) και εκφράζεται από τον νόμο του Darcy:

$$K=\frac{dh}{dx}x\,A$$

Με dh/dx την υδραυλική κλίση κατά την διεύθυνση x.

Για τον προσδιορισμό του συντελεστή υδροπερατότητας σε βραχώδη υλικά εφαρμόζονται δοκιμές εισπίεσης νερού. Με την εφαρμογή ελαστικών παρεμβυσμάτων (packer) παρέχονται οι κατάλληλες πληροφορίες για την κυκλοφορία του νερού κυρίως μέσω του δευτερογενούς πορώδους της βραχόμαζας.

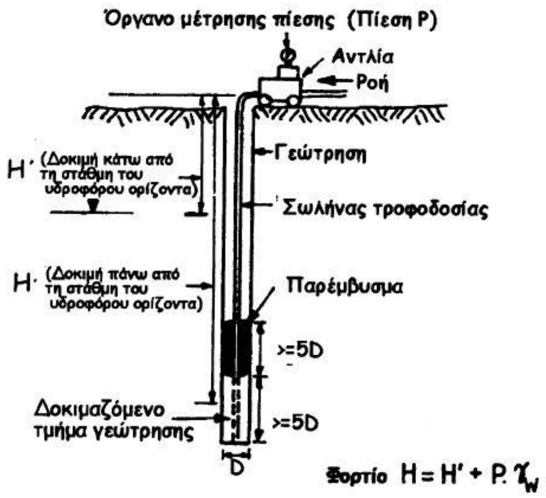
Δοκιμή Lugeon

Κατά την δοκιμή αυτή εισέρχεται ένα δοκιμαζόμενο τμήμα μέχρι το βάθος 3-5m από τον πυθμένα της γεώτρησης, πάνω στο οποίο τοποθετείται ένα παρέμβυσμα που απομονώνει το δοκιμαζόμενο τμήμα και διογκώνεται κατάλληλα έτσι ώστε να εφάπτεται ερμητικά με τα τοιχώματα της γεώτρησης και να μην παρατηρούνται διαφυγές. Στην συνέχεια εισπιέζεται νερό μέσω αντλίας και μετράται η ποσότητα απορρόφησής του σε κατάλληλη βαθμίδα πίεσης με την χρήση μανομέτρου, υδρομετρητή και βαλβίδας ανακούφισης. Η δοκιμή εκτελείται με την εφαρμογή πιέσεως κατά βαθμίδες. Σε αυτήν την πίεση προστίθεται και η πίεση που δημιουργεί η στήλη της δοκιμή Για κάθε σταθερή πίεση, η ποσότητα που απορροφάται μετριέται σε μια διάρκεια 5 ή καλύτερα 10min. Η δοκιμή γίνεται με την εφαρμογή κατάλληλα επιλεγμένων πιέσεων για το συγκεκριμένο τεχνικό έργο, σε αύξουσα σειρά μέχρι μια μέγιστη τιμή πίεσης και συνεχίζεται κατά φθίνουσα σειρά με πιέσεις αντίστοιχες της αύξουσας σειράς. Στην πίεση που εφαρμόζεται προστίθεται και η πίεση που δημιουργεί η στήλη δοκιμής.

Δίνεται η δυνατότητα εκτέλεσης της δοκιμής με την βοήθεια δίπλών παρεμβυσμάτων (Packers), που διογκώνονται με την βοήθεια παροχέτευσης πεπιεσμένου αέρα.

Η μέτρηση της υδροπερατότητας βραχομάζας γίνεται σε μονάδα Lugeon η οποία αντιστοιχεί στην υδροπερατότητα που έχει μια βραχώδης μάζα κάτω από πίεση 10 Atm (φορτίο 100m πάνω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα), όταν ένα (1) m γεώτρησης διαμέτρου NX (76 mm) σε αυτή τη βραχομάζα επιτρέπει απώλειες ενός (1) λίτρου νερού ανά λεπτό.

Οι δοκιμές Lugeon μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τον καθορισμό της κατάστασης του κερματισμού μιας βραχομάζας αλλά και για την μελέτη της συμπεριφοράς αυτής σε καθεστώς υψηλής υδροστατικής πίεσης . Δηλαδή μπορούν να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να διαπιστωθεί αν οι υψηλές πιέσεις που πρόκειται να εφαρμοστούν στην βραχομάζα κατά τη λειτουργία ενός τεχνικού έργου είναι δυνατόν να προκαλέσουν ελαστικές ή πλαστικές παραμορφώσεις και θραύσεις.



Σχήμα 1: Τυπική διάταξη δοκιμής Lugeon απλού παρεμβύσματος με τη στάθμη του υπεδαφικού νερού είτε πάνω από το εισπιεζόμενο τμήμα της γεώτρησης είτε κάτω από αυτό

2.3.4 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΚΑΙ ΣΤΑΘΜΗΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ ΟΡΙΖΟΝΤΑ

Η γνώση της στάθμης του υδροφορέα και της πιεζομετρίας στην περιοχή της κατασκευής μιας σήραγγας είναι απαραίτητες για την αντιμετώπιση προβλημάτων κατά την κατασκευή της σήραγγας και κυρίως για την επιλογή του κατάλληλου μηχανήματος διάνοιξης.

Απαραίτητη προϋπόθεση για την γνώση της κατανομής και η κίνησης των υπόγειων νερών είναι η γνώση των υδραυλικών δεδομένων από το πεδίο και τα πιο βασικά είναι οι στάθμες της ελεύθερης επιφάνειας και τα πιεζομετρικά φορτία που μετρούνται στα πιεζόμετρα και στα πηγάδια παρατήρησης.

Στο εσωτερικό των γεωτρήσεων τοποθετούνται όργανα μέτρησης της στάθμης, τα σταθμίμετρα, τα οποία πραγματοποιούν την μέτρηση με βύθιση του ηλεκτροδίου εντός της γεώτρησης. Όταν το ηλεκτρόδιο έρθει σε επαφή με το νερό εκπέμπεται ηχητικό σήμα με ταυτόχρονη ένδειξη της λυχνίας. Η ένδειξη της μετροταινίας παρέχει το βάθος της στάθμης νερού. Η στάθμη μπορεί εναλλακτικά ή συμπληρωματικά να βρεθεί και οπτικά από την ένδειξη της υγρασίας στη βαθμονομημένη ταινία όταν αυτή εξαχθεί στην επιφάνεια.

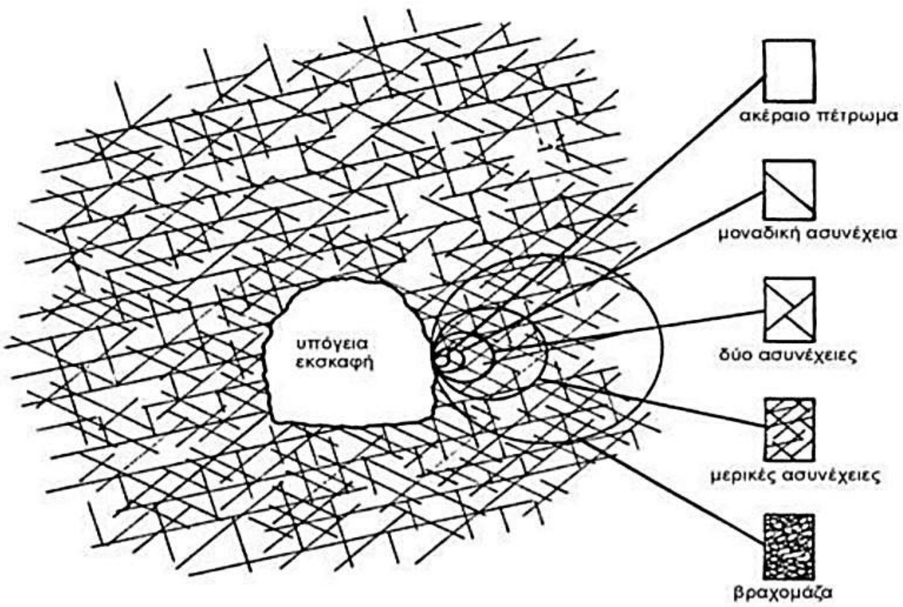
Ένα πιεζόμετρο αποτελείται από μια σωλήνωση που είναι διάτρητη μόνο στο κάτω άκρο της και που τοποθετείται διανοίγοντας κατακόρυφα τον υπό μελέτη υδροφορέα. Με το πιεζόμετρο μετριέται η πίεση, δηλαδή το πιεζομετρικό φορτίο σε ένα συγκεκριμένο σημείο ενός περιορισμένου υδροφορέα, εκεί όπου βρίσκεται το διάτρητο άκρο του.

Ένα πηγάδι παρατήρησης αποτελείται από ένα διάτρητο σε όλο το μήκος του σωλήνα που, αντίθετα με το πιεζόμετρο, δε στεγανοποιείται ως προς τον υδροφορέα που τον περιβάλλει. Έτσι, θεωρητικά τουλάχιστον, το πηγάδι αυτό δεν προκαλεί κανένα εμπόδιο στην υπόγεια ροή. Είναι φυσικό ότι μια τέτοια σωλήνωση δε θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση του πιεζομετρικού φορτίου σε περιορισμένους υδροφορείς, αφού τελικά θα έδινε μια τιμή που δε θα ήταν ούτε πιεζομετρικό φορτίο ούτε στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας αλλά συνδυασμός τους. Στην περίπτωση του περιορισμένου υδροφορέα, το φορτίο που μετριέται είναι μια μέση τιμή κατά το ύψος του φιλτραρισμένου τμήματος του υδροφορέα. Οι τιμές λοιπόν που παίρνονται από πιεζόμετρα και πηγάδια εκμετάλλευσης γενικά διαφέρουν και ισούνται μόνον όταν δεν υπάρχει ροή στον υπόψη υδροφορέα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΟΙΟΤΙΚΑ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΚΑΙ Η ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΗΣ

Κατά την κατασκευή ενός τεχνικού έργου, τις περισσότερες φορές το πέτρωμα στο οποίο θα κατασκευαστεί δεν είναι άρρηκτο, αλλά αποτελεί ένα σύνολο τεμαχών άρρηκτου βράχου που διαχωρίζονται από ασυνέχειες. Πρόκειται λοιπόν για μία βραχόμαζα, οι ιδιότητες της οποίας προδιορίζονται από τις ιδιότητες του άρρηκτου βράχου και των ασυνεχειών της. Στην πραγματικότητα η βραχομάζα αποτελεί τη φυσική κατάσταση ενός πετρώματος, δηλαδή όπως αυτό συναντάται στην ύπαιθρο και σε μεγάλη έκταση.

Οι ασυνέχειες επιδρούν σε μεγάλο βαθμό στην συμπεριφορά της βραχόμαζας, τις περισσότερες φορές σε μεγαλύτερο από αυτόν των ιδιοτήτων του ακέραιου πετρώματος. Η έντονη ρωγμάτωση της βραχόμαζας μπορεί να προσεγγίσει την συμπεριφορά εδαφικού υλικού, ενώ αντίθετα τα λίγα συστήματα ασυνεχειών μπορεί να την προσομοιάζουν περισσότερο με το ακέραιο πέτρωμα. Επομένως ανάλογα με το πλήθος των ασυνεχειών, δηλαδή τον κερματισμό του πετρώματος το ακέραιο πέτρωμα αποκτά σταδιακά την δομή της βραχομάζας. Κρίνεται λοιπόν απαραίτητο να οριστεί η μηχανική περιγραφή της ποιότητας των ασυνεχειών του, το πλήθος τους η αντοχή του άρρηκτου τμήματός και γενικά η δομή της βραχόμαζας. Στην συνέχεια αναλλοίωνται οι παράμετροι των ασυνεχειών και της αποσάθρωσης της βραχόμαζας, αφού η αντοχή του άρρηκτου βράχου αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο.



Σχήμα 2: Η σταδιακή μετατροπή του ακέραιου πετρώματος σε έντονα διακλασμένη βραχόμαζα σύμφωνα με Hoek and Brown (1988)

3.1.ΑΣΥΝΕΧΕΙΕΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

Διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες, τις μικρο-ασυνέχειες (σχιστότητα, φύλλωση) και τις μακρο-ασυνέχειες. Ως μικρο- ασυνέχειες ορίζονται αυτές που αποτελούν μέρος της δομής του βραχώδους υλικού, δηλαδή προέκυψαν κατά τον σχηματισμό του πετρώματος και έχουν χαρακτηριστική συνοχή. Ως μακρο-ασυνέχειες ορίζονται οι ανοιχτές ασυνέχειες, όπως διαρρήξεις, στρώσεις, ρωγματώσεις, ρήγματα ή και επίπεδα διάτμησης. Στην περίπτωση που το πέτρωμα παρουσιάζει μικρο-ασυνέχειες, που περιέχονται στην ακέραια δομή του, τότε η ανισοτροπία αντοχής του ακέραιου πετρώματος μπορεί να προσδιοριστεί άμεσα και εργαστηριακά. Αντιθέτως, εάν το πέτρωμα παρουσιάζει μακρο-ασυνέχειες, τότε πρέπει να ληφθούν υπόψη τα χαρακτηριστικά και η μηχανική συμπεριφορά των ασυνεχειών του, προκειμένου να προσδιοριστεί και η μηχανική συμπεριφορά της βραχομάζας.

Οι ασυνέχειες της βραχόμαζας ομαδοποιούνται σε συστήματα-οικογένειες, οι οποίες έχουν περίπου κοινό προσανατολισμό Έτσι, η γεωμηχανική συμπεριφορά της βραχομάζας κατά την θεμελίωση ενός τεχνικού έργου επ' αυτής ή στην κατασκευή υπόγειου έργου εντός αυτής καθορίζεται κυρίως από το καθεστώς διάρρηξης που τη χαρακτηρίζει.

Προσανατολισμός

Καθορίζεται από την διεύθυνση της ασυνέχειας, τη μέγιστη κλίση της και την διεύθυνση της μέγιστης κλίσης.

Εμμονή στο χώρο

Είναι απαραίτητο να καθοριστεί το μήκος που μια ασυνέχεια διατέμνει την βραχόμαζα. Οι επιφάνειες στρώσης και σχιστότητας συνήθως είναι αυτές που έχουν τα μεγαλύτερα μήκη. Η διαρρήξεις που παρουσιάζουν μεγάλη συνέχεια στον χώρο είναι και αυτές που καθορίζουν τις περισσότερες φορές την συμπεριφορά της βραχόμαζας

Πίνακας 13: Ταξινόμηση ασυνεχειών βάση της εμμονής τους (I.S.R.M., 1981)

ΕΜΜΟΝΗ	ΜΗΚΟΣ
Πολύ μικρή	<1m
Μικρή	1-3m
Μέτρια	3-10m
Μεγάλη	10-20m
Πολύ μεγάλη	>20m

Απόσταση ασυνεχειών

Πρόκειται για τις διαστάσεις των τεμαχών που αποτελούν την βραχόμαζα. Αυτές εκτιμούνται με τον δείκτη μεγέθους I_d και το άθροισμα του αριθμού ασυνεχειών ανά m^3 (J_v). Η απόσταση των ασυνεχειών σύμφωνα με την I.S.R.M. (1981) διακρίνεται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 14: Κατηγοριοποίηση ασυνεχειών βάση της απόστασής τους (I.S.R.M., 1981)

ΑΠΟΣΤΑΣΗ	ΜΗΚΟΣ (cm)
Πάρα πολύ μικρή	2
Πολύ μικρή	2-6
Μικρή	6-20
Μέση	20-60
Μεγάλη	60-200
Πολύ μεγάλη	200-600
Πάρα πολύ μεγάλη	> 600

Άνοιγμα

Πρόκειται για την κάθετη απόσταση μεταξύ των τοιχωμάτων της. Μπορεί να προκύψει φυσικά ή τεχνητά από την παρέμβαση του ανθρώπου.

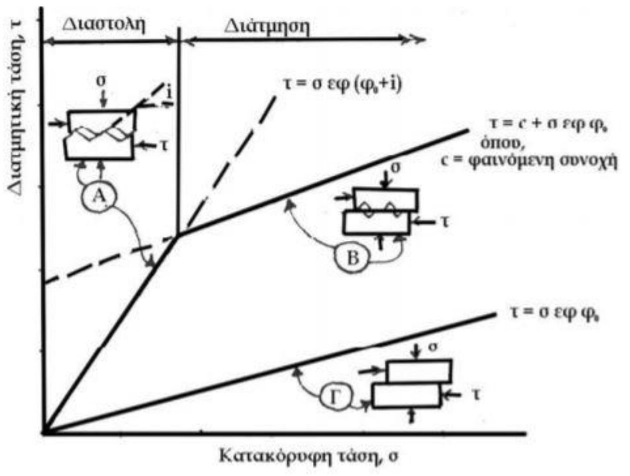
Πίνακας 15: Ταξινόμηση ασυνεχειών βάση του ανοίγματός τους (I.S.R.M., 1981)

ΑΝΟΙΓΜΑ	ΜΗΚΟΣ
Πολύ κλειστές	<0.1mm
Κλειστές	0.1-0.25mm
Μερικά ανοικτές	0.25-0.5mm
Ανοικτές	0.5-2.5mm
Μέτρια ευρείες	2.5-10mm
Ευρείες	>10mm
Πολύ ευρείες	1-10cm
Εξαιρετικά ευρείες	10-100cm
Σπηλαιώδεις	>100cm

Τραχύτητα

Πρόκειται για την μεγάλου μήκους κυμάτωση ή μικρού μήκους μικροτραχύτητα της επιφάνειας της ασυνέχειας (Σχήμα 3). Είναι ιδιαίτερα σημαντική για την αντοχή της βραχόμαζας σε διάτμηση, με την ασυνέχεια να έχει γωνία τριβής ίση με το άθροισμα της βασικής γωνίας τριβής του υλικού και την γωνία της κύριας ανωμαλίας της ασυνέχειας (φ_b+i). Διακρίνουμε τρεις περιπτώσεις τραχύτητας ασυνέχειας σε σχέση με την αντοχή της, οι οποίοι παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 16: Η σχέση διατμητικής και ορθής τάσης στους τύπους αστοχίας ανώμαλης ασυνέχειας (Α), επουλωμένης (Β) και λείας (Γ).

<table>
<tr><th>ΑΣΥΝΕΧΕΙΑ</th><th>ΕΞΙΣΩΣΗ MOHR-COULOMB</th><td rowspan="4">

Κούκης και Σαμπατακάκης (2002)</td></tr>
<tr><td>Λεία ασυνέχεια</td><td>$\tau = \sigma_n * εφφ_b$ Καμπύλη Γ</td></tr>
<tr><td>Τραχύτητα και μη συγκολλημένη ασυνέχεια</td><td>$\tau = σn*εφ(φ_b+i)$ Καμπύλη Α</td></tr>
<tr><td>Επουλωμένη ασυνέχεια</td><td>$\tau = c+σn*εφφ_b$ Καμπύλη Β</td></tr>
</table>

Σύμφωνα με το κριτήριο Barton (1973, 1976) η σχέση διατμητικής και ορθής τάσης δίνεται από τον τύπο:

$\tau = \sigma_n * εφ(\varphi_b + J.R.C\ log_{10}(\ J.C.S\ /\sigma_n))$ *(1)*

Όπου:

φ_b: η βασική γωνία τριβής

J.R.C: Συντελεστής τραχύτητας (Joint Roughness Coefficient)

υπολογίζεται από τυπικά προφίλ τραχύτητας

J.C.S. = Αντοχή των τοιχωμάτων της ασυνέχειας (Joint wall Compression Compression Strength)

Το 1977 ωστόσο οι Barton and Choubey, πρότειναν την χρήση της υπολειμματικής γωνίας φ_r στην θέση της γωνίας φ_b, με την φ_r να υπολογίζεται από τον τύπο:

$\varphi_r = (\ \varphi_b - 20\ ) + 20\ (\ r\ /\ R\ )$ (Barton and Choubey, 1977)

όπου r είναι ο αριθμός αναπήδησης στης σφύρας Schmidt σε υγρές και αποσαθρωμένες επιφάνειες ασυνεχειών, ενώ R είναι ο αριθμός αναπήδησης σε στεγνές και μη αποσαθρωμένες επιφάνειες.

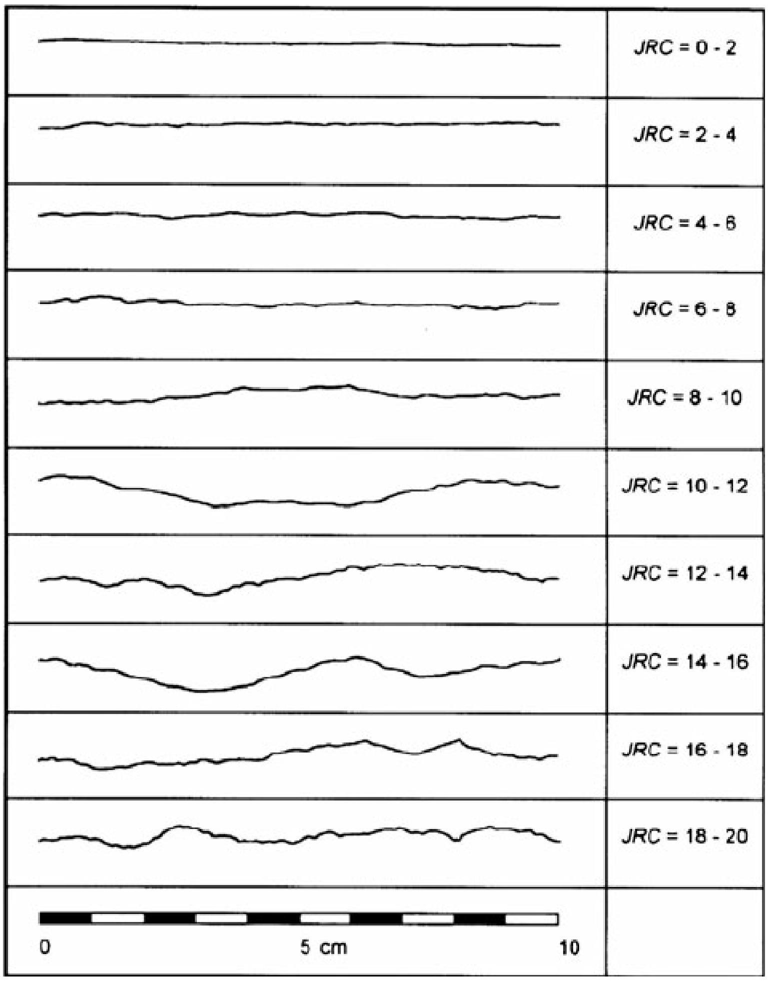
Έτσι η αρχική εξίσωση μετατρέπεται πλέον σε:

$\tau = \sigma_n * εφ(\varphi_r + J.R.C\ log_{10}(\ J.C.S\ /\sigma_n))$ *(2)*

Οι εξισώσεις (1) και (2) αποτελούν μέρος του κριτηρίου της αντοχής ασυνεχειών Barton and Bandis (1990).

Υλικό πλήρωσης

Το υλικό πλήρωσης είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τον καθορισμό της αντοχής της ασυνέχειας. Συγκεκριμένα η σύσταση και το πάχος της επηρεάζουν την διατμητική αντοχή της.



Σχήμα 3: Τυπικά προφίλ ασυνεχειών βάση του JRC (Barton and Choubey, 1977)

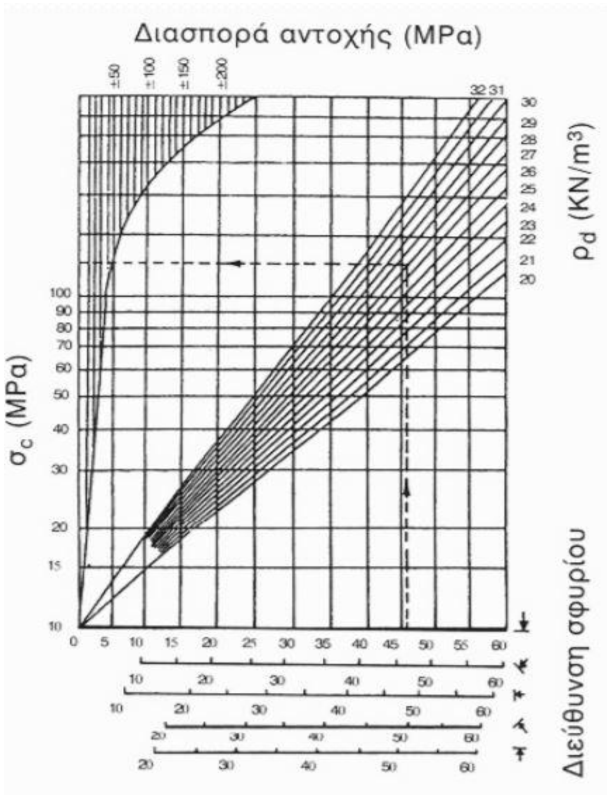
Αντοχή

Η αντοχή των τοιχωμάτων της ασυνέχειας εξαρτάται από τον βαθμό αποσάθρωσής της. Μετράται με την σφύρα Schmidt τύπου L, από την οποία εκτιμάται ο μέσος όρος της αντοχής μετά από πολλές μετρήσεις(Πίνακας 17).

Παρουσία νερού

Το νερό μπορεί να προκαλέσει την αποσάθρωση και διάβρωση του υλικού των ασυνεχειών και επομένως να μειώσει την αντοχή τους. Διακρίνονται ανάλογα με την ποσότητα νερού που ρέει στο εσωτερικό τους σε στεγνές, υγρές, πολύ υγρές, με στάγδην ροή και με συνεχή ροή.

Πίνακας 17: Κατανομή της αντοχής των υλικών βάση της σφύρας Schmidt (Deere and Miller, 1965)

ΥΛΙΚΟ	ΑΝΤΟΧΗ	ΝΟΜΟΓΡΑΜΜΑ
Πολύ μαλακό	<10 MPa	
Μαλακό	10-20MPa	
Μέτριο	20-50 MPa	
Σκληρό	50-60 MPa	
Πολύ σκληρό	>60 MPa	

3.2 ΑΠΟΣΑΘΡΩΣΗ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

Κάθε βραχόμαζα, ανάλογα με την έκθεσή της στην επιφάνεια της γης ή την δράση του νερού δια μέσου των ασυνεχειών μπορεί να υποστεί αποσάθρωση. Διακρίνεται στην φυσική αποσάθρωση με την καταστροφή λόγω επίδρασης φυσικής ή μηχανικής ενέργειας και την χημική αποσάθρωση, λόγω της επίδρασης χημικής ενέργειας. Η αντοχή ενός πετρώματος υποβαθμίζεται σημαντικά, καθώς ο βαθμός αποσάθρωσης αυξάνει.

Πίνακας 18: Βαθμός αποσάθρωσης σύμφωνα με την I.S.R.M.

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ISRM	ΕΙΚΟΝΕΣ
Υγιές (F)	Χωρίς ίχνη αποσάθρωσης	I	
Ελάχιστα αποσαθρωμένο	Η αποσάθρωση περιορίζεται στις επιφάνειες των ασυνεχειών	II	

Ολίγον αποσαθρωμένο	Έντονη αποσάθρωση στις επιφάνειες των ασυνεχειών και ελαφρά αποσάθρωση στη μάζα του υλικού	III	
Μετρίως αποσαθρωμένο	Εκτεταμένη αποσάθρωση στη μάζα του υλικού χωρίς το υλικό να παρουσιάζει ευθρυπτότητα.	IV	
Έντονα αποσαθρωμένο	Εκτεταμένη αποσάθρωση στη μάζα του υλικού, με τοπική ευθρυπτότητα του υλικού	V	
Πλήρως αποσαθρωμένο	Πλήρης αποσάθρωση και μεγάλη ευθρυπτότξτα του υλικού, με διατήρηση της υφής και της δομής	VI	

Υπολλειμματικό έδαφος	Η υφή και δομή του υλικού έχει καταστραφεί και το υλικό μπορεί να χαρακτηρισθεί ως έδαφος (υπολειμματικός σχηματισμός)	-	

3.3 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΟΝ ΔΕΙΚΤΗ RQD

Ο δείκτης ποιότητας ή κατακερματισμού πετρώματος διατυπώθηκε για πρώτη φορά από τους Deere et al., (Design of Surface and Near Surface Constructions in Rock, 1967). Είναι το ποσοστό των αδιατάρακτων τεμαχών πετρώματος με μήκος μεγαλύτερο από 100mm στο συνολικό μήκος διάτρησης με πυρηνοληψία.Η σχέση που εκφράζει το RQD είναι:

$$RQD = \frac{Συνολικό\ μήκος\ τμημάτων\ πυρήνα\ > 100mm}{συνολικό\ μήκος\ πυρήνα} x\ 100$$

Ο δείκτης ανάγεται επί τοις εκατό, έτσι ώστε να περιέχει τα υγιή τμήματα του πυρήνα. Ένα από τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι πως επειδή δεν λαμβάνει υπόψη την φύση και τον προσανατολισμό των ασυνεχειών, μπορεί να προσμετρήσει σαν ασυνέχειες ακόμη και τις διακλάσεις που μπορεί να προκύψουν από δειγματοληψία σε ασθενέστερους κυρίως σχηματισμούς. Επιπλέον είναι πολύ ευαίσθητος σε μικρές μεταβολές του μήκους του πυρήνα της δειγματοληψίας. Από μόνος του δεν δίνει της απαραίτητες πληροφορίες για την συστηματική ταξινόμηση της βραχόμαζας. Χρησιμοποιείται λοιπόν ως μια παράμετρος σε πολλά συστήματα ταξινόμησης (RMR, Q).

Πίνακας 19: Κατανομή των ομάδων τιμών RQD (Deere -Miller, 1966)

Ποιότητα πετρώματος	RQD
Πολύ πτωχή	0-25
Πτωχή	25-50
Μέτρια	50-75

Καλή	75-90
Εξαιρετική	90-100

3.4 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΜΕ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΑΝΤΟΧΗΣ (GSI – Geological Strength Index)

Οι συνδυασμοί δομικών χαρακτηριστικών που μπορεί να εμφανίζει μια βραχόμαζα, αλλά και ο δύσκολος προσδιορισμός της διατμητικής της αντοχής και του μέτρου παραμορφωσιμότητάς της, οδήγησαν στην αναγκαιότητα ομαδοποίησης κάποιων συνδυασμών των δομικών της χαρακτηριστικών και στην δημιουργία κάποιων τυπικών δομών. Η αρχική προσπάθεια έγινε από τον Terzaghi (1946), ο οποίος χώρισε την βραχόμαζα σε εννέα κατηγορίες. Αυτές ήταν:

- Σκληρό και άρρηκτο πέτρωμα
- Σκληρό και στρωσιγενές ή σχιστώδες πέτρωμα
- Συμπαγής, μέτρια διακλασμένη βραχόμαζα
- Μέτρια τεμαχισμένη και στρωματώδης βραχόμαζα
- Πολύ τεμαχισμένη και στρωματώδης βραχόμαζα
- Πλήρως θρυμματισμένη βραχόμαζα
- Συνθλιβόμενη βραχόμαζα, μέτριο βάθος
- Συνθλιβόμενη βραχόμαζα, μεγάλο βάθος
- Διογκούμενη βραχόμαζα

Ο Hoek (Strength of jointed rock masses, 1983) θεωρώντας πως πρέπει να ληφθούν υπόψη για την ομαδοποίηση αυτή τα δομικά χαρακτηριστικά των ασυνεχειών και των άρρηκτων τεμαχών. Έτσι η συμπεριφορά κάθε βραχομάζας, η οποία θα δέχονταν καταπόνηση θα διέφερε ανάλογα με τα δομικά της χαρακτηριστικά. Προέκυψε λοιπόν η εξής κατηγοριοποίηση:

- Σκληρό, άρρηκτο πέτρωμα
- Άρρηκτο πέτρωμα με μια κεκλιμένη ασυνέχεια
- Συμπαγές πέτρωμα με λίγα σύνολα ασυνεχειών
- Ισχυρά διακλασμένη βραχομάζα
- Αποδομημένη λιθορριπή
- Χαλαρή απόθεση

Συγκεκριμένα για τις βραχόμαζες που έχουν υποστεί κερματισμό οι Hoek et al. (A modified Hoek-Brown failure criterion for jointed rock masses, 1992) κατέληξαν σε τέσσερις τυπικές δομές. Αυτές είναι:

- Τεμαχισμένη
- Πολύ τεμαχισμένη
- Τεμαχισμένη/στρωματώδης
- Θρυμματισμένη

Οι τέσσερις αυτές κατηγορίες σε συνδυασμό με το μέγεθος των τεμαχών της βραχομάζας, αλλά και της κατάστασης των επιφανειών των ασυνεχειών της οδήγησαν στον σχεδιασμό του συστήματος ταξινόμησης Γεωλογικού Δείκτη Αντοχής (Geological Strength Index, GSI) από τον Hoek (Strength of rock and rock masses, 1994) και μετέπειτα από τους Marinos & Hoek (GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation ,2000). Ο δείκτης αυτός εκφράζει την γεωτεχνική ταξινόμηση του πετρώματος, με την αριθμητική απομείωση των σταθερών του σε συνδυασμό με τον βαθμό ρωγμάτωσής του. Βασίζεται δηλαδή στην:

- εκτίμηση της δομής της βραχόμαζας που χαρακτηρίζει τον βαθμό αλληλεμπλοκής των βραχώδων τεμαχών

- της κατάστασης των επιφανειών των ασυνεχειών της βραχόμαζας που χαρακτηρίζει το μέγεθος της διατμητικής τους αντοχής.

Είναι σημαντικό στοιχείο για την επίλυση του κριτηρίου Hoek and Brown και χρησιμοποιείται ευρέως για τον προσδιορισμό των παραμέτρων σχεδιασμού τεχνικών έργων σε ρωγματωμένους βράχους.

Η εφαρμογή του συστήματος ταξινόμηση με τον δείκτη GSI παρουσιάζει ορισμένους περιορισμούς και διορθώσεις για τους οποίους μπορεί να χρειάζεται μια περαιτέρω ανάλυση του διαγράμματος προκειμένου να καταλήξει ο μελετητής στο εικονίδιο το οποίο προσομοιάζει περισσότερο την ρεαλιστική εικόνα που αυτός παρατηρεί. Οι περιορισμοί αυτοί είναι οι εξής:

α) <u>Ανισοτροπία</u>: Προυπόθεση του κριτηρίου είναι η ισότροπη συμπεριφορά της βραχόμαζας, χωρίς συγκεκριμένες διευθύνσεις αστοχίας. Μπορεί ωστόσο να εφαρμοσθεί σε ανισότροπα μέσα αν η θραύση ελέγχεται από την ανισοτροπία.

β) <u>Πεδίο παρατήρησης και προεκβολή πληροφορίας</u>: Ο δείκτης μπορεί να εξαχθεί σε επί τόπου παρατηρήσεις επιφανειακών εμφανίσεων, εκσκαφών, μετώπων σηράγγων και πυρήνων γεωτρήσεων. Στην περίπτωση των σηράγγων πρέπει να εκτιμηθεί η βραχόμαζα που θα φέρει τα φορτία, έστω σε μία ζώνη της μέχρι περίπου μια διάμετρο. Αν δεν υπάρχει δυνατότητα προσδιορισμού του GSI ευθέως στο βάθος, εκεί που θα διανοιγεί το έργο, και η εκτίμηση γίνεται από τις επιφανειακές εμφανίσεις λογικό είναι να γίνεται, με γεωλογική πάντα κρίση, μια μετακίνηση προς τα πάνω και ίσως ελαφρά προς τα αριστερά (ανάλογα με τη λογική μείωσης της αποσάθρωσης του πετρώματος με το βάθος).

γ) Άνοιγμα ασυνεχειών: Το άνοιγμα ασυνεχειών κλείνει συνήθως σε μεγαλύτερα βάθη και η δομή γίνεται πυκνότερη. Γι’ αυτό τον λόγο στο κριτήριο Hoek, Carranza-Torres and Corkum (2002), προστίθεται ο δείκτης διαταραχής D.

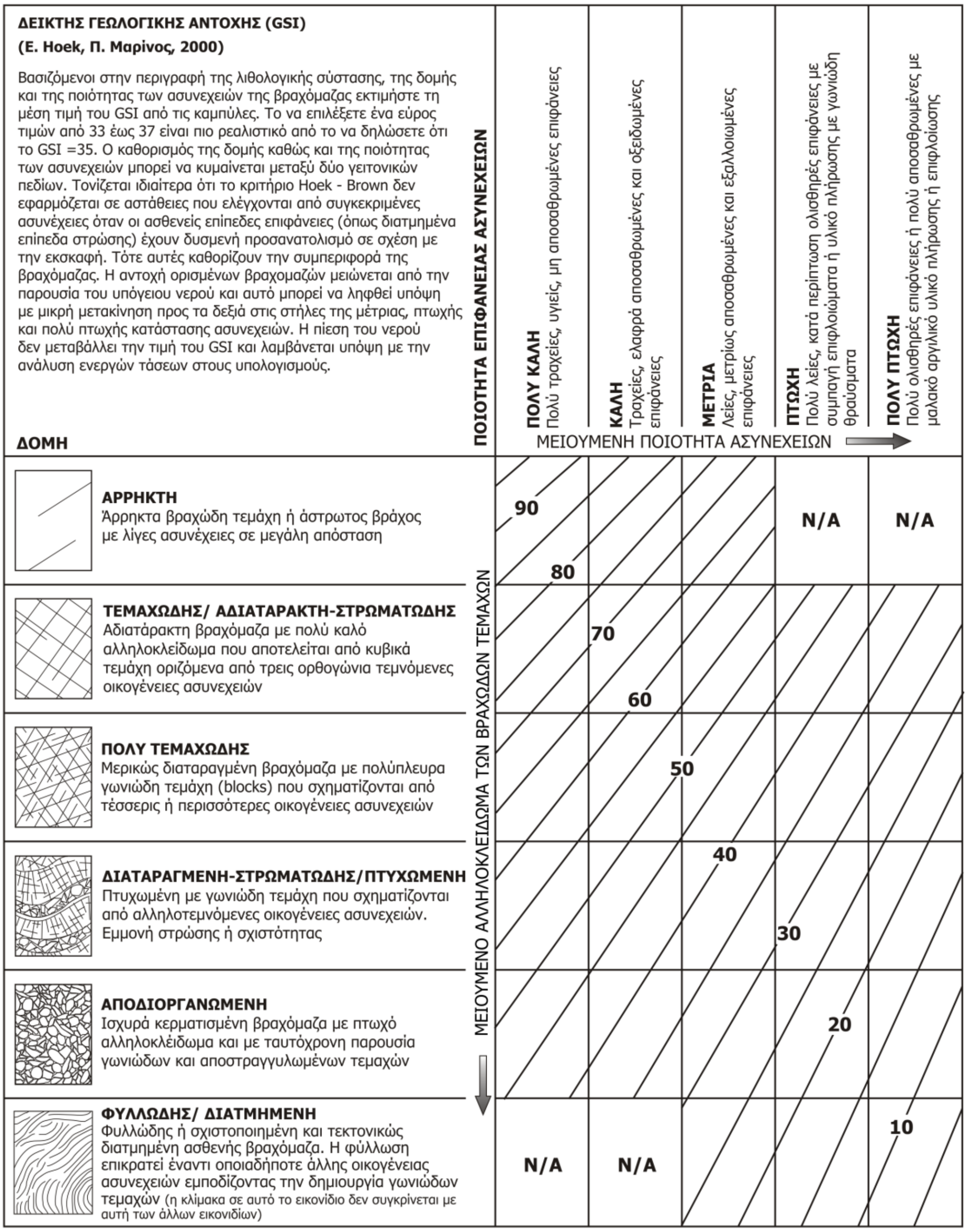
δ) Πολύ μεγάλα βάθη: Σε πολύ μεγάλα βάθη οι βραχόμαζες παρουσιάζονται σχεδόν άρρηκτες με πολύ πυκνή δομή, με αποτέλεσμα ο δείκτης GSI να μετακινείται προς τα αριστερά και προς τα πάνω.

ε) Νερό: Η παρουσία του νερού μειώνει την διατμητική αντοχή των ασυνεχειών σε πετρώματα που τα ίδια ή το υλικό πλήρωσής τους επηρεάζεται από το νερό. Συνίσταται η μετακίνηση προς τα δεξιά του διαγράμματος.

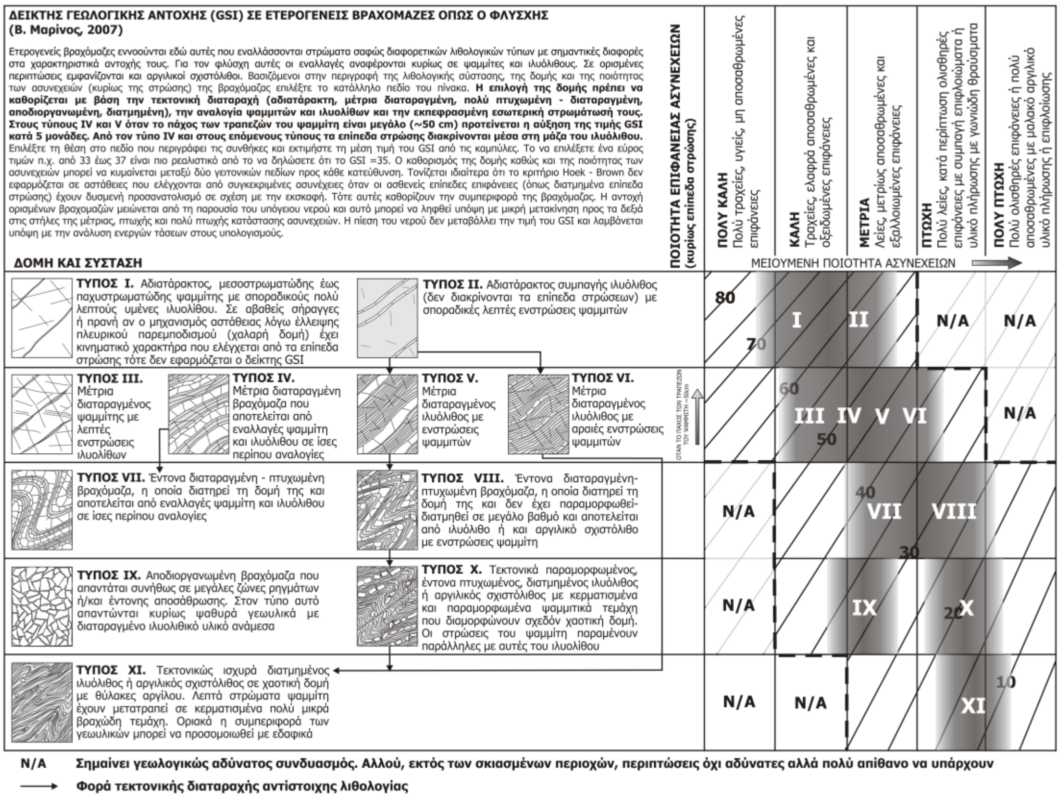
στ) Αποσαθρωμένη βραχόμαζα: Το διάγραμμα μετακινείται προς τα δεξιά , στις θέσεις των αποσαθρωμένων πετρωμάτων. Με αποσάθρωση στην θεμελιώδη μάζα, μειώνεται ανάλογα και το σci και το mi. Η υπερβολική αποσάθρωση, μπορεί να οδηγήσει σε «εδαφοποίηση» του πετρώματος, οπότε και παύει να αντιμετωπίζεται σαν βράχος, αλλά σαν έδαφος.

ζ) Άρρηκτοι βράχοι: Κυρίως πρόκειται για μεταλπικά πετρώματα που η ενδεχόμενη αστοχία τους ελέγχεται πλήρως από την κύρια μάζα και συνεπώς οι γεωτεχνικές παράμετροι πρέπει να βασίζονται σε εργαστηριακές δοκιμές.

Τα πετρογραφικά χαρακτηριστικά κάθε πετρώματος ελέγχουν τους συνδυασμούς των δύο παραμέτρων του GSI και δεν επιτρέπουν την ανάπτυξη δομών που να αντιστοιχούν σ’ όλες τις περιοχές του διαγράμματος. Έτσι για παράδειγμα στην περίπτωση του φλύσχη και για ετερογενείς γενικά βραχόμαζες έχει κατασκευαστεί συγκεκριμένο διάγραμμα από τους Marinos and Hoek, 2000 οι περιοχές του οποίου εξαρτώνται από τα ποσοστά ιλυολιθικού και ψαμμιτικού υλικού του φλύσχη.



Διάγραμμα 2: Εκτίμηση του Γεωλογικού δείκτη Αντοχής GSI με βάση τη γεωλογική περιγραφή και παρατήρηση (Hoek and Marinos, 2000).



Διάγραμμα 3: Νέο διάγραμμα εκτίμησης του Γεωλογικού δείκτη Αντοχής GSI για ετερογενείς βραχομάζες, όπως ο φλύσχης (Μαρίνος, 2007).

3.5 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΘΡΑΥΣΗΣ

Ως κριτήριο θραύσης ορίζεται κάθε πιθανός συνδυασμός τάσεων, οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν την αστοχία ενός υλικού. Καθοριστικό ρόλο στην συνάρτηση του κριτηρίου έχει το σύνολο των χαρακτηριστικών του κάθε πετρώματος. Η σχέση που το εκφράζει είναι:

$$\sigma_1 = f\,(\sigma_2\sigma_3)$$

Το κριτήριο θραύσης απεικονίζεται με μια γραφική μέθοδο δισδιάστατης απεικόνισης της εντατικής κατάστασης στο εσωτερικό ενός υλικού σώματος (πετρώματος ή εδάφους) που υποβάλλεται σε κύριες τάσεις σ1 και σ3, τον κύκλο του Mohr. Σύμφωνα με αυτή προβλέπεται η εντατική κατάσταση ενός σημείου, όταν σε αυτό ασκείται μια τάση. Πρόκειται για έναν κύκλο όπου στον άξονα τον y απεικονίζεται το σύνολο των διατμητικών τάσεων, ενώ στον x το σύνολο των ορθών τάσεων που ασκούνται στο επίπεδο θραύσης.

Κριτήριο Hoek-Brown

Το εμπειρικό κριτήριο θραύσης που πρότειναν οι Hoek-Brown (1980) εκφράζεται από την σχέση:

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci}(m\frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s)^{0.5}$$

Όπου:

σ_1΄: η μέγιστη ενεργή κύρια τάση κατά την αστοχία

σ_3΄: η ελάχιστη ενεργή κύρια τάση κατά την αστοχία

σ_{ci} : η αντοχή σε μοναξονική θλίψη του ακέραιου πετρώματος

m : σταθερά του πετρώματος που εξαρτάται από τις ιδιότητες του βραχώδους υλικού. Στην περίπτωση του άρρηκτού βράχου m=mi, ενώ στης βραχομάζας m=mb όπου mb<mi.

s: σταθερά του πετρώματος που εξαρτάται από τις ιδιότητες του βραχώδους υλικού με s=1 για ακέραιο πέτρωμα και 0≤s<1 για βραχόμαζα.

Οι Hoek and Brown (1980) λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω θεωρίες κατέληξαν σε μια καμπύλη που ταυτίζονταν τόσο με την αρχική θεωρία του Griffith στο πεδίο εφελκυστικών τάσεων, όσο και με τις εμπειρικές θεωρίες που αφορούσαν τα ψαθυρά πετρώματα στο πεδίο συμπιεστικών τάσεων.

Η σημαντικότερη συμβολή αυτού του κριτηρίου ήταν στις κατασκευές των υπόγειων έργων και συγκεκριμένα η σύνδεσή της με τα συστήματα ταξινόμησης RMR και GSI.

Στον εφελκυσμό του πετρώματος ισχύει ότι $\sigma_3=\sigma_t$ και $\sigma_1=0$, επομένως η σταθερά mi δίνεται από την σχέση :

$$m_i = \frac{\sigma_c}{|\sigma_t|}$$

Η mi συσχετίζεται με τις ιδιότητες τριβής του βραχώδους υλικού και είναι μια αδιάσταση σταθερά όπως και η σταθερά s. Οι Hoek and Brown (1980) αντί της παραπάνω σχέσης για την εύρεση της σταθεράς mi, πρότειναν τον στατιστικό της προσδιορισμό ως μια σταθερά που επηρεάζει την κλίση της περιβάλλουσας θραύσης. Βασίστηκαν στο γεγονός ότι η αντοχή του υλικού σε μοναξονικό εφελκυσμό είναι δύσκολο να θεωρηθεί ως μια βασική ιδιότητα της μηχανικής συμπεριφοράς του υλικού.

Προτάθηκε λοιπόν η εκτέλεση τριαξονικών δοκιμών από τους Hoek and Brown (1980) με σκοπό τον προσδιορισμό της σταθεράς mi. Χρησιμοποιήθηκαν συγκεκριμένα 5 δοκίμια στα οποία ασκήθηκαν πλευρικές τάσεις της τάξης $0<\sigma_3<0.5\sigma_{ci}$.

Οι Hoek and Marinos (2000) στην συνέχεια πρότειναν κάποιες ενδεικτικές τιμές mi, οι οποίες βασίζονται σε αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών που έγιναν σε άλλες περιπτώσεις και μπορούν να χρησιμοποιηθούν όταν η εκτέλεση τριαξονικών δοκιμών είναι αδύνατη.

Πίνακας 20: Τιμές της σταθεράς mi για άρρηκτο βράχο (Hoek and Marinos, 2000, 2001)

Τύπος	Ομάδα		Υφή			
			Αδρή	Μέση	Λεπτή	Πολύ λεπτή
ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΗ	Κλαστικά		Κροκαλοπαγή Λατυποπαγή	Ψαμμίτες 17±4	Ιλυόλιθοι 7±2 Γραουβάκες (18±3)	Αργιλόλιθοι 4±2 Αργιλικός σχίστης 6±2 Μάργες (7±2)
	Μη κλαστικά	Ανθρακικά	Κρυσταλλικοί Ασβεστόλιθοι (12±3)	Σπαριτικοί Ασβεστόλιθοι (10±2)	Μικριτικοί Ασβεστόλιθοι (9±2)	Δολομίτες (9±3)
		Εβαπορίτες		Γύψος 8±2	Ανυδρίτης 12±2	
		Οργανικά				Κρητίς 7±2
ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΜΕΝΑ	Μη σχιστοποιημένα		Μάρμαρο 9±3	Κερατίτες (19±4) Μεταψαμμίτες 19±3	Χαλαζίτες 20±3	
	Ελαφρά σχιστοποιημένα		Μιγματίτες 29±3	Αμφιβολίτες 26±6	Γνεύσιοι 28±5	
	Σχιστοποιημένα			Σχιχτόλιθοι 12±3	Φυλλίτες 7±3	Αργιλικοί σχιστόλιθοι 7±4
ΠΥΡΙΓΕΝΗ	Πλουτώνια	Ανοικτόχρωμα	Γρανίτης 32±3	Διορίτης 25±5		
			Γρανοδιορίτης (29±3)			
		Σκοτεινόχρωμα	Γάββρος 27±3	Δολερίτης (16±5)		
			Νορίτης 20±5			
	Υποαβυσσικά		Πορφύρης (20±5)		Διαβάσης (15±5)	Περιδοτίτης (25±5)
	Ηφαιστειακά	Λάβα		Ρυόλιθος (25±5) Ανδεσίτης 25±5	Δακίτης (25±3) Βασάλτης (25±5)	
		Πυροκλαστικά	Ηφ. Κροκαλοπαγή (19±3)	Ηφ. Λατυποπαγή (19±5)	Τόφφοι (13±5)	

Ακολούθησε η δημιουργία ενός τροποποιημένου κριτηρίου θραύσης του Hoek and Brown (1980) , το οποίο προέκυψε από τους Hoek, Wood and Shah (1992) και τις έντονα διακλασμένες βραχομάζες με μηδενική εφελκυστική αντοχή. Αυτό εκφράζεται με την σχέση:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci}(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}})^a$$

Όπου:

α: η σταθερά που αλλάζει την καμπυλότητα της περιβάλλουσας θραύσης όταν s=0 (έντονα διακλασμένη βραχόμαζα).

Λαμβάνοντας υπόψη το αρχικό κριτήριο του Hoek and Brown (1980) και το τροποποιημένο κατά τους Hoek, Wood and Shah (1992), προέκυψε το γενικευμένο κριτήριο από τους Hoek (1994), Hoek, Kaiser and Bawden (1995), το οποίο εκφράζεται με την σχέση:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci}(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s)^a$$

Όπου για το ακέραιο πέτρωμα ισχύει ότι m_b=m_i, s=1 και α=0.5.

3.4.4.1 Το σύστημα GSI και οι παράμετροι του κριτηρίου Hoek –Brown

Με την εκτίμηση του γεωλογικού δείκτη αντοχής GSI που αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.2.1 και με βάση την γενικευμένη μορφή του κριτηρίου Hoek-Brown προέκυψε ο υπολογισμός των σταθερών του κριτηρίου κατά Hoek, Carranza-Torres and Corkum (2002) από τις εξής σχέσεις:

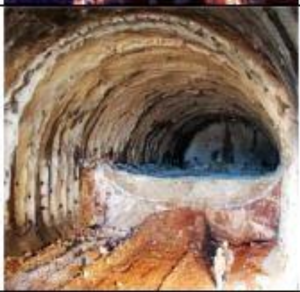
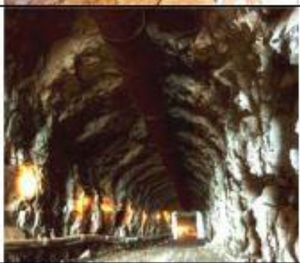
$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right)$$

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

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

Με D τον παράγοντα διατάραξης της βραχομάζας από την χρήση εκρηκτικών και την ανακατανομή των τάσεων. Ισχύει ότι 0≤D≤1 με την τιμή 1 να αντιστοιχεί σε κατακερματισμένες βραχομάζες.

Πίνακας 21: Παράγοντα διατάραξης D (Hoek, Carranza-Torres and Corkum, 2002).

Εμφάνιση της βραχομάζας	Περιγραφή της βραχομάζας	Προτεινόμενη τιμή του D
	Εξαιρετικής ποιότητας ελεγχόμενη διάνοιξη με εκρηκτικά ή εκσκαπτικά μηχανήματα συντελούν σε ελάχιστη διαταραχή της βραχομάζας που περιβάλλει τη σήραγγα.	D=0
	Η εκσκαφή με μηχανικά ή χειρωνακτικά μέσα (χωρίς χρήση εκρηκτικών) σε βραχομάζες φτωχής ποιότητας συντελεί σε ελάχιστη διαταραχή της περιβάλλουσας βραχομάζας. Στις περιπτώσεις που προβλήματα συμπίεσης συντελούν σε σημαντική ανύψωση του δαπέδου, μπορεί να υπάρχουν σοβαρές διαταραχές, εκτός αν χρησιμοποιηθεί προσωρινό invert, όπως φαίνεται στη φωτογραφία.	D=0 D=0.5 No invert
	Η πολύ φτωχής ποιότητας διάνοιξη με εκρηκτικά σε σήραγγα σκληρού πετρώματος συντελεί σε σοβαρή επί τόπου καταστροφή, που εκτείνεται από2 έως 3 μ., στην περιβάλλουσα βραχομάζα.	D=0.8
	Οι ανατινάξεις μικρής κλίμακας σε πρανή συντελούν σε μέτρια διαταραχή της βραχομάζας, ιδιαίτερα αν η ελεγχόμενη διάνοιξη με εκρηκτικά γίνεται όπως φαίνεται στο αριστερό μέρος της φωτογραφίας. Πάντως η εκτόνωση των τάσεων συντελεί σε κάποια διατάραξη της βραχομάζας.	D=0.7 Good blasting D=1.0 Poor blasting
	Τα πολύ μεγάλα ορυχεία ανοιχτής εκσκαφής έχουν συνήθως υποστεί μεγάλη διαταραχή λόγω της μεγάλης χρήσης εκρηκτικών και επίσης λόγω ανακατανομής τάσεων από την απομάκρυνση των υπερκειμένων. Σε ασθενέστερα πετρώματα η εκσκαφή μπορεί να γίνει με άλλες μεθόδους (ripping ή dozing) οπότε και ο βαθμός της καταστροφής στα πρανή είναι μικρότερος.	D=1.0 Διάνοιξη με εκρηκτικά D=0.7 Εκσκαφή με μηχανικά μέσα.

Κριτήριο Mohr-Coulomb

Το κριτήριο Mohr-Coulomb εκφράζει μια εξίσωση ευθείας, η οποία εφάπτεται στους κύκλους του Mohr, στα σημεία που οι συνδυασμοί ορθών και διατμητικών τάσεων προκαλούν την θραύση του υλικού. Η σχέση αυτή είναι:

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

όπου:

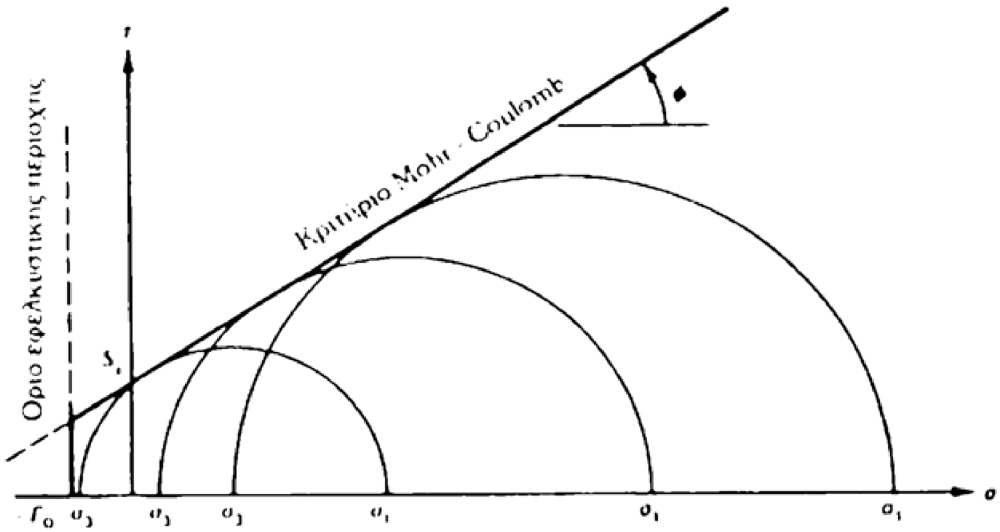
τ: μέγιστη διατμητική αντοχή

φ: γωνία εσωτερικής τριβής υλικού

σ: ορθή τάση

c: φαινόμενη συνοχή βραχώδους υλικού

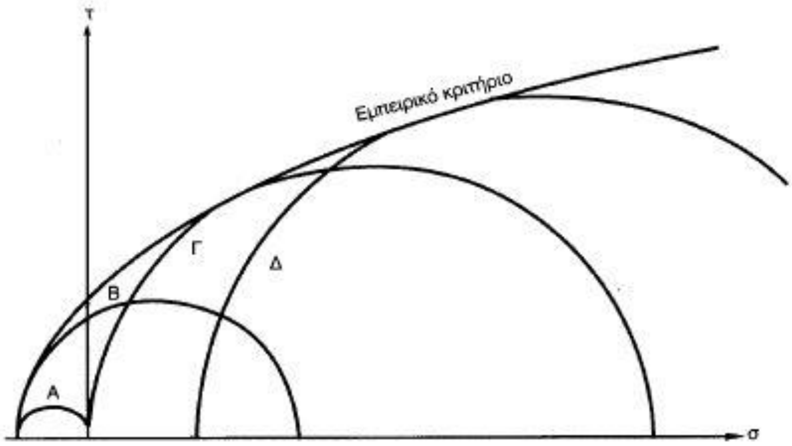
Αξίζει να σημειωθεί η ιδιαιτερότητα της εφελκυστικής περιοχής τους κριτηρίου. Συγκεκριμένα όταν η σ βρίσκεται σε αυτήν, τότε το κριτήριο χάνει την φυσική του σημασία, αφού η περιβάλλουσα θραύσης δεν περιγράφει επαρκώς την εφελκυστική αντοχή του υλικού. Ωστόσο η ελάχιστη κύρια τάση σ3 προεκτείνεται για λόγους απλούστευσης στην περιοχή αυτή μέχρις ότου η σ3=Το (μοναξονική εφελκυστική αντοχή-Goodman, 1989).



Σχήμα 4: Κριτήριο θραύσης Mohr-Coulomb. Στο αρνητικό τμήμα του άξονα x, βρίσκεται το όριο της εφελκυστικής περιοχής (από Goodman, 1989).

Κριτήριο Goodman

Πρόκειται για ένα κριτήριο θραύσης, το οποίο αφορά μια περιβάλλουσα θραύσης που προέρχεται από δοκιμές άμεσου εφελκυσμού, έμμεσου εφελκυσμού και μοναξονικής και τριαξονικής θλίψης. Οι αντίστοιχοι κύκλοι του Mohr απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 5: Εμπειρικό κριτήριο από Goodman (1989).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΩΝ ΣΤΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

Ο σχεδιασμός ενός υπόγειου έργου πρέπει να συνδυάζει δύο βασικούς παράγοντες, την ασφάλεια και την όσο το δυνατόν οικονομικότερη κατασκευή του. Βασική προϋπόθεση για να επιτευχθεί αυτός ο συνδυασμός είναι να σχεδιαστεί ένα ρεαλιστικό γεωλογικό μοντέλο, να εκτιμηθούν σωστά τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά της βραχομάζας και να προσδιοριστούν οι επιτόπου συνθήκες των τάσεων και του υπόγειου νερού, έτσι ώστε να κατασκευαστεί ένα τελικό και αντιπροσωπευτικό τεχνικογεωλογικό μοντέλο της θέσης κατασκευής του υπόγειου έργου.

Για να εφαρμοστεί μια τυποποιημένη μέθοδος προσδιορισμού των γεωυλικών χρειάζονται κάποια συγκεκριμένα βήματα. Αρχικά πρέπει να προσδιοριστεί ποιοτικά η τεχνικογεωλογική συμπεριφορά των γεωυλικών πριν την διάνοιξή τους, έτσι ώστε να προσδιοριστούν ποιοτικά και οι τυχόν αστοχίες που αναμένονται. Γίνεται λοιπόν δυνατός και ο ποιοτικός προσδιορισμός των μέτρων υποστήριξης για κάθε αστοχία. Με την σωστή αξιολόγηση των δεδομένων αυτών, είναι στην συνέχεια δυνατή η αξιόπιστη και ακριβής διαστασιολόγηση του σχεδιασμού των μέτρων υποστήριξης που θα χρειαστούν.

Στην Ελλάδα τα τελευταία μελετήθηκε και κατασκευάστηκε σημαντικός αριθμός υπογείων έργων. Προέκυψε έτσι ένα σύνολο πληροφοριών που αφορούν τα χαρακτηριστικά των γεωλογικών συνθηκών που αντιμετώπισαν τα έργα. Οι πληροφορίες αυτές συγκεντρώθηκαν σε μια βάση δεδομένων για σήραγγες (TIAS-Tunnel Information Analysis System), στοχεύοντας στην καλύτερη και ευκολότερη διαχείριση και πολλαπλή αξιολόγηση των πληροφοριών που προέρχονται από γεωερευνητικές μελέτες και στοιχεία της κατασκευής (Marinos et al, 2006). Μετά από την κατασκευή 62 σηράγγων της Εγνατίας Οδού, προσδιορίστηκαν οι τύποι των βραχομαζών, η τεχνικογεωλογική τους συμπεριφορά και τα αντίστοιχα μέτρα άμεσης υποστήριξης ανάλογα με την συμπεριφορά του κάθε γεωυλικού. Η διάνοιξη και τα μέτρα υποστήριξης βασίστηκαν σε αριθμητικές αναλύσεις που αντικατόπτριζαν τις τάσεις και τις συνθήκες του υπόγειου νερού στο έργο.

Έγινε μια μεγάλη προσπάθεια να αναπτυχθεί ένας οδηγός της διαδικασίας που θα ακολουθείται για τον σχεδιασμό μιας σήραγγας, στον οποίο η παρατήρηση της συμπεριφοράς των βραχομαζών είναι κρίσιμη για την σωστή επιλογή της μεθόδου εκσκαφής και υποστήριξής της. Έτσι το 2004 προτάθηκε από τους Goricki et al. και Schubert η εξής σειρά βημάτων σχεδιασμού:

Α) Προσδιορισμός τύπων βραχομαζών

Β) Εκτίμηση συμπεριφοράς βραχομαζών

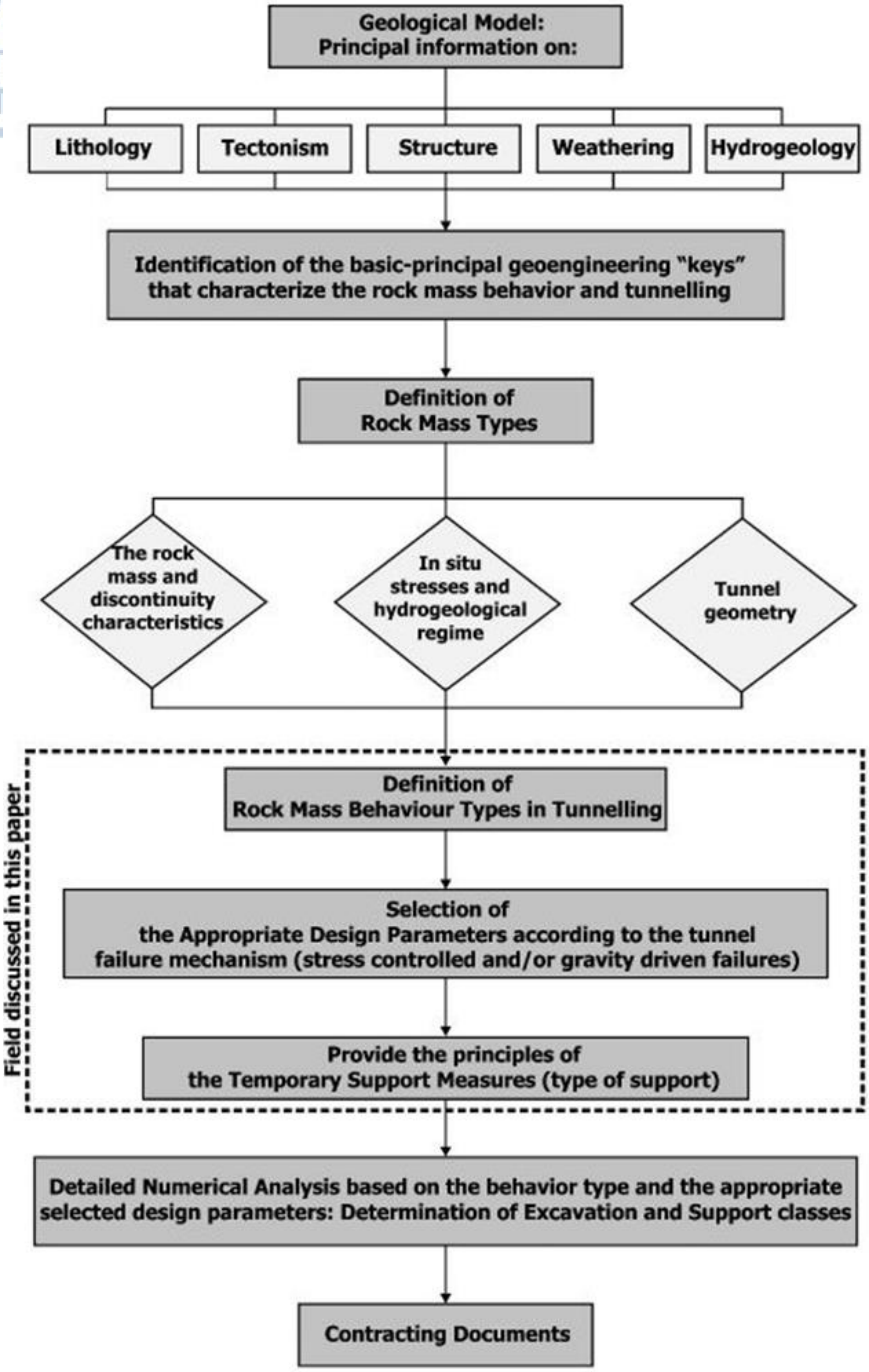
Γ) Καθορισμός μεθόδου εκσκαφής και υποστήριξης

Δ) Διακριτοποίηση κατά μήκος της σήραγγας περιοχών με κοινά χαρακτηριστικά και απαιτησεις εκσκαφής και υποστήριξης και προσαρμογή με επιτόπου κριτήρια και περιορισμούς κατασκευής

Ε) Κόστος και χρόνος εφαρμογής των κατηγοριών εκσκαφής και υποστήριξη.

Αυτή η μεθοδολογία αποτέλεσε την βάση για τον σχεδιασμό του διαγράμματος συμπεριφοράς των βραχομαζών. Έτσι σε συνδυασμό με την πληθώρα των γεωλογικών σχηματισμών που συνάντησαν οι 62 σήραγγες, κάτω από διαφορετικές in situ τάσεις, προέκυψαν οι κατάλληλες πληροφορίες όσο αφορά την τεχνικογεωλογική συμπεριφορά πολλών διαφορετικών τύπων βραχομαζών.

Η αξιολόγηση της συμπεριφοράς των βραχομαζών στην διάνοιξη των σηράγγων ολοκληρώθηκε με την χρήση δύο συστημάτων. Το πρώτο είναι το σύστημα εκτίμησης της τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς της βραχόμαζας (TBC-Tunnel Behaviour Chart), ενώ το δεύτερο ονομάζεται σύστημα χαρακτηρισμού εδάφους, συμπεριφοράς και υποστήριξης των σηράγγων.



Διάγραμμα 4: Το διάγραμμα ροής της διαδικασίας σχεδιασμού σηράγγων χρησιμοποιώντας την συμβατική μέθοδο εκσκαφής και την μέθοδο εκσκαφής με εκρηκτικά (Marinos, 2012). Αρχικά προσδιορίζεαι το γεωλογικό μοντέλο βάση της λιθολογίας, του τεκτονισμού, της δομή του βαθμού αποσάθρωσης και των υδρογεωλογικών χαρακτηριστικών της περιοχής του έργου. Στην συνέχεια αναγνωρίζονται τα βασικά τεχνικογεωλογικά «κλειδιά» που αρακτηρίζουν την συμπεριφορά της βραχόμαζας και τις συνθήκες της σήραγγας. Έτσι περιγράφονται (1) η βραχομάζες και τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών τους, (2) οι τοπικές τάσεις και το υδρογεωλογικό καθεστώς του έργου, (3) η γεωμετρία της σήραγγας. Έπειτα γίνεται η τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της σήραγγας με την ανάλυση των συμπεριφορών των βραχομαζών, τον κατάλληλο σχεδιασμό της ανάλογα με τους αναμενόμενους μηχανισμούς αστοχιών της και των κατάλληλων μέτρων υποστήριξης. Τέλος ακολουθεί μια λεπτομερής αριθμητική ανάλυση που βασίζεται στους τύπους συμπεριφοράς κατά την διάνοιξη και στις αντίστοιχες παραμέτρους σχεδιασμού και αποφασίζεται η μέθοδος εκσκαφής και υποστήριξης.

4.1 ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ (TBC-TUNNEL BEHAVIOUR CHART)

Το σύστημα TBC αποτελεί μια κοινή διάλεκτο παγκοσμίως για την κατασκευή των σηράγγων. Παρόλα αυτά υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί όσο αφορά το εύρος της εφαρμογής του και την παρουσία γεωλογικών σχηματισμών που δεν μπορούν να χαρακτηριστούν από αυτό. Βασίζεται στον χαρακτηρισμό της δομής της βραχομάζας, στην αντοχή του άρρηκτου βράχου (σ_{ci}) και στο ύψος των υπερκείμενων (H).

Από ***την δομή*** της βραχομάζας είναι εφικτό να προσδιοριστεί ο βαθμός καταπόνησής της, ο κερματισμός της, το μέγεθος των τεμαχών της, το σχήμα τους και η ικανότητά τους να περιστρέφονται. Η δομή των βραχομαζών ταξινομείται βάση το σύστημα GSI (Marinos and Hoek, 2000) σε άρρηκτη, τεμαχώδη, πολύ τεμαχώδη, κερματισμένη, κατακερματισμένη και διατμημένη.

Σημαντικό ρόλο έχει το ***ύψος των υπερκείμενων*** στον μηχανισμό αστοχίας, αφού σχετίζεται με τις in situ τάσεις που ασκούνται και την κατάσταση συνεκτικότητας του υλικού. Οι συμπεριφορές που προτείνονται αφορούν παρατηρήσεις σε σήραγγες βαθών 30-300m (και μια ειδική περίπτωση 600m). Για τις βαρυτικές αστοχίες το βάθος καθορίζει την έκταση των αστοχιών, καθώς επηρεάζει τις πλευρικές συμπιέσεις που μπορεί να δέχεται το πέτρωμα. Για τις τασικές διατμητικές αστοχίες, το βάθος καθορίζει τον χρόνο έναρξης των διατμητικών αστοχιών και την έκταση των παραμορφώσεων. Τα όρια των υπερκείμενων πετρωμάτων διακρίνονται σε:

- 150m→άρρηκτη και κερματισμένη-αδιατάρακτη-στρωματώδης
- 100m→πολύ κερματισμένη
- 70m →διαταραγμένη-πτυχωμένη, αποδιοργανωμένη, φυλλώδης-διατμημένη

Τα όρια των τιμών ***σ_{ci}*** καθορίζονται βάση ενός ορίου που δεν εμφανίζονται τασικές αστοχίες, το οποίο είναι 15MPa.Η έντασή της αστοχίας επηρεάζεται από την ποιότητα των ασυνεχειών και την παρουσία του νερού, όχι όμως ο τύπος της συμπεριφοράς της.

Οι αστοχίες διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες, τις βαρυτικές και τις τασικές.

Οι ***βαρυτικές αστοχίες*** αφορούν βραχόμαζες με καθόλου ή λίγες ασυνέχειες και αντοχή σ_{ci}>15MPa. Πρόκειται για αστοχίες τύπου σφήνας (Wg), οι οποίες με την αύξηση του κερματισμού, κυρίως ψαθυρών υλικών, μπορεί να μετατραπούν σε αστοχία τύπου καμινάδας (Ch) ή καταρροής υλικού (Rv,Fl). Η δομή της βραχόμαζας, το αλληλοκλείδωμα των τεμαχών της και το βάθος της εκσκαφής είναι οι τρείς παράγοντες που καθορίζουν το μέγεθος της αστοχίας και την συχνότητά της. Όσο αφορά την περίπτωση των παραμορφώσεων, αυτές μπορεί να εμφανιστούν μόνο σε μικρό βαθμό, όταν ο παρουσιαστεί ο συνδυασμός υψηλού κερματισμού της βραχόμαζας και υπερκείμενων H>70m.

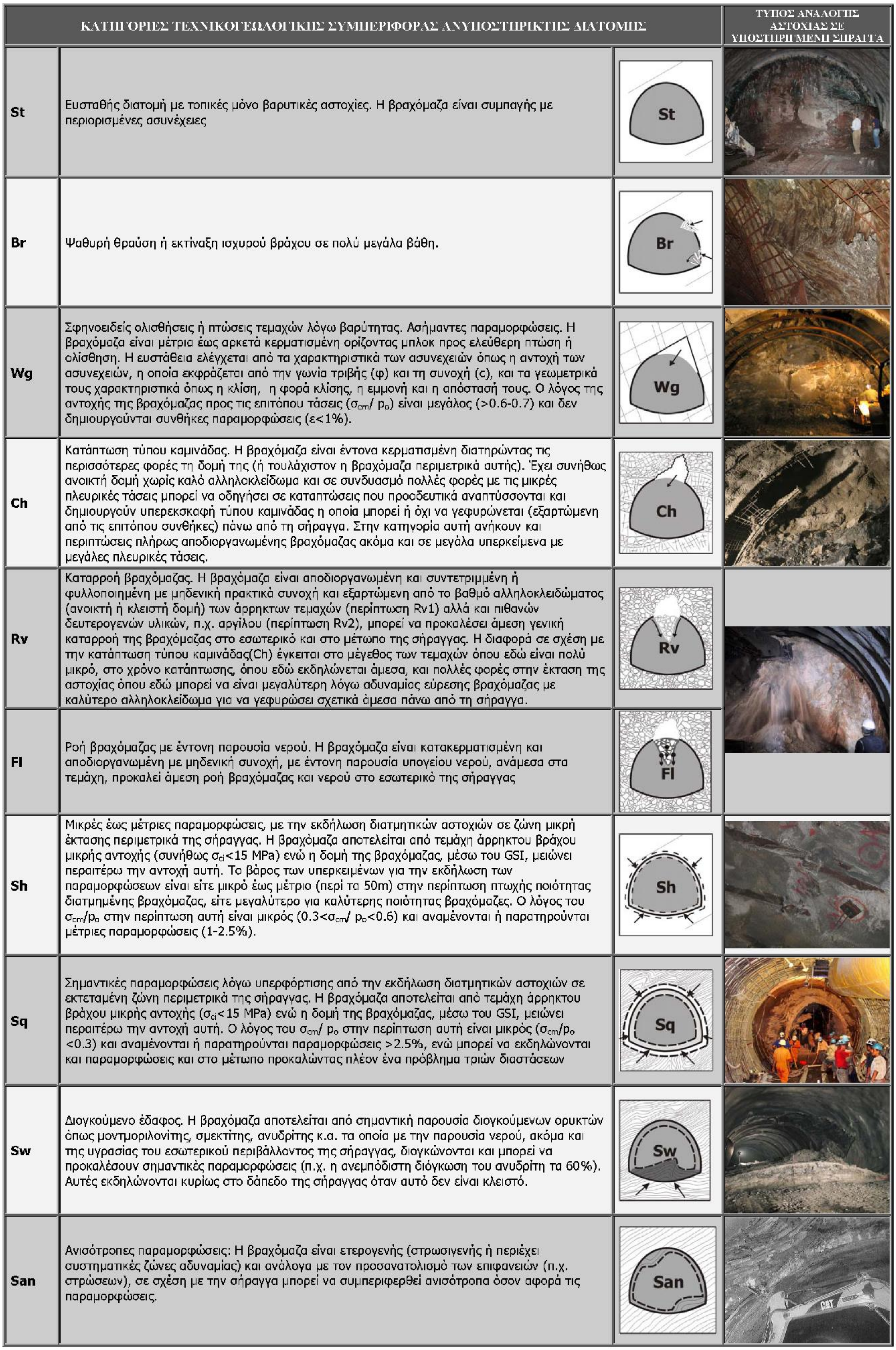
Οι ***τασικές αστοχίες*** εντοπίζονται σε βραχόμαζες με τιμές αντοχής σci < 10-20 MPa, μέτρια έως υψηλά υπερκείμενα και δομή που ποικίλλει. Ο υπολογισμός των μικρών-μέτριων παραμορφώσεων (Sh) που προκαλούν οι αστοχίες αυτές στο κέλυφος της σήραγγας προκύπτει από τον λόγο της αντοχής βραχόμαζας προς τις επιτόπου τάσεις που αυτή δέχεται, δηλαδή $\sigma_{cm}/p_0 < 0.6 - 0.7$. Στην περίπτωση που οι παραμορφώσεις είναι εντονότερες (Sq) τότε ισχύει ότι ο λόγος αυτός είναι μικρότερος και συγκεκριμένα: $\sigma_{cm}/p_0 < 0.3$, όταν πρόκειται για ασθενέστερα υλικά, έντονα διατμημένα και με χαμηλή αντοχή. Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται και οι αστοχίες διογκούμενου εδάφους (Sw) στο δάπεδο της σήραγγας, λόγω διογκούμενων ορυκτών, η εκτίναξη βράχου (Br) σε υψηλά υπερκείμενα και οι ανισότροπες παραμορφώσεις (San).

4.1.1 ΤΑ ΜΕΤΡΑ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ

Με την χρήση του διαγράμματος TBC, έχει προσδιοριστεί ο πιθανός τρόπος αστοχιών κατά μήκος της σήραγγας. Με την γνώση της τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς του γεωυλικού καθορίζονται τα μέτρα υποστήριξης που χρησιμοποιούνται για την συγκράτηση των αστοχιών. Αρχικά προσδιορίζεται ποιοτικά ο τύπος των μέτρων που θα υποστηρίξουν την σήραγγα, ενώ στην συνέχεια μέσω εμπειρικών και αριθμητικών επιλύσεων προκύπτει η ένταση των μέτρων αυτών.

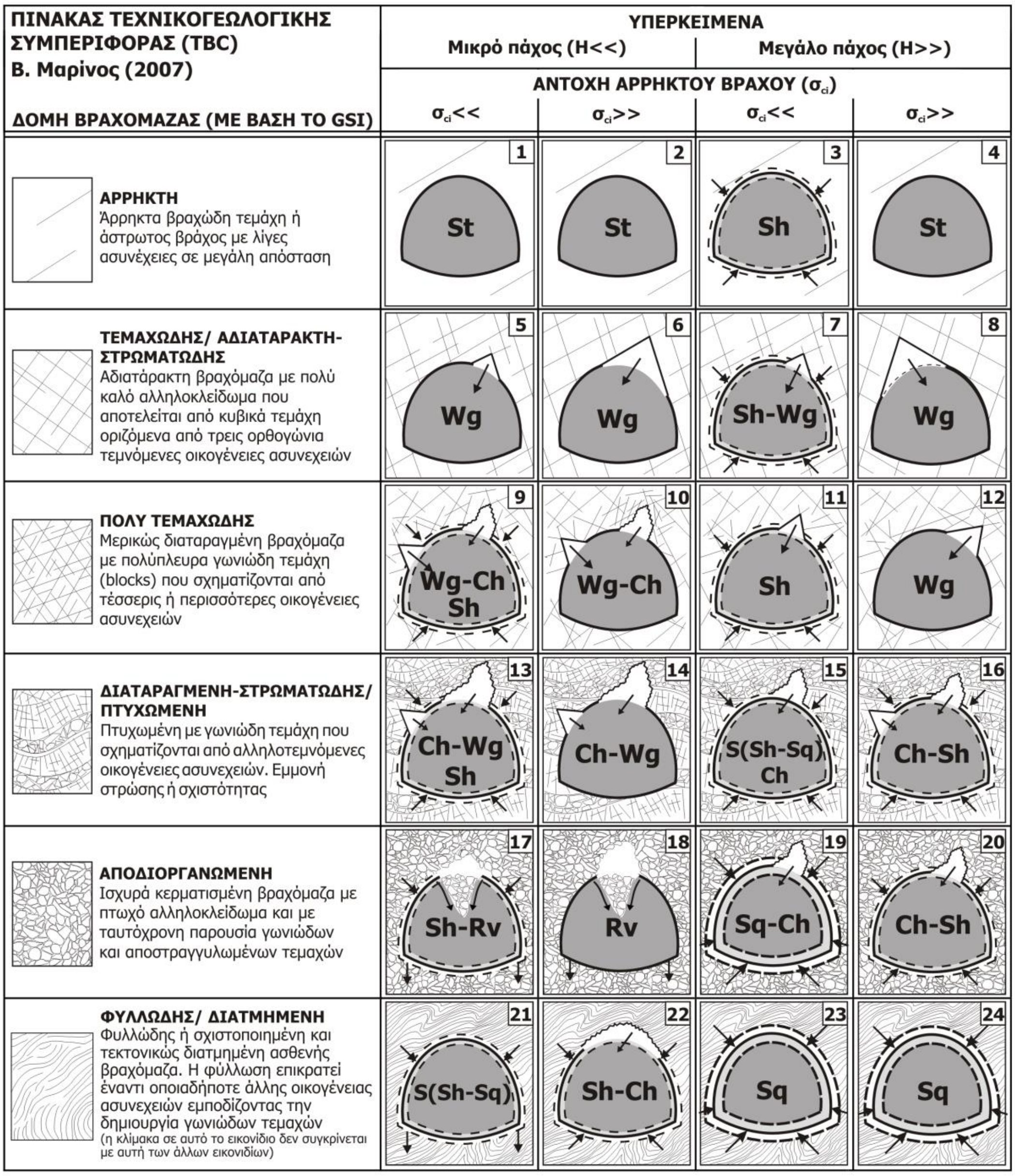
Μέσω αυτών των παραδοχών που προέκυψαν μετά από την εξέταση 62 σηράγγων της Εγνατίας οδού, σχεδιάστηκε ένα διάγραμμα με τις διατομές άμεσης υποστήριξης των σηράγγων βάση της κατηγορίας συμπεριφοράς της βραχόμαζας. Παρατίθενται ποσότητες κα παρατηρήσεις για το κάθε είδος μέτρου υποστήριξης, αλλά και για την ίδια την διατομή. Οι καταστάσεις που προσεγγίζουν, τις συνθήκες διάνοιξης σηράγγων στην έρευνα αυτή αναφέρονται σε: i) πάχος υπερκειμένων έως 300m, ii) διάνοιξη σηράγγων πεταλοειδούς διατομής διάστασης 100-120 m^2, iii) διάνοιξη με συμβατικά μηχανικά μέσα ή με διατρήματα και ανατινάξεις και iv) διάνοιξη σε δύο τουλάχιστον φάσεις.

Το διάγραμμα αυτό στοχεύει στην πρωταρχική προσέγγιση των μέτρων που μπορεί να χρειαστεί μια σήραγγα για να υποστηριχθεί, χρήζει όμως στην συνέχεια ελέγχου, με κατάλληλες μεθόδους και πιθανή τροποποίηση, των μέτρων που έχουν προταθεί.



ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΑΝΥΠΟΣΤΗΡΙΚΤΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ		ΤΥΠΟΣ ΑΝΑΛΟΓΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΕ ΥΠΟΣΤΗΡΙΓΜΕΝΗ ΣΗΡΑΓΓΑ
St	Ευσταθής διατομή με τοπικές μόνο βαρυτικές αστοχίες. Η βραχόμαζα είναι συμπαγής με περιορισμένες ασυνέχειες	
Br	Ψαθυρή θραύση ή εκτίναξη ισχυρού βράχου σε πολύ μεγάλα βάθη.	
Wg	Σφηνοειδείς ολισθήσεις ή πτώσεις τεμαχών λόγω βαρύτητας. Ασήμαντες παραμορφώσεις. Η βραχόμαζα είναι μέτρια έως αρκετά κερματισμένη ορίζοντας μπλοκ προς ελεύθερη πτώση ή ολίσθηση. Η ευστάθεια ελέγχεται από τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών όπως η αντοχή των ασυνεχειών, η οποία εκφράζεται από την γωνία τριβής (φ) και τη συνοχή (c), και τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά όπως η κλίση, η φορά κλίσης, η εμμονή και η απόστασή τους. Ο λόγος της αντοχής της βραχόμαζας προς τις επιτόπου τάσεις (σ_{cm}/ p_o) είναι μεγάλος (>0.6-0.7) και δεν δημιουργούνται συνθήκες παραμορφώσεις (ε<1%).	
Ch	Κατάπτωση τύπου καμινάδας. Η βραχόμαζα είναι έντονα κερματισμένη διατηρώντας τις περισσότερες φορές τη δομή της (ή τουλάχιστον η βραχόμαζα περιμετρικά αυτής). Έχει συνήθως ανοικτή δομή χωρίς καλό αλληλοκλείδωμα και σε συνδυασμό πολλές φορές με τις μικρές πλευρικές τάσεις μπορεί να οδηγήσει σε καταπτώσεις που προοδευτικά αναπτύσσονται και δημιουργούν υπερεκσκαφή τύπου καμινάδας η οποία μπορεί ή όχι να γεφυρώνεται (εξαρτώμενη από τις επιτόπου συνθήκες) πάνω από τη σήραγγα. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν και περιπτώσεις πλήρως αποδιοργανωμένης βραχόμαζας ακόμα και σε μεγάλα υπερκείμενα με μεγάλες πλευρικές τάσεις.	
Rv	Καταρροή βραχόμαζας. Η βραχόμαζα είναι αποδιοργανωμένη και συντετριμμένη ή φυλλοποιημένη με μηδενική πρακτικά συνοχή και εξαρτώμενη από το βαθμό αλληλοκλειδώματος (ανοικτή ή κλειστή δομή) των άρρηκτων τεμαχών (περίπτωση Rv1) αλλά και πιθανών δευτερογενών υλικών, π.χ. αργίλου (περίπτωση Rv2), μπορεί να προκαλέσει άμεση γενική καταρροή της βραχόμαζας στο εσωτερικό και στο μέτωπο της σήραγγας. Η διαφορά σε σχέση με την κατάπτωση τύπου καμινάδας(Ch) έγκειται στο μέγεθος των τεμαχών όπου εδώ είναι πολύ μικρό, στο χρόνο κατάπτωσης, όπου εδώ εκδηλώνεται άμεσα, και πολλές φορές στην έκταση της αστοχίας όπου εδώ μπορεί να είναι μεγαλύτερη λόγω αδυναμίας εύρεσης βραχόμαζας με καλύτερο αλληλοκλείδωμα για να γεφυρώσει σχετικά άμεσα πάνω από τη σήραγγα.	
Fl	Ροή βραχόμαζας με έντονη παρουσία νερού. Η βραχόμαζα είναι κατακερματισμένη και αποδιοργανωμένη με μηδενική συνοχή, με έντονη παρουσία υπογείου νερού, ανάμεσα στα τεμάχη, προκαλεί άμεση ροή βραχόμαζας και νερού στο εσωτερικό της σήραγγας	
Sh	Μικρές έως μέτριες παραμορφώσεις, με την εκδήλωση διατμητικών αστοχιών σε ζώνη μικρή έκτασης περιμετρικά της σήραγγας. Η βραχόμαζα αποτελείται από τεμάχη άρρηκτου βράχου μικρής αντοχής (συνήθως σ_{ci}<15 MPa) ενώ η δομή της βραχόμαζας, μέσω του GSI, μειώνει περαιτέρω την αντοχή αυτή. Το βάρος των υπερκειμένων για την εκδήλωση των παραμορφώσεων είναι είτε μικρό έως μέτριο (περί τα 50m) στην περίπτωση πτωχής ποιότητας διατμημένης βραχόμαζας, είτε μεγαλύτερο για καλύτερης ποιότητας βραχόμαζες. Ο λόγος του σ_{cm}/p_o στην περίπτωση αυτή είναι μικρός (0.3<σ_{cm}/ p_o<0.6) και αναμένονται ή παρατηρούνται μέτριες παραμορφώσεις (1-2.5%).	
Sq	Σημαντικές παραμορφώσεις λόγω υπερφόρτισης από την εκδήλωση διατμητικών αστοχιών σε εκτεταμένη ζώνη περιμετρικά της σήραγγας. Η βραχόμαζα αποτελείται από τεμάχη άρρηκτου βράχου μικρής αντοχής (σ_{ci}<15 MPa) ενώ η δομή της βραχόμαζας, μέσω του GSI, μειώνει περαιτέρω την αντοχή αυτή. Ο λόγος του σ_{cm}/ p_o στην περίπτωση αυτή είναι μικρός (σ_{cm}/p_o <0.3) και αναμένονται ή παρατηρούνται παραμορφώσεις >2.5%, ενώ μπορεί να εκδηλώνονται και παραμορφώσεις και στο μέτωπο προκαλώντας πλέον ένα πρόβλημα τριών διαστάσεων	
Sw	Διογκούμενο έδαφος. Η βραχόμαζα αποτελείται από σημαντική παρουσία διογκούμενων ορυκτών όπως μοντμοριλονίτης, σμεκτίτης, ανυδρίτης κ.α. τα οποία με την παρουσία νερού, ακόμα και της υγρασίας του εσωτερικού περιβάλλοντος της σήραγγας, διογκώνονται και μπορεί να προκαλέσουν σημαντικές παραμορφώσεις (π.χ. η ανεμπόδιστη διόγκωση του ανυδρίτη τα 60%). Αυτές εκδηλώνονται κυρίως στο δάπεδο της σήραγγας όταν αυτό δεν είναι κλειστό.	
San	Ανισότροπες παραμορφώσεις: Η βραχόμαζα είναι ετερογενής (στρωσιγενής ή περιέχει συστηματικές ζώνες αδυναμίας) και ανάλογα με τον προσανατολισμό των επιφανειών (π.χ. στρώσεων), σε σχέση με την σήραγγα μπορεί να συμπεριφερθεί ανισότροπα όσον αφορά τις παραμορφώσεις.	

Σχήμα 6: Σχηματική παρουσίαση των κατηγοριών τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς γεωυλικών κατά τη διάνοιξη σηράγγων (Marinos 2007).

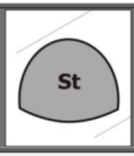
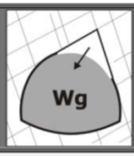
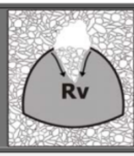
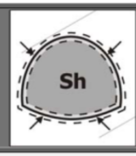


Κατηγορίες Τεχνικογεωλογικής Συμπεριφοράς Ανυποστήρικτης Διατομής	
St (Stable):	Ευσταθής διατομή με τοπικές μόνο βαρυτικές αστοχίες
Wg (Wedge failure):	Σφηνοειδείς ολισθήσεις ή πτώσεις τεμαχών λόγω βαρύτητας
Ch (Chimney failure):	Αστοχία τύπου «καμινάδας»
Rv (Ravelling ground):	Καταρροή βραχόμαζας
Sh (Shearing failures in shallow zone around the tunnel perimeter):	Μικρές έως μέτριες παραμορφώσεις με την εκδήλωση διατμητικών αστοχιών σε ζώνη μικρή έκτασης περιμετρικά της σήραγγας χωρίς όμως να αποκλείονται τοπικά και αστοχίες τεμαχών λόγω βαρύτητας
Sq (Squeezing ground):	Σημαντικές παραμορφώσεις λόγω υπερφόρτισης από την εκδήλωση διαμητικών αστοχιών σε εκτεταμένη ζώνη περιμετρικά της σήραγγας
Η τεχνικογεωλογική συμπεριφορά μπορεί να ελέγχεται και από δύο ή ακόμα και τρεις τύπους κατηγορίας (π.χ. Sh-Ch) αλλά και από ενδιάμεσες συνθήκες δυο κατηγοριών που ανήκουν στον ίδιο γενικό μηχανισμό συμπεριφοράς (π.χ. βαρυτικές αστοχίες: Wg-Ch)	

Σημειώσεις:

- **Η έντονη παρουσία αργίλου είτε στις ασυνέχειες ως επιφλοιώσεις είτε ως ζώνες μέσα στη βραχόμαζα μπορεί να μετακινεί τον τύπο των κινηματικών αστοχιών μόνο προς τα κάτω στο παραπάνω διάγραμμα (π.χ. από Wg 9 ➡ Ch 13)**
- **Η παρουσία νερού επηρεάζει τον συντελεστή ασφαλείας και όχι τον μηχανισμό της συμπεριφοράς. Οι περιπτώσεις που επηρεάζει αφορούν κυρίως στις δομές «Διαταραγμένη-Στρωματώδης» και «Αποδιοργανωμένη» όπου η έντονη παρουσία νερού είναι πιθανό να "μετακινήσει" τη συμπεριφορά από μια κατάπτωση τύπου καμινάδας (Ch) ή συνεχή κατάπτωση και καταρροή (Rv) σε ροή εδάφους (Fl). Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην παρουσία νερού σε ζώνες υψηλής περατότητας (κερματισμένες ζώνες ρηγμάτων) ή σε ενότητες οι οποίες έχουν «φραγεί» από ζώνες πολύ χαμηλής περατότητας (διατμημένες ζώνες ρηγμάτων με έντονη παρουσία αργιλοποιημένων γεωυλικών)**
- **Η ποιότητα των ασυνεχειών, το δεύτερο στοιχείο του GSI, συμβάλει στην ένταση του φαινομένου της συγκεκριμένης συμπεριφοράς**
- **Ο πίνακας δεν αφορά περιπτώσεις πολύ μεγάλου πάχους υπερκειμένων (π.χ. πολλές εκατοντάδες m ή πάνω από 1000 m)**
- **Επί τούτοις δεν ορίζονται όρια στο πάχος των υπερκειμένων ούτε στις τιμές της αντοχής του άρρηκτου πετρώματος, ώστε ο πίνακας αυτός να μην κινδυνεύει να τυποποιηθεί από μη έμπειρους χρήστες. Σκοπός του πίνακα είναι να δώσει τη λογική και τους μηχανισμούς της αστάθειας στις διάφορες περιπτώσεις τύπων βραχόμαζας στη φύση. Εν πάσει περιπτώσει θα μπορούσε να θεωρήσει κανείς εντελώς ενδεικτικά ως καταρχήν όριο σci= 15 MPa**

Διάγραμμα 5: Διάγραμμα εκτίμησης της τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς της βραχόμαζας (TBC) (από Marinos, 2012)

						
Βήμα προχώρησης	>3m στην άνω ημιδιατομή	2-3m στην άνω ημιδιατομή	1.5-2.0m στην άνω ημιδιατομή	1-1.5m στην άνω ημιδιατομή	1.5-2m	1m
Εκτοξευμένο Σκυρόδεμα	5cm	5-10cm	10-15cm	20-25cm	20-25cm	25-35cm
Αγκύρια	Σημειακή τοποθέτηση, όπου κρίνεται απαραίτητο	Αραιός κάνναβος (π.χ. 3mx3m) και μήκος ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των σφηνών.	Πυκνός κάνναβος (π.χ. 1,5mx1,5m) και μήκος ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των τεμαχών προς ολίσθηση.	Πυκνός κάνναβος (π.χ. 1,5mx1,5m) και μήκος 3-4m, πλήρους πάκτωσης για την όσο το δυνατόν καλύτερη ενίσχυση και πρόσδωση συνοχής στο υλικό.	Κάνναβος 1.5m-2m x 1.5m-2m, και μήκος 5-6m.	Κάνναβος 1-1.5m x 1-1.5m, 6-9m μήκος στο θόλο της σήραγγας
Πλαίσια		HEB120 ή αντίστοιχα Lattice Girders όπου απαιτείται ανάλογα και με το κερματισμό της βραχόμαζας.	HEB120-140 ή αντίστοιχα Lattice Girders, πιθανώς με Elephant Foot.	HEB140-HEB160 ή αντίστοιχα Lattice Girders, με Elephant Foot.	HEB120-HEB140 ή αντίστοιχα Lattice Girders με Elephant Foot.	HEB160-HEB180 ή αντίστοιχα Lattice Girders, με Elephant Foot.
Θεμελίωση κελύφους				Σε περίπτωση που χρειαστεί ενίσχυση της περιοχής θεμελίωσης, μπορεί να γίνει χρήση μικροπασσάλων, ενεμάτωσης ή/και διαμόρφωση προσωρινού ανάστροφου τόξου.		Ενδεχομένως (Μικροπάσσαλοι)
Αγκύρια Μετώπου					Σε ειδικές περιπτώσεις τοποθέτηση αγκυρίων fibreglass για λόγους σ_{cm}/p_0 =0.3-0.5	Τοποθέτηση αγκυρίων fibreglass για λόγους $\sigma_{cm}/p_0 < 0.3$ για τον περιορισμό ασταθειών μετώπου
Δοκοί προπορείας			Διαμέτρου 25-32mm και μήκους 5-6m. σημαντικό μέγεθος στα spiles είναι η πυκνότητα τους και όχι τόσο το μήκος ή η διάμετρος τους. Το μήκος που προτείνεται για τα spiles είναι περισσότερο κατασκευαστικό, καθώς αυτά δεν πρόκειται να παραλάβουν κάποια φορτία.	Διαμέτρου 51-76mm και μήκους 5-6m. το σημαντικό μέγεθος στα spiles είναι η πυκνότητα τους και όχι τόσο το μήκος ή η διάμετρός τους.		Διαμέτρου Φ114/101mm και μήκους 12m.
Πυρήνας Μετώπου			Αναλόγως με 5cm εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο μέτωπο	Ναι με 5cm εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο μέτωπο	Πιθανόν αν η βραχόμαζα έχει πτωχή δομή	Ναι
Προσωρινό ανάστροφο τόξο				Πιθανώς αν υπάρχουν και θέματα παραμορφώσεων	Πιθανώς (σ_{cm}/p_o<0.4)	Ναι
Μόνιμο ανάστροφο τόξο					Πιθανώς (σ_{cm}/p_o<0.4)	Ναι
Αποστράγγιση		Αναλόγως των συνθηκών υπογείων υδάτων	Αναλόγως των συνθηκών υπογείων υδάτων απαιτείται καλή αποστράγγιση διότι διευκολύνουν τις καταπτώσεις αυτές.	Για περιορισμένη παρουσία νερού χρειάζεται καλή αποστράγγιση διότι διαταράσσει το αλληλοκλείδωμα των τεμαχών και μειώνει τις ενεργές τάσεις.	Αναλόγως των συνθηκών υπογείων υδάτων απαιτείται ανακούφιση από τις πιέσεις των νερών	Αναλόγως των συνθηκών υπογείων υδάτων απαιτείται ανακούφιση από τις πιέσεις των νερών
Παρατηρήσεις	Πιθανώς να υπάρχει δυνατότητα ολομέτωπης διάνοιξης. Άμεση τοποθέτηση εκτ. σκυροδέματος για την συγκράτηση μικρο-τεμαχών πιθανώς προκληθέντων από την διαταραχή της εκσκαφής	Το βήμα εκσκαφής θα πρέπει να καθορίζεται από την ανάγκη περιορισμού των σφηνών ανάλογα του μεγέθους τους και του χρόνου αυτουποστήριξής τους (π.χ. πόσο χαλαρή μπορεί να είναι η βραχόμαζα, ποιότητα εκσκαφής, ελεύθερες πτώσεις κ.α.). Άμεσο σφράγισμα των τεμαχών της βραχόμαζας για παρεμπόδιση της χαλάρωσής τους και ενδεχόμενης πτώσης ή ολίσθησής τους και την συνέχιση ασφαλέστερης τοποθέτησης των άλλων μέτρων. Πιθανόν να απαιτείται τοποθέτηση αγκυρίων άμεσης ενέργειας (τύπου Swellex) και όχι παθητικών πλήρους πάκτωσης, αν απαιτείται άμεση επέμβαση (π.χ. σε βραχόμαζα με σχετική χαλάρωση	Άμεσο σφράγισμα των τεμαχών της βραχόμαζας για παρεμπόδιση της χαλάρωσής τους και ενδεχόμενης πτώσης ή ολίσθησής τους και την συνέχιση ασφαλέστερης τοποθέτησης των άλλων μέτρων. Η φιλοσοφία τοποθέτησης πυκνού καννάβου αγκυρίων σε συνδυασμό με τα πλαίσια ενσωματωμένα στο εκτοξευμένο σκυρόδεμα περιορίζουν τη βραχόμαζα (τα δικτυωτά πλαίσια συντελούν στην κατεύθυνση αυτή). Η ενεμάτωση μέσω των αγκυρίων σε ευρύτερη έκταση της περιβάλλουσας βραχόμαζας την ενισχύει έναντι ολίσθησης. Πιθανή η ανάγκη χρησιμοποίησης αυτοδιατρυώμενων αγκυρίων. μέτριο(ανάλογα τη ποιότητα της βραχόμαζας και άλλων συνθηκών) βήμα εκσκαφής μπορεί να βοηθήσει στον περιορισμό της βραχόμαζας και μη ενεργοποίησης και διαταραχής ευρύτερης ζώνης γύρω από τη σήραγγα. Βέβαια, πρέπει να καθορίζεται και από τα μεγέθη των υπό ολίσθηση τεμαχών	Το μικρό έως μέτριο(ανάλογα τη ποιότητα της βραχόμαζας και άλλων επιτόπου συνθηκών) βήμα εκσκαφής μπορεί να βοηθήσει στον περιορισμό της βραχόμαζας και μη ενεργοποίησης και διαταραχής ευρύτερης ζώνης γύρω από τη σήραγγα. Άμεσο σφράγισμα - περιορισμός των τεμαχών της βραχόμαζας για την συγκράτηση της βραχόμαζας έναντι καταρροής. Για την ενίσχυση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος προτείνεται η χρήση μεταλλικού πλέγματος μικρού καννάβου για την άμεση δυνατότητα συγκράτησης των χαλαρών τεμαχών βράχου. Προτείνονται αυτοδιατρυούμενα αγκύρια λόγω της άμεσης καταρροής των οπών διάτρησης. Στο θόλο της σήραγγας μπορεί να προταθεί απλές τσιμεντενέσεις οι οποίες είναι δυνατόν εν μέρει να επιτευχθούν μέσω οπών των spiles. Δεν απαιτείται η δημιουργία ισχυρού κελύφους αφού δεν προβλέπονται στη κατηγορία αυτή παραμορφώσεις.	Το ακριβές πάχος του εκτ. σκυροδέματος, το μήκος των αγκυρίων και τα χαρακτηριστικά αντοχής τους καθορίζονται από την αντοχή της βραχόμαζας και τις επιτόπου συνθήκες.	Το ακριβές πάχος του εκτ. σκυροδέματος, το μήκος των αγκυρίων και τα χαρακτηριστικά αντοχής τους καθορίζονται από την αντοχή της βραχόμαζας και τις επιτόπου συνθήκες. Εναλλακτική διατομή: Πολύ πυκνός κάνναβος αγκυρίων fibreglass στο μέτωπο, μη τοποθέτηση forepolling, πυκνός κάνναβος αγκυρίων στο θόλο και τις παρειές και γρήγορο κλείσιμο του προσωρινού ανάστροφου. Όταν σ_{cm}/p_o<0.15 και τα προβλήματα παραμορφώσεων είναι πολύ μεγάλα, η φιλοσοφία της άμεσης υποστήριξης επικεντρώνεται στον έλεγχο και περιορισμό των παραμορφώσεων με <u>ολισθαίνουσες διατάξεις (εύκαμπτη υποστήριξη)</u> για την ελεγχόμενη παραμόρφωση της βραχόμαζας και την ακολουθεί μείωση των πιέσεων που θα κληθεί να παραλάβει η τελική διατομή όταν και θα λειτουργεί ως άκαμπτη.

Διάγραμμα 6: Διατομές άμεσης υποστήριξης σηράγγων ανά κατηγορία συμπεριφοράς βραχόμαζας (Marinos, 2010)

4.1.2 Η ΛΕΠΤΟΜΕΡΗΣ ΜΕΘΟΔΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

Εκτός από το σύστημα TBC, που καλύπτει ένα μεγάλο εύρος τεχνικογεωλογικών συνθηκών μιας σήραγγας, ο προσδιορισμός της συμπεριφοράς της σήραγγας και της φιλοσοφίας των μέτρων υποστήριξής της, οφείλει να βασίζεται σε μια λεπτομερή περιγραφή των γεωυλικών. Η μέθοδος χαρακτηρισμού του γεωυλικού των σηράγγων οδηγεί τον χρήστη να αξιολογήσει τα δεδομένα με λεπτομέρεια με σκοπό να προσδιορίσει την συμπεριφορά της σήραγγας και τα κατάλληλα μέτρα υποστήριξης. Βασίζεται στο γεωλογικό μοντέλο και στον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών της βραχόμαζας που ελέγχουν τις δυνητικές αστοχίες της.

Η μέθοδος αυτή επικεντρώνει περισσότερο γεωλογικά ή /και τα επί τόπου χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την συμπεριφορά της σήραγγας, σε σύγκριση με μία πιο γενική μέθοδο που θα μπορούσαν να τις ξεφύγουν ιδιαιτερότητες στο εσωτερικό και γύρω στην περίμετρο της σήραγγας. Για παράδειγμα ένας διατμημένος φλύσχης με εκατοντάδες μέτρα υπερκειμένων, αναμένεται να παρουσιάσει παραμορφώσεις. Παρόλα αυτά εάν αυτός εμφανίζει ζώνες «καλής ποιότητας» κοντά στην οροφή της σήραγγας, οι παραμορφώσεις αυτές περιορίζονται. Με αυτό τον τρόπο μεταβάλλονται προφανώς και τα μέτρα υποστήριξης που θα χρησιμοποιηθούν.

Τα βήματα για τη εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου είναι τα εξής:

1^{ο} βήμα: Η προσέγγιση ξεκινά με την περιγραφή του γεωλογικού μοντέλου της ευρύτερης και τοπικής θέσης του έργου. Αυτή βασίζεται σε λιθολογικά δεδομένα, τεκτονισμό, αποσάθρωση και υδροπερατότητα.

2^{ο} βήμα:Ακολουθούν οι «in situ» συνθήκες (τάσεις, υδρογεωλογικές συνθήκες, άλλοι περιορισμοί) και η «γεωμετρία της σήραγγας».

3^{ο} βήμα: Αναγνωρίζονται τα «χαρακτηριστικά-κλειδιά» της βραχόμαζας, τα οποία καθορίζουν την ευστάθεια και αστάθεια της σήραγγας. Στο σημείο αυτό καθορίζεται εάν η αστοχία οφείλεται γενικά στην βραχώδη μάζα ή στις ασυνέχειές τις ή και στους δύο παράγοντες και προσδιορίζεται συγκεκριμένα ο τύπος της αστοχίας.

4^{ο} βήμα: Προσδιορίζεται η «συμπεριφορά» τη βραχόμαζας κατά την εκσκαφή της σήραγγας

5^{ο} βήμα: Ακολουθούν οι καταλληλότερες «παράμετροι σχεδιασμού» της σήραγγας, βάση των αρχών των αστοχιών αυτών. Εάν η συμπεριφορά της βραχόμαζας είναι ισότροπη και παρουσιάζει τασικές αστοχίες (Sh,Sq), δίνεται προσοχή στις παραμέτρους της βραχόμαζας (τομές Va). Από την άλλη πλευρά, εάν οι αστοχίες είναι βαρυτικές (Wg, Ch, Rv), δίνεται προσοχή στις παραμέτρους των ασυνεχειών της βραχόμαζας (τομές Vb). Σε περίπτωση ανισότροπης βραχόμαζας με χαμηλή αντοχή, λαμβάνονται υπόψη τόσο η βραχώδης μάζα, όσο και οι ασυνέχειες (San). Προσδιορίζονται τα γεωτεχνικά συστήματα ταξινόμησης της βραχόμαζας (RMR, Q, GSI). Από την στιγμή που ο σχεδιασμός μιας σήραγγας πλέον περιλαμβάνει αριθμητικές αναλύσεις, το ερώτημα είναι πότε χρησιμοποιούνται παράμετροι βραχόμαζας (σ_{cm}, c_{mass}, φ_{mass}, E_{mass}, κ.τ.λ.) όταν αυτή συμπεριφέρεται ισότροπα, ή και πότε περιλαμβάνονται παράμετροι ασυνεχειών (διατμητική αντοχή ασυνεχειών , εμμονή, προσανατολισμός c_{joint}, $\varphi_{joint)}$ και πότε οι αστοχιες οφείλονται στις ασυνέχειες ή επηρεάζονται από την ανισοτροπία που μπορεί να υπάρχει (ανισότροπες παραμορφώσεις, San).

6^{ο} βήμα: Αναπτύσσεται η «Φιλοσοφία της υποστήριξης της σήραγγας»

7^{ο} βήμα: Προσδιορίζεται το εναπομένον ρίσκο» μετά την εγκατάσταση των μέτρων υποστήριξης που επιλέχθηκαν.

Η μέθοδος χαρακτηρισμού του εδάφους των σηράγγων απεικονίζεται στα 2 ακόλουθα διαγράμματα, τα οποία στην συγκεκριμένη περίπτωση αφορούν σερπεντινιωμένο περιδοτίτη.

GROUND CHARACTERIZATION, BEHAVIOUR AND SUPPORT FOR TUNNELS (1/2) (V. Marinos)

Location:	T1 (Panagia Area, Northern Greece)
Classification phase (primary, evaluation, construction):	Evaluation
Date:	13/12/2011

I. GEOLOGICAL CONDITIONS

a) Lithology	
Geotectonic unit:	
General formation to which it belongs (e.g. Flysch):	Pindos ophiolitic complex
Rock mass name:	Serpentinised Peridotite with foliated-clayey serpentinite zones Note: information concerning significant alteration of the rock mass, intact rock or surface weathering, presence of foliated - clayey geomaterial and bedding thickness if it is stratified
b) Tectonism	
Tectonic zones:	The big thrust of Pindos ophiolites over the geotectonic unit of flysch is extended in the wide tunnel area but is not crossed by the tunnel
– Major thrust zones which affect the project in great scale:	
– Localized fault or disturbed zones:	Several sheared zones across the peridotite blocks
Fracturing or Shearing:	
– Fracturing degree:	Slightly fractured ☐ Fractured ☐ Very fractured ☑ Brecciated ☐
– Continuation- persistence of fracturing with depth:	Preserves the same structure characteristics to tunnel depth (~90m)
– Shearing or foliation across the rock mass:	Shearing affects the rock mass in places
Folding:	
– Type:	
– Geometry:	
c) Weathering	
Discontinuities:	Serpentinised discontinuities (slickensided)
Intact rock:	Only locally affected
Persistence with depth:	It does not follow any pattern. Irregular geometry and extent in depth
d) Permeability	
Qualitative appraisal:	High (k>10^{-5}m/sec) ☐ Low (k:10^{-7}-10^{-9}m/sec) ☑ Practically impermeable (k<10^{-11}m/sec) ☐ Medium(k:10^{-5}-10^{-7}m/sec) ☐ Very low (k:10^{-9}-10^{-11}m/sec) ☐ Localized groundwater presence in the peridotite rock trapped behind clayey zones
Quantitative appraisal:	k: ____ m/sec

II. IN SITU CONDITIONS AND TUNNEL CHARACTERISTICS

a) Tunnel Geometry	
Tunnel Size:	12m diameter
Shape:	Horseshoe
Tunnel Direction:	
b) Overburden	
Overburden range with similar behaviour:	H: 30 - 100 m
Insitu stresses ($P_o=\gamma H_{min}$ to γH_{max}):	p_o: 0.75 - 2.5 MPa
c) Stress field particularities	
Particular presence of lateral pressures (k_o):	
d) Adjacent zone close to tunnel perimeter	
Weak zone close to tunnel perimeter:	Dip: ____ / ____ Dip Direction Thickness: ____ m Geological characteristics: Possible foliated-clayey serpentinite in thin zones
Competent zone close to tunnel perimeter:	Dip: ____ / ____ Dip Direction Thickness: ____ m Geological characteristics:
e) Hydrogeological conditions (location of aquifer according to the tunnel axis)	Dry conditions are expected
f) Other boundaries	

III. CHARACTERISTIC "KEYS" FOR TUNNEL BEHAVIOUR OR INSTABILITY

Intact rock strength:	>50MPa
Rock mass strength to insitu stress ratio(σ_{cm}/p_o):	$\sigma_{cm}/p_o>0.6$ ☑ $0.3<\sigma_{cm}/p_o<0.6$ ☐ $\sigma_{cm}/p_o<0.3$ ☐
Structure "interlocking":	Due to the serpentinisation rock mass has poor interlocking
Presence of low strength minerals:	Serpentinite at discontinuities. Clay occasionally at discontinuities
Intact rock weathering, clay zones:	Foliated-clayey zones may specify irregular blocks
Groundwater presence:	Possibility of trapped permeable small aquifers behind impermeable clayey zones which may be unfavourable to the tunnel stability due to excessive pressures. May act as a "lubricant" to the serpentinised discontinuities decreasing their strength characteristics
Block geometry - bed thickness:	0.2-0.5m x 0.2-0.5m
Rock mass structure (based to GSI classification)	Blocky ☐ Very blocky ☑ Blocky/Disturbed/Seamy ☐ Disintegrated ☐ Laminated/Sheared ☐
Discontinuity geometry:	Significant risk of wedge failures
Discontinuity persistence:	They present persistence but reduced due to the serpentinised zones
Discontinuity quality (based to GSI classification)	Very good ☐ Good ☐ Fair ☐ Poor ☑ Very poor ☑
Rock Quality Index (RQD):	RQD:
Other characteristic:	
Fundamental engineering geological characteristics - "Keys":	Poor-very poor discontinuity surfaces (serpentinization). Foliated-clayey zones may exist. High rock mass strength

☐ The behaviour is controlled by the overall rock mass: ↓ It is essential to enter the relevant rock mass parameters in field "Va"	☑ The behaviour is controlled by the discontinuities: ↓ It is essential to enter the relevant parameters of the discontinuities in field "Vb"

Page 1 from 2

Διάγραμμα 7: Η μέθοδος χαρακτηρισμού του εδάφους των σηράγγων (1ο-3ο βήμα) σύμφωνα με Μαρίνο Π.Β.(2010)

GROUND CHARACTERIZATION, BEHAVIOUR AND SUPPORT FOR TUNNELS (2/2) (V. Marinos)

IV. ROCK MASS BEHAVIOR IN TUNNEL EXCAVATION
-The Tunnel Behaviour Types are listed in figure 3
-The user may consult the TBC classification (figure 4) in order to fill the section IV

a) Isotropy - Anisotropy (Stress or gravity driven failures):
- Isotropic: Yes ☐
- Anisotropic: Yes ☑ Gravity driven failures

b) Behaviour type of unsupported tunnel section:
- Qualitative: Wedge slidings (Wg) or gravity driven failures. Possibility for greater-more extended chimney type failures (Ch) containing blocks which are surrounded by clayey foliated zones. Face stability problems may also occur from the same mechanism. Special attention should be given in possible weakened serpentinised zones if water is present. If these zones appear in critical tunnel section areas, as the foundation area, vertical displacements (settlements) of the whole section may be developed

c) Design philosophy:
- Structural dependant instability analysis (e.g. Unwedge Programs) ☑ Support selection based on analysis
- Structural and stress dependant instability analysis (Wedge and Numerical Analysis) ☑ Stress problems should also be analyzed but will not govern the support selection
- Stress dependant instability -Deformation analysis (Numerical Analysis) ☐
- Empirical design ☐

V. DETAIL CHARACTERISTICS AND DESIGN PARAMETERS
-Focus on V_a and/or V_b according to the rock mass behavior

a) Rock mass parameters (Hoek & Brown):
- GSI classification value: GSI=30 - 35

GSI chart (Marinos and Hoek, 2000)

- Intact rock strength: σ_{ci}: 30 MPa
- Constant m_i: 22
- γ: 0.025 MN/m³
- Modulus Ratio (MR) or (E_i): MR=550
- Disturbance factor (D): 0

b) Discontinuity parameters:
- Number of discontinuities: 3

	J_1	J_2	J_3
Geometry (Dip/dip direction)	14 / 076	47 / 165	60 / 210
Persistence (m)	1 - 3	1 - 2	1 - 2
Distance apart or Spacing (m)	0.2 - 0.5	0.2 - 0.5	0.2 - 0.5
Aperture (mm)	1 - 3	0	0
Filling material (Hard<5mm / Hard>5mm / Soft<5mm / Soft>5mm / None)	Soft>5mm ☑	Soft<5mm ☑	Soft<5mm ☑
Weathering (Unweathered / Slightly / Moderately / Highly / Decomposed)	Highly ☑	Moderately ☑	Moderately ☑
Ground water conditions (Dry / Sub-wet / Wet / In drops / Flow)	Wet ☑	Wet ☑	Wet ☑
Joint Roughness Condition (JRC)	4 - 6	6 - 8	6 - 8
Joint Compression Strength (JCS) (MPa)	25	28	28

Shear strength properties of rock mass:
- Friction angle (φ): °
- Cohesion (c): KPa
- Deformation modulus (E_m): KPa
- Rock mass strength (σ_{cm}): Mpa
- Hoek & Brown parameters (m_b, a, s):

Shear strength properties of discontinuities:
- Friction angle (φ): J_1: 25- 30 ° J_2: 25- 30 ° J_3: 25- 30 °
- Cohesion (c): J_1: 0 KPa J_2: 0 KPa J_3: 0 KPa

c) Other rock mass classification value
- RMR: Q:

* Discontinuities parameters can be assessed from Vb

VI. TUNNEL SUPPORT PHILOSOPHY
- The specific support measures and loads must be calculated through detailed design analysis
- The user may also consult the Tunnel Support Measures for Each Tunnel Behaviour Type (figure 5) in order to complete section VI

Qualitative:
- Excavation phases: Two phases (Top Heading and Bench)
- Excavation step: Small excavation step (~2m) in order to confine the rock mass and avoid releasing the foliated zones
- Shotcrete/bolts: Shotcrete should be applied to control the gravity controlled failures and not the deformations (depends on depth). Bolts should have a significant length to hold greater overbreak
- Steel sets: Should be closely spaced (1-1.5m) to confine some blocks often marked by the weak clayey zones
- Light face support for structurally dependent instability (e.g. spiles): It may be required to apply spiles and face buttress in case of continuous appearance of the clayey zones
- Face support against stress dependant instability (e.g. fibreglass, forepolling, invert):
- Water drainage: Long drainage holes to relieve water pressure behind the support shell and the face. Protected drainage canals on the tunnel floor to avoid the softening in the foundation of the shell of serpentinised zones
- Other (e.g. grouting):

VII. REMAINING RISK
- Possible rock strength reduction by water circulation when the canals along the sides of the tunnel are poorly constructed. In this case subsidence of the support shell may occur

Page 2 from 2

Διάγραμμα 8: Η μέθοδος χαρακτηρισμού του εδάφους των σηράγγων (4^o-7^o βήμα) σύμφωνα με Μαρίνο Π.Β (2010)

4.2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΩΝ ΚΙΝΔΥΝΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΜΗΧΑΝΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗ

Δεν είναι λίγες οι φορές που πολλά υπόγεια έργα κατά την κατασκευή τους αντιμετωπίζουν αναπάντεχες εδαφικές συνθήκες που μπορεί να αποτελέσουν απειλή τόσο για το χρονοδιάγραμμα των εργασιών, όσο και για το κόστος τους. Έτσι λοιπόν βασικά ερωτήματα για την κατασκευή τέτοιων έργων στις μέρες μας είναι «πότε μπορούν να κατασκευαστούν», «ποια είναι η καταλληλότερη μέθοδος κατασκευής τους» και «ποιες είναι οι πιθανές επιπτώσεις της επιλογής της μεθόδου».

Η εφαρμογή της μηχανοποιημένης διάνοιξης (TBM), μπορεί να παρέχει γρήγορους ρυθμούς εκσκαφής, ωστόσο η οποιαδήποτε αναπάντεχη μεταβολή των γεωλογικών συνθηκών μπορεί να επηρεάζει την λειτουργία του μηχανήματός της. Έτσι λοιπόν προκειμένου να αποφευχθούν τέτοια προβλήματα κρίνεται απαραίτητο να αξιολογηθούν οι πιθανές θέσεις που μπορεί να αποτελέσουν απειλή για την διεκπεραίωση του έργου, αλλά και η αξιολόγηση του μεγέθους τους. Πολλοί ερευνητές προκειμένου να αντιμετωπίσουν αυτό το θέμα, σχεδίασαν κάποιες μεθόδους προσδιορισμού των πιθανών γεωτεχνικών κινδύνων, καθώς επίσης και της επιρροής τους στους ρυθμούς της διάνοιξης και στην κατάσταση του TBM.

4.2.1 Η ΜΕΘΟΔΟΣ DAT (Decision Aids in Tunneling)

Το 1992, ο Herbert H.Einstein αρχικά εισήγαγε μια διαδικασία επιλογής κατάλληλων αποφάσεων για σήραγγες (DAT). Πρόκειται για ένα βοήθημα που παρουσιάζεται και με την μορφή κώδικα, το οποίο αναπαριστά την κατασκευή της σήραγγας και μελετά τα αποτελέσματα διαφορετικών μεθόδων στον χρόνο και το κόστος της κατασκευής. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αξιολογηθούν τυχόν απρόβλεπτες δυσκολίες που μπορεί να προκληθούν από γεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες που θα συναντήσει το έργο. Χαρακτηριστικό του βοηθήματος αυτού είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο κατά την διαδικασία της κατασκευής του έργου. Ο κώδικας υπολογίζει την ολική αβεβαιότητα των δυσκολιών αυτών, εισάγοντας ως παραμέτρους τις αβεβαιότητες που θα θεωρήσει ο ίδιος ο χρήστης. Ωστόσο το 2000, ο Christoph Haas, αναβάθμισε την διαδικασία αυτή με σκοπό να μπορεί να εφαρμοστεί και κατά την κατασκευή της σήραγγας. Η αναβάθμιση αυτή δεν βελτίωσε μόνο τις αρχικές εκτιμήσεις που προέκυπταν από τα πραγματικά δεδομένα της εκσκαφής, αλλά επίσης έδινε την δυνατότητα στον χρήστη να έχει πλέον εκτιμήσεις και για το τμήμα της σήραγγας που δεν είχε ακόμη εκσκαφθεί. Το αναβαθμισμένο DAT, επιτρέπει την γραφική αναπαράσταση των αρχικών δεδομένων και των τελικών που προέκυψαν ύστερα από την επεξεργασία των πρώτων. Επιπλέον ένα μαθηματικό μοντέλο που βασίζεται στην θεωρία του Bayes, δίνει την δυνατότητα στον κώδικα να προτείνει σε ορισμένες περιπτώσεις βελτιωμένες παραμέτρους που εισάγονται ως δεδομένα. Η γνώση που παρείχε η εφαρμογή της μεθόδου DAT, έδωσε την δυνατότητα βελτίωσης των αποφάσεων που λαμβάνονταν για την σήραγγα, μειώνοντας την αβεβαιότητά τους.

4.2.2 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ Q TBM

Το 1999, σχεδιάστηκε μια μέθοδος πρόβλεψης του ρυθμού προχώρησης του TBM (PR: η απόσταση που έχει εκσκαφθεί διαιρούμενη τον χρόνο λειτουργίας του μηχανήματος κατά την διάρκεια μιας συνεχόμενης φάσης εκσκαφής) και εξέλιξης της εκσκαφής (AR: η πραγματική απόσταση που διανοίχθηκε και υποστηρίχθηκε διαιρούμενη με τον ολικό χρόνο, στον οποίο εντάσσονται και οι χρόνοι συντήρησης του TBM ή αστοχίας της σήραγγας) από τον Barton. Η μέθοδος αυτή βασίστηκε στο ευρύτερο σύστημα Q και στην μέση διατρητική ισχύ του TBM σε σχέση με την καταλληλότητα της αντοχής της βραχόμαζας και της τραχύτητάς της. Λαμβάνεται υπόψη ο προσανατολισμός την ασυνεχειών σε συνδυασμό με την συμπιεστική αντοχή η την αντοχή σημειακής φόρτισής του. Η φύση της τραχύτητας της βραχόμαζας υπολογίζεται μέσω του δείκτη ζωής του κοπτικού άκρου (CLI:Cutter Life Index). Το επίπεδο των τάσεων της βραχόμαζας λαμβάνεται επίσης υπόψη. Η νέα παράμετρος Q_{TBM} σύμφωνα με τον Barton μπορεί να προσδιοριστεί τόσο κατά την διάρκεια των μελετών καταλληλότητας του TBM, όσο και κατά την διάρκεια λειτουργίας του. Κατά την διάρκεια κατασκευής των σηράγγων πριν τον σχεδιασμό αυτού του συστήματος το πρόβλημα ήταν ότι έπρεπε να προστεθούν στην μέθοδο ανάλυσης παράμετροι αλληλεπίδρασης βραχόμαζας-μηχανήματος που να αξιολογούνται αποκλειστικά για την διάνοιξη με TBM, ενώ οι συμβατικές μέθοδοι κατάταξης αφορούσαν την ευστάθεια της σήραγγας και τα μέτρα υποστήριξης.

Οι παράμετροι του δείκτη Q_{TBM} είναι οι εξής:

$$Q_{TBM} = (RQD_o / J_n)\times(J_r/J_a)\times(J_w/SRF)\times(SIGMA/F^{10}/20^9)\times(20/CLI)\times(q/20)\times(\sigma_\theta /5)$$

Όπου:

- RQD_0=RQD(%) που υπολογίζεται κατά την διάνοιξη της σήραγγας
- J_n, J_r, J_a, J_w και SRF είναι οι μετρήσεις από το αρχικό σύστημα Q. Ο λόγος RQD_0/J_n εκφράζει το μέγεθος των τεμαχών βράχου. Οι δείκτες J_r/J_a χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών και παρουσιάζουν μεγάλο σφάλμα, όταν προκύπτουν από το συμβατικό σύστημα Q. Αφορούν το σύστημα ασυνεχειών που προκαλεί την μεγαλύτερη επιρροή στην ευστάθεια της σήραγγας, το οποίο είναι συνήθως αυτό που είναι παράλληλα στον άξονα της σήραγγας, ενώ ο δείκτης Q_{TBM}

εντείνει την προσοχή στο σύστημα ασυνεχειών που επηρεάζει κυρίως την διάνοιξη και είναι συνήθως αυτό που έχει ανισότροπη δομή παράλληλη στο μέτωπο της σήραγγας. Ο λόγος Jw/SRF από την άλλη εκφράζει την ενεργές τάσεις

- SIGMA=H αντοχή της βραχόμαζας σε MPa, η οποία υπολογίστηκε μέσω της εξίσωσης που περιλαμβάνει την τιμή Q_0 (την συμβατική Qβάση της κατεύθυνσης της σήραγγας.
- F= H μέση τάση του κοπής (ton,~10kN) μέσα από την ίδια ζώνη, εξομαλυμένη από 20tons. Ο λόγος SIGMA/(F19/209) εκφράζει την αντοχή και την θραύση.
- CLI=δείκτης ζωής κοπτικού (από NTH/NTNU, Bruland, 1998)
- Q= Ποσοστό χαλαζία %
- σ_θ= η διαξονική τάση στο μέτωπο της σήραγγας (MPa) κανονικοποιημένη σε βάθος 100m

Από την ανάλυση πολλών μελετών (145 περιπτώσεις) ο Barton κατέληξε σε μια απλή εξίσωση μεταξύ ρυθμού διείσδυσης και Q_{TBM}:

$$PR=5(Q_{TBM})^{-0.2}$$

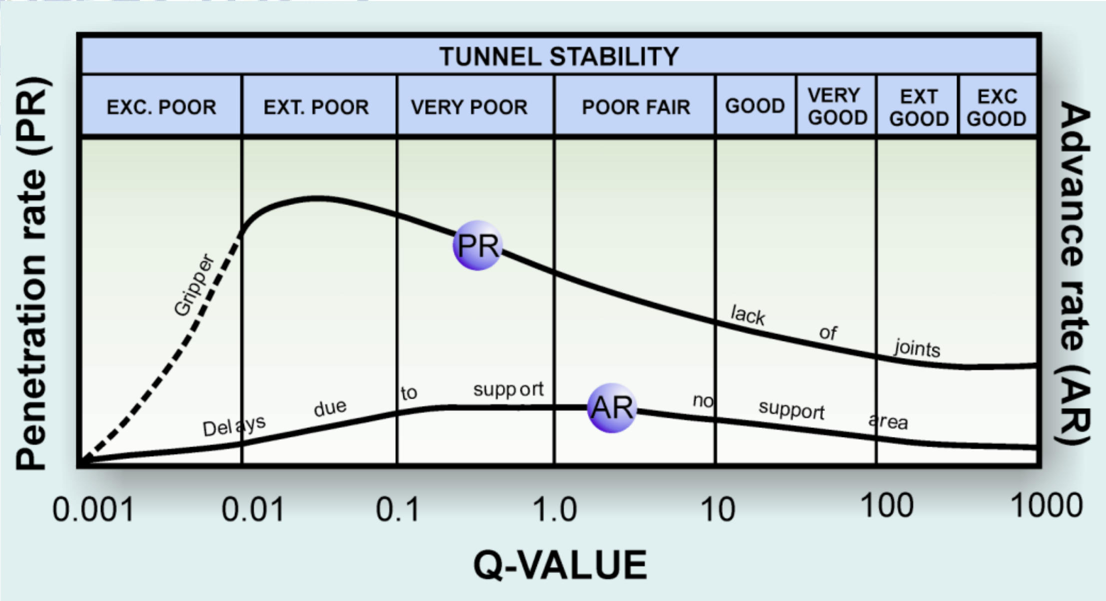
Η εξίσωση αυτή προβλέπει την αύξηση της δύναμης διείσδυσης με την μείωση του δείκτη Q_{TBM}. Ωστόσο η σχέση αυτή δίνει λογικά αποτελέσματα μόνο εάν ο δείκτης $Q_{TBM}>1$, αφού για βραχόμαζες φτωχής ποιότητας ο χρήστης θα μείωνε τον ρυθμό διείσδυσης λόγω των κακών συνθηκών της βραχόμαζας.

Το σύστημα Q_{TBM} επίσης επιτρέπει τον προσδιορισμό του ρυθμού εξέλιξης (AR) της εκσκαφής:

$$AR = PR \times T^m$$

Όπου

- T: είναι ο χρόνος σε ώρες
- m: είναι ένας αρνητικός πραγματικός αριθμός που μειώνει τον μέσο ρυθμό προχώρησης της σήραγγας με την αύξηση του χρόνου κατασκευής



Διάγραμμα 9: Αρχική συσχέτιση των παραμέτρων PR και AR με τη διακύμανση του δείκτη Q (Barton, 1998,2000)

4.2.3 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΔΕΙΚΤΗ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ (Vulnerability Index-VI)

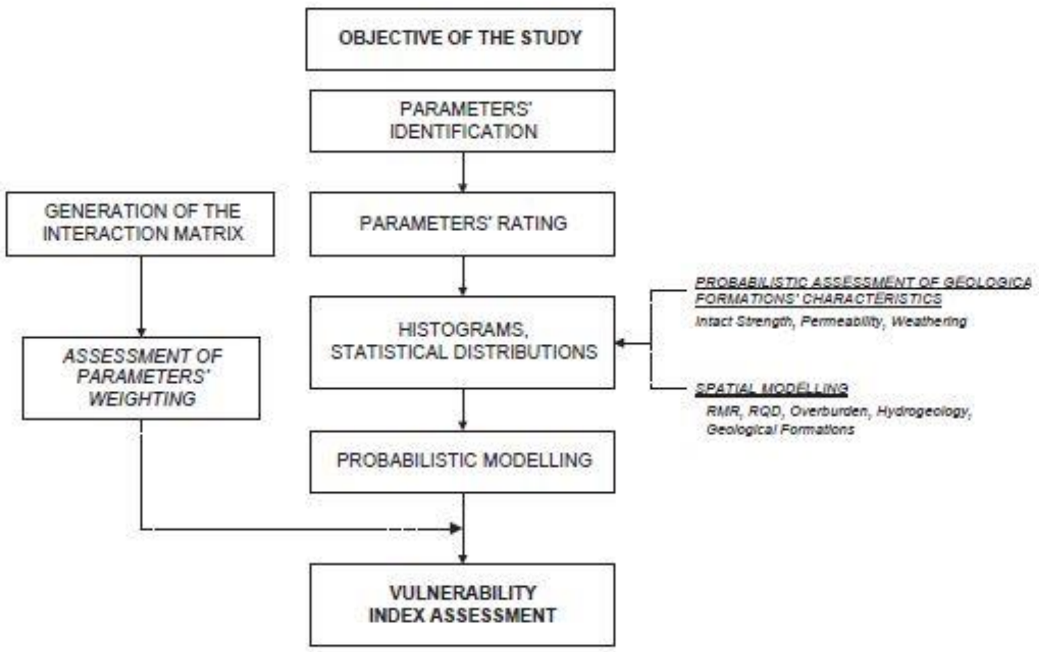
Για τον εντοπισμό των ευάλωτων θέσεων που μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα κατά την εκσκαφή, λαμβάνονται υπόψη δύο βασικά κριτήρια. Το πρώτο είναι η αναζήτηση των παραμέτρων που είναι υπεύθυνες για την πιθανότητα αστοχιών, η αξιολόγηση της συμπεριφοράς τους και η ανάλυση της επιρροής τους στις ολικές συνθήκες διακινδύνευσης του έργου. Δεν χρειάζεται απλώς να γίνει κατανοητή η σχετική σημασία της κάθε μίας παραμέτρου, αλλά και η αλληλεπίδρασή τους, αφού πιθανές απειλές στο έργο μπορεί να προκληθούν από την σχέση μεταξύ κάποιων παραμέτρων. Το δεύτερο κριτήριο είναι να ληφθεί υπόψη η αβεβαιότητα και η τρωτότητα των παραμέτρων. Επομένως η χρήση των μέσω τιμών των παραμέτρων δεν είναι σίγουρο ότι θα οδηγήσει σε αξιόπιστα αποτελέσματα, καθώς ορισμένες ακραίες τιμές μπορεί να επηρεάσουν τα λογικά συμπεράσματα της διάνοιξης.

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα θέματα αυτά, προτάθηκαν δύο μεθοδολογίες για την επεξεργασία αυτών των παραμέτρων. Η πρώτη αναφέρεται στις αρχές των τεχνικών συστημάτων κατάταξης του βράχου (Rock Engineering System-RES), όπου σύμφωνα με τον Hudson, βασίζεται στην αλληλεπίδραση ανάμεσα σε διαφορετικές τιμές της βραχόμαζας, σε μια προσπάθεια να ληφθούν όλες οι προοπτικές διακινδύνευσης υπόψη. Με αυτή την προσέγγιση, το βασικό εργαλείο περιγραφής και ανάλυσης των βασικών παραμέτρων και των μηχανισμών αλληλεπίδρασής τους είναι ένας πίνακας αλληλεπίδρασης. Μέσα από αυτόν μπορούν να υπολογιστούν οι σχέσεις ανάμεσα στις παραμέτρους, καθώς επίσης και η επιρροή που αυτές έχουν στο ολικό σύστημα.

Η δεύτερη μεθοδολογία, η διαχείριση και προσέγγιση της αβεβαιότητας, προκύπτει με την επιλογή μιας προσέγγισης των τιμών των παραμέτρων, που κάνει εφικτή την ποσοτική έκφρασή τους. Όπως ανέφερε και ο Hoek (Hoek E. M.uller Lecture Presented at 7th Congress of the International Society for Rock Mechanics, Aachen, Germany,September 1991), οι κλασσικές ντετερμινιστικές μέθοδοι γεωτεχνικής ανάλυσης πρέπει να αντικατασταθούν από αυτές της πιθανοτικής (propabilistic) ανάλυσης. Μία τέτοια ανάλυση είναι η μέθοδος του Monte-Carlo (Vose D.,1996), η οποία τοποθετεί τυχαίους αριθμούς σε δείγματα από γνωστές πιθανοτικές ταξινομήσεις και υπολογίζει συγκεκριμένα αποτελέσματα.

Συγκεκριμένα με την πιθανοτική μέθοδο, χρησιμοποιώντας το σύστημα GIS, χαρτογραφούνται και διαχειρίζονται τα δεδομένα. Επιπλέον ταξινομούνται χωρικά και οπτικοποιούνται σε μοντέλα και ταξινομήσεις οι θέσεις υπό εκσκαφή. Τα βασικά βήματα της πιθανολογικής μεθοδολογίας είναι τα εξής:

- Προσδιορισμός των βασικών παραμέτρων
- Επεξήγηση τον στατιτιστικών κατανομών που μοντελοποιούν την συμπεριφορά των παραμέτρων και η πιθανοτική μοντελοποίηση χρησιμοποιώντας την προσομοίωση του Monte-Carlo
- Ανάλυση της συνολικής επιρροής που έχουν οι επιλεγμένες παράμετροι στην διαδικασία της διάνοιξης, μέσα από την παραγωγή του πίνακα αλληλεπίδρασης.
- Προσδιορισμός του δείκτη τρωτότητας (VI)



Διάγραμμα 10: Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας προσδιοριμού του συντελεστή τρωτότητας (Benardos AG, Kaliampakos DC, 2004)

1: Επιλογή παραμέτρων

Οι βασικές παράμετροι που επιλέγονται για την εφαρμογή της πιθανολογικής μεθόδου είναι αυτές που απεικονίζουν καλύτερα τις γεωλογικές, γεωτεχνικές και υδρογεωλογικές συνθήκες στην θέση που θα κατασκευαστεί το έργο και που θα συναντήσει το TBM. Αυτές είναι:

- Δείκτης κερματισμού του πετρώματος (RQD)
- Δείκτης αποσάθρωσης
- Παράγοντας αστάθειας
- Ποιότητα βραχόμαζας μέσω της κατάταξης RMR
- Μοναξονική θλιπτική αντοχή βράχου (UCS)
- Ύψος υπερκείμενων
- Υδρογεωλογικές συνθήκες
- Υδροπερατότητα

2: Αξιολόγηση των παραμέτρων βάσεο της επιρροής τους στον δείκτη τρωτότητας

Η αξιολόγηση γίνεται χρησιμοποιώντας μια κλίμακα τεσσάρων κατηγοριών, από το 0 έως το 3, όπου η τιμή 0 αντιστοιχεί στην χειρότερες συνθήκες εκσκαφής, ενώ η τιμή 3 στις καλύτερες. Τα όρια κάθε κατηγορίας αντιστοιχούν στις συνθήκες εκσκαφής και στα χαρακτηριστικά του μηχανήματος.

3: Στατιστική κατανομή

Η στατιστική κατανομή με την οποία περιγράφεται η συμπεριφορά μιας παραμέτρου, χρησιμοποιείται με σκοπό να επιτευχθεί η πιθανοτική μοντελοποίηση. Συγκεκριμένα γίνεται διαχωρισμός σε δύο ομάδες, με την πρώτη να περιέχει της παραμέτρους που σχετίζονται με τους γεωλογικούς σχηματισμούς (UCS, υδροπερατότητα), ενώ η δεύτερη ομάδα περιλαμβάνει παραμέτρους που σχετίζονται με τις τοπικές συνθήκες (βαθμός κερματισμού, βάθος εκσκαφής κτλ). Η τιμή κάθε παραμέτρου της πρώτης ομάδας, για μια συγκεκριμένη θέση, είναι ένα προϊόν της τιμής της πιθανότητας μιας παραμέτρου για κάθε γεωλογικό σχηματισμό πολλαπλασιαζόμενης επί την πιθανότητας εμφάνισης του γεωλογικού σχηματισμού στην θέση κατασκευής. Το πιθανοτικό μοντέλο παρουσιάζεται έχοντας ως δεδομένα την κατανομή της κάθε παραμέτρου.

4: Σχεδιασμός του πίνακα αλληλεπίδρασης με τις τιμές των παραμέτρων

Η κατασκευή ενός τέτοιου πίνακα δίνει την δυνατότητα υπολογισμού της βαρύτητας της κάθε παραμέτρου στο ολικό σύστημα της βραχόμαζας. Οι βασικές παράμετροι βρίσκονται στην διαγώνιο του πίνακα, ενώ η αλληλεπίδρασή τους στα κελιά εκατέρωθεν της διαγωνίου. Η ένταση αυτών των μηχανισμών αλληλεπίδρασης υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τον κώδικα ESQ (Expert Semi-Quantitative) από τον Hudson, σύμφωνα με τον οποίο η ένταση της αλληλεπίδρασης ανάμεσα στις παραμέτρους απεικονίζεται με τιμές από το 0-4 (καθόλου αλληλεπίδραση-κρίσιμη αλληλεπίδραση).

Ουσιαστικά πρόκειται για έναν πίνακα που περιγράφει το «αίτιο» και το «αποτέλεσμα» των παραμέτρων. Συγκεκριμένα το άθροισμα των τιμών μιας σειράς στην οποία βρίσκεται η βασική παράμετρος στο αντίστοιχο κελί της διαγωνίου, εκφράζει την επιρροή της βασικής παραμέτρου σε όλες τις υπόλοιπες παραμέτρους (αίτιο). Αντίθετα το άθροισμα των τιμών της στήλης, στην οποία βρίσκεται και πάλι η βασική παράμετρος, εκφράζει την επιρροή των υπόλοιπων παραμέτρων στην βασική παράμετρο (αποτέλεσμα).

Προκύπτουν λοιπόν οι σχέσεις:

- Αίτιο : $C_{Pi} = \sum_{j=1}^{n} I_{ij}$
- Αποτέλεσμα: $E_{Pj} = \sum_{i=1}^{n} I_{ij}$
- Ένταση αλληλεπίδρασης: C+E
- Συντελεστής βαρύτητας παραμέτρου $a_\iota = \frac{(Ci+Ei)}{\sum_i Ci+\sum_i Ei}(\%)$

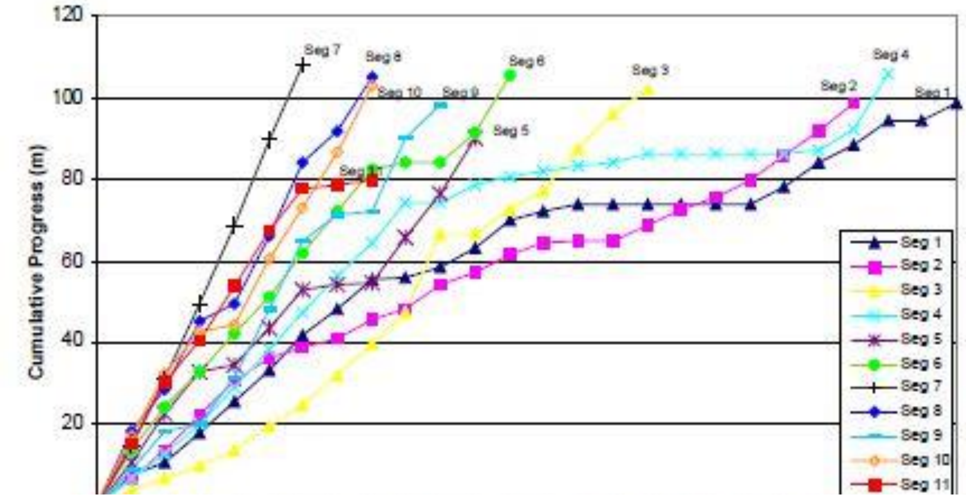
5: Προσδιορισμός συντελεστή τρωτότητας (VI)

Ο προσδιορισμός του VI μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό των δυνητικών προβλημάτων κατά την εκσκαφή. Εκφράζεται ως η γραμμική συσχέτιση του συντελεστή βαρύτητας (ai) και της βαθμονόμησης της παραμέτρου του όπως προκύπτει από την κατανομή των πιθανοτήτων για n παραμέτρους. Η σχέση του είναι:

$$VI = (100 - \sum_{i=1}^{n} a_i \frac{P_i}{P_{max}})$$

Ο δείκτη Pmax χρησιμοποιείται για να μετατρέψει τον συντελεστή τρωτότητας σε κλίμακα 0-100 τιμών.

Έχοντας υπολογίσει τον συντελεστή τρωτότητας, είναι δυνατόν να κατασκευαστεί ένα διάγραμμα συνολικής προόδου του έργου, απεικονίζοντας τα τμήματα της σήραγγας, και τον χρόνο που θα χρειαστεί για να κατασκευαστούν, ανάλογα με την τιμή του συντελεστή τρωτότητας.



Διάγραμμα 11: Η πρόοδος του έργου για κάθε τμήμα της σήραγγας βάσει του δείκτη τρωτότητάς του (Μετρό Αθήνας:Κατεχάκη-Πανόρμου (Benardos et al.2004)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΤΥΠΟΙ ΜΗΧΑΝΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΟΡΥΞΗΣ (TBM)

Το μηχάνημα διάνοιξης σηράγγων (TBM: Tunnel Boring Machine) είναι ένα μηχάνημα που χρησιμοποιείται για την κατασκευή σηράγγων συνήθως κυκλικής διατομής σε εδάφη και βράχο με διάμετρο που κυμαίνεται από 1-15m. Σε αυτή την μέθοδο εκσκαφής η διεύθυνση κοπής είναι κάθετη προς τον άξονα προωθήσεως του μηχανήματος. Μέσω της περιστροφικής κίνησης της κυκλικής κεφαλής του μηχανήματος και των κοπτικών εργαλείων που αυτή διαθέτει, γίνεται η εκσκαφή του πετρώματος. Η επιλογή της κοπτικής κεφαλής εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού. Πίσω από τον θάλαμο τοποθετούνται υδραυλικού γρύλοι, οι οποίοι προωθούν το μηχάνημα. Ένας τυπικός μέσος ρυθμός προώθησης ενός TBM την ημέρα είναι 10m, τοποθετώντας στα τμήματα που εκσκάφτηκαν επένδυση με δακτυλίους προκατασκευασμένων στοιχείων σκυροδέματος.

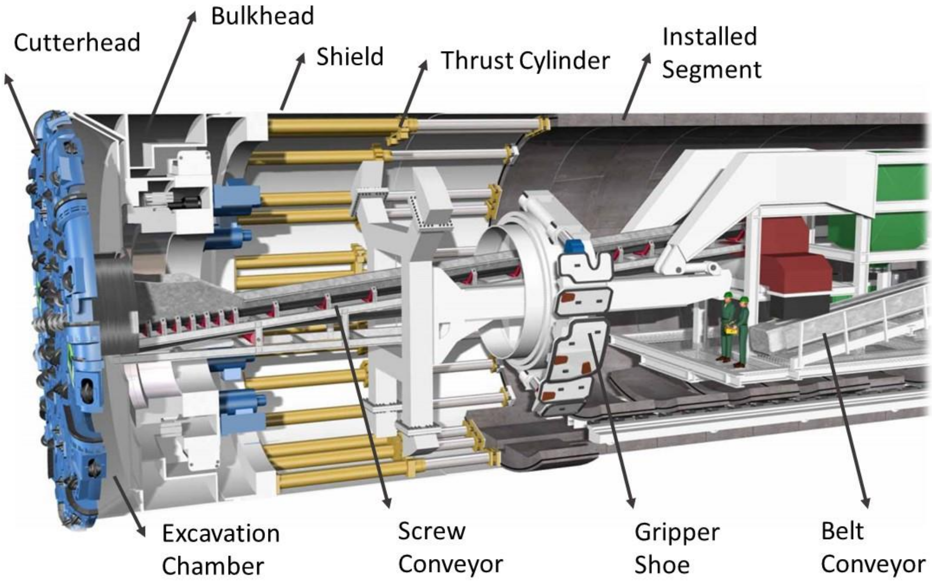
Αίτια για την ανάπτυξη της μηχανοποιημένης όρυξης είναι ότι πρόκειται για μια μέθοδο που δεν επηρεάζει την περίμετρο της εκσκαφής όπως θα έκανε η χρήση εκρηκτικών υλών. Σε περίπτωση καλής πρόβλεψης προχώρησης, μετά από σωστή τεχνικογεωλογική μελέτη, μπορεί να γίνει εκσκαφή ηπιότερη και με λιγότερη διαταραχή της βραχόμαζας. Ακόμη το TBM πλεονεκτεί στο ότι παρέχει την δυνατότητα συνεχούς λειτουργίας σε συνδυασμό με υψηλές ταχύτητες προχώρησης.

Το μεγαλύτερο μειονέκτημά του είναι το υψηλό του κόστος και ο χρόνος παράδοσης και προετοιμασίας του, ενώ σε περιπτώσεις λανθασμένης εκτίμησης των γεωλογικών συνθηκών, η τροποποίησή του για την σωστή του λειτουργία είναι δύσκολη.

Οι κατηγορίες των μηχανημάτων διάνοιξης σηράγγων μπορούν να διαχωριστούν ανάλογα με:

- τις μεθόδους εκσκαφής (ολομέτωπη κοπή ή μερική υποστήριξη του μετώπου εκσκαφής)
- τον τύπο της κεφαλής κοπής (περιστρεφόμενη ή μη περιστρεφόμενη)
- τις μεθόδους εξασφάλισης της δύναμης στήριξης και προώθησης του Μηχανήματος (πέδιλα στήριξης ή Προκατασκευασμένα στοιχεία)

Τα μηχανήματα σηράγγων TBM διακρίνονται σε μηχανήματα που είναι κατάλληλα για μαλακά εδάφη και σε αυτά που είναι κατάλληλα για μαλακό ή συμπαγή βράχο. Με νέες καινοτομίες δίνεται η δυνατότητα να προκύψει ένας συνδυασμός μηχανημάτων που θα είναι ικανά να εφαρμοστούν σε ένα μεγαλύτερο φάσμα γεωτεχνικών συνθηκών. Παρακάτω γίνεται μια αναφορά στους τύπους TBM βάση του τρόπου που εφαρμόζουν για την στήριξη του μετώπου.



Εικόνα 5: Τα στελέχη ενός μηχανήματος TBM. (1) κοπτική κεφαλή (cutterhead),(2) θάλαμος εκσκαφής (excavation chamber), (3) διάφραγμα (bulkhead), (4) ασπίδα (shield), (5) βύσματα ώθησης (thrust cylinder), (6) πέδιλα μετακίνησης, (gripper shoe), (7) στέλεχος επένδυσης (installed segment), (8) μεταφορέας (belt conveyor) (Railsystem.net)

5.1 TBM ΧΩΡΙΣ ΑΣΠΙΔΑ

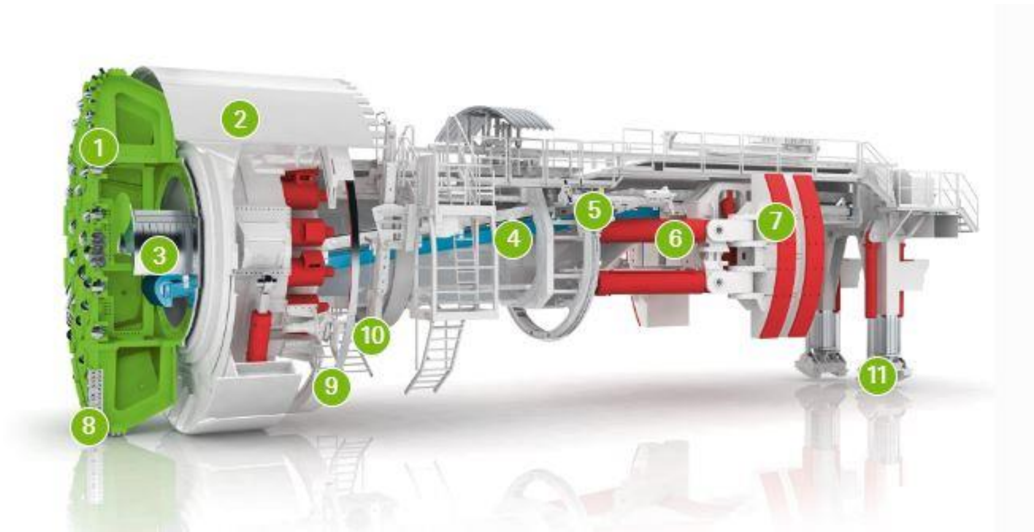
5.1.1 GRIPPER TBM

Λειτουργεί με την αξονική περιστροφή της κοπτικής κεφαλής παράλληλα στον άξονα της σήραγγας. Τα κοπτικά προκαλούν την ρωγμάτωση των σχηματισμών και ψύχονται με ένα υδραυλικό σύστημα προκειμένου να περιοριστεί και η σκόνη στο μηχάνημα. Ειδικές δεξαμενές που είναι τοποθετημένες στην κοπτική κεφαλή, συλλέγουν το εκσκαφθέν υλικό, το οποίο καταλήγει, σε έναν δακτύλιο στο κέντρο της κεφαλής και μέσω ειδικού συστήματος μεταφοράς φτάνει στο εξωτερικό της σήραγγας (Εικόνα 6)

Τα βασικά μέρη του μηχανήματος είναι:

1. Η κοπτική κεφαλή
2. Η ασπίδα της οροφής του μηχανήματος
3. Ο δακτύλιος συλλογής των εκσκαφθέντων υλικών
4. Ο μεταφορές
5. Στέλεχος ερευνητικών διατρήσεων
6. Βύσματα ώθησης
7. Πέδιλα ώθησης
8. Δεξαμενές

9. Σύστημα εγκατάστασης δοκών
10. Μονάδα εγκατάστασης αγκυρίων
11. Προσωρινή υποστήριξη για την περιοχή κοντά στα πέδιλα προώθησης



Εικόνα 6: Μέρη του μηχανήματος Gripper (Herrenknecht Tunneling Systems)

<u>ΠΕΔΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ</u>: Συμπαγή πετρώματα με μέση έως υψηλή ευστάθεια του μετώπου εκσκαφής. Ένα TBM χωρίς ασπίδα είναι κατάλληλο για βραχόμαζες που επιτρέπουν την ευστάθειά τους είτε με αυτουποστήριξη, είτε με την τοποθέτηση προσωρινών μέσων υποστήριξης, όπως μεταλλικά πλαίσια και εκτοξευμένο σκυρόδεμα. Είναι πιο οικονομικά από τα TBM με ασπίδα.

5.2 TBM ΜΕ ΑΣΠΙΔΑ - ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΤΟΥ ΜΕΤΩΠΟΥ

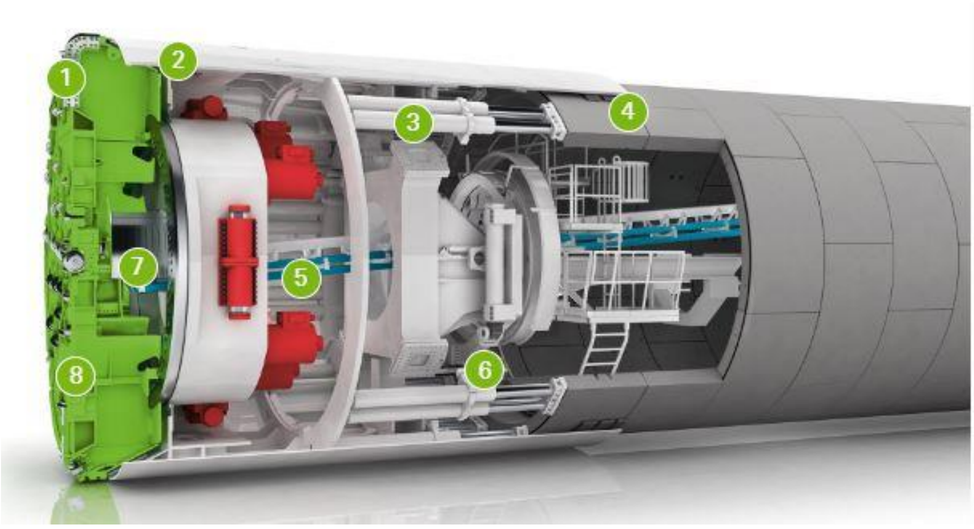
Τα TBM αυτής της κατηγορίας παρέχουν προσωρινή στήριξη σε ασταθή εδάφη, στο μέτωπο και στα τοιχώματα της σήραγγας. Είναι ιδανικά για βραχομάζες μικρότερης αντοχής και εδαφικά υλικά.. Το μηχάνημα προωθείται με την πίεση που ασκούν τα έμβολα στα προκατασκευασμένα στοιχεία της τελικής επένδυσης της σήραγγας.

5.2.1 TBM ΜΕ ΜΟΝΗ ΑΣΠΙΔΑ (SINGLE SHIELD TBM)

Το μηχάνημα είναι καλυμμένο με μια ασπίδα μικρότερης οριακά διαμέτρου από την διάμετρο της σήραγγας. Η επίπεδη κοπτική κεφαλή μειώνει τον παράγοντα διατάραξης του μετώπου, ενώ μειώνεται η πιθανότητα καταπτώσεων και διατάραξης των τάσεων. Κατά την διάρκεια της περιστροφής της κοπτικής κεφαλής, ένας δακτύλιος υδραυλικών κυλίνδρων παρέχει την δυνατότητα της εμπρόσθιας μετακίνησης του μηχανήματος, μέσω των πέδιλων ώθησης. Η εγκατάσταση των προκατασκευασμένων στοιχείων γίνεται σε δεύτερη φάση, πριν συνεχιστεί ο επόμενος κύκλος διάτρησης, αφού το μηχάνημα μονής ασπίδας δεν μπορεί να διατρήσει και παράλληλα να εγκαθιστά τα μέτρα υποστήριξης.

Τα βασικά μέρη του μηχανήματος μονής ασπίδας είναι τα εξής::

1. Δοχεία υποδοχής εκσκαφθέντος υλικού
2. Ασπίδα
3. Το σύστημα ώθησης, το οποίο αποτελείται από σειρές διαμηκών/υδραυλικών στελεχών, τοποθετημένων στο εσωτερικό της ασπίδας που υποστηρίζει την σήραγγα
4. Το τμήμα τοποθέτησης των μέτρων υποστήριξης
5. Ο διάδρομος απομάκρυνσης των εκσκαφθέντων υλικών από το κέντρο της κοπτικής κεφαλής
6. Το μηχάνημα τοποθέτησης των δακτυλίων υποστήριξης
7. Η κοπτική κεφαλή



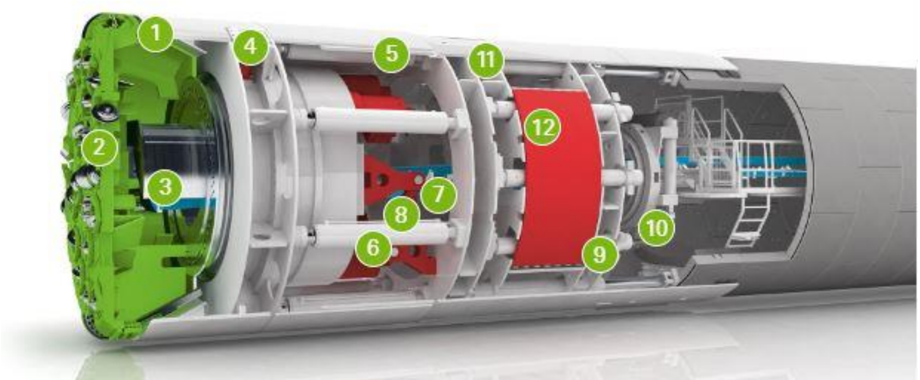
Εικόνα 7: Τα μέρη ενός TBM μονής ασπίδας (Herrenknecht Tunneling Systems)

ΠΕΔΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ: Κερματισμένες βραχόμαζες και ευσταθή στεγανά εδάφη. Λόγω της τοποθέτησης προκατασκευασμένων μέτρων και της υπογειας υδραυλικής προώθησης, μπορούν να παρατηρηθούν υψηλές επιδόσεις και σε βραχώδεις σχηματισμούς με χαμηλότερη ικανότητας αυτοϋποστήριξης.

5.2.2 TBM ΜΕ ΔΙΠΛΗ ΑΣΠΙΔΑ (DOUBLE SHIELD TBM)

Η λειτουργία τους συνδυάζει τις αρχές λειτουργίας του Gripper και του TBM μονής ασπίδας. Με τον συνδυασμό αυτών των αρχών παρέχει την δυνατότητα ενός συνεχούς κύκλου διάτρησης, αφού επιτρέπει την εγκατάσταση των προπατασκευασμένων στοιχείων υποστήριξης ταυτόχρονα με την προχώρηση του μετώπου. Το γεγονός αυτό το καθιστά πιο ευέλικτο και γρήγορο. Τα βασικά στελέχη του είναι:

1. Η εμπρόσθια ασπίδα
2. Η κοπτική κεφαλή
3. Ο δακτύλιος συλλογής του εκσκαφθέντος υλικού
4. Ο σταθεροποιητής έναντι κραδασμών που στοχεύει στον περιορισμό της φθοράς των στελεχών του TBM
5. Η τηλεσκοπική ασπίδα, η οποία βρίσκεται πάνω από την μπροστινή και την ασπίδα τύπου gripper (οπίσθια ασπίδα)
6. Το σύστημα ώθησης το οποίο είναι τοποθετημένο στην οπίσθια ασπίδα και αποτελείται από σειρές διαμηκών/υδραυλικών στελεχών
7. Ο διάδρομος απομάκρυνσης των εκσκαφθέντων υλικών από το κέντρο της κοπτικής κεφαλής
8. Κύλινδροι απορρόφησης των ροπών της κοπτικής κεφαλής
9. Έμβολα προώθησης που εφάπτονται στην θέση των ήδη τοποθετημένων προπαρασκευασμένων μέτρων υποστήριξης και ωθούν την οπίσθια ασπίδα μπροστά
10. Το μηχάνημα τοποθέτησης των δακτυλίων υποστήριξης
11. Η οπίσθια ασπίδα
12. Τα πέδιλα προώθησης



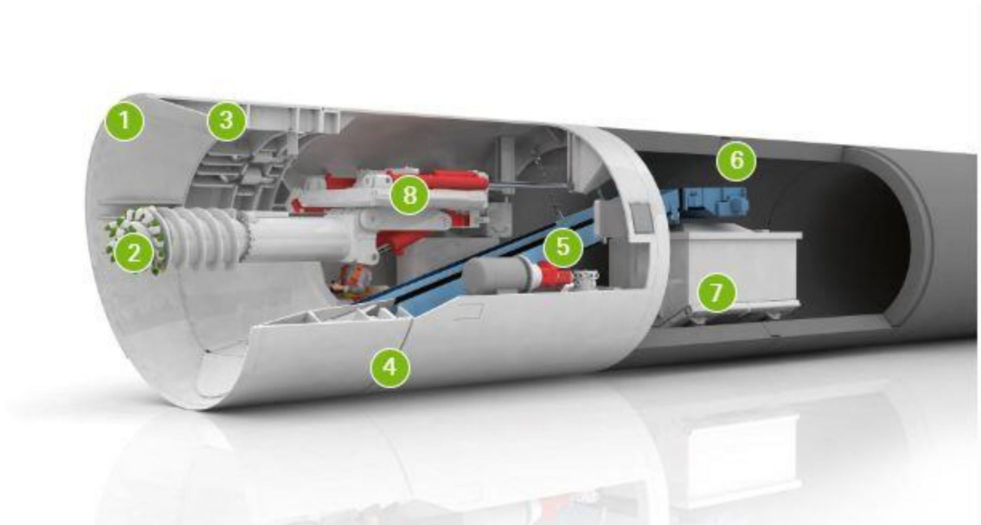
Εικόνα 8: Μέρη TBM διπλής ασπίδας (Herrenknecht Tunneling Systems)

__ΠΕΔΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ:__ Βραχόμαζες τα χαρακτηριστικά των οποίων ποικίλουν από ιδανικά έως φτωχά.

5.3 TBM ΜΕ ΑΣΠΙΔΑ - ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΜΕΤΩΠΟΥ (OPEN FACE SHIELD)

Πρόκειται για μηχανήματα που δεν παρέχουν υποστήριξη στο μέτωπο. Η εκσκαφή και η αντιστήριξη της σήραγγας γίνεται κάτω από την ασπίδα που αυτό διαθέτει. Συγκεκριμένα τοποθετεί προκατασκευασμένα στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος στα τοιχώματα της σήραγγας. Αποτελείται από:

1. Εμπρόσθια ασπίδα που επεκτείνεται στο επίπεδο της στέψης για να μειώσει την γωνία εσωτερικής τριβής των μη συνεκτικών γεωυλικών
2. Στέλεχος εκσκαφής
3. Ασπίδα επικάλυψης του μηχανήματος από την περιβάλλουσα γεωλογία
4. Αρθρωτό στέλεχος, το οποίο ελέγχει τον προσανατολισμό του μηχανήματος
5. Διάδρομος απομάκρυνσης υλικών εκσκαφής
6.
7. Μεταφορέας υλικών
8. Κύριο σύστημα ελέγχου, το οποίο παρέχει την απαραίτητη ενέργεια για όλες τις λειτουργίες των σκαπτικών εργαλείων



Εικόνα 9: Μέρη ενός TBM ανοικτού μετώπου OFS (Herrenknecht Tunneling Systems)

ΠΕΔΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ: Οι βραχώδεις σχηματισμοί μέτριας ποιότητας, μαλακά πετρώματα και συμπαγείς εδαφικοί σχηματισμοί, ενώ αδυνατεί να διανοίξει στο εσωτερικό πιο χαλαρών εδαφικών πετρωμάτων ή πολύ ισχυρών.

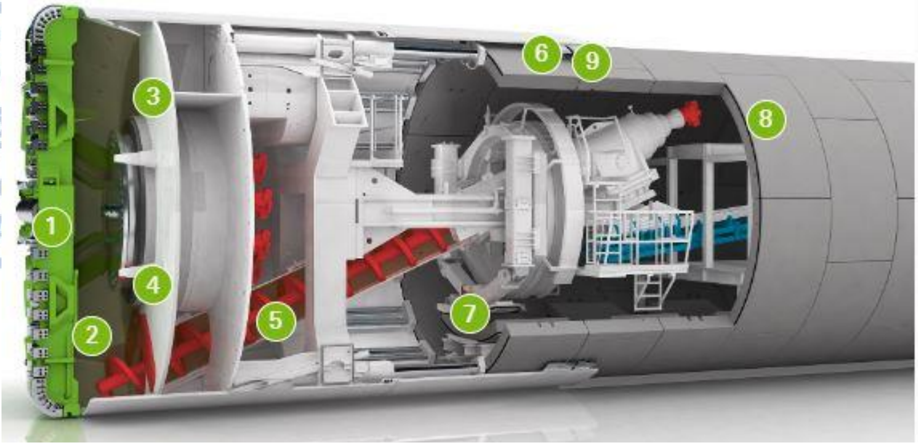
5.4 TBM ΜΕ ΑΣΠΙΔΑ - ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΗ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΤΟΥ ΜΕΤΩΠΟΥ

5.4.1 TBM ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΠΙΕΣΗΣ – ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΜΕΤΩΠΟΥ (EARTH PRESSURE BALANCE SHIELD-EPB)

Το TBM αυτού του τύπου μετατρέπει το εκσκαφθέν υλικό σε έναν πολφό εδάφους που χρησιμοποιείται για την υποστήριξη του μετωπου. Με αυτό τον τρόπο διατηρεί σταθερές συνθήκες πίεσης στο μέτωπο, αποφεύγοντας ανεξέλεγκτες ροές εδάφους στο μηχάνημα και σχηματίζοντας συνθήκες γρήγορης εκσκαφής με όσο το δυνατόν λιγότερες καθιζήσεις

Αποτελείται από:

1. Την κοπτική κεφαλή, ο οποίος διαθέτει τα κοπτικά στελέχη που απομακρύνουν το έδαφος από το μέτωπο εκσκαφής
2. Τον θάλαμο εκσκαφής, στον οποίο συγκεντρώνονται τα υλικά εκσκαφής και ο οποίος παρέχει την απαραίτητη πίεση υποστήριξης στο μέτωπο
3. Το διάφραγμα, το οποίο μεταφέρει την δύναμη κοπής στο μίγμα του εδάφους που υπάρχει στον θάλαμο εκσκαφής
4. Στελέχη που αναμειγνύουν το υλικό έτσι ώστε να αποκτήσει την κατάλληλη υφή
5. Τον κοχλία απομάκρυνσης υλικών,. Ανάλογα με την ταχύτητά του καθορίζει το ποσοστό του υλικού που θα απομακρυνθεί από τον θάλαμο εκσκαφή
6. Οπίσθια ασπίδα
7. Μηχάνημα τοποθέτησης δακτυλίων υποστήριξης
8. Τοποθέτηση προκατασκευασμένων μέτρων υποστήριξης
9. Το διάκενο της εκσκαφθείσας επιφάνειας και του εξωτερικού τμήματος της επενδυμένης σήραγγας σκυροδετείται.



Εικόνα 10: Τα μέρη του EPB (Herrenknecht Tunneling Systems)

<u>ΠΕΔΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ</u>: Χαλαρά πετρώματα, συνεκτικά ή μερικώς συνεκτικά εδάφη. Τα υψηλά ποσοστά ιλύος ή αργίλου θεωρούνται τα πλέον ιδανικά.

Πίνακας 22: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του TBM εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης.

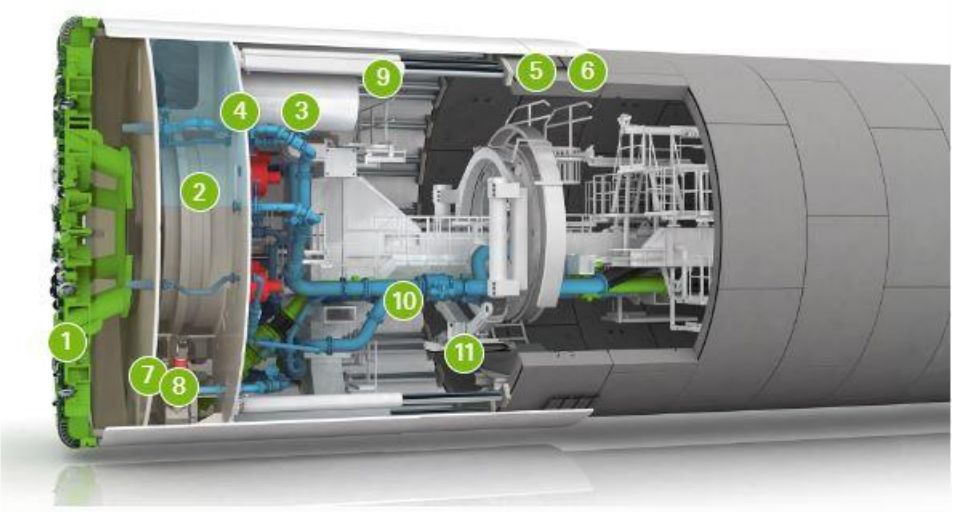
Πλεονεκτήματα EPB	Μειονεκτήματα EPB
Παρέχει γρηγορότερη και ασφαλέστερη διάνοιξη σε μαλακά, υγρά ή ασταθή εδάφη	Υψηλό κόστος κατασκευής
Περιορίζει τις καθιζήσεις των εδαφών και σχηματίζει λεία τοιχώματα στην σήραγγα, μειώνοντας το κόστος εσωτερικής επένδυσης του έργου	Δύσκολη μεταφορά
Κατάλληλα για αστικές σήραγγες	-

5.3.2 TBM ΠΟΛΦΟΥ ΜΠΕΝΤΟΝΙΤΗ (Slurry Shield)

Η αρχή λειτουργίας του Slurry είναι ίδια με αυτή του EPB. Δηλαδή πρόκειται για ένα μηχάνημα που υποστηρίζει το μέτωπο με άσκηση πίεσης όμως αντί για εδαφικό πολφό χρησιμοποιεί μπεντονίτη. Τα TBM αυτού του τύπου βασίζονται στην αρχή εισπίεσης πολφού μπεντονίτη στο χώρο του μετώπου. Έτσι το έδαφος του μετώπου διαποτίζεται με πολφό, ο οποίος στερεοποιείται, υποστηρίζοντας το μέτωπο. Καθώς η ασπίδα του μηχανήματος προχωράει εμπρός, η κοπτική κεφαλή του λειτουργεί εκσκάπτοντας το έδαφος. Αποτελείται από:

1. Κοπτικός τροχός
2. Αυτόματο στρώμα αέρα που επιτρέπει τον ακριβή έλεγχο της πίεσης του μετώπου στον θάλαμο εκσκαφής
3. Χώρος που επιτρέπει σε εξειδικευμένο προσωπικό να εισέρχεται στον υπό πίεση θάλαμο εκσκαφής
4. Διάφραγμα που διαχωρίζει τον χώρο του μηχανήματος στον οποίο επικρατεί ατμοσφαιρική πίεση, από την περιοχή του υπό πίεση θαλάμου

5. Οπίσθια ασπίδα
6. Το διάκενο της εκσκαφθείσας επιφάνειας και του εξωτερικού τμήματος της επενδυμένης σήραγγας σκυροδετείται
7. Κλειστό τοίχωμα, το οποίο διαχωρίζει τον θάλαμο εκσκαφής σε ένα τμήμα εργασίας και σε ένα τμήμα υπό πίεση
8. Σπαστήρας μεγάλων τεμαχώνσε κατάλληλο μέγεθος
9. Έμβολα προώθησης
10. Σύστημα πολφού μπεντονίτη που μεταφέρει την πίεση του μετώπου στον θάλαμο εκσκαφής και το μίγμα του εκσκαφθέντος υλικού πίσω στον χώρο διαχωρισμού
11. Μηχάνημα τοποθέτησης δακτυλίων υποστήριξης



Εικόνα 11: Μέρη TBM πολφού μπεντονίτη (Herrenknecht Tunneling Systems)

ΠΕΔΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ: Εδαφικά υλικά κυρίως αμμώδη και υδροπερατά

Πίνακας 23: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα TBM πολφού μπεντονίτη

Πλεονεκτήματα Slurry	Μειονεκτήματα Slurry
Παρέχει γρηγορότερη και ασφαλέστερη διάνοιξη σε μαλακά, υγρά ή ασταθή εδάφη	Υψηλό κόστος κατασκευής
Κατάλληλο για εδάφη με υψηλές υδροστατικές πιέσεις (κάτω από το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα)	Δύσκολη μεταφορά
Περιορίζει τις καθιζήσεις των εδαφών και σχηματίζει λεία τοιχώματα στην σήραγγα, μειώνοντας το κόστος εσωτερικής επένδυσης του έργου	Η προχώρηση μπορεί να καθυστερήσει , λόγω παρουσίας μεγάλων βραχώδων τεμαχών

5.3.3 TBM ΜΕ ΠΕΠΙΕΣΜΕΝΟ ΑΕΡΑ (COMPRESSED AIR TBM)

Η περιστρεφόμενη κοπτική κεφαλή συμπεριφέρεται ως το μέσο εκσκαφής, ενώ η υποστήριξη του μετώπου επιτυγχάνεται με την χρήση συμπιεσμένου αέρα σε ένα ικανοποιητικό επίπεδο έτσι ώστε να εξισορροπηθεί η υδροστατική πίεση του εδάφους. Τα υλικά που προκύπτουν απομακρύνονται από τον εισπιεζόμενο θάλαμο εκσκαφής χρησιμοποιώντας μια περιστρεφόμενη χοάνη και στην συνέχεια μεταφέρονται στο πρωτογενές σύστημα θραύσης.

ΠΕΔΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ: Εδάφη που στερούνται αυτουποστήριξης και έχουν υψηλή υδροπερατότητα ($k \leq 10^{-4}$ m/s). Υπό την παρουσία υπόγειων υδάτων. Η υψηλή διαπερατότητα μπορεί τοπικά να μειωθεί με τον ενεματωμένο πολφό μπετονίτη στο μέτωπο εκσκαφής. Το όριο λειτουργίας του μηχανήματος βασίζεται στην μέγιστη χρήση πεπιεσμένου αέρα που χρησιμοποιείται σε κάθε χώρα.

5.4 TBM ΜΙΚΤΗΣ ΑΣΠΙΔΑΣ – ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΜΕΤΩΠΟΥ

Η μορφή αυτής της ασπίδας μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διαφορετικές συνθήκες εκσκαφής, διαφοροποιώντας κυρίως το σύστημα εκσκαφής και υποστήριξης του μετώπου. Η εναλλαγή των τύπων λειτουργίας από κλειστό σε ανοικτό τύπο απαιτεί μηχανική παρέμβαση για την αλλαγή της διαμόρφωσης της μηχανής, ενώ χρησιμοποιούνται και διαφορετικές τεχνικές αποκομιδής των προϊόντων εκσκαφής. Διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

5.4.1 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΤΟΥ EPB ΜΕ ΤΟ TBM ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΜΕΤΩΠΟΥ

Μηχανές που μπορούν να λειτουργούν ως ανοικτού μετώπου, με μεταφορική ταινία απομάκρυνσης των προϊόντων εκσκαφής, και ως κλειστού τύπου, με υποστήριξη του μετώπου με εδαφική εξισορροπητική πίεση (EPBM) και κοχλιωτό μεταφορέα

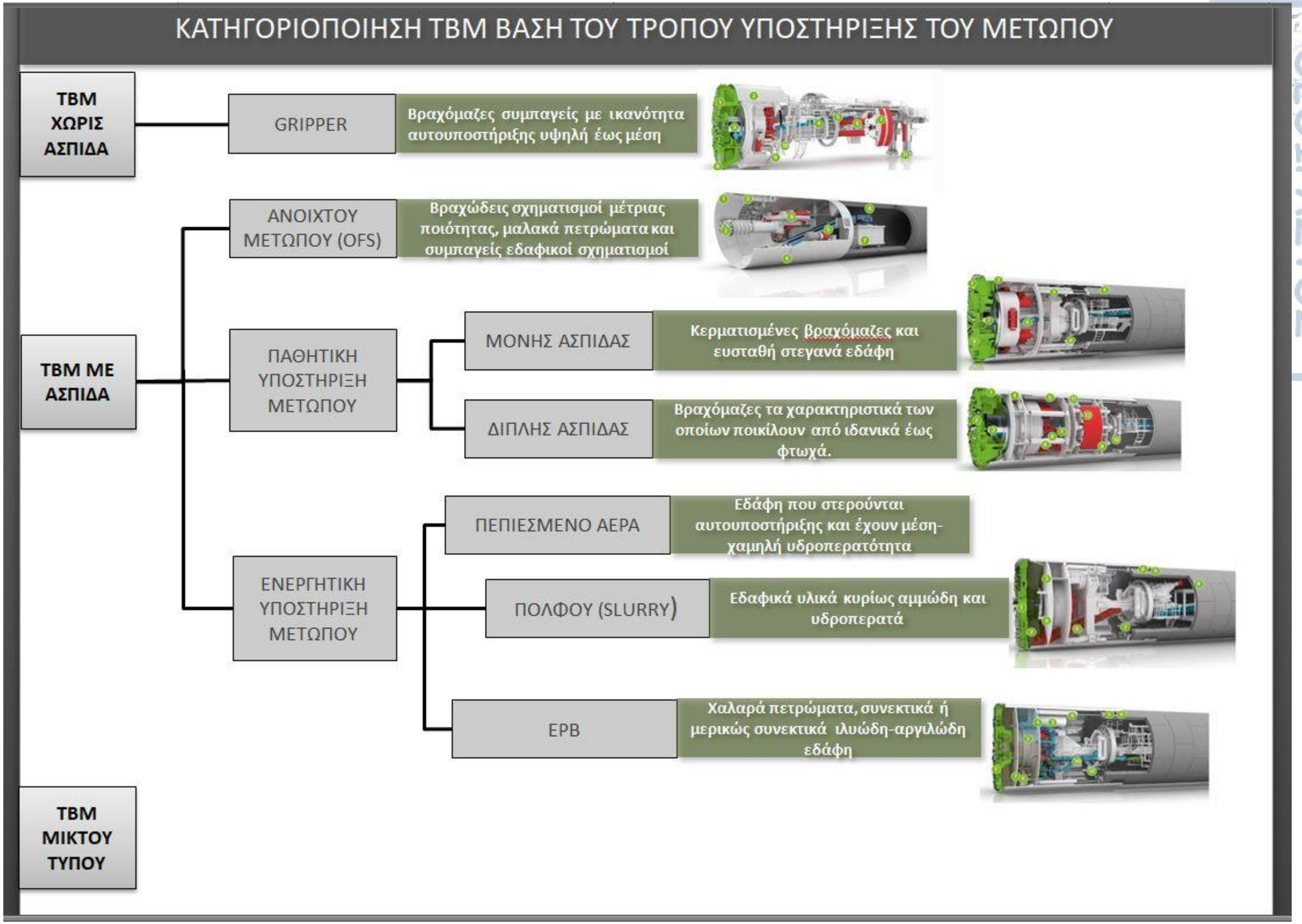
5.4.2 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΤΟΥ TBM ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΜΕΤΩΠΟΥ ΜΕ ΤΟ TBM ΠΟΛΦΟΥ ΜΠΕΝΤΟΝΙΤΗ

Μηχανές που μπορούν να λειτουργούν ως ανοικτού τύπου, με μεταφορική ταινία απομάκρυνσης των προϊόντων εκσκαφής, και ως κλειστού τύπου, με υποστήριξη του μετώπου με αιώρημα (slurry) και σύστημα υδραυλικής μεταφοράς των προϊόντων εκσκαφής, μετά την απενεργοποίηση της μεταφορικής ταινίας.

5.4.3 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ TBM ΠΟΛΦΟΥ-ΜΠΕΝΤΟΝΙΤΗ (SLURRY) ΜΕ TBM ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΤΙΚΗΣ ΠΙΕΣΗΣ (EPBM)

Και οι δύο τρόποι λειτουργούν με ένα σύστημα κλειστή πίεσης και ενεργούς πίεσης στο μέτωπο. Η βασική διαφορά οφείλεται στην θέση και στα χαρακτηριστικά της μέσης υποστήριξης, στον τρόπο μεταφοράς των εσκκαφθέντων υλικών και στον σχεδιασμό του θαλάμου εκσκαφής.

ΠΕΔΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ: Ετερογενή εδάφη κατά μήκος της σήραγγας.



Διάγραμμα 12: Οι κατηγορίες των TBM, ανάλογα με τον τρόπο στήριξης του μετώπου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΑΣΤΟΧΙΩΝ ΕΝΑΝΤΙ ΜΗΧΑΝΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ

Η εφαρμογή της μηχανοποιημένης διάνοιξης σήμερα είναι ευρέως διαδεδομένη, διότι επιτυγχάνεται με ένα μηχάνημα εξαιρετικά παραγωγικό, ασφαλές στην χρήση του με υψηλή ποιότητα κατασκευής και με χαμηλή επιβάρυνση στο περιβάλλον. Παρόλα αυτά πολλές φορές η εφαρμογή του TBM μπορεί να αντιμετωπίσει προβλήματα που μπορεί να αφορούν τις γεωλογικές και υδρογεωλογικές συνθήκες, τις μηχανολογικές αστάθειες του μηχανήματος ή την λανθασμένη χρήση του από το προσωπικό. Ο πιο σημαντικός κίνδυνος από αυτούς είναι ο γεωλογικός.

Η αναγκαιότητα ακρίβειας και αξιοπιστίας των γεωλογικών πληροφοριών, επιβαρύνει δυστυχώς το κόστος της γεωλογικής έρευνας με αποτέλεσμανα επιλέγονται πιο οικονομικές γεωλογικές προβλέψεις. Οι προβλέψεις αυτές όμως μπορεί να μην περιλαμβάνουν τις περιπτώσεις απρόβλεπτων και δύσκολων στην διαχείριση γεωλογικών συνθηκών. Τέτοιες είναι κυρίως οι αποκολλήσεις τεμαχών από τα τοιχώματα της σήραγγας, η διάνοιξη καμινάδων ή υπερεκσκαφών, καταρρεύσεις του μετώπου και δυσκολία στην κίνηση του TBM και μεγάλες παραμορφώσεις, λόγω συγκλίσεων. Η συμπεριφορά των βραχομαζών της σήραγγας σε αυτές τις συνθήκες εξαρτάται από την παρουσία ρηγμάτων, το ύψος των υπερκειμένων, τις υδρογεωλογικές συνθήκες και τον τύπο του TBM που έχει επιλεχθεί. Η λανθασμένη ή ελλιπής γεωλογική έρευνα μπορεί να οδηγήσει στη μείωση του ρυθμού διάνοιξης, στην καταστροφή του TBM, στην αλλοίωση της ποιότητας της σήραγγας ακόμη και σε ανθρώπινα ατυχήματα κατά την κατασκευή της.

Μια μέθοδος που θα συνδύαζε τις γεωλογικές συνθήκες και τις αστοχίες που αναμένονται με τον τύπο του TBM, θα περιόριζε σε μεγάλο βαθμό τις αβεβαιότητες που δημιουργούν οι εκάστοτε γεωλογικές συνθήκες, για την επιλογή των σωστών αποφάσεων σε ότι αφορά την ασφαλή διάνοιξη του έργου.

Ξεκινώντας λοιπόν με την σωστή αξιολόγηση της βραχόμαζας , περιγράφονται τα χαρακτηριστικά της, όπως ο δείκτης κερματισμού της, η τραχύτητά της, μέσω των συστημάτων RQD και GSI, η αντοχή της σε μοναξονική θλίψη UCS και τέλος το ύψος των υπερκειμένων και η θέση του υδροφόρου ορίζοντα για την εφαρμογή των συστημάτων ταξινόμησης Q, RMR. Στην συνέχεια, γνωρίζοντας τα χαρακτηριστικά της βραχόμαζας, προβλέπονται οι πιθανές αστοχίες που αναμένονται σε συνδυασμό ωστόσο με τον πιο κατάλληλο τύπο TBM που θα μπορούσε να ανταπεξέλθει σε αυτές. Όλα αυτά θα μπορούσαν να εκφραστούν εμπεριστατωμένα σε έναν πίνακα που με κύρια μέρη του τον τύπο της αστοχίας και τον τύπο του TBM θα μπορούσε να αποτελέσει οδηγό στην μηχανοποιημένη όρυξη των σηραγγών.

Παρακάτω αναλύονται οι γεωλογικοί παράγοντες που καθορίζουν την συμπεριφορά των γεωυλικών και την σωστή λειτουργία του TBM, ενώ παρουσιάζονται και κάποια χαρακτηριστικά παραδείγματα αστοχιών που επιβάρυναν τόσο το εργατικό δυναμικό του έργου, όσο και το χρονοδιάγραμμά του.

6.1 ΟΙ ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΚΑΘΟΡΙΖΟΥΝ ΤΗΝ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΓΕΩΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΗΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ TBM

6.1.1 ΑΝΤΟΧΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ

Η μοναξονική θλιπτική αντοχή (UCS) του πετρώματος επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τον ρυθμό της διάνοιξης, αφού η χαμηλότερη τιμή της οδηγεί στην υψηλότερη ταχύτητα διάνοιξης με το TBM. Ωστόσο η πολύ χαμηλή τιμή της, μειώνει και την ικανότητα αυτουποστήριξης της βραχόμαζας. Έτσι λοιπόν αυτή πρέπει να βρίσκεται μεταξύ κάποιων αποδεκτών ορίων, ώστε να είναι ικανή να αυτουποστηριχθεί, αλλά και να επιτρέπει καλούς ρυθμούς διάνοιξής της. Γι’αυτό τον λόγο τα TBM βράχου είναι ιδανικά για περιπτώσεις μέτριας έως υψηλής αντοχής βραχόμαζας με τιμές UCS=30MPa-150MPa.

6.1.2 ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ ΣΤΗΝ ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ

Συνήθως, όσο πιο αναπτυγμένες είναι οι ασυνέχειες του βράχου, τόσο πιο γρήγορη είναι η διάνοιξη με το TBM. Οι βράχοι χωρίς ασυνέχειες, είναι συμπαγείς και δύσκολοι στην θραύση, ενώ οι βραχόμαζες με καλά ανεπτυγμένο σύστημα ασυνεχειών είναι εύκολες στην θραύση, παρουσιάζουν ωστόσο αδυναμία στην αυτουποστήριξή τους. Παρέχουν με αυτό τον τρόπο ανεπαρκή δύναμη στις λαβές του TBM (grippers) με αποτέλεσμα η δύναμη ωθήσεως να είναι χαμηλή και οι εργασίες υποστήριξης ανεπαρκείς. Η δομή της βραχόμαζας είναι πιο ανεπτυγμένη, όταν η πυκνότητά της είναι υψηλότερη, η απόσταση των ασυνεχειών μικρότερη, ο συντελεστής ακεραιότητάς της μικρότερος και αποτελεσματικά και ο ρυθμός διάνοιξης υψηλότερος. Ωστόσο όταν η δομή της βραχόμαζας είναι υπερβολικά ανεπτυγμένη, η πυκνότητα, η απόσταση των ασυνεχειών και ο δείκτης ακεραιότητας έχουν πολύ χαμηλές τιμές, με αποτέλεσμα η βραχόμαζα να είναι χαλαρή, κατακερματισμένη και ασταθής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ταχύτητα της διάνοιξης να μην αυξάνεται σε τέτοιο βράχο, αφού χρειάζεται παραπάνω εργασία μέχρι να σταθεροποιηθεί η βραχόμαζα που είναι ασταθής. Η ανάπτυξη των ασυνεχειών και η δομή του πετρώματος περιγράφεται με το σύστημα GSI, καθώς επίσης και με τον δείκτη κερματισμού RQD.

6.1.3 Η ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ

Πρόκειται για ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά της για τον καθορισμό του κοπτικού άκρου. Μπορεί να περιγραφεί ποιοτικά με το σύστημα GIS ή με εργαστηριακές δοκιμές. Κάτω από τις ίδιες συνθήκες, η υψηλότερη τραχύτητα του βράχου οδηγεί στην ανάγκη περισσότερων κοπτικών κεφαλών και κοπτικών άκρων. Η αυξημένη συχνότητα και ο χρόνος της αντικατάστασης των κοπτικών μπορεί να καταστρέψει τα οικονομικά οφέλη του έργου και να καθυστερήσει την ολοκλήρωσή του. Η φθορά των κοπτικών άκρων και δακτυλίων αυξάνει το κόστος χρήσης του TBM. Η σκληρότητα του πετρώματος, το μέγεθος και το περιεχόμενο κάποιων κόκκων (ειδικά αυτών του χαλαζία) καθορίζουν την τραχύτητα του πετρώματος. Γενικά μιλώντας, η υψηλότερη σκληρότητα του πετρώματος οδηγεί σε αυξημένη χρήση κοπτικών και μειωμένο ρυθμό διάνοιξης.

6.1.4 Ο ΚΥΡΙΟΣ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ ΤΟΥ ΒΡΑΧΟΥ

Στην περίπτωση όπου η γωνία ανάμεσα στην κύρια επιφάνεια ασυνέχειας του μετώπου και του άξονα της σήραγγας είναι μικρότερη από 45° και η γωνία βύθισης της ασυνέχειας είναι ≤30°, τότε η οροφή της σήραγγας και τα τοιχώματά της είναι επιρρεπή στην πτώση ως αποτέλεσμα ασταθών σφηνών που σχηματίζονται λόγω της κύριας επιφάνειας ασυνέχειας και της επιφάνειας του μετώπου. Το γεγονός αυτό έχει αρνητικό αντίκτυπο στην λειτουργία του TBM.

6.1.5 ΤΟ ΥΨΟΣ ΤΩΝ ΥΠΕΡΚΕΙΜΕΝΩΝ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ

Κάτω από υψηλά πάχη υπερκειμένων, το σκληρό πέτρωμα, το οποίο είναι θραυσιγενές και άρρηκτο, είναι επιρρεπές σε εκρηκτική συμπεριφορά και σε σοβαρές περιπτώσεις προκαλεί την αδυναμία κατασκευής της σήραγγας. Αντίθετα οι πιο μαλακοί βράχοι έχουν την ικανότητα να παραμορφώνονται κάτω από υψηλά υπερκείμενα, προκαλώντας όμως εξίσου δύσκολες συνθήκες εκσκαφής.

6.1.6 ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΥΔΡΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ

Το περιεχόμενο νερό και η περιεχόμενη υγρασία του πετρώματος επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την κατασκευή ης σήραγγας με TBM. Γενικά, η αντοχή του πετρώματος, ειδικά σε πιο μαλακά πετρώματα, ελαττώνεται στην περίπτωση που αυτό είναι υδροπερατό και παρουσιάζει περιεχόμενη υγρασία. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται η ικανότητα της ευστάθειας του υλικού. Οι μεγάλης κλίμακας εισροές δεν δυσχεραίνουν μόνο τις συνθήκες λειτουργίας του TBM, αλλά ελαττώνουν και τους ρυθμούς εξέλιξης της κατασκευής, προκαλώντας παράλληλα και φθορές στον εξοπλισμό και στο προσωπικό.

6.1.7 ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΚΟΙΛΟΤΗΤΩΝ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ

Οι υπόγειες κοιλότητες μπορεί να οφείλονται σε τεχνητά μέσα, όπως θαμμένα πηγάδια ή αρχαιολογικά ευρήματα και σε φυσικά μέσα όπως η καρστικοποίηση. Εμφανίζονται σε μεγαλύτερα βάθη και παρουσιάζουν αγωγιμότητα στην δράση του νερού. Οι φυσικές κοιλότητες των κάρστ μπορούν να διευρύνονται διαρκώς από τις υδραυλικές δυνάμεις που ασκούνται από το νερό των διακλάσεων και ρωγμώσεων στο πέτρωμα.

6.2 ΟΙ ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΙ ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΜΕ TBM

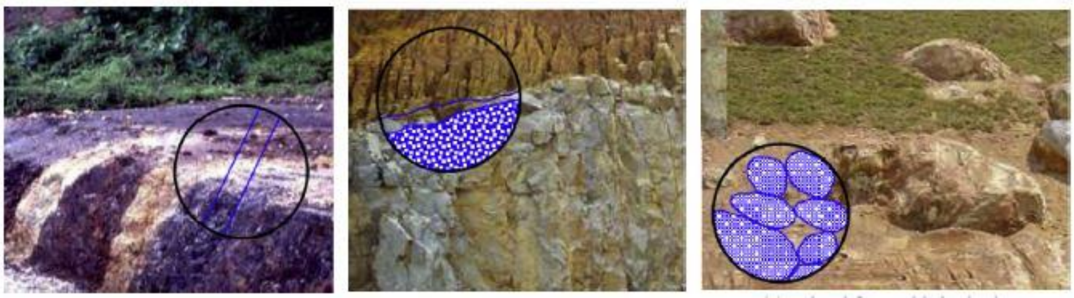
Οι βασικοί γεωλογικοί κίνδυνοι διακρίνονται σε πέντε ομάδες που μπορεί να επηρεάσουν την ευστάθεια του μετώπου της σήραγγας, τα τοιχώματά της και την σχέση της με την επιφάνεια. Αυτές είναι:

1. Η παραμόρφωση της βραχομάζας
2. Οι εκτινάξεις σε μεγάλα βάθη
3. Η κατάρρευση ή υπερεκσκαφή διακλασμένης ζώνης ή μαλακού βράχου
4. Καθιζήσεις σε αστικό περιβάλλον
5. Η εισροή νερού και οι διαρροές από το μέτωπο της σήραγγας και τον περιβάλλοντα βράχο
6. Η διαρροή αερίου

6.2.1 ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΜΕ TBM ΣΕ ΜΙΚΤΟ ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ

Ως μικτά εδάφη θεωρούνται αυτά που αποτελούνται ταυτόχρονα από δύο ή περισσότερους γεωλογικούς σχηματισμούς με τελείως διαφορετικά μηχανικά, τεχνικογεωλογικά ή/και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά, ή από τον ίδιο γεωλογικό σχηματισμό με διαφορετικούς βαθμούς αποσάθρωσης. Ειδικά για την διάνοιξη με TBM, έχουν δοθεί κάποιες διαφορετικές ερμηνείες ανάλογα με την επιρροή των μικτών γεωλογικών συνθηκών στην λειτουργία του TBM. Προέκυψε λοιπόν μια κατηγοριοποίηση σε τρεις περιπτώσεις, η οποίες είναι

1. Στρωσιγενές έδαφος σχηματισμένο από ιζηματογενείς στρώσεις, φλέβες, ρήγματα ή ζώνες διάρρηξης
2. Διεπαφή επιφάνειας εδάφους και βράχου με συνηθισμένη την παρουσία αποσαθρωμένων υλικών
3. Μικτό μέτωπο με κροκάλες ή λατύπες που περιβάλλονται από εδάφη ή μαλακούς σχηματισμούς



Εικόνα 12: (1) Στρωσιγενές έδαφος, (2) Διεπαφή επιφάνειας εδάφους/βράχου, (3) Μικτό μέτωπο με τεμάχη από κροκάλες ή λατύπες που περιβάλλονται από έδαφος (Toth et al., 2013)

Γενικά τα προβλήματα που αντιμετωπίζονται κατά την διάνοιξη με TBM σε μικτά εδάφη οφείλονται κυρίως στην αλληλεπίδραση κοπτικής κεφαλής με το μέτωπο εκσκαφής. Λόγω των απότομων μεταβολών των μηχανικών χαρακτηριστικών των γεωλογικών σχηματισμών, τα κοπτικά άκρα που λειτουργούν στο πιο ισχυρό τμήμα του μετώπου παραλαμβάνουν περισσότερη ώθηση απ' ότι αυτά στο ασθενέστερο τμήμα, οδηγώντας σε άνιση πίεση στο μέτωπο της σήραγγας. Η άνιση πίεση του μετώπου, όπως και οι έντονες δονήσεις που προκαλούν τα κοπτικά που γυρνούν από το μαλακό έδαφος στον σκληρό βράχο, μπορεί να οδηγήσουν σε εξαιρετικά ανομοιογενή εκσκαφή και σε προβλήματα γεωλογικών κινδύνων όπως:

- Καταρρεύσεις και αστάθεια του μετώπου συμπεριλαμβάνοντας την περίπτωση της υπερεκσκαφής του σε εδαφικούς ή ασθενείς σχηματισμούς
- Καθίζηση
- Κατάρρευση του εδάφους στην επιφάνεια
- Εισροές νερού

Οι συνθήκες μικτού μετώπου συνήθως συνδυάζονται με άφθονη παρουσία υπόγειου νερού λόγω των υψηλών επιπέδων υδροπερατότητας ανάμεσα στους διαφορετικούς σχηματισμούς. Επηρεάζεται με αυτό τον τρόπο η ευστάθεια του μετώπου, προκαλώντας δυσκολίες στην απομάκρυνση των υλικών που προκύπτουν απ την εκσκαφή και στην υποστήριξη της σήραγγας (Zhao et al., 2007). Επιπλέον τα μεγάλα χαλίκια και οι κροκάλες που δεν έχουν σπάσει και βρίσκονται στο μικτό μέτωπο, μπορεί να μπλοκάρουν την μετακίνηση των κερματισμένων από την εκσκαφή υλικών, τόσο στον θάλαμο της κοπτικής κεφαλής, όσο και στο σύστημα μεταφοράς.

6.2.2 ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΜΕ TBM ΣΕ ΚΕΡΜΑΤΙΣΜΕΝΕΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΕΣ

Οι βραχόμαζες είναι συχνά κερματισμένες και ο βαθμός κερματισμού τους μπορεί να προσδιοριστεί με δείκτες όπως το RQD, η απόσταση των ασυνεχειών και το μέγεθος των τεμαχών. Ο δείκτης γεωλογικής αντοχής (GSI) διακρίνει της βραχόμαζες σε κερματισμένες, πολύ κερματισμένες και επακόλουθα σε αποδομημένες ή διατμημένες, που παρατηρούνται συνήθως σε ζώνες ρηγμάτων ή ζώνες διάτμησης. Οι κερματισμένες βραχόμαζες σε σχέση με τις δυσκολίες που μπορεί να προκαλέσουν στα TBM, διακρίνονται σε τρείς ομάδες

1. Την κερματισμένη βραχόμαζα, που αντιπροσωπεύεται κυρίως από ανομοιογενή μέτωπα εκσκαφής, λόγω των τεμαχώδων δομών
2. Την κατακερματισμένη βραχόμαζα που αντιπροσωπεύεται από υψηλό βαθμό κερματισμού και μικρές αποστάσεις ασυνεχειών
3. Τις ζώνες ρηγμάτων ή διατμήσεων, οι οποίες εμφανίζουν χαρακτηριστικά αποδομημένες ζώνες λόγω της διάτμησης. Αυτή η ζώνη συνήθως αποτελείται από χαλαρά και μαλακά υλικά με την παρουσία υπόγειων υδάτων.

Γενικά τα προβλήματα που αντιμετωπίζουν τα TBM σε κερματισμένες βραχόμαζες μπορούν να μελετηθούν σε τρία μέρη: το μέτωπο εκσκαφής, τα τοιχώματα της σήραγγας και την εισροή του νερού. Όταν η βραχόμαζα είναι κερματισμένη ή κατακερματισμένη με μη ευνοϊκό προσανατολισμό, το κερματισμένο μέτωπο της σήραγγας μπορεί να καταρρεύσει, να καταστρέψει την κοπτική κεφαλή και να την μπλοκάρει. Το γεγονός αυτό μπορεί να προκαλέσει :Μεγάλες εναλλαγές της δύναμης κοπής και μεγάλο δυναμικό αντίκτυπο λόγω του ανομοιογενούς σχήματος του μετώπου, που μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφή του κοπτικού άκρου

(1) Εκτεταμένες δονήσεις της κοπτικής κεφαλής μπορεί να οδηγήσουν σε αστάθεια του μετώπου
(2) Υπερβολική φθορά του συστήματος μεταφοράς των κερματισμένων υλικών που οφείλεται στις μεγάλες διαστάσεις τους και στο σχήμα τους

Στην περίπτωση των ρηγμάτων και των ζωνών διάτμησης τα τυπικά προβλήματα που αντιμετωπίζει το TBM είναι:

1. Αστάθεια του μετώπου εκσκαφής , κυρίως τα ασθενή και χαλαρά υλικά στις ζώνες των ρηγμάτων και των διατμήσεων
2. Εκτεταμένη υπερεκσκαφή της σήραγγας, λόγω των κατακερματισμένων και πολύ ασθενών δομών βραχόμαζας
3. Εκτεταμένη παραμόρφωση, λόγω της χαμηλής αντοχής και μεγάλης παραμορφωσιμότητας των ασθενών βραχομαζών και των ζωνών ρηγμάτων
4. Συχνές μεταβολές των τάσεων και μετατοπίσεις, λόγω της παρουσίας του ρήγματος
5. Ισχυρή εισροή νερού, συνήθως στις ζώνες ρηγμάτων που παρέχουν κενές διόδους ροής του υπόγειου νερού

Όσο αφορά τον ρυθμό εκσκαφής του TBM, η κερματισμένη βραχόμαζα μπορεί να τον ενισχύσει. Ωστόσο ο πυκνός κερματισμός, οδηγεί σε αλλαγές στις ανάγκες υποστήριξης, σε βλάβες στην κοπτική κεφαλή και σε καταρρεύσεις τεμαχών με αποτέλεσμα να μειώνεται ο ρυθμός αυτός.

6.2.3 ΔΙΑΝΟΙΞΗ TBM ΣΕ ΒΡΑΧΟΜΑΖΕΣ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

Στην διάνοιξη βαθιών σηράγγων με μεγάλα υπερκείμενα απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή και διαχείριση των υψηλών τάσεων. Οι βραχόμαζες που δέχονται υψηλές τάσεις (μόνο θραυσιγενείς ή σκληρές) μπορούν να διαχωριστούν σε τρείς κατηγορίες βάση της θραύσης τους από το TBM και ταυτόχρονα του τύπου αστοχίας τους:

1. Η συμπιεσμένη βραχόμαζα που δεν προκαλεί τασικές αστοχίες κατά την διάνοιξη με TBM
2. Η συμπιεσμένη βραχόμαζα που μπορεί να προκαλέσει τασικές αστοχίες κατά την διάνοιξη με TBM
3. Η συμπιεσμένη βραχόμαζα που μπορεί να προκαλέσει εκρηκτική αστοχία κατά την διάρκεια της διάνοιξης με TBM

Στην πρώτη περίπτωση οι τοπικές τάσεις αυξάνουν τις τάσεις συγκράτησης της βραχόμαζας. Με την αύξηση των τοπικών τάσεων, περιορίζεται ο κερματισμός του βράχου από το TBM και χρειάζεται περισσότερη δύναμη ώθησης για την αποτελεσματική θραύση του. Κατά συνέπεια το ποσοστό της διείσδυσης του TBM μειώνεται με την αύξηση των επιτόπου τάσεων. Για την δεύτερη κατηγορία, η επαγόμενη τάση προκαλεί γενικά τον σχηματισμό περισσότερων ασυνεχειών στο μέτωπο της σήραγγας και στα τοιχώματά της. Ο κερματισμός του βράχου από το TBM είναι ευκολότερος. Ο δείκτης αντίστασης της βραχόμαζας μειώνεται και αυξάνεται ο ρυθμός διείσδυσης του TBM με την αύξηση των τοπικών τάσεων. Τέλος στην τρίτη κατηγορία η επιρροή των εντατικών εκρήξεων του βράχου στην διάνοιξη με TBM είναι περίπλοκη, αφού επηρεάζει κυρίως το ποσοστό πρώθησης του TBM, λόγω της φθοράς των κοπτικών, του συστήματος απομάκρυνσης των κομμένων τεμαχών και της δυσκολίας στήριξης των στελεχών προώθησης στα τοιχώματα. Έτσι κάτω από αυτές τις συνθήκες, πρέπει να ληφθούν ειδικά μέτρα για να αποφευχθεί αυτή η επιρροή των βράχων στο ποσοστό προώθησης του TBM και όχι τόσο στην ταχύτητα διείσδυσής του.

Από την άλλη πλευρά, ο μαλακός/αδύναμος βράχος παρουσιάζει παραμόρφωση κάτω από συνθήκες υψηλών τάσεων, η οποία οδηγεί το πέτρωμα σε μαζική συμπίεση γύρω από την σήραγγα που σχετίζεται με ερπυσμό των πετρωμάτων, λόγω της υπέρβασης των ορίων τάσεων διάτμησης. Η παραμόρφωση λόγω συμπίεσης της βραχόμαζας (squeezing) μπορεί να τερματιστεί κατά την διάρκεια της κατασκευής ή να συνεχιστεί για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Η εκσκαφή της σήραγγας συνήθως μεταβάλλει την κατανομή των τάσεων από σταθερό επίπεδο σε ασταθές. Από την στιγμή που η πίεση που ασκεί η εκσκαφή είναι επαρκής, προκαλείται τασική αστοχία του βράχου. Για τις υψηλές τάσεις στο μέτωπο της σήραγγας, οι τασικές αστοχίες με ή χωρίς επιφάνειες αδυναμίας (σχιστότητα η στρώση) μπορεί να προκαλέσουν υποβιβασμό της κατάστασης του μετώπου ή αστοχία του. Οι προϋπάρχουσες ασυνέχειες μπορεί να ενισχύσουν την διαδικασία υποβιβασμού του μετώπου και να δημιουργηθούν νέες ομάδες ασυνεχειών μπροστά από την κοπτική κεφαλή του TBM. Για την βραχόμαζες υψηλών τάσεων στα τοιχώματα της σήραγγας, οι εκρήξεις βράχων, οι συγκλίσεις, η πλακώδης θραύση και ο σχηματισμών μικρών ρωγμών μπορεί να παρουσιαστούν κατά την διάνοιξη. Ωστόσο από την μέχρι τώρα εμπειρία, τα μέτωπα των σηράγγων είναι πιο επιρρεπή σε τασικές αστοχίες.

Με βάση τις παραπάνω περιγραφές τα βασικά προβλήματα που μπορεί να παρουσιαστούν σε μια σήραγγα κάτω από υψηλό επίπεδο τάσεων είναι:

1. Χαμηλή απόδοση κοπής και αυξημένη κατανάλωση κοπτικών άκρων, λόγω της δυσκολίας κοπής της βραχόμαζας, ενώ δεν παρατηρούνται τασικές αστοχίες
2. Υπερβολική φθορά των κοπτικών άκρων, λόγω της αστάθειας του μετώπου και των τεμαχών βράχου που διακόπτουν το μέτωπο
3. Η δύσκολη συγκράτηση του TBM στα τοιχώματα, λόγω της πλακώδους θραύσης των τοιχωμάτων και των μικρορωγμών σε αυτά.
4. Βλάβη της κοπτικής κεφαλής και μπλοκάρισμά της από την εκρηξιγενή συμπεριφορά του βράχου
5. Δυσκολία απομάκρυνσης των άχρηστων υλικών εκσκαφής και καθαρισμού της κοπτικής κεφαλής, λόγω των μεγάλων τεμαχών που σχηματίζονται από τις τασικές αστοχίες στο μέτωπο ή στα τοιχώματα.

6.2.4 ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΤΟΝ ΥΔΡΟΦΟΡΟ ΟΡΙΖΟΝΤΑ

Η παρουσία εισροών κατά την εκσκαφή κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα, τόσο σε κορεσμένο έδαφος, όσο και σε βράχο, μπορεί να είναι επικίνδυνη όταν η ποσότητα του νερού είναι αξιόλογη. Το γεγονός αυτό μπορεί να προκαλέσει διαφορετικά προβλήματα, ανάλογα με τον τύπο του εδάφους, την κλίση της σήραγγας το μέγεθος . Ο καλύτερος τρόπος διαχείρισης των εισροών νερού είναι η τοποθέτηση αποστραγγιστικών αντλιών για την απομάκρυνση ποσοτήτων του, καθώς επίσης και εφεδρικών αντλιών σε περίπτωση που οι βασικές αντλίες βουλώσουν από τα υλικά που μεταφέρει το νερό. Τέτοια προβλήματα μπορεί να παρουσιαστούν σε εκσκαφές υδραυλικών σηράγγων σε διαφορετικά μη ευθυγραμμισμένα τμήματα. Σε αυτές τις περιπτώσεις η αποστράγγιση είναι απαραίτητη κατά την εκσκαφή έτσι ώστε να αποφευχθούν ανθρώπινες απώλειες και καταστροφές στον εξοπλισμό του TBM.

Κατά την εκσκαφή με TBM σε μαλακό έδαφος, εφαρμόζεται το μηχάνημα εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης EPB ή το μηχάνημα πολφού-μπεντονίτη. Ωστόσο η εφαρμογή τους μπορεί να μην είναι επιτυχημένη, καθώς η υδροστατική πίεση μπορεί να σπάσει τον μεταφορέα των εκσκαφθέντων υλικών, να σταματήσει την διαδικασία και να καταστρέψει τον μη αδιάβροχο ηλεκτρολογικό εξοπλισμό. Όσο για τα βραχώδη σκληρά πετρώματα τα TBM με ασπίδα ή χωρίς μπορεί και αυτά να παρουσιάσουν προβλήματα στον μη αδιάβροχο ηλεκτρολογικό εξοπλισμό.

<u>Η σήραγγα Kranji της Σιγκαπούρης</u>

Πρόκειται για μια σήραγγα που αποτελεί μέρος του μεγάλου βάθους αποχετευτικού συστήματος της Σιγκαπούρης. Το μήκος της είναι περίπου 12,6 km και βρίσκεται σε περιβάλλον γρανιτών με διαφορετικούς βαθμούς αποσάθρωσης (από υγιές πέτρωμα έως υπολειμματικό έδαφος). Η εναλλαγές σκληρού πετρώματος, σε μικτό μέτωπο και εδαφοποιημένου πετρώματος είχαν προβλεφθεί. Το βάθος της σήραγγας κατά μήκος της ήταν από 15-50m. Χρησιμοποιήθηκαν δύο μηχανήματα TBM βράχου με ασπίδα που μπορούσαν να λειτουργήσουν και ως TBM εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης EPB με διάμετρο διάτρησης 4,90m. Ο προβλεπόμενος χρόνος διάνοιξης ήταν 90mm/min. Η κοπτική κεφαλή τους είχε σχεδιαστεί με έναν συνδυασμό κοπτικών άκρων έτσι ώστε το μηχάνημα να προσαρμοστεί στις αναμενόμενες συνθήκες.

Γεωλογικά η περιοχή της σήραγγας αποτελείται από τον σχηματισμό του γρανίτη Bukit Timah Τριαδικής ηλικίας. Πρόκειται για το βασικό πέτρωμα της Σιγκαπούρης το οποίο εκτείνεται σε μήκος 8km βόρεια-νότια και 7km ανατολικά-δυτικά.

Καλύπτεται από τον σχηματισμό Jurong στα νοτιοδυτικά και από παλαιοαλλουβιακά υλικά στα δυτικά. Ο γρανίτης έχει μια μέση αντοχή UCS 190MPa, μέτρο του Young περίπου 84GPa και διατμητική αντοχή 17MPa (Zhao, 1996). Τα ρήγματα στον σχηματισμό Bukit Timah είναι γενικά παρακατακόρυφα με ποικίλα πάχη. Τα περισσότερα φέρουν νερό, ενώ σε άλλα έχουν σχηματιστεί ανθρακικά υλικά. Ο γρανίτης αποτελείται από 3-4 κύριες οικογένειες ασυνεχειών με παρα-κατακόρυφες και παρα-οριζόντιες κλίσεις. Οι απόσταση των ασυνεχειών είναι μεγάλη και οι επιφάνειές τους είναι γενικά επίπεδες, κλειστές και τραχείες. Η διαπερατότητα του γρανίτη είναι μικρή, της τάξεως 10^{-9}-10^{-7} m/s και αναμένεται να μειωθεί με το βάθος. Παρόμοια κατάσταση επικρατεί και στις ζώνες ανθρακικών υλικών των ρηγμάτων με τιμές 10^{-7} m/sec, ωστόσο στις μη πληρωμένες θέσεις τους αναμένονται εισροές νερού στα βαθύτερα (Zhao, 1996).

Γενικά δόθηκαν περιγραφές για τέσσερις τύπους γρανίτη οι οποίοι είναι οι εξής:

(G1) Υγιής-ελαφρώς αποσαθρωμένος, ελαφριά-μέτρια κερματισμένη βραχόμαζα (βαθμοί αποσάθρωσης I-III)

(G2) Μέτρια-πολύ αποσαθρωμένη, πολύ κερματισμένη βραχόμαζα (βαθμοί αποσάθρωσης III-IV)

(G3) Έδαφος με τεμάχη γρανίτη: Τεμάχη διαφόρων μεγεθών και αποσάθρωσης στο εσωτερικό εντελώς αποσαθρωμένου υλικού ή υπολειμματικού εδάφους

(G4) Εντελώς αποσαθρωμένο υλικό ή υπολειμματικό έδαφος (βαθμός αποσάθρωσης V-VI)

Η αποσάθρωση του γρανίτη οφείλεται στην χημική αποσύνθεση που προκαλείται από το Τροπικό κλίμα της Σιγκαπούρης. Το μέγιστο βάθος των υπολειμματικών εδαφών του φτάνει μέχρι τα 70m. Οι αντοχή του μέτρια αποσαθρωμένου γρανίτη μειώνεται κατά 40-60% του αρχικά υγιούς. Η αστράγγιστη αντοχή του υπολειμματικού εδάφους είναι 100kPa σε βάθη 20m, ενώ παρουσιάζει χαμηλή υδροπερατότητα, λόγω της παρουσίας της αργίλου στην σύστασή του. Το πλήρως εδαφοποιημένο υλικό ωστόσο, παρουσιάζει υψηλότερη διαπερατότητα και βρίσκεται ανάμεσα στο μέτρια αποσαθρωμένο γρανίτη και υπολειμματικό έδαφος. Χαρακτηρίστηκε γενικά ως πολύ τραχύς γρανίτης με αντοχές στις κατηγορίες G1 και G2 που ποικίλλουν, πιθανώς λόγω κάποιας λανθασμένης επεξεργασίας των δειγμάτων.

Ο υδροφόρος βρίσκεται μερικά μέτρα κάτω από το έδαφος. Η υδροστατική πίεση του υδροφόρου εξαρτάται από το βάθος της εκσκαφής. Ωστόσο βάση της έρευνας που έγινε στην περιοχή, δεν προβλέφθηκαν πιθανές εισροές κατά την εκσκαφή.

Geological formation	Rock and soil type	General description
Bukit Timah granite	G1	Fresh to slightly weathered, fair to moderately fractured rock mass (weathering grades I and II)
	G2	Moderately to highly weathered, highly fractured rock mass (weathering grades III and IV)
	G3	Bouldery soil: boulders of variable size and weathering within completely weathered material or residual soil
	G4	Completely weathered rock or residual soil (weathering grades V and VI)

Πίνακας 24: Η κατηγοριοποίηση του γρανίτη Bukit Timah σε 4 τύπους και οι γενικές περιγραφές που δόθηκαν γι' αυτούς (Zhao J. et. al, 1996)

Borehole No.	Depth (m)	Geotechnical unit	Rock type	RQD	Cerchar abrasivity index (CAI)
NR-8 (T06)	40.5	G1–G2	Granite	95	4.78
NR-8 (T06)	43.6	G1–G2	Granite	43	5.24
NR-9 (T06)	51.0	G2–G4	Granite	27	4.72
G-106 (T05)	25.0	G1–G2	Diorite	100	4.53
H-108 (T05)	53.75	G1–G2	Granite	100	4.44

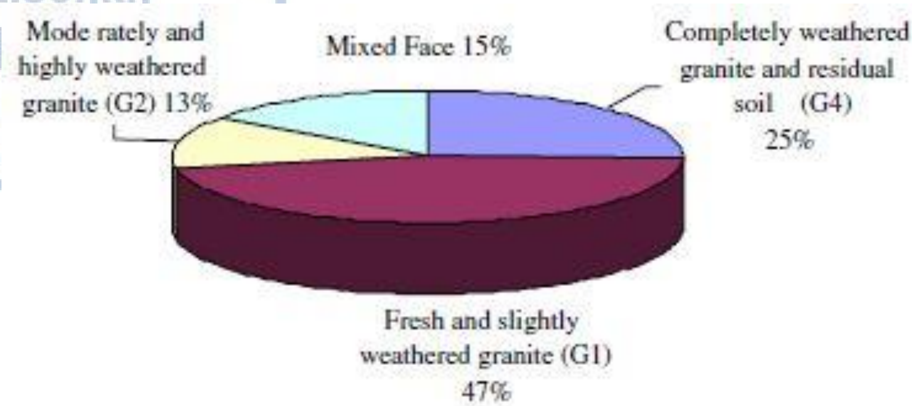
* The rock classified as extremely abrasive in accordance to the Cerchar definition.

Πίνακας 25: Οι τιμές RQD των διάφορων τύπων γρανίτη της σήραγγας και ο βαθμός τραχύτητάς τους (CA) (Zhao J. et. al, 1994)

Laboratory rock strength test results of cored samples from tunnel site

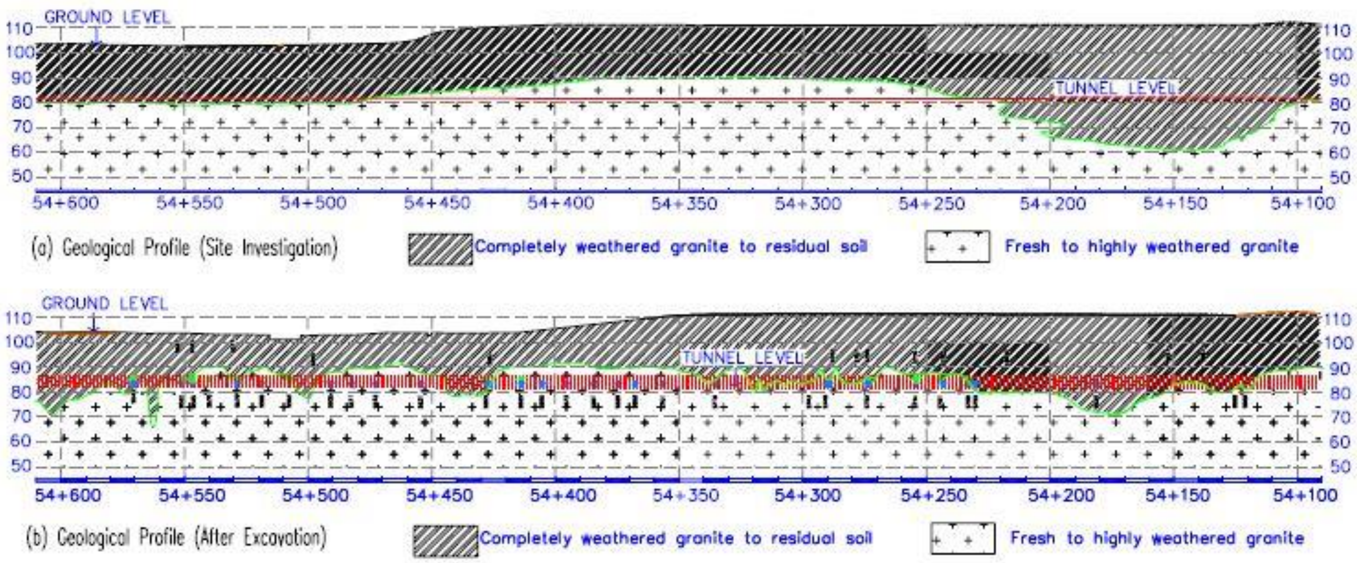
Rock type	Geotechnical unit	Fracture index[a]	RQD	UCS (MPa)		Point load test (I_{s50} (MPa))	
				Range	Average	Range	Average
Bukit Timah granite	G1–G2	>32–2	0–94	19–209	85	1.2–14.5	7
	G2–G4	>16	0–25	–	51	0.7–5.1	1.8

Πίνακας 26: Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών αντοχής από τους πυρήνες της δειγματοληψίας της σήραγγας (Zhao J. et. al, 1996)



Διάγραμμα 13: Κατανομή τύπων γρανίτη κατά μήκος της σήραγγας Kranji (Zhao J. et. al, 1996)

Η λανθασμένη εκτίμηση των εναλλαγών των κατηγοριών G1-G2 με G3-G4 του γρανίτη είχε ως αποτέλεσμα την συχνότερη εμφάνιση μικτών μετώπων. Επιπλέον το γεγονός αυτό οδήγησε το TBM σε αλλαγή λειτουργίας από ανοιχτό τύπο, σε μεταβατικό και κλειστό πιο συχνά. Σημαντικό πρόβλημα ήταν η λεπτή ζώνη του εντελώς αποσαθρωμένου γρανίτη, που παρουσίασε πολύ υψηλότερη υδροπερατότητα απ' ότι αναμένονταν. Η παρουσία αυτής της ζώνης στο μικτό μέτωπο, οδήγησε σε παύσεις της συντήρησης των κοπτικών κεφαλών, ιδιαίτερα όταν δεν ασκούνταν η απαιτούμενη πίεση. Έτσι προέκυψαν εισροές στον θάλαμο εκσκαφής και ξέπλυμα του υλικού ενεμάτωσης των κενών, με διάβρωση και φθορά του εδαφοποιημένου υλικού. Ακόμη, η αλλαγή των κοπτικών άκρων σε μεγαλύτερη συχνότητα, λόγω της καταστροφής τους ήταν αναγκαία. Στο μικτό έδαφος, η εφαρμογή των μηχανημάτων πρέπει να λαμβάνει χώρα σε συνθήκες συμπιεσμένου αέρα. Οι παρεμβολές στον συμπιεσμένο αέρα είχαν ως αποτέλεσμα την μείωση της σταθερότητας του μετώπου και την αύξηση των εισροών νερού. Όλα αυτά τα γεγονότα οδήγησαν ασφαλώς στην καθυστέρηση της ολοκλήρωσης του έργου.



Σχήμα 7: Γεωλογικό προφίλ της θέσης της σήραγγας. Η τομή (α) είναι η πρόβλεψη της επαφής του υγιούς-πολύ αποσαθρωμένου γρανίτη με τον εδαφοποιημένο γρανίτη-υπολειμματικού εδάφους, η οποία παρατηρούνταν σε έναν τμήμα της σήραγγας ανάμεσα στις χ.θ 54+120-54+220. Η τομή (β) είναι η πραγματική επαφή του υγιούς-πολύ αποσαθρωμένου γρανίτη με τον εδαφοποιημένο γρανίτη-υπολειμματικού εδάφους, όπως προέκυψε κατά την διάνοιξη του TBM (Zhao J. et. al, 2002).

Η πιλοτική σήραγγα της βασικής σήραγγας των Απεννίνων στην Ιταλία

Ο σχεδιασμός ενός νέου αυτοκινητοδρόμου Α1 ανάμεσα στις Sasso Marconi και Barberino del Mugello έκρινε απαραίτητη την εσκαφή τεσσάρων πιλοτικών κατά μήκος της σήραγγας των Απεννίνων. Η εφαρμογή αυτή έλαβε χώρα πριν την εκσκαφή δύο παράλληλων δίδυμων σηράγγων, μήκους αντίστοιχα 8,5 km και ύψους υπερκείμενων έως τα 400m. Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα TBM ανοιχτού τύπου, το καθένα με διάμετρο 3,9 m για την εκσκαφή των πιλοτικών σηράγγων του νότιου στομίου (Εκατέρωθεν της Φλωρεντίας), στο οποίο εντοπίστηκαν και τα προβλήματα, και του βόρειου (Εκατέρωθεν της Μπολόνια).

Το νότιο τμήμα αποτελούνταν από ιλυόλιθο και φλύσχη (από ενστρώσεις ψαμμίτη και μαρμάρου). Κατά την διάρκεια της εκσκαφής η βραχόμαζα αξιολογήθηκε με βάση τον δείκτη RMR (Bieniawski, 1989; 1997). Η μέση τιμή RMR για 2400m είναι 42, με πολλές μεταβολές στο μήκος αυτό. Μέσω της καμπύλης κανονικής κατανομής προέκυψε ότι η πιθανότητα η βραχόμαζα να είναι φτωχή έως πολύ φτωχή είναι μεγαλύτερη από 88%.

Η μείωση αυτή της τιμής του RMR, παρατηρείται σε θέσεις στις οποίες οι συνθήκες αυτουποστήριξης της σήραγγας δεν είναι ευνοικές μετά την εκσκαφή και κρίνεται απαραίτητη η τοποθέτηση συστήματος υποστήριξης κοντά στο μέτωπο. Η αστάθεια αυτή παρατηρήθηκε σε τεμαχώδεις δομές, ποικίλλων διαστάσεων, στα τοιχώματα και στην στέψη της σήραγγας, ανάμεσα στις στρωματώδεις επιφάνειες του φλύσχη. Προέκυψαν λοιπόν περιπτώσεις υπερεκσκαφών φτάνοντας βάθη 0.5-1m σε χρόνο 30min, οι οποίες με την παρουσία νερού ήταν ακόμη πιο εύκολες να συμβούν.

Η δομή αποτελούνταν κυρίως από δύο κάθετες μεταξύ τους οικογένειες ασυνεχειών, με την μία να είναι η στρώση του φλύσχη. Η απόστασή τους ήταν περίπου 30-40cm. Κατασκευάστηκαν λοιπόν μοντέλα με την χρήση προγραμμάτων 2D (UDEC, Shen and Barton, 1997) στα οποία παρουσιάζονται περίπου 6500 τεμάχη βράχου. Όπως φαίνεται και στο σχήμα, η τοπική αστάθεια της στέψης και των τοιχωμάτων, απεικονίζεται από υπερεκσκαφή με τεμάχη που πέφτουν μέσα στην σήραγγα. Η υπερεκσκαφή που απεικονίζεται στο μοντέλο UDEC αφορά της ασυνέχειες και μπορεί να συσχετιστεί με τις ζώνες διάτμησης γύρω από την σήραγγα μέσω της αναλυτικής μεθόδου των Shen and Barton, 1997.

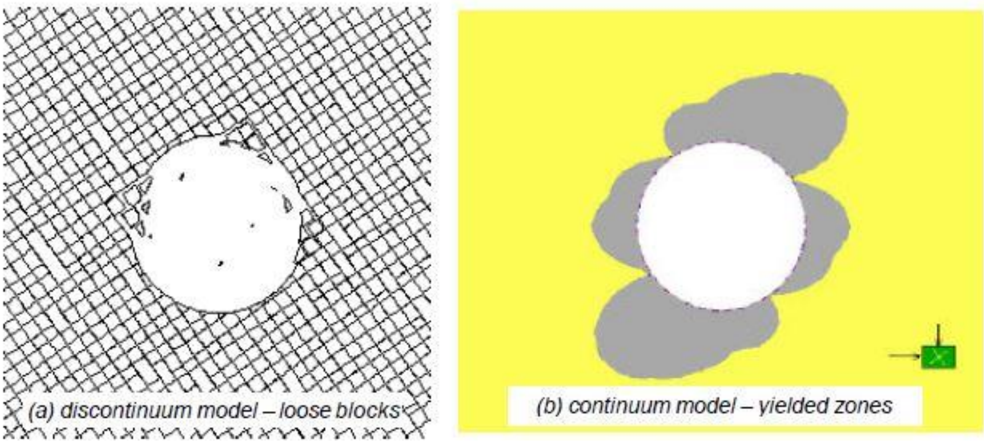
Τα TBM με μονή ασπίδα ή με διπλή δεν είναι τόσο ευαίσθητα όσο τα ανοιχτού τύπου TBM σε φαινόμενα αστάθειας των τοιχωμάτων, αφού προεπενδύουν την σήραγγα με σκυρόδεμα χαλύβδινες δοκούς εσωτερικά και κάτω από την προστασία της ασπίδας. Ασκώντας λοιπόν πίεση το TBM στην επένδυση, μπορεί να προωθηθεί χωρίς να το εμποδίσουν αστοχίες.

Με τα ανοικτού τύπου TBM, οι πιθανότητες να αντιμετωπιστούν αποτελεσματικά τα φαινόμενα αστάθειας των τοιχωμάτων εξαρτώνται από τα εξής:

- Σταθεροποίηση και ανακατασκευή των τοιχωμάτων, αμέσως πίσω από την υποστήριξη της κοπτικής κεφαλής, χρησιμοποιώντας χαλύβδινα πλαίσια και εκτοξευμένο σκυρόδεμα. Η εγκατάσταση αυτών των στοιχείων υποστήριξης, ειδικά του σκυροδέματος, στην ζώνη του μηχανήματος απαιτεί πολύ χρόνο και αποτελέι μεγάλο ρίσκο για την πιθανή καταστροφή του εξοπλισμού
- Συμβατική εκσκαφή μπροστά από το TBM, συνήθως με την μέθοδο top heading (Tseng et al., 1998)
- Ενίσχυση του μετώπου με διατρήσεις και ενεμάτωση, ή με εγκατάσταση ομπρέλας προπορείας πάνω από το TBM

Πίνακας 27: Μηχανικές ιδιότητες ασυνεχειών της πιλοτικής σήραγγας (Barla & Pelizza, 1998)

Block Young's modulus, E_d (GPa)	20.0	
Block Poisson's ratio, ν_d (-)	0.2	
Joint normal stiffness, k_n (GPa/m)	24.0	12.0
Joint shear stiffness, k_s (GPa/m)	2.4	1.2
Friction angle (peak value), ϕ_p (°)	30	20
Friction angle (residual value), ϕ_r (°)	20	15
Cohesion (peak value), c	0.0	0.0



Σχήμα 8: Μοντέλα που προέκυψαν από back analysis της αστάθειας του φλύσχη, ακριβώς πίσω από την κεφαλή του TBM (Barla & Pelizza, 1998)

<u>Σήραγγες Jinping στην περιοχή της Κίνας</u>

Πρόκειται για τέσσερις σήραγγες εκ των οποίων οι δύο κατασκευάστηκαν με την χρήση TBM. Η γεωλογία των σηραγγών αποτελείται από μάρμαρα πολύ κερματισμένα με μέγιστο ύψος υπερκείμενων 2.525 m. Για να επιτευχθεί η αποστράγγιση της ροής του νερού η 1η και 3η σήραγγα διανοίχθηκαν με την χρήση δύο TBM βράχου, με διεύθυνση ανατολική προς δυτική και διάμετρο 12,4m.

Η γεωλογική δομή στην περιοχή αυτή αποτελείται από ένα συμπιεστικό πεδίο με προσανατολισμό ΔΒΔ-ΑΝΑ, με περίπλοκες πτυχές και κατακόρυφα ρήγματα (ECIDI, 2009). Χωρίζεται σε τρία στρώματα:

1. Κάτω Τριαδικά στρώματα (T1): Στο δυτικό τμήμα της σήραγγας. Αποτελούνται από επίδοτο, χλωρίτη, βιοτίτη, σχίστες, μεταψαμμίτες και μάρμαρο με κροκάλες.
2. Μέσο Τριαδικά στρώματα (T2): Στο μέσο τμήμα της σήραγγας. Αποτελούνται από 10km ανθρακικά πετρώματα, δολομιτιωμένα μάρμαρα με ενστρώσεις αργίλου που μειώνουν την ποιότητα της βραχόμαζας.
3. Άνω Τριαδικά στρώματα (T3): Στο ανατολικό τμήμα της σήραγγας. Αποτελούνται από ψαμμίτες και σχιστόλιθους.

Rock type	Sample numbers	Weathering degree	Uniaxial compressive strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Brittleness index
Greyish white marble (T^{4}_{2y})	40	Slightly weathering- fresh	90.10 (73.34–113.27)	–	–
	–		100–110	5.0–5.5	20
Black marble (T^{6-1}_{2y})	42	Fresh	92.44 (66.32–113.48)	4.67 (3.24–8.96)	19.79 (20.47–12.67)
Grey marble	29	Fresh	73.64 (60.98–89.92)	4.52 (3.41–7.69)	16.29 (17.88–11.69)
(T^{6-2}_{2y})	3	Fresh	57.99	5.92	9.79
Argillaceous marble	23	Fresh	92.54 (68.53–112.55)	5.49 (3.57–10.14)	16.86 (19.17–11.10)
(T^{6}_{2y})	3	Fresh		8.57	
Argillaceous limestone to marble (T^{6}_{2y})	–	–	70–80	3.5–4.0	20
Crystalline marble (T_{2b})	39	Fresh	136.8 (99.58–183.20)	4.10 (3.40–4.87)	33.37 (29.29–37.62)
	2	Fresh	75.53	7.03	10.74
	3	Fresh	122.71	9.53	12.88
Grey marble (T_{2z})	6	Fresh	89.95 (76.18–106.48)	–	–
Calcite siltstone (T_3)	17	Fresh	110.72 (76.14–137.89)	4.97 (3.95–6.36)	22.28 (19.28–21.68)
Slate (T_3)			80–90	2.4–2.7	33.33
Interbeded sandstone and slate (T_3)	–	–	85–95	2.6–2.9	32.69–32.76

2.69 (2.67–2.71)–average value (minimum average value–maximum average value)

Πίνακας 28: Μηχανικές ιδιότητες ενοτήτων των γεωλογικών σχηματισμών της σήραγγας (Q. M. Gong et al. 2013).

Πάρθηκαν δείγματα από την διάνοιξη των σηράγγων 1 και 3 και βρέθηκαν τα μηχανικά τους χαρακτηριστικά, όπως απεικονίζονται στον πίνακα 28. Χαρακτηρίστηκαν ως βράχοι με μεγάλη τραχύτητα σύμφωνα με τον Bruland (1998). Ο σταθερός ρυθμός ροής του νερού ήταν 2-3 m3/s, ωστόσο η μέγιστη ροή σε κάποια σημεία έφτανε τα 4,91 m^3/s. Αναμένονταν επομένως υψηλότερα επίπεδα υδροστατικών πιέσεων και εισροών νερού με το βάθος (Zhang et al. 2009). Οι επιτόπου τάσεις βρέθηκαν όχι μόνο να αυξάνονται με το βάθος (με μέγιστη τιμή τα 42MPa), αλλά και να αλλάζουν από οριζόντιες σε κατακόρυφες από 600 m σε 3km βάθος.

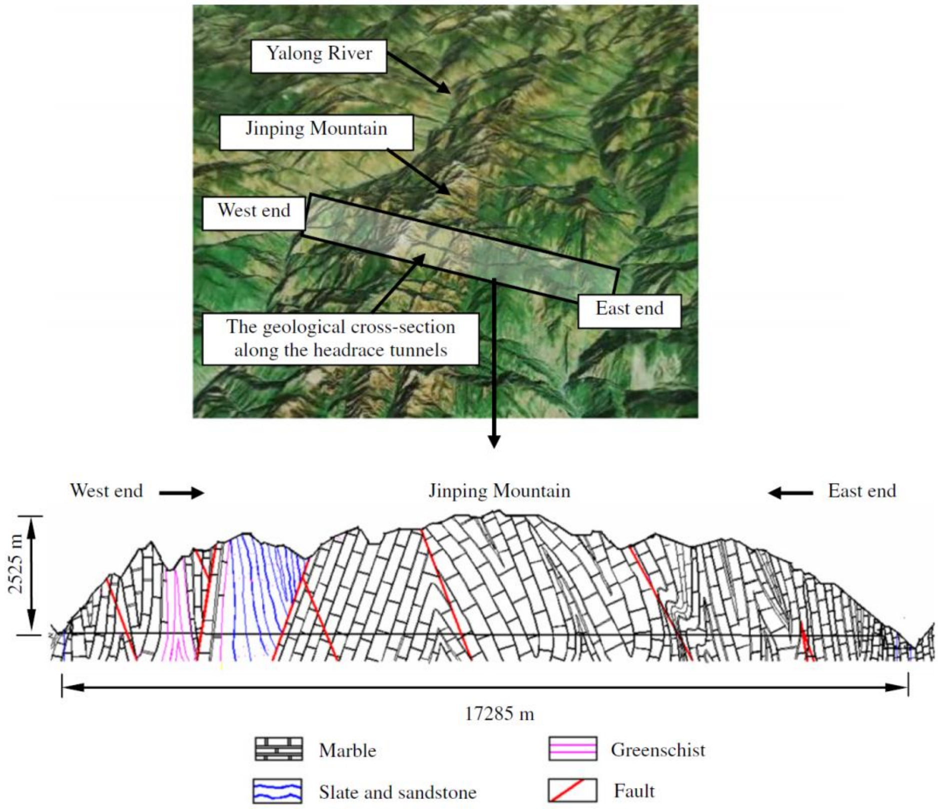
Οι γεωλογικές έρευνες προσδιόρισαν πως τα βασικά προβλήματα που θα αντιμετώπιζε το TBM θα ήταν οι υψηλές τάσεις, η εισροή του υπόγειου νερού και οι κερματισμένες βραχόμαζες.

Οι καταρρεύσεις του μετώπου συνέβησαν στις θέσεις των λεπτοπλακώδων μαρμάρων που βυθίζονταν με μεγάλες γωνίες στο μέτωπο της σήραγγας. Οι υψηλές τάσεις οδήγησαν σε μεγάλες διατμητικές διαρρήξεις. Έτσι η προώθηση του TBM δυσχεραίνονταν, καθώς τεμάχη βράχου εμπόδιζαν την λειτουργία της κοπτικής κεφαλής και της μετακίνησης του μηχανήματος.

Ακόμη πλακώδεις αποκολλήσεις και καταρρεύσεις προκλήθηκαν στο μέτωπο στις θέσεις όπου οι ζώνες πετρωμάτων ήταν λεπτού-μέσου πάχους. Η υψηλές τοπικές τάσεις προκάλεσαν την αποφλοίωση τεμαχών. Με αυτό τον τρόπο διευκολύνονταν η διάκλαση των βράχων από τα κοπτικά του TBM, αλλά προκαλούνταν και η αστάθεια του μετώπου όταν το κοπτικό ήταν κοντά στις πλακώδεις αποκολλήσεις. Σε αυτή την περίπτωση το σύστημα απομάκρυνσης των υλικών έχει να αντιμετωπίσει όχι μόνο τα εναπομείναντα τεμάχη βράχου, αλλά και μικρότερα θραύσματα.

Η τρίτη περίπτωση αστοχίας είναι αυτή των εκρήξεων βράχου σε συνδυασμό με αποκολλήσεις πλακών. Πρόκειται για την πιο δυσμενή περίπτωση για το TBM, η οποία αφορά μέσου έως μεγάλου πάχους στρώσεις μαρμάρων και μεγάλων επιφανειών ασυνεχειών, όπως ρήγματα και εκτεταμένες ασυνέχειες.

Ο συνδυασμός υψηλών τάσεων στην σήραγγα με τις πιέσεις που ασκούσαν τα στελέχη προώθησης του TBM στα τοιχώματα, οδήγησαν σε κερματισμό και εκρήξεις των τοιχωμάτων. Τα περισσότερα τεμάχη προέρχονταν από την στέψη της σήραγγας..



Σχήμα 9: Γεωλογικό προφίλ κατά μήκος της διάνοιξης. (Wu et al. 2007)

Η σήραγγα Zagros στο δυτικό Ιράν

Πρόκειται για μια σήραγγα μήκους 49 km και διαμέτρου 6,73 m που χωρίστηκε σε δύο μέρη και κατασκευάστηκε περίπου 120 km ΒΔ της πόλης Kermanshah, στα βουνά Zagros. Η εκσκαφή της έγινε με την χρήση δύο TBM διπλής ασπίδας. Το 2^{ο} τμήμα της σήραγγας είναι μήκους 26 km και το μηχάνημα στο μήκος αυτό αντιμετώπισε αρκετά δύσκολες συνθήκες εκσκαφής. Συγκεκριμένα, διαπέρασε ζώνες ρηγμάτων με μεγάλες ποσότητες εισροών νερού, σχηματισμούς με περιεχόμενα αέρια, ασταθή τεμαχώδη εδάφη, συγκλίσεις, μικτά μέτωπα και κολλώδη εδάφη, συνθήκες που περιγράφηκαν από τους Khademi Hamidi et al. (2009), Shahriar et al. (2009), Rostami et al. (2010) and Bayati et al. (2016).

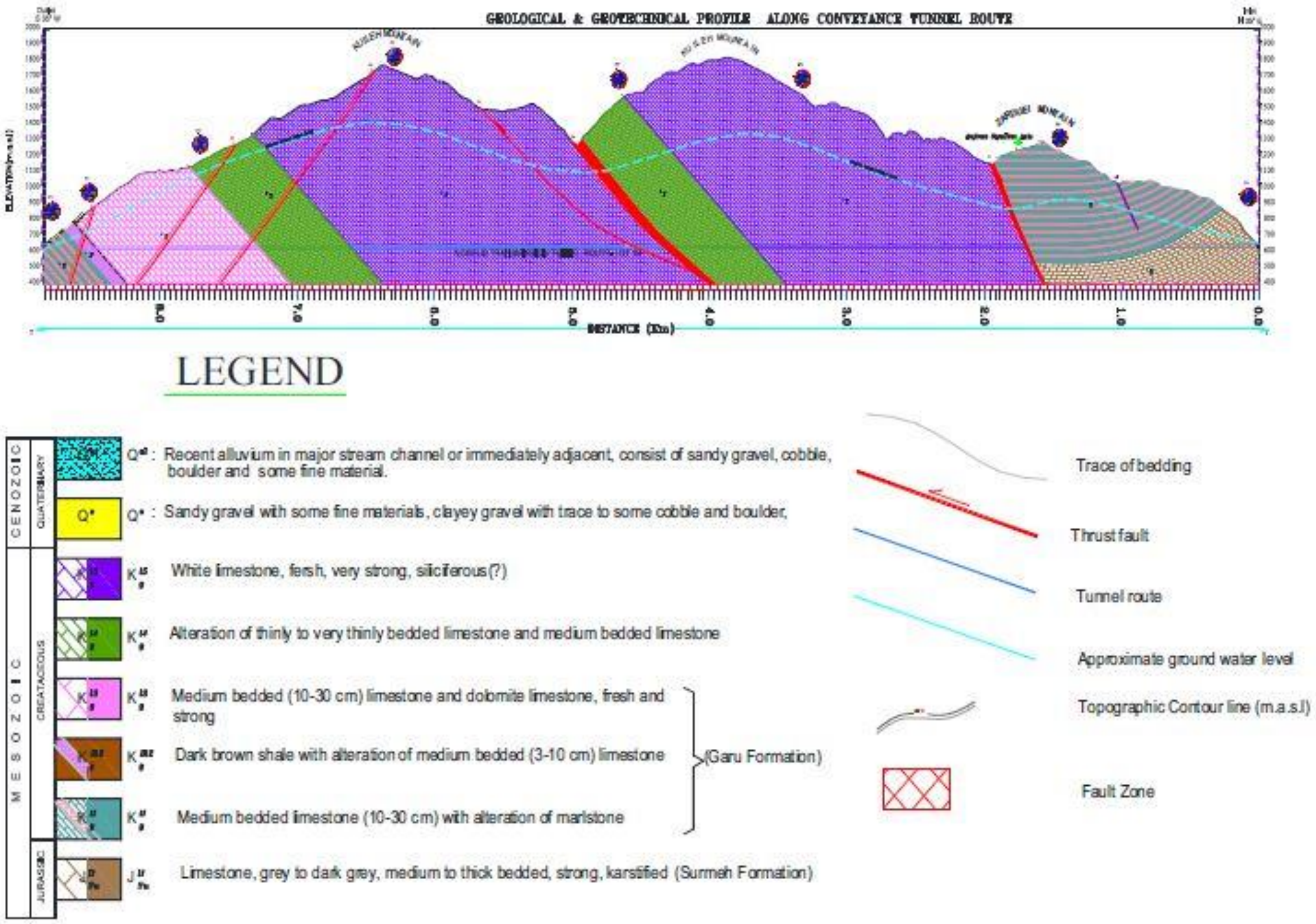
Κατά την εκσκαφή με τα TBM, οι απρόβλεπτες γεωλογικές συνθήκες που προέκυψαν, οδήγησαν στην παύση της λειτουργίας του κατά 8 μήνες. Για περίπου 180 m το μηχάνημα περνούσε μέσα από ζώνη ρήγματος πληρωμένη με υλικό έντονης αποσάθρωσης, με την μορφή λάσπης, λόγω της παρουσίας νερού. Στην χιλιομετρική θέση 930-1.110 m η σήραγγα διέρχεται μέσα από πολύ φτωχές βραχόμαζες με RMR τάξεως V και IV (Bieniawski, 1989) και αντιμετωπίζει προβλήματα καταπτώσεων, καθώς επίσης και την παρουσία μιας κοιλότητας. Η μεγάλη κοιλότητα σχηματίστηκε στο μέτωπο της σήραγγας, στην ένωσή της με την στέψη της. Επιπλέον εισροές νερού κατέληγαν στο εσωτερικό της, προερχόμενες από το κεντρικό τμήμα της.

Γεωλογικά η θέση του έργου αποτελούνταν από σχηματισμούς Μεσοζωικής ηλικίας, με επικρατέστερους τους ιζηματογενείς ανθρακικούς βράχους. Οι σχηματισμοί αυτοί είναι ο Garu, Κρητιδικής ηλικίας, με κύρια υλικά μεσοστρωματώδεις ασβεστολίθους σε εναλλαγές με δολομίτες, σχιστολίθους και μάρμαρα και ο Surmeh, Ιουρασικής ηλικίας, που αποτελείται από ασβεστολίθους λεπτοστρωματώδεις και ισχυρά καρστικοποιημένους.

Chainage (km) from Sirvan to Leileh river	Lithological member	RMR	Q index	GSI
0 – 0 + 724	JS^{ul}	63	6.1	56–60
0 + 724 – 1 + 690	Kg^{11}	40	0.5	–
1 + 690 – 3 + 672	Kg^{15}	59	4	52–56
3 + 672 – 4 + 302	Kg^{14}	58	3.6	51–55
4 + 302 – 6 + 608	Kg^{15}	59	4	52–56
6 + 608 – 7 + 721	Kg^{14}	55	3	48–52
7 + 721 – 8 + 460	Kg^{13}	64	7	57–61
8 + 460 – 8 + 581	Kg^{812}	–	–	–
8 + 581 – 8 + 840	Kg^{11}	46	1	39–43

Πίνακας 29: Κατάταξη βραχομαζών βάση των συστημάτων RMR, Q, GSI (ITMA, 2011)

Στην προκειμένη περίπτωση έγινε λανθασμένη πρόβλεψη των χαρακτηριστικών των βραχομαζών και ιδιαίτερα των φτωχών τους χαρακτηριστικών, καθώς δεν είχαν εντοπιστεί τόσα ρήγματα και πτυχώσεις παρόλο που αρκετές ήταν εμφανείς και από την επιφάνεια της κοιλάδας.



Σχήμα 10: Γεωλογική τομή στο 1ο τμήμα της σήραγγας Zagros (ITMA, 2011)

Σήραγγα Parbati στην περιοχή των Ιμαλαΐων στην Ινδία

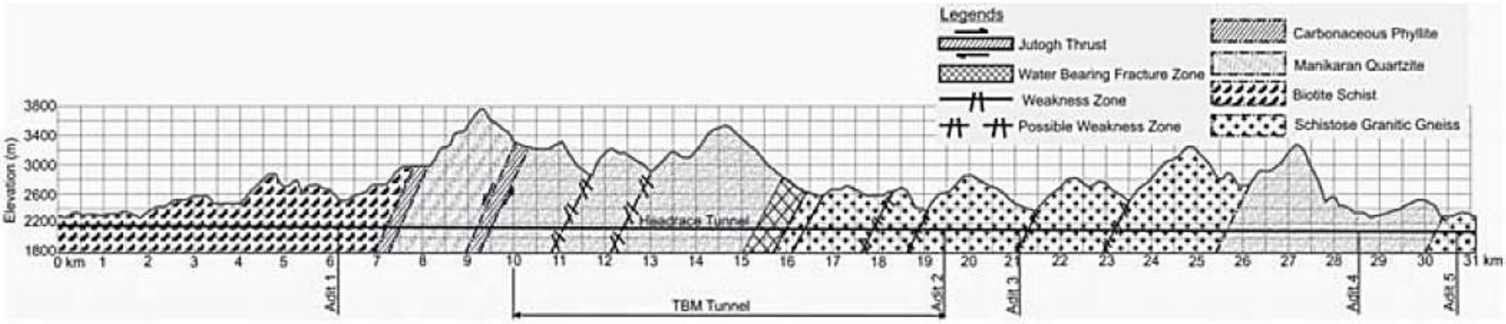
Η σήραγγα Parbati σχεδιάστηκε για υδροηλεκτρικούς σκοπούς κοντά στην περιοχή Kullu στα Ιμαλάια της Ινδίας. Πρόκειται για σήραγγα μήκους 31.5 km, με τα 9.05 km (χ.θ 10-19,05 km) της να έχουν κατασκευαστεί με την χρήση TBM. Το μηχάνημα διαπερνά μέσα από γρανίτες, γρανιτογνευσίους και χαλαζίτες. Παρατηρούνται επίσης και στρώσεις βιοτιτικών σχιστολίθων και χλωριτιωμένων και ταλκικών σχιστολίθων. Οι γρανιτογνεύσιοι είναι σκληρά και συμπαγή πετρώματα και σχηματίζουν πολύ ανεπτυγμένη φολίδωση σε ορισμένες περιοχές (Madan and Kumar, 2004). Έχουν υποστεί ισχυρές συμπιεστικές δυνάμεις και έχουν παρουσιάσει πτυχές, ρήγματα, φολίδωση και ασυνέχειες, λόγω του MCT (Main Central Thrust), ενός συστήματος τεκτονικής της περιοχής, χαρακτηριστικό πολύ τυπικό για τα πετρώματα των Ιμαλαίων. Το ύψος των υπερκείμενων ποικίλλει από 100-1.300 m. Για την διάνοιξη επιλέχθηκε το TBM ανοιχτού μετώπου διπλής ασπίδας για σκληρά πετρώματα, με διάμετρο 6,8 m.

Το μηχάνημα διαπερνά ζώνες με διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά, τόσο στην επαφή των σχηματισμών, όσο και σε θέσεις που εντοπίζονται ζώνες διάτμησης και ζώνες ρηγμάτων. Σύμφωνα με τον Panthi (2003) ο χαλαζίτης αποτελείται από τρείς οικογένειες ασυνεχειών κάποιες πληρωμένες με ιλυολιθικό υλικό, ενώ ο γρανιτικός γνεύσιος είναι κερματισμένος με ασυνέχειες ταλκικού, χλωριτικού, μαρμαρυγιακού σχίστη, διατμημένες, σχιστοποιημένες και αδιαπέρατες. Ισχυρίστηκε ότι το TBM θα περνούσε μέσα από 5 ζώνες αδυναμίας, ενώ θα αντιμετώπιζε προβλήματα εισροών και υπερπιέσεων. Η επαφή του γρανιτικού γνευσίου με τον χαλαζίτη της περιοχής είναι σχιστοποιημένη σε υψηλά επίπεδα και αδιαπέρατη, ενώ ο χαλαζίτης είναι κερματισμένος και με ανοιχτές ασυνέχειες. Επομένως ήταν δυνατόν να παρατηρηθούν εισροές σε αυτή την ζώνη, καθώς επίσης και στις υπόλοιπες ζώνες αδυναμίας του χαλαζίτη.

Το βασικό πρόβλημα παρουσιάστηκε στις ζώνες του γνευσίου με τις σχιστολιθικές ενστρώσεις και τους φακούς χαλαζία. Συγκεκριμένα, όταν ο σχηματισμός διαφοροποιούνταν σε σχιστοποιημένο γνεύσιο με ενστρώσεις χλωρίτη, ήταν φτωχός σε μηχανικά χαρακτηριστικά και ισχυρά κερματισμένος με τέσσερις οικογένειες ασυνεχειών. Το γεγονός αυτό οδήγησε στην κατάρρευση ενός μεγάλου τεμάχους βράχου και στον σχηματισμό μιας κοιλότητας στην οροφή της σήραγγας στην χιλιομετρική θέση 748 m. Έτσι χρειάστηκε η υποστήριξη των κατακερματισμένων τεμαχών με πλήρωση της κοιλότητας με σκυρόδεμα. Η διαδικασία ενίσχυσης του πετρώματος διήρκησε τρεις περίπου εβδομάδες. Μετά από αυτό το περιστατικό, προκλήθηκε μια αστοχία κατάπτωσης σφήνας που σχημάτισε κοιλότητες μεγαλύτερες των 5m πάνω από την στέψη της σήραγγας.

Με την εξέλιξη του έργου, οι συνθήκες γίνονταν ακόμη χειρότερες, καθώς παρατηρήθηκαν πολλές ζώνες μαρμαρυγίων, που προκαλούσαν υπερεκσκαφές. Έτσι απαιτούνταν ακόμη περισσότερη υποστήριξη των τοιχωμάτων καθυστερώντας την διάνοιξη.

Τέλος το μεγαλύτερο πρόβλημα εμφανίστηκε τον Μάιο του 2007, όπου οι γεωτρήσεις ανίχνευσης που βρίσκονταν μπροστά από το TBM, εντόπισαν μια ζώνη διατμημένου και κερματισμένου χαλαζίτη, με υπερκείμενα 900 m, από την οποία εισέρχονταν μεγάλες ποσότητες νερού με αμμούχα και ιλυολιθικά υλικά. Η εισροή ήταν απότομη με ποσότητες 7500m άμμου και ιλύος που σκέπασαν το TBM, καθυστερώντας το έργο 3,5 χρόνια.



Σχήμα 11: Η γεωλογική τομή του τμήματος της σήραγγας Parbati που κατασκευάστηκε με TBM (Panthi, 2003)

Πίνακας 30: Σύγκριση υλικών τμήματος που διανοίχθηκε με την μέθοδο των εκρηκτικών (χ.θ 8,1 km) και με την μέθοδο του TBM (15,7 km).

Description	Estimated values	
	Chainage 8.1 km	Chainage 15.7 km
Ground surface elevation, m	2,992	2,930
Rock cover above tunnel, m	810	775
Geological strength index	70	70
Material constant (mi)	20	20
Disturbance factor (D)	0.8	0
Reduced material constant (mb)	6.85	6.85
Constant (s)	0.035	0.035
Constant (a)	0.501	0.501
Peak friction angle (ø), deg	53.7	53.7
Cohesion (c), MPa	5.75	6.25
Tensile strength (σ_t), MPa	1.1	1.1
Deformation modulus (E_{cm}), GPa	12.2	14.3

Πίνακας 31: Μηχανικές ιδιότητες του χαλαζίτη για την διάνοιξη με εκρηκτικά (Adit 1) και με TBM (Adit 2).

Mechanical properties	Adit 1 DS	Adit 2 US
Specific weight, MN/m3	0.026	0.026
Intact rock strength (UCS) (σ_{ci}), MPa	150	175
Elasticity modulus (E_{ci}), GPa	60	65
Poisson's ratio (v)	0.18	0.2
Strength anisotropy coefficient	1.05	1.1
Mode of failure	Brittle	Brittle

Σήραγγα Kargi στην Τουρκία

Πρόκειται για μια σήραγγα που κατασκευάστηκε για υδροηλεκτρική χρήση στην περιοχή του ποταμού Kizlirmak. Τα 4 πρώτα km σήραγγας διανοίχθηκαν με την μέθοδο NATM, ενώ με την εφαρμογή ενός TBM διπλής ασπίδας, διανοίχθηκαν τα υπόλοιπα 7,8m, ξεκινώντας την διαδικασία το 2012, με 10 m διάμετρο.

Το έργο κατασκευάζεται στην περιοχή του ρήγματος της Βόρειας Ανατολίας (NAFS). Το ύψος των υπερκείμενων φτάνει έως τα 600 m, ενώ τα υλικά που συναντά είναι οι οφιόλιθοι του συμπλέγματος Kirazbasi για τα αρχικά πρώτα 2,3 km, οι οποίοι περιλαμβάνουν ψαμμίτες, ιλυόλιθους και μάργα, ακολουθούν οι σχηματισμοί Kundaz, με μάρμαρα, μεταλάβες και μεταπηλίτες για μήκος 1 km, ενώ τέλος για 8,5 km διανοίγει τον σχηματισμό Beynamaz που περιλαμβάνει βασάλτες, ανδεσίτες και κροκαλοπαγή. Η μέση αντοχή του πετρώματος είναι πάνω από 140 MPa. Πολλαπλές ζώνες ρηγμάτων και μεταβατικές ζώνες προστίθενται στις περίπλοκες γεωλογικές συνθήκες της περιοχής της σήραγγας.

Οι αρχικές έρευνες πρόβλεψαν την παρουσία χαλαρότερου και λιγότερο ευσταθούς εδάφους για τα πρώτα 2,5 km της διάνοιξης με TBM, το οποίο θα ενισχύονταν με την χρήση εκτοξευμένου σκυροδέματος. Με την έναρξη της λειτουργίας του μηχανήματος εμφανίστηκαν οι συνθήκες αυτές. Συγκεκριμένα, στην χιλιομετρική θέση των 88 m το μηχάνημα συνάντησε χαλαρά υλικά με υψηλή ποσότητα αργίλου και άμμου. Επιπλέον η αυξημένη παρουσία διογκούμενων ορυκτών, κυρίως σμεκτίτη, συμπιέζει το TBM και οδηγεί στην κατάπτωση υλικών. Προκλήθηκε λοιπόν καταρροή υλικού μπροστά από την κοπτική κεφαλή, η οποία οδήγησε σε μετέπειτα υπερεκσκαφή 10 m.

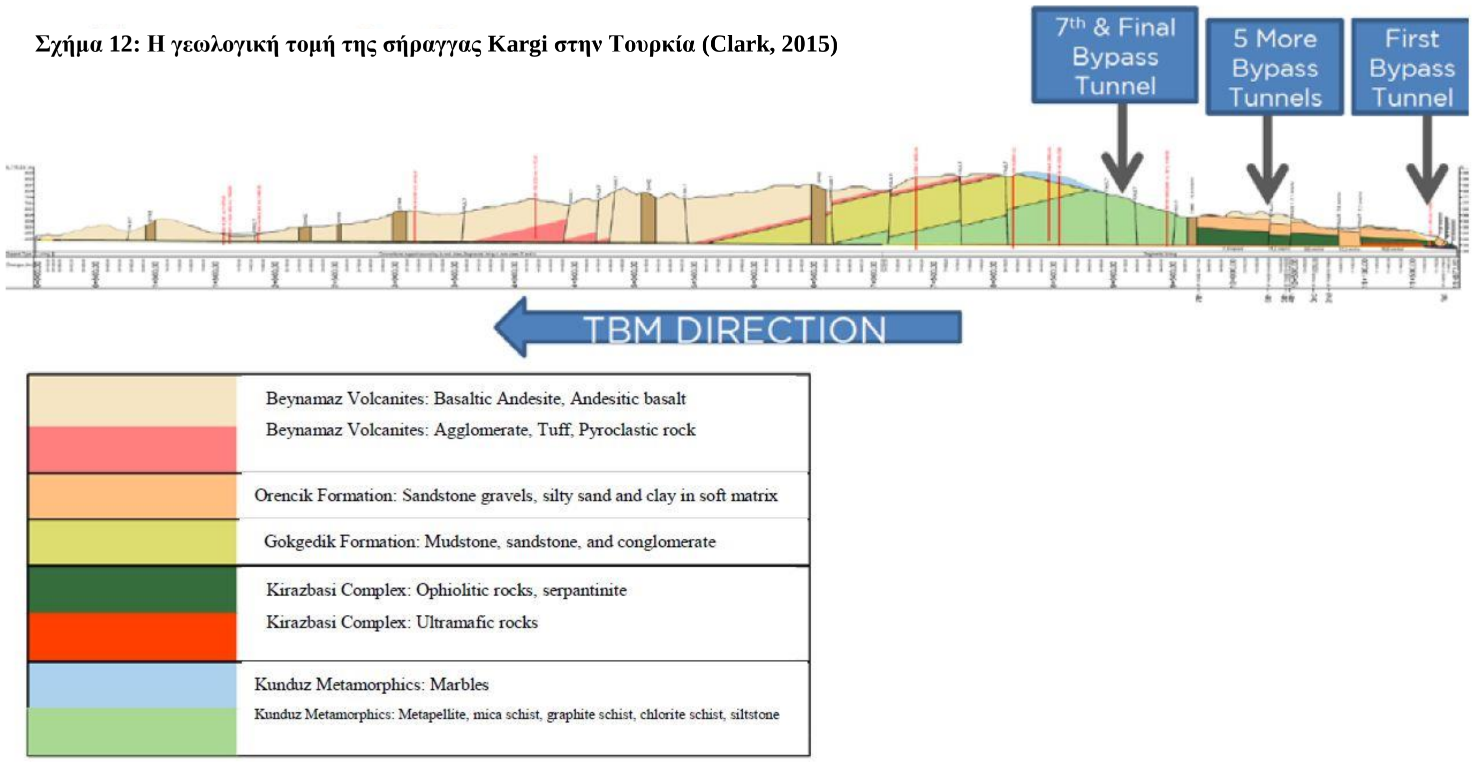
Το βάρος των καταπτώσεων παγίδευσε το μηχάνημα και έγιναν προσπάθειες επαναλειτουργίας του με τον καθαρισμό του από τα χαλαρά υλικά και στην συνέχεια με την στερεοποίηση του υλικού με ενεμάτωση πολυουρεθάνης. Ωστόσο καμία προσπάθεια δεν λειτούργησε και έτσι κατασκευάστηκε μια βοηθητική σήραγγα για να απελευθερώσει την κοπτική κεφαλή και να σταθεροποιήσει το διαταραγμένο έδαφος. Μετά την κατασκευή της βοηθητικής σήραγγας και την προχώρηση του TBM, θεωρήθηκε ότι το δύσκολο τμήμα της είχε ξεπεραστεί. Ωστόσο χρειάστηκε η κατασκευή άλλων έξι βοηθητικών σηράγγων για τα πρώτα 2 km προκειμένου να αντιμετωπιστούν παρόμοια προβλήματα με αποτέλεσμα η σήραγγα να καθυστερήσει να ολοκληρωθεί κατά 281 ημέρες. Η πρόβλεψη λοιπόν της γεωλογίας του έργου είχε μεγάλη απόκλιση από την πραγματικότητα.

Κατά την εκσκαφή συγκεντρώθηκαν 12 υλικά από διαφορετικές θέσεις της εκσκαφής, στα οποία μελετήθηκαν τα γεωτεχνικά τους χαρακτηριστικά . Έτσι έγινε εμφανής πως ο λόγος που το TBM στην σήραγγα Kargi δεν μπορούσε να λειτουργήσει, ήταν η παρουσία αργιλικών ορυκτών που διογκώνονταν.

Bypass	UCS MPa	γ g/cm³	Nc	Ground characteristic
1	20	2.39	16.7	Fault zone
2	15	2.09	4.8	Swelling clay, ground is wet
3	5	1.99	1.3	Swelling clay, very weak rock
4	5–23	2.30	1–1.5	Swelling clay, very weak rock
5		2.30	1–1.5	Fault, swelling clay, weal rock
6	5–23	2.30	4.6	Fault, swelling clay, ground is wet
7	5–23 5.23	2.30	2.2–10	Weathered dyke

Πίνακας 32: Τα χαρακτηριστικά 7 θέσεων που το TBM αντιμετώπισε πρόβλημα. Ο δείκτης Nc αποτελεί έναν δεικτη πηλίκου της μοναξονικής αντοχής σc με την πίεση των υπερκειμένων. Εάν ο δείκτης Nc είναι μικρότερος της τιμής 2.0 τότε παρατηρούνται φαινόμενα σημπίεσης (Aydan et al.)

Σχήμα 12: Η γεωλογική τομή της σήραγγας Kargi στην Τουρκία (Clark, 2015)



Η σήραγγα Αποσελέμη στην Κρήτη

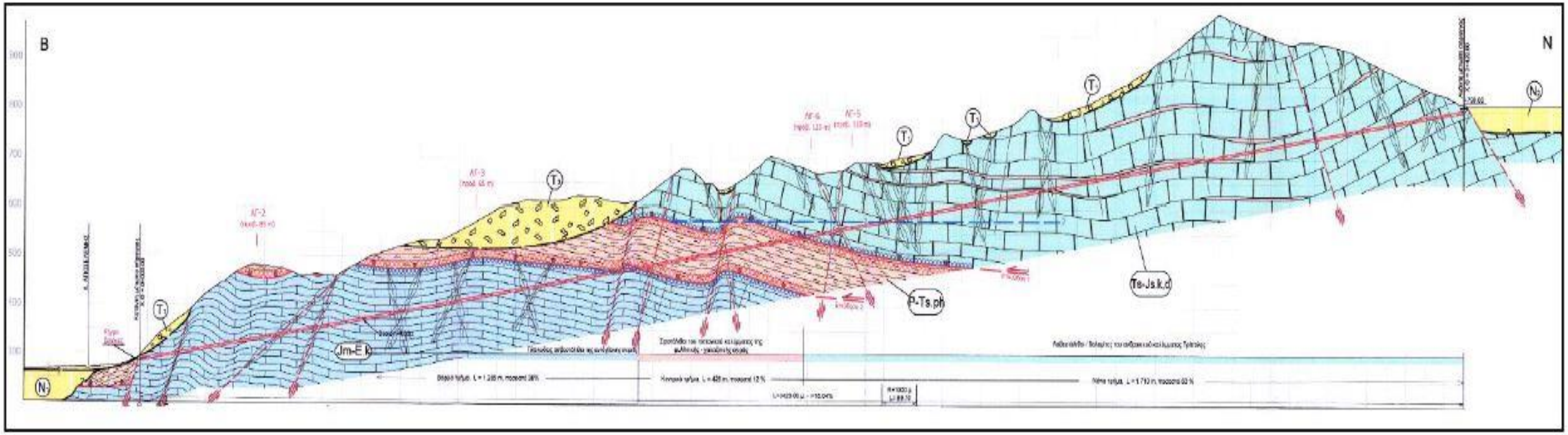
Κατασκευάστηκε με σκοπό να μεταφέρει νερό από το Οροπέδιο Λασιθίου στο φράγμα Αποσελέμη. Το μήκος της σήραγγας είναι 3,4 km, με διάμετρο 4,35 m. Ως μηχανή διάνοιξης στη συγκεκριμένη σήραγγα, επιλέχθηκε το TBM διπλής ασπίδας, Σε πιο σκληρούς βράχους η διπλή ασπίδα μπορεί να προχωρήσει με υψηλότερους ρυθμούς, με πέδιλα και συνεχή προχώρηση, ενώ σε πιο ασθενείς σχηματισμούς η ασπίδα προσφέρει άμεση υποστήριξη και η λειτουργία του TBM γίνεται τύπου μονής ασπίδας.

Γεωλογικά η περιοχή της κατασκευής αποτελείται από τα κατάντη προς τα ανάντη από:

1. τους αυτόχθονους σχηματισμούς των πλακωδών ασβεστόλιθων (Plattenkalk): Παρουσιάζουν υψηλές γενικά αντοχές και λίγες ζώνες καρστικοποίησης, ενώ στις ζώνες των ρηγμάτων τα χαρακτηριστικά αυτά υποβαθμίζονται.
2. την αλλόχθονη σειρά των φυλλιτών:
   Είναι ισχυρά διακλασμένοι και αποσαθρωμένοι και η αντοχή τους δεν είναι υψηλή. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην επώθηση των ασβεστολίθων Τριπόλεως, επάνω στους φυλλίτες
   την αλλόχθονη σειρά των ασβεστολίθων-δολομιτών Τρίπολης:
   Μέτρια διακλασμένοι και καρστικοποιημένοι ασβεστόλιθοι υψηλής αντοχής

Πίνακας 33: Γεωτεχνικές παράμετροι πετρωμάτων σήραγγας Αποσελέμη (Έργα ενίσχυσης Ταμιευτήρα φράγματος Αποσελέμη από το Οροπέδιο Λασιθίου Οριστική Γεωλογική Μελέτη, Μάϊος 2013)

		ΠΛΑΚΩΔΕΙΣ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΙ PLATTENKALK	ΦΥΛΛΙΤΕΣ	ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΙ ΣΕΙΡΑΣ ΤΡΙΠΟΛΗΣ
Μοναδιαίο βάρος	KN/m^3	27	24	26
UCS	MPa	37	7	40
UTS	MPa	4,68	-	4,30
Is50	MPa	3,64	-	3,94
RQD	%	75	20	60
GSI		40	15	30
Q (wall)		2,60	0,93	2,08
RMR		45	36	52
C	MPa	0,193	0,030	0,190
φ	deg	40	27	45
Ei (intact modulus)	MPa	40000	2750	40000
Es (deform. modulus)	MPa	2603,19	100,23	3255,32
Πορώδες n	%	17	8	22
Poisson ratio		0,17	0,25	0,18
Δείκτης Φθοράς Cerchar	CAI	3,00 (πολύ έως εξαιρετικά φθοροποιός)	-	2,50 (μέτρια έως πολύ φθοροποιός)



Σχήμα 13: Η γεωλογική τομή κατά μήκος του άξονα της σήραγγας (Ref: Έργα ενίσχυσης Ταμιευτήρα φράγματος Αποσελέμη από το Οροπέδιο Λασιθίου Οριστική Γεωλογική Μελέτη, Μάϊος 2013)

Με εργαστηριακές δοκιμές στα δείγματα των σχηματισμών προέκυψαν οι γεωτεχνικές παράμετροι των πετρωμάτων αυτών.

Από τα πρώτα κιόλας μέτρα της διάνοιξης παρατηρήθηκε διαφορετική γεωλογία από αυτή που είχε προβλεφθεί. Τα αρχικά 40 m της εκσκαφής από τις χιλιομετρικές θέσεις 42.5-82.8 αποτέλεσαν μια κρυφή ζώνη καταρροής υλικών, η οποία δεν ήταν ορατή από την επιφάνεια.

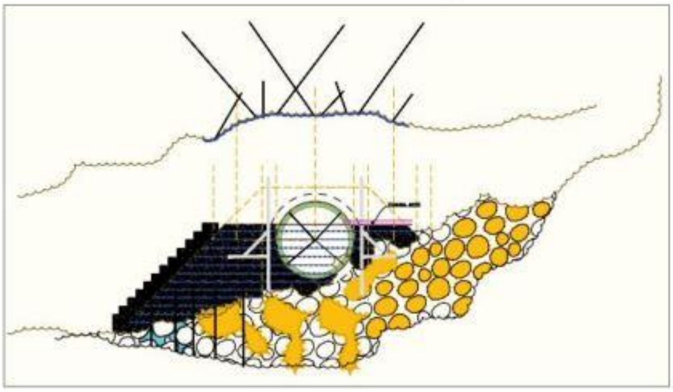
Ο αποσαθρωμένος και πολύ χαλαρός χαρακτήρας της βραχόμαζας προκάλεσε πολύ δύσκολες συνθήκες διάνοιξης, με έναν μεγάλο αριθμό υπερεκσκαφών και καταπτώσεων της οροφής και του μετώπου, χωρίς να έχει ασκηθεί μεγάλη δύναμη κοπής από το TBM. Οι υπερεκσκαφές μερικές φορές αναπτύσσονται επιμήκως στην στέψη της σήραγγας και δημιουργούν κενά όπως καμινάδες . Οι καταπτώσεις συμβαίνουν τυχαία και έχουν την συμπεριφορά ροής εδάφους, λόγω της χαμηλής συνοχής τους. Αυτή η αντίδραση του εδάφους είναι εντελώς διαφορετική από την συμπεριφορά του στις ζώνες των ρηγμάτων, με φτωχή έως πολύ φτωχή ποιότητα. Λήφθηκαν λοιπόν υπόψη αυτά τα προβλήματα και εφαρμόστηκαν ειδικά μέτρα υποστήριξης και ειδικά μέτρα για την σωστή λειτουργία του TBM.

Τον Μάρτιο του 2016 στην χιλιομετρική θέση 1404 m, το TBM παγιδεύτηκε από σημαντικές παραμορφώσεις ζώνη μετάβασης από τον ασβεστόλιθο στους σχηματισμούς φυλλιτών-χαλαζιτών. Τα υπερκείμενα στην θέση αυτή ήταν μόνο 180 m και δεν αναμένονταν συγκλίσεις, ωστόσο το TBM κόλλησε στην θέση αυτή και οι ασπίδες έπρεπε να ελευθερωθούν χειροκίνητα.

Ανάμεσα στις χιλιομετρικές θέσεις 1538-1622 m η εκσκαφή πέρασε από το ιζηματογενες πέτρωμα "mélange" στον δολομίτη που περιείχε μεγάλες ποσότητες H_2S που απελευθερώθηκε κατά την εκσκαφή. Οι μεγάλες συγκεντρώσεις του οδήγησαν τους εργαζομενους να πάσχουν από πονοκεφάλους και παθήσεις των ματιών. Το γεγονός αυτό είχε ως αποτέλεσμα η εκσκαφή να γίνεται μόνο με αντιασφυξιογόνες μάσκες. Η συνεχής παρουσία αερίου δυσχέραινε την γρήγορη διάνοιξη.

Στον ασβεστόλιθο της Τρίπολης, η παρουσία των καρστικών εγκοίλων είχε προβλεφθεί. τον Ιούλιο του 2016, στην χιλιομετρική θέση 2317 m, το TBM αντιμετώπισε ένα τεράστιο καρστικό σπήλαιο. Εν τέλει αντιμετωπίστηκε με την κατασκευή βοηθητικής σήραγγας έτσι ώστε να παρέχεται πρόσβαση μπροστά από το TBM, την υποστήριξη των βράχων της οροφής και την προπαρασκευή του ανάστροφου τόξου.

Εικόνα 13: Η κεφαλή του TBM, όταν εντόπισε καρστικό σπήλαιο και σταμάτησε η λειτουργία του (Πηγή: Σήραγγες στην Ελλάδα, γεωλογία, σχεδιασμός, κατασκευή 2016)



Εικόνα 14: Βοηθητικό πέρασμα του TBM από το καρστικό σπήλαιο (intrakat)

Η γραμμή μετρό L10 της Βαρκελώνης

Οι γραμμές L9 και L10 κατασκευάστηκαν με σκοπό να βελτιώσουν την πρόσβαση με μετρό σε περιοχές όπως το βορειότερο τμήμα της Βαρκελώνης και οι περιοχές των δέλτα Besos και Llobregat. Και οι δύο γραμμές έχουν ένα μέσο μήκος 50 km, με τα 43,7 km να βρίσκονται υπόγεια. Στο κεντρικό τμήμα και οι δύο γραμμές κινούνται παράλληλα, στα νότια όμως αυτές χωρίζονται, στα νότια με την πρώτη να καταλήγει στο αεροδρόμιο της Βαρκελώνης, μέσω του δέλτα Llobregat, ενώ η δεύτερη ακολουθώντας τα βόρεια όρια του δέλτα, καταλήγει στο λιμάνι και στην ζώνη του βιομηχανικού πάρκου Franca. Στα βόρεια, οι γραμμές πάλι διαχωρίζονται και καταλήγουν σε διαφορετικά σημεία του δέλτα Besos.

Χρησιμοποιήθηκαν πέντε μηχανήματα διάνοιξης, δύο EPB διαμέτρου 12,06 m, ένα TBM διπλού τύπου με διάμετρο 11,95 m και δύο EPB διαμέτρου 9,4 m. Η μικρότερη διάμετρος εφαρμόστηκε στην γραμμή L9 μέσα από το δέλτα Llobregat. Τα υλικά των L9, L10 διακρίνονται σε 4 κατηγορίες, τα προσφατα Τεταρτογενή, τα παλαιότερα Τεταρτογενή, τα Νεογενή και τα Παλαιοζωικά γεωυλικά. Κάτω από τις τεταρτογενείς αποθέσεις των δέλτα και την πεδιάδα της Βαρκελώνης βρέθηκαν νεογενείς αποθέσεις. Αποτελούνται από Πλειοκαινικές μάργες προέλευσης βαθιάς θάλασσας, πάνω από τις οποίες παρατηρούνται ενστρώσεις άμμου προέλευσης ρηχής θάλασσας. Το συνολικό πάχος τους είναι 100 m και καλύπτει μια παλιά διαβρωμένη επιφάνεια Μειοκαινικών αποθέσεων. Το πάχος των Μέσο-Μειοκαινικών ιζημάτων είναι 200 m αποτελείται από ενστρώσεις χαλαζιακής άμμου, χαλικιών, ιλύος και μάργας. Τα αμμούχα και χαλικώδη τμήματα έχουν υποστεί κατά τόπους ιζηματογένεση σχηματίζοντας ψαμμίτες και κροκαλοπαγή. Τα πετρώματα αυτά εντοπίζονται κυρίως στο βουνό Montjuic. Οι Κάτω-Μειοκαινικοί σχηματισμοί αποτελούνται από χαλικώδη άργιλο κόκκινου χρώματος και πάχους 100 m, καλύπτοντας τα Παλαιοζωικά πετρώματα.

Η Παλαιοζωική σειρά αποτελείται από μεταμορφωμένα πετρώματα, ιζηματογενή, με κύρια τα ανθρακικά και κροκαλοπαγή και γρανιτικά από το Ορδοβίσιο μέχρι Λιθανθρακοφόρο. Έχουν υποστεί ισχυρή Αλπική τεκτονική και μαζί με αυτά και τα Μειοκαινικά ιζήματα από τα μετα-αλπικά εκτατικά γεγονότα. Τα Πλειοκαινικά και Τεταρτογενή δεν έχουν επηρεαστεί από αυτήν.

Οι γραμμές L2 και L10 κόβουν τα Τεταρτογενή και Μειοκαινικά ιζήματα των βόρειων ορίων του δέλτα Llobregat, κοντά στο βουνό Montjuic.

Τα πρόσφατα Τεταρτογενή σχηματίζουν μια σφηνοειδή δομή η οποία γίνεται παχύτερη προς την ακτή. Αποτελείται από έξι βασικές ιζηματογενείς σειρές κυρίως προδελταικής και δελταικής προέλευσης, οι οποίες απλοποιούνται σε τρείς με την πρώτη να αποτελείται από αλλουβιακά ιζήματα, τις ενδιαμέσες κυρίως από άμμο και την ανώτερη στρώση από ιλύ. Πιο συγκεκριμένα:

- H1: Αδρόκοκκα αλλουβιακά ιζήματα επάνω σε προ-Ολοκαινικές αποθέσεις. Αντιστοιχεί στις θέσεις που το TBM παγιδεύτηκε
- H2: Αδρόκοκκη άμμος με μικρά χαλίκια που αντιστοιχεί στα παράκτια ιζήματα.
- H3: Στρώση ιλύος προδελταϊκής προέλευσης με απόσταση ωστόσο από το δέλτα
- H4: Ιλυώδης λεπτόκοκκη άμμος προδελταϊκής προέλευσης με κοντινή απόσταση από το δέλτα
- H5: Στρώση αδρόκοκκης άμμου με ενστρώσεις χαλικιών δελταίκής προέλευσης.
- H6: Η κορυφαία στρώση από ιλύ δελταϊκής προέλευσης

	Apparent density	Saturated density	Submerged density	Uniaxial compression	Cohesion	Friction angle	Poisson's ratio	Young's modulus
	γ_n	γ_{sat}	γ'	qu	C'	ϕ'	ν	E
	kN/m³	kN/m³	kN/m³	MPa	t/m²	°		MPa
Anthropic fill	18	19	9	–	3	30	0.35	10
Upper layer of silt	17.2	20.1	10.1	0.647	2.5	29	0.35	15
Middle layer of sand	17.8	20.2	10	0.11	1	34	0.33	15
Basal layer of boulders	18	22	12	91.88[a]	1	45	0.3	20
Miocene basement, sand	18.4	21.2	11.2	0.158	1	33	0.33	60

[a] Calculated for a single boulder.

Πίνακας 34: Γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των υλικών που διαπέρασε το μηχάνημα TBM στις ζώνες L2, L10 (GISA, 2002).

Σύμφωνα με την γεωλογία του δέλτα Llobregat, ύστερα από λεπτομερή έρευνα με γεωτρήσεις υδρογεωλογικού και γεωτεχνικού ενδιαφέροντος (Gamez, 2007), αυτό αποτελείται από ένα άθροισμα τεσσάρων δέλτα ηλικίας Τεταρτογενούς. Τα δύο χαμηλότερα στρώματα των δέλτα δεν εντοπίζονται στην περιοχή.

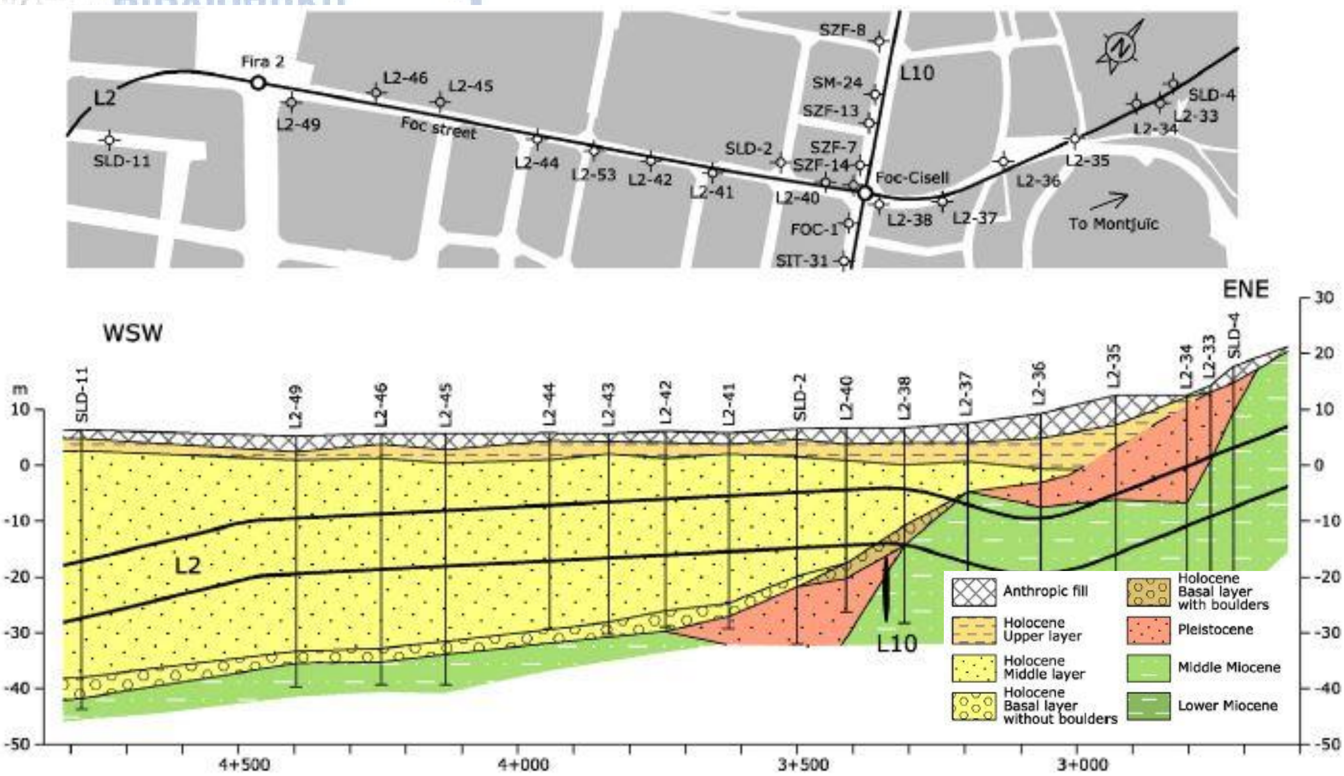
Η γραμμή L10 ξεκίνησε να εκσκάπτεται με το EPB τον Ιανουάριο του 2009. Τον Μάρτιο μετά από 3 μήνες εκσκαφής στην χιλιομετρική θέση 3+716 ξεκίνησαν οι πρώτες δυσκολίες στην εκσκαφή με αλλαγές στην συμπεριφορά των παραμέτρων που αντιμετώπιζε το μηχάνημα. Συγκεκριμένα εκείνη την ημέρα εμφανίστηκαν κάποιοι ογκόλιθοι στο σύστημα μεταφοράς, γεγονός που προμήνυε την παρουσία της ζώνης των ογκολίθων. Παρόλα αυτά η εκσκαφή συνεχίστηκε και 3 μέρες αργότερα στην χιλιομετρική θέση 3+785 παρατηρήθηκε μια σημαντική μείωση της επίδοσης του μηχανήματος. Σε αυτό το σημείο παρατηρήθηκε υψηλή διακύμανση της πίεσης που ασκούνταν στο έδαφος του μετώπου, λόγω της δυσκολίας να διατηρηθεί η πύλη που οδηγεί στον μεταφορέα απομάκρυνσης των υλικών, κλειστή από τους ογκολίθους. Έτσι το TBM δυσκολεύτηκε να συνεχίσει την λειτουργία του αρχικά από την χιλιομετρική θέση 3+774 και στην συνέχεια στην θέση 3+789, όπου και σταμάτησε να λειτουργεί, προκειμένου να ελεγχθούν τα κοπτικά του άκρα. Η συντήρηση των κοπτικών κεφαλών του EPB και η αντικατάστασή των κοπτικών άκρων γίνεται με την άσκηση πίεσης σε υψηλότερα επίπεδα κατά την διάρκεια της αντικατάστασης Παρόλα αυτά σε αυτή την περίπτωση δεν ήταν εύκολη αυτή η μέθοδος, καθώς τα αμμώδη και χαλικώδη υλικά του μετώπου εκσκαφής προκαλούν συνέχεια απώλειες πιέσεως. Αυτό οδήγησε σε πολλές αποτυχημένες προσπάθειες εφαρμογής αυτής της μεθόδου με αποτέλεσμα το μηχάνημα να χρειαστεί να μετακινηθεί στην χιλιομετρική θέση 3+793, όπου τα προβλήματα αυξήθηκαν, καθώς τα πρόσθετα μπεντονίτη που χρησιμοποιήθηκαν κατά τις πρώτες απόπειρες αύξησαν την ρευστότητα των υλικών. Προκειμένου να βρεθεί μια σταθερή θέση το μηχάνημα προχώρησε λίγα μέτρα ακόμη όπου η ζώνη μεταφοράς των υλικών άρχισε να μεταφέρει και κομμάτια της κοπτικής κεφαλής και του μπεντονίτη, ενώ παρατηρήθηκαν και διαρροές αφρού που συγκεντρώθηκαν μέσα σε ένα συλλέκτη νερού πάνω από την σήραγγα. Επιπλέον παρατηρήθηκε μια ισχυρή μυρωδιά σε αυτόν. Όλοι αυτοί οι λόγοι οδήγησαν στην παύση της λειτουργίας του EPB.

Ένας ακόμη λόγος ήταν οι ισχυρές καθιζήσεις που συνέβησαν στην επιφάνεια, κυρίως λίγο πριν την παύση του TBM, λόγω των αυξομειώσεων των πιέσεων στο μέτωπο. Η καθιζήσεις κοντά σε αυτό το σημείο έφτασαν την τάξη των 80 mm.

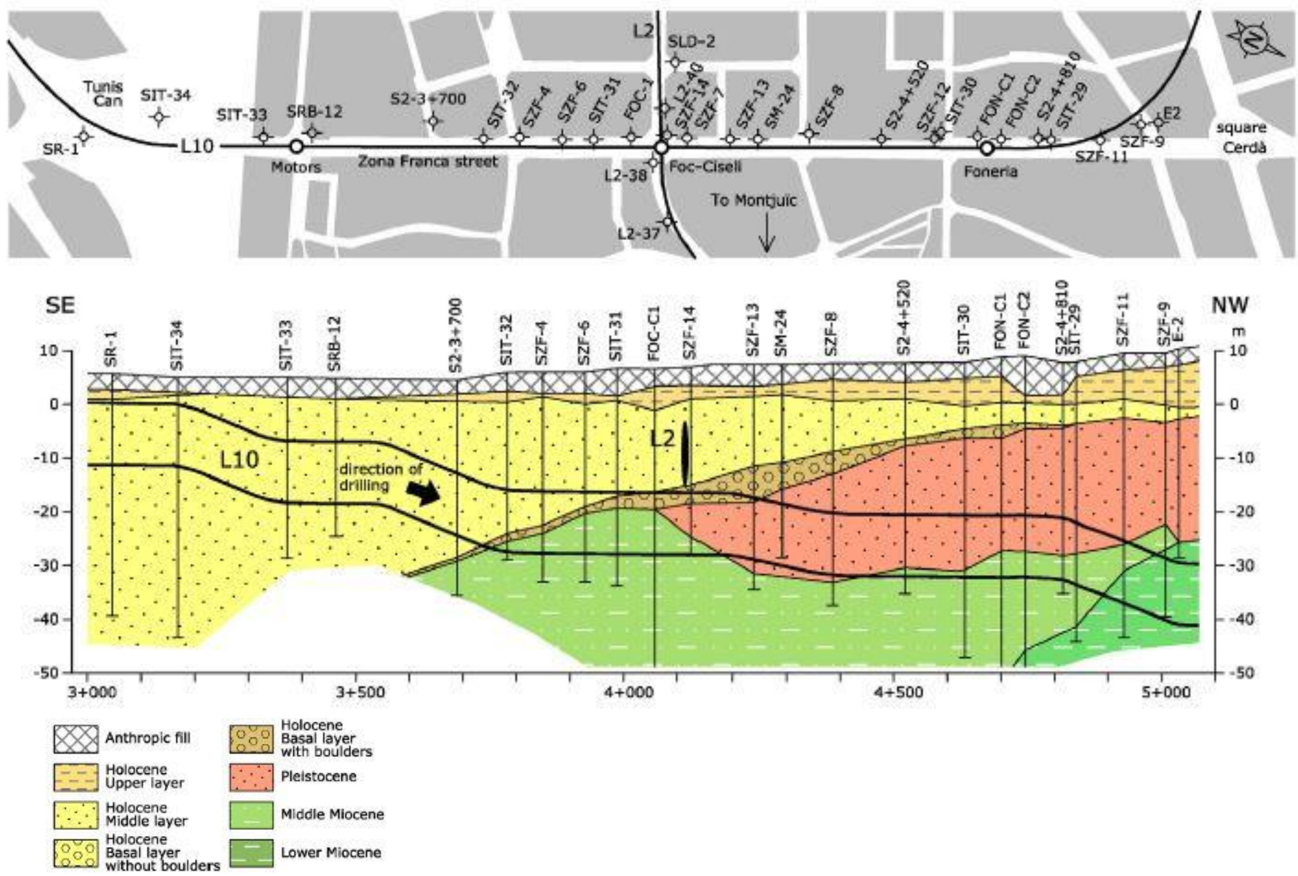
Η παρέμβαση με την αύξηση της πίεσης για την αντικατάσταση των στελεχών της κοπτικής κεφαλής ήταν εν τέλει δυνατή από την χιλιομετρική θέση 3+798 και μετά.

Στο σημείο της παύσης της λειτουργίας του TBM, το μέτωπο εκσκαφής αποτελούνταν από το ανώτερο στρώμα άμμου δελταϊκής προέλευσης, την ζώνη των ογκολίθων πάχους 1,5m και την κατώτερη ζώη άμμου Μειοκαίνου. Σε αυτό το σημείο η σήραγγα ήταν 13m κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα. Ο πιο εύκολος και γρήγορος τρόπος επιδιόρθωσης της κοπτικής κεφαλής θα ήταν η εκσκαφή ενός περιφραγμένου χώρου ανάμεσα σε έναν διαφραγματικό τοίχο και την κεφαλή. Παρόλα αυτά η παρουσία του συλλέκτη νερού απέτρεψε αυτή την επιλογή και οδήγησε στην κατασκευή ενός συμπαγούς τεμάχους εκτοξευμένου σκυροδέματος στο εσωτερικό του οποίου εισχώρησε το TBM και εν τέλει οδήγησε στην εκσκαφή μιας στοάς μέσα στο τέμαχος, η οποία επέτρεψε την πρόσβαση στο μέτωπο εκσκαφής και στην επιδιόρθωση της κοπτικής κεφαλής. Στην συνέχεια εντοπίστηκαν οι ζώνες των ογκολίθων και η κατώτερη ζώνη άμμου Μειοκαίνου που εξακολουθούσαν να είναι περατές παρά την τοποθέτηση εκτοξευμένου σκυροδέματος. Για να μειωθεί η περατότητά τους εφαρμόστηκαν νέες ενεματώσεις από την επιφάνεια με όνομα TAM. Επιπλέον έγιναν ενεματώσεις με αφρώδες υλικό από την επιφάνεια για να πληρωθούν τυχόν κενά που είχαν προκληθεί από τις επαναλαμβανόμενες αποτυχημένες προσπάθειες επιδιόρθωσης της κεφαλής του TBM. Μετά την επιδιόρθωση του TBM, το μηχάνημα σταμάτησε στην θέση 3+804, όπου ο περιμετρικός χώρος ανάμεσα στην ασπίδα και το έδαφος καλύφθηκε με γεωαφρό για να αποφευχθούν εισροές νερού.

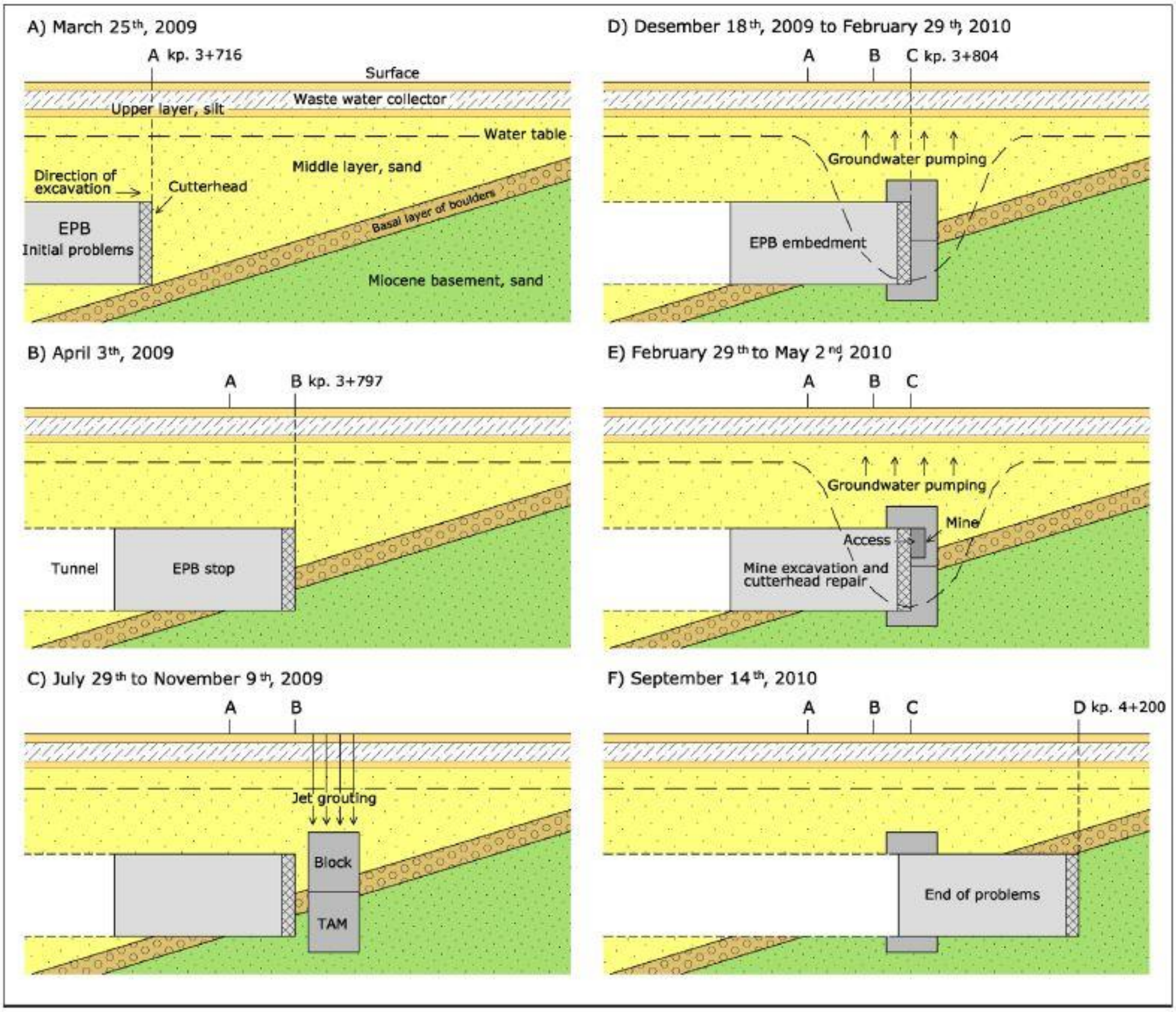
Με την τοποθέτηση της πλάκας του σκυροδέματος και πριν την εκσκαφή της στοάς έγιναν δοκιμές περατότητας περιμετρικά του τεμάχους και κρίθηκε απαραίτητη η μείωση του επιπέδου του υδροφόρου προκειμένου να είναι εφικτές οι εργασίες αποκατάστασης σε συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης. Έτσι έγιναν 21 πηγάδια άντλησης στο εσωτερικό της πλάκας και στα γύρω γεωυλικά για να μειωθεί η στάθμη του υδροφόρου. Τοποθετήθηκαν επίσης πιεζόμετρα για να ελέγχουν την στάθμη αυτή, ενώ εφαρμόστηκε και ένα σύστημα ελέγχου μετακινήσεων λόγω της άντλησης το οποίο μέτρησε μετακινήσεις της τάξεως 5-15mm, που μετά το πέρας των αντλήσεων θα επανέρχονταν στα αρχικά επίπεδα.



Σχήμα 14: Η γεωλογική τομή των γεωτρήσεων της γραμμής L2 στην θέση της έρευνας (M. Filbà et al., 2016)



Σχήμα 15: : Η γεωλογική τομή των γεωτρήσεων της γραμμής L10 στην θέση της έρευνας ((M. Filbà et al., 2016)



Σχήμα 16: Τα βήματα εκσκαφής του TBM μέχρι την εμφάνιση της ζώνης των ογκολίθων , την παύση της λειτουργίας του, και την κατασκευή του τεμάχους σκυροδέματος για την επιδιόρθωση της κεφαλής του TBM και την συνέχεια της προχώρησής του (M. Filbà et al., 2016)

Σήραγγα	Διάμετρος (m)	Μήκος (km)	Υπερκείμενα (m)	Υλικά εκσκαφής	Τύπος TBM	Αστοχία	Αίτια	Πηγή
Kranji (Σιγκαπούρη)	4,9	12,6	50	Γρανίτης υγιής και αποσαθρωμένος (Τριαδικό)	EPB	Εισροή νερού, καταπτώσεις, συχνότερη αλλαγή κοπτικών άκρων	Λανθασμένη γεωλογική εκτίμηση εναλλαγών τύπων γρανίτη	Zhao J. et al., (2006), Tunnelling through a frequently changing and mixed ground: A case history in Singapore
Πιλοτική σήραγγα Απέννινων (Ιταλία). Κατασκευάστηκε μαζί με άλλες 3 πιλοτικές σήραγγες, ως μέρος του σχεδιασμού του αυτοκινητοδρόμου A1 ανάμεσα στις περιοχές Sasso Marconi – Barberino del Mugello	3,9	8,5	400	Ιλυόλιθος, φλύσχης, ψαμμίτης, μάρμαρο	4 TBM ανοιχτού τύπου	Υπερεκσκαφές	Φτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά φλύσχη	Barla G. and Pelizza S., (2000), TBM tunnelling in difficult ground conditions
Σήραγγες Jinpang (Κίνα). Κατασκευάστηκαν για υδροηλεκτρική χρήση	12,4	16,6	2,525	Μάρμαρο, ασβεστόλιθος (Τριαδικό)	2 TBM Gripper	Εκρήξεις βράχων, πλακώδεις αποκολλήσεις τοιχωμάτων, εισροή νερού	Ρήγματα, Υψηλά υπερκείμενα, Αλλαγή τάσεων με το βάθος και αλλαγή του προσανατολισμού τους	Gong G. et al., (2013), TBM tunneling in marble rock masses with high in situ stress and large groundwater inflow: a case study in China
Zagros (Δ. Ιράν). Κατασκευάστηκε για την μεταφορά νερού μέσω των βουνών Zagros	6,73	46	1400	Ασβεστόλιθος, δολομίτης, σχιστόλιθος, μάρμαρο (Κρητιδικό),				

Σήραγγα	Διάμετρος (m)	Μήκος (km)	Υπερκείμενα (m)	Υλικά εκσκαφής	Τύπος TBM	Αστοχία	Αίτια	Πηγή
Zagros (Δ.Ιραν), Κατασκευάστηκαν για την μεταφορά νερού μέσω των βουνών Zagros.	6,73	46	1400	Ασβεστόλιθος, δολομίτης, σχιστόλιθος, μάρμαρο (Κρητιδικό), Καρστικοποιημένοι ασβεστόλιθοι (Ιουρασικό)	2 TBM διπλής ασπίδας	Καταρροή υλικού από τα ρήγματα, καταπτώσεις, συγκλίσεις, παρουσία εγκοίλου	Παρουσία μικτών μετώπων, κατακερματισμένος καρστικοποιημένος ασβεστόλιθος, υψηλά υπερκείμενα	Bayati M, Khademi J., (2016), A case study on TBM tunnelling in fault zones and lessons learned from ground improvement
Parbati (Ινδία). Κατασκευάστηκε για υδροηλεκτρικούς σκοπούς	6,8	9,05 km (χ.θ 19,46 km-10,3 km)	1300	Γρανίτης, γνευσιογρανίτης, χαλαζίτης, σχιστόλιθος (Προτεροζωικό-Κάμβριο)	TBM ανοιχτού τύπου	Κατάρρευση τεμάχους σφήνας, υπερεκσκαφές, εισροή νερού και υλικών άμμου και ιλύος	Κατακερματισμένος γνεύσιος, Ζώνες μαραρυγιών ανάμεσα στον γνεύσιο, διατμημένος και κερματισμένος χαλαζίτης σε υπερκείμενα 200m	K.K. Panthi, (2010), Appropriateness of open TBM tunnelling in the Himalaya – A case study K.K. Panthi, (2012), Evaluation of rock bursting phenomena in a tunnel in the Himalayas
Kargi (Τουρκία). Κατασκευάστηκε για υδροηλεκτρική χρήση στην περιοχή του ποταμού Kizlirmak	10	11,8	600	Οφιόλιθοι(ψαμμίτες, μάργα, μάρμαρα), βασάλτες, ανδεσίτες	TBM διπλής ασπίδας	Καταρροή γεωυλικού, υπερεκσκαφές	Παρουσία ρηγμάτων, μικρό έδαφος, διογκούμενα ορυκτά (σμεκτίτης)	Home L., (2016), Hard rock TBM tunneling in challenging ground: Developments and lessons learned from the field

Σήραγγα	Διάμετρος (m)	Μήκος (km)	Υπερκείμενα (m)	Υλικά εκσκαφής	Τύπος TBM	Αστοχία	Αίτια	Πηγή
Αποσελέμη (Κρήτη). Πρόκειται για τμήμα του φράγματος Αποσελέμη που κατασκευάστηκε για την τροφοδότηση νερού στο Ηράκλειο και Άγιο Νικόλαο	4,35	3,4	200	Ασβεστόλιθος Plattenkalk, φυλλίτης, ασβεστόλιθος-δολομίτης	TBM διπλής ασπίδας με δυνατότητα μετατροπής σε μονή	Καταρροή γεωυλικού, υπερεκσκαφές, καταπτώσεις καμινάδας, συγκλίσεις	Λανθασμένη πρόβλεψη ποιότητας βραχομαζών, Αποσαθρωμένοι και καρστικοποιημένοι ασβεστόλιθοι με χαμηλή συνοχή, παρουσία αερίων H_2S	Gutter W., Rudigier G., (2016), Tunneling in Crete- A challenging task from a variety of aspects
Γραμμή L10 του μετρό της Βαρκελώνης	12,06	43,71	80	Προδελταικά και δελταικά υλικά και συγκεκριμένς αλλουβιακά ιζήματα, άμμος, ιλύς	EPB	Παύση λειτουργίας TBM, καθιζήσεις	Ογκόλιθοι, Αυξομειώσεις πιέσεων στο μέτωπο λόγω της υπολειτουργίας του EPB	Filba M. et al., (2015), Tunnel boring machine collision with an ancient boulder beach during the excavation of the Barcelona city subway L10 line: A case of adverse geology and resulting engineering solutions

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΕΝΑΝΤΙ ΜΗΧΑΝΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΟΡΥΞΗΣ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΩΝ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ

7.1 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ

Πρόκειται για ένα δίκτυο επίγειας, υπέργειας και υπόγειας κατασκευής αστικών σιδηροδρόμων. Εξυπηρετεί την Μητροπολιτική περιοχή της Αθήνας, ενώ συνδέεται και με τον Προαστιακό Σιδηρόδρομο και το δίκτυο του τραμ. Αποτελείται από 61 σταθμούς που εκτείνονται στο μήκος 3 γραμμών. Αυτές είναι:

- Γ1: Πειραιάς – Κηφισιά (Πράσινη γραμμή): Λειτουργεί από το 1869, είναι στο μεγαλύτερο μέρος της επίγεια
- Γ2: Ανθούπολη - Ελληνικό (Κόκκινη γραμμή): Λειτουργεί από το 2000, είναι εξ ολοκλήρου υπόγεια
- Γ3: Αγία Μαρίνα- Δουκίσσης Πλακεντίας- Αεροδρόμιο (Μπλε γραμμή): Λειτουργεί από το 2000, είναι στο μεγαλύτερο μέρος της υπόγεια, εκτός από το τμήμα της κεντρικής νησίδας Αττικής οδού, όπου είναι κοινό με την γραμμή του Προαστιακού Σιδηροδρόμου

Στην παρούσα εργασία ερευνάται η τεχνικογεωλογική συμπεριφορά έναντι μηχανοποιημένης όρυξης κατά μήκος των επεκτάσεων του Μετρό της Αθήνας «Άγιος Δημήτριος - Ελληνικό» και « Χαϊδάρι - Ευαγγελίστρια » , σύμφωνα με τις Τεχνικές Εκθέσεις του Π.Γ Μαρίνου (2005, 2006).

7.2 ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ

ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΓΡΑΜΜΗΣ 1 (ΠΡΑΣΙΝΗ ΓΡΑΜΜΗ)

Το 1869 κατασκευάστηκε η πρώτη γραμμή μήκους 8,5 χιλιομέτρων από το Θησείο έως τον Πειραιά. Από το 1889-1895 κατασκευάζεται η επέκταση προς Ομόνοια , μαζί με την κατασκευή του πρώτου ημι-υπόγειου σταθμού της Ομόνοιας. Το μετρό της Αθήνας κατασκευάζεται ουσιαστικά το 1904, όταν ο σιδηρόδρομος Αθηνών-Πειραιώς ηλεκτροδοτείται και αποκτά την ονομασία «Ηλεκτρικός». Το έργο αυτό ανέλαβε η εταιρίας ΣΑΠ ΑΕ(Σιδηρόδρομοι Αθηνών Πειραιώς).

Το 1926 η ΗΕΜ (Ηλεκτρική Εταιρεία Μεταφορών) αναλαμβάνει τα τραμ της Αθήνας και την γραμμή Πλατεία Ατικής-Κηφισιά. Οι ΕΗΣ (Ελληνικοί Ηλεκτρικοί Σιδηρόδρομοι) αναλαμβάνουν την βελτίωση της υπάρχουσας γραμμής , με υπόγεια επέκταση της σήραγγας ως τον σταθμό Αττική, έτσι ώστε η γραμμή του Ηλεκτρικού να καλύπτει και την Κηφισιά. Το 1957 παραδίδεται ο Ηλεκτρικός που συνδέει πλέον Πειραιά-Κηφισιά.

ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΓΡΑΜΜΩΝ 2 ΚΑΙ 3 (ΚΟΚΚΙΝΗΣ ΚΑΙ ΜΠΛΕ ΓΡΑΜΜΗΣ)

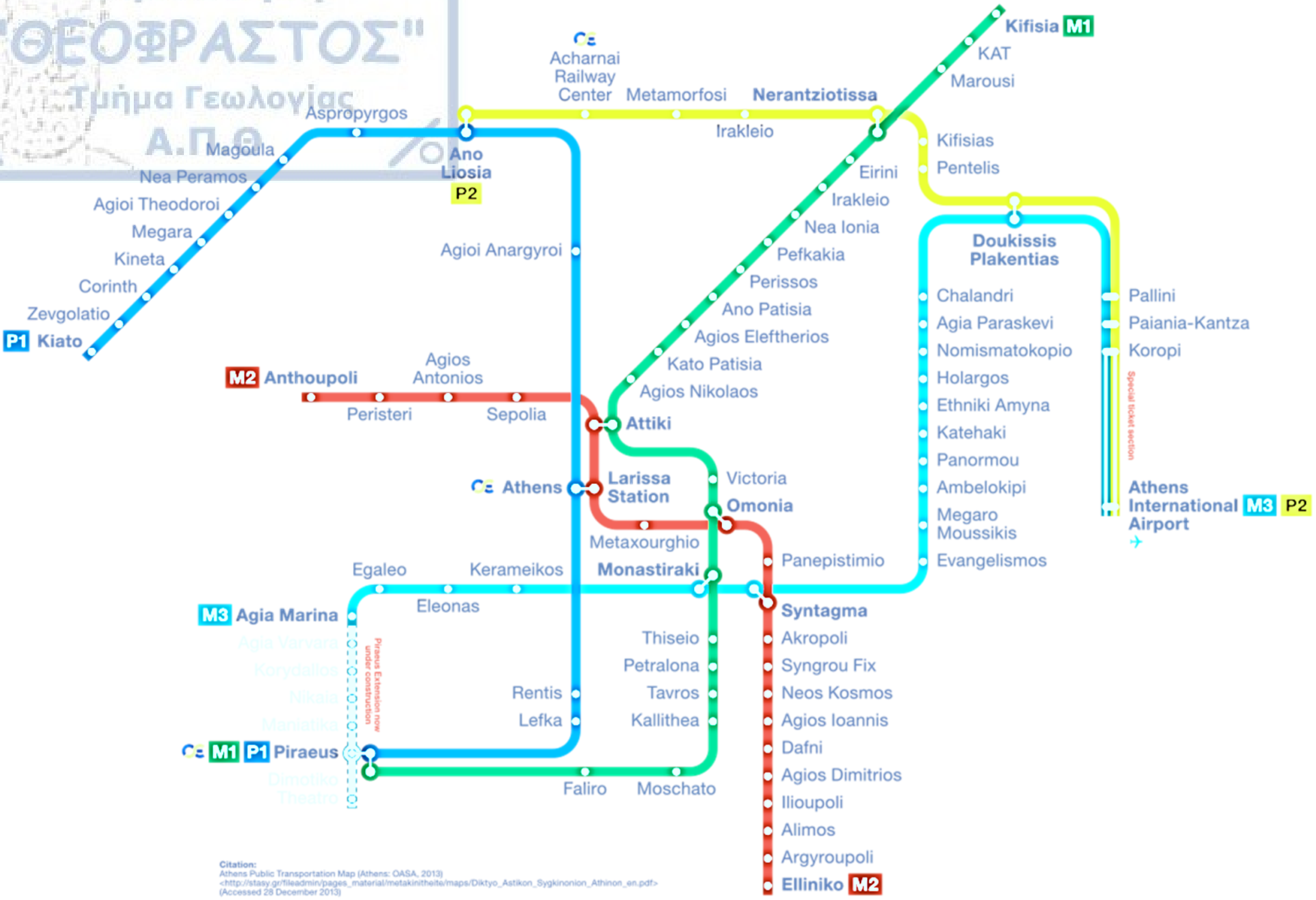
Η αρχική μελέτη σχεδιασμού της γραμμής 2 προέβλεπε ότι θα εκτείνονταν από τα Σεπόλια έως το Δάφνη και θα αποτελούνταν από 12 σταθμούς. Το 1991-1999 κατασκευάζεται το τμήμα Σεπόλια-Σύνταγμα με 7 σταθμούς, ενώ τελικά το 2000 κατασκευάζονται και οι υπόλοιποι 5 σταθμοί της γραμμής 2 στο τμήμα Σύνταγμα-Δαφνί.

Αντίστοιχα για την γραμμή 3 η μελέτη προέβλεπε την κατασκευή της γραμμής Κεραμεικός- Εθνική Άμυνα με 9 σταθμούς. Στο ίδιο διάστημα κατασκευής με την γραμμή 2, παραδόθηκε το τμήμα Σύνταγμα- Εθνική Άμυνα της γραμμής 3 με 7 σταθμούς. Το 2003 παραδόθηκε σε λειτουργία το τμήμα Σύνταγμα-Μοναστηράκι, ενώ το 2004 παραδόθηκε η επέκταση προς Αεροδρόμιο.

Το 2007 ολοκληρώνεται η επέκταση της γραμμής 3 προς Αιγάλεω με τους σταθμούς Κεραμεικός και Βοτανικός. Αρχικά τον Απρίλιο του 2013 λειτούργησε η επέκταση της γραμμής 2 από τον Άγιο Αντώνιο στην Ανθούπολη που περιελάμβανε και τον σταθμό Περιστέρι. Τον Ιούλιο του 2013 εγκαινιάστηκε η επέκταση της γραμμής 2 από τον Άγιο Δημήτριο στο Ελληνικό κάτω από τη λεωφόρο Βουλιαγμένης. Τέλος, τον Δεκέμβριο του 2013 δόθηκε σε λειτουργία ο σταθμός Αγία Μαρίνα της γραμμής 3.

ΓΡΑΜΜΗ	ΔΙΑΔΡΟΜΗ	ΣΤΑΘΜΟΙ	ΠΡΩΤΟ ΤΜΗΜΑ	ΤΕΛΕΥΤΑΙΑ ΕΠΕΚΤΑΣΗ
Γ1	Πειραιάς - Κηφισιά	24	Πειραιάς - Θησείο (1869)	Ηράκλειο - Κηφισιά (2004)
Γ2	Ανθούπολη - Ελληνικό	29	Σεπόλια - Σύνταγμα (2000)	Άγιος Δημήτριος - Ελληνικό (2013)
Γ3	Αγία Μαρίνα - Δουκίσσης Πλακεντίας - Αεροδρόμιο	21	Σύνταγμα - Εθνική Άμυνα (2000)	Αιγάλεω - Αγία Μαρίνα (2013)

Πίνακας 35: Η εξέλιξη των γραμμών του μετρό της Αθήνας έως το 2013.



Εικόνα 15: Ο χάρτης του Μετρό της Αθήνας, σύμφωνα με τις επεκτάσεις του (Wikipedia)

7.3 Η ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ-ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

7.3.1 Η ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

Η Αττική αποτελείται στο κεντρικό της τμήμα από το Λεκανοπέδιο των Αθηνών, το οποίο έχει έκταση 22km μήκος και 11 km πλάτος και προσανατολισμό ΒΑ-ΝΔ. Προς τα ΝΔ ανοίγεται στον Σαρωνικό κόλπο, ενώ προς τα Βόρεια, Ανατολικά και Δυτικά οριοθετείται από τα όρη :

- Της Πάρνηθας ΒΒΔ
- Της Πεντέλης ΒΑ
- Του Υμηττού προς τα Α
- Των Αιγάλεω και Ποικίλο προς τα Δ

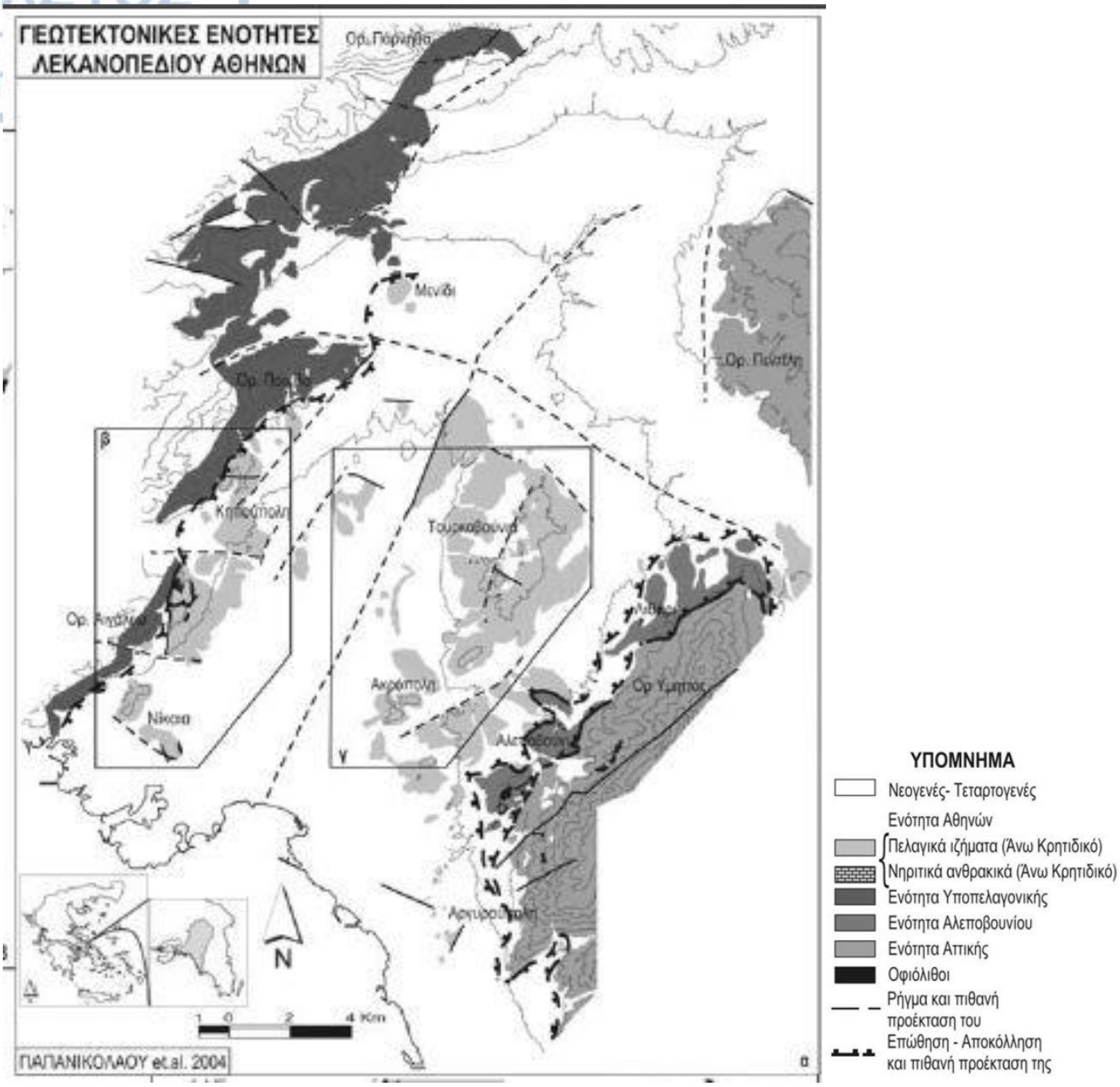
Ένα χαρακτηριστικό του Λεκανοπεδίου της Αττικής είναι ότι παρουσιάζει στον κεντρικό του άξονα μια λοφώδη δομή, που αποτελείται από τους λόφους του Λυκαβηττού, Ακρόπολης-Φιλοπάππου, Στρέφης, Τουρκοβουνίων, Αρδηττού και Ζωοδόχου Πηγής.

Εικόνα 16: Αεροφωτογραφία του Λεκανοπεδίου της Αττικής (πηγή: Flickr).

7.3.2 ΟΙ ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

Η γεωλογική δομή της Αττικής αποτελείται από αλπικούς και μεταλπικούς σχηματισμούς, με τους πρώτους να καλύπτουν τα ορεινά τμήματα της Αττικής, ενώ τους δεύτερους τα πεδινά, καλύπτοντας ασύμφωνα τους υποκείμενους αλπικούς.

Το λεκανοπέδιο της Αττικής είναι μια τεκτονική ζώνη αποκόλλησης δύο ενοτήτων πετρωμάτων. Το Δυτικό τμήμα αποτελείται από την αλλόχθονη ενότητα της Υποπελαγονικής ζώνης (Παπανικολάου 2002), καλύπτει τα όρη της Πάρνηθας, του Αιγάλεου και του Ποικίλου και αποτελείται από αμεταμόρφωτους σχηματισμούς. Το Ανατολικό τμήμα αντίστοιχα αποτελείται από την αυτόχθονη ενότητα της Αττικής, στην οποία ανήκουν τα όρη του Υμηττού και της Πεντέλης και αποτελείται από μεταμορφωμένους σχηματισμούς. Ανώτερα της Υποπελαγονικής και Αττικής εντοπίζεται το Αλλόχθονο σύστημα των Σχιστολίθων των Αθηνών (Marinos et al. 1971, 1974).



Σχήμα 17: Οι γεωτεκτονικές ενότητες του Λεκανοπεδίου Αθηνών (Παπανικολάου et al., 2004)

7.3.2.1 ΑΛΠΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ

Η αυτόχθονη ενότητα Αττικής

Αποτελείται από της μεταμορφωμένη ενότητα της Βάρης, Τριαδικής ηλικία, την υπερκείμενη ενότητα Υμηττού, Τριαδικο-Ιουρασικής ηλικίας και την ενότητα Πεντέλης. Στην πρώτη εντοπίζονται τα μεταβασικά πετρώματα, οι Σχιστόλιθοι Βάρης και Πιρνάρης και τα παχυστρωματώδη δολομιτικά Μάρμαρα, ενώ στην δεύτερη εντοπίζονται τα κατώτερα και ανώτερα Μάρμαρα και οι Σχιστόλιθοι της Καισαριανής (Lepsius 1893). Τέλος στην ενότητα Πεντέλης εντοπίζεται μια μετα-ηφαιστειοϊζηματογενής ακολουθία που καταλήγει σε παχυστρωματώδη μάρμαρα.

Η αλλόχθονη ενότητα της Υποπελαγονικής

Αποτελείται από ένα ηφαιστειοιζηματογενές σύμπλεγμα πετρωμάτων και από άστρωτους έως παχυστρωματώδεις, νηριτικής φάσεως ασβεστόλιθους και δολομιτικούς ασβεστόλιθους

Το αλλόχθονο σύστημα των Σχιστολίθων των Αθηνών (Ενότητα Αθηνών, Ενότητα Αλεποβουνίου)

Διακρίνεται σε δύο υποενότητες, την ενότητα των Αθηνών που εκτείνεται κεντρικά ως υπερκείμενη των ενοτήτων Αττικής και Υποπελαγονικής και την ενότητα του Αλεποβουνίου στα ανατολικά, ως υπερκείμενη του καλύμματος της Αττικής και υποκείμενη της ενότητας Αθηνών. Η ενότητα Αθηνών, είναι ουσιαστικά αμεταμόρφωτη αποτελείται από ασβεστόλιθους ηλικίας Άνω Κρητιδικού και μείγμα πετρωμάτων (mélange). Η ενότητα Αλεποβουνίου αποτελείται από δύο τεκτονικά καλύμματα, με το ανώτερο να περιλαμβάνει συμπαγείς κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους και το κατώτερο ελαφρά μεταμορφωμένα σχιστομαργαϊκά στρώματα και φυλλίτες έντονα σχιστοποιημένους ηλικίας Μέσο-Άνω Κρητιδικής (Lepsius 1893, Kober 1929).

7.3.2.2 ΟΙ ΜΕΤΑΛΠΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ

Πρόκειται για Νεογενείς θαλάσσιους και ηπειρωτικούς σχηματισμούς μαργών, ψαμμιτών, λατυποπαγών, αργίλων, ασβεστολίθων και Τεταρτογενείς αποθέσεις φερτών υλικών των ποταμών του Λεκανοπεδίου, ποτάμιων αναβαθμίδων, πλευρικών κορημάτων και ριπιδίων.

ΑΛΠΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ	Αυτόχθονη ενότητα Αττικής	Ενότητα Βάρης	Σχιστόλιθοι, Δολομιτικά παχυστρωματώδη Μάρμαρα
		Ενότητα Υμηττού	Μάρμαρα και Σχιστόλιθοι Καισαριανής
		Ενότητα Πεντέλης	Μεταηφαιστειοϊζηματογενής ακολουθία, Μάρμαρα
	Αλλόχθονη ενότητα Υποπελαγονικής	-	Ηφαιστειοιζηματογενές σύμπλεγμα, άστρωτους έως παχυστρωματώδεις, νηριτικής φάσεως ασβεστόλιθοι και δολομιτικοί ασβεστόλιθοι
	Αλλόχθονο σύστημα	Ενότητα Αθηνών	Ασβεστόλιθοι, μείγμα

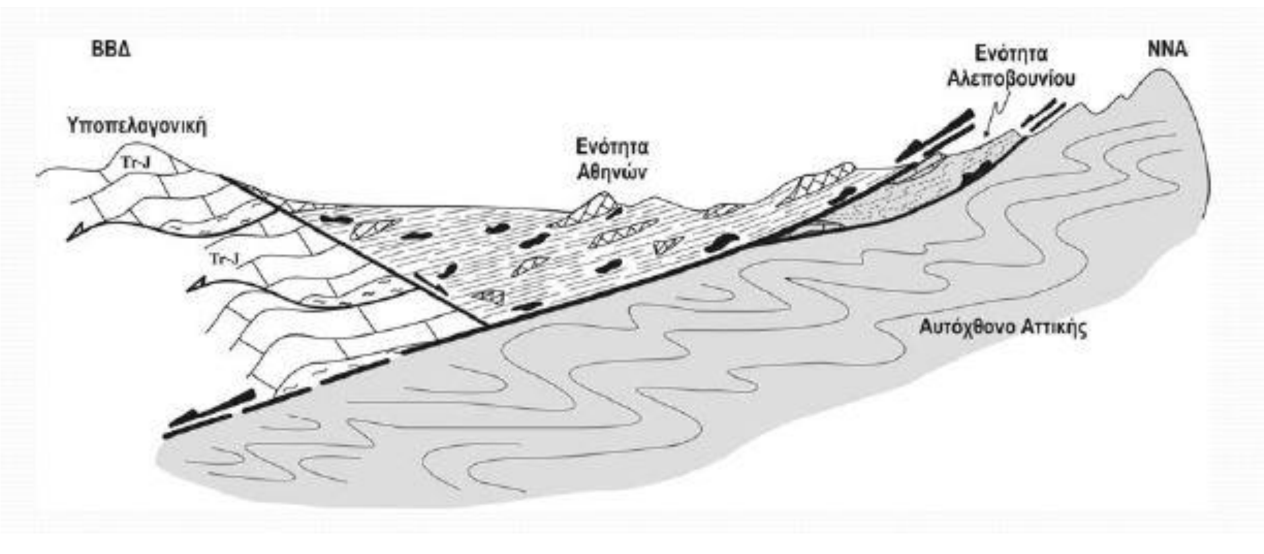
	Σχιστολίθων Αθηνών		πετρωμάτων (mélange)
		Ενότητα Αλεποβουνίου	Κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι, Μεταμορφωμένα σχιστομαργαϊκά στρώματα και φυλλίτες έντονα σχιστοποιημένοι
ΜΕΤΑΛΠΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ	Νεογενείς αποθέσεις		Μάργες, Ψαμμίτες, Λατυποπαγοί, Άργιλοι, Ασβεστόλιθοι
	Τεταρτογενείς αποθέσεις		Ποτάμια υλικά, Υλικά αναβαθμίδων, πλευρικά κορήματα, ριπίδια

Σχήμα 18: Η σχηματική απεικόνιση της γεωλογικής δομής της ευρύτερης περιοχής των Αθηνών (Παπανικολάου et al. 2004).

7.4 Η ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ ΑΠΟ ΑΓΙΟ ΔΗΜΗΤΡΙΟ ΠΡΟΣ ΕΛΛΗΝΙΚΟ

Πίνακας 36: Οι γεωλογικές ε νότητες του Λεκανοπεδίου της Αττικής.

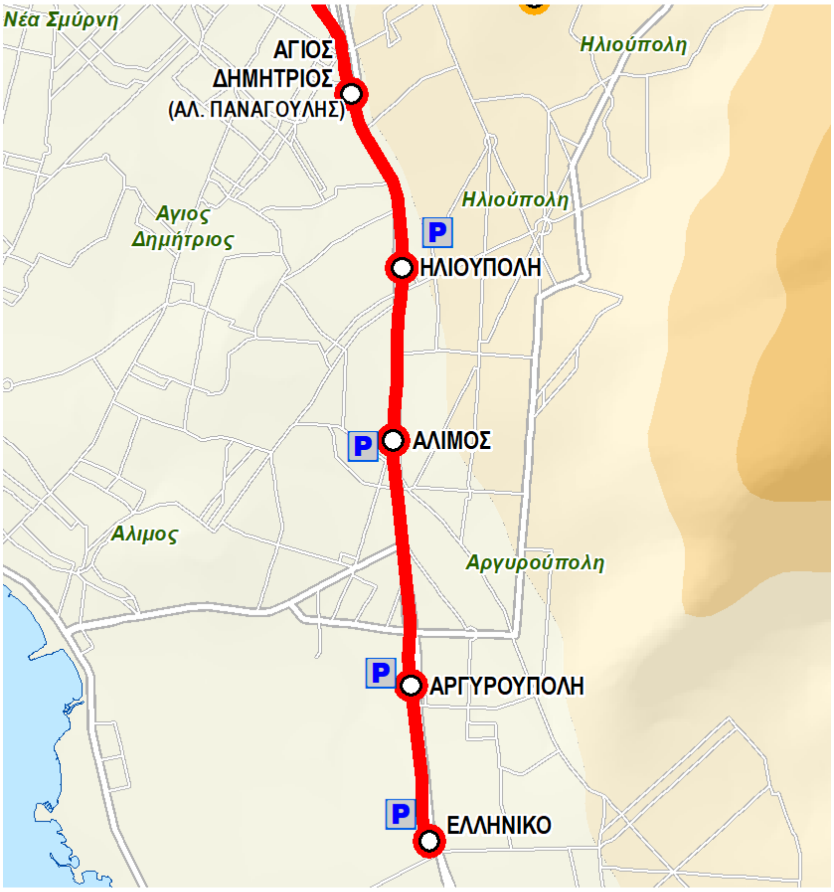
Τα στοιχεία τα οποία πρόκειται να παρουσιαστούν παρακάτω αναφορικά με τις γεωλογικές και τεχνικογεωλογικ ές συνθήκες έχουν ληφθεί από την Τεχνική ‘Εκθεση σχεδιαζόμενης επέκτασης μετρό



Αθηνών «Άγιος Δημήτριος-Ελληνικό» (Μαρίνος Π.Γ.,2005). Πρόκειται για μια επέκταση, με την οποία το 2010, στην γραμμή 2 προστίθενται 5.5 χιλιόμετρα και 4 σταθμοί, φτάνοντας πλέον στον σταθμό του Ελληνικού. Το μήκος της χάραξης από τον σταθμό Άγιος Δημήτριος φτάνει μέχρι την χ.θ. 14+000, όπου διέρχεται κάτω από την λεωφόρο Βουλιαγμένης. Από το σημείο αυτό και έπειτα η σήραγγα παρεκκλίνει προς τα δυτικά, διερχόμενη κάτω από την Αεροπορική Βάση του Ελληνικού έως τον χώρο εναπόθεσης των συρμών του Παλαιού Αεροδρομίου Ελληνικού.

Η διάμετρος της σήραγγας είναι ~10m (διπλής τροχιάς) και διανοίγεται σε βάθη 10-25m. Ανατέθηκε στην Εδαφομηχανική Α.Τ.Ε και εκτελέστηκε σε τρεις γεωτρητικές φάσεις. Αυτές είναι:

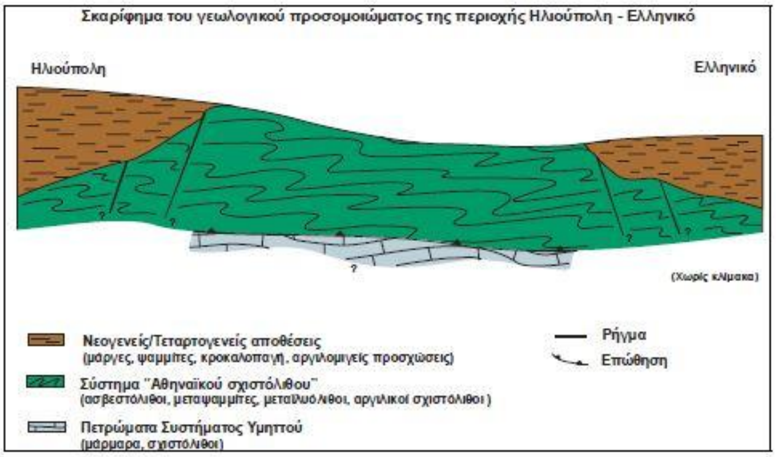
1. 23 μεγάλου βάθους γεωτρήσεις (ελάχιστο βάθος 28m)
2. 59 γεωτρήσεις βάθους ~15m
3. 22 γεωτρήσεις (τυφλές) μέχρι τα 10m και δειγματοληπτικές μέχρι τα 30m



Εικόνα 17: Η επέκταση του μετρό της Αθήνας από Αγ.Δημήτριο προς Ελληνικό. (ΑΤΤΙΚΌ ΜΕΤΡΟ)

7.4.1 ΟΙ ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΗΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ ΑΓ. ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ-ΕΛΛΗΝΙΚΟ

Η σήραγγα εκτείνεται στο εσωτερικό του καλύμματος των «Αθηναϊκών Σχιστολίθων», παράλληλα με την ζώνη επώθησης και πάνω στην αυτόχθονη ενότητα του Υμηττού (Κατσικάτσος et al, 1976, 1986). Επιπλέον διέρχεται και από το εσωτερικό Νεογενών και Τεταρτογενών ιζημάτων, τα οποία αποτέθηκαν επάνω στο σύστημα των «Αθηναϊκών Σχιστολίθων» (Σχήμα 19).



Σχήμα 19: Σκαρίφημα του γεωλογικού προσομοιώματος της περιοχής Ηλιούπολη-Ελληνικό (Π.Γ Μαρίνος 2005, Νέα σχεδιαζόμενη επέκταση Μετρό Αθηνών Αγιος Δημήτριος-Ελληνικό. Σχολιασμός επί των υπεδαφικών συνθηκών σε σχέση με διάφορες μεθόδους μηχανικής διάνοιξης σηράγγων)

Η σήραγγα μπορεί να διακριθεί σε τρία τμήματα βάση των γεωλογικών της συνθηκών. Αυτά είναι:

- Το Βόρειο τμήμα : Περιλαμβάνει μεταλπικά ιζήματα και έχει μήκος 1.6 km
- Το Κεντρικό τμήμα: Περιλαμβάνει τον «Αθηναϊκό Σχιστόλιθο» και έχει μήκος 3.3 km.
- Το Νότιο τμήμα: Περιλαμβάνει μεταλπικά ιζήματα και έχει μήκος 0.6 km.

7.4.1.1 ΤΟ ΒΟΡΕΙΟ ΤΜΗΜΑ (Χ.Θ : 10+100 - 11+700)

Το βόρειο τμήμα περιλαμβάνει κυρίως κροκαλοπαγή/ψηφιδοπαγή, ψαμμίτες, αργίλους και πηλίτες. Τοπικά μπορεί να παρατηρηθούν συνεκτικά κορήματα, χάλικες και τεμάχη ασβεστολίθου στο εσωτερικό αργιλοαμμώδους υλικού.

Στο μέτωπο της σήραγγας, καθώς και στην υπερκείμενη ζώνη εντοπίζονται κυρίως μεταλπικά ιζήματα, ενώ τοπικά παρατηρούνται και λεπτές στρώσεις κορημάτων στις υψηλότερες ζώνες των υπερκειμένων.

Εικόνα 18: Κροκαλοπαγή του Νεογενούς σε τεχνητό πρανές στα ανατολικά της χάραξης (Π.Γ Μαρίνος 2005, Νέα σχεδιαζόμενη επέκταση Μετρό Αθηνών

Εικόνα 19: Κροκαλοπαγή και ψαμμίτες του Νεογενούς σε τεχνητό πρανές ανατολικά της χάραξης (Π.Γ Μαρίνος 2005, Νέα σχεδιαζόμενη επέκταση Μετρό Αθηνών

7.4.1.2 ΤΟ ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ (Χ.Θ : 11+700 – 15+000)

Αποτελείται από της ενότητα του «Αθηναϊκού Σχιστολίθου» , η οποία στα ανώτερα τμήματα χαρακτηρίζεται από μαργαϊκούς ασβεστολίθους, ασβεστολίθους, μεταϊλυολίθους και μεταψαμμίτες, ενώ στα κατώτερα αποτελείται από αργιλικούς σχιστολίθους, μεταϊλυολίθους και ενστρώσεις μεταψαμμίτη.

Το πέτρωμα σε αυτό το τμήμα της χάραξης εμφανίζεται έντονα καταπονημένο και αποσαθρωμένο, λόγω της παραοριζόντιας επώθησης του καλύμματος του «Αθηναϊκού Σχιστολίθου» επάνω στην αυτόχθονη μεταμορφωμένη ενότητα του Υμηττού, με τα χαρακτηριστικά μάρμαρα, σχιστολίθους και φυλλίτες του Υμηττού (Κατσικάτσος et al., 1976, 1986). Οι σχηματισμού του «Σχιστολίθου των Αθηνών» εντοπίζονται τόσο στο μέτωπο της χάραξης, όσο και στη υπερκείμενη ζώνη, φτάνοντας τοπικά ως την επιφάνεια.

Μεταξύ των χ.θ: 12+000-13+000 και 13+400-13+900 εμφανίζονται οι αποθέσεις των, μικρού πάχους, νεογενών και πλειστοκαινικών σχηματισμών και τα κορήματα με τις διλλουβιακές αποθέσεις αντίστοιχα.

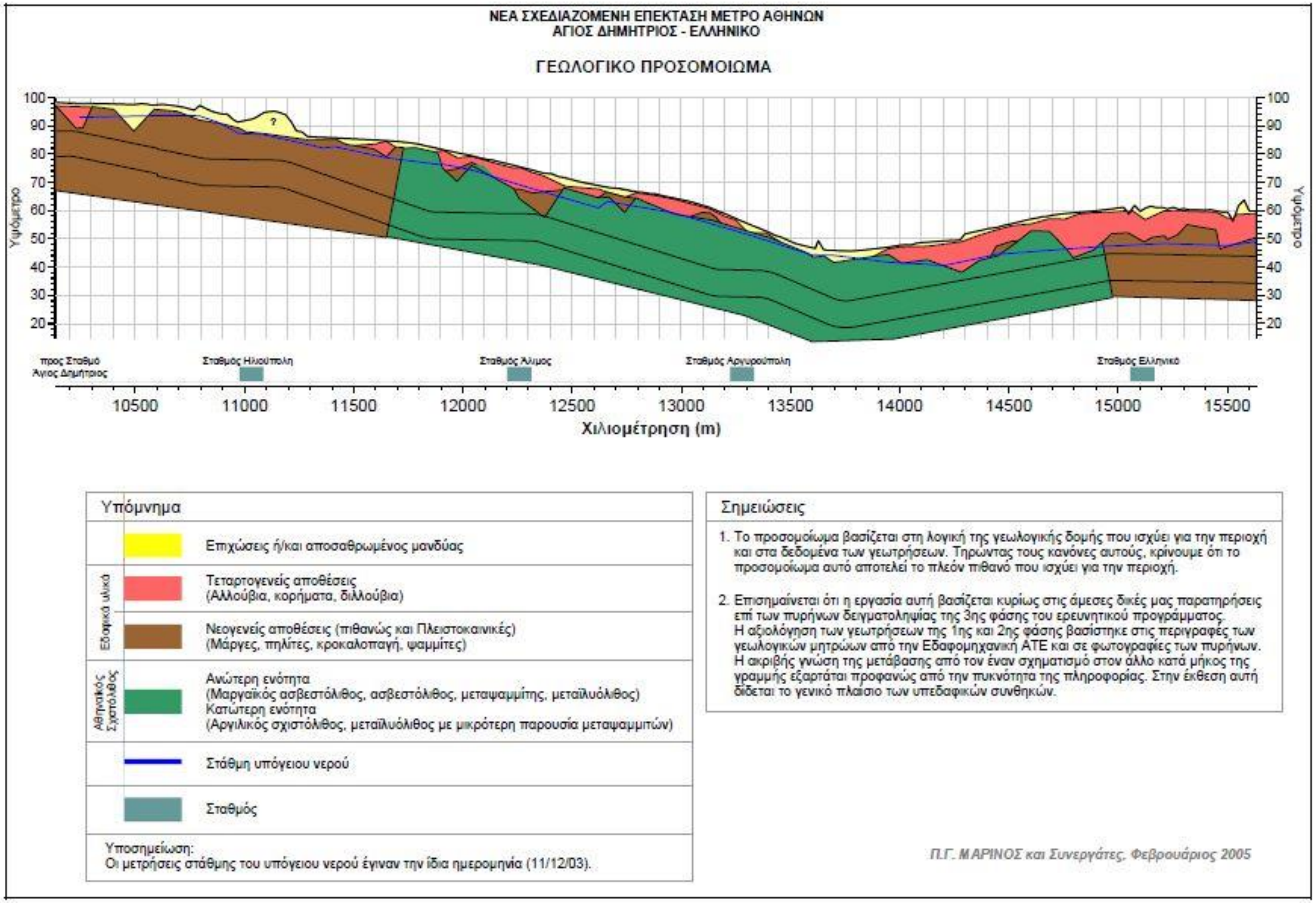
7.4.1.3 ΤΟ ΝΟΤΙΟ ΤΜΗΜΑ (Χ.Θ : 15+000 – 15+600)

Πρόκειται για τμήμα μεταλπικών σχηματισμών με κροκαλοπαγή/ ψηφιδοπαγή, ψαμμίτες, αργίλους και πηλίτες. Διαφοροποιείται από το Βόρειο τμήμα, διότι παρουσιάζει πολύ πιο συστηματική παρουσία και εξάπλωση των κορημάτων οριζοντίως και καθέτως.

Η σήραγγα διέρχεται από τα μεταλπικά ιζήματα, ενώ σε αυτά εντάσσεται και η ζώνη των υπερκειμένων με ιδιαίτερη την παρουσία κορημάτων.

Πίνακας 37: Οι γεωλογικές συνθήκες κατά μήκος των τμημάτων της χάραξης Ηλιούπολη-Ελληνικό.

ΤΜΗΜΑ	Χ.Θ	ΜΗΚΟΣ (km)	ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ
Βόρειο	10+100 - 11+700	1.6	κροκαλοπαγή/ψηφιδοπαγή, ψαμμίτες, άργιλοι, πηλίτες, κορήματα, χάλικες, τεμάχη ασβεστολίθου
Κεντρικό	11+700 – 15+000	3.3	μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, ασβεστόλιθοι, μεταϊλυόλιθοι, ,μεταψαμμίτες, αργιλικοί σχιστόλιθοι, μεταϊλυόλιθοι, ενστρώσεις μεταψαμμίτη
Νότιο	15+000 – 15+600	0.6	κροκαλοπαγή/ ψηφιδοπαγή, ψαμμίτες, άργιλοι, πηλίτες, κορήματα



Σχήμα 20: Γεωλογική τομή της επε΄κτασης Αγ.Δημητρίου – Ελληνικού (Π.Γ Μαρίνος και συνεργάτες, 2005)

7.4.2 ΟΙ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΗΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ ΑΓΙΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ-ΕΛΛΗΝΙΚΟ

Με σκοπό την εκτίμηση της τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς των γεωυλικών, προέκυψε μια ταξινόμηση για τα μεταλπικά ιζήματα, βάση τον βαθμό συγκόλλησης και την συνεκτικότητά τους και για τους βραχώδεις σχηματισμούς βάση του γεωλογικού δείκτη αντοχής GSI.

7.4.2.1 ΕΔΑΦΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ

Τεταρτογενή Ιζήματα

Οι εδαφικοί σχηματισμοί διακρίθηκαν σε χαλαρούς, συνεκτικούς και συμπαγείς. Στην κατηγορία τον χαλαρών σχηματισμών εντάσσονται τα Τεταρτογενή ιζήματα (αλλούβια, κορήματα, διλλούβια), με εξαίρεση ορισμένες θέσεις στις οποίες εντοπίζονται πιο καλής ποιότητας. Χαρακτηριστική μορφή των χαλαρών ιζημάτων είναι τα γωνιώδη τεμάχη συνδεδεμένα με χαλαρό συνδετικό υλικό ή και καθόλου συνδετικό υλικό. Από την άλλη τα κορήματα καλύτερης ποιότητας μπορεί να είναι. ανάλογα με το συνδετικό υλικό, συνεκτικά, αν αυτό είναι αργιλοαμμώδες και συμπαγή, αν είναι μέτρια ή καλά συγκολλημένα με ασβεστιτικό συνδετικό υλικό.

Σε γενικές γραμμές τα ιζήματα αυτά δεν εντοπίζονται στην διατομή της σήραγγας, εκτός από το νότιο τμήμα της σήραγγας, στο οποίο τα υλικά αυτά πλησιάζουν την στέψη της σήραγγας.

Νεογενή Ιζήματα

Σε αυτούς εντάσσονται κροκαλοπαγή/ ψηφιδοπαγή, ψαμμίτες, άργιλοι, πηλίτες, οι οποίοι εμφανίζονται κυρίως ως συνεκτικοί και τοπικά συμπαγής, όταν το συνδετικό υλικό είναι συμπαγές και χαλαροί όταν υπάρχουν ζώνες ατελούς διαγένεσης. Ωστόσο κατά μήκος της χάραξης επικρατούν κυρίως συνεκτικοί σχηματισμοί με ελάχιστες ζώνες χαλαρού υλικού.

	ΧΑΛΑΡΟΙ ΕΔΑΦΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ
	ΣΥΝΕΚΤΙΚΟΙ ΕΔΑΦΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ
	ΣΥΜΠΑΓΕΙΣ ΕΔΑΦΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ

Πίνακας 38: Τεχνικογεωλογικος χαρακτηρισμός εδαφικών σχηματισμών (Εδαφομηχανική ΑΤΕ)

7.4.2.2 ΒΡΑΧΩΔΕΙΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ

Πρόκειται για τους σχηματισμούς του συστήματος του «Αθηναϊκού Σχιστολίθου», οι οποίοι, λόγω της επώθησης παρουσιάζονται με μια πολύ πτωχή έως πτωχή ποιότητα. Ωστόσο υπάρχουν ορισμένες ζώνες καλύτερης ποιότητας στις χ.θ: 11+700 – 12+300 και χ.θ: 13+300 – 13+700.

Στους βραχώδεις σχηματισμούς διακρίθηκαν τρεις κατηγορίες: GSI<20, 20<GSI<30, GSI>30.

GSI<20 (Πολύ πτωχή ποιότητα)

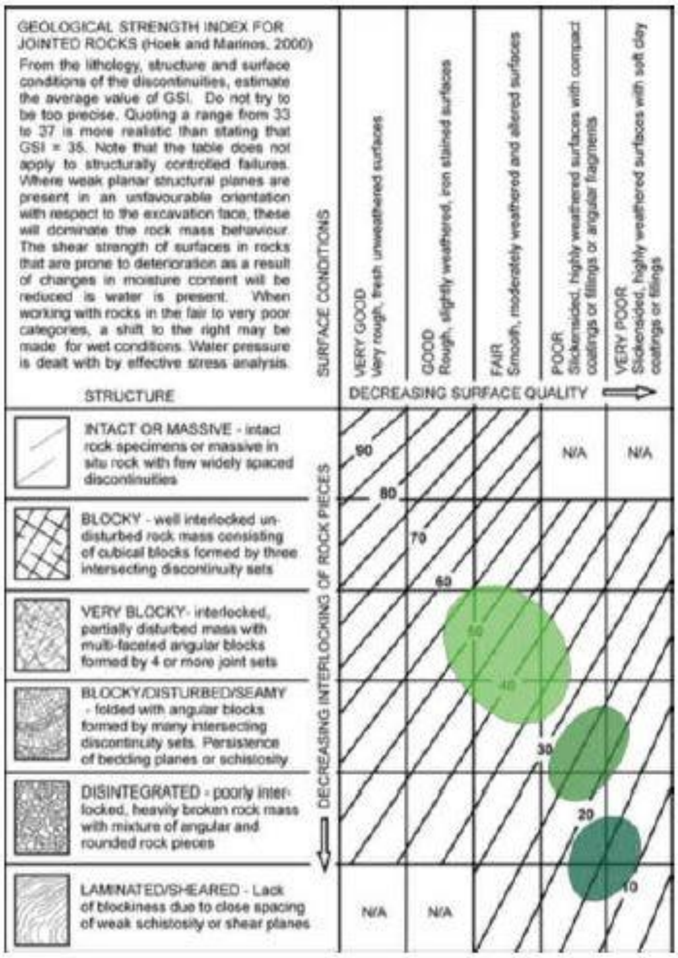
Στην κατηγορία αυτή εντάσσεται ο έντονα κερματισμένος και αποδιοργανωμένος έως διατμημένος μεταψαμμίτης ή/και μαργαϊκός ασβεστόλιθος και ο διατμημένος αργιλικός σχιστόλιθος. Το υλικό υποβαθμίζεται ποιοτικά και λόγω της επίδρασης της έντονης κατά βάθος αποσάθρωσης. Τοποθετείται λοιπόν στην κατηγορία της αποδομημένης (Disintegrated), σχιστοποιημένης και φυλλώδους (Laminated/Sheared) βραχομάζας, με πτωχές-πολύ πτωχές ασυνέχειες (αργιλοποιημένες ζώνες)

20<GSI<30 (Πτωχή-μέτρια ποιότητα)

Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται βραχόμαζες διατμημένες και κερματισμένες, διατηρώντας όμως καλύτερης ποιότητας υλικό κατά ζώνες. Συγκεκριμένα πρόκειται για ζώνες όπου τα ψαθυρά μέλη (μεταψαμμίτης, μαργαϊκός ασβεστόλιθος) της βραχομάζας επικρατούν έναντι των πιο μαλακών. Έτσι πρόκειται για μια βραχόμαζα που μπορεί να χαρακτηριστεί ως διαταραγμένη-στρωματώδης/αποδομημένη (Disturbed-Seamy/Disintegrated), με πτωχή έως πολύ πτωχή κατάσταση ασυνεχειών (αργιλοποιημένες ζώνες.

GSI>30 (Μέτρια-Καλή ποιότητα)

Στην τελευταία κατηγορία εντάσσεται η κερματισμένη/ μερικώς διαταραγμένη-στρωματώδης βραχόμαζα (Very Blocky/Disturbed-Seamy) με μέτρια έως πτωχή κατάσταση ασυνεχειών. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκει ο μαργαϊκός ασβεστόλιθος, που εμφανίζεται μέτρια κερματισμένος.



Διάγραμμα 14: Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής (Hoek and Marinos, 2000) σε σχέση με τις επικρατούσες ποιότητες γεωυλικών της περιοχής

ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΓΕΩΛΙΚΟ	GSI < 20	
ΠΤΩΧΗΣ – ΜΕΤΡΙΑΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΓΕΩΥΛΙΚΟ	20 < GSI < 30	
ΜΕΤΡΙΑΣ-ΚΑΛΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΓΕΩΥΛΙΚΟ	GSI < 30	

Πίνακας 39: Τεχνικογεωλογικός χαρακτηρισμός βραχωδών σχηματισμών (φωτογραφίες από Εδαφομηχανική ΑΤΕ)

Συμπερασματικά τα υλικά που συναντά η χάραξη διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες ως προς την συμπεριφορά τους. Αυτές είναι:

- Υλικά με εδαφική συμπεριφορά: Οι χαλαροί και οι συνεκτικοί εδαφικοί σχηματισμοί στις και η έντονα αποσαθρωμένη και διατμημένη βραχόμαζα του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου.
- Κερματισμένα υλικά: Η βραχόμαζα του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου που παρουσιάζεται πιο υγιής.
- Συμπαγή υλικά: Τα εδαφικά υλικά που είναι ισχυρά συγκολλημένα και ο μαργαϊκός ασβεστόλιθος που είναι λίγο έως καθόλου διαταραγμένος.

7.4.3 Η ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΧΑΡΑΞΗΣ

Ο σχηματισμός του «Αθηναϊκού Σχιστολίθου» είναι γενικά αδιαπέρατος, ενώ η περατότητα των μεταλπικών σχηματισμών εξαρτάται από την κοκκομετρία και το ποσοστό του αργιλικού υλικού που συμμετέχει. Γενικά η ετερογένεια των υλικών που απαντώνται κατά μήκος της χάραξης, μπορεί να αναπτύσσει τοπικούς υδροφορείς, ασθενούς έως μέτριου χαρακτήρα από πλευράς δυναμικού, κυρίως λόγω της συχνής παρουσίας αργιλικού υλικού. Ως περατοί λοιπόν σχηματισμοί θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν οι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, τα κροκαλοπαγή, οι ψαμμίτες και τα κορήματα.

Η χάραξη τέμνεται από άξονές αποστράγγισης σε διάφορες χ.θ., όπως: 10+130, 10+250, 11+370, 12+080, 12+450, 14+070,15+550 και 15+680 (πηγή: Εδαφομηχανική Α.Τ.Ε). Τέλος το ύψος της στάθμης κυμαίνεται από ~1.5m-18m.

7.4.4 Η ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΓΕΩΥΛΙΚΩΝ ΕΝΑΝΤΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΧΑΡΑΞΗΣ ΚΑΙ Η ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΥ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΥ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΟΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ

Όπως αναφέρθηκε τα μεταλπικά ιζήματα χαρακτηρίστηκαν τεχνικογεωλογικά με βάση τον βαθμό συγκόλλησης και την συνεκτικότητά τους, ενώ οι βραχώδεις σχηματισμοί βάση του γεωλογικού δείκτη αντοχής τους, GSI. Ο τεχνικογεωλογικός χαρακτηρισμός είναι αυτός που επηρεάζει την επιλογή του κατάλληλου τύπου μηχανήματος (TBM) και της μεθόδου για την διάνοιξη της σήραγγας.

Βασικό κριτήριο λοιπόν για την καταλληλότητα του μηχανήματος είναι να έχει όσο το δυνατόν λιγότερες πιθανότητες εμφάνισης καθιζήσεων και καταρρεύσεων. Φαινόμενα καταρροής εμφανίζονται συνήθως σε εδαφικούς χαλαρούς σχηματισμούς και σε εδαφοποιημένους βραχώδεις σχηματισμούς, ενώ σε πιο μέτριας έως πτωχής ποιότητας βραχόμαζες παρατηρούνται καταρρεύσεις είτε άμεσες στην επιφάνεια του θόλου, είτε με ολισθήσεις σε επιφάνειες ασυνεχειών.

Έτσι με βάση την γεωλογία κατά μήκος της χάραξης, αλλά και την ποιότητα των υλικών που συναντήθηκαν εκτιμήθηκε η συμπεριφορά τους, στο βάθος της διατομής και της στέψης έναντι μηχανικής εκσκαφής και στην συνέχεια προσδιορίστηκε το καταλληλότερο μηχάνημα διάνοιξης για κάθε περίπτωση. Οι τρόποι εκσκαφής που εξετάστηκαν είναι:

1. Ασπίδα Ανοικτού μετώπου (OFS):
2. TBM με μηχανική υποστήριξη μετώπου (TBM βράχου)
3. Ασπίδα με εδαφική εξισορροπητική πίεση (EPB)

7.4.4.1 ΑΣΠΙΔΑ ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΜΕΤΩΠΟΥ (OFS)

Με το μηχάνημα αυτό η εκσκαφή και η αντιστήριξη της σήραγγας γίνεται κάτω από την ασπίδα που αυτό διαθέτει. Συγκεκριμένα τοποθετεί προκατασκευασμένα στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος στα τοιχώματα της σήραγγας. Εφαρμόζεται κυρίως σε βραχώδεις σχηματισμούς μέτριας ποιότητας, μαλακά πετρώματα και συμπαγείς εδαφικούς σχηματισμούς, ενώ αδυνατεί να διανοίξει στο εσωτερικό πιο χαλαρών εδαφικών πετρωμάτων ή πολύ ισχυρών.

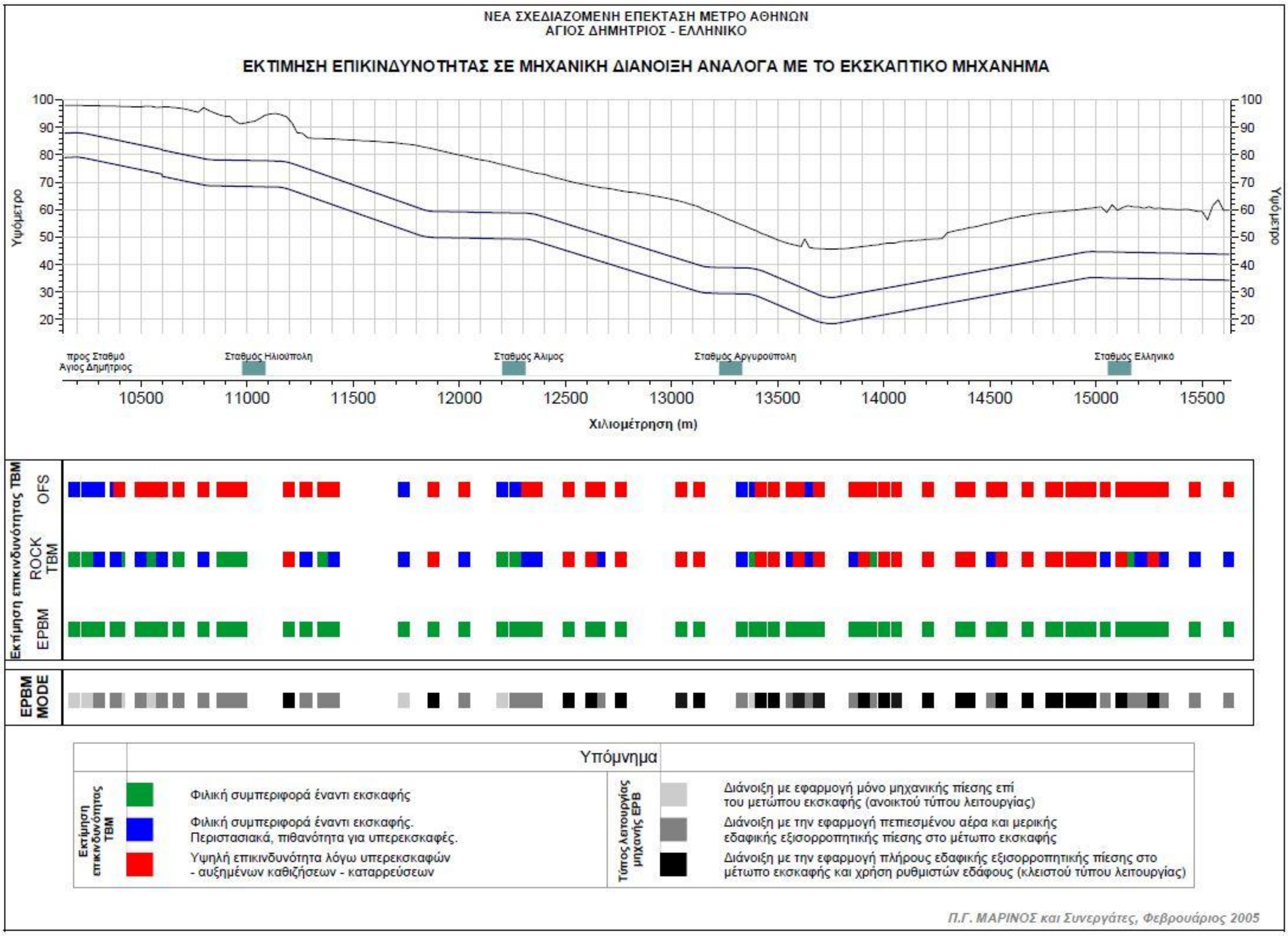
Το μεγάλο πλεονέκτημα που παρουσιάζει ένα TBM ασπίδας ανοικτού μετώπου είναι η άμεση επέμβαση στο μέτωπο. Παρόλα αυτά πρακτικά δεν ήταν δυνατό να χρησιμοποιηθεί κατά μήκος της συγκεκριμένης χάραξης, αφού είναι αδύνατη η ελαχιστοποίηση της πιθανότητας εκδήλωσης αστοχιών. Και αυτό διότι παρατηρήθηκαν πολλές εναλλαγές των ζωνών των πετρωμάτων, με χαλαρές ζώνες να βρίσκονται μέσα σε συμπαγείς σχηματισμούς και την παρουσία πολύ ασθενούς βραχομάζας στο μεγαλύτερο μέρος της σήραγγας.

7.4.4.2 TBM ΜΕ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΤΟΥ ΜΕΤΩΠΟΥ (TBM ΒΡΑΧΟΥ)

Το συγκεκριμένο μηχάνημα αποτελείται από μία ασπίδα και χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου το υλικό εκσκαφής είναι κερματισμένο ή αποτελείται από μαλακούς βραχώδεις σχηματισμούς. Μπορεί επίσης να εφαρμοστεί και σε πιο ισχυρούς βράχους, ενώ είναι αδύνατη η εφαρμογή του σε εδαφικά υλικά, αφού μπορεί να προκαλέσει ανεξέλεγκτη κοπή των κοπτικών εργαλείων, να υποβαθμίσει την βραχόμαζα και να οδηγήσει σε φαινόμενα υπερεκσκαφών και καθιζήσεων. Επομένως είναι πολύ πιθανό σε μέτωπα όπου εντοπίζονται μεγάλα συμπαγή τεμάχη σε μίγμα μαλακού εδάφους, να εμφανιστούν τέτοια προβλήματα.

7.4.4.3 TBM ΑΣΠΙΔΑΣ ΜΕ ΕΔΑΦΙΚΗ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΤΙΚΗ ΠΙΕΣΗ ΣΤΟ ΜΕΤΩΠΟ (EPB)

Τα μηχανήματα αυτά έχουν την δυνατότητα να ασκούν ελεγχόμενη πίεση στο μέτωπο κατά την διάρκεια της εκσκαφής περιορίζοντας την πιθανότητα να εκδηλωθούν αστάθειες και υπερεκσκαφές, Συγκεκριμένα, ο καταλληλότερος τύπος TBM με άσκηση πίεσης επί του μετώπου στην επέκταση «Αγ.Δημήτριος-Ελληνικό» ήταν αυτός της Εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης (EPB). Η λειτουργία του βασίζεται στην υποστήριξη του μετώπου της σήραγγας με το εκσκαφέν υλικό. Το υλικό πρέπει να είναι εύπλαστο, ενώ υπάρχει η δυνατότητα να γίνουν προσμίξεις με πρόσθετα χημικά σε θέσεις όπου δεν παρατηρείται αυτό το χαρακτηριστικό. Κρίθηκε προτιμότερος τύπος TBM σε σχέση με αυτόν του πολφου-μπεντονίτη (Slurry Shield), διότι στην χάραξη επικρατούσαν λεπτόκοκκα υλικά μικρής διαπερατότητας και συνεκτικά εδάφη. Το EPB έχει την δυνατότητα να λειτουργεί με τρεις τρόπους, τον (1) πληρωμένο και υπό πίεση θάλαμο με χρήση ατέρμονα κοχλία για την αποκομιδή υλικών εκσκαφής, (2) τον μερικώς πληρωμένο και υπό πίεση θάλαμο και (3) τον κενό θάλαμο, χωρίς άσκηση πιέσεως, με χρήση μεταφορικής ταινίας. Έτσι έχει την δυνατότητα να εναλλάσσει την λειτουργία του ανάλογα με την ποιότητα του γεωυλικού. Η εφαρμοσιμότητα των μηχανημάτων διακρίθηκε σε κατηγορίες κατά μήκος της τομής, ανάλογα με τα ποσοστά των προβλημάτων που μπορεί να παρουσιάσουν στην διάνοιξη, με την πράσινη να αναφέρεται στην ελάχιστη πιθανότητα αστοχιών, την κόκκινη στην μέγιστη πιθανότητα αστοχιών και την μπλε σε μια ενδιάμεση κατάσταση.



Σχήμα 21: Εκτίμηση επικινδυνότητας σε μηχανική διάνοιξη ανάλογα με το εκσκαπτικό μηχάνημα (Π.Γ Μαρίνος και Συνεργατες, Φεβρουάριος 2005)

Τμήμα χάραξης (χ.θ.)	OFS: Εφαρμοσιμότητα TBM κατά μήκος της χάραξης	OFS: Ποσοστά (%) ανά κατηγορία	TBM: Εφαρμοσιμότητα TBM κατά μήκος της χάραξης	TBM: Ποσοστά (%) ανά κατηγορία	EPBM: Εφαρμοσιμότητα TBM κατά μήκος της χάραξης	EPBM: Ποσοστά (%) ανά κατηγορία
Βόρειο (10+100 – 11+700)		20		50		25
		80		45		70
				5		5
Κεντρικό (11+700 - 15+000)		15		10		10
		85		30		30
				60		60
Νότιο (15+000 - 15+600)		0		10		0
		100		70		80
				20		20

Επί του συνόλου των επεξεργασθεισών πληροφοριών

	OFS		TBM		EPBM	
Συνολικό μήκος χάραξης		15		20		10
		85		40		50
				40*		40

Υπόμνημα

- Φιλική συμπεριφορά του γεωυλικού έναντι του μηχανήματος
- Μικρή έως μέση επικινδυνότητα. Πιθανή απαίτηση μέτρων βελτίωσης του υπεδάφους.
- Υψηλή επικινδυνότητα λόγω υπερεκσκαφών
- Διάνοιξη με εφαρμογή μόνο μηχανικής πίεσης επί του μετώπου εκσκαφής (λειτουργία ανοικτού τύπου)
- Διάνοιξη με την εφαρμογή πεπιεσμένου αέρα και μερικής εδαφικής εξισορροπητικής πίεσης στο μέτωπο εκσκαφής
- Διάνοιξη με την εφαρμογή πλήρους εδαφικής εξισορροπητικής πίεσης στο μέτωπο εκσκαφής και χρήση ρυθμιστών εδάφους (λειτουργία κλειστού τύπου)

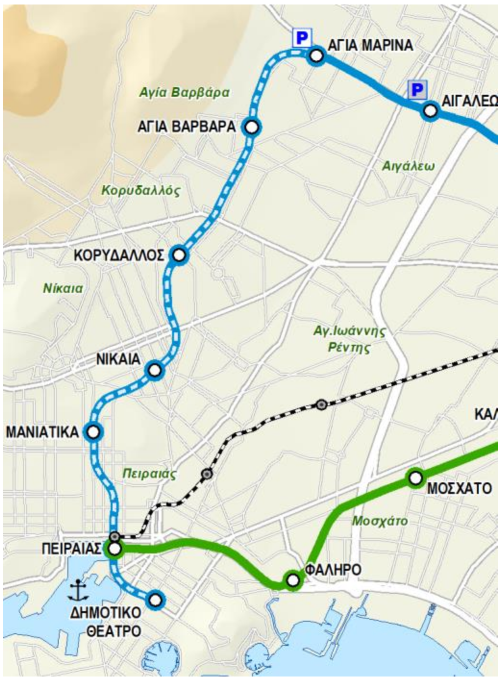
Σημείωση

* Η έστω και κατά 40% παρουσία του μη φιλικού υλικού και η διάσπαρτη κατανομή του είναι ικανή για να χαρακτηρισθεί όλη η διαδρομή ως υψηλής επικινδυνότητας.

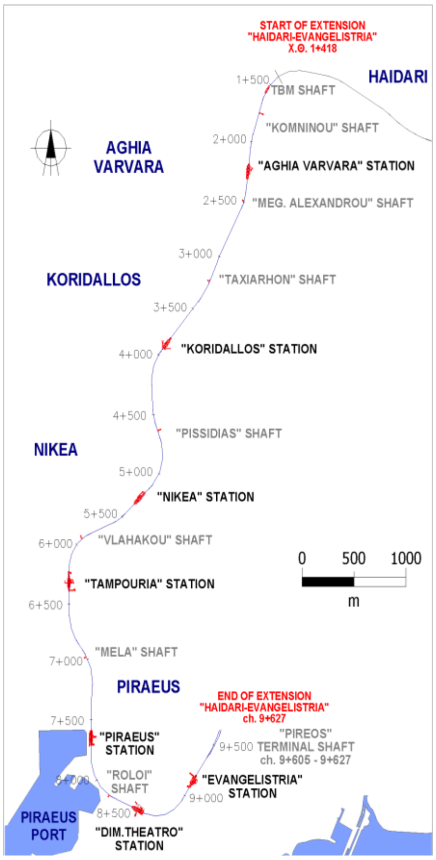
Πίνακας 40: Συνοπτικός πίνακας εφαρμοσιμότητας μεθόδων μηχανοποιημένης διάνοιξης για την επέκταση της γραμμής 2 του Μετρό Αθηνών προς Ελληνικό (Π.Γ Μαρίνος και Συνεργάτες, 2005)

7.5 Η ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ ΑΠΟ ΤΟ ΧΑΙΔΑΡΙ ΕΩΣ ΤΟΝ ΠΕΙΡΑΙΑ

Τα στοιχεία τα οποία πρόκειται να παρουσιαστούν παρακάτω αναφορικά με τις γεωλογικές και τεχνικογεωλογικές συνθήκες έχουν ληφθεί από την Τεχνική Έκθεση σχεδιαζόμενης επέκτασης της γραμμής 3 του μετρό Αθηνών «Χαϊδάρι-Ευαγγελίστρια» (Μαρίνος Π.Γ.,2006).Πρόκειται για μια επέκταση, η μελέτη της οποίας το 2012 προέβλεπε την κατασκευή σήραγγας διπλής κυκλοφορίας, 7.6 χιλιομέτρων με 6 σταθμούς: Αγία Βαρβάρα, Κορυδαλλός, Νίκαια, Μανιάτικα (Ταμπουριά), Πειραιάς, Δημοτικό Θέατρο, η τελική παράδοση των οποίων θα γίνει το 2021. .



Εικόνα 21: Επέκταση μετρό Αθηνών από Αγία Μαρίνα προς Δημοτικό Θέατρο Πειραιά. (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ, ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ 2012)



Εικόνα 20: Επέκταση μετρό Αθηνών από το Χαιδάρι προς την περιοχή της Ευαγγελίστριας (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ. ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ 2006)

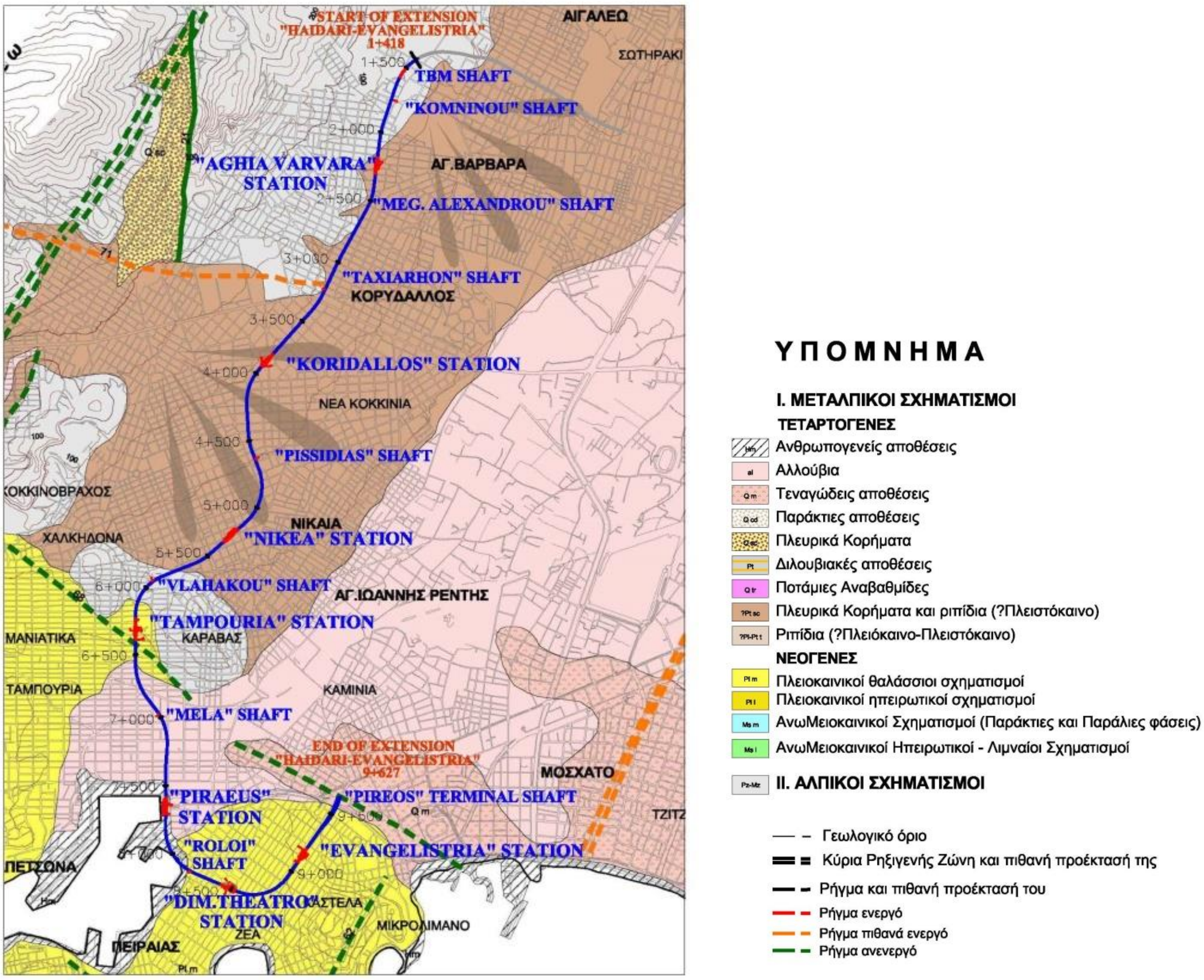
Ο αρχικός σχεδιασμός ωστόσο το 2006 προέβλεπε την κατασκευή επέκτασης 8.2 km και 7 σταθμών με την πρόσθεση αυτού της Ευαγγελίστριας, ο οποίος ακυρώθηκε. Στη μελέτη αυτή εκπονήθηκαν 125 γεωτρήσεις που μελετήθηκαν από την ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗ Α.Ε με βάση τις οποίες γίνεται η ανάλυση των επόμενων κεφαλαίων.

7.5.1 ΟΙ ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΗΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ ΑΓΙΑ ΜΑΡΙΝΑ-ΕΥΑΓΓΕΛΙΣΤΡΙΑ

Η περιοχή της επέκτασης τοποθετείται στις δυτικές-νότιοδυτικές παρυφές του ορεινού όγκου του Αιγάλεω. Το βόρειο τμήμα της χάραξης (Χαϊδάρι-Ταμπούρια) βρίσκεται σε λοφώδες έδαφος, ενώ το νότιο (Ταμπούρια-Πειραιάς) σε πεδινό-παράκτιο έδαφος. Αποτελείται από δύο βασικές κατηγορίες:

- Αλπικοί σχηματισμοί: Ασβεστόλιθοι, Οφιόλιθοι, Τεκτονικό κάλυμμα «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου»
- Νεογενείς-Τεταρτογενείς σχηματισμοί: Μάργες, Μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, Κροκαλοπαγή και πρόσφατες αποθέσεις ιζημάτων διαφόρων κοκκομετριών.

Στον νεοτεκτονικό χάρτη της λεκάνης των Αθηνών (D. Papanikolaou et al. 2002) παρατηρούνται και τα ρήγματα της περιοχής κατηγοριοποιημένα με βάση την σεισμική τους δραστηριότητα. Σύμφωνα με τον χάρτη του σχήματος 28, δύο ρήγματα διακόπτουν την συγκεκριμένη επέκταση.



Σχήμα 22: Νεοτεκτονικός χάρτης της λεκάνης των Αθηνών (Papanikolaou D. Et al, 2002)

Στην χ.θ ~ 3+250, στο φρέαρ Ταξιαρχών, παρατηρείται η απόληξη ενός ρήγματος, χωρίς ωστόσο αυτό να φαίνεται να επηρέασε την δομή των γεωλογικών σχηματισμών που έγιναν στις κοντινές γεωτρήσεις. Το ρήγμα αυτό χαρακτηρίζεται ως πιθανά ενεργό. Παρόλα αυτά δεν θεωρείται ότι θα έχει μεγάλο αντίκτυπο σε περίπτωση που ενεργοποιηθεί, διότι δεν έχει αξιόλογο μήκος και δεν λαμβάνεται υπ'όψη ως ένα ρήγμα με χαρακτήρα οριοθέτησης. Επιπλέον, βάση της εμπειρίας του σεισμού του 1999 στην Πάρνηθα, τα ρήγματα της ευρύτερης περιοχής των Αθηνών δεν παρουσίασαν κάποια μετατόπιση στα επιφανειακά στρώματα. Έτσι θεωρείται ότι το ρήγμα αυτό παρουσιάζει πολύ μικρό βαθμό επικινδυνότητας ως προς το συγκεκριμένο έργο, χωρίς ωστόσο να αναιρείται ο απαραίτητος αντισεισμικός σχεδιασμός.

Αντίθετα στην χ.θ ~6+500, η παρουσία του ρήγματος υποστηρίζεται από την ύπαρξη πολύ φτωχών βραχομαζών και ταυτίζεται με τα όρια της «Μάργας του Πειραιά» στα βόρεια. Το ρήγμα αυτό χαρακτηρίζεται ως ανενεργό.

7.5.1.1 ΑΛΠΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ

Ασβεστόλιθοι Καραβά

Το όνομά τους προήλθε από τον λόφο του Καραβά στην περιοχή Ταμπούρια. Εμφανίζονται με διάφορες μορφές, με κυρίαρχη αυτή των παχυστρωματώδων ασβεστολίθων που εντοπίζονται στις περιοχές του φρέατος Βλαχάκου (χ.θ ~5+725) και του σταθμού Ταμπούρια (χ.θ ~6+500). Στις επαφές τους με τους γύρω σχηματισμούς παρατηρούνται φαινόμενα καρστικοποίησης, μικρής ωστόσο εξάπλωσης (μέγιστο πάχος 0.9m).

Εικόνα 22: Παχυστρωματώδεις ασβεστόλιθοι στην περιοχή των Ταμπουριών και λεπτοστρωματώδεις αασβεστόλιθοι Αμφιάλης (P.G Marinos, 2005, Western extension of Line 3 of the Athens Metro 'Haidari-Evangelistria (ch. 1+418 - ch. 9+627))

Οφιόλιθοι

Οι οφιόλιθοι αποτελούνται κυρίως από σερπεντινίτες. Με σκούρο πράσινο χρώμα συνήθως εμφανίζονται οι υγιείς έως ελαφρώς αποσαθρωμένοι, ενώ αυτοί που έχουν φυλλώδη, διατμημένη και εξαλλοιωμένη δομή εμφανίζονται με ανοιχτότερο πράσινο χρώμα έως καστανό και χαρακτηρίζονται μετρίως έως πολύ αποσαθρωμένοι. Εντοπίζονται στο φρέαρ Πισιδίας (χ.θ. ~ 4+650-4+800), στην περιοχή ανάμεσα στο φρεαρ Βλαχάκου και στον σταθμό Ταμπουρίων (χ.θ ~ 6+125-6+385) .

Αθηναϊκός Σχιστόλιθος

Πρόκειται για ένα τεκτονικό κάλυμμα που τοποθετείται επάνω στους προηγούμενους σχηματισμούς. Αποτελείται από δύο ενότητες, την ανώτερη και την κατώτερη και σχηματίζει χαρακτηριστικές πτυχές και επαναλαμβανόμενες ζώνες διάτμησης στις οποίες οι αντοχή των σχηματισμών μειώνεται απότομα φτάνοντας ακόμη και τις τιμές αργιλοποιημένου εδάφους.

- Ανώτερη ενότητα: Αποτελείται από μεταψαμμίτες, μεταιλυόλιθους, ασβεστιτικούς μεταψαμμίτες, ασβεστιτικούς σχιστόλιθους και ψαμμιτικούς σχιστόλιθους. Οι εναλλαγές των υλικών αποτελούνται κυρίως από μεγαλύτερου πάχους σκληρούς μεταψαμμίτες, οι οποίοι παρεμβάλλονται από λεπτότερες στρώσεις ασθενέστερου μεταιλυολίθου. Η τεκτονική παραμόρφωση έχει προκαλέσει επιφάνειες διάτμησης ανάμεσα στις εναλλαγές αυτές.
- Κατώτερη ενότητα: Σε αυτήν εντάσσονται ασθενέστερα υλικά, αποτελούμενα κυρίως από μαύρους σχιστολίθους και/ή μεταιλυολίθους, ενώ τοπικά παρατηρούνται και εναλλαγές με μεταψαμμίτες ή σχιστολίθους. Κυρίως στην ζώνη μετάβασης της άνω και κάτω ενότητας παρατηρούνται επιδοτιτικοί, χλωριτιωμένοι, σερικιτιωμένοι και ταλκικοί σχιστόλιθοι. Η μικρότερες αντοχές των υλικών αυτών καθιστούν την κατώτερη ενότητα πιο επιρρεπή σε τεκτονική και πλαστική παραμόρφωση, με τις ενδείξεις της σχιστοποίησης να είναι εντονότερες.

Παρατηρείται μεταξύ των σταθμών Χαϊδαρίου-Νίκαιας (χ.θ~1+418-5+500) με εξάιρεση την ζώνη μαργαϊκών αποθέσεων (χ.θ ~2+100-2+400). Η κατώτερη ενότητα εντοπίζεται κυρίως στον σταθμό της Αγίας Βαρβάρας (χ.θ ~ 2+100), ενώ η ανώτερη κυρίως στον σταθμό του Κορυδαλλού (χ.θ ~3+800).

7.5.1.2 ΝΕΟΓΕΝΕΙΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ

Μαργαϊκές αποθέσεις

Οι λιμναίες μάργες, αποτελούνται κυρίως από ασβεστιτικούς αργιλόλιθους, ιλυόλιθους, μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, αργιλόλιθους και κροκαλοπαγή. Οι μαργαϊκές αποθέσεις εντοπίζονται στην περιοχή του σταθμού Αγία Βαρβάρα (χ.θ ~ 2+100-2+700).

Μάργα Πειραιά

Πρόκειται για θαλάσσια ιζήματα, με παρουσία λιμναίων και χερσαίων φάσεων κατά τόπους. Αποτελείται από μάργες, μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, ψαμμίτες, αργιλόλιθους, ιλυόλιθους και κροκαλοπαγή. Εντοπίζεται από τον σταθμό Ταμπούρια έως το λιμάνι του Πειραιά (χ.θ~6+500-7+550) και από το φρέαρ Ρολόι έως το τέλος της χάραξης (χ.θ ~8+150 - 9+627).

Εικόνα 23: Η μάργα του Πειραιά (P.G Marinos, 2005, Western extension of Line 3 of the Athens Metro 'Haidari-Evangelistria (ch. 1+418 - ch. 9+627))

7.5.1.3 ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΙΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ

Σε αυτούς εντάσσονται παράκτιες αποθέσεις, ελώδεις αποθέσεις, κορρήματα, αλλουβιακές αποθέσεις και υλικά πλήρωσης.

Κορρήματα, αλλούβια, υλικά πλήρωσης

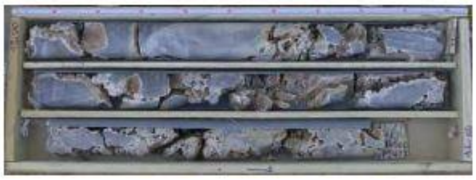
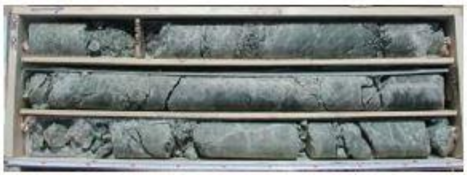
Εντοπίζονται στην επιφανειακή ζώνη και δεν αναμένονται να εμφανιστούν στο μέτωπο εκσκαφής. Το πάχος των αλλούβιων και των υλικών πλήρωσης φτάνει γενικά τα 3m. Τα κορρήματα εντοπίζονται μόνο στο βόρειο τμήμα της χάραξης, από την Αγία Βαρβάρα έως τον σταθμό Ταμπούρια και δεν υπερβαίνουν το πάχος των 7m.

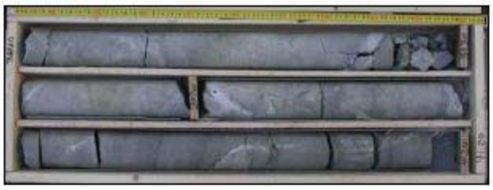
Πρόσφατες παράκτιες αποθέσεις

Εντοπίζονται στο βόρειο τμήμα της χάραξης, μεταξύ του λιμανιού του Πειραιά και του φρέατος Ρολόι. Αποτελούνται κυρίως από αμμώδεις ιλύες, ιλυώδεις άμμους, ιλυώδεις ψαμμίτες και αμμώδεις ιλυολίθους. Επιπλέον πολλές ενστρώσεις των παράκτιων αποθέσεων περιλαμβάνουν και απολιθώματα. Το πάχος τους φτάνει μέχρι βάθη κάτω από το επίπεδο της σήραγγας.

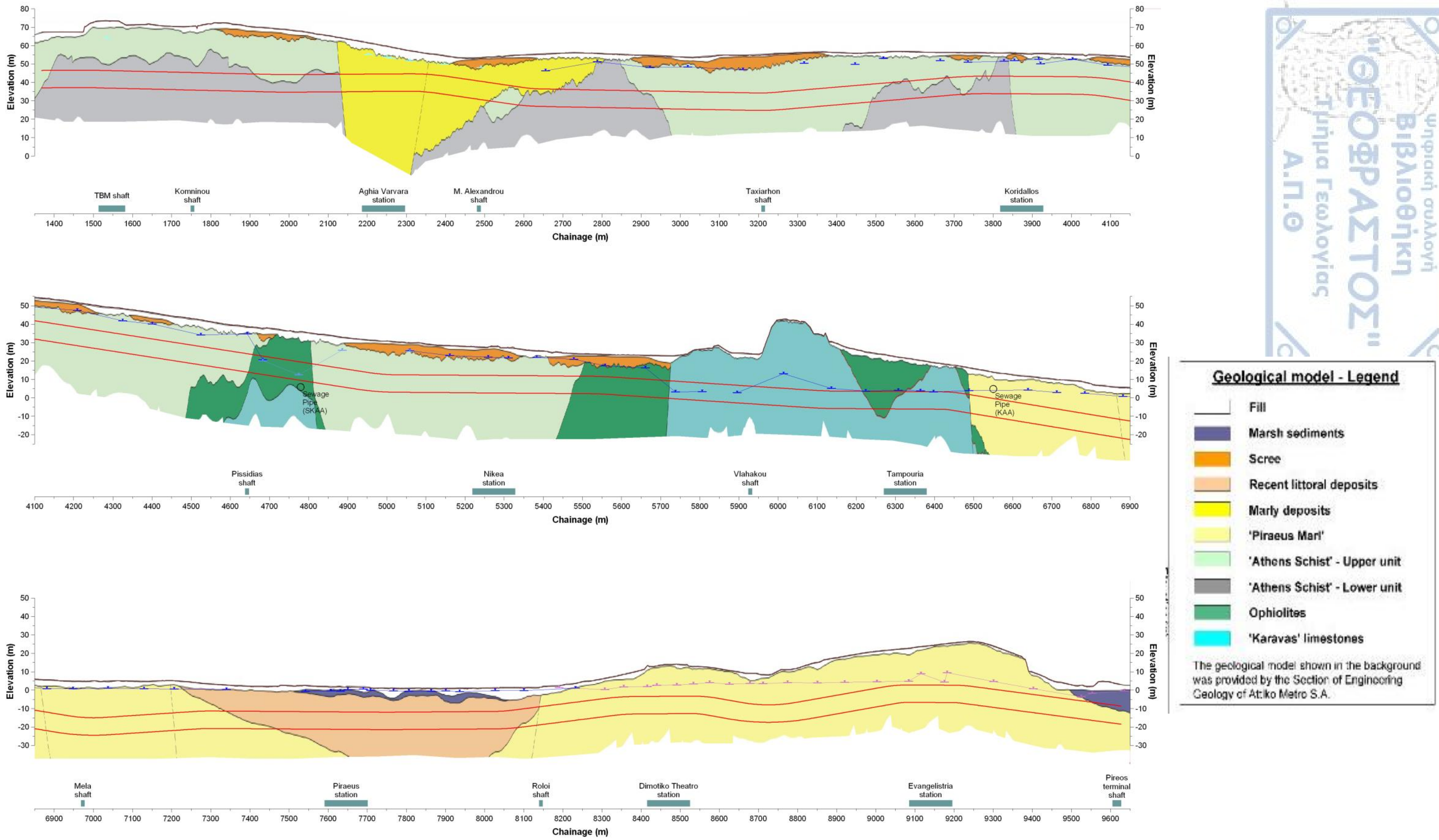
Ελώδεις αποθέσεις

Μαλακές άργιλοι και ιλύες ή/και αργιλικές- ιλυολιθικές άμμοι. Τα ιζήματα αυτά βρίσκονται πάνω από τις παράκτιες αποθέσεις στην ζώνη του λιμανιού του Πειραιά, υπερκαλύπτοντας μάλιστα στο τέλος της σήραγγας και την «Μάργα του Πειραιά» φτάνοντας το πάχος των 12m και αγγίζοντας το προφίλ της σήραγγας.

<table>
<tr><td colspan="2">Ασβεστόλιθοι Καράβα</td><td>
Παχυστρωματώδεις
BP1311 (11.3-14.2m)</td><td>
Καρστικοποιημένοι
BP2427 (14-14.6m)</td></tr>
<tr><td colspan="2">Οφιόλιθοι</td><td>
Ελαφρώς αποσαθρωμένοι σερπεντινίτες
BP2424 (30.2-33.0m)</td><td>
Πολύ αποσαθρωμένοι- φυλλώδεις σερπεντινίτες
BH2455 (37.2-40.0m)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Αθηναϊκός Σχιστόλιθος</td><td>Ανώτερη Ενότητα</td><td>
Συμπαγής ασβεστιτικός σχιστόλιθος
BP2413 (26.2-29.2m)</td><td>
Συμπαγής μεταψαμμίτης (ασβεστιτικός)
BP1302 (17-19.8m)</td></tr>
<tr><td>Κατώτερη Ενότητα</td><td colspan="2">
Ασθενείς αργιλώδεις σχιστόλιθοι
BP3332 (17.8-20.8m)</td></tr>
</table>

Μαργαϊκές αποθέσεις	 Τυπική μάργα (ασβεστιτικός αργιλόλιθος) BP3324 (23.3-26.1m)	 Ιλυόλιθος BP3323 (38.4-41.2m)
Μάργα Πειραιά	 Τυπική Μάργα (ασβεστιτικός αργιλόλιθος) με λεπτές ενστρώσεις ιλυολίθου BP1319 (34.1-37.0m)	 Ερυθρή μάργα και κροκαλοπαγές (πιθανόν χερσαία φάση) BP2486 (8.4-11.2m)
Ελώδεις αποθέσεις	 Αμμώδεις ιλυόλιθοι των πρόσφατων παράκτιων αποθέσεων BP2443 (22.9-25.8m)	 Ελώδεις αποθέσεις BP2491 (10.4-13.6m)

Πίνακας 41: Οι εικόνες των γεωτρήσεων των γεωλογικών σχηματισμών της χάραξης Χαιδάρι-Ευαγγελίστρια



Σχήμα 23: Η γεωλογική τομή της χάραξης Χαιδάρι-Ευαγγελίστρια.
(K.Boronka, Section of Engineering Geology, ATTIKO METRO S.A.)

7.5.2 ΟΙ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΗΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ ΧΑΪΔΑΡΙ (ΑΓΙΑ ΜΑΡΙΝΑ) -ΕΥΑΓΓΕΛΙΣΤΡΙΑ

Η σήραγγα διακρίθηκε σε 13 τεχνικογεωλογικές ενότητες με βάση τις γεωλογικές και τις γεωτεχνικές συνθήκες που αναμένονται σύμφωνα με την Τεχνική έκθεση της επέκτασης Μετρό Αθηνών «Χαϊδάρι-Ευαγγελίστρια» από τον Μαρίνο Π.Γ. και συνεργάτες (2006). Αυτές αναλύονται στην συνέχεια.

7.5.2.1 Χ.Θ : 1+418 - 2+150 (επίσταθμος «Χαϊδαρίου» - σταθμός «Αγ. Βαρβάρα»)

Στο μέτωπο της σήραγγας συναντώνται κυρίως σχηματισμοί της κατώτερης ενότητας του «Αθηναϊκού Σχιστολίθου», οι οποίοι χαρακτηρίζονται ασθενείς-πολύ ασθενείς, με τιμές GSI<35. Παρατηρούνται επίσης περιοχές με υψηλότερες τιμές GSI (χ.θ~1+800), λόγω της εντονότερης παρουσίας ισχυρότερων μεταψαμμιτών του «Αθηναϊκού Σχιστολίθου», αλλά και ζώνες με μικτές συνθήκες εδάφους στο μετωπο (χ.θ~1+950).

Στην ζώνη των υπερκείμενων εντοπίζονται κυρίως σχηματισμοί της ανώτερης ενότητας «Αθηναϊκού Σχιστολίθου», ενώ προς την επιφάνεια παρατηρείται η παρουσία τεχνητών επιχώσεων και κορημάτων μέγιστου πάχους 5m.

7.5.2.2 Χ.Θ : 2+150 – 2+500 (σταθμός «Αγία Βαρβάρα» - φρέαρ «Μεγάλου Αλεξάνδρου»)

Στο μέτωπο της σήραγγας συναντώνται μαργαϊκές αποθέσεις, ικανοποιητικής αντοχής, με εξαίρεση κάποιες ζώνες που παρατηρούνται πιο εδαφοποιημένες, με ισχυρό κερματισμό και σε ορισμένα σημεία έχουν και μεγάλη κατακόρυφη ανάπτυξη (χ.θ ~2+480).

Στην ζώνη των υπερκείμενων εντοπίζονται μαργαϊκές αποθέσεις και κορήματα σε βάθη μικρότερα των 5m (χ.θ:2+400-2+650).

7.5.2.3 Χ.Θ : 2+500 – 2+700 (φρέαρ «Μ.Αλεξάνδρου» - «Ταξιαρχών»)

Πρόκειται για ένα μέτωπο με μικτές εδαφικές συνθήκες. Αποτελείται από «Αθηναϊκό Σχιστόλιθο» που εμφανίζει διαφορετικές αντοχές, από ισχυρές έως πολύ ασθενείς.

Στα υπερκείμενα στρώματα εντοπίζονται μαργαϊκές αποθέσεις με ποικίλο επίσης χαρακτήρα, από εδαφικό έως βραχώδη.

7.5.2.4 ΧΘ : 2+700 – 4+650 (μεταξύ των φρεάτων «Μ.Αλεξάνδρου» και «Ταξιαρχών» - φρέαρ «Πισιδίας»)

Στο αρχικό τμήμα της ζώνης αυτής (έως τη χ.θ: 2+950) στο μέτωπο της σήραγγας εντοπίζονται «Αθηναϊκοί Σχιστόλιθοι» της ανώτερης ενότητας με χαρακτήρα ασθενή έως πολύ ασθενή. Στα υπερκείμενα της ζώνης αυτής εντοπίζονται επίσης και οι δύο ενότητες του «Αθηναϊκού Σχιστολίθου» με παρόμοιο χαρακτήρα με αυτόν του μετώπου.

Στο τμήμα από την χ.θ: 3+050-3+450 το μέτωπο της σήραγγας αποτελείται από την ανώτερη ενότητα του «Αθηναϊκού Σχιστολίθου», η οποία έχει πιο ισχυρό χαρακτήρα, ενώ στα υπερκείμενα εντοπίζονται πιο ισχυρές βραχόμαζες της ανώτερης ενότητας του «Αθηναϊκού Σχιστολίθου».

Από την χ.θ: 3+450-3+850 παρατηρούνται μικτές εδαφικές συνθήκες με τις δύο ενότητες του «Αθηναϊκού Σχιστολίθου» να εμφανίζονται ως ασθενείς-πολύ ασθενείς κυρίως βραχόμαζες.

Τέλος από την χ.θ: 3+850 έως το τέλος της ενότητας, επικρατούν σχηματισμοί της ανώτερης ενότητας του «Αθηναϊκού Σχιστολίθου», ως ασθενείς-πολύ ασθενείς βραχόμαζες με GSI<35.

7.5.2.5 Χ.Θ : 4+650 – 4+800 (Φρέαρ «Πισιδίας» - μεταξύ φρέατος «Πισιδίας και σταθμού «Νίκαιας»)

Στην ζώνη αυτή επικρατούν οφιόλιθοι τόσο στην διατομή της σήραγγας όσο και στα υπερκείμενά της. Στα τμήματα που υπόκεινται της σήραγγας εντοπίζονται ασβεστόλιθοι. Οι οφιόλιθοι της ζώνης αυτής είναι γενικά ισχυροί, με υψηλές τιμές GSI, ενώ οι ασθενείς βραχόμαζες είναι περιορισμένες.

7.5.2.6 Χ.Θ : 4+800 – 5+450 (μεταξύ του φρέατος «Πισιδίας» και του σταθμού «Νίκαιας» - σταθμός «Νίκαιας»

Επικρατεί η ανώτερη ενότητα του «Αθηναϊκού Σχιστολίθου», η οποία παρουσιάζεται ασθενής έως πολύ ασθενής, ενώ τοπικά εμφανίζονται και πιο ισχυρά μέλη (Χ.Θ: 4+950, 5+150).

Επιφανειακά εμφανίζονται κορήματα φτάνοντας κατά τόπους πάχος 5m, ενώ στα υπερκείμενα της συγκεκριμένης ζώνης παρατηρούνται υλικά παρόμοια με αυτά της διατομής της σήραγγας.

7.5.2.7 Χ.Θ : 5+450 – 5+725 (σταθμός «Νίκαια» - μεταξύ του σταθμού «Νίκαια» και του φρέατος «Βλαχάκου»)

Στο μέτωπο της σήραγγας παρατηρούνται ασθενείς έως πολύ ασθενείς οφιόλιθοι, στο αρχικό τμήμα της ενότητας, ενώ στο τελικό η αντοχή τους φαίνεται να αυξάνεται.

Στα υπερκείμενα εντοπίζονται παρόμοια υλικά με το μέτωπο και κορήματα ασθενώς συγκολλημένα στα ανώτερα 5m.

7.5.2.8 Χ.Θ : 5+725 – 6+200 (μεταξύ του σταθμού «Νίκαια» και του φρέατος «Βλαχάκου» - σταθμός «Ταμπούρια»)

Πρόκειται για ένα τμήμα που αποτελείται από ισχυρή βραχόμαζα ασβεστολίθου με GSI>35, τόσο στο μέτωπο όσο και στα υπερκείμενα. Στο τμήμα αυτό επιπλέον παρατηρούνται τα μεγαλύτερα πάχη υπερκειμένων που φτάνουν τα 37m, καθώς επίσης και περιορισμένα καρστικά φαινόμενα.

7.5.2.9 Χ.Θ : 6+200 – 6+500 (σταθμός «Ταμπούρια» - μεταξύ του σταθμού «Ταμπούρια» και του φρέατος «Μελά»)

Στην ενότητα αυτή παρατηρούνται εναλλαγές ασβεστολίθων και οφιολίθων στην ζώνη των υπερκείμενων και του μετώπου. Η μόνη διαφοροποίηση με τα υπερκείμενα είναι ότι σε αυτά το τελικό τμήμα καταλήγει σε οφιόλιθους, ενώ στο μέτωπο σε ασβεστόλιθους. Η βραχόμαζα είναι καλή, ενώ σε ορισμένες θέσεις υπερκειμένων οι οφιόλιθοι παρατηρούνται πιο κακής ποιότητας. Τέλος εξαίρεση αποτελεί και το τελικό τμήμα της ενότητας, το οποίο παρατηρείται κατακερματισμένο, λόγω της παρουσίας ρήγματος που διαχωρίζει τους αλπικούς σχηματισμούς από την «Μάργα του Πειραιά».

7.5.2.10 Χ.Θ : 6+500 – 7+350 (μεταξύ του σταθμού «Ταμπούρια» και του φρέατος «Μελά» - μεταξύ του φρέατος «Μελά» και του σταθμού «Πειραιά»)

Παρατηρείται η «Μάργα του Πειραιά» στην ζώνη των υπερκείμενων και στο προφίλ της εκσκαφής, ως διαταραγμένη αρχικά, πιθανόν λόγω της παρουσίας του ρήγματος, ενώ στην συνέχει ο χαρακτήρας της μετατρέπεται σε πιο βραχώδη. Στα τελικά 150m της ενότητας οι εδαφικές συνθήκες γίνονται μικτές, λόγω της παρουσίας λιγότερο ικανών παράκτιων αποθέσεων στη ζώνη των υπερκειμένων. Η «Μάργα του Πειραιά» χαρακτηρίζεται γενικά ως διαταραγμένη και περατή.

7.5.2.11 Χ.Θ : 7+350 – 8+150 (μεταξύ του φρέατος «Μελά» και του σταθμού «Πειραιάς»-φρέαρ Ρολόι)

Πρόκειται για ένα τμήμα στο οποίο παρατηρούνται εναλλαγές υλικών διαφορετικού βαθμού διαγένεσης, από παράκτιες αποθέσεις με χαμηλές τιμές εντοχών στο μέτωπο, έως ελώδεις αποθέσεις κακής ποιότητας και πάχους έως 4 m στα υπερκείμενα.

7.5.2.12 Χ.Θ : 8+150 – 9+500 (Φρέαρ «Ρολόι» - πριν το τερματικό φρέαρ «Πειραιώς»)

Η «Μάργα του Πειραιά» στην θέση αυτή παρουσιάζει καλή ποιότητα στο μέτωπο της εκσκαφής και στην ζώνη των υπερκειμένων, με τοπικές εμφανίσεις εδαφοποιημένων ζωνών.

7.5.2.13 Χ.Θ : 9+500 – 9+627 (Πριν το τερματικό φρέαρ «Πειραιώς» - τερματικό φρέαρ «Πειραιάς»)

Παρατηρείται η παρουσία ασθενών ελωδών αποθέσεων στην ζώνη των υπερκείμενων, οι οποίες φτάνουν μέχρι τα 12m βάθος, καλύπτοντας και το μεγαλύτερο μέρος του μετώπου, με υποκείμενη την ισχυρή «Μάργα του Πειραιά».

ΤΕ	Χ.Θ	ΣΤΑΘΜΟΙ-ΦΡΕΑΤΑ	ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΜΕΤΩΠΟΥ	ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ
1	1+418-2+150	Χαϊδάρι-Αγ.Βαρβάρα	Ανώτερη και κατώτερη ενότητα «Αθηναϊκού Σχιστολίθου»	Ασθενής-πολύ ασθενής GSI<35
2	2+150-2+500	Αγ.Βαρβάρα-φρέαρ Μ.Αλέξανδρος	Μαργαϊκές αποθέσεις	Ικανές-εδαφοποιημένες
3	2+500-2+700	Φρέαρ Μ.Αλεξάνδρου-Ταξιαρχών	Ανώτερη και κατώτερη ενότητα «Αθηναϊκού Σχιστολίθου»	Ισχυρός-Ασθενής
4	2+700-4+650	Μεταξύ φρέατος Μ.Αλεξάνδρου και Ταξιαρχών-Φρέαρ Πεισιδίας	Ανώτερη και κατώτερη ενότητα «Αθηναϊκού Σχιστολίθου»	Ασθενής-Πολύ ασθενής GSI<35
5	4+650-4+800	Φρέαρ Πεισιδίας-Νίκαια	Οφιόλιθοι	Ισχυροί
6	4+800 – 5+450	Μεταξύ φρέατος «Πεισιδίας» και Νίκαιας - Νίκαια	Ανώτερη ενότητα «Αθηναϊκου Σχιστολίθου»	Ασθενής-Πολύ ασθενής
7	5+450 – 5+725	σταθμός «Νίκαια» - μεταξύ σταθμού «Νίκαιας» και του φρέατος «Βλαχάκου»	Οφιόλιθοι	Ασθενείς (αρχικό τμήμα) Ισχυροί (τελικό τμήμα)
8	5+725 – 6+200	Μεταξύ σταθμού «Νίκαιας» και φρέατος «Βλαχάκου» - Ταμπούρια	Ασβεστόλιθοι	Ισχυροί-Πολύ ισχυροί GSI>35
9	6+200 – 6+500	σταθμός «Ταμπούρια» - μεταξύ του σταθμού «Ταμπούρια» και του φρέατος «Μελά»	Εναλλαγές ασβεστόλιθων-οφιόλιθων	Ισχυροί
10	6+500 – 7+350	μεταξύ του σταθμού «Ταμπούρια» και του φρέατος «Μελά» - μεταξύ του φρέατος «Μελά» και του σταθμου «Πειραιά»	Μάργα Πειραιά	Γενικώς διαταραγμένη
11	7+350 – 8+150	μεταξύ του φρέατος «Μελά» και του σταθμού «Πειραιάς»-	Παράκτιες αποθέσεις	Διαταραγμένες

		φρέαρ Ρολόι		
12	8+150 – 9+500	Φρέαρ «Ρολόι» - πριν το τερματικό φρέαρ «Πειραιώς»	Μάργα Πειραιά	Ισχυρή
13	9+500 – 9+627	Πριν το τερματικό φρέαρ «Πειραιώς»- τερματικό φρέαρ «Πειραιάς»	Ελώδεις αποθέσεις	Ασθενείς

Πίνακας 42: Οι τεχνικογεωλογικές ενότητες της χάραξης Χαϊδάρι-Ευαγγελίστρια

Η επέκταση «Χαϊδάρι-Ευαγγελίστρια» χρίζει ιδιαίτερης προσοχής ως προς την κατασκευή της, διότι παρουσιάζονται πολλές παράμετροι, που μπορούν να επηρεάσουν την ευστάθειά του έργου. Πιο συγκεκριμένα, πέρα από τις γεωλογικές συνθήκες και τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών της σήραγγας, που παρουσιάζονται ασθενή κατά κύριο λόγο κατά μήκος, διαπερνά και κάτω από αρχαιολογικές δομές, κοντά από παράκτιες θέσεις και κατά θέσεις παρουσιάζει και μικρά πάχη υπερκειμένων. Το γεγονός αυτό, ιδιαίτερα στις πυκνοκατοικημένες περιοχές, στις οποίες η σήραγγα μπορεί να διέρχεται σε πολύ μικρά βάθη και κοντά στα κτίρια, μπορεί να προκαλέσει ως μεγαλύτερο πρόβλημα πιθανές καθιζήσεις. Παρακάτω αναλύονται οι ζώνες επικινδυνότητας του κάθε σταθμού με τις αντίστοιχες χιλιομετρικές τους θέσεις.

Αγία Βαρβάρα

- 1+750-1+960, 2+020-2+060: Τα υπερκείμενα και το προφίλ της χάραξης σε αυτές τις χ.θ αποτελούνται από «Αθηναϊκό Σχιστόλιθο» ανώτερης και κατώτερης ενότητας με GSI <35.
- 2+060-2+175: Αναμένονται μικτές συνθήκες στο προφίλ της χάραξης που αποτελούνται από ασθενείς βραχόμαζες τις κατώτερης ενότητας του «Αθηναϊκού Σχιστολίθου», ενώ στα υπερκείμενα αναμένονται μάργες, μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι καλής ποιότητας.
- 2+470-2+570: Μικτές συνθήκες στο προφίλ εκσκαφής με πολύ ασθενείς μαργαϊκές αποθέσεις και ασθενής-συμπαγείς βραχόμαζες ανώτερης και κατώτερης ενότητας «Αθηναϊκού Σχιστολίθου».
- 2+880-2+915, 2+995-3+015: Σχιστόλιθοι της ανώτερης και της κατώτερης ενότητας, με φτωχή ποιότητας αποτελούν το μέτωπο της χάραξης, ενώ αυτή σε ορισμένα σημεία φτάνει πολύ κοντά στην επιφάνεια (7m από τον άξονα).

Κορυδαλλός

- 3+305, 3+345-3+370, 3+990-4+250, 4+490-4+520: Χαμηλής-μετρια ποιότητας «Αθηναϊκός Σχιστόλιθος της ανώτερης ενότητας.

Νίκαια

- 4+690-5+260, 5+350-5+590: Συμπαγείς κυρίως βραχόμαζες της ανώτερης ενότητας του Αθηναϊκού Σχιστολίθου εντοπίζονται στο προφίλ της σήραγγας, ενώ σε ορισμένα σημεία συναντώνται και οι υποκείμενοι οφιόλιθοι. Ωστόσο κατά θέσεις εντοπίζονται και χαμηλότερης ποιότητας βραχόμαζες στο προφιλ και στα υπερκείμενα

Ταμπούρια

- 5+760-6+270: Οι ασβεστόλιθοι του «Καραβά» παρουσιάζονται ως πολλής καλής ποιότητας βραχόμαζες .
- 6+280-6+620: Μικτές συνθήκες αναμένονται στις συγκεκριμένες χ.θ όπου οι ασβεστόλιθοι «Καραβάςς» υπόκεινται των οφιολίθων. Στην χ.θ 6+500 παρατηρείται η ζώνη του κυρίως ρήγματος που οριοθετεί την «Μάργα του Πειραιά». Στο νότιο τμήμα μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι και η «Μάργα του Πειραιά» εισέρχεται στην διατομή της σήραγγας κυρίως ως αποδιοργανωμένοι, λόγω της παρουσίας ρήγματος. Τέλος στην θέση 6+550 διέρχεται ο κύριος αποχετευτικός αγωγός (ΚΑΑ).
- 6+600-7+110, 7+135-7+280: Η σήραγγα διέρχεται κάτω από την σιδηροδρομική γραμμή του ΟΣΕ και αποτελείται από μαργαϊκούς ασβεστολίθους, μάργες και κροκαλοπαγή της «Μάργας του Πειραιά». Είναι γενικά καλής ποιότητας σχηματισμοί με αντοχή 10-20MPa.

Πειραιάς

- 7+250-7+505: Μικτές συνθήκες στο προφίλ της σήραγγας με τον σχηματισμό της «Μάργας του Πειραιά» να υπόκεινται των παράκτιων αποθέσεων και οι αντοχές να παρουσιάζουν τιμές μεγαλύτερες του 1MPa.
- 7+885-7+910, 7+980-8+040, 8050-8+110 : Η σήραγγα διέρχεται κάτω από ευπαθή κτίρια, όπως ο πύργος του Πειραιά, με απόσταση από τον άξονα της σήραγγας τα 40m. Στην διατομή της σήραγγας συναντώνται κυρίως ελώδη ιζήματα με τιμές UCS=0.25-1MPa. Στα υπερκείμενα συναντώνται και λιμναίες αποθέσεις με σημαντικά πάχη μεγαλύτερα των 7.7m.

Δημοτικό Θέατρο

- 8+275-8+340, 8+385-8+410: Η καμπυλωτός σχεδιασμός της σήραγγας καθιστά αναγκαίο να διέλθει κάτω από δημόσια κτήρια όπως το δημοτικό θέατρο του Πειραιά.
- 8+540-9+040, 9+250-9+510: η σήραγγα διέρχεται κάτω από δημόσια επίσης κτήρια.

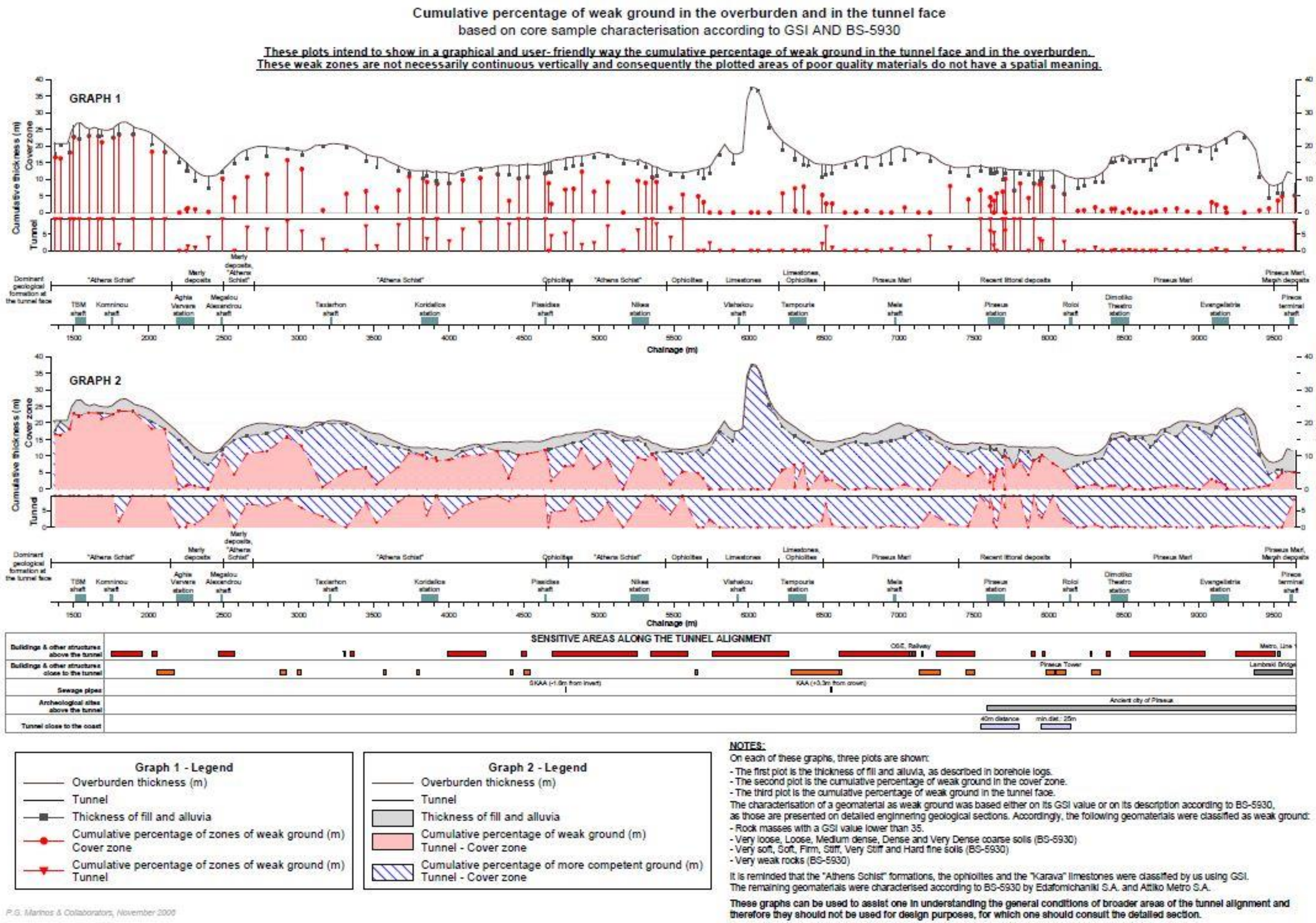
Εναλλαγές μαργών, αργιλόλιθων, μαργαϊκών ασβεστόλιθων, ψαμμιτών και κροκαλοπαγών του Πειραιά εντοπίζονται στις ζώνες αυτές με σχετικά καλή ποιότητα και τιμές αντοχής 2.5-20MPa.

Τερματικός σταθμός Πειραιά

- 9+525-9+540: Η σήραγγα διέρχεται κάτω από την γραμμή 1 του μετρό

- 9+400-9+620: Η χάραξη διέρχεται παράλληλα με την γέφυρα της Λαμπράκη

Οι ελώδεις αποθέσεις υπέρκεινται των σχηματισμών της «Μάργας του Πειραιά» και βρίσκονται στο εσωτερικό του προφιλ της σήραγγας στα τελευταία 50m της χάραξης. Παρουσιάζουν πολύ χαμηλές τιμές Nspt (<15).



Σχήμα 24: Ποσοστά ασθενούς εδάφους στο μέτωπο της χάραξης και στα υπερκείμενα (Μαρίνος και συνεργάτες, 2006)

7.5.3 Η ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΧΑΡΑΞΗΣ

Οι μετρήσεις περατότητας της σήραγγας έδωσαν τιμές περατότητες κατά βάση μικρότερες του $1x10^{-5}$ m/sec. Τοπικά παρατηρούνται υψηλότερες τιμές, κυρίως σε ζώνες της «Μάργας του Πειραιά» και των παράκτιων αποθέσεων. Στην περίπτωση των παράκτιων αποθέσεων οι ζώνες μεγαλύτερης περατότητας είναι περιορισμένες στα υπερκείμενα ανάμεσα σε αργιλικά-ιλυώδη στρώματα, ενώ στο βάθος της σήραγγας, η αυξημένη παρουσία λεπτόκοκκων εξισορροπεί την αυξημένη περατότητα. Στην περίπτωση της «Μάργας του Πειραιά» η αυξημένες τιμές περατότητας οφείλονται στο δευτερογενές πορώδες και στις διακλάσεις του σχηματισμού, ωστόσο κυριαρχεί πάλι η παρουσία αργιλοϊλυωδών υλικών και δεν παρουσιάζονται ιδιαίτερες δυσκολίες στην επίτευξη υδατοστεγών συνθηκών.

Το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα είναι 5-10m επάνω από την στέψη της σήραγγας. Το μέγιστο υδροστατικό φορτίο εντοπίστηκε στην αρχή της διάνοιξης, όπου το επίπεδο του υδροφόρου μετρήθηκε 17m επάνω από την στέψη. Σε όλες τις περιπτώσεις, δεν αναμένονται ισχυρά υδροστατικά φορτία.

7.5.4 Η ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΓΕΩΥΛΙΚΩΝ ΕΝΑΝΤΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΧΑΡΑΞΗΣ ΚΑΙ Η ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΥ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΥ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΟΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ

Μετά την πραγματοποίηση του τεχνικογεωλογικού-γεωτεχνικού χαρακτηρισμού της ποιότητας των σχηματισμών που παρατηρούνται κατά την διάνοιξη της σήραγγας, είναι δυνατόν να εκτιμηθεί η συμπεριφορά των υλικών εκσκαφής έναντι μηχανικής μηχανοποιημένης διάνοιξης. Πρόκειται για μια αστικοποιημένη ζώνη, γεγονός που καθιστά απαραίτητη την γρήγορη ολοκλήρωση του έργου, επηρεάζοντας όσο το δυνατόν λιγότερο τις υπάρχουσες συνθήκες της περιοχής. Η καταλληλότητα των μηχανημάτων αξιολογείται κυρίως βάση των γεωλογικών και τεχνικογεωλογικών δεδομένων της χάραξης «Χαϊδάρι-Ευαγγελίστρια».

Το γεγονός ότι οι εδαφικές συνθήκες που συναντά η σήραγγα μεταβάλλονται με μια μεγάλη συχνότητα σε συνδυασμό με την παρουσία πολλών «ευάλωτων» περιοχών κατά μήκος της χάραξης (όπως η πυκνότητα των κτιρίων), οδηγεί στην ανάγκη εφαρμογής ενός TBM που δεν χρειάζεται μόνο να διαθέτει ασπίδα, αλλά και ένα σύστημα διατήρησης της πίεσης στο μέτωπο με σκοπό να προληφθούν αστοχίες και καθιζήσεις στο μέτωπο.

Ο έλεγχος αυτών των συνθηκών μπορεί να επιτευχθεί με ένα κατάλληλο σύστημα κοπτικής κεφαλής που θα παρέχει υποστήριξη ή με ένα υπό πίεση κλειστό μέτωπο. Η παρουσία ωστόσο πολλών διαφορετικών περιπτώσεων «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου», καθώς επίσης και των παράκτιων αποθέσεων που εντοπίζονται στο λιμάνι του Πειραιά, απαιτούν την εφαρμογή ενός κλειστού μετώπου TBM, με προτιμότερα αυτά του πολφού (Slurry Shield) και εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης (EPB).

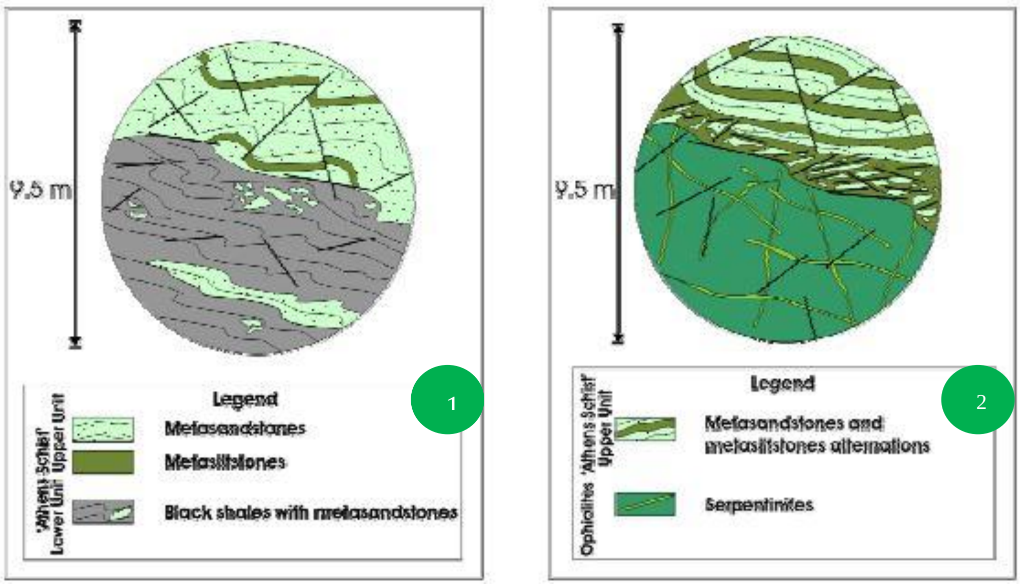
Ωστόσο, το γεγονός ότι ένας μεγάλος αριθμός τμημάτων της διάνοιξης αποτελείται από ευσταθείς συνθήκες, το TBM πρέπει να έχει την δυνατότητα να λειτουργεί και με συνθήκες μη υπό πίεση μετώπου, μειώνοντας έτσι και το χρωματικό αλλά και το χρονικό κόστος. Η επιλογή μεταξύ του EPB και του Slurry Shield έγινε βάση κυρίως της γεωλογίας και της περατότητας των σχηματισμών. Ωστόσο λήφθηκαν υπ’όψιν και κάποιες επιπλέον παράμετροι, οι οποίες αναλύονται στην συνέχεια.

- Η κοκκομετρία των υλικών ποικίλλει κατά μήκος της χάραξης. Λεπτόκοκκα κυρίως υλικά εντοπίζονται στις ζώνες των ασθενών υλικών, ενώ πιο αδρόκοκκα εντοπίζονται στην ανώτερη ενότητα του «Αθηναϊκού Σχιστολίθου».
- Η περατότητα των σχηματισμών είναι καταλληλότερη για το EPB εάν παρουσιάζει τιμές μικρότερες από το όριο $1x10^{-5}$ m/sec, ενώ για το Slurry Shield απαιτούνται μεγαλύτερες τιμές. Οι μετρήσεις περατότητας της σήραγγας έδωσαν τιμές περατότητες κατά βάση μικρότερες του ορίου, με εξαιρέσεις ωστόσο να εντοπίζονται στις θέσεις της «Μάργας του Πειραιά» και στις παράκτιες αποθέσεις.
- Το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα είναι 5-10m επάνω από την στέψη της σήραγγας με μέγιστο υδροστατικό φορτίο να εντοπίζεται στην αρχή της διάνοιξης.
- Μεγάλη δυσκολία εντοπίζεται στις περιπτώσεις όπου το μέτωπο της σήραγγας είναι μικτό. Τέτοιες περιπτώσεις εντοπίζονται σε διατομές όπου περιλαμβάνουν την ενότητα του ανώτερου και του κατώτερου «Αθηναϊκού Σχιστολίθου» την ενότητα του ανώτερου «Αθηναϊκού Σχιστολίθου» επάνω στους οφιολίθους, οφιολίθους επάνω σε ασβεστολίθους και παράκτιες αποθέσεις επάνω στην «Μάργα του Πειραιά».

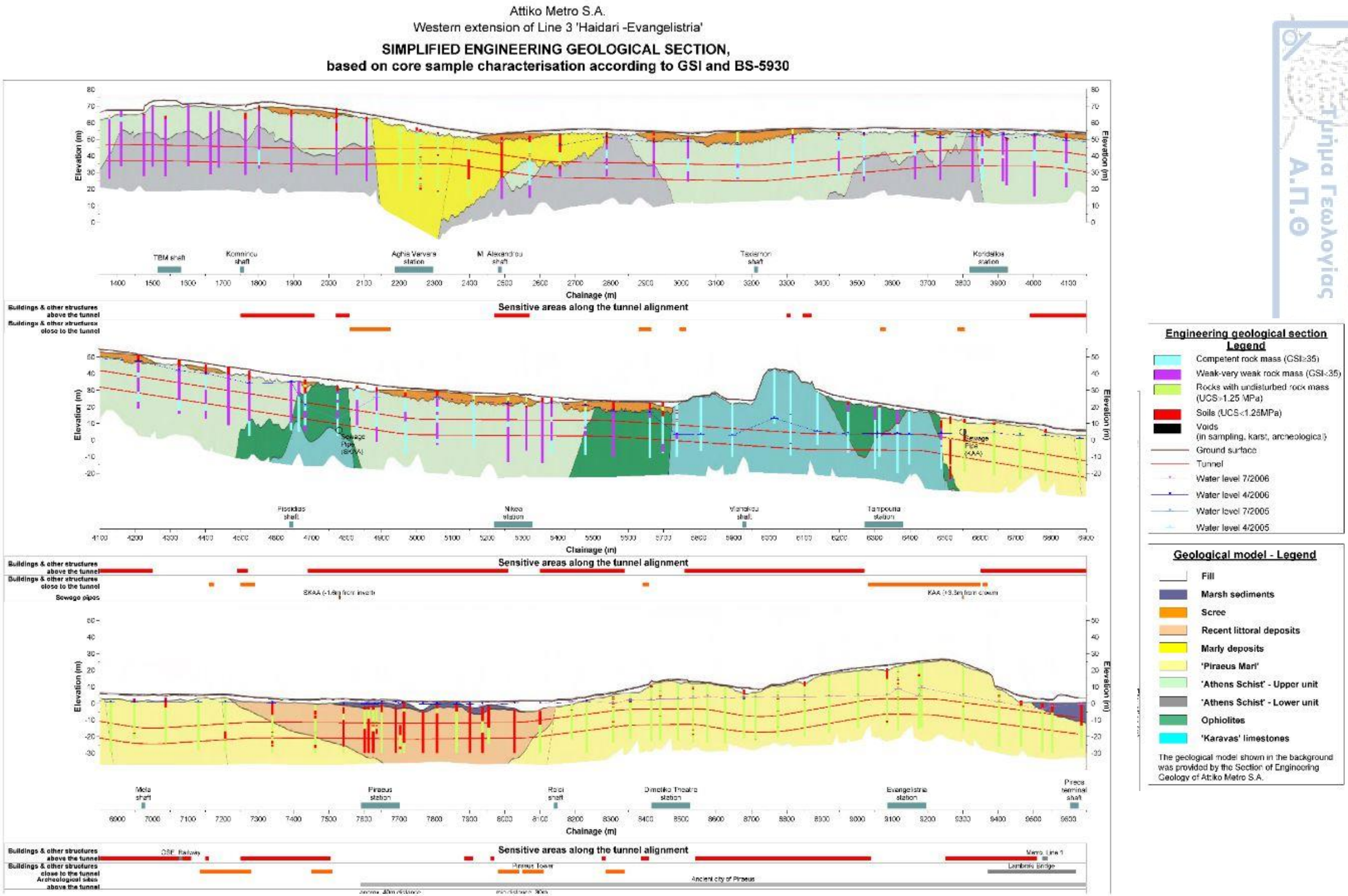
  Σε τέτοιες συνθήκες είναι απαραίτητη η διατήρηση της πίεσης στο μέτωπο, με τα TBM πολφού να έχουν άμεση αντιμετώπιση του φαινομένου απώλειας πιέσεων, ενώ το μηχάνημα εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης μπορεί να αντιμετωπίσει ένα τέτοιο γεγονός με ένα πρόσθετο σύστημα υποστήριξης μετώπου (Additional Face Support). Η κατά μήκος εμφάνιση μικτών υλικών εντοπίζεται σε θέσεις όπως για παράδειγμα αυτές που εντοπίζονται συμπαγείς ασβεστόλιθοι με οφιολίθους (5+600-6+450), που απαιτείται η λειτουργία του μηχανήματος σε συνθήκες μη εισπιεζόμενου μετώπου.
- Η μειωμένη τραχύτητα ορισμένων γεωλογικών σχηματισμών έχει ιδιαίτερη σημασία για την διατήρηση της ομαλής λειτουργίας του TBM, χωρίς να παρουσιάζονται φθορές στα σκαπτικά στελέχη, στην κοπτική κεφαλή, στον κοχλία απομάκρυνσης του EPB ή στους σωλήνες πολφού και στις βαλβίες του TBM πολφού.

- Ορισμένα γεωυλικά, ειδικά αυτά που αποτελούνται σε μεγάλο ποσοστό από πλαστικές αργίλους, έχουν την τάση να αναπτύσσουν κολλώδη συμπεριφορά. Αυτή η τάση μπορεί να προκαλέσει κατά την διάρκεια λειτουργίας του EPB, την φραγή της κοπτικής κεφαλής και του κοχλία απομάκρυνσης ή να εμποδίζει την ανάπτυξη της ασπίδας λόγω τριβής. Για τα μηχανήματα πολφού-μπεντονιίτη, υλικά μεγαλύτερης πλαστικότητας μπορούν να οδηγήσουν σε προβλήματα μη ολοκληρωμένης μίξης του πολφού και διαχωρισμού του. Τα όρια Atterberg των σχηματισμών της χάραξης είναι αυτά με τα οποία μπορεί να καθοριστεί η πιθανότητα τέτοιων φαινομένων.

Το EPBM λειτουργεί καλύτερα στους αργιλώδεις σχιστόλιθους και στις πρόσφατες παράκτιες αποθέσεις, λόγω του υψηλού ποσοστού λεπτής κοκκομετρίας των υλικών αυτών, απαιτείται ωστόσο η εφαρμογή επιπλέον πίεσης στο μέτωπο σε ορισμένα σημεία της χάραξης. Το TBM πολφού-μπεντονίτη από την άλλη είναι πιο αποτελεσματικό έναντι της ανώτερης ενότητας του «Αθηναϊκού Σχιστολίθου», στους διατμημένους οφιολίθους και στα μικτά μέτωπα. Οι μαργαϊκές αποθέσεις και η «Μάργα του Πειραιά» δεν προκαλούν ιδιαίτερες δυσκολίες στην λειτουργία και των δύο τύπων TBM, ενώ στις θέσεις των πιο υγιών οφιολίθων και των ασβεστολίθων «Καραβά» μπορεί να μην ασκηθεί πίεση στο μέτωπο. Οι καταγεγραμμένες περατότητες των σχηματισμών και η υδροστατική πίεση κατά μήκος της σήραγγας παρουσιάζουν τέτοιες τιμές που δεν καθορίζουν τον τύπο του μηχανήματος.



Σχήμα 25: Το μέτωπο της σήραγγας με την ανώτερη και την κατώτερη ενότητα του Αθηναϊκού Σχιστολίθου (1) και της ανώτερης ενότητας Αθηναϊκού Σχιστολίθου επάνω στους οφιολίθους (2) (P.G Marinos, 2005, Western extension of Line 3 of the Athens Metro 'Haidari-Evangelistria (ch. 1+418 - ch. 9+627))



Σχήμα 26: Τεχνικογεωλογικός χαρακτηρισμός κατά μήκος της χάραξης «Χαϊδάρι-Ευαγγελίστρια» (Μαρίνος και συνεργάτες, 2005)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. Η ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΟΥ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΒΡΑΧΟΜΑΖΩΝ ΕΝΑΝΤΙ ΜΗΧΑΝΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΟΡΥΞΗΣ

Η ανάγκη εκτίμησης της τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς των βραχομάζων αποτέλεσε αιτία της δημιουργίας ενός συστήματος που μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα μεγάλο εύρος γεωλογικών καταστάσεων. Πρόκειται για το διάγραμμα TBC, το οποίο αναφέρθηκε και σε προηγούμενα κεφάλαια. Το διάγραμμα αυτό προέκυψε ύστερα από την συλλογή ενός εύρους δεδομένων 62 σηράγγων της Εγνατίας οδού. Αποτέλεσε ένα πολύ σημαντικό βήμα για την δημιουργία μιας « παγκόσμιας κοινής διαλέκτου» για την εκτίμηση της συμπεριφοράς της βραχόμαζας, αλλά και για την πρωταρχική προσέγγιση των κατάλληλων μέτρων υποστήριξης σε πιθανές αστοχίες. Πρόκειται ωστόσο για ένα διάγραμμα που μπορεί να εφαρμοστεί σε σήραγγες που κατασκευάζονται με συμβατική εκσκαφή.

Στην παρούσα διπλωματική γίνεται μια προσπάθεια κατασκευής ενός αντίστοιχου διαγράμματος συμπεριφοράς των βραχομαζών, το οποίο ωστόσο αφορά την μηχανοποιημένη εκσκαφή. Σκοπός είναι η προσέγγιση της ανάγκης του μετώπου να υποστηριχθεί. Συγκεκριμένα προσδιορίζεται εάν το μέτωπο της σήραγγας χρήζει υποστήριξης (παθητικής ή ενεργητικής) ή όχι. Ως δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν οι γεωτρήσεις του Μετρό της Αθήνας, ενώ για τους σκοπούς της διπλωματικής χρησιμοποιήθηκαν οι γεωτρήσεις της χάραξης «Χαϊδάρι-Ευαγγελίστρια» και «Άγιος Δημήτριος-Ελληνικό», επεκτάσεις οι οποίες παρουσιάζουν ένα μεγάλο εύρος γεωλογικών σχηματισμών, αλλά και διαφορετικών δομών σε διαφορετικούς, αλλά και ίδιας κατηγορίας σχηματισμούς (π.χ «Αθηναϊκός Σχιστόλιθος».

Στην επέκταση **«Άγιος Δημήτριος-Ελληνικό»** παρατηρήθηκε η έντονη παρουσία κερματισμένων γεωυλικών, καθώς επίσης και μία συχνή μεταβολή της ποιότητας τους. Το γεγονός αυτό είχε ως αποτέλεσμα να κρίνεται αναγκαία η υποστήριξη του μετώπου σχεδόν σε όλο το μήκος της χάραξης. Προέκυψε λοιπόν πως για τα ασθενή γεωυλικά, δηλαδή σε περιπτώσεις κερματισμένης ή πτωχής βραχόμαζας, είναι προτιμότερη η εφαρμογή παθητικής υποστήριξης του μετώπου με την εφαρμογή μηχανήματος με ασπίδα (Single Shield).

Η εφαρμογή ενός τέτοιου τύπου μηχανήματος μπορεί να υλοποιηθεί και σε πιο ισχυρές βραχόμαζες, ενώ είναι εντελώς ακατάλληλη για εδαφικά υλικά, συμπαγή ή μη, καθώς δεν μπορεί να αναπτυχθεί η απαραίτητη πίεση κεφαλής. Έτσι είναι πιθανό να συμβούν φθορές στα κοπτικά εργαλεία και το μηχάνημα να υποβαθμίσει περαιτέρω το υλικό, προκαλώντας φαινόμενα υπερεκσκαφών και καθιζήσεων Το μηχάνημα αυτού του τύπο είναι καταλληλότερο στα τμήματα όπου εντοπίζονται κυρίως «Αθηναϊκοί Σχιστόλιθοι» ασθενούς- μέτριας ποιότητας, καθώς επίσης και σε ορισμένες θέσεις συνεκτικών Νεογενών υλικών που προσομοιάζουν βραχόμαζες.

Τα μηχανήματα που προσφέρουν ενεργητική υποστήριξη του μετώπου, έχουν την δυνατότητα να ασκούν ελεγχόμενη πίεση στο μέτωπο κατά την διάρκεια της εκσκαφής περιορίζοντας την πιθανότητα να εκδηλωθούν αστάθειες και υπερεκσκαφές. Συγκεκριμένα, ο καταλληλότερος τύπος TBM με άσκηση πίεσης επί του μετώπου στην επέκταση «Αγ.Δημήτριος-Ελληνικό» είναι αυτός της Εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης (EPB). Κρίνεται προτιμότερος τύπος TBM σε σχέση με αυτόν του πολφου-μπεντονίτη (Slurry Shield), διότι στην χάραξη επικρατούν λεπτόκοκκα υλικά μικρής διαπερατότητας και συνεκτικά εδάφη. Η λειτουργία του βασίζεται στην υποστήριξη του μετώπου της σήραγγας με το εκσκαφθέν υλικό. Το υλικό πρέπει να είναι εύπλαστο, ενώ υπάρχει η δυνατότητα να γίνουν προσμίξεις με πρόσθετα χημικά σε θέσεις όπου δεν παρατηρείται αυτό το χαρακτηριστικό. Το EPB έχει την δυνατότητα να λειτουργεί με τρεις τρόπους, τον (1) πληρωμένο και υπό πίεση θάλαμο με χρήση ατέρμονα κοχλία για την αποκομιδή υλικών εκσκαφής, (2) τον μερικώς πληρωμένο και υπό πίεση θάλαμο και (3) τον κενό θάλαμο, χωρίς άσκηση πιέσεως, με χρήση μεταφορικής ταινίας. Έτσι έχει την δυνατότητα να εναλλάσσει την λειτουργία του ανάλογα με την ποιότητα του γεωυλικού. Η δυνατότητά του αυτή το καθιστά καταλληλότερο έναντι των συχνών μεταβολών της ποιότητας των γεωυλικών και των κατακερματισμενων υλικών. Έτσι λοιπόν είναι και το μηχάνημα που επιλέγεται για την κατασκευή της επέκτασης αυτής, εφαρμόζοντας στο μεγαλύτερο μήκος της την λειτουργία μερικώς πληρωμένου και υπό πίεση θαλάμου.

Παρακάτω παρουσιάζονται υπό μορφή πινάκων τα βήματα προσδιορισμού του κατάλληλου TBM, με βάση τις εικόνες των σχηματισμών και τις αντίστοιχες περιγραφές από τις γεωτρήσεις.

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΥ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΟΣ TBM

ΒΡΑΧΟΜΑΖΑ

HP1107

ΑΡΓΙΛΟΛΙΘΟΣ με παρουσία ΨΑΜΜΙΤΗ

HP3269

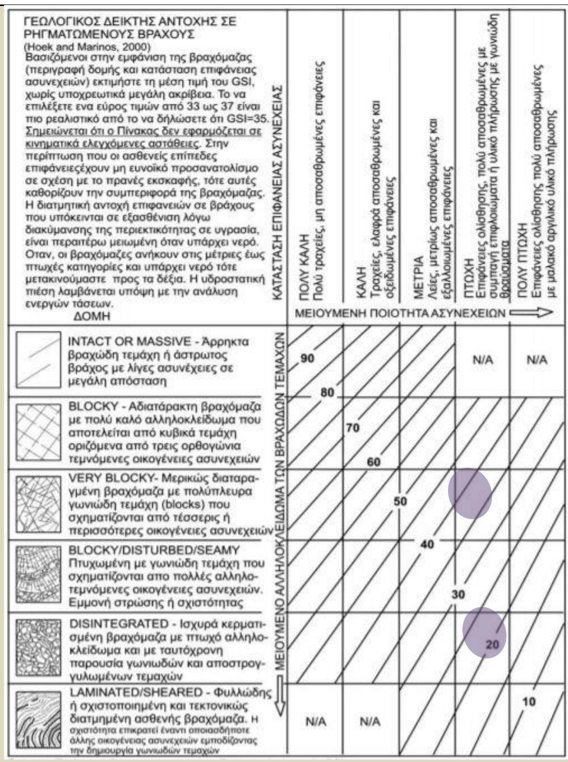
Μαργ. ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ, μέτρια κερματισμένος, οξειδωμένος, με λεπτές εδαφικές ζώνες

ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

GSI: 20-25

Δομή
Κερματισμένη-Διαταραγμένη-Αποδομημένη

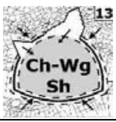
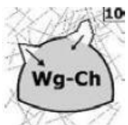
Επιφάνεια Ασυνέχειας
Πτωχή



GSI: 35-40

Δομή:
Κερματισμένη-Πολύ κερματισμένη

Επιφάνεια Ασυνέχειας
Μέτρια-Πτωχή

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΑΝΤΟΧΗΣ	
$\sigma_{ci} < 15MPa$	$\sigma_{ci} > 15MPa$
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΥΠΕΡΚΕΙΜΕΝΩΝ	
15-18	16-19
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΗΡΑΓΓΑΣ	
Καταπτώσεις τύπου καμινάδας, σφηνοειδείς ολισθήσεις ή πτώσεις τεμαχών λόγω βαρύτητας, μικρές έως μέτριες παραμορφώσεις με την εκδήλωση διατμητικών αστοχιών 	Σφηνοειδείς ολισθήσεις και καταπτώσεις τύπου καμινάδας 
ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΕΡΟ TBM	
Ενεργητική υποστήριξη μετώπου (EPB, Slurry Shield)	Παθητική υποστήριξη μετώπου (Single Shield, Double Shield)

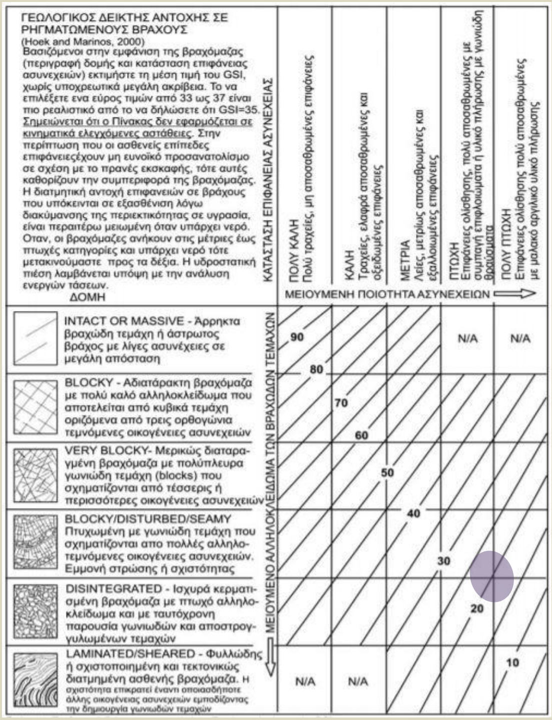
ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΥ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΟΣ TBM	
ΒΡΑΧΟΜΑΖΑ	
HP2254  Μαρ. ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ έως ασβεστιτικός ΑΡΓΙΛΟΛΙΘΟΣ, έντονα κερματισμένος με εδαφικές ζώνες κατά τόπους	HP1102  ΑΡΓΙΛΟΛΙΘΟΣ, αμμώδης, ελαφρώς χαλικώδης και ΨΑΜΜΙΤΗΣ ασβεστιτικός. λεπτόκοκκος

ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

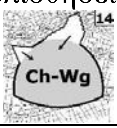
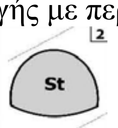
GSI: 20-25

<u>*Δομή*</u>
Κερματισμένη-
Διαταραγμένη-
Αποδομημένη

<u>*Επιφάνεια Ασυνέχειας*</u>
Πτωχή-πολύ πτωχή



ΣΥΝΕΚΤΙΚΟΣ

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΑΝΤΟΧΗΣ	
σ_{ci} >15MPa	
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΥΠΕΡΚΕΙΜΕΝΩΝ	
22-25	16-19
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΗΡΑΓΓΑΣ	
Καταπτώσεις τύπου καμινάδας και σφηνοειδείς ολισθήσεις 	Ευσταθής διατομή με τοπικές μόνο βαρυτικές αστοχίες. Η βραχόμαζα είναι συμπαγής με περιορισμένες ασυνέχειες 
ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΕΡΟ TBM	
Ενεργητική υποστήριξη μετώπου (EPB, Slurry Shield)	Παθητική και ενεργητική υποστήριξη μετώπου

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΥ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΟΣ TBM

ΒΡΑΧΟΜΑΖΑ

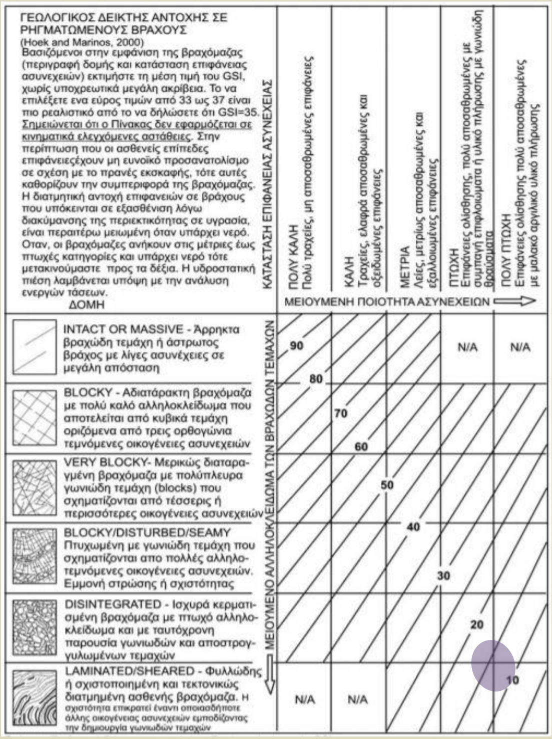
HP3272	HP2225
	
Μαργ. ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ, έντονα κερματισμένος και εδαφοποιημένος σε μορφή υπολειμμάτων μέσα σε εδαφικό υλικό	ΚΡΟΚΑΛΟΠΑΓΕΣ,εμφανίζεται μη συγκολλημένο σε βάθη (14.50-14.70, 15.10-15.30)

ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

GSI: 10-15

Δομή
Αποδομημένη - Φυλλώδης

Επιφάνεια Ασυνέχειας
Πτωχή-πολύ πτωχή



ΣΥΝΕΚΤΙΚΟ

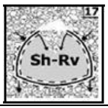
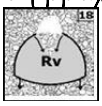
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

σ_{ci} < 15MPa	

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΥΠΕΡΚΕΙΜΕΝΩΝ

17-20	13-15.30

ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΗΡΑΓΓΑΣ

Μικρές έως μέτριες παραμορφώσεις με εκδήλωση διατμητικών αστοχιών και καταρροή βραχομάζας 	Καταρροή βραχομάζας 

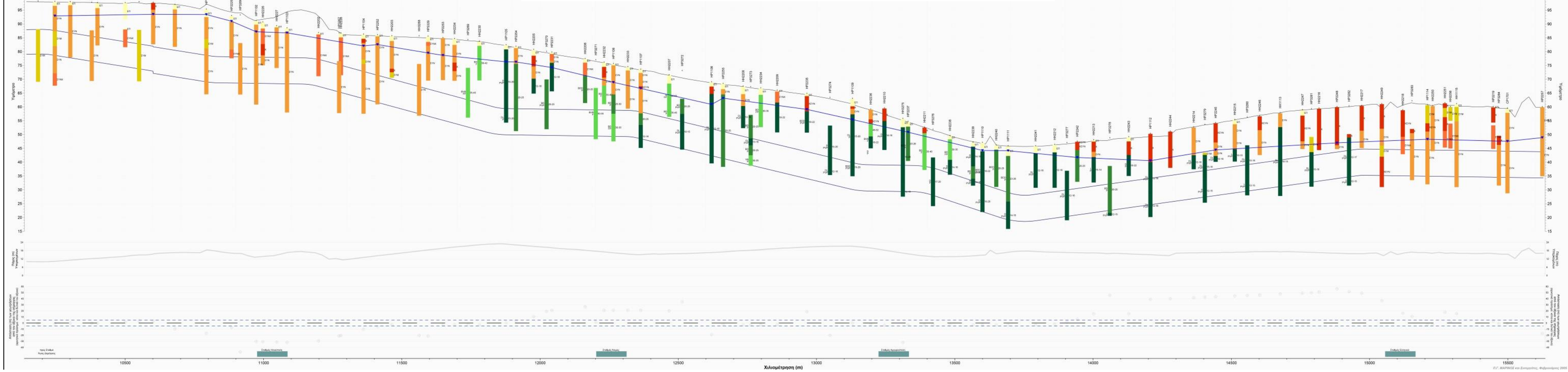
ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΕΡΟ TBM

Ενεργητική υποστήριξη μετώπου (EPB, Slurry Shield)	Ενεργητική υποστήριξη μετώπου (EPB, Slurry Shield)

Πίνακας 43: Βήματα προσδιορισμού του καταλληλότερου τύπου TBM με παραδείγματα γεωτρήσεων της χάραξης «Άγιος Δημήτριος-Ελληνικό»

Με βάση την διαδικασία αυτή κατασκευάστηκαν αντίστοιχοι πίνακες κατά μήκος των τεχνικογεωλογικών τομών των επεκτάσεων, καθώς επίσης και συγκεντρωτικοί πίνακες ποσοστού καταλληλότητας κάθε TBM, οι οποίοι παρουσιάζονται στις επόμενες ενότητες που αναφέρονται στην συγκεκριμένη χάραξη.

ΑΓ.ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ-ΕΛΛΗΝΙΚΟ



ΑΣΤΟΧΙΑ																															
ΒΑΘΟΣ	10-13	11-14 12-15	13-16	18-21	14-21	13-19	10-15	13-16 12-15	14-17 13-16	16-19	22-25	18-21	17-20	15-18	16-20	19-22	13-16	22-25	18-21	13-15	14-17	17-20	18-21	17-20	16-19	18-21	19-22	18-21	17-20	13-18	17-21	16-20
ΤΒΜ																															

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

Ομαδοποίηση κατά τεχνικογεωλογική συμπεριφορά

- ΕΠ — Επιχώσεις ή/και αποσαθρωμένος μανδύας
- Χ — Εδαφικά υλικά χαλαρά ή λίγο συνεκτικά
- ΣΥΝΧ — Εδαφικά υλικά συνεκτικά με παρουσία χαλαρών ζωνών
- ΣΥΝ — Συνεκτικά εδαφικά υλικά
- ΣΥΜ — Συμπαγή εδαφικά υλικά

Ταξινόμηση κατά GSI

- <20 — GSI < 20
- 20-30 — GSI 20 - 30
- >30 — GSI > 30

Στάθμη υπόγειου νερού και σημείο μέτρησης

Σταθμός

Υποσημειώσεις:
1. Στους βραχώδεις σχηματισμούς, δεξιά από κάθε γεώτρηση εμφανίζεται η τιμή GSI, ενώ αριστερά η βαθμονόμηση της δομής και της κατάστασης των ασυνεχειών κατά GSI. Στους εδαφικούς σχηματισμούς, δεξιά από κάθε γεώτρηση εμφανίζεται ο ο χαρακτηρισμός με βάση την τεχνικογεωλογική συμπεριφορά.
2. Οι μετρήσεις στάθμης του υπόγειου νερού έγιναν την ίδια ημερομηνία (11/12/03).

Σημειώσεις:
1. Η ταξινόμηση των εδαφικών σχηματισμών ως συμπαγή ή συνεκτικά δεν αποκλείει την πιθανότητα να υπάρχουν ζώνες χαλαρού υλικού, περιορισμένου όμως πάχους.
2. Επισημαίνεται ότι η εργασία αυτή βασίζεται κυρίως στις άμεσες δικές μας παρατηρήσεις επί των πυρήνων δειγματοληψίας της 3ης φάσης του ερευνητικού προγράμματος. Η αξιολόγηση των γεωτρήσεων της 1ης και 2ης φάσης βασίστηκε στις περιγραφές των γεωλογικών μητρώων από την Εδαφομηχανική ΑΤΕ και σε φωτογραφίες των πυρήνων. Η ακριβής γνώση της μετάβασης από τον έναν σχηματισμό στον άλλο κατά μήκος της γραμμής εξαρτάται προφανώς από την πυκνότητα της πληροφορίας. Στην έκθεση αυτή δίδεται το γενικό πλαίσιο των υπεδαφικών συνθηκών.

ΤΥΠΟΙ ΑΣΤΟΧΙΩΝ

St	Wg-Ch	Ch-Wg-Sh	Ch-Wg	Ch	Ch-Sh	Sh-Rv	Rv
(1)	(10)	(13)	(14)		(16)	(17)	

ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΜΕΤΩΠΟΥ

Παθητική	Ενεργητική και παθητική	Ενεργητική

Πίνακες ποσοστιαίας καταλληλότητας TBM κατά μήκος των ενοτήτων και των σταθμών της χάραξης «Άγιος Δημήτριος-Ελληνικό»

Τεχνικογεωλογικές ενότητες (m)	ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΗΤΑ TBM (%)		
	ΜΕ ΑΣΠΙΔΑ		
	Ενεργητική	Παθητική και ενεργητική	Παθητική
10+100-11+700	57	34	9
11+700-15+000	84	10	6
15+000-15+600	75	25	0

Χ.Θ κατά μήκος των σταθμών (m)		ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΗΤΑ TBM (%)		
		Ενεργητική	Παθητική και ενεργητική	Παθητική
10+100-11+000	Προς σταθμό Άγιος Δημήτριος	56	33	11
11+000-12+200	Σταθμός Ηλιούπολη	75	17	8
12+200-13+200	Σταθμός Άλιμος	100	0	0
13+200-15+050	Σταθμός Αργυρούπολη	84	16	0
15+050-15+650	Σταθμός Ηλιούπολη	77	23	0

Η επέκταση **«Χαϊδάρι-Ευαγγελίστρια»** υλοποιείται σε ένα εξίσου συχνά μεταβαλλόμενο περιβάλλον, με τις περισσότερες ζώνες να είναι αποδομημένες και ασθενείς, ενώ παρατηρούνται εκτεταμένες ζώνες με ισχυρότερα υλικά. Συγκεκριμένα τα ασθενή τμήματα εντοπίζονται κυρίως στις θέσεις του «Αθηναϊκού Σχιστολίθου», σε ορισμένες θέσεις των οφιολίθων, στις παράκτιες αποθέσεις και στις ελώδεις αποθέσεις. Αντιθέτως ως πιο ισχυρές ζώνες θεωρούνται αυτές των ασβεστολίθων «Καραβά», των μαργαϊκών αποθέσεων και της «Μάργας του Πειραιά».

Η εφαρμογή ενός μηχανήματος χωρίς ασπίδα (Gripper), βασίζεται στην ικανότητα αυτοϋποστήριξης της βραχόμαζας. Λειτουργούν χωρίς να εγκαθιστούν προκατασκευασμένα στοιχεία πίσω από την κοπτική κεφαλή. Αντίθετα η βραχόμαζα σταθεροποιείται με άλλα μέσα, όπως αγκύρια και σκυρόδεμα. Είναι καταλληλότερο για πιο σκληρούς και ισχυρούς βράχους, γι΄αυτό και μπορεί να εφαρμοστεί στις ζώνες των ασβεστολίθων «Καραβά» και σε ορισμένες θέσεις οφιολίθων.

Από την άλλη πλευρά η εφαρμογή ενός TBM με ασπίδα είναι καταλληλότερη για το μεγαλύτερο μέρος της σήραγγας. Ένα TBM με ασπίδα παθητικής υποστήριξης του μετώπου (Single Shield) μπορεί να εφαρμοστεί σε ζώνες πιο κερματισμένες , με ασθενείς κυρίως βραχόμαζες, χωρίς να είναι αδύνατη η εφαρμογή του και σε πιο ισχυρές. Είναι καταλληλότερο για ζώνες όπως αυτές των μαργαϊκών αποθέσεων, των σχιστολίθων της κατώτερης ενότητας,, ορισμένες θέσεις οφιολίθων και ασβεστολίθων και κυρίως της «Μάργας του Πειραιά»

Οι πιο ισχυροί σχηματισμοί αποτελούν ένα αξιόλογο κομμάτι της χάραξης. Δεν επηρέασαν ωστόσο αρκετά την επιλογή του μηχανήματος εκσκαφής, αφού τα ποσοστά των ασθενών και μικτών σχηματισμών είναι πολύ υψηλότερα. Έτσι το γεγονός αυτό έκανε εντονότερη την ανάγκη εφαρμογής ενός TBM που θα περιορίζει τυχόν αστοχίες και καθιζήσεις στο μέτωπο και στην επιφάνεια. Ένα τέτοιο TBM είναι αυτό της ενεργητικής υποστήριξης του μετώπου, δηλαδή ένα TBM εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης (EPB) ή πολφού μπεντονίτη (Slurry Shield). Συγκεκριμένα οι ζώνες που απαιτούν την εφαρμογή τέτοιου τύπου μηχανήματος είναι η ζώνη του «Αθηναϊκού Σχιστολίθου» και η ζώνη των παράκτιων αποθέσεων στο λιμάνι του Πειραιά.

Επιπλέον, προκειμένου να λειτουργήσει ικανοποιητικά ένα μηχάνημα ενεργητικής υποστήριξης του μετώπου, στις θέσεις που οι συνθήκες είναι ευσταθείς, κρίθηκε αναγκαίο αυτό να λειτουργεί χωρίς εισπίεση στο μέτωπο, κερδίζοντας έτσι όχι μόνο την καλύτερη αντιμετώπιση των εκάστοτε συνθηκών, αλλά και κόστος και χρόνο εκσκαφής.

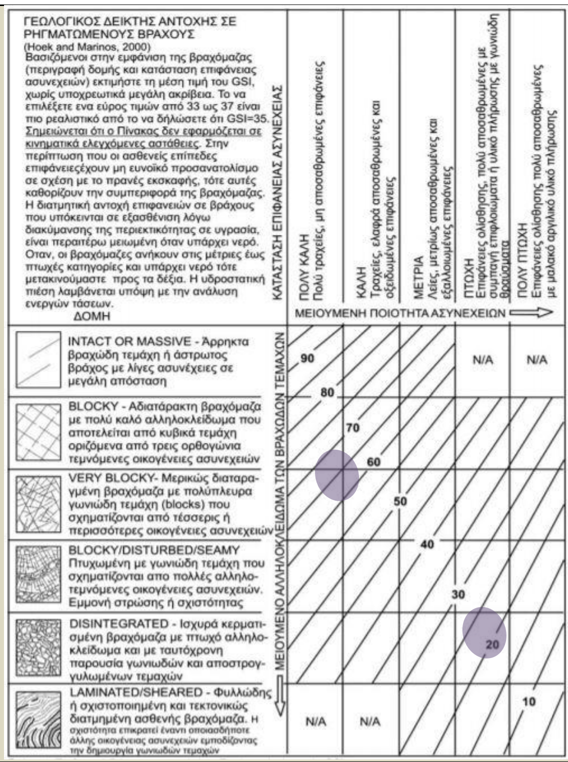
Παρακάτω παρουσιάζονται υπό μορφή πινάκα τα βήματα προσδιορισμού του κατάλληλου TBM, με βάση παραδείγματα εικόνων των σχηματισμών και τις αντίστοιχες περιγραφές από τις γεωτρήσεις.

<table>
<tr><th colspan="3">ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΥ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΟΣ TBM</th></tr>
<tr><th colspan="3">ΒΡΑΧΟΜΑΖΑ</th></tr>
<tr><td>BP3340

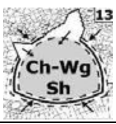
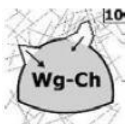
Εναλλαγές αργιλικού ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΥ φολιωμένου με ολισθηρές επιφάνειες και κερματισμένου έως λατυποποιημένου ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗ</td><td colspan="2">BP2433

Κρυσταλλικός ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ, υγιής έως ελαφρά αποσαθρωμένος, λεπτοστρωματώδης, ελαφρά διακλασμένος, με τραχείες-πολύ τραχείες επιφάνειες ασυνεχειών</td></tr>
<tr><th colspan="3">ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ</th></tr>
<tr><td>GSI: 18-28

<u>Δομή</u>
Κερματισμένη-Διαταραγμένη-Αποδομημένη

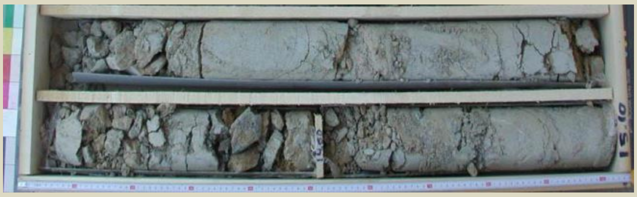
<u>Επιφάνεια Ασυνέχειας</u>
Πτωχή</td><td>
</td><td>GSI: 65-70

<u>Δομή:</u>
Κερματισμένη-Πολύ κερματισμένη

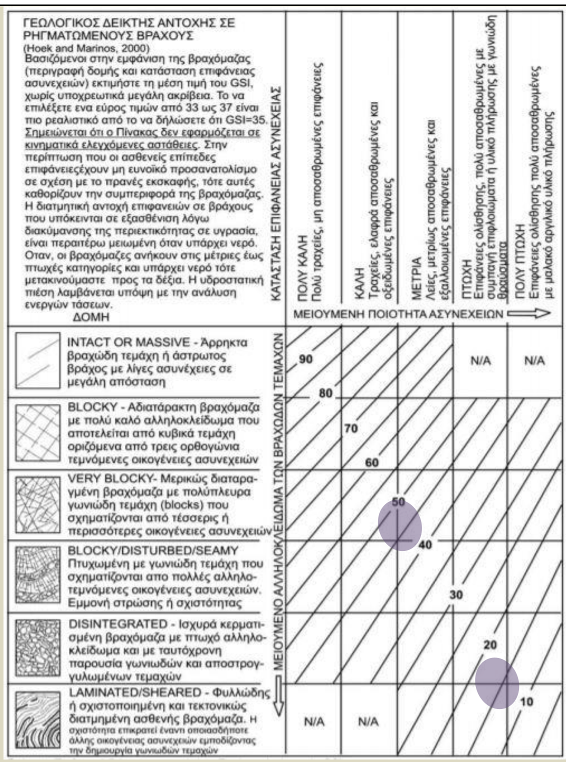
<u>Επιφάνεια Ασυνέχειας</u>
Καλή-Πολύ καλή</td></tr>
<tr><th colspan="3">ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΑΝΤΟΧΗΣ</th></tr>
<tr><td>σ_{ci} < 15MPa</td><td colspan="2">σ_{ci} > 15MPa</td></tr>
<tr><th colspan="3">ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΥΠΕΡΚΕΙΜΕΝΩΝ</th></tr>
<tr><td>25-28</td><td colspan="2">15-18</td></tr>
<tr><th colspan="3">ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΗΡΑΓΓΑΣ</th></tr>
<tr><td>Καταπτώσεις τύπου καμινάδας, σφηνοειδείς ολισθήσεις ή πτώσεις τεμαχών λόγω βαρύτητας, μικρές έως μέτριες παραμορφώσεις με την εκδήλωση διατμητικών αστοχιών

</td><td colspan="2">Σφηνοειδείς ολισθήσεις και καταπτώσεις τύπου καμινάδας

</td></tr>
<tr><th colspan="3">ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΕΡΟ TBM</th></tr>
<tr><td>Ενεργητική υποστήριξη μετώπου
(EPB, Slurry Shield)</td><td colspan="2">Παθητική υποστήριξη μετώπου (Single Shield, Double Shield)</td></tr>
</table>

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΥ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΟΣ TBM

ΒΡΑΧΟΜΑΖΑ

ΒΡ2406	ΒΡ2423
 Εναλλαγές ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗ και αργιλικού ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΥ,κερματισμένου	 ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗΣ, έντονα κερματισμένος και τοπικά λατυποποιημένος και ζώνες εδαφοποίησης

ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

GSI: 15-20 *Δομή* Αποδομημένη-Φυλλώδης *Επιφάνεια Ασυνέχειας* Πτωχή		GSI: 45-50 *Δομή:* Πολύ κερματισμένη *Επιφάνεια Ασυνέχειας* Καλή-μέτρια

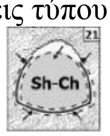
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

σ_{ci} < 15MPa	σ_{ci} < 15MPa

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΥΠΕΡΚΕΙΜΕΝΩΝ

16.40-18	14-15.10

ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΗΡΑΓΓΑΣ

Μικρές έως μέτριες παραμορφώσεις με την εκδήλωση διατμητικών αστοχιών σε ζώνη μικρής έκτασης περιμετρικά της σήραγγας και καταπτώσεις τύπου καμινάδας 	Σφηνοειδείς ολισθήσεις, καταπτώσεις τύπου καμινάδας και μικρές έως μέτριες παραμορφώσεις με την εκδήλωση διατμητικών αστοχιών σε ζώνη μικρής έκτασης περιμετρικά της σήραγγας 

ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΕΡΟ TBM

Ενεργητική υποστήριξη μετώπου (EPB, Slurry Shield)	Δυνατότητα και παθητικής (Single Shield, Double Shield)και ενεργητικής υποστήριξης μετώπου

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΥ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΟΣ TBM

ΒΡΑΧΟΜΑΖΑ

BP2426

Σερπεντινιωμένος ΠΕΡΙΔΟΤΙΤΗΣ έως ΣΕΡΠΕΝΤΙΝΗΣ. Ελαφρώς και τοπικά μετρίως αποσαθρωμένος, με πυκνό ιστό ασβεστιτικών κυρίως φλεβιδίων. Ελαφρά έως μέτρια διακλασμένος

BP2428

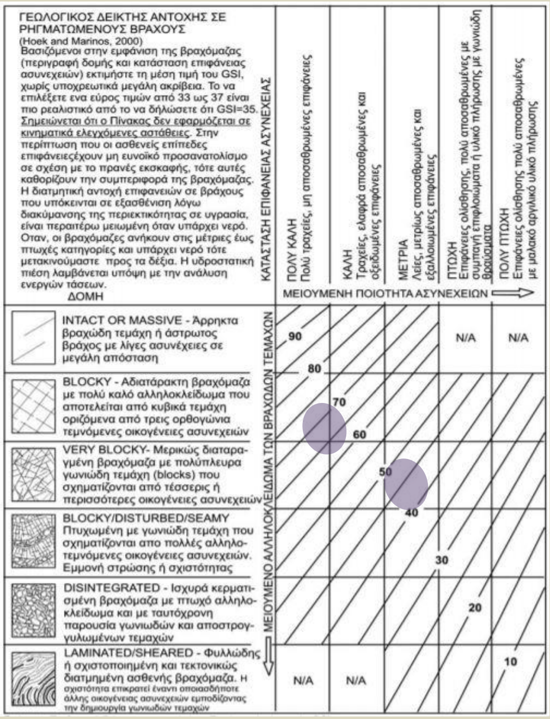
ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ κρυσταλλικός. Υγιής έως ελαφρά αποσαθρωμένος και ελαφρώς διακλασμένος. Επιφάνειες ασυνέχειας τραχείες έως πολύ τραχείες, πληρωμένες τοπικά με ασβεστίτη

ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

GSI: 45-50

Δομή
Κερματισμένη-Πολύ κερματισμένη

Επιφάνεια Ασυνέχειας
Μέτρια



GSI: 70-80

Δομή:
Συμπαγής-Κερματισμένη

Επιφάνεια Ασυνέχειας
Πολύ καλή-καλή

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

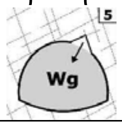
$\sigma_{ci} < 15MPa$	$\sigma_{ci} > 15MPa$

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΥΠΕΡΚΕΙΜΕΝΩΝ

13-16	18-21

ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΗΡΑΓΓΑΣ

Σφηνοειδείς ολισθήσεις ή πτώσεις τεμαχών λόγω βαρύτητας



Ευσταθής διατομή με τοπικές μόνο βαρυτικές αστοχίες. Η βραχόμαζα είναι συμπαγής με περιορισμένες ασυνέχειες

ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΕΡΟ TBM

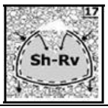
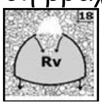
TBM χωρίς ασπίδα (Gripper) ή παθητικής υποστήριξης μετώπου (Single Shield, Double Shield)	TBM χωρίς ασπίδα (Gripper) ή ανοιχτού μετώπου (OFS)

<table>
<tr><th colspan="3">ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΥ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΟΣ TBM</th></tr>
<tr><th colspan="3">ΒΡΑΧΟΜΑΖΑ</th></tr>
<tr><td>BP3321

ΑΡΓΙΛΙΚΟΣ ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ, έντονα τεκτονισμένος και οξειδωμένος</td><td colspan="2">BP2454

ΑΜΜΟΣ, ιλυώδης, πολύ πυκνή έως ελαφρά σιμεντωμένος ΨΑΜΜΙΤΗΣ. Αδιατάρακτη δειγματοληψία από 14.30-15.00μ.</td></tr>
<tr><th colspan="3">ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ</th></tr>
<tr><td>GSI: 8-15

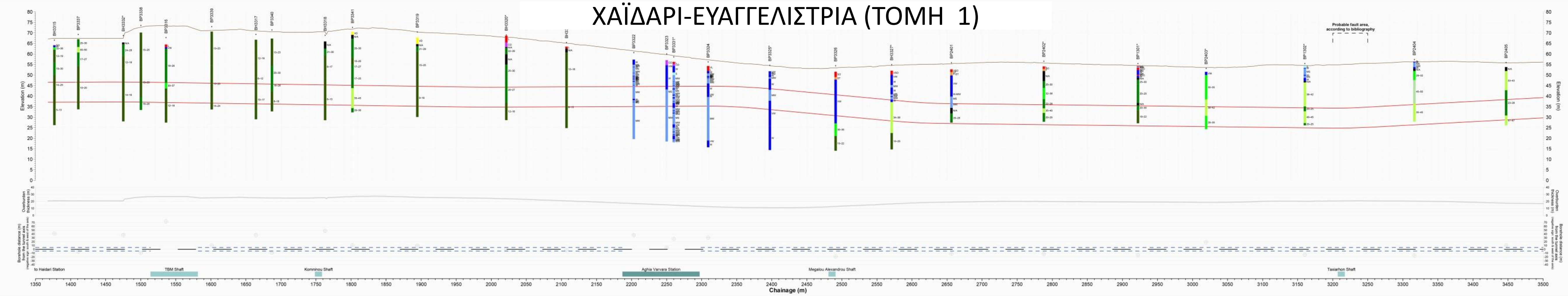
<u>Δομή</u>
Αποδομημένη

<u>Επιφάνεια Ασυνέχειας</u>
Πολύ πτωχή</td><td></td><td>Πολύ πυκνή</td></tr>
<tr><th colspan="3">ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΑΝΤΟΧΗΣ</th></tr>
<tr><td>σ_{ci} < 15MPa</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><th colspan="3">ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΥΠΕΡΚΕΙΜΕΝΩΝ</th></tr>
<tr><td>20-23</td><td colspan="2">14-16.50</td></tr>
<tr><th colspan="3">ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΗΡΑΓΓΑΣ</th></tr>
<tr><td>Μικρές έως μέτριες παραμορφώσεις με εκδήλωση διατμητικών αστοχιών και καταρροή βραχομάζας
</td><td colspan="2">Καταρροή βραχομάζας
</td></tr>
<tr><th colspan="3">ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΕΡΟ TBM</th></tr>
<tr><td>Ενεργητική υποστήριξη μετώπου
(EPB, Slurry Shield)</td><td colspan="2">Ενεργητική υποστήριξη μετώπου
(EPB, Slurry Shield)</td></tr>
</table>

Πίνακας 44: Βήματα προσδιορισμού του καταλληλότερου τύπου TBM με παραδείγματα γεωτρήσεων της χάραξης «Χαϊδάρι-Ευαγγελίστρια»

Παρακάτω παρουσιάζονται τα τμήματα των τεχνικογεωλογικών τομών και οι πίνακες προσδιορισμού του τύπου αστοχίας και του καταλληλότερου μηχανήματος εκσκαφής για κάθε γεώτρηση κατά μήκος της χάραξης.

ΧΑΪΔΑΡΙ-ΕΥΑΓΓΕΛΙΣΤΡΙΑ (ΤΟΜΗ 1)



ΑΣΤΟΧΙΑ																						
ΒΑΘΟΣ	20-23	21-24	25-30	25 - 28	24 - 27	27-28.50 28.50-30	25-28	24-27	20-23	15-18	15 - 18	13 - 16	10-13	13-16	16-19	20-23	20-22 22-23	20-23	19-22	20-23	12-15	16-19
TBM																						

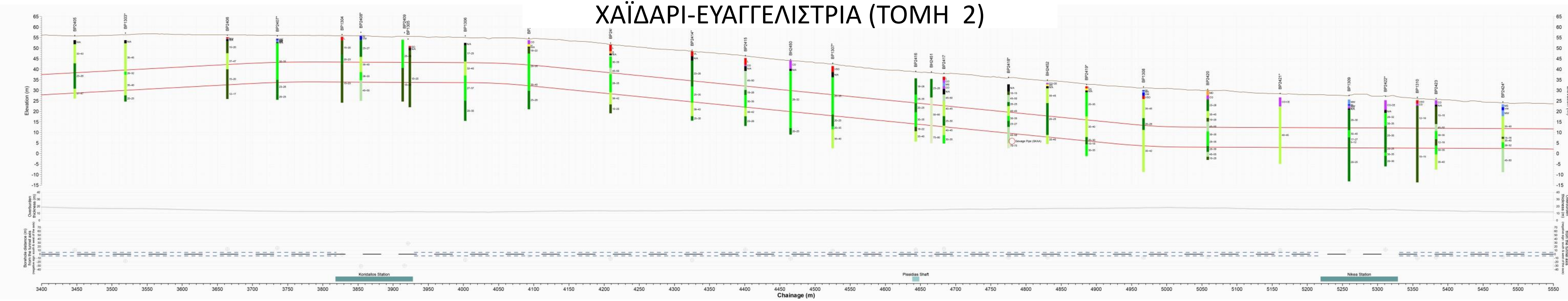
ΥΠΟΜΝΗΜΑ

Characterisation according to BS		
	VSO SO	Fine soils, very soft to soft
	F ST	Fine soils, firm to stiff
	VST H	Fine soils, very stiff to hard
	VL L	Coarse soils, very loose to loose
	MD D	Coarse soils, medium dense to dense
	VD	Coarse soils, very dense
	VW W	Rocks with undisturbed rock mass, very weak to weak
	MW MS	Rocks with undisturbed rock mass, moderaterly weak to moderately strong
	S VS ES	Rocks with undisturbed rock mass, strong to extremely strong
Qualitative characterisation of geomaterials		
	CO	Consistent conglomerates, breccia and grits
	CE	Cemented conglomerates, breccia and grits
Classification according to GSI		
	N/A	Non applicable GSI (soil-like zone)
	<20	Rock mass with GSI < 20
	20-28	Rock mass with GSI 20 - 28
	28-35	Rock mass with GSI 28 - 35
	35-45	Rock mass with GSI 35 - 45
	45-55	Rock mass with GSI 45 - 55
	>55	Rock mass with GSI > 55
	KENO	Void (in sampling, karstic, archeological)
		Ground water level and measurement point (July 2006) Ground water level and measurement point (May 2006) Ground water level and measurement point (May 2005) Indicatine stream position (from Edafomichaniki S.A.)

ΤΥΠΟΙ ΑΣΤΟΧΙΩΝ								
St	**Wg**		**Wg-Ch, Sh**	**Wg-Ch**	**Ch-Wg, Sh**	Sh-Rv	Rv	**Sh-Ch**
(2)	(5)	(6)	(9)	(10)	(13)	(17)	(18)	(21)

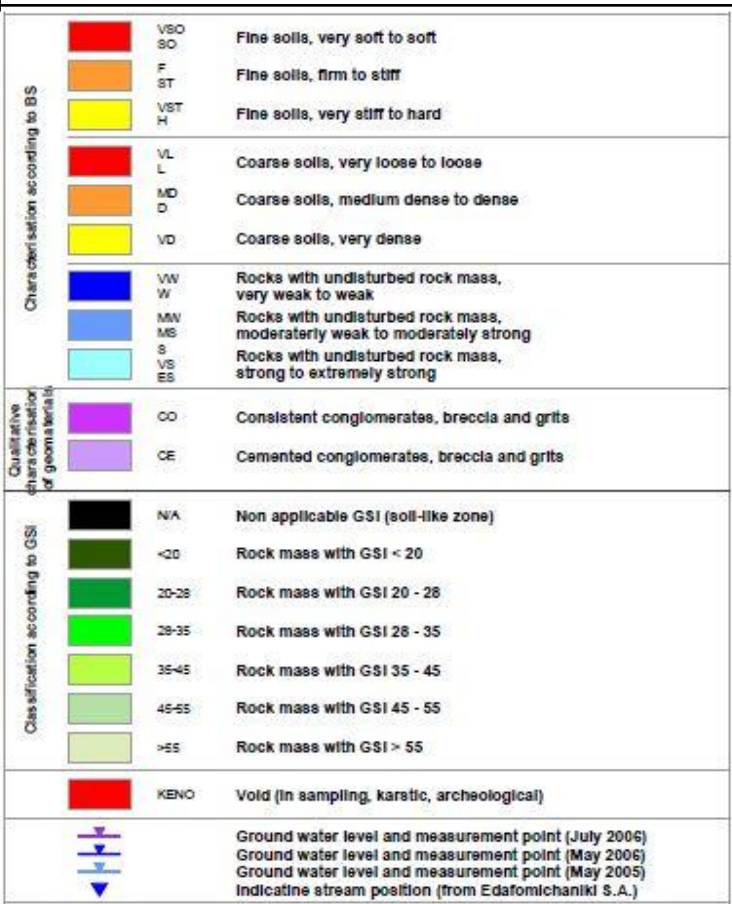
ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΜΕΤΩΠΟΥ			
Με ασπίδα			Χωρίς ασπίδα
Παθητική	Ενεργητική και παθητική	Ενεργητική	

ΧΑΪΔΑΡΙ-ΕΥΑΓΓΕΛΙΣΤΡΙΑ (ΤΟΜΗ 2)



ΑΣΤΟΧΙΑ																						
ΒΑΘΟΣ	12-15	16-19	15-16.40 16.40-18	13-16	13-16	13-16	13-16	12-15	13-16	14.40-17	15-18	15-15.90 15.90-18	15-18	15-18	16-18 18-19	16-19	17-20	17-20	15-18	15-18	14-17	14-15.10 15.10-17	12-15
TBM																						

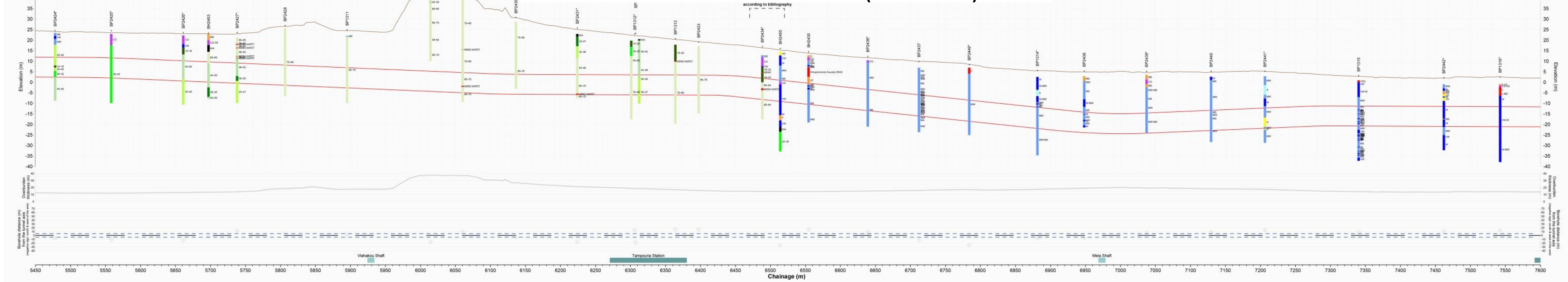
ΥΠΟΜΝΗΜΑ



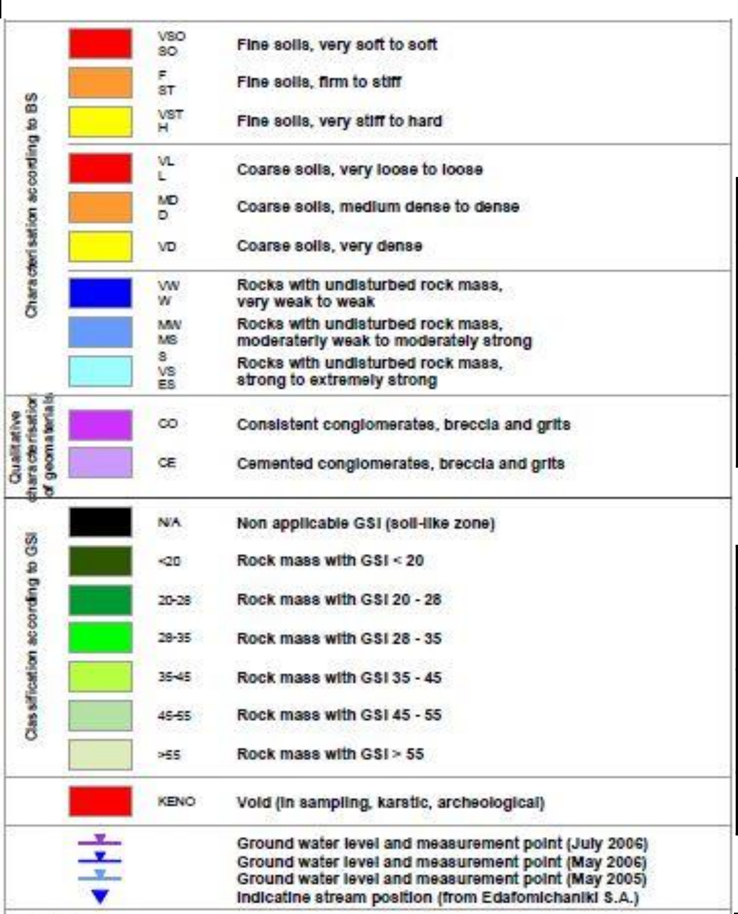
ΤΥΠΟΙ ΑΣΤΟΧΙΩΝ								
St	Wg		Wg-Ch, Sh	Wg-Ch	Ch-Wg, Sh	Sh-Rv	Rv	Sh-Ch
(2)	(5)	(6)	(9)	(10)	(13)	(17)	(18)	(21)

ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΜΕΤΩΠΟΥ			
Με ασπίδα			Χωρίς ασπίδα
Παθητική	Ενεργητική και παθητική	Ενεργητική	

ΧΑΪΔΑΡΙ-ΕΥΑΓΓΕΛΙΣΤΡΙΑ (ΤΟΜΗ 3)



ΑΣΤΟΧΙΑ																							
ΒΑΘΟΣ	12-15	13-16	14-17	15-18	18-21	13-16	35-36.60 36.60-38	26 - 29	23 - 26	21 - 23.40 23.40 -- 24	19 - 22	18 - 20. 60 20. 60 -21	17 - 20	15 - 18	15 16:40 16.40 18	15 - 18	15-18	16-19	17-20	20-23	18-18.50 18.50-21	17-20	17-20	15-18	14-17
TBM																							

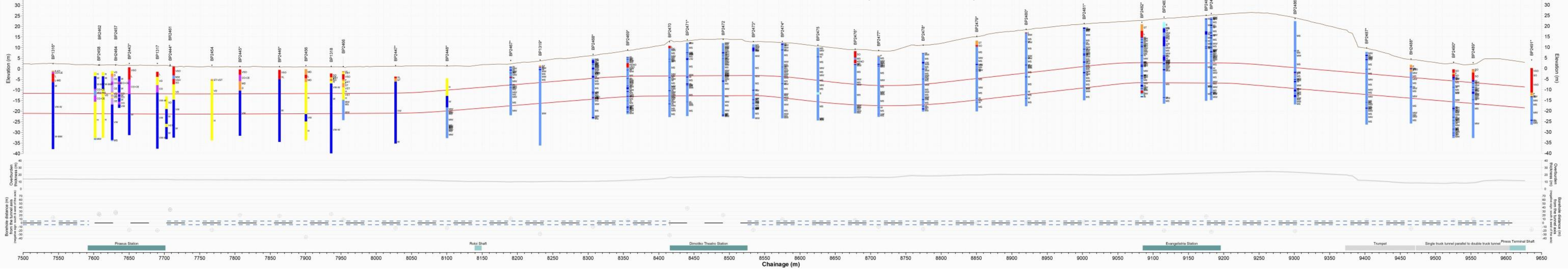


ΥΠΟΜΝΗΜΑ

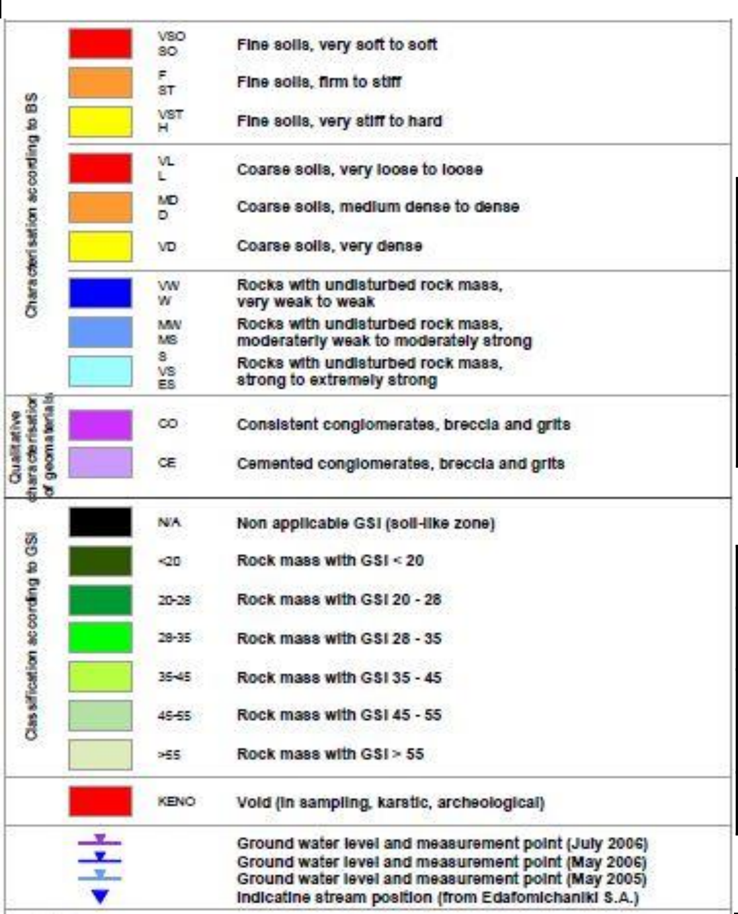
ΤΥΠΟΙ ΑΣΤΟΧΙΩΝ								
St	Wg		Wg-Ch, Sh	Wg-Ch	Ch-Wg, Sh	Sh-Rv	Rv	Sh-Ch
(2)	(5)	(6)	(9)	(10)	(13)	(17)	(18)	(21)

ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΜΕΤΩΠΟΥ			
Με ασπίδα			Χωρίς ασπίδα
Παθητική	Ενεργητική και παθητική	Ενεργητική	

ΧΑΙΔΑΡΙ-ΕΥΑΓΓΕΛΙΣΤΡΙΑ (ΤΟΜΗ 4)



ΑΣΤΟΧΙΑ																									
ΒΑΘΟΣ	14-17	14-17	14 - 16 / 16 - 17	14 - 16.30 / 16.30 - 17	14-17	14 - 14.5 / 15.4 - 17	14-17	14-17	15-18	16-19	16-18 / 18-20	16-19	15-18	15-18	16-19	19-22	20-23	21-22.6 / 22.6-24	23 - 26	23-23.5 / 23.5-26	24.8-24.5 / 24.5-27	12 - 15	8 - 11	9 - 11.2 / 11.2 - 13	9 - 12	10 - 13
TBM																									



ΥΠΟΜΝΗΜΑ

ΤΥΠΟΙ ΑΣΤΟΧΙΩΝ								
St	Wg		Wg-Ch, Sh	Wg-Ch	Ch-Wg, Sh	Sh-Rv	Rv	Sh-Ch
(2)	(5)	(6)	(9)	(10)	(13)	(17)		(21)

ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΜΕΤΩΠΟΥ			
Με ασπίδα			Χωρίς ασπίδα
Παθητική	Ενεργητική και παθητική	Ενεργητική	

Πίνακες ποσοστιαίας καταλληλότητας TBM κατά μήκος των ενοτήτων και των σταθμών της χάραξης «Χαϊδάρι-Ευαγγελίστρια»

Τεχνικογεωλογικές ενότητες (m)	ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΗΤΑ TBM (%)			
	ΜΕ ΑΣΠΙΔΑ			ΧΩΡΙΣ ΑΣΠΙΔΑ
	Ενεργητική	Ενεργητική και Παθητική	Παθητική	
1+418-2+150	***100***	-	-	-
2+150-2+500	29	-	29	42
2+500-2+700	***100***	-	-	-
2+700-4+650	***82***	18	-	-
4+650-4+800	-	***100***	-	-
4+800-5+450	***77***	23	-	-
5+450-5+725	36	37	-	27
5+725-6+200	-	17	-	***83***
6+200-6+500	8	***50***	-	42
6+500-7+350	10	***90***		
7+350-8+150	37	***63***	-	-
8+150-9+500	-	***95***	5	-
9+500-9+627	***50***	***50***		

Χ.Θ κατά μήκος των σταθμών (m)		ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΗΤΑ TBM (%)			
		ΜΕ ΑΣΠΙΔΑ			ΧΩΡΙΣ ΑΣΠΙΔΑ
		Ενεργητική	Ενεργητική και Παθητική	Παθητική	
1+350-1+750	Επίσταθμος Χαϊδαρίου-Φρεαρ Κομνηνού	***100***	-	-	-
1+750-2+180	Φρεαρ Κομνηνού-Σταθμός Αγ. Βαρβάρα	***93***	-	7	-
2+180-2+500	Σταθμός Αγ. Βαρβάρα-Φρέαρ Μ.Αλεξάνδρου	37	-	***63***	-
2+500-3+210	Φρέαρ Μ.Αλεξάνδρου-Φρέαρ Ταξιαρχών	***72***	18	10	-
3+210-3+820	Φρέαρ Ταξιαρχών-Σταθμός Κορυδαλλός	***84***	16	-	-
3+820-4+640	Σταθμός Κορυδαλλός-Φρέαρ Πισιδίας	***90***	10	-	-
4+640-5+400	Φρέαρ Πισιδίας-Σταθμός Νίκαιας	***61***	39	-	0
5+400-5+920	Σταθμός Νίκαιας-Φρέαρ Βλαχάκου	***42***	29	-	29
5+920-6+270	Φρέαρ Βλαχάκου-Σταθμός Ταμπούρια	-	-	-	***100***
6+270-6+970	Σταθμός Ταμπούρια-Φρέαρ Μελά	16	***70***	-	14
6+970-7+590	Φρέαρ Μελά-Σταθμός Πειραιά	16	***84***	-	-
7+590-8+140	Σταθμός Πειραιά-Φρέαρ Ρολόι	***54***	46	-	-
8+140-8+410	Φρέαρ Ρολόι-Σταθμός Δημοτικό θέατρο	-	***100***	-	-
8+410-9+080	Σταθμός Δημοτικό θέατρο-Σταθμός Ευαγγελίστρια	-	***100***	-	-
9+080-9+610	Σταθμός Ευαγγελίστρια-Τερματικός σταθμός Πειραιά	19	***81***	-	-

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΕΝΑΝΤΙ ΜΗΧΑΝΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΟΡΥΞΗΣ

Σε κάθε γεώτρηση και των δύο επεκτάσεων, έγινε ένας προσδιορισμός της τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς των σχηματισμών με βάση συγκεκριμένες παραμέτρους και προσδιορίστηκε τελικά εάν το μέτωπο βάση κάθε γεώτρησης χρειάζεται να υποστηριχθεί και αν ναι, τότε εάν θα είναι με παθητικό ή ενεργητικό τρόπο.

Εφαρμόζοντας λοιπόν την διαδικασία που αναφέρθηκε στις προηγούμενες ενότητες σχεδιάστηκε το «Διάγραμμα συμπεριφοράς σηράγγων έναντι μηχανοποιημένης στο οποίο εντάσσονται οι παράμετροι:

1. Τύπος βραχόμαζας και συμπεριφορά της
2. Ύψος υπερκειμένων (Low – High)
3. Τιμή αντοχής άρρηκτου βράχου - σ_{ci} (MPa) και βαθμός συγκόλλησης μαλακού βράχου έως εδαφοποιημένου γεωυλικού
4. Καταλληλότερος τύπος TBM (Gripper, Single Shield, Double Shield, OFS, AFS-EPB, AFS-Slurry)
5. Εξίσου εφαρμόσιμος τύπος TBM, υπό κάποιες περιορισμένες συνθήκες

Οι τιμές της αντοχής σci στο διάγραμμα διακρίνονται με βάση την απόκλιση από την τιμή των 15MPa, ενώ το βάθος της εκσκαφής βάση των δεδομένων είναι σε όλες τις περιπτώσεις μικρό (15-20m)

Ανάλογα με την δομή που παρατηρείται και τις περιγραφές των μητρώων των γεωτρήσεων γίνεται ο προσδιορισμός των τιμών του GSI της βραχόμαζας και μπορεί να χαρακτηριστεί η συμπεριφορά της. Η αρχική εκτίμηση του τύπου της τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς μπορεί να αφορά την διάκρισή της σε βαρυτικού ή τασικού τύπου χωρίς να αναιρείται η περίπτωση να απαντώνται και οι δύο κατηγορίες. Οι βαρυτικές αστοχίες επηρεάζονται από το βάθος ως προς την έκτασή τους, με τις περιπτώσεις τους να αφορούν καταπτώσεις. Από την άλλη ανάλογα με το βάθος οι τασικές αστοχίες εξελίσσονται σε διατμητικές και αποκτούν διαφορετική έκταση παραμορφώσεων. Οι κατηγορίες των αστοχιών που απαντήθηκαν είναι οι εξής:

- St (Stable) : Ευσταθής διατομή με τοπικές μόνο βαρυτικές αστοχίες
- Wg (Wedge failure): Σφηνοειδείς ολισθήσεις ή πτώσεις τεμαχών λόγω βαρύτητας
- Ch (Chimney failure): Αστοχία τύπου καμινάδας
- Rv (Ravelling ground): Καταρροή βραχόμαζας

• Sh (Shearing failures in shallow zone around tunnel perimeter): Μικρές έως μέτριες παραμορφώσεις με την εκδήλωση διατμητικών αστοχιών σε ζώνη μικρής έκτασης περιμετρικά της σήραγγας χωρίς όμως να αποκλείονται τοπικά και αστοχίες τεμαχών λόγω βαρύτητας

• Sq (Squeezing ground): Σημαντικές παραμορφώσεις λόγω υπερφόρτισης από την εκδήλωση διατμητικών αστοχιών σε εκτεταμένη ζώνη περιμετρικά της σήραγγας

Παρατηρείται επίσης η πιθανότητα η σήραγγα να ελέγχεται από δύο ή περισσότερους τύπους αστοχίας αλλά και από ενδιάμεσες συνθήκες κατηγοριών που ανήκουν στον ίδιο μηχανισμό συμπεριφοράς (π.χ βαρυτικές αστοχίες Wg-Ch). Αξίζει τέλος να σημειωθεί ότι η παρουσία του νερού και η πλήρωση των ασυνεχειών δεν εντοπίζονται στο διάγραμμα αφού εντάσσονται στον τύπο της αστοχίας, διευκολύνοντας ή εντείνοντας τον μηχανισμό της.

Τέλος μετά την ανάλυση των αστοχιών προσδιορίζεται ο κατάλληλος τύπος μηχανήματος εκσκαφής, ο οποίος διακρίνεται στις κατηγορίες του μηχανήματος με ασπίδα ή χωρίς ασπίδα (Gripper). Στην πρώτη κατηγορία παρουσιάζονται οι περιπτώσεις της παθητικής υποστήριξης του μετώπου (Μονής ασπίδας-Single shield, Διπλής ασπίδας-Double Shield), ενεργητικής υποστήριξης μετώπου (Εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης-EPB,πολφού -Slurry TBM, εισπιεζόμενου αέρα-air TBM) και ασπίδας ανοιχτού μετώπου (OFS), ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις υπάρχει η δυνατότητα εφαρμογής περισσότερων τύπων TBM.

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα εκτίμησης της τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς βραχομαζων κατά την μηχανοποιημένη όρυξη

Δομή βραχόμαζας		Ύψος υπερκειμένων	Αντοχή σ_{ci}	Τύπος συμπεριφοράς σήραγγας	Τύπος μηχανήματος όρυξης (TBM)	τύπος μηχανήματος όρυξης (TBM) υπό κατάλληλες συνθήκες
1	St	Χαμηλό	Χαμηλή (<15MPa)	Ευσταθής	Παθητική υποστήριξη μετώπου (TBM μονής ασπίδας, TBM διπλής ασπίδας)	Ασπίδα ανοιχτού μετώπου - OFS (Μερική)
2	St		Υψηλή (>15MPa)	Ευσταθής	Χωρίς ασπίδα (Gripper)	Ασπίδα ανοιχτού μετώπου – OFS (Μερική ~ 80 MPa)
3	Sh	Υψηλό	Χαμηλή (<15MPa	Μικρές έως μέτριες παραμορφώσεις με διατμητικές αστοχίες	Παθητική υποστήριξη μετώπου (TBM μονής ασπίδας, TBM διπλής ασπίδας)	Ασπίδα ανοιχτού μετώπου - OFS (Μερική)
4	St		Υψηλή (>15MPa)	Ευσταθής	Χωρίς ασπίδα (Gripper)	Ασπίδα ανοιχτού μετώπου – OFS (Μερική ~ 80 MPa)
5	Wg	Χαμηλό	Χαμηλή (<15MPa	Σφηνοειδής ολίσθηση	Παθητική υποστήριξη μετώπου (TBM μονής ασπίδας, TBM διπλής ασπίδας)	
6	Wg		Υψηλή (>15MPa)	Σφηνοειδής ολίσθηση	Παθητική υποστήριξη μετώπου (TBM μονής ασπίδας, TBM διπλής ασπίδας)	Χωρίς ασπίδα (Gripper) ανάλογα με την κατάσταση των ασυνεχειων
7	Sh-Wg	Υψηλό	Χαμηλή (<15MPa	Μικρές έως μέτριες παραμορφώσεις με διατμητικές αστοχίες-Σφηνοειδής ολίσθηση	Παθητική υποστήριξη μετώπου (TBM μονής ασπίδας, TBM διπλής ασπίδας)	
8	St-Wg		Υψηλή (>15MPa)	Ευσταθής-Σφηνοειδής ολίσθηση	Χωρίς ασπίδα (Gripper)	Παθητική υποστήριξη μετώπου (TBM μονής ασπίδας, TBM διπλής ασπίδας)
9	Wg-Ch Sh	Χαμηλό	Χαμηλή (<15MPa	Σφηνοειδής ολίσθηση-Κατάπτωση τύπου καμινάδας Μικρές έως μέτριες παραμορφώσεις με διατμητικές αστοχίες	Παθητική υποστήριξη μετώπου (TBM μονής ασπίδας[1], TBM διπλής ασπίδας)	Ενεργητική υποστήριξη του μετώπου
10	Wg-Ch		Υψηλή (>15MPa)	Σφηνοειδής ολίσθηση-Κατάπτωση τύπου καμινάδας	Παθητική υποστήριξη μετώπου (TBM μονής ασπίδας[1], TBM διπλής ασπίδας)	Ενεργητική υποστήριξη του μετώπου
11	Sh	Υψηλό	Χαμηλή (<15MPa	Μικρή έως μέτρια παραμορφώση με διατμητική αστοχία	Παθητική υποστήριξη μετώπου (TBM μονής ασπίδας[1], TBM διπλής ασπίδας)	Ενεργητική υποστήριξη του μετώπου
12	Wg		Υψηλή (>15MPa)	Σφηνοειδής ολίσθηση	Παθητική υποστήριξη μετώπου (TBM μονής ασπίδας, TBM διπλής ασπίδας)	Χωρίς ασπίδα (Gripper) ανάλογα με την κατάσταση των ασυνεχειων
13	Ch-Wg Sh	Χαμηλό	Χαμηλή (<15MPa	Κατάπτωση τύπου καμινάδας-Σφηνοειδής ολίσθηση, Μικρές έως μέτριες παραμορφώσεις με διατμητικές αστοχίες	Ενεργητική υποστήριξη του μετώπου	
14	Ch-Wg		Υψηλή (>15MPa)	Κατάπτωση τύπου καμινάδας-Σφηνοειδής ολίσθηση	Ενεργητική υποστήριξη του μετώπου,	
15	S(Sh-Sq) Ch	Υψηλό	Χαμηλή (<15MPa	Μικρή έως μέτρια παραμορφώση με διατμητική αστοχία- Σημαντική παραμόρφωση με διατμητική αστοχία, Αστοχία τύπου καμινάδας	Ενεργητική υποστήριξη του μετώπου,	
16	Ch-Sh		Υψηλή (>15MPa)	Κατάπτωση τύπου καμινάδας- Μικρές έως μέτριες παραμορφώσεις με διατμητικές αστοχίες	Ενεργητική υποστήριξη του μετώπου	
17	Sh-Rv	Χαμηλό	Χαμηλή (<15MPa	Μικρές έως μέτριες παραμορφώσεις με διατμητικές αστοχίες - Καταρροή εδάφους	Ενεργητική υποστήριξη του μετώπου	
18	Rv		Υψηλή (>15MPa)	Καταρροή εδάφους	Ενεργητική υποστήριξη του μετώπου (TBM πολφού μπεντονίτη)	
19	Sq-Ch	Υψηλό	Χαμηλή (<15MPa	Σημαντικές παραμορφώσεις με διατμητικές αστοχίες-Κατάπτωση τύπου καμινάδας	Ενεργητική υποστήριξη του μετώπου[2]	
20	Ch-Sh		Υψηλή (>15MPa)	Κατάπτωση τύπου καμινάδας-Μικρές έως μέτριες παραμορφώσεις με διατμητικές αστοχίες	Ενεργητική υποστήριξη του μετώπου (TBM πολφού μπεντονίτη)	
21	Sh-Ch	Χαμηλό	Χαμηλή (<15MPa	Μικρές έως μέτριες παραμορφώσεις με διατμητικές αστοχίες-Κατάπτωση τύπου καμινάδας	Ενεργητική υποστήριξη του μετώπου (TBM Εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης)	
22	Sh-Ch		Υψηλή (>15MPa)	Μικρές έως μέτριες παραμορφώσεις με διατμητικές αστοχίες- Κατάπτωση τύπου καμινάδας	Ενεργητική υποστήριξη του μετώπου (TBM Εξισορόπησης εδαφικής πίεσης)	
23	Sq	Υψηλό	Χαμηλή (<15MPa	Σημαντικές παραμορφώσεις με διατμητικές αστοχίες	Ενεργητική υποστήριξη του μετώπου (TBM Εξισορόπησης εδαφικής πίεσης)	
24	Sq		Υψηλή (>15MPa)	Σημαντικές παραμορφώσεις με διατμητικές αστοχίες	Ενεργητική υποστήριξη του μετώπου (TBM Εξισορόπησης εδαφικής πίεσης)	

[1] με μικρά κενά στα κοπτικά άκρα
[2] , ο τύπος της οποίας εξαρτάται από την πετρογραφία, το καθεστώς υπόγειων υδάτων, την υδροπερατότητα και το επίπεδο του υδροφόρου ορίζονται (TBM εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης, TBM πολφού μπεντονίτη, TBM με πίεση αέρα)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως κύριο αντικείμενο την αξιολόγηση της τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς των βραχομαζών έναντι μηχανοποιημένης όρυξης.

Η εκτίμηση των αστοχιών που μπορεί να εμφανιστούν στην κατασκευή μιας σήραγγας αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα βήματα για τον ασφαλή σχεδιασμό της. Η σημασία αυτής της διαδικασίας δημιούργησε αρχικά την ανάγκη για την κατασκευή μιας «κοινής διαλέκτου» προκειμένου να εκτιμάται με την ίδια μέθοδο η συμπεριφορά των βραχομαζών, σε όλο τον κόσμο. Κατασκευάστηκε λοιπόν το διάγραμμα TBC, με το οποίο εκτιμάται η συμπεριφορά της βραχομάζας και γίνεται μια πρώτη προσέγγιση των κατάλληλων μέτρων υποστήριξης για τις αστοχίες που αναμένονται σε μια σήραγγα που διανοίγεται με συμβατικό τρόπο εκσκαφής. Σε αστικά ωστόσο περιβάλλοντα και σε περιβάλλοντα που οι τάσεις που αναπτύσσονται υπόγεια πρέπει να διατηρούνται όσο το δυνατόν πιο σταθερές, η διάνοιξη των σηράγγων επιτυγχάνεται με τα μηχανήματα TBM. Πρόκειται λοιπόν για έναν επιπλέον παράγοντα που καλείται να λάβει κάποιος υπόψη στην τεχνικογεωλογική αξιολόγηση των σχηματισμών, καθώς τα μηχανήματα αυτά επηρεάζονται σε έναν μεγάλο βαθμό από τις γεωλογικές και τεχνικογεωλογικές συνθήκες που συναντά κάθε διάνοιξη. Είναι ανάγκη επομένως να επιλεχθεί στην εκάστοτε περίπτωση σήραγγας, εκείνο το μηχάνημα που θα λειτουργήσει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο.

Στην συγκεκριμένη εργασία γίνεται μια προσπάθεια κατασκευής ενός αντίστοιχου διαγράμματος συμπεριφοράς των βραχομαζών, το οποίο αφορά την μηχανοποιημένη όρυξη με σκοπό να προτείνει τους τύπους των μηχανημάτων που ενδείκνυνται για κάθε κατηγορία αστοχίας.

Αναφορικά σε αυτό το διάγραμμα έγινε μια ανάλυση των στοιχείων περιγραφής των βραχομαζών, των παραμέτρων τους και των στοιχείων ταξινόμησής τους. Στην συνέχεια ακολούθησε μια βιβλιογραφική αναζήτηση σηράγγων που κατασκευάστηκαν με την χρήση μεθόδων μηχανοποιημένης όρυξης προκειμένου να συλλεχθούν πληροφορίες από πολλές και διαφορετικές εμπειρίες τέτοιων έργων. Αναλύθηκαν οι συγκεκριμένες γεωλογικές συνθήκες και αστοχίες κατά μήκος των σχηματισμών που οδήγησαν στην επιλογή συγκεκριμένων μηχανημάτων εκσκαφής. Έπειτα εξετάστηκαν οι επεκτάσεις «Άγιος Δημήτριος-Ελληνικό» και «Χαϊδάρι-Ευαγγελίστρια» του μετρό της Αθήνας. Έχοντας ως δεδομένα λοιπόν τις βιβλιογραφικές αναφορές, αλλά και αντίστοιχες μελέτες που διεξήχθησαν στις επεκτάσεις που αναφέρθηκαν, έγινε μια εκτενής ανάλυση. Συγκεκριμένα από της επεκτάσεις της Αθήνας, αναλύθηκαν τα στοιχεία των γεωτρήσεων τους και τα τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών που εντοπίστηκαν στα βάθη της διατομής της σήραγγας, εξετάστηκε η τεχνικογεωλογική συμπεριφορά τους και τέλος εκτιμήθηκε ο καταλληλότερος τρόπος μηχανοποιημένης εκσκαφής για κάθε χάραξη.

Στην επέκταση «Άγιος Δημήτριος-Ελληνικό» η έντονη παρουσία κερματισμένων γεωυλικών και η συχνή μεταβολή της ποιότητας τους οδήγησε στην ανάγκη υποστήριξης του μετώπου με την εφαρμογή μηχανήματος που διαθέτει ασπίδα. Η επιλογή TBM ενεργητικής υποστήριξης του μετώπου, έναντι TBM παθητικής υποστήριξης βασίστηκε στο γεγονός ότι τα TBM του δεύτερου τύπου δεν ήταν ικανά να ασκήσουν την απαραίτητη πίεση σε εδαφικά υλικά, συμπαγή ή μη με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι πιθανότητες υπερεκσκαφών και καθιζήσεων. Σε αντίθεση με τα TBM ενεργητικής υποστήριξης που έχουν την δυνατότητα να ασκούν ελεγχόμενη πίεση στο μέτωπο. Επιλέχθηκε ο τύπος μηχανήματος εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης (EPB), διότι έχει την δυνατότητα να εναλλάσσει την λειτουργία του ανάλογα με την ποιότητα του γεωυλικού, σε πληρωμένο, μερικώς πληρωμένο και κενό θάλαμο εκσκαφής, ενώ η παρουσία λεπτόκοκκων υλικών μικρής διαπερατότητας το κατέστησε προτιμότερο από το TBM πολφού (Slurry).

Η επέκταση «Χαϊδάρι-Ευαγγελίστρια» υλοποιείται σε ένα περιβάλλον μικτών συνθηκών με ζώνες αποδομημένων και ασθενών υλικών να ακολουθούνται από ζώνες ισχυρών υλικών. Παρατηρείται ένα ποσοστό σχηματισμών με δυνατή την εφαρμογή TBM χωρίς ασπίδα (Gripper), το οποίο είναι πολύ μικρότερο σε σχέση με το ποσοστό των σχηματισμών που χρήζουν υποστήριξης μετώπου. Η επιλογή της ενεργητικής υποστήριξης του μετώπου έναντι της παθητικής βασίστηκε στο γεγονός ότι τα ασθενή και μικτά υλικά καλύπτουν ένα μεγάλο μέρος της διατομής και η εφαρμογή ενός τέτοιο TBM θα μπορούσε να μειώσει τις πιθανότητες καθιζήσεων στο μέτωπο και την επιφάνεια της σήραγγας.

Το διάγραμμα το οποίο προέκυψε από αυτή την διαδικασία έχει τίτλο «Συμπεριφορά σηράγγων έναντι μηχανοποιημένης όρυξης», Βασίστηκε στο σύνολο των δυνητικών αστοχιών που προβλέφθηκαν κατά μήκος των δύο επεκτάσεων των Αθηνών, αλλά και των επιπλέον περιπτώσεων μηχανοποιημένων ορύξεων που προήλθαν από βιβλιογραφικές πηγές.. Στις περιπτώσεις της Αθήνας οι αστοχίες που εντοπίστηκαν αφορούσαν μικρά υπερκείμενα, αφού αναφέρονται σε βάθη 10-20m, ενώ για περιπτώσεις υψηλότερων υπερκείμενων χρησιμοποιήθηκαν οι σήραγγες που μελετήθηκαν βιβλιογραφικά.

Σύμφωνα με αυτό, προκύπτει ότι σε πιο ευσταθείς και ελαφρώς κερματισμένες βραχόμαζες υψηλότερων αντοχών (2,4), ενδείκνυνται μηχανήματα χωρίς ασπίδα (Gripper), ενώ σε αντίστοιχους σχηματισμούς χαμηλότερων αντοχών (1,3) προτείνονται TBM με παθητική υποστήριξη του μετώπου (Single Shield, Double Shield) και μπορεί πέρα από ευσταθή εδάφη (3) να παρατηρηθούν και φαινόμενα μικρών έως μέτριων παραμορφώσεων με την εκδήλωση διατμητικών αστοχιών (3). Αξίζει να σημειωθεί ωστόσο ότι σε όλες αυτές τις περιπτώσεις είναι δυνατή η εφαρμογή TBM ασπίδας ανοιχτού μετώπου (OFS). Σε περιπτώσεις μέτρια κερματισμένων βραχομαζών, όπου παρατηρούνται φαινόμενα σφηνοειδών καταπτώσεων και μικρών-μέτριων παραμορφώσεων με εκδήλωση διατμητικών αστοχιών (5,6,7) ο καταλληλότερος τρόπος διάνοιξης είναι με TBM παθητικής υποστήριξης στο μέτωπο, με την περίπτωση των υψηλών υπερκείμενων και υψηλών αντοχών να παρουσιάζει ευστάθεια ή αστοχία σφηνοειδούς ολίσθησης (8) και να θεωρείται ικανή να αντιμετωπιστεί και με μηχάνημα χωρίς ασπίδα. Στις περιπτώσεις πολύ κερματισμένων βραχομαζών παρατηρούνται φαινόμενα σφηνοειδών ολισθήσεων, καταπτώσεων τύπου καμινάδας και διατμητικών αστοχιών (9,10,11,12) και ενδείκνυνται η διάνοιξη με μηχάνημα παθητικής υποστήριξης μετώπου. Ωστόσο εάν η βραχόμαζα παρατηρείται πιο εδαφοποιημένη, και το καθεστώς του υπόγειου νερού κατέχει ιδιαίτερο ρόλο στην εκσκαφή τότε είναι πιθανή η εφαρμογή ενός TBM με ενεργητική υποστήριξη στο μέτωπο. Για κερματισμένες, διαταραγμένες και στρωματώδεις βραχόμαζες που εντοπίζονται φαινόμενα καταπτώσεων τύπου καμινάδας, σφηνοειδών ολισθήσεων και μικρών έως σημαντικών παραμορφώσεων στην ζώνη περιμετρικά της σήραγγας (13,14,15,16) προτείνεται η εφαρμογή TBM με ενεργητική υποστήριξη στο μέτωπο. Οι αποδιοργανωμένες βραχόμαζες με αστοχίες μέτριων έως ισχυρών παραμορφώσεων, καταρροών γεωυλικού και καταπτώσεων τύπου καμινάδας(17,18,19,20) μπορούν να αντιμετωπιστούν καλύτερα υπό την λειτουργία ενός μηχανήματος TBM με ενεργητική υποστήριξη στο μέτωπο, με τις περιπτώσεις (18,20) να προτείνουν ακόμη πιο συγκεκριμένα τον τύπο του TBM πολφού, αφού αστοχίες τέτοιας μορφής εντοπίζονται συνήθως σε πιο αδρόκοκκα υλικά μεγαλύτερης διαπερατότητας. Τέλος για φυλλώδεις και διατμημένες βραχόμαζες, στις οποίες παρατηρούνται φαινόμενα μικρών έως μεγάλων παραμορφώσεων και καταπτώσεων τύπου καμινάδας προτείνονται μηχανήματα εκσκαφής με ενεργητική υποστήριξη του μετώπου και συγκεκριμένα μηχανήματα εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης, δεδομένου ότι παρατηρούνται συνήθως σε πιο λεπτόκοκκους και αδιαπέρατους σχηματισμούς.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακες τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς των σχηματισμών των γεωτρήσεων κατά μήκος της χάραξης «Άγιος Δημήτριος-Ελληνικό»

ΓΕΩΤΡΗΣΗ		ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΥΨΟΣ ΥΠΕΡΚΕΙΜΕΝΩΝ (m)	ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ				σci (MPa)	ΑΣΤΟΧΙΑ	ΤΥΠΟΣ TBM
				ΒΑΘΜΟΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ	GSI					
					ΔΟΜΗ	ΑΣΥΝΕΧΕΙΑ	ΔΕΙΚΤΗΣ			
ΝΕΟΓΕΝΕΙΣ ΑΠΟΘΕΣΕΙΣ	**HP3263**	ΨΑΜΜΙΤΗΣ καστανού χρώματος που στο βάθος μετατρέπεται σε ΚΡΟΚΑΛΟΠΑΓΕΣ πολύμικτο, λεπτόκοκκο έως μεσόκοκκο με ιλυοαμμώδες συνδετικό υλικό	10-13	ΣΥΜΠ	-	-	-	-	Ch-Wg-Sh	AFS
	HP2220	Ασβεστιτικός ΑΡΕΝΙΤΗΣ-Ασβεστιτικός ΡΟΥΔΙΤΗΣ	10-13	ΣΥΜΠ	-	-	-	-	Ch-Wh-Sh	AFS
	HP2221	ΑΡΓΙΛΟΛΙΘΟΣ, ελαφρώς χαλικώδης (11.50-12.50 m) και αμμώδης (12.50-15.70 m)	10-13	ΣΥΝ	-	-	-	-	Ch-Wg-Sh	AFS
	HP3264	Χαλικώδης ΑΡΓΙΛΟΣ με άμμο και με ενστρώσεις ΨΑΜΜΙΤΗ και κροκαλοπαγούς	11-14	ΣΥΝ	-	-	-	-	Ch	AFS
	HP2222	ΚΡΟΚΑΛΟΠΑΓΕΣ, αμμώδες και κερματισμένο και εναλλαγές ΨΑΜΜΙΤΗ-ΑΡΓΙΛΟΛΙΘΟΥ	12-15	ΣΥΝ	-	-	-	-	Ch-Wg-Sh	AFS
	HP2223	ΚΡΟΚΑΛΟΠΑΓΕΣ, κατακερματισμένο -ΨΑΜΜΙΤΗΣ χαμηλής αντοχής-Μαργ.ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ	13-15.90	ΣΥΝΧ	-	-	-	-	Wg-Ch	Single Shield (Small Cutterhead Openings) - AFS
	HP3265	ΚΡΟΚΑΛΟΠΑΓΕΣ πολύμικτο, μεσόκοκκο, μέτρια κερματισμένο, συνδετικό υλικό ψαμμιτικό, χαλίκια και κροκάλες ασβεστολιθικά, με ζώνες ΨΑΜΜΙΤΗ.	13-16	ΣΥΜΠ	-	-	-	-	Wg-Ch	Single Shield (Small Cutterhead Openings) - AFS
	HP1101	ΑΡΓΙΛΟΛΙΘΟΣ αμμώδης, ΚΡΟΚΑΛΟΠΑΓΕΣ αμμώδες και ΨΑΜΜΙΤΗΣ λεπτόκοκκος,	18-21	ΣΥΝ	-	-	-	-	Ch	Single Shield (Small Cutterhead

	ασθενούς-μέτριας αντοχής								Openings) - AFS
HP2225	ΚΡΟΚΑΛΟΠΑΓΕΣ,εμφανίζεται μη συγκολλημένο σε βάθη (14.50-14.70, 15.10-15.30)	13-15.30	ΣΥΝΧ	-	-	-	-	Rv	AFS
HP3266	ΑΡΓΙΛΟΛΙΘΟΣ αποσυντίθεται σε ισχνή ΑΡΓΙΛΟ με χαλίκια, μέσης πλαστικότητας που μετατρέπεται σε αδρόκοκκο ΨΑΜΜΙΤΗ	15-18	ΣΥΝ	-	-	-	-	Ch	AFS
HP1102	ΑΡΓΙΛΟΛΙΘΟΣ, αμμώδης, ελαφρώς χαλικώδης και ΨΑΜΜΙΤΗΣ ασβεστιτικός. λεπτόκοκκος	16-19	ΣΥΝ	-	-	-	-	St	Single Shield - AFS
HH2226	ΑΡΓΙΛΟΛΙΘΟΣ και ΚΡΟΚΑΛΟΠΑΓΕΣ αμμώδες, ιλυώδες	13-15.50	ΣΥΝ	-	-	-	-	St	Single Shield - AFS
HH2227	ΑΡΓΙΛΟΛΙΘΟΣσε εναλλαγές με ασβεστιτκό ΚΡΟΚΑΛΟΠΑΓΕΣ/ΨΑΜΜΙΤΗ μετρίως ισχυρής αντοχής	12-15.10	ΣΥΝ	-	-	-		Ch-Wg	AFS
HP1103	ΨΑΜΜΙΤΗΣ. Ιλυώδης, με ενστρώσεις γκρίζου ΑΡΓΙΛΟΛΙΘΟΥ	10-13	ΣΥΝ	-	-	-		Ch-Wg-Sh	AFS
HH2202	ΑΡΓΙΛΟΛΙΘΟΣ και ΨΑΜΜΙΤΗΣ	11-14	ΣΥΝΧ	-	-	-		Ch	AFS
HP3267	ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ, αμμώδης, με αραιές λεπτές ψαμμιτικές ενστρώσεις	13-16	ΣΥΝ	-	-	-		Ch-Sh	AFS
HH2228	ΑΡΓΙΛΟΛΙΘΟΣ με χαλίκια και λατύπες Μαργ.ασβεστολίθου και Κροκαλοπαγούς	13-15.10	ΣΥΝΧ	-	-	-		Ch-Sh	AFS
HP1104	ΑΡΓΙΛΟΛΙΘΟΣ, αμμώδης	12-15	ΣΥΝ	-	-	-	-	Ch	AFS
HP2252	ΚΡΟΚΑΛΟΠΑΓΕΣ, πολύμικτο	14-17	ΣΥΝ	-	-	-	-	Wg-Ch	Single Shield

		και ΑΡΓΙΛΟΛΙΘΟΣ αμμώδης, χαλικώδης								- AFS
	HH3268	ΨΑΜΜΙΤΗΣ και ισχνή ΑΡΓΙΛΟΣ με άμμο	13-16	ΣΥΝ	-	-	-	-	Ch	AFS
ΑΘΗΝΑΙΚΟΣ ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ	HP3269	Μαργ. ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ, μέτρια κερματισμένος, οξειδωμένος, με λεπτές εδαφικές ζώνες	16-19	-	BVB	FP	35-40	>15	Wg-Ch (10)	Single Shield
	HP1105	Μαργ. ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ ως μικτό βραχώδες υλικό που προσομοιάζει έδαφος	22-25	-	D	PVP	15-20	<15	Sh-Rv (17)	AFS
	HP2254	Μαργ.ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ, βράχος με λευκές φλέβες και εδαφικό υλικό που σε μεγαλύτερα βάθη παρουσιάζει φύλλωση (μεταβατικό στρώμα)	22-25	-	BDD	PVP	20-25	>15	Ch-Wg (14)	AFS
	HP3270	Μαρ. ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ έως ασβεστιτικός ΑΡΓΙΛΟΛΙΘΟΣ, έντονα κερματισμένος με εδαφικές ζώνες κατά τόπους	22-25	-	BD	PVP	20-25	<15	Ch-Wg-Sh (13)	AFS
	HP3271	Μαργ. ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ, κατακερματισμένος, έντονα εδαφοποιημένος έως Ασβεστιτικός ΑΡΓΙΛΟΛΙΘΟΣ	18-21	-	BVB	F	50-55	>15	Wg-Ch (10)	Single Shield
	HP1106	Μαργ. ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ ως μικτό βραχώδες και εδαφικό υλικό (19.00-19.70 m κερματισμένος βράχος ισχυρής αντοχής)	17-20	-	BD	FP	30-35	>15	Ch-Wg (14)	AFS
	HP1107	ΑΡΓΙΛΟΛΙΘΟΣ με παρουσία ΨΑΜΜΙΤΗ	15-18	-	BDD	P	20-25	<15	Ch-Wg-Sh (13)	AFS
	HP3272	Μαργ. ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ, έντονα κερματισμένος και εδαφοποιημένος σε μορφή υπολειμμάτων μέσα σε εδαφικό	17-20	-	DL	PVP	10-15	<15	Sh-Rv (17)	AFS
	HP1108	Μαργ. ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ, κατακερματισμένος, μέτρια-ισχυρά αποσαθρωμένος, ασθενούς αντοχής	16-19	-	DL	PVP	12-16	<15	Sh-Rv (17)	AFS
	HP2255	Ασβεστιτικός ΑΡΕΝΙΤΗΣ/Μαργ. ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ	17-20	-	BDD	P	20-25	>15	Ch-Wg (14)	AFS
	HP3273	Μαργ. ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ έως ΨΑΜΜΙΤΗΣ, έντονα κερματισμένος και εδαφοποιημένος	19-22	-	DL	PVP	13-16	<15	Sh-Rv (17)	AFS
	HP3274	Μαργ. ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ, οξειδωμένος, κερματισμένος έως έντονα κερματισμένος και εδαφοποιημένος	13-16	-	D	PVP	15-20	<15	Sh-Rv (17)	AFS
	HP1109	ΜΕΤΑΙΛΥΟΛΙΘΟΣ (Φυλλίτης) και ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗΣ σε εναλλαγές. Μικτό βραχώδες υλικό προσομοιάζον με έδαφος.	22-25	-	BDD	PVP	15-20	<15	Ch-Wg-Sh (13)	AFS
	HH3275	Μαργ. ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ, έντονα εδαφοποιημένος	18-21	-	D	PVP	15-20	<15	Sh-Rv (17)	AFS
	HH2211	Μαργ. ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ, κατακερματισμένος	13-15	-	BD	F	35-40	>15	Ch-Wg (14)	AFS
	HP3276	Διαταραγμένη ζώνη Μαργ. ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ-ΑΡΓΙΛΟΛΙΘΟΥ	14-17	-	D	P	17-20	<15	Sh-Rv (17)	AFS
	HH2238	Μαργ. ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ, μετρίως ισχυρής αντοχής ανακατεμένος με εδαφικό υλικό	13-14	-	D	P	19-25	<15	Sh-Rv (17)	AFS
	HH2239	Μαργ.ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ με βραχώδη θραύσματα ανακατωμένα με εδαφικό υλικό	14-15.50	-	D	PVP	14-18	<15	Sh-Rv (17)	AFS
	HP1110	Μαργ. ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ έντονα κερματισμένος	15-18	-	BDD	PVP	18-22	<15	Ch-Wg-Sh (13)	AFS
	HP1111	ΜΕΤΑΙΛΥΟΛΙΘΟΣ (φυλλίτης) και ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗΣ, έντονα	17-20	-	BDD	P	23-28	<15	Ch-Wg-Sh (13)	AFS

		αποσαθρωμένος								
	HP3277	Ζώνη διατάραξης ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗ, τοπικά αποσυντίθεται σε ιλυοαργιλώδη ΑΜΜΟ και εναλλαγές ΜΕΤΑΙΛΥΟΛΙΘΟΥ-ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗ έντονα σχιστοποιημένου.	18-21	-	DL	PVP	12-16	<15	Sh-Rv (17)	AFS
	HP3278	ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗΣ, έντονα κερματισμένος και εδαφοποιημένος με βραχώδη τμήματα.	17-20	-	BD	P	20-25	>15	Ch-Wg (14)	AFS
	HP1112	ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗΣ, ασβεστιτικός ως μικτό βραχώδες υλικό που προσομοιάζει έδαφος και ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗΣ-ΜΕΤΑΙΛΥΟΛΙΘΟΣ, κατακερματισμένος και ισχυρά αποσαθρωμένος-ασθενούς αντοχής	16-19	-	DL	PVP	12-16	<15	Sh-Rv (17)	AFS
	HP3279	ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗΣ, τοπικά λατυποπαγής, κερματισμένος και εδαφοποιημένος και εναλλαγές ΜΕΤΑΙΛΥΟΛΙΘΟΥ-ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗ, έντονα κερματισμένων και εδαφοποιημένων	18-21	-	DLS	PVP	15-18	<15	Sh-Rv (17)	AFS
	HP3280	ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗΣ, έντονα κερματισμένος-διατμημένος, έντονα εδαφοποιημένος, τοπικά με βραχώδη τμήματα και ΜΕΤΑΙΛΥΟΛΙΘΟΣ με αργιλικό ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟ έντονα	19-22	-	DL	PVP	15-18	<15	Sh-Rv (17)	AFS
		διαταραγμένους και αποσαθρωμένους.								
	HH1113	ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗΣ	18-21	-	DL	PVP	10-15	>15	Wg-Ch (10)	Single Shield (Small Cutterhead openings) - AFS
	HP3281	ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗΣ, έντονα κερματισμένος και αποσαθρωμένος	18-21	-	DL	PVP	15-18	>15	Wg-Ch (10)	Single Shield (Small Cutterhead openings) - AFS
	HP3282	ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗΣ, οξειδωμένος και κερματισμένος	17-20	-	DL	PVP	12-17	>15	Wg-Ch (10)	Single Shield (Small Cutterhead openings) - AFS
ΝΕΟΓΕΝΕΙΣ ΑΠΟΘΕΣΕΙΣ	**HH2249**	ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ/Ασβεστιτικός ΑΡΕΝΙΤΗΣ, κερματισμένος, καρστικοποιημένος και οξειδωμένος και τεμάχη ΚΡΟΚΑΛΟΠΑΓΟΥΣ.	15-18	ΣΥΜ					Rv	AFS
	HH2218	ΚΡΟΚΑΛΟΠΑΓΕΣ, αμμώδες με χαλίκια μεταψαμμιτη και ασβεστιτικό συνδετικό υλικό	13-15.90	ΣΥΝΧ					Rv	AFS
	HP3283	ΛΑΤΥΠΟΠΑΓΕΣ, συγκολλημένο, μέτρια κερματισμένο και αργιλώδης ΑΜΜΟΣ με χαλίκια	18-21	ΣΥΝΧ					Ch	AFS
		μεταψαμμίτη								
	HP1114	Αργιλώδης/Ιλυώδης ΑΜΜΟΣ με χαλίκια	17-20	ΣΥΝ					Ch	AFS
	HH2250	ΑΜΜΟΣ, ιλυώδης με χαλίκια μεταψαμμίτη	15-16.30	ΣΥΝ					Rv	AFS
	HH1115	Ιλυώδης ΑΜΜΟΣ και ΚΡΟΚΑΛΟΠΑΓΕΣ με ποικίλη αντοχή	17-20	ΣΥΝ					Ch	AFS
	HP3284	ΛΑΤΥΠΟΠΑΓΕΣ, ισχυρά έως μέτρια συγκολλημένο, μέτρια κερματισμένο, με ιλυοαμμώδες συγκολλητικό υλικό	16-19	ΣΥΝ					Wg-Ch	Single Shield (Small Cutterhead openings) - AFS
	CP1701	ΚΡΟΚΑΛΟΠΑΓΕΣ πολύ ασθενούς αντοχής	16-19	ΣΥΝ					Rv	AFS
	HP2257	ΛΑΤΥΠΟΠΑΓΕΣ, αμμώδες με γωνιώδη χαλίκια μεταψαμμίτη και συνδετικό υλικό άμμου και ΚΡΟΚΑΛΟΠΑΓΕΣ	17-20	ΣΥΝ					St	Single Shield - AFS

Πίνακες τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς των βασικών σχηματισμών των γεωτρήσεων κατά μήκος της χάραξης «Χαϊδάρι-Ευαγγελίστρια»

ΓΕΩΤΡΗΣΗ		ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΥΨΟΣ ΥΠΕΡΚΕΙΜΕΝΩΝ (m)	ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ				σci (MPa)	ΑΣΤΟΧΙΑ	ΤΥΠΟΣ TBM
				ΒΑΣΗ ΤΩΝ BS	GSI					
					ΔΟΜΗ	ΑΣΥΝΕΧΕΙΑ	ΔΕΙΚΤΗΣ			
ΑΘΗΝΑΙΚΟΣ ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ ΑΝΩΤΕΡΗ ΕΝΟΤΗΤΑ	BH3315	Μεταβατική ζώνη ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗ-ΑΡΓΙΛΙΚΟΥ ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΥ. Πολύ ασθενής αντοχή, πτυχωμένος και διατμημένος, μεσόκοκκος έως λεπτόκοκκος, μίγμα βράχου και εδάφους	20-23	-	D	PVP	14-25	<15	Sh-Rv (17)	AFS
ΑΘΗΝΑΙΚΟΣ ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ ΚΑΤΩΤΕΡΗ ΕΝΟΤΗΤΑ	BP3337	ΑΡΓΙΛΙΚΟΣ ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ έως ΜΕΤΑΙΛΥΟΛΙΘΟΣ, έντονα φολιωμένος με ολισθηρές επιφάνειες.	20-23	-	L	P	10-20	<15	Sh-Ch (21)	AFS (EPB)
	BH3332	ΑΡΓΙΛΙΚΟΣ ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ πτυχωμένος και διατμημένος με λείες επιφάνειες και γραμμές ολίσθησης και φλεβίδια χαλαζία. Κατά τόπους εμφανίζει ενστρώσεις Ασβεστιτικού ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗ. Μίγμα βράχου και εδάφους	21-24	-	DL	VP	14-16	<15	Sh-Ch (21)	AFS (EPB)
	BP3338	ΑΡΓΙΛΙΚΟΣ ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ, φολιωμένος με ολισθηρές επιφάνειες	25-28	-	L	PVP	10-20	<15	Sh-Ch (21)	AFS (EPB)
	BP3316	ΑΡΓΙΛΙΚΟΣ ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ, ασθενούς-πολύ ασθενούς αντοχής. Ασυνέχειες με ίχνη γράμμωσης και παρουσία Τάλκη	27-30	-	L	P	12-18	<15	Sh-Ch (21)	AFS (EPB)
	BP3339	ΑΡΓΙΛΙΚΟΣ ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ, με ενστρώσεις ταλκικού ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΥ, φολιωμένος με ολισθηρές επιφάνειες.	25-28	-	L	VP	10-20	<15	Sh-Ch (21)	AFS (EPB)
	BH3317	ΑΡΓΙΛΙΚΟΣ ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ, πτυχωμένος, έντονα διατμημένος με λείες επιφάνειες με γραμμές ολίσθησης, ασθενούς-πολύ ασθενούς αντοχής. Μίγμα βράχου και εδάφους.	25-28	-	L	PVP	10-17	<15	Sh-Ch (21)	AFS (EPB)
	BP3340	Εναλλαγές αργιλικού ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΥ φολιωμένου με ολισθηρές επιφάνειες και κερματισμένου έως λατυποποιημένου ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗ	25-28	-	BDD	P	18-28	<15	Ch-Wg-Sh (13)	AFS
	BH3318	ΑΡΓΙΛΙΚΟΣ ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ, πτυχωμένος και διατμημένος με λείες επιφάνειες με γραμμές ολίσθησης και φλέβες χαλαζία	24-27	-	L	VP	8-13	<15	Sh-Ch (21)	AFS (EPB)
	BP3341	ΜΕΤΑΙΛΥΟΛΙΘΟΣ έως αργιλικός ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ, φολιωμένος με ολισθηρές επιφάνειες	27-28.50	-	DL	P	17-25	<15	Sh-Ch (21)	AFS (EPB)
		Επιδοτιτικός-χλωριτικός ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ, μέτρια φολιωμένος, ελαφρά διακλασμένος	28.50-30	-	BVB	FP	35-45	<15	Wg-Ch-Sh (9)	Single Shield
	BP3319	ΑΡΓΙΛΙΚΟΣ ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ, έντονα κερματισμένος και διατμημένος με λείες επιφάνειες και γραμμές ολίσθησης.	25-28	-	L	VP	9-16	<15	Sh-Ch (21)	AFS (EPB)
	BH3320	Εναλλαγές ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗ-ΜΕΤΑΙΛΥΟΛΙΘΟΥ. Σχηματισμός τεκτονισμένος με μορφή τεκτονικού λατυποπαγούς. Ασθενούς έως μετρίως ασθενούς με επιφάνειες ασυνεχειών που φέρουν γραμμές ολίσθησης.	24-27	-	BDD	P	20-27	<15	Ch-Wg-Sh (13)	AFS
	BH3321	ΑΡΓΙΛΙΚΟΣ ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ, έντονα τεκτονισμένος και οξειδωμένος	20-23	-	D	VP	8-15	<15	Sh-Rv (17)	AFS
ΛΙΜΝΑΙΕΣ ΑΠΟΘΕΣΕΙΣ	BP3322	Εναλλαγές ασβεστιτικού ΑΡΓΙΛΟΛΙΘΟΥ (ΜΑΡΓΑΣ) ασθενούς αντοχής, με μαργαϊκό ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟ μετρίως ισχυρό και ελαφρώς κερματισμένο	15.5-16	ΑΣΘΕΝΗΣ	-	-	-	>15	Wg (6)	Single Shield - Gripper
ΛΙΜΝΑΙΕΣ ΑΠΟΘΕΣΕΙΣ		Ασβεστιτικός ΑΡΓΙΛΟΛΙΘΟΣ (ΜΑΡΓΑ) συμπαγής έως ελαφρώς κερματισμένος βράχος	16-18	ΜΕΤΡΙΩΣ ΑΣΘΕΝΗΣ	-	-	-	<15	Wg (5)	Single Shield
	BP3323	Ασβεστιτικός ΑΡΓΙΛΟΛΙΘΟΣ (ΜΑΡΓΑ) ασθενής, ελαφρώς κερματισμένη, με ενστρώσεις μαργαϊκού ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ μετρίως ισχυρού, κερματισμένου με οξειδώσεις	15-16.50	ΑΣΘΕΝΗΣ	-	-	-	<15	Wg (5)	Single Shield
		Μαργαϊκός ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ, ασθενώς κερματισμένος, μετρίως ισχυρός, μικρο-καρστικοποιημένος. Βράχος	16.50-18	ΜΕΤΡΙΩΣ ΙΣΧΥΡΟΣ	-	-	-	>15	Wg (6)	Single Shield - Gripper
	BP3331	Ασβεστιτικός ΑΡΓΙΛΟΛΙΘΟΣ (ΜΑΡΓΑ), ασθενώς – μετρίως κερματισμένος και οξειδωμένος στις επιφάνειες ασυνεχειών. Βράχος.	15-18	ΑΣΘΕΝΗΣ-ΜΕΤΡΙΩΣ ΑΣΘΕΝΗΣ	-	-	-	<15	Wg-Ch-Sh (9)	Single Shield

	BP3324	Ασβεστιτικός ΑΡΓΙΛΟΛΙΘΟΣ (ΜΑΡΓΑ) ασθενής, αμμώδης. Κερματισμένος-έντονα κερματισμένός	13-16	ΑΣΘΕΝΗΣ	-	-	-	<15	Wg-Ch-Sh (9)	Single Shield
	BP3325	Ασβεστιτικός ΑΡΓΙΛΟΛΙΘΟΣ (ΜΑΡΓΑ), αμμώδης, έντονα κερματισμένος-κατακερματισμένος, οξειδωμένος στις εσωτερικές επιφάνειες, τοπικά με ασβεστιτικές φλέβες. Μίγμα βράχου και εδάφους	10-11.5	ΑΣΘΕΝΗΣ	-	-	-	<15	Ch-Wg-Sh (13)	AFS
		Ασβεστιτικός ΑΡΓΙΛΟΛΙΘΟΣ (ΜΑΡΓΑ), αμμώδης, μετρίως ασθενής, με οξειδώσεις, μετρίως – έντονα κερματισμένος. Βράχος	11.5-13	ΜΕΤΡΙΩΣ ΑΣΘΕΝΗΣ	-	-	-	<15	Ch-Wg-Sh (13)	AFS
	BP3326	ΑΡΓΙΛΟΛΙΘΟΣ, αμμώδης,.	13-16	ΠΟΛΥ ΑΣΘΕΝΗΣ	-	-	-	<15	Wg-Ch-Sh (9)	Single Shield
	BH3327	Ασβεστιτικός ΑΡΓΙΛΟΛΙΘΟΣ (ΜΑΡΓΑ), αμμώδης, ασθενώς κερματισμένος με ενστρώσεις μαργαικού ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ. Βράχος έως μίγμα βράχους και εδάφους	16-17.40	ΑΣΘΕΝΗΣ	-	-	-	<15	Ch-Wg-Sh (13)	AFS
		ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗΣ, σχιστοποιημένος και οξειδωμένος, μετρίως κερματισμένος, με χαλαζιακές φλέβες	17.40-19	-	BD	F	34-38	<15	Ch-Wg-Sh (13)	AFS
	BP2401	Ασβεστιτικός ΑΡΓΙΛΟΛΙΘΟΣ, τεκτονισμένος (ζώνη διατάραξης)	20-21.10	ΜΕΤΡΙΩΣ ΑΣΘΕΝΗΣ	-	-	-	<15	Sh-Rv (17)	AFS
		ΑΡΓΙΛΙΚΟΣ ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ με χαλίκια και τεμάχη ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗ. Μίγμα βράχου και εδάφους	21.10-23	-	BDD	P	20-28	<15	Ch-Wg-Sh (13)	AFS
	BP2402	ΑΡΓΙΛΙΚΟΣ ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ, αμμώδης με ενστρώσεις ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗ	20-22	-	BDD	P	22-28	<15	Ch-Wg-Sh (13)	AFS
		ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗΣ, μετρίως κερματισμένος, ελαφρώς έως μέτρια αποσαθρωμένος. Βράχος	22-23	-	VBBD	FP	35-40	<15	Wg-Ch-Sh (9)	Single Shield (Small cutterhead openings) - AFS
	BP1301	Εναλλαγές Ασβεστιτικού ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗ και ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΥ τεκτονισμένου	20-23	-	BDD	PVP	18-22	<15	Ch-Wg-Sh (13)	AFS
	BP2403	ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗΣ με παρουσία ΜΕΤΑΙΛΥΟΛΙΘΟΥ τοπικά κερματισμένος-πολύ κερματισμένος και μερικώς αποσαθρωμένος. Βράχος	19-22	-	VBBD	F	38-42	<15	Ch-Wg-Sh (13)	AFS
	BP1302	Τεκτονισμένη ζώνη. Ασβεστιτικός ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗΣ, κερματισμενος με αποσαθρωμένο ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟ. Μίγμα βράχου-εδάφους	20-21.40	-	BDD	P	20-25	<15	Ch-Wg-Sh (13)	AFS
		Ασβεστιτικός ψαμμιτικός ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ, πτυχωμένος, κερματισμένος με φλέβες χαλαζίτη και σημάδια καρστικοποίησης. Βράχος	21.40-23	-	BD	FP	40-45	<15	Ch-Wg-Sh (13)	AFS
	BP2404	Ζώνη διάτμησης. ΑΜΜΟΣ με χάλικες. Μίγμα βράχου-εδάφους	20.30-21.30	-	VBBD	F	35-45	<15	Ch-Wg-Sh (13)	AFS
		Ασβεστιτικός ψαμμιτικός ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ, κερματισμένος και μέτρια αποσαθρωμένος. Βράχος	21.30-23	-						
	BP2405	Ασβεστιτικός ψαμμιτικός ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ	12-15	-	BDD	P	23-28	<15	Ch-Wg-Sh (13)	AFS
	BP1303	Ψαμμιτικός ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ, κερματισμένος και μετρίως αποσαθρωμένος. Βράχος	16-18	-	BD	F	35-45	<15	Ch-Wg-Sh (13)	AFS
		Τεκτονισμένη ζώνη. Τεμάχη κροκαλών ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗ. Μίγμα βράχου-εδάφους	18-19	-	BD	FP	28-32	<15	Ch-Wg-Sh (13)	AFS
	BP2406	Ασβεστιτικός ψαμμιτικός ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ, μετρίως κερματισμένος, ελαφρώς αποσαθρωμένος και οξειδωμένος. Βράχος	15-16.40	-	VB	F	37-47	<15	Wg-Ch-Sh (9)	Single Shield (Small Cutterhead Openings) - AFS
		Εναλλαγές ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗ και αργιλικού ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΥ, κερματισμένου.	16.40-18	-	DL	P	15-20	<15	Sh-Ch (21)	AFS (EPB)
	BP2407	Εναλλαγές ΜΕΤΑΨΑΜΜΙΤΗ με αργιλικό ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟ, κερματισμένο, οξειδωμένο και μετρίως-υψηλά αποσαθρωμένο. Μίγμα βράχου-εδάφους	13-16	-	BD	P	30-35	<15	Ch-Wg-Sh (13)	AFS
	BP1304	Αμμώδης ΙΛΥΣ έως Ιλυώδης ΑΜΜΟΣ με παρουσία ψαμμιτικού ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΥ	13-16	-	D	PVP	15-23	<15	Sh-Rv (17)	AFS
	BP2408	Ψαμμιτικός ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ, κερματισμένος, ελαφρώς-	13-16	-	BD	F	35-40	<15	Ch-Wg-Sh (13)	AFS

		Μεταλυολίθου και Χαλαζίτη								
	BP2416	ΜΕΤΑΙΛΥΟΛΙΘΟΣ, διαταραγμένος, με φυλλώδη δομή και ενστρώσεις κερματισμένο Μεταψαμμίτη. Μίγμα εδάφους και βράχου	15-18	-	BD	PVP	20-25	<15	Ch-Wg-Sh (13)	AFS
ΟΦΙΟΛΙΘΟΙ	**BH2451**	Σερπεντινιωμένος ΠΕΡΙΔΟΤΙΤΗΣ έως ΣΕΡΠΕΝΤΙΝΙΤΗΣ, μέτρια κερματισμένος και σχιστοποιημένος	15-18	-	BVB	G	55-65	<15	Wg-Ch-Sh (9)	Single Shield (Small Cutterhead openings) - AFS
	BP2417	Σερπεντινιωμένος ΠΕΡΙΔΟΤΙΤΗΣ έως ΣΕΡΠΕΝΤΙΝΙΤΗΣ, ελαφρώς αποσαθρωμένος, με πυκνό ιστό ασβεστιτικών φλεβιδίων, τοπικά φολιωμένος και διατμημένος σε ζώνες πάχους 5-20cm. ελαφρώς διακλασμένος	15-18	-	VBBD	F	40-45	<15	Wg-Ch-Sh (9)	Single Shield (Small Cutterhead openings) - AFS
	BP2418	ΣΕΡΠΕΝΤΙΝΙΩΜΕΝΟΣ ΠΕΡΙΔΟΤΙΤΗΣ έως ΣΕΡΠΕΝΤΙΝΙΤΗΣ ελαφρώς και τοπικά μετρίως αποσαθρωμένος, με πυκνό ιστό φλεβιδίων τυχαίως προσανατολισμένων(κυρίως ασβεστιτικών), ελαφρώς έως μερτίως διακλασμένος	16-18	-	VB	FP	40-45	<15	Wg-Ch-Sh (9)	Single Shield (Small Cutterhead openings) - AFS
			18-19	-	BD	F	30-35	<15	Ch-Wg-Sh (13)	AFS
	BH2452	ΜΕΤΑΙΛΥΟΛΙΘΟΣ, έντονα κερματισμένος έως θρυμματισμένος, οξειδωμένος. με εδαφικές ζώνες	16-19	-	BDD	P	20-25	<15	Sh-Rv (17)	AFS
		ΜΕΤΑΙΛΥΟΛΙΘΟΣ με ενστρώσεις Μεταψαμμίτη, έντονα σχιστοποιημένος και κερματισμένος	14.10-15						Ch-Wg-Sh (13)	AFS
ΟΦΙΟΛΙΘΟΙ	**BP2425**	Σερπεντινιωμένος ΠΕΡΙΔΟΤΙΤΗΣ έως ΣΕΡΠΕΝΤΙΝΙΤΗΣ. Μετρίως αποσαθρωμένος και κατά ζώνες εξαλλοιωμένος. Ισχυρά διατμημένος και φολιωμένος	12-15	-	BD	FP	28-32	<15	Ch-Wg-Sh (13)	AFS
	BP2426	Σερπεντινιωμένος ΠΕΡΙΔΟΤΙΤΗΣ έως ΣΕΡΠΕΝΤΙΝΗΣ. Ελαφρώς και τοπικά μετρίως αποσαθρωμένος, με πυκνό ιστό φλεβιδίων τυχαίως προσανατολισμένος (κυρίως ασβεστιτικών) ελαφρά έως μετρίως διακλασμένος	13-16	-	BVB	F	45-50	<15	Wg (5)	Single Shield - Gripper
	BP2453	Σερπεντινιωμένος ΠΕΡΙΔΟΤΙΤΗΣ έως ΣΕΡΠΕΝΤΙΝΙΤΗΣ. Με πυκνό ιστό φλεβιδίων(κυρίως ασβεστιτικών), σχιστοποιημένος, μέτρια κερματισμένος, με ζώνες κατακερματισμού-αποσάθρωσης στα βάθη 14.10-15.00, 16.70-17.00	14-17	-	VBBD	G	45-55	<15	Wg-Ch-Sh (9)	Single Shield (Small Cutterhead openings) - AFS
ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΙ ΚΑΡΑΒΑΣ	**BP2427**	Κρυσταλλικός ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ, υγιής έως ελαφρά αποσαθρωμένος, μεσοστρωματώδης και ελαφρά διακλασμένος, με επιφάνειες ασυνέγειας καρστικοποιημένες	15-18	-	VB	GF	48-52	>15	Wg-Ch (10)	Single Shield (Small Cutterhead Openings) -
		και πληρωμένες με ασβεστίτη, έντονα καρστικοποιημένος με συχνά καρστικά κενά μεγέθους 20-30εκ								AFS
ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΙ ΚΑΡΑΒΑΣ	**BP2428**	ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ κρυσταλλικός. Υγιής έως ελαφρά αποσαθρωμένος, μέσο-παχυστρωματώδης και ελαφρώς διακλασμένος έως κατά τόπους ακέραιος. Επιφάνειες ασυνέχειας τραχείες έως πολύ τραχείες πληρωμένες τοπικά με ασβεστίτη	18-21	-	IB	VGG	70-80	>15	St (2)	Gripper - Partial (up to~80 MPa)
	BP1311	ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ, κρυσταλλικός, υγιής έως ελαφρά αποσαθρωμένος. Μεσοστρωματώδης με αραιές διακλάσεις, οξειδωμένος στις επιφάνειες ασυνέχειας και με ασβεστιτικό υλικό πλήρωσης στις ασυνέχειες με λίγα ίχνη καρστικοποίησης κατά τόπους. Βραχώδες υλικό	13-16	-	BVB	G	55-60	>15	Wg (6)	Single Shield - Gripper
	BP2465	ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ, υγιής έως ελαφρά αποσαθρωμένος. Μέτρια ισχυρός έως ισχυρός μεσοστρωματώδης, ελαφρά διακλασμένος και πτυχωμένος, με ασβεστιτικές φλέβες, οξειδωμένος στις επιφάνειες ασυνέχειας	35-36.60	-	IB	VGG	70-80	>15	Wg (6)	Single Shield - Gripper
		ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ, υγιής έως ελαφρά αποσαθρωμένος. Μέτρια ισχυρός.	36.60-38	-	B	VGG	65-75	>15	Wg (6)	Single Shield -

		ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ, υγιής έως ελαφρά αποσαθρωμένος, μεσοστρωματώδης και ελαφρά διακλασμένος. Τοπικά λατυποπαγής σε ζώνες πάχους 2-3μ (16.50-17.20), οξειδωμένος στις επιφάνειες ασυνέχειας. Γενικώς μικρο-καρστικοποιημένος με διάσπαρτα καρστικά ίχνη, τοπικά πληρωμένα με ασβεστίτη							(10)	Shield (Small Cutterhead Openings) - AFS
ΜΑΡΓΑ ΠΕΙΡΑΙΑ	BH2455	ΛΑΤΥΠΟΠΑΓΕΣ έως ΨΗΦΙΔΟΠΑΓΕΣ, συνεκτικό και τοπικά σιμεντοποιημένο	15-18	ΣΥΝΕΚΤΙΚΟ	-	-	-	<15	Wg-Ch (9)	Single Shield (Small Cutterhead openings) - AFS
	BH2435	Μαργαϊκός ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ, έντονα κερματισμένος έως θρυμματισμένος	15-18	ΜΕΤΡΙΩΣ ΑΣΘΕΝΗΣ	-	-	-	<15	Ch-Wg-Sh (13)	AFS
ΜΑΡΓΑ ΠΕΙΡΑΙΑ	BP2436	Μαργαϊκός ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ, κερματισμένος έως κατακερματισμένος. Ελαφρά έως τοπικά μέτρια αποσαθρωμένος, οξειδωμένος στις επιφάνειες ασυνέχειας	15-18	ΜΕΤΡΙΩΣ ΙΣΧΥΡΟΣ-ΜΕΤΡΙΩΣ ΑΣΘΕΝΗΣ	-	-	-	<15	Wg-Ch (9)	Single Shield (Small Cutterhead openings) - AFS
	BP2437	Μαργαϊκός ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ, κερματισμένος έως έντονα κερματισμένος και τοπικά θρυμματισμένος, ελαφρά έως μέτρια αποσαθρωμένος.	15-18	ΜΕΤΡΙΩΣ ΙΣΧΥΡΟΣ-ΜΕΤΡΙΩΣ ΑΣΘΕΝΗΣ	-	-	-	<15	Wg-Ch (9)	Single Shield (Small Cutterhead openings) -

										AFS
	BP2449	Μαργαϊκός ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ, με ζώνες θρυμματισμού (16.30-16.80μ) και τοπικά θρυμματισμένος έως εδαφοποιημένος, ελαφρά έως μέτρια αποσαθρωμένος	16-19	ΜΕΤΡΙΩΣ ΑΣΘΕΝΗΣ	-	-	-	<15	Ch-Wg (13)	AFS
	BP1314	Μαργαϊκός ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ, κερματισμένος έως έντονα κερματισμένος, οξειδωμένος	17-20	ΜΕΤΡΙΩΣ ΑΣΘΕΝΗΣ	-	-	-	<15	Wg-Ch (9)	Single Shield (Small Cutterhead openings) - AFS
	BP2438	Μαργαϊκός ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ, λατυποπαγής, μέτρια κερματισμένος έως τοπικά κερματισμένος, ελαφρά αποσαθρωμένος, τοπικά με ίχνη καρστικοποίησης	20-23	ΜΕΤΡΙΩΣ ΙΣΧΥΡΟΣ-ΜΕΤΡΙΩΣ ΑΣΘΕΝΗΣ	-	-	-	<15	Wg-Ch (9)	Single Shield (Small Cutterhead openings) - AFS
	BP2439	ΨΑΜΜΙΤΗΣ, ελαφρά κερματισμένος	18-18.50	ΜΕΤΡΙΩΣ ΑΣΘΕΝΗΣ	-	-	-	<15	Wg (5)	Single Shield
		Μαργαϊκός ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ, κερματισμένος έως τοπικά έντονα κερματισμένος, ελαφρά έως μέτρια αποσαθρωμένος, οξειδωμένος στις επιφάνειες ασυνέχειας	18.50-21	ΜΕΤΡΙΩΣ ΑΣΘΕΝΗΣ-ΜΕΤΡΙΩΣ ΙΣΧΥΡΟΣ	-	-	-	>!5	Wg-Ch (9)	Single Shield (Small Cutterhead openings) - AFS
	BP2440	Ασβεστιτικός ΑΡΓΙΛΟΛΙΘΟΣ έως μαργαϊκός ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ, κερματισμένος έως έντονα κερματισμένος, οξειδωμένος,	17-20	ΜΕΤΡΙΩΣ ΑΣΘΕΝΗΣ-ΜΕΤΡΙΩΣ ΙΣΧΥΡΟΣ	-	-	-	<!5	Wg-Ch (9)	Single Shield (Small Cutterhead openings)

ΠΑΡΑΚΤΙΕΣ ΑΠΟΘΕΣΕΙΣ	BP2442	ΨΑΜΜΙΤΗΣ μέτρια κερματισμένος με ενστρώσεις άμμου κατά τόπους	14-17	ΑΣΘΕΝΗΣ	-	-	-	<15	Wg-Ch-Sh (9)	Single Shield (Small Cutterhead openings) - AFS
	BP1316	ΨΑΜΜΙΤΗΣ, ελαφρώς έως μέτρια διακλασμένος με μικρές ζώνες κερματισμού. Παρουσία απολιθωμάτων	14-17	ΠΟΛΥ ΑΣΘΕΝΗΣ	-	-	-	<15	Wg-Ch-Sh (9)	Single Shield (Small Cutterhead openings) - AFS
	BP2458	ΑΜΜΟΣ ιλυώδης πολύ πυκνή έως τοπικά συγκολλημένη με μορφή εύθρυπτου Ψαμμίτη	14-17	ΣΤΑΘΕΡΗ	-	-	-	-	Ch	AFS
	BR2462	ΑΜΜΟΣ, ιλυώδης, πολύ πυκνή έως τοπικά συγκολλημένη με μορφή εύθρυπτου Ψαμμίτη	14-17	ΠΟΛΥ ΠΥΚΝΗ	-	-	-	-	Ch	AFS
	BH2464	ΑΜΜΟΣ, ιλυώδης, πολύ πυκνή έως ελαφρά σιμεντωμένη σε εύθρυπτο ΨΑΜΜΙΤΗ	14.60-15.20	ΣΤΑΘΕΡΗ	-	-	-	-	Ch	AFS
		ΨΑΜΜΙΤΗΣ, αδρόκοκκος, ιλυώδης, σιμεντωμένος με απολιθώματα	15.20-17	ΑΣΘΕΝΗΣ	-	-	-	<15	Sh-Rv (17)	AFS
	BP2457	ΨΑΜΜΙΤΗΣ, αδρόκοκκος ιλυώδης σιμεντωμένος με απολιθώματα	14-60-15.20	ΑΣΘΕΝΗΣ	-	-	-	<15	Sh-Rv (17)	AFS
		ΑΜΜΟΣ ιλυώδης με χαλίκια, πολύ πυκνή έως ελαφρά σιμεντωμένη σε εύθρυπτο ΨΑΜΜΙΤΗ	15.20-17	ΣΤΑΘΕΡΗ	-	-	-	-	Ch	AFS

											AFS
	BP2467	Ασβεστιτικός ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ έως μαργαϊκός ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ, μέτρια κερματισμένος. Στο βάθος 15.50-15.60μ κροκαλοπαγές	15-15.90	ΜΕΤΡΙΩΣ ΑΣΘΕΝΗΣ	-	-	-	<15	Wg-Ch-Sh (9)	Single Shield (Small Cutterhead openings) - AFS
		ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ, αμμώδης, ελαφρά έως μέτρια κερματισμένος	15.90-18	ΜΕΤΡΙΩΣ ΙΣΧΥΡΟΣ-ΜΕΤΡΙΩΣ ΑΣΘΕΝΗΣ	-	-	-	<15	Wg-Ch-Sh (9)	Single Shield (Small Cutterhead openings) - AFS
	BP1319	Μαργαϊκός ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ έως ΨΑΜΜΙΤΗΣ, μέτρια κερματισμένος, ελαφρά αποσαθρωμένος	15-18	ΑΣΘΕΝΗΣ-ΜΕΤΡΙΩΣ ΙΣΧΥΡΟΣ	-	-	-	<15	Wg-Ch-Sh (9)	Single Shield (Small Cutterhead openings) - AFS
	BP2468	Ασβεστιτικός ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ, μέτρια κερματισμένος	16-17.40	ΜΕΤΡΙΩΣ ΙΣΧΥΡΟΣ	-	-	-	<15	Wg-Ch-Sh (9)	Single Shield (Small Cutterhead openings) - AFS
		ΨΗΦΙΔΟΠΑΓΕΣ έως ΚΡΟΚΑΛΟΠΑΓΕΣ, πολύμικτο, μέτρια έως ισχυρά συγκολλημένο	17.40-18.60	ΜΕΤΡΙΩΣ ΑΣΘΕΝΗΣ-ΜΕΤΡΙΩΣ ΙΣΧΥΡΟς	-	-	-	<15	Wg-Ch-Sh (9)	Single Shield (Small Cutterhead openings) -
	BP2489	ΑΡΓΙΛΟΛΙΘΟΣ, μέτρια κερματισμένος έως κερματισμένος	9-12	ΠΟΛΥ ΑΣΘΕΝΗΣ-ΑΣΘΕΝΗΣ	-	-	-	<15	Wg-Ch-Sh (9)	Single Shield (Small Cutterhead openings) - AFS
ΕΛΩΔΕΙΣ ΑΠΟΘΕΣΕΙΣ	BP2491	ΑΜΜΟΣ, κακής διαβάθμισης, υδαρή με παρουσία απολιθωμάτων	10-10.50	ΧΑΛΑΡΗ	-	-	-		Rv	AFS
		Ισχνή ΑΡΓΙΛΟΣ	10.50-13	ΧΑΛΑΡΗ	-	-	-		Rv	AFS

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική

- Αικατερίνη Δ., 2015. Αξιολόγηση ακουστικών εκπομπών κατά την δοκιμή Βραζιλιανού δίσκου με εγκοπή «chevron» σε δοκίμια μαρμάρου, *Μεταπτυχιακή Διπλωματική Διατριβή, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης*
- Γιαλύτη Ε., 2016. Εφαρμογή και σύγκριση μοντέλων πρόγνωσης ρυθμού προχώρησης ανιούσας σήραγγας σε ετερογενείς βραχόμαζες με TBM διπλής ασπίδας, *Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία,, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά*
- Θεοφανοπούλου Α., 2012. Συσχέτιση χαρακτηριστικών βραχομάζας σε επιφανειακές και υπόγειες ανατινάξεις, *Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων*, Χανιά
- Κούκης Γ., Σαμπατακάκης Ν., 2007. Γεωλογία Τεχνικών Έργων
- Κούρτης Μ., 2013. Διερεύνηση της συσχέτισης των ακουστικών εκπομπών με φόρτιση και αστοχία ψαθυρών πετρωμάτων, *Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης*
- Λουπασάκης Κ., Σημειώσεις «Τεχνική γεωλογία Ι», *Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας - Υδρογεωλογίας Ε.Μ.Π*
- Λουπασάκης Κ., Σημειώσεις «Τεχνική γεωλογία ΙΙ», *Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας - Υδρογεωλογίας Ε.Μ.Π*
- Μάρης Φ.Π., Σημειώσεις «Τεχνική Υδρολογία», *Εργαστήριο Διευθέτησης Ορεινών Υδάτων και Διαχείρισης Κινδύνου, Τμήμα Δασολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος και Φυσικών Πόρων Δ.Π.Θ*
- Μαρίνος Π.Γ., 2005. Σχολιασμός επί των υπεδαφικών συνθηκών σε σχέση με διάφορες μεθόδους μηχανικής διάνοιξης σηράγγων-Νέα σχεδιαζόμενη επέκταση μετρό Αθηνών «Άγιος Δημήτριος-Ελληνικό», *Τεχνική Έκθεση Εμπειρογνωμοσίας, Αττικό Μετρό Α.Ε*
- Μαρίνος Β., 2010.. Η Τεχνικογεωλογική Συμπεριφορά των Βραχομαζών κατά τη Διάνοιξη Σηράγγων. Η Σημασία στον Σχεδιασμό των Μέτρων Υποστήριξης, *6ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, 29/09 – 1/10 2010, Βόλος*
- Μαρίνος Β., Μαρίνος Π., Hoek.E., 2004. Γεωλογικής Δείκτης Αντοχής GSI Εφαρμογή, συστάσεις, περιορισμοί και πεδία μεταβολών ανάλογα με τον τύπο του πετρώματος, *Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας τομ. XXXVI, 2004, Πρακτικά 10ου Διεθνούς Συνεδρίου, Θεσ/νίκη Απρίλιος 2004*
- Μαρίνος Π.Γ., Σημειώσεις «Ειδικά Γεωτεχνικά Έργα», *Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας-Υδρογεωλογίας Ε.Μ.Π*

- Νομικός Π.Π., 2015. Εισαγωγή στη μηχανική των πετρωμάτων, Κεφάλαια 5,7,10., *Τμήμα μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών Ε.Μ.Π*
- Παπανακλή Σ.Θ., 2007. Προσδιορισμός μηχανικών πραμέτρων του βραχώδους υλικού και εφαρμογή αυτών στην εκτίμηση της αντοχής και παραμορφωσιμότητας της βραχομάζας, *Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας Πάτρας*
- Ρόζος Δ., Σημειώσεις «Τεχνική Γεωλογία Ι», *Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας –Υδρογεωλογίας Ε.Μ.Π*

<u>Διεθνής</u>

- Ates U., 2013. A comparative study on the relationships between design parameters of TBMs with two current examples of large section TBMs, *Master of Science dissertation, Instanbul Technical University*
- Barla G., Barla M., 1999. Continuum and discontinuum modelling in tunnel engineering, *International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering, 9th ISRM Congress, 25-28 August, Paris, France*
- Barla G., Pelizza S., 2000. TBM tunnelling in difficult ground conditions *Geoeng. Melbourne, Australia*
- Barton N., 2000. TBM tunneling in jointed and faulted rock, *Second Edition, A.A. Balkema, Rotterdam*
- Barton N.R, 2006. TBM tunnelling in sheared and fractured rock and the application of Q TBM model concepts, *Oslo*
- Barton N.R., 2018. TBM Tunnelling under Difficult Conditions: Too Massive, Too Faulted, Too Wet, Too Deep, *Conference: TUNIROCK 2018. Proc. of First International Conference on Advances in Rock Mechanics, Tunisia*
- Barton N.R., Choubey V., 1977. The shear strength of rock joints in theory and practice, *Rock Mechanics and Rock Engineering 10 (1):1-54*
- Bayati M., Hamidi J.K., 2016. A case study on TBM tunneling in fault zones and lessons learned from ground improvement, Elvesier, *Tunnelling and Underground Technology 63 (2017), pp.162-170*
- Bell F.G., 2007. Engineering Geology, Second Edition, *Butterworths*
- Benardos A.G., Kaliampakos D.C., 2004. A methodology for assessing geotechnical hazards for TBM tunnelling—illustrated by the Athens Metro, *Greece, Elvesier, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 41 (2004), pp. 87–999*
- Bilgin N., 2016. An appraisal of TBM performances in Turkey in difficult ground conditions and some recommendations, Elvesier, *Tunnelling and Underground Space Technology 57 (2016), pp. 265–27*

- Bilgin N., Copur H., Balci C., 2016. TBM Excavation in Difficult Ground Conditions: Case Studies from Turkey, *Wiley, Ernst & Son*
- Çığla M., Yagiz S., Ozdemir L., 2001. Application of Tunnel Boring Machines in Underground Mine Development, *Conference: 17th International Mining Congress & Exhibition of Turkey Volume: 1; 155-164*
- Clark J., 2015. Extreme Excavation in Fault Zones and Squeezing Ground at the Kargi HEPP in Turkey, *ITAWTC 2015 Congress and 41st General Assembly, May 22-28, 2015, Croatia*
- Clark J., Chorley S., 2014. The Greatest Challenges in TBM Tunneling: Experiences from the Field, *North American Tunneling Conference (2014)*
- Connors R.., 2017. The challenges of tunnelling with slurry shield machines in mixed ground, *The David Sugden Young Engineers Writing Award 2017*
- Deere D.U.., Miller R.P., 1966 "Engineering Classification and Index Properties for Intact Rock, *Report AFWL-TR-65-116. Air Force Weapons Laboratory (WLDC). Kirtland Air Force Base. New Mexico 87117.*
- Deere, D.U., Hendron, A.J., Patton, F.D., Cording, E.J., 1967. "Design of Surface and Near Surface Constructions in Rock", *In C. Fairhurst (ed.), Proc. 8th U.S. Symp. Rock Mechanics of AIME, New York, pp. 237 – 302*
- Deere, D.U., Miller, R.P., 1966. Engineering classification and index properties for intact rock. *Tech. Rep. No. AFWL-TR-65-116, Air Force Weapons Lab, Kirtland Air Force Base, Albuquerque, NM.*
- Filbà M., Salvany M.J., Jubany J., 2010. Tunnel boring machine collision with an ancient boulder beach during the excavation of the Barcelona city subway L10 line: A case of adverse geology and resulting engineering solutions, Elvesier, *Engineering Geology 200 (2016), pp. 31-46*
- Goel R.K., 2016. Experiences and lessons from the use of TBM in the Himalaya- A review, Elvesier, *Tunnelling and Underground Technology 57 (2016), pp. 277-283*
- Gong Q, Yin L., Ma H., Zhao J., 2016. TBM tunneling under adverse geological conditions: An overview, Elvesier, *Tunnelling and Underground Space Technology 57 (2016), pp. 4-17*
- Gong Q.M., Yin L.J., She Q.R., 2013. TBM tunneling in marble rock masses with high in situ stress and large groundwater inflow: a case study in China, *Bull.Eng. Geol. Environ. 72 (2013), pp. 163–172, Springer*
- Goodman, R.E. (1989) Introduction to Rock Mechanics. *2nd Edition, John Wiley & Sons Ltd., New York.*
- Gutter W., Rudigier G., 2016. Tunneling in Crete: A challenging task from variety of aspect, *Geomechanics and Tunnelling Volume 9, Issue 6*
- Haas C., 2000. Updating in the "Decision Aids for Tunneling, Master of Science thesis in Civil and Environmental Engineering, *Massachusetts Institute of Technology*
- Hassanpour J., Ghaedi Vanani A.A., Rostami J., Cheshomi A., 2016. Evaluation of common TBM performance prediction models based on field

data from the second lot of Zagros water conveyance tunnel(ZWCT2), Elvesier, *Tunnelling and Underground Space Technology 52 (2016), pp. 147–156*

- Hoek 8., Wood D., Shatt S., 1992. "A modified Hoek-Brown failure criterionfor jointed rock masses." *Proc. Int. Conf. Eurock '92, Chester, England, pp.209-214*
- Hoek E., Brown E.T., 1988. The Hoek-Brown Failure Criterion - a 1988 Update
- Hoek, E., 1994. Strength of rock and rock masses, *ISRM News Journal, 2/2, pp. 4–16*
- Home L., 2016. Hard rock TBM tunneling in challenging ground: Developments and lessons learned from the field, *Tunnelling and Underground Space Technology 57 (2016), pp. 27–32. Elvesier*
- Innaurato N. Oggeri C., Oreste P.P., Vinai R., 2006. Experimental and Numerical Studies on Rock Breaking with TBM Tools under High Stress Confinement, *Rock Mechanics and Rock Engineering (2007) 40, pp 429–451*
- Kui C.,Huanhuan F., 2013. Risks of TBM Construction and Corresponding Measures, *Applied Mechanics and Materials Vols. 353-356 (2013), pp. 1370-1378*
- Liu Q., Huan X., Gong Q., Liu J., 2016. Application and development of hard rock TBM and its prospect in China, *Elvesier, Tunnelling and Underground Space Technology 57 (2016), pp. 33–46*
- Marinos P.G., 2006. Evaluation of the geological, hydrogeological and engineering geological conditions. Elaboration of ground conditions with respect to the proposed mechanised tunnelling methods-Western extension of Line 3 of the Athens Metro ‘HAIDARI – EVANGELISTRIA, *Attiko Metro S.A.*
- Marinos P.V., 2010. Geological Behaviour of Rock masses in Underground Excavations, *Bulletin of the Geological Society of Greece (2010), Proceedings of the 12th International Congress, Patras*
- Marinos V., 2012. Assessing Rock Mass Behaviour for Tunnelling, Environmental & Engineering Geoscience, *Vol. XVIII, No. 4, November 2012, pp. 327–341*
- Marinos V., 2014. Tunnel behaviour and support associated with the weak rock masses of flysch, *Elvesier, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 6 (2014), pp. 227-239*
- Marinos, P., Hoek E., 2000. GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation, *Proceedings of the GeoEng 2000 at the international conference on geotehnical and geological engineering, Melbourne, Technomic publishers, Lanchester, pp. 1422–1446.*
- Palmstrom A., Broch E., 2006. Use and misuse of rock mass classification systems with particular reference to the Q-system, *Tunnels and Underground Space Technology, vol. 21, pp. 575-593*

- Panthi K.K. , 2010. Appropriateness of open TBM tunnelling in the Himalaya – A case study, N*orwegian University of Science and Technology (NTNU), Norway*
- Path K.K., 2012. Evaluation of rock bursting phenomena in a tunnelinG the Himalayas, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Vol. 71, pp. 761–769*
- Sapigni M., Berti M., Bethaz E., Cardone G., 2002. TBM performance estimation using rock mass classifications, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 39 (2002), pp.771–788, Pergamon*
- Shahriar K., Sharifzadeh M., Hamidi J.F., 2007. Geotechnical risk assessment based approach for rock TBM selection in difficult ground conditions, *Elvesier, Tunnelling and Underground Space Technology 23 (2008), pp 318–32,*
- Vergara I.M.., Saroglou C., 2017. Prediction of TBM performance in mixed-face ground conditions, *Elvesier, Tunnelling and Underground Space Technology 69 (2017), pp. 116–124*
- Waltham T.. 2009. Foundations of Engineering Geology, *Third Edition, Spon Press, New Your & London*
- Zhao J., 2006. Tunnelling through a frequently changing and mixed ground: A case history in Singapore, Elvesier, *Tunnelling and Underground Space Technology 22 (2007), pp. 388–400*

Ιστοσελίδες

www.herrenknecht.com

www.railsystem.net.com