



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

**«ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ –  
ΑΝΑΤΙΝΑΞΗΣ ΚΑΙ ΟΛΟΜΕΤΩΠΗΣ ΚΟΠΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ  
ΟΡΥΞΗ ΣΤΟΑΣ»**

**ΣΟΥΒΑΤΖΗ ΓΕΩΡΓΙΑ**

**ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

**ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΕΞΑΔΑΚΤΥΛΟΣ**, Επιβλέπων καθηγητής

**ΜΙΧΑΛΗΣ ΓΑΛΕΤΑΚΗΣ**, Καθηγητής

**ΠΑΝΤΕΛΗΣ ΛΙΟΛΙΟΣ**, Μέλος ΕΔΠ

ΧΑΝΙΑ, 2020

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή την εργασία εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Συμβουλευτικής Επιτροπής .

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ – ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια της μεταπτυχιακής διατριβής του μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών «Γεωτεχνολογία και Περιβάλλον» της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης. Σκοπός της εργασίας είναι η σύγκριση της παραγωγικότητας και του κόστους των μεθόδων διάτρησης – ανατίναξης (D&B) καθώς και της μεθόδου ολομέτωπης κοπής (TBM).

Θα ήθελα λοιπόν να ευχαριστήσω όλους εκείνους που βοήθησαν στην πραγματοποίηση της.

Ευχαριστώ θερμά τον καθηγητή μου, κύριο Εξαδάκτυλο Γεώργιο, για την ανάθεση του θέματος, τη βοήθεια που μου προσέφερε, και την άριστη συνεργασία μας καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της μεταπτυχιακής μου διατριβής.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους κ. Λιόλιο Παντελή για τη καθοδήγηση καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας και τον κ. Γαλετάκη Μιχαήλ για τον χρόνο που διέθεσαν για τη διόρθωση και αξιολόγηση της εργασίας, καθώς και για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Καζάκο Λεωνίδα από την εταιρεία EXTRACO για τον χρόνο που αφιέρωσε και τις πολύτιμες συμβουλές που μου παρείχε κατά τη διάρκεια της μεταπτυχιακής μου διατριβής.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου για τη βοήθεια και την στήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι δύο επικρατούσες τεχνικές διάνοιξης σηράγγων και στοών σε σκληρά και ασυνεχή πετρώματα είναι είτε η τεχνική της σταδιακής εξόρυξης με προσωρινή υποστήριξη με τη χρήση Διάτρησης και Ανατίναξης (Δ-Α) είτε η τεχνική με απευθείας μόνιμη επένδυση με τη χρήση μηχανών ολομέτωπης κοπής (TBM, Tunnel Boring Machines). Η απόφαση επιλογής της μιας εκ των δύο ανωτέρω μεθόδων εξαρτάται από το εμβαδόν της διατομής της στοάς ή σήραγγας, το μήκος της, τον τύπο του πετρώματος, τη διαθεσιμότητα εξειδικευμένου προσωπικού και μηχανολογικού εξοπλισμού, το διαθέσιμο κεφάλαιο και τον χρονικό προγραμματισμό του υπό μελέτη έργου. Η τελική απόφαση επιλογής της μιας εκ των δύο τεχνικών στη φάση του σχεδιασμού του έργου είναι μια απαιτητική εργασία που απαιτεί την καλύτερη πρόβλεψη για το κόστος, το χρόνο περάτωσης του έργου και τους κινδύνους που σχετίζονται με το χρονικό προγραμματισμό, την υπέρβαση του κόστους και τη μηχανική συμπεριφορά της βραχομάζας. Στην παρούσα διατριβή γίνεται η σύγκριση της παραγωγικότητας (ρυθμού προχώρησης) και του κόστους των δύο αυτών τεχνικών όρυξης σηράγγων σε πραγματική περίπτωση εφαρμογής (case study) διάνοιξης συνδετήριας στοάς μήκους 6,7 km και διαμέτρου 5,7m των μεταλλείων της Ολυμπιάδας και του Μαδέμ Λάκκου στη Χαλκιδική. Σύμφωνα με την κατάταξη ποιότητας της βραχομάζας με το σύστημα Q για την συγκριτική μελέτη επιλέχθηκε μηχανήμα TBM ανοικτού τύπου με πέδιλα έδρασης. Κατόπιν σχεδιάσθηκε η κεφαλή του TBM σύμφωνα με τη διάμετρο της διατομής της στοάς και τα μηχανικά χαρακτηριστικά του πετρώματος. Η εναλλακτική τεχνική με Δ-Α σχεδιάσθηκε με κυλινδρική διάταξη διατρημάτων προεκσκαφής στο μέτωπο στοάς τετραγωνικής διατομής εμβαδού περίπου ίδιου με αυτό της περίπτωσης του TBM. Εκτιμήθηκαν τα κόστη και των δύο τεχνικών, ο μέσος ρυθμός προχώρησης και οι χρόνοι ολοκλήρωσης του υπόγειου έργου, καθώς και οι κίνδυνοι καθυστερήσεων σύμφωνα με τις υδρογεωλογικές και τεκτονικές συνθήκες του υπόγειου έργου. Από τη συγκριτική μελέτη προέκυψε με κριτήρια του κόστους και του χρόνου περάτωσης του έργου και του ρίσκου καθυστερήσεων ότι η τεχνική της Δ+Α είναι προτιμότερη από την εναλλακτική της ολομέτωπης κοπής

## ABSTRACT

Two possible alternative tunnel driving (or boring) techniques are the sequential excavation method with drilling and blasting (D+B) with temporary support (sometimes called New Austrian Tunnelling Method, NATM) or the mechanical method with a Tunnel Boring Machine (TBM) with simultaneous load-transport of excavated rock and installation of the support. The choice of the most effective technique for the rock excavation during driving of a drift or adit or a tunnel depends on many factors like the length and cross-sectional area of the tunnel or drive, rock mass conditions and water, the cost, the required time of completion of the drive, risk of delays etc. In the present thesis these two techniques are compared in an actual case study of a planned adit of a length of 6.7 km and diameter of 5.7m connecting the two underground mines of Olympias and Madem Lakkos in Chalkidiki (Northern Greece). Considering rock mass conditions an open-type hard rock TBM was first selected and its cutting-head equipped with disc-cutters was properly designed for the case study under consideration. The D+B technique was also designed based on rock mass quality and tunnel dimensions and shape with a drilling pattern having a cylinder cut with parallel drillholes around an empty or dummy drillhole. Based on the rock mass and tunnel design parameters of the two alternative methods we performed a cost and performance analysis and we predicted the time of completion of the tunnel. All calculations were performed in [Excel™](#) spreadsheets to facilitate transparent and quick computations of relevant quantities. From this comparative analysis it turned out that the D+B technique is the most time and cost effective and is characterized by the lowest risk of time delays due to its flexibility.

## Περιεχόμενα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
2. ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ .....	10
2.1. Λιθολογικά χαρακτηριστικά πετρώματος της περιοχής.....	11
2.2. Γεωτεχνική ταξινόμηση της βραχομάζας της περιοχής μελέτης.....	11
3. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΟΡΥΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ .....	17
3.1. Μέθοδος ολομέτωπης κοπής (TBM).....	18
3.1.1. Τρόπος λειτουργίας TBM.....	20
3.1.2. Μέθοδος πρόβλεψης απόδοσης και σχεδιασμού του TBM .....	26
3.2. Μέθοδος διάτρησης – ανατίναξης.....	31
3.2.1. Γενικά στοιχεία.....	31
3.2.2. Διατάξεις διατρημάτων .....	34
3.2.3. Μέθοδος υπολογισμού και σχεδίασης της διάτρησης – ανατίναξης.....	36
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	46
4.1. Αποτελέσματα σχεδίασης μηχανήματος ολομέτωπης κοπής (TBM) .....	47
4.2. Σχεδιασμός διάτρησης – ανατίναξης.....	55
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	71
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	73

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι στοές είναι αναγκαίες σε μεταλλευτικά έργα καθώς χρησιμεύουν είτε σαν υπόγεια έργα προσπέλασης μεταλλευτικών κοιτασμάτων και ως συνδετήριες στοές μεταξύ κύριων στοών ή φρεάτων ή κεκλιμένων προσπέλασης γειτονικών κοιτασμάτων ή μεταφοράς του μεταλλεύματος. Η κατασκευή των υπόγειων έργων προσπέλασης αποτελεί το πρώτο βασικό στάδιο για την έναρξη λειτουργίας ενός μεταλλείου, καθώς αυτά επιτρέπουν την προσέγγιση του κοιτάσματος, την μεταφορά προσωπικού στα μέτωπα, την μεταφορά του εξορυσσόμενου μεταλλεύματος και την ασφάλεια των υπόγειων εργασιών αν χρησιμοποιούνται ως δευτερεύοντα έργα εξόδου των εργαζομένων από τα υπόγεια στην περίπτωση που τεθεί εκτός λειτουργίας η κύρια στοά προσπέλασης. Η ολοκλήρωση αυτού του σταδίου σηματοδοτεί την έναρξη της επόμενης φάσης η οποία περιλαμβάνει τα έργα ανάπτυξης και την έναρξη της παραγωγής του μεταλλείου.

Η διάνοιξη των στοών μπορεί να διακριθεί στις παρακάτω κατηγορίες με βάση το μέγεθος της διατομής τους:

- στοές μικρού μεγέθους ( $<10 \text{ m}^2$ ),
- στοές μέσου μεγέθους (μεταξύ  $10$  και  $25 \text{ m}^2$ ),
- στοές μεγάλου μεγέθους ( $>25 \text{ m}^2$ )

Οι τελευταίες επιλέγονται στην περίπτωση όπου το μεταλλείο έχει μεγάλη ετήσια παραγωγή και διακινείται ογκώδης και «βαρύς» μηχανολογικός εξοπλισμός. Όσον αφορά το μήκος μιας σήραγγας αυτές διακρίνονται σε μικρού μήκους όταν το μήκος τους είναι μικρότερο του  $2\text{km}$  και μεγάλου μήκους όταν αυτό ξεπερνά τα  $2\text{km}$ .

Η όρυξη σηράγγων συνεισφέρει σε μεγάλο βαθμό και στην ανάπτυξη του οδικού δικτύου της χώρας με την κατασκευή οδικών σηράγγων. Οι δέκα από τις μεγαλύτερες οδικές σήραγγες της Ελλάδας παρουσιάζονται παρακάτω:

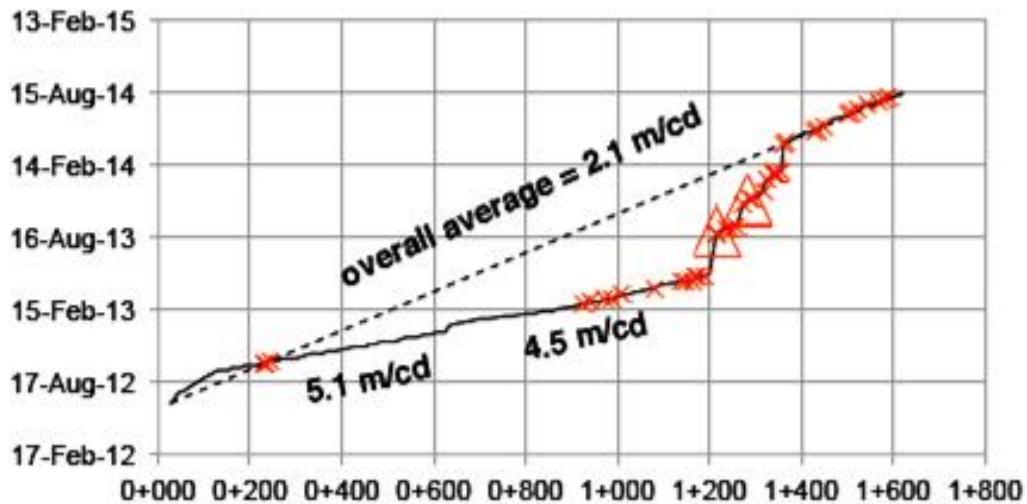
1. Σήραγγα Τεμπών (6 χιλιόμετρα μήκος – Αυτοκινητόδρομος Αιγαίου)
2. Σήραγγα Δρίσκου (4,6 χιλιόμετρα – Εγνατία Οδός)
3. Σήραγγα Παναγούλας (4 χιλιόμετρα – Ολυμπία Οδός)
4. Σήραγγα Μετσόβου (3,5 χιλιόμετρα – Εγνατία Οδός)
5. Σήραγγα Δωδώνης (3,36 χιλιόμετρα – Εγνατία Οδός)
6. Σήραγγα Κλόκοβας (3 χιλιόμετρα – Ιονία Οδός)

7. Σήραγγα Πλαταμώνα (3 χιλιόμετρα – Αυτοκινητόδρομος Αιγαίου)
8. Σήραγγα Δομοκού (3 χιλιόμετρα – Κεντρική Οδός Ε65, Μελλοντική σήραγγα)
9. Σήραγγα Αγίου Κωνσταντίνου (2,5 χιλιόμετρα – Νέα Οδός)
10. Σήραγγα Καστανιάς (2,22 χιλιόμετρα – Εγνατία Οδός)

Ο κατάλογος των υπόγειων έργων και σιηράγγων που η κατασκευή τους εξυπηρετεί την καθημερινή δραστηριότητα της κοινωνίας είναι μακρύς και με μέλλον. Αρκεί να αναφέρουμε επίσης τις σιδηροδρομικές σήραγγες, τις σήραγγες στα αστικά κέντρα και τις υδραυλικές σήραγγες μεταξύ άλλων (λ.χ. η κεκλιμένη σήραγγα του Αποσελέμη που ολοκληρώθηκε πρόσφατα στην Κρήτη).

Οι πλέον συχνές τεχνικές διάνοιξης στοών και σιηράγγων είναι η συμβατική μέθοδος της διάτρησης – ανατίναξης (Δ-Α) και οι μηχανικές μέθοδοι (mechanized techniques). Στις μηχανικές μεθόδους περιλαμβάνονται η μέθοδος ολομέτωπης κοπής (TBM), η μέθοδος σημειακής κοπής (Roadheaders) κ.ά. Στην συγκεκριμένη εργασία θα χρησιμοποιηθούν για τη σύγκριση σχεδιασμού μίας στοάς μεγάλου μήκους η μέθοδος ολομέτωπης κοπής (TBM) και η μέθοδος διάτρησης – ανατίναξης. Η σχεδιαζόμενη συνδετήρια στοά **συνολικού μήκους 6,7 km** θα συνενώνει το μεταλλείο της Ολυμπιάδας με αυτό του Μαντέμ-Λάκκου για την απελευθέρωση του εθνικού και επαρχιακού οδικού δικτύου από φορτηγά μεταφοράς μεταλλεύματος. Το έναυσμα για αυτή την μελέτη ήταν το μεγάλο κόστος της Δ-Α που είχε ήδη εκκινήσει πριν την χάραξη που μελετάμε εδώ των 6,7 km, και οι χαμηλές ημερήσιες προχωρήσεις της στοάς (περίπου 2,1 m/ημέρα, βλ. **Εικόνα 1.1.**) με την συμβατική αυτή τεχνική. Ο λόγος των μεγάλων προχωρήσεων και του υψηλού κόστους ήταν το πλημμελές σχέδιο ανατίναξης που προκαλούσε μεγάλο κόστος υποστήριξης με τσιμεντενέσεις, μεταλλικά πλέγματα, κοχλίες κλπ λόγω υπερεκσκαφών κατά την ανατίναξη της στοάς αλλά και την ανάγκη έμφραξης ρωγμών με τσιμεντενέσεις για την μείωση της εισροής υδάτων.





*Εικόνα 1.1.: Τιμμεντέσεις κατά μήκος της χιλιομετρικής θέσης (χ.θ.) της σήραγγας.  
Πηγή: Θεοδωρακόπουλος & Λεκίδης, 2017.*

Το μοναδιαίο κόστος της Δ-Α που κατεγράφετο κατά την όρυξη της στοάς έφτανε τα 1190 €/m συμπεριλαμβανομένης της αποκόμισης του θραυσμένου υλικού και των εργατικών από το μέτωπο. Αν θεωρήσουμε χονδρικά ότι το κόστος εργατικών αποτελεί το 30% της Δ-Α και της φόρτωσης-μεταφοράς (από ιστορικά στοιχεία) τότε το μοναδιαίο κόστος χωρίς τα εργατικά ανερχόταν στα 830 €/m (χονδροειδής υπολογισμός). Γι' αυτό και από την Εταιρεία Ελληνικός Χρυσός εξετάσθηκε τότε το εναλλακτικό σενάριο της μηχανικής όρυξης με TBM (Θεοδωρακόπουλος & Λεκίδης, 2017). Στην παρούσα μελέτη επανεξετάσθηκε το σχέδιο της ανατίναξης εφαρμόζοντας και την τεχνική των λείων τοιχωμάτων (smooth blasting) για την μείωση της θραύσης του πετρώματος περιφερειακά της στοάς. Αφού ολοκληρώθηκε ο σωστός σχεδιασμός της Δ-Α ήταν εφικτό η σύγκριση της με τη τεχνική TBM ως προς τον ρυθμό προχώρησης και το μοναδιαίο κόστος. Για το σκοπό αυτό μελετήθηκε και σχεδιάσθηκε το καταλληλότερο TBM από την αρχή σύμφωνα με τις επί τόπου γεωτεχνικές συνθήκες.

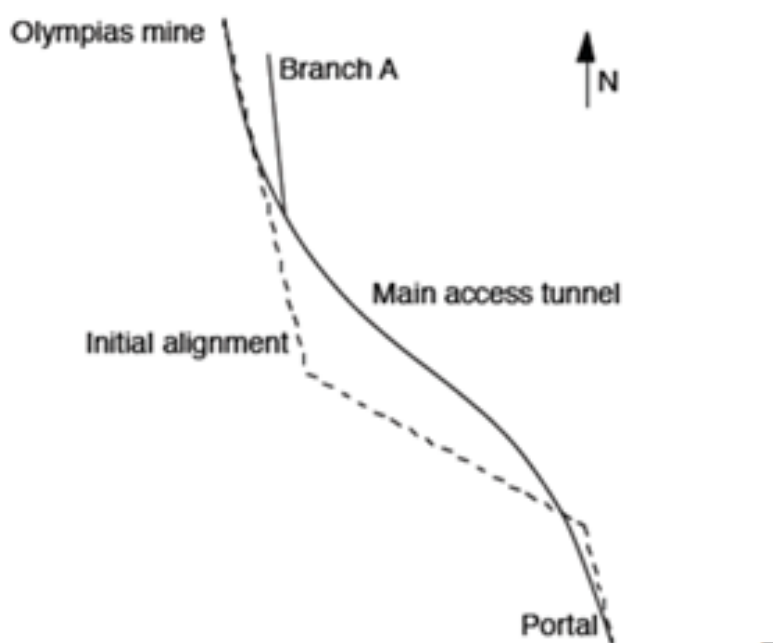
Στο επόμενο (2<sup>ο</sup>) κεφάλαιο αναλύεται η γεωλογία της περιοχής στην οποία πρόκειται να διανοιχθεί η στοά. Επίσης, γίνεται χαρακτηρισμός της βραχομάζας σύμφωνα με το σύστημα ταξινόμησης της βραχομάζας. Στο τρίτο (3<sup>ο</sup>) κεφάλαιο, γίνεται αναφορά στο θεωρητικό υπόβαθρο των δύο μεθόδων που έχουν χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία και

η σύγκριση αυτών. Στο τέταρτο (4<sup>ο</sup>) κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επεξεργασίας και τέλος τα συμπεράσματα αυτών.

## 2. ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ

Η περιοχή ενδιαφέροντος για την ενδεχόμενη κατασκευή κεκλιμένης συνδετήριας στοάς συνολικού μήκους 6,7 km για την οποία πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός της διάτρησης – ανατίναξης καθώς και ο προσδιορισμός των τεχνικών χαρακτηριστικών του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής (TBM) αφορά την περιοχή σύνδεσης των μεταλλείων της Ολυμπιάδας και του Μαδέμ-Λάκκου στην Χαλκιδική. Στην περιοχή έχει ήδη πραγματοποιηθεί οριζόντια προσανατολισμένη γεωτεχνική ερευνητική γεώτρηση προπορείας με χρήση τριπλού δειγματοληπτικού σωλήνα διαμέτρου HQ στο μέτωπο της στοάς κατά μήκος του άξονα μελλοντικής προχώρησης της συνολικού μήκους 700,80m.

Η σήραγγα αρχίζει στο υψόμετρο των +240 m και τελειώνει περίπου στα -660 m, έχοντας κατά συνέπεια μια κλίση περίπου 11% προς τα κατόντη. Σύμφωνα με τη σχεδιαζόμενη χάραξη της στοάς (Εικόνα 2.1.), το πάχος των υπερκειμένων ανέρχεται σε περισσότερο από 600 m σε ποσοστό άνω του 70% της σήραγγας.



**Εικόνα 2.1.: Χάραξη της συνδετήριας στοάς που θα ενώσει τα μεταλλεία Ολυμπιάδας και Μαδέμ-Λάκκος. Πηγή: Θεοδωρακόπουλος & Λεκίδης, 2017.**

## 2.1. Λιθολογικά χαρακτηριστικά πετρώματος της περιοχής

Λιθολογικά το επικρατές πέτρωμα της γεώτρησης είναι βιοτιτικός γνεύσιος χαρακτηριστικός της γεωτεκτονικής ενότητας των Κερδυλλίων. Εντός του βιοτιτικού γνευσίου και κατά μήκος της γεώτρησης εντοπίζονται διεισδύσεις λευκοκρατικού γρανιτικού γνευσίου. Κατά θέσεις παρατηρείται επίσης αυξημένη περιεκτικότητα του γνευσίου σε αμφιβόλους (αμφιβολιτικός γνεύσιος). Τεκτονικό λατυποπαγές που πιθανότατα σχετίζεται με τεκτονικές δομές, συναντάται επίσης σε μήκος γεώτρησης 546,6 m έως 547,4 m. Επίσης, λατυποπαγές με πυριτικό υλικό συγκόλλησης παρατηρείται σε μήκος 691,5 m έως 692,00 m. Ελάχιστη έως καθόλου είναι η παρουσία ισχυρών υδροθερμικών εξαλλοιώσεων. Κατά θέσεις και σε περιορισμένη έκταση παρατηρούνται ασθενής χλωριτική και σερικιτική εξαλλοίωση. Εισροή νερού εντοπίστηκε αρχικά σε ένα μήκος γεώτρησης 16 m ενώ σε μήκος 45,7 m η γεώτρηση συνάντησε ρηξιγενή ζώνη με συνέπεια την αύξηση παροχής νερού. Παρομοίως αύξηση της παροχής νερού υπήρξε και σε απόσταση από το κολλάρο της γεώτρησης 635,9 m. Περισσότερα δεδομένα για τις εισροές υδάτων φαίνονται στον **Πίνακα 2.1** (Θεοδωρακόπουλος & Λεκίδης, 2017).

*Πίνακας 2.1: Ρήγματα και ρηξιγενείς ζώνες με μεγάλη παροχή νερού.*

Από (m)	Έως (m)	Τεκτονική δομή	
		Ρήγμα	Ρηξιγενής ζώνη
41.3	47.2		x
58.1	63.1		x
81.5	82.1	x	
248.4	255.3		x
323.5	323.9	x	
479	480.15	x	
600	610.6		x
624.7	654.3		x

## 2.2. Γεωτεχνική ταξινόμηση της βραχομάζας της περιοχής μελέτης

Η συλλογή γεωτεχνικών δεδομένων από την προσανατολισμένη οριζόντια γεώτρηση OLD\_001, που πραγματοποιήθηκε είχε ως στόχο:

- Την γεωμηχανική ταξινόμηση της βραχομάζας κατά Barton (Q-system)

- Τον εντοπισμό των κύριων τεκτονικών δομών.
- Την εύρεση των κύριων συστημάτων ασυνεχειών που επικρατούν στην εν λόγω περιοχή και συμβάλλουν στον κερματισμό της βραχομάζας.

Το σύστημα ταξινόμησης Q αναπτύχθηκε από τους Barton, Lien και Lunde (Barton et al, 1974) για τον προσδιορισμό των γεωμηχανικών παραμέτρων της βραχομάζας, αλλά και τον εμπειρικό σχεδιασμό της υποστήριξης στις σήραγγες. Για τον υπολογισμό του δείκτη Q λαμβάνονται υπόψη οι παρακάτω παράμετροι:

- δείκτης ποιότητας βραχομάζας (RQD)
- ο αριθμός των συστημάτων ασυνεχειών (Joint Set Number – Jn)
- η τραχύτητα των ασυνεχειών (Joint Roughness Number – Jr)
- ο βαθμός αποσάθρωσης και πλήρωσης των ασυνεχειών (Joint alteration number – Ja)
- το καθεστώς του νερού στις ασυνέχειες (Joint Water Reduction Factor – Jw)
- τις διάφορες δυσμενείς παραμέτρους (βαθμός απομείωσης τάσεων) που συνδέονται με τη χαλάρωση, τις υψηλές τάσεις, καθώς και το βαθμό συμπίεσης και διόγκωσης του υλικού, (Stress Reduction Factor - SRF)

Η τελική ποιότητα της βραχομάζας σύμφωνα με το σύστημα Q δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (2.1)$$

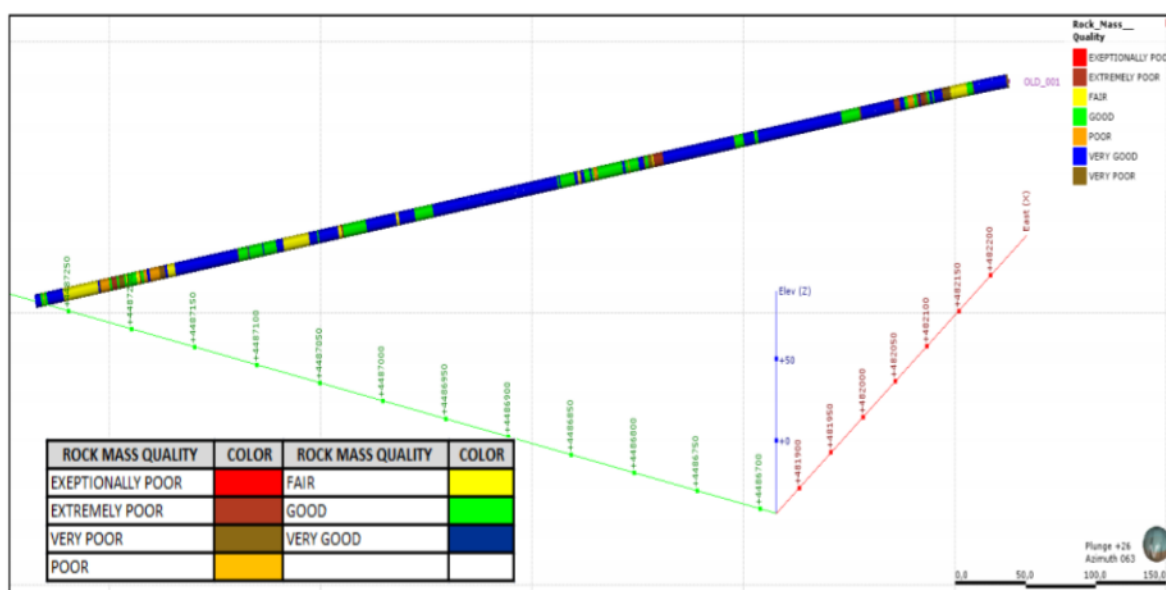
Οι τιμές του Q κυμαίνονται μεταξύ 0,001 για εξαιρετικά κακής ποιότητας βραχομάζα έως 1000 για εξαιρετικά καλής ποιότητας βραχομάζα. Με τη χρήση ακραίων συνδυασμών των παραμέτρων οι τιμές του Q δύναται να είναι μικρότερες ή μεγαλύτερες από τα προαναφερθέντα όρια.

Στον **Πίνακα 2.2** παρουσιάζεται το υπόμνημα για την κατηγοριοποίηση των τεκτονικών δομών που εμφανίστηκαν στη δειγματοληπτική γεώτρηση. Περιέχεται χρωματική διαβάθμιση για την καλύτερη κατανόηση των τεκτονικών δομών της υπό μελέτη περιοχής.

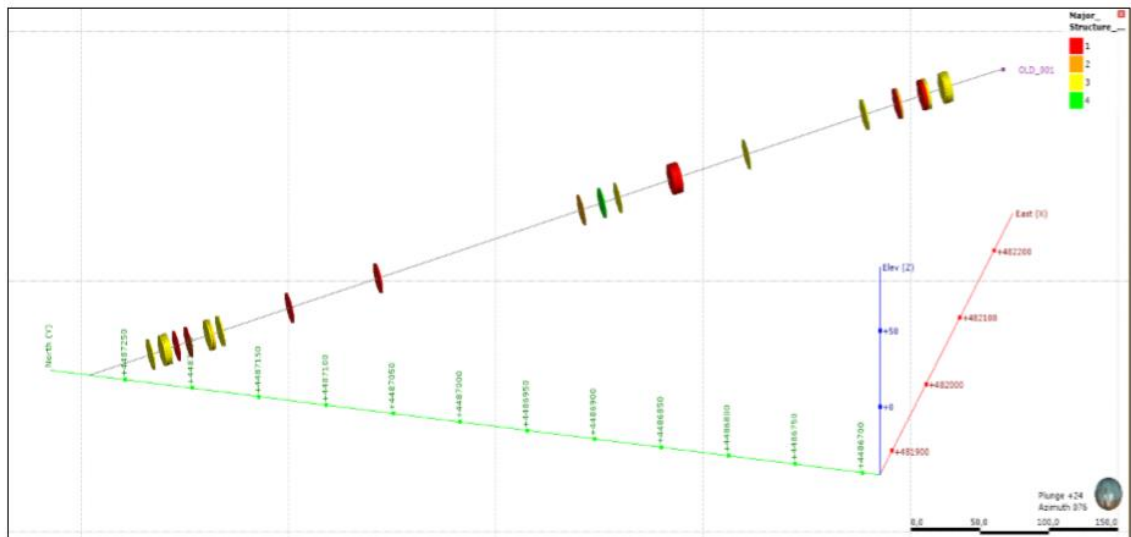
**Πίνακας 2.2: Κατηγοριοποίηση τεκτονικών δομών.**

Κατηγορίες τεκτονικών δομών	
1	Έντονα ρηγματωμένη ζώνη
2	Εμφανής μετατόπιση ή γραμμές ολίσθησης
3	Εξαλλοιωμένη ή κερματισμένη ζώνη
4	Μέτρια κερματισμένη ζώνη

Στην **Εικόνα 2.2** φαίνεται η τρισδιάστατη απεικόνιση των κατηγοριών της βραχομάζας σύμφωνα με το σύστημα ταξινόμησης Q (Barton) κατά μήκος της γεώτρησης. Η ποιότητα της βραχομάζας απομειώνεται καθώς πραγματοποιείται η μετάβαση από τα ψυχρά προς τα θερμά χρώματα. Στην **Εικόνα 2.3** παρουσιάζονται οι κύριες τεκτονικές δομές κατά μήκος της γεώτρησης.



**Εικόνα 2.2:** Ταξινόμηση βραχομάζας σύμφωνα με το σύστημα Q κατά μήκος της γεώτρησης. Πηγή: Θεοδωρακόπουλος & Λεκίδης, 2017.



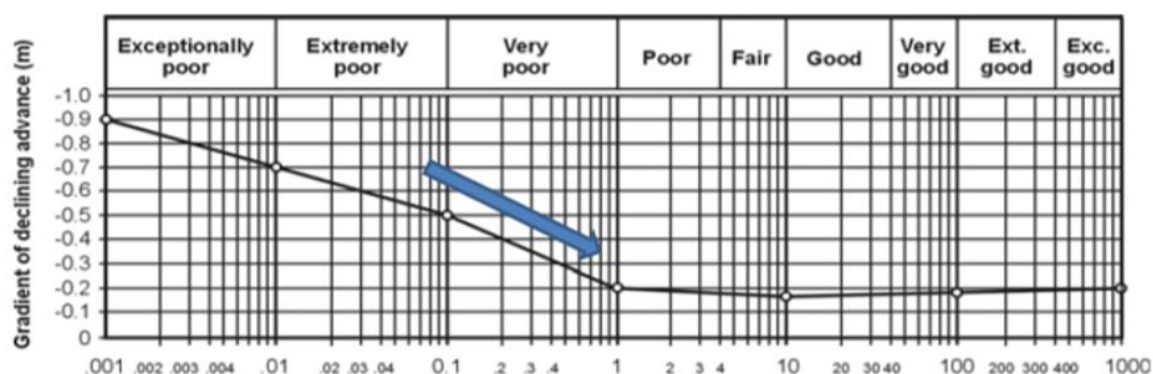
**Εικόνα 1.3: Κύριες τεκτονικές δομές κατά μήκος της γεώτρησης. Πηγή: Θεοδωρακόπουλος & Λεκίδης, 2017.**

Στο παρακάτω απόσπασμα αεροφωτογραφίας της **Εικόνας 2.4.** έχουν σχεδιασθεί τα πιθανά ρήγματα στην επιφάνεια που ενδεχομένως συναντήσει η στοιά καθώς και η χάραξη της.



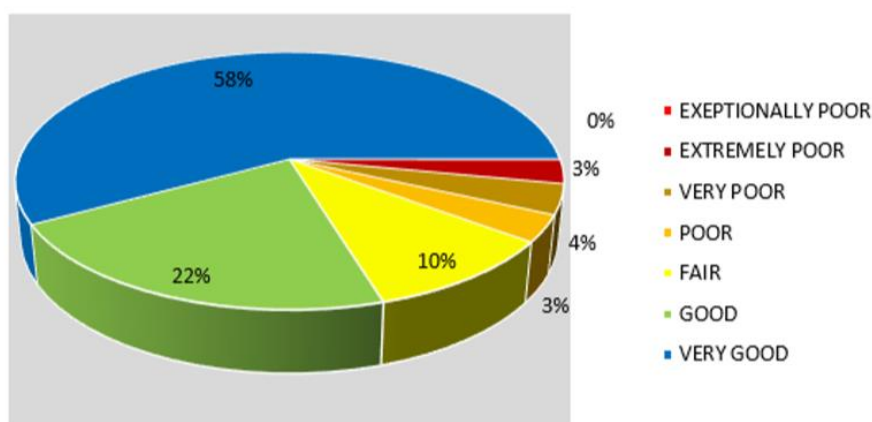
**Εικόνα 2.4.:Χάραξη της σήραγγας με διαδρομή σχήματος “S” στο απόσπασμα αεροφωτογραφίας με τα ρήγματα που ενδεχομένως θα συναντήσει. Πηγή: Θεοδωρακόπουλος & Λεκίδης, 2017.**

Στην **Εικόνα 2.5 (α)** παρουσιάζεται η ταξινόμηση του πετρώματος της υπό μελέτη περιοχής σύμφωνα με το σύστημα ταξινόμησης Q (Barton). Τα αποτελέσματα της γεωτεχνικής ταξινόμησης της βραχομάζας κατά το σύστημα Q (Barton) παρουσιάζονται στην **Εικόνα 2.5 (β)**. Σύμφωνα με το διάγραμμα τύπου «πίτας» της **Εικόνας 2.5 (β)**, το 80% της βραχομάζας όπως αυτή απεικονίζεται από τον πυρήνα της γεώτρησης χαρακτηρίζεται καλής έως πολύ καλής ποιότητας (58% very good, 22% good). Μόνο το 10% (3% extremely poor, 4% very poor and 3% poor) της βραχομάζας χαρακτηρίστηκε κακής έως πολύ κακής ποιότητας, ενώ το υπόλοιπο 10% της βραχομάζας χαρακτηρίστηκε μέτριας ποιότητας (10% fair).



$$\text{Rock mass quality } Q = \left( \frac{RQD}{J_n} \right) \times \left( \frac{J_r}{J_a} \right) \times \left( \frac{J_w}{SRF} \right)$$

(α)



(β)



***Εικόνα 2.5 (α) Κλάσεις ποιότητας βραχομάζας σύμφωνα με το σύστημα Q ,και (β)  
Ποιότητα βραχομάζας κατά μήκος της γεώτρησης σύμφωνα με το σύστημα Q. Πηγή:  
Θεοδωρακόπουλος & Λεκίδης, 2017.***

Επομένως, σύμφωνα με τα παραπάνω γίνεται κατανοητό ότι η στοά που μελετάται στην συγκεκριμένη εργασία βρίσκεται εντός γνευσίων και τεκτονισμένων μαρμάρων με μέτρια έως πολύ καλή ποιότητα βραχομάζας σύμφωνα με το σύστημα ταξινόμησης Q (μεγαλύτερο του 3 έως 10) σε ποσοστό μεγαλύτερο του 90% του μήκους της στοάς.

### 3. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΟΡΥΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

Με τον όρο εξόρυξη του πετρώματος ή άλλου φυσικού σχηματισμού εννοείται η απόσπαση τεμαχίων πετρώματος από την φυσική τους θέση. Οι διαδικασίες εξόρυξης αποτελούν αναπόσπαστο τμήμα κάθε σύγχρονου έργου. Τα τεχνικά έργα περιλαμβάνουν μεταλλευτικές δραστηριότητες, όπως στις επιφανειακές και υπόγειες εκμεταλλεύσεις, κατασκευαστικές δραστηριότητες σε πετρώματα ή εδαφικά υλικά όπως ορύξεις σηράγγων, διαμόρφωση πρανών, εκσκαφές κ.λπ. Η φάση της εξόρυξης ακολουθείται από την φάση της αποκομιδής (φόρτωση, μεταφορά και απόθεση του εξορυγμένου υλικού) (Τσουτρέλης, 2001).

Η διάνοιξη υπογείων μετώπων προσπελάσεως γίνεται κατά δύο τρόπους (Τσουτρέλης, 2001):

- Με χρήση μηχανικών μέσων (αναφέρεται συχνά και ως «μηχανική διάτρηση ή καλύτερα όρυξη σηράγγων»), όπως είναι τα διατρητικά μηχανήματα ολομέτρου εκσκαφής (Tunnel Boring Machines) ή τα μηχανήματα σημειακής κοπής (Roadheaders) για τις σήραγγες και διάφοροι συγγενείς τύποι για τη διάνοιξη φρεάτων και κεκλιμένων (Shaft Borers, Raise Borers κ.λπ.).
- Με τον συμβατικό τρόπο της διατρήσεως και ανατινάξεως (Drilling an Blasting Method).

Η χρήση μηχανικών μέσων βρίσκει κυρίως εφαρμογή σε τεχνικά έργα και λιγότερο σε μεταλλευτικά, στα πετρώματα εκείνα των οποίων τα μηχανικά και φθοροποιά χαρακτηριστικά τους καθιστούν οικονομικώς συμφέρουσα την μηχανική εξόρυξη σε σύγκριση με εκείνη της χρήσης εκρηκτικών υλών. Με βάση τα σημερινά δεδομένα θεωρείται ότι πετρώματα με αντοχή σε μονοαξονική θλίψη μέχρι 170-180 MPa, μπορεί να εξορυχθούν οικονομικώς με μηχανικό τρόπο υπό την προϋπόθεση ότι τα φθοροποιά τους χαρακτηριστικά είναι χαμηλά (κυρίως η περιεκτικότητά τους σε χαλαζία). Βεβαίως και άλλοι παράγοντες επηρεάζουν την επιλογή του τρόπου εξορύξεως όπως είναι η έκταση του έργου, η διατομή της εκσκαφής, η διαθεσιμότητα του κατάλληλου μηχανικού εξοπλισμού και η εμπειρία του προσωπικού.

Η θραύση των πετρωμάτων με συμβατικές εκρηκτικές ύλες άρχισε να γίνεται ασφαλέστερη και οικονομικότερη από τον 19ο αιώνα. Αργότερα έγινε δυνατή η εφαρμογή διαφόρων θερμοδυναμικών, θερμοχημικών κ.ά. θεωριών που συνδέονται με την γένεση και την διάδοση των κρουστικών κυμάτων με σκοπό τον υπολογισμό διαφόρων παραμέτρων των

εκρήξεων. Βάσει του αντίστοιχου θεωρητικού υποβάθρου αλλά και της εμπειρίας από τα διαφορετικού τύπου τεχνικά έργα, ο σύγχρονος μηχανικός μπορεί να εφαρμόσει ένα ευρύ πεδίο μεθόδων και υλικών (πχ. εκρηκτικών) ώστε να επιτύχει την βέλτιστη δυνατή εξόρυξη σε δεδομένο τεχνικό έργο (πχ. τον καλύτερο θρυμματισμό του πετρώματος ανάλογα με τις συνθήκες εξόρυξης, την δυνατότητα εύκολης φόρτωσης, την προστασία παρακείμενων κατασκευών, κ.λπ.) (Τσουτρέλης, 2001).

Στις υποενότητες που ακολουθούν αναλύονται το θεωρητικό υπόβαθρο των μεθόδων της ολομέτωπης κοπής (TBM) καθώς και αυτή της συμβατικής μεθόδου διάτρησης – ανατίναξης, που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία.

### **3.1. Μέθοδος ολομέτωπης κοπής (TBM)**

Η χρήση των υπόγειων ανοιγμάτων, τόσο στην εκμετάλλευση όσο και στα τεχνικά έργα, απαιτεί, σε μεγαλύτερο βαθμό κάθε μέρα, τη χρήση στοών, σηράγγων και φρεάτων. Τα τελευταία χρόνια η μηχανική εκσκαφή με τη χρήση TBM έχει προοδεύσει σημαντικά, εξορύσσοντας πετρώματα με αντοχή σε μονοαξονική θλίψη πάνω από 250 MPa. Σε σκληρά πετρώματα και για διάνοιξη μεγάλου μήκους στοών ή σηράγγων τα TBM έχουν μεγάλο πεδίο εφαρμογής και προσφέρουν σημαντικά οφέλη (Χειμωνίδου, 2010).

Τα πρώτα κοπτικά μηχανήματα ήταν κατά κύριο λόγο μεταλλικοί σωλήνες οι οποίοι υποστήριζαν την περιβάλλουσα εδαφοβραχομάζα γύρω από τη σήραγγα εντός των οποίων εξόρυσσαν τα διατρητικά μηχανήματα. Διαφορετικές τεχνολογίες είχαν αναπτυχθεί στο παρελθόν προκειμένου να κατασκευαστούν μηχανήματα εξόρυξης τόσο για «ενδιάμεσης» σκληρότητας πετρώματα όσο και για «δύσκολα» εδάφη.

Από το 1954, όταν ο James S. Robbins δημιούργησε τη μηχανή ολομέτωπης κοπής της σήραγγας (TBM), οι τύποι των TBM βελτιώθηκαν σε μεγάλο βαθμό, σε μια προσπάθεια να αντιμετωπιστεί το ολόένα και μεγαλύτερο εύρος συνθηκών πετρωμάτων σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο ποσοστό. Οι σημερινοί τύποι TBM μπορούν να φτάσουν στα 1000 m/μήνα, αλλά ταχύτητες προώθησης μικρότερες από 50 m/μήνα μπορεί να παρατηρηθούν σε δυσμενείς γεωλογικές συνθήκες ή όταν τα μέτρα στήριξης δεν διατηρήσουν τη σταθερότητα της σήραγγας μέχρι την τελική επένδυση (Sapigni et.al., 2002).

Τα μηχανήματα ολομέτωπης κοπής (Tunnel boring machines, TBM και οι ασπίδες, shields) χρησιμοποιούνται για την διάνοιξη σηράγγων μέσα σε διαφορετικούς γεωλογικούς

σηματισμούς. Μπορεί να χρησιμοποιηθούν το ίδιο αποτελεσματικά για τη διάνοιξη σκληρών ή χαλαρών πετρωμάτων ή εδαφών. Οι διάμετροι διάνοιξης κυμαίνονται από 1 m έως και 15 m (με τάση να φθάσουν τα 19 m) και οι ταχύτητες προχώρησης ανάλογα με τις γεωλογικές συνθήκες, από μερικά cm/εβδομάδα έως και 130 m/εβδομάδα. Οι σήραγγες οι οποίες έχουν διάμετρο μικρότερη από 1 m είναι πιο πιθανό να διανοιχθούν με οριζόντια κατευθυνόμενη όρυξη ή με τη χρήση της μεθόδου Pipe Jacking, παρά με TBM (Εξαδάκτυλος, Σταυροπούλου, 2005).

Τα μηχανήματα ολομέτωπης κοπής αποτελούνται από την κοπτική κεφαλή, κυλίνδρους ώθησης, ασπίδες και κινητήρες κοπτικών κεφαλών. Έχουν επίσης εφεδρικά ρυμουλκούμενα, τα οποία φέρουν υδραυλικό και ηλεκτρικό εξοπλισμό, μεταφορείς και ανεμιστήρες εξαερισμού.

Η κατασκευή του TBM συνδέεται στενά με τις γεωλογικές συνθήκες του έργου, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Οι κατασκευαστές δίνουν διαφορετικά ονόματα στα μοντέλα TBM, ωστόσο, είναι δυνατή η ταξινόμηση των TBM σε δύο κύριες ομάδες, οι οποίες είναι τα TBM για σκληρά και TBM για μαλακά πετρώματα.

Τα ανοικτά, μονής και διπλής ασπίδας TBM χρησιμοποιούνται για την εκσκαφή σκληρών πετρωμάτων ενώ τα TBM μαλακών πετρωμάτων χρησιμοποιούνται για την εκσκαφή σε εδάφη ή σε μέτωπο με μικτές συνθήκες. Η επιλογή μονής ή διπλής ασπίδας εξαρτάται κυρίως από τη γεωλογία της περιοχής καθώς και από την ταχύτητα προχώρησης. Διπλές ασπίδες χρησιμοποιούνται σε χαλαρά εδάφη ή ρηγματογόνες ζώνες όπου απαιτείται μεγάλη ταχύτητα προχώρησης. Αντίστοιχα, η μονή ασπίδα χρησιμοποιείται σε σκληρά, συμπαγή πετρώματα (Εξαδάκτυλος, Σταυροπούλου, 2005). Στον **Πίνακα 3.1** παρουσιάζονται οι τεχνικές και τα μηχανήματα όρυξης σηράγγων σε σκληρά πετρώματα.

**Πίνακας 3.1: Κατάταξη τεχνικών και μηχανημάτων όρυξης σηράγγων σε σκληρά πετρώματα.**

Τεχνική σταδιακής όρυξης-κατασκευής	NATM New Austrian Tunneling Method με διάτρηση και ανατίναξη
	Μηχανές σημειακής όρυξης (Roadheaders)
TBM	Μηχανές για πετρώματα με πέδιλα έδρασης (Gripper TBM)
	Μηχανές με μονή ασπίδα (single shield TBM)

	Διπλής ασπίδας (Double Shield TBM)
	Μικτής ασπίδας (Mixshield)
	Εξισορρόπησης γεωστατικής πίεσης (Earth Pressure Balanced TBM, EPB)

Η απόδοση του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως είναι (Ξηρουδάκης, 2007):

- Ο τύπος του γεωλογικού σχηματισμού,
- Η διάμετρος της σήραγγας,
- Ο τύπος του TBM: ανοιχτού ή κλειστού,
- Η γεωμετρία της κεφαλής: αριθμός κοπτικών δίσκων, απόσταση μεταξύ των κοπτικών, διάμετρος εκσκαφής,
- Η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της κεφαλής,
- Η μέγιστη ισχύς του μηχανήματος και
- Η δύναμη ωθήσεως

Καθώς και από τις παρακάτω ιδιότητες της βραχομάζας:

- Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη,
- Η αντοχή σε εφελκυσμό,
- Η γωνία εσωτερικής τριβής και
- Τα φθοροποιά χαρακτηριστικά του πετρώματος.

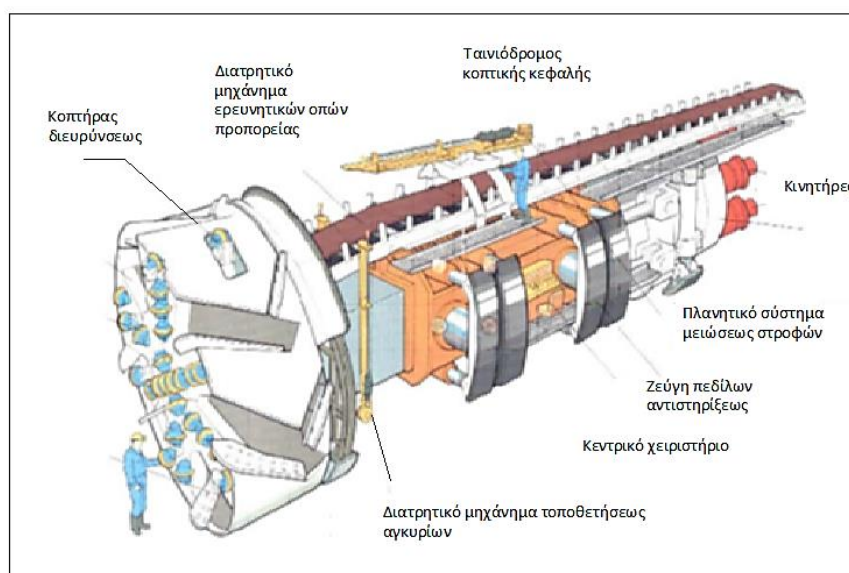
### 3.1.1. Τρόπος λειτουργίας TBM

Στην παρούσα εργασία, έχει επιλεγεί η χρήση μηχανήματος ολομέτωπης κοπής ανοιχτού τύπου (χωρίς ασπίδα) με πέδιλα έδρασης στις παρειές της στοάς, καθώς οι γεωλογικές και λιθολογικές συνθήκες το επιτρέπουν. Στα μηχανήματα αυτά, δεν απαιτείται η τοποθέτηση δακτυλίων αντιστηρίξεως στο πέτρωμα. Το σύστημα αυτό είναι απλό και δεν απαιτεί πολλούς χειρισμούς. Ωστόσο, χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή σε περίπτωση κάποιου ρήγματος ή κενού, διότι θα χρειαστούν τοιχεία αντιστήριξης από σκυρόδεμα.

Η λειτουργία της μηχανής ολομέτωπης κοπής ανοικτού τύπου βασίζεται στα παρακάτω βήματα (Εφραιμίδης, 2002):

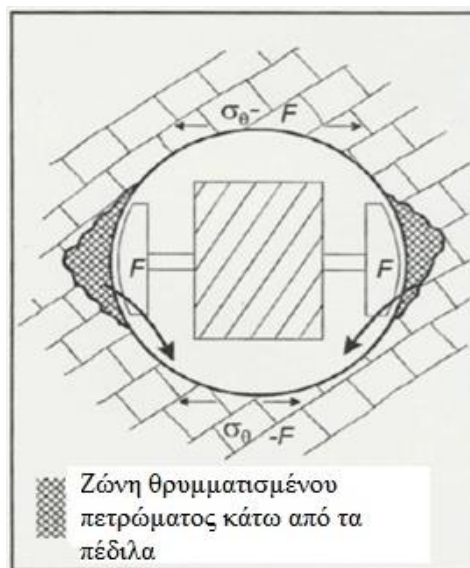
- Στη φάση της εκσκαφής, τα πλευρικά πέδιλα έδρασης της μηχανής προεντείνονται πλευρικά προς τα τοιχώματα της σήραγγας ή της στοάς. Αυτό καθίσταται απαραίτητο για την απόκτηση της απαιτούμενης πρόσφυσης, η οποία χρειάζεται για την ανάπτυξη δυνάμεων ώθησης της κεφαλής. Η προώθηση γίνεται με τους υδραυλικούς κυλίνδρους προωθήσεως.
- Κατά την φάση εξάντλησης της διαδρομής των εμβόλων προώθησης, διακόπτεται η λειτουργία της μηχανής, αυτή εδράζεται στα βοηθητικά πέδιλα και οι υδραυλικοί κύλινδροι πλευρικής στήριξης συμπύσσονται.
- Το σύστημα των υδραυλικών κυλίνδρων προώθησης συμπύσσεται και το σύστημα των κυλίνδρων προεντάσεως κινείται προς τη φορά του μετώπου κατά μια διαδρομή εμβόλου.
- Τέλος, οι κύλινδροι προεντείνονται στη νέα θέση προς τα τοιχώματα, τα πέδιλα στήριξης μαζεύονται κι ο κύκλος εκσκαφής επαναλαμβάνεται για ένα μήκος διαδρομής εμβόλου.

Στην **Εικόνα 3.1**, παρουσιάζονται τα επιμέρους τμήματα ενός μηχανήματος ολομέτωπης κοπής (TBM).



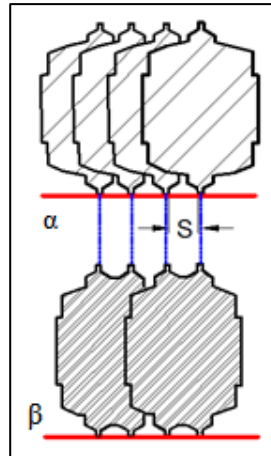
**Εικόνα 3.1:** Τμήματα ενός μηχανήματος ολομέτωπης κοπής (TBM) (Εξαδάκτυλος, Σταυροπούλου, 2005).

Η μηχανή πρέπει να στηρίζεται στα πλευρικά τοιχώματα της σήραγγας με υδραυλικά έμβολα (πέδιλα) για την απόκτηση της απαιτούμενης πρόσφυσης. Η προώθηση της κοπτικής κεφαλής γίνεται από μία ή περισσότερες σειρές τηλεσκοπικών κυλίνδρων. Τα πέδιλα αυτά θα πρέπει να εδράζονται σε συνεκτικό πέτρωμα, διότι μπορεί να συμβεί αστοχία κάτω από την επιφάνεια επαφής, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 3.2**.

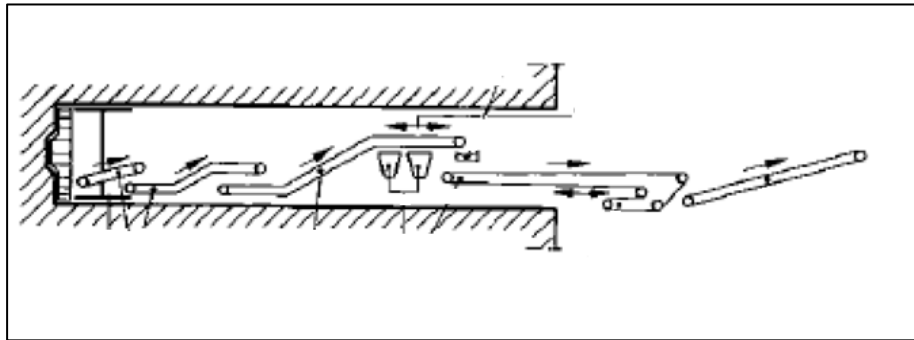


**Εικόνα 3.2:** Περιοχή αστοχίας σε θρυμματισμένο πέτρωμα κάτω από τα πέδιλα του μηχανήματος TBM (Εξαδάκτυλος, Σημειώσεις μαθήματος διάτρησης – ανατίναξης).

Η θραύση του πετρώματος επιτυγχάνεται με τη βοήθεια κοπτικών δίσκων (**Εικόνα 3.3**) οι οποίοι είναι κατασκευασμένοι από σκληρό μέταλλο καθώς η κεφαλή του μηχανήματος ωθείται προς το μέτωπο και περιστρέφεται. Τα θραυσμένα τεμάχια του πετρώματος, συγκεντρώνονται από τα ανοίγματα στην κεφαλή και απομακρύνονται μέσω της μεταφορικής ταινίας στην είσοδο της στοάς (**Εικόνα 3.4**). Επομένως, γίνεται σαφές ότι τα μηχανήματα ολομέτωπης κοπής (TBM) είναι ολοκληρωμένες μηχανές που εκσκάπτουν, φορτώνουν και μεταφέρουν το ορυχθέν πέτρωμα.



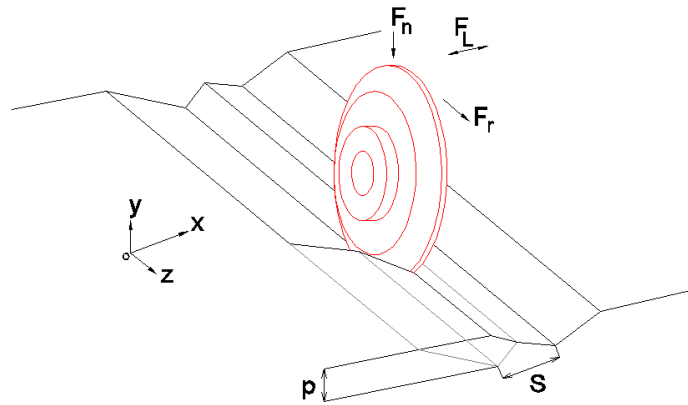
**Εικόνα 3.3:** Απεικόνιση της απόστασης μεταξύ των κοπτικών δίσκων του TBM. α) ανεξάρτητοι δίσκοι, σε πετρώματα μέσης έως υψηλής αντοχής, β) Δίδυμοι δίσκοι, σε πετρώματα χαμηλής αντοχής (Εξαδάκτυλος, Σημειώσεις μαθήματος διάτρησης – ανατίναξης).



**Εικόνα 3.4:** Σύστημα μεταφορικής ταινίας για την απομάκρυνση του εξορυγμένου υλικού. (Εξαδάκτυλος, Σημειώσεις μαθήματος διάτρησης – ανατίναξης).

Οι δυνάμεις που ασκούνται στο πέτρωμα και στους κοπτικούς δίσκους παρουσιάζονται στην **Εικόνα 3.5α**. Η  $F_n$  είναι η ορθή δύναμη που απαιτείται για την διείσδυση του δίσκου στο πέτρωμα σε βάθος μερικών χιλιοστών, η  $F_L$  η πλευρική δύναμη (μία προς την αύλακα και μία προς την αντίθετη μεριά) και η  $F_r$  η δύναμη κύλισης.

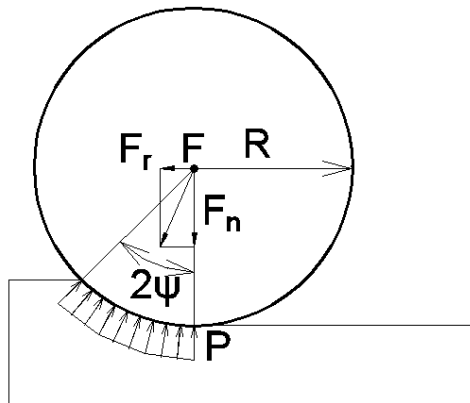




**Εικόνα 3.5α. : Ανάλυση δυνάμεων στους δίσκους κοπής του TBM (Εξαδάκτυλος, Σημειώσεις μαθήματος διάτρησης – ανατίναξης).**

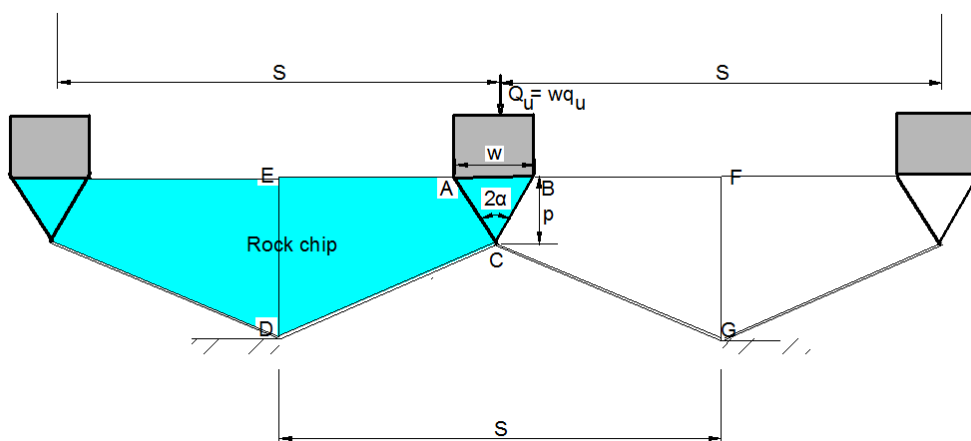
Ο λόγος της δύναμης κύλισης προς την ορθή δύναμη που ονομάζεται και συντελεστής κοπής είναι σταθερός και εξαρτάται από την γωνία επαφής δίσκου-πετρώματος όπως φαίνεται στην **Εικόνα 3.5β**.

$$\begin{aligned}
 CC &= \frac{F_r}{F_n} = \frac{1 - \cos 2\psi}{\sin 2\psi} = \\
 &= \frac{1 - \cos^2 \psi + \sin^2 \psi}{2 \sin \psi \cos \psi} = \frac{2 \sin^2 \psi}{2 \sin \psi \cos \psi} = \tan \psi
 \end{aligned} \tag{3.1}$$



**Εικόνα. 3.5β. Πλάγια τομή επαφής του δίσκου στο μέτωπο (Εξαδάκτυλος, Σημειώσεις μαθήματος διάτρησης – ανατίναξης).**

Ο λόγος  $S/p$ , ήτοι της απόστασης των κυκλικών διαδρομών παρακείμενων δίσκων προς το βάθος διείσδυσης ανά περιστροφή εξαρτάται από την συνολική ώση της κεφαλής επί του μετώπου που ρυθμίζεται από τον χειριστή και επηρεάζει την ειδική ενέργειας θραύσης (καταναλισκόμενη ενέργεια προς μοναδιαίο όγκο θραυσμένου πετρώματος). Για μικρό λόγο  $S/p$  έχουμε σχηματισμό μεγάλου αριθμού ρωγμών και παραγωγή λεπτομερών θραυσμάτων (σκόνης) ενώ για μεγάλο λόγο δεν συνενώνονται γειτονικές ρωγμές για τη δημιουργία φλούδας πετρώματος όπως φαίνεται στην **Εικόνα 3.5γ**.



**Εικόνα 3.5γ. Μηχανισμός θραύσης του πετρώματος κάτω από παρακείμενους κοπτικούς δίσκους με συνένωση διατμητικών - εφελκυστικών ρωγμών που εκκινούν στα σημεία επαφής και**

*επεκτείνονται προς τους γειτονικούς δίσκους διαμορφώνοντας φλούδες πετρώματος (rock chips).  
(Εξαδάκτυλος, Σημειώσεις μαθήματος διάτρησης – ανατίναξης)*

### **3.1.2. Μέθοδος πρόβλεψης απόδοσης και σχεδιασμού του TBM**

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι θεμελιώδεις σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τον σχεδιασμό της κεφαλής της TBM ανάλογα με τη διάμετρο της στοάς, την αντοχή της βραχομάζας και την παραγωγικότητα της μηχανής.

Κατά τον σχεδιασμό ενός έργου με τη χρήση μηχανήματος ολομέτωπης κοπής (TBM) είναι σημαντικό να προσδιορισθεί ο συνολικός χρόνος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί το μηχάνημα αποκλειστικά για την διάνοιξη. Αυτό μπορεί να υπολογισθεί από την σχέση σύμφωνα με τον Barton (2000):

$$AR = U \times PR \quad (3.2)$$

Όπου:

AR (Advanced Rate): ο πραγματικός ρυθμός διάτρησης,

U (Utilisation factor): ο παράγοντας χρήσης του μηχανήματος (μηχανικής διαθεσιμότητας) που κυμαίνεται από 0 έως 1 και

PR (Penetration Rate): ο καθαρός (net) ρυθμός προχώρησης του μηχανήματος.

Η σχέση αυτή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις συνθήκες της βραχομάζας. Γι' αυτό τον λόγο είναι πολύ σημαντικό να γίνει ταξινόμηση της βραχομάζας που πρόκειται να εκσκαφθεί.

Ο βαθμός χρήσης επηρεάζεται από τις παράλληλες ή διαδοχικές δραστηριότητες, οι οποίες είναι απαραίτητες για τη συμπλήρωση του κύκλου εκσκαφής, αλλά και από τις καθυστερήσεις λόγω μη αναμενόμενων αστοχιών του μετώπου, της οροφής ή των παρειών. Υπάρχουν διάφοροι λόγοι για τους οποίους ένα μηχάνημα ολομέτωπης κοπής (TBM) θα πρέπει να διακόψει τη λειτουργία του. Οι κυριότεροι λόγοι για τους οποίους θα πρέπει να συμβεί αυτό αφορά το μήκος της σήραγγας, τις μεταβολές στις γεωλογικές συνθήκες που τυχόν δεν είχαν ανιχνευθεί, απροσδόκητη βλάβη του μηχανήματος καθώς και καθυστερήσεις για τη συντήρηση αυτού. Επιπλέον, οι ενέργειες που θα πρέπει να πραγματοποιηθούν για την

ορθή λειτουργία του μηχανήματος, όπως είναι ο έλεγχος για τα πέδιλα έδρασης του μηχανήματος, έλεγχος των κοπτικών και αλλαγές αυτών σε περίπτωση φθοράς και συντήρηση της μεταφορικής ταινίας σε περίπτωση φθοράς από το πέτρωμα που εξορύσσεται. Στον **Πίνακα 3.2** παρουσιάζονται ενδεικτικές τιμές για την απόδοση του TBM (%).

**Πίνακας 3.2:** Ενδεικτικές τιμές απόδοσης του TBM (Εξαδάκτυλος, Σημειώσεις μαθήματος διάτρησης – ανατίναξης).

Διεργασία	Ποσοστό απασχόλησης (%)
Καθαρή διάτρηση (όρυξη)	49
Αναμετάθεση κεφαλής	4
Κοπτικά άκρα, αλλαγή και επιθεώρηση	11
Ανεξέλεγκτες διακοπές	4
Σύστημα υποστηρίξεως (βλάβες)	4
Είσοδος υπόγειων υδάτων	7
Αναμονή συρμού μεταφοράς	12
Γεωλογικές και λοιπές διακοπές	9
	100

Με βάση τον νόμο του φθίνοντος ρυθμού προχώρησης, ο παράγοντας ή συντελεστής χρήσης ( $U$ ) μπορεί να εκφραστεί σύμφωνα με τον Barton (2000) και ως εξής:

$$U = T^m \quad (3.3)$$

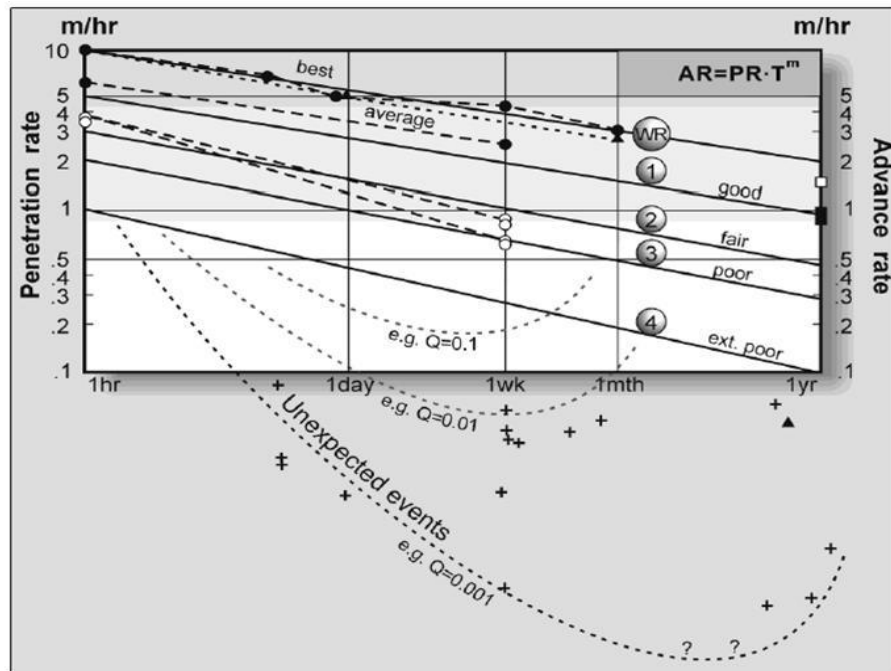
Όπου  $T$  (h): ο χρόνος διάρκειας κατασκευής της στοάς ή της σήραγγας και

$m$ : αρνητικός πραγματικός αριθμός που μειώνει τον μέσο ρυθμό προχώρησης.

Λαμβάνει τιμές από -0,2 έως -0,45.

Στην **Εικόνα 3.6**, απεικονίζεται το νομόγραμμα στο οποίο βασίζεται ο νόμος του φθίνοντος ρυθμού προχώρησης. Στο νομόγραμμα αυτό, παρουσιάζονται ο μειούμενος ρυθμός προχώρησης σε συνάρτηση του χρόνου διάνοιξης της σήραγγας ή της στοάς (μετρούμενος σε ώρες, ημέρες, εβδομάδες κτλ), καθώς το μήκος αυτής αυξάνεται. Τα δεδομένα αυτά είναι βασισμένα σε δεδομένα από 145 σήραγγες με χρήση TBM. Πιο συγκεκριμένα, στον αριστερό άξονα μπαίνει το PR που έχει διαπιστωθεί για δεδομένο σχηματισμό και σχεδιασμό TBM. Το μετρούμενο AR μετριέται για κάθε χρονική στιγμή και τοποθετείται ως σημείο στο

νομόγραμμα. Τα σημεία αυτά ενώνονται και σχηματίζουν μία ευθεία. Εφόσον, οι άξονες είναι σε λογαριθμική κλίμακα, οι ευθείες επί του διαγράμματος δίνουν τη σχέση  $AR=PR \times t^m$ , όπου  $m < 0$ , γιατί η ευθεία είναι φθίνουσα. Τέλος, από πάνω προς τα κάτω, οι ευθείες αντιστοιχούν σε όλο και χειρότερης ποιότητας βραχομάζας.



**Εικόνα 3.6:** Νομόγραμμα για τον υπολογισμό του νόμου του φθίνοντος ρυθμού προχώρησης (Barton,2000).

Ο ρυθμός διάτρησης PR (m/h) είναι πολυπαραμετρικό μέγεθος κι εξαρτάται τόσο από τις ιδιότητες του άρρηκτου πετρώματος (αντοχή, διακλάσεις, κλπ), την γεωμετρία των κοπτικών δίσκων, όσο κι από τα τεχνικά χαρακτηριστικά και τις παραμέτρους λειτουργίας της μηχανής συμπεριλαμβανομένων της ώθησης και της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής της κεφαλής. Πρόκειται ουσιαστικά για τη διείσδυση του μηχανήματος στο πέτρωμα, σε διάρκεια καθαρού χρόνου συνεχόμενης όρυξης. Ο τύπος για τον υπολογισμό του ρυθμού διάτρησης δίνεται παρακάτω:

$$PR = p \times \omega \times 60 \times 10^{-2} \quad (3.4)$$

Όπου

- $p$  (mm/rev): το βάθος διείδυσης ανά περιστροφή της κεφαλής, το οποίο εξαρτάται από την συνολική ώθηση της μηχανής στο μέτωπο (ρυθμίζεται από τον χειριστή), την αντοχή της βραχομάζας, τον αριθμό και την γεωμετρία των κοπτικών δίσκων της κεφαλής.
- $\omega$  (rev/min): ταχύτητα περιστροφής κεφαλής που ρυθμίζεται από τον χειριστή.

Η γωνία επαφής δίσκου-πετρώματος εξαρτάται από τα βάθος διείδυσης  $p$  (Εικόνα 3.5β.) και βρίσκεται ως εξής:

$$2\psi = \cos^{-1} \left( \frac{R-p}{R} \right) \quad (3.5)$$

Όπου  $p$  (mm/rev): το βάθος διείδυσης ανά περιστροφή της κεφαλής,

$R$  (cm): η ακτίνα του κοπτικού δίσκου

Η πίεση θραύσης ( $P_o$ ) του πετρώματος στο στην περιοχή της επαφής κοπτικού δίσκου-πετρώματος δίνεται από τον εμπειρικό τύπο<sup>1</sup>:

$$P_o = C \times \sqrt[3]{\frac{S \times UTS \times UCS^2}{2\psi \times \sqrt{R \times w}}} \quad (3.6)$$

Όπου  $R$  (cm): η ακτίνα του κοπτικού δίσκου,

$S$  (cm): απόσταση μεταξύ κοπτικών δίσκων,

$UTS$  (MPa): αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό,

$UCS$  (MPa): αντοχή σε μονοαξονική θλίψη,

$2\psi$  (rad): γωνίας επαφής δίσκου-πετρώματος,

$w$  (cm): πλάτος του κοπτικού δίσκου σταθερού προφίλ στην επαφή και

$C$ : σταθερά.

Η ορθή δύναμη ανά κοπτικό δίσκο ( $F_n$ ) υπολογίζεται:

---

<sup>1</sup> ROSTAMI, J. & OZDEMIR L. 1993b. A New Model for Performance Prediction of Hard Rock TBM. In Proceedings of Rapid Excavation and Tunnelling Conference. Chapter 50, Boston, MA. USA, 793-809.

$$F_n = w \times R \times P_o \times \sin\varphi \quad (3.7)$$

Όπου R (cm): η ακτίνα του κοπτικού δίσκου,

w (cm): πλάτος του κοπτικού δίσκου σταθερού προφίλ στην επαφή

P<sub>o</sub> (MPa): πίεση θραύσης και

φ: γωνίας επαφής δίσκου-πετρώματος, σε μοίρες.

Ο αριθμός κοπτικών δίσκων υπολογίζεται ως εξής:

$$N = \frac{D}{2 \times S} \quad (3.8)$$

Όπου D (m): διάμετρος κοπτικής κεφαλής και

S (cm): απόσταση μεταξύ κοπτικών δίσκων.

Η δύναμη ώσης ανά δίσκο δίνεται από τον εξής τύπο:

$$F = N \times F_n \quad (3.9)$$

Όπου N : αριθμός κοπτικών δίσκων και

F<sub>n</sub> (KN): ορθή δύναμη ανά δίσκο.

Ο συντελεστής κοπής CC δίνεται από τον τύπο:

$$CC = \tan \psi \quad (3.10)$$

Όπου ψ (rad): γωνίας επαφής δίσκου-πετρώματος.

Η ροπή στρέψης της κεφαλής (Torque) του TBM υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$T = 0.3 \times D \times N \times F_r \quad (3.11)$$

Όπου D (m): διάμετρος κοπτικής κεφαλής,

N: αριθμός κοπτικών δίσκων και

$F_r$  (KN): δύναμη κύλισης.

Τέλος, για τον υπολογισμό της ισχύος του TBM εφαρμόζεται η κάτωθι σχέση της Μηχανικής:

$$P = T \times 2\pi \times \omega \quad (3.12)$$

Όπου  $\omega$  (rev/min): ταχύτητα περιστροφής κεφαλής και

$T$  (KNm): ροπή στρέψης της κεφαλής.

Στην παρούσα εργασία θεωρείται μηχάνημα ολομέτωπης κοπής χωρίς ασπίδα (Open TBM), καθώς το πέτρωμα στην περιοχή σχεδίασης είναι υψηλής αντοχής. Επίσης, τεχνικά χαρακτηριστικά για τον σχεδιασμό του κατάλληλου τύπου TBM αναλύονται σε επόμενο κεφάλαιο.

## 3.2. Μέθοδος διάτρησης – ανατινάξης

### 3.2.1. Γενικά στοιχεία

Οι υπόγειες ανατινάξεις σε μέτωπα προσπελάσεως, των οποίων ο κυριότερος εκπρόσωπος είναι οι σήραγγες και σε μικρότερη έκταση τα φρέατα, τα κεκλιμένα και οι ράμπες, πραγματοποιούνται πάντοτε υπό πολύ δυσμενέστερες συνθήκες σε σύγκριση είτε με εκείνες που συναντώνται στις υπαίθριες ανατινάξεις είτε με εκείνες των υπόγειων ανατινάξεων σε μέτωπα παραγωγής. Αυτό συμβαίνει διότι τα υπόψη μέτωπα διαθέτουν μόνο μία ελεύθερη επιφάνεια και ο χώρος εργασίας είναι κατά κανόνα περιορισμένος επιβάλλοντας για το λόγο αυτό ειδικούς όρους εργασίας κατά την όρυξη των διατρημάτων, τη φόρτωση και την αποκόμιση του υλικού (Τσουτρέλης, 2001).

Εκρηκτική ύλη είναι μια απλή ή μίγμα χημικών ουσιών που σε κατάλληλες συνθήκες μπορούν να απελευθερώσουν πολύ μεγάλη ισχύ λόγω αλυσιδωτής χημικής αντίδρασης που μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια που μεταφέρεται από κρουστικό κύμα και από την απελευθέρωση πολύ μεγάλου όγκου θερμών αερίων.

Μια εκρηκτική ύλη αποτελείται από δύο ή περισσότερες χημικές ουσίες από τις οποίες η μία είναι καύσιμη ύλη (ελλιπής σε οξυγόνο) και η άλλη οξειδωτική (αυτάρκης σε οξυγόνο). Πρέπει να προστεθεί στο σημείο αυτό ότι εκείνο που χαρακτηρίζει μια εκρηκτική



ύλη είναι η αναπτυσσόμενη ενέργεια στην μονάδα του χρόνου και όχι η ποσότητα της αποδιδόμενης ενέργειας κατά την αντίδραση. Η ισχύς οφείλεται στην μεγάλη ταχύτητα με την οποία πραγματοποιείται η χημική αντίδραση της. Η ικανότητα που της προσδίδει λοιπόν η ισχύς, να αποδίδει την ενέργεια της σε πολύ μικρό χρόνο σε ένα τμήμα του πετρώματος, την καθιστά κατάλληλη για την θραύση του (Τσουτρέλης, 1997).

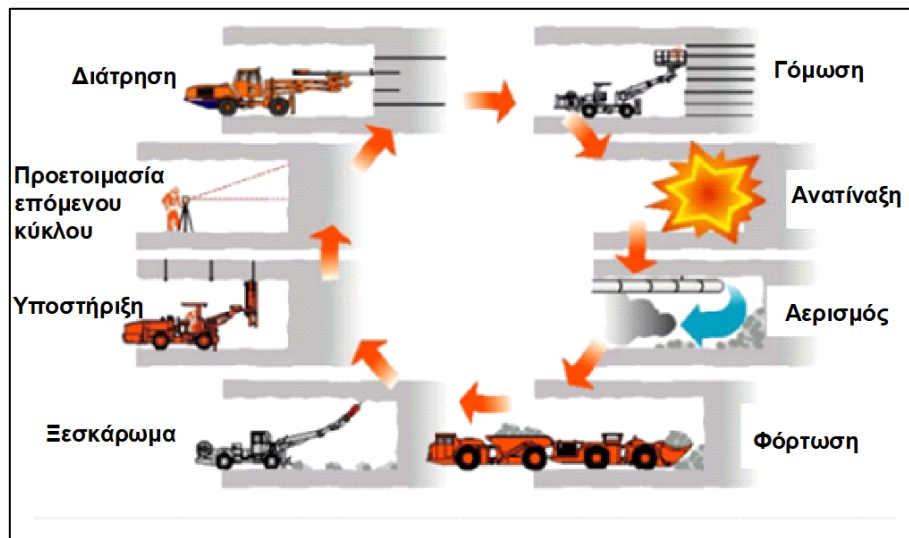
Η ορθή επιλογή της κατάλληλης εκρηκτικής ύλης για τις απαιτήσεις μιας εξόρυξης στηρίζεται στην αξιολόγηση των ιδιοτήτων της και των χαρακτηριστικών του πετρώματος. Σημειώνεται ότι η καλύτερη σύγκριση για την ισχύ και την αποδοτικότητα δύο εκρηκτικών είναι να υπολογιστεί ο θρυμματισμός που επιτυγχάνεται σε διάφορα πετρώματα υπό σταθερές συνθήκες. Επειδή όμως αυτός ο τρόπος θεωρείται δαπανηρός χρησιμοποιούνται δείκτες οι οποίοι προέκυψαν από πειραματικές διεργασίες μικρότερης κλίμακας. Έτσι προέκυψαν οι ακόλουθες παράμετροι για την σύγκριση αποδοτικότητας και καταλληλότητας των εκρηκτικών υλών (Τσουτρέλης, 1997):

- Η ισχύς,
- Η ταχύτητα έκρηξης,
- Η παραγόμενη ενέργεια ή θερμότητα,
- Η πίεση έκρηξης,
- Η πυκνότητα της εκρηκτικής ύλης,
- Η ανθεκτικότητα στο νερό και
- Η ευαισθησία.

Η διάνοιξη έργων με τη μέθοδο διάτρησης – ανατίναξης αποτελεί την κλασική μέθοδο όρυξης. Αποτελείται από επιμέρους διακριτές φάσεις οι οποίες εκτελούνται διαδοχικά και στο σύνολό τους δομούν τον κύκλο εργασιών της μεθόδου. Όταν οι φυσικοχημικές ιδιότητες των πετρωμάτων στην υπόγεια κατασκευή είναι ευνοϊκές (συμπαγείς σχηματισμοί), μπορούν να χρησιμοποιηθούν εκρηκτικές ύλες για την διάνοιξη της σήραγγας. Ο βασικός κύκλος εργασιών για την διαδικασία διάτρησης – ανατίναξης, όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 3.7**, αποτελείται από τα εξής βήματα:

- Διάτρηση
- Γόμωση
- Ανατίναξη
- Αερισμός

- Απομάκρυνση χαλαρών σχηματισμών
- Φόρτωση και μεταφορά
- Υποστήλωση
- Ετοιμασία επόμενου κύκλου



*Εικόνα 3.7: Κύκλος εργασιών διάνοιξης στοάς με τη μέθοδο της διάτρησης – ανατίναξης (<http://www.railsystem.net/drill-and-blast-method/>).*

Οι χρησιμοποιούμενες τεχνικές εξορύξεως για την διάνοιξη σήραγγων με την τεχνική διάτρησης ανατίναξης διακρίνονται σε διάφορες επί μέρους μεθόδους διανοίξεως. Από αυτές οι πλέον συνήθεις είναι (Τσουτρέλης, 2001):

1. Η μέθοδος προσβολής του πετρώματος ταυτόχρονα σε όλη τη διατομή της σήραγγας (full face method)
2. Η μέθοδος προσβολής αρχικά του άνω τμήματος της σήραγγας και στη συνέχεια του κάτω υπό μορφή βαθμίδας, του οποίου ο σχεδιασμός πραγματοποιείται όπως και στις υπαίθριες ανατινάξεις (top heading and bench blasting).

Η επιλογή μεταξύ των μεθόδων αυτών εξαρτάται κυρίως από τις διαστάσεις της εγκάρσιας διατομής της σήραγγας καθώς και από την ανθεκτικότητα του πετρώματος, αλλά και από τον διαθέσιμο διατρητικό εξοπλισμό. Για σήραγγες μικρής διατομής υιοθετείται

πάντα η πρώτη μέθοδος σύμφωνα με την οποία το σχέδιο ανατίναξης προβλέπει την εξόρυξη του πετρώματος ταυτοχρόνως σε όλη την διατομή.

### **3.2.2. Διατάξεις διατρημάτων**

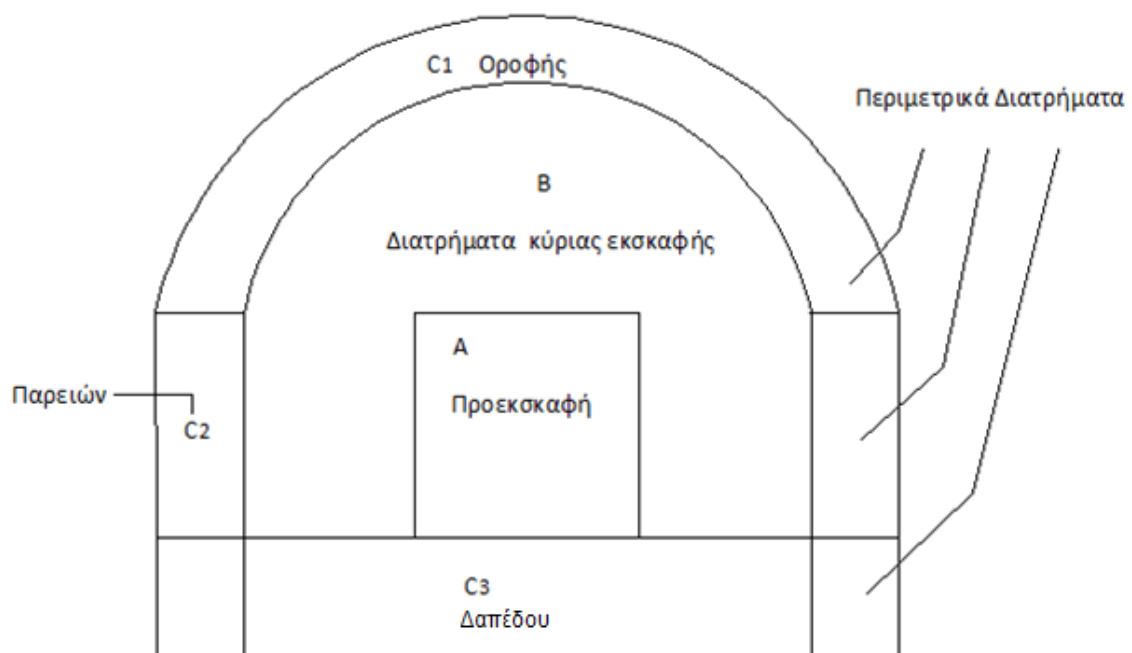
Οι δυσμενείς συνθήκες εξόρυξης των πετρωμάτων, που απαντώνται κατά την όρυξη των σήραγγων, λόγω της παρουσίας μίας ελεύθερης επιφάνειας περιορισμένων διαστάσεων, επιβάλλουν την εφαρμογή ειδικών τεχνικών κατά την όρυξη των διατρημάτων, ώστε να επιτευχθεί το καλύτερο δυνατό οικονομικό αποτέλεσμα. Οι επί μέρους τεχνικές ορύξεως των διατρημάτων εξαρτώνται από τις διαστάσεις της εγκάρσιας διατομής της σήραγγας, τα δομικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του πετρώματος και από τις απαιτήσεις του έργου. Σε κάθε όμως περίπτωση το σύνολο των διατρημάτων διατάσσεται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε με τη χρήση επιβραδυνόμενων μέσων εναύσεως οι εκρήξεις να γίνονται σταδιακά με σκοπό κάθε επόμενο στάδιο να εκμεταλλευτεί τις ελεύθερες επιφάνειες που δημιουργήσε το προηγούμενο. Η όλη διάταξη των διατρημάτων, όπως αυτή εμφανίζεται στο μέτωπο της σήραγγας, χωρίζεται συνήθως σε τρεις κατηγορίες, κάθε μία από τις οποίες εξορύσσει συγκεκριμένη περιοχή του μετώπου (Τσουτρέλης, 2001).

Τα διατρήματα που ανοίγονται στο μέτωπο της εκσκαφής μπορούν να διακριθούν σε τρεις κατηγορίες:

- Διατρήματα προεκσκαφής,
- Διατρήματα κύριας εκσκαφής ή διεύρυνσης και
- Διατρήματα διαμόρφωσης της διατομής.

Οι λεπτομέρειες της διάνοιξης των προηγούμενων κατηγοριών των διατρημάτων εξαρτάται από:

1. Την διατομή της σήραγγας,
2. Τα χαρακτηριστικά του πετρώματος,
3. Τον σκοπό της σήραγγας και
4. Την εμπειρία του προσωπικού.



**Εικόνα 3.8: Διαίρεση των διατρημάτων του μετώπου σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με την σειρά εκρήξεώς τους (Τσουτρέλης, 2001).**

Τα διατρήματα της πρώτης κατηγορίας (Α) συνιστούν τα λεγόμενα διατρήματα προεκσκαφής (cut holes). Αυτά αποσκοπούν με την έκρηξή τους να δημιουργήσουν στο πέτρωμα μία κατάλληλης γεωμετρικής μορφής εκσκαφή, της οποίας η επιφάνεια θα χρησιμεύσει ως επιφάνεια ανακλάσεως του κρουστικού κύματος από τις εκρήξεις της επόμενης σειράς υπονόμων (διατρημάτων που έχουν γομωθεί και επιγομωθεί κατάλληλα και είναι έτοιμα για έναυση). Αυτό θα επαναληφθεί για την επόμενη σειρά υπονόμων, μέχρι να ολοκληρωθεί η ανατίναξη στο μέτωπο.

Η δημιουργία της προεκσκαφής, από την οποία εξαρτάται η επιτυχία του όλου σχεδίου της ανατινάξεως, συνιστά την σπουδαιότερη διαδικασία σε μία ανατίναξη σε μέτωπο σήραγγας, αφού από αυτήν καθορίζεται η προχώρηση της σήραγγας.

Γύρω από τα διατρήματα της προεκσκαφής διατάσσονται κατάλληλα τα διατρήματα της κύριας εκσκαφής (B – stoping holes). Τα διατρήματα αυτά εκρήγνυνται με τέτοια σειρά

έτσι ώστε να εξορύξουν το πέτρωμα σταδιακά σε όλη σχεδόν τη διατομή της σήραγγας. Στο στάδιο αυτό η διατομή της σήραγγας δεν έχει διαμορφωθεί πλήρως.

Η τρίτη κατηγορία διατρημάτων (C) περιλαμβάνει τα περιμετρικά ή περιφερειακά διατρήματα (contour holes), τα οποία υποδιαιρούνται σε διατρήματα οροφής (roof holes – C<sub>1</sub>), σε διατρήματα παρειών ή αλλιώς πλευρικά (wall holes – C<sub>2</sub>) και σε διατρήματα δαπέδου (lifters – C<sub>3</sub>), τα οποία συνήθως, αλλά και με αρκετές εξαιρέσεις εκρήγνυνται τελευταία. Τα διατρήματα της κατηγορίας C αποσκοπούν στο να εξορύξουν το πέτρωμα στην ακριβή διατομή της σήραγγας αποφεύγοντας τόσο την υπέρθραυση (overbreak) όσο και την πρόκληση ρωγμάτωσης στο περιβάλλον της σήραγγας πέτρωμα. Επίσης σε περιπτώσεις εξόρυξης πετρωμάτων κοντά σε κατοικημένες περιοχές όπου απαιτούνται μειωμένες δονήσεις του εδάφους που προκαλούνται από τις εκρήξεις.

Τα περιμετρικά διατρήματα, διανοίγονται με μικρή κλίση προς τα έξω, ώστε να δημιουργείται μετά από κάθε ανατίναξη ο αναγκαίος χώρος για την τοποθέτηση της κεφαλής του διατρητικού μηχανήματος.

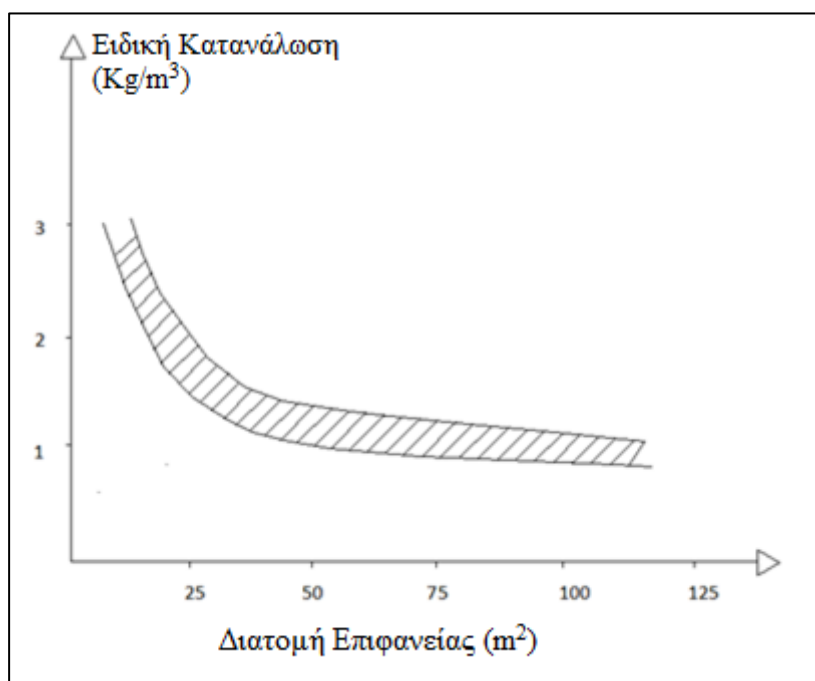
Στις παραπάνω περιπτώσεις εφαρμόζονται στα όρια του όγκου που πρόκειται να εξορυχτεί (οριογραμμή), ειδικές μέθοδοι εξόρυξης με εκρηκτικές ύλες οι οποίες ονομάζονται μέθοδοι ελεγχόμενων ανατινάξεων και έχουν σκοπό (Πολυχρονόπουλος, 2001):

1. Την μείωση της ρωγμάτωσης του πετρώματος που παραμένει, με τον σχηματισμό ενός επιπέδου πρότμησης στο οποίο ανακλώνται τα κρουστικά κύματα της έκρηξης και κατευθύνονται προς την επιθυμητή διεύθυνση.
2. Την μείωση της υπερεκσκαφής, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του προς μεταφορά εξορυσσόμενου υλικού και την μείωση των δαπανών για υλικά στήριξης.
3. Την καλύτερη εκμετάλλευση της ενέργειας έκρηξης για τον θρυμματισμό του εξορυσσόμενου υλικού.
4. Την μείωση των παραγόμενων δονήσεων κατά την διάρκεια της ανατίναξης.

### **3.2.3. Μέθοδος υπολογισμού και σχεδίασης της διάτρησης – ανατίναξης**

Η μέθοδος που αναλύεται παρακάτω και χρησιμοποιήθηκε για τον σχεδιασμό της διάτρησης – ανατίναξης στη συγκεκριμένη εργασία είναι η σουηδική μέθοδος Holmberg.

Προκειμένου να διευκρινιστούν οι συνθήκες κι οι αρχές των υπόγειων ανατινάξεων, πρέπει να γίνει ανάλυση μέσω των εμπειρικών τύπων για μία οικονομική και λειτουργική σχεδίαση της ανατίναξης. Η υπόγεια ανατίναξη είναι μία πιο περίπλοκη διαδικασία καθώς η μόνη ελεύθερη επιφάνεια, όπου η αρχική κοπή μπορεί να πραγματοποιηθεί είναι το μέτωπο της στοάς. Εξαιτίας των γεωμετρικών συνθηκών που επικρατούν στα υπόγεια μέτωπα, απαιτούνται μεγαλύτερες ποσότητες εκρηκτικών, οδηγώντας σε σημαντικά μεγαλύτερη ειδική κατανάλωση. Στην **Εικόνα 3.9** παρουσιάζονται η διακύμανση της κατανάλωσης των εκρηκτικών ανάλογα με το μέγεθος της σήραγγας (Persson et al, 1996).

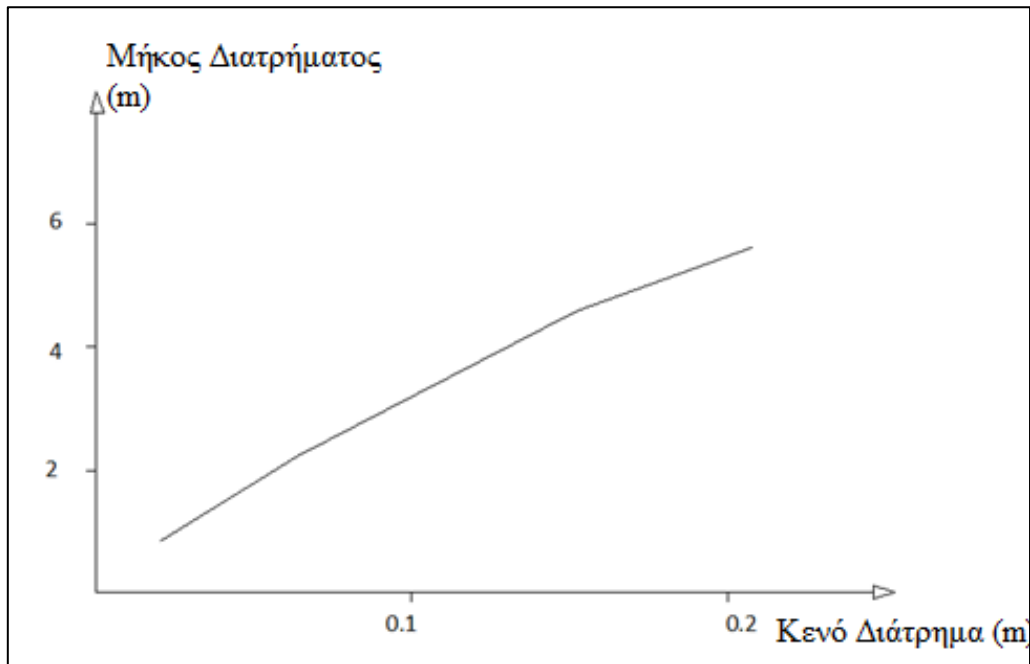


**Εικόνα 3.9:** Διάγραμμα ειδικής κατανάλωσης της ΕΥ σε συνάρτηση με τη διατομή της σήραγγας (Λιόλιος, Σημειώσεις μαθήματος διάτρησης – ανατίναξης).

Η επιλογή της κατάλληλης εκρηκτικής ύλης εξαρτάται από τις συνθήκες που επικρατούν στο μέτωπο (π.χ. υγρασία), από το ίδιο το πέτρωμα κ.λπ. Επίσης, η εκρηκτική ύλη θα πρέπει να έχει επαρκώς υψηλή ταχύτητα ανατίναξης έτσι ώστε να αποφευχθούν αρνητικά αποτελέσματα, όπως η μη θραύση του πετρώματος.

Το μήκος του διατρήματος εξαρτάται άμεσα από τη διάμετρο του κενού διατρήματος. Στην **Εικόνα 3.10** παρουσιάζεται το απαιτούμενο μήκος διατρήματος σαν συνάρτηση του

κενού διατρήματος όταν η επιθυμητή προχώρηση είναι 95% σε διάταξη προεκσκαφής με παράλληλα διατρήματα.



**Εικόνα 3.10: Μήκος διατρήματος συναρτήσει του κενού διατρήματος για προχώρηση 95% (Λιόλιος, Σημειώσεις μαθήματος διάτρησης – ανατίναξης).**

Το μήκος του διατρήματος δίνεται από την παρακάτω σχέση

$$H = 0.15 + 34.1 \times \phi - 39.4 \times \phi^2 \quad (3.13)$$

Όπου,  $\phi$  είναι η διάμετρος του κενού διατρήματος εκφρασμένη σε m και λαμβάνει τιμές  $0,05 \leq \phi \leq 0,25$  m.

Η προχώρηση  $I$  για το συγκεκριμένο μήκος διατρήματος δίνεται από τον τύπο:

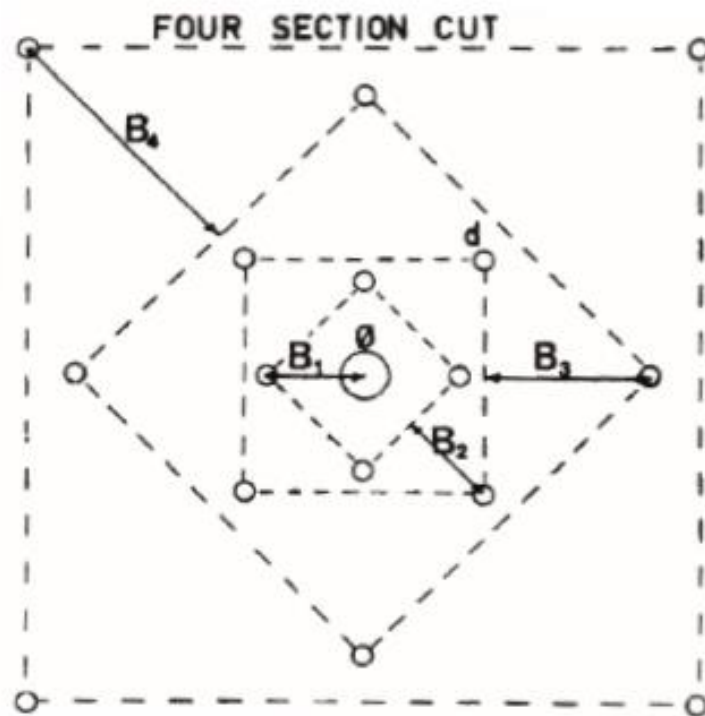
$$I = 0.95 \times H \quad (3.14)$$

Σε περίπτωση δύο ή περισσότερων αλληλοεπικαλυπτόμενων κενών διατρημάτων ο τύπος είναι:

$$\phi = \sqrt{n} \times d \quad (3.15)$$

όπου  $d$  είναι η διάμετρος των διατρημάτων σε μονάδες μήκους.

Η διάταξη των διατρημάτων για την αρχική κοπή με τη μέθοδο των τεσσάρων τετραγώνων παρουσιάζεται στην **Εικόνα 3.11**.



*Εικόνα 3.11: Τυπική διάταξη προεκσκαφής με παράλληλα διατρήματα για τη μέθοδο των τεσσάρων τετραγώνων (Λιόλιος, Σημειώσεις μαθήματος διάτρησης – ανατίναξης).*

Στη συνέχεια, θα αναλυθούν οι αναγκαίες παράμετροι για τον σχεδιασμό της αρχικής κοπής.

### Πρώτο τετράγωνο

Το μέγιστο φορτίο δεν θα πρέπει να ξεπερνάει το  $1.7\phi$  ώστε να επιτυγχάνεται βέλτιστη θραύση και «καθαρισμός» της κοπής. Δηλαδή:

$$B = 1,7 \times \phi \quad (3.16)$$

Όπου,  $\phi$  είναι η διάμετρος του κενού διατρήματος εκφρασμένη σε m.

Αν η παρέκκλιση στη διάτρηση είναι μέχρι 0,5 έως 1% τότε το πρακτικό φορτίο:

$$B_1 = 1,5 \times \phi \quad (3.17)$$



Όπου,  $\emptyset$  είναι η διάμετρος του κενού διατρήματος εκφρασμένη σε m.

Σε περίπτωση όπου υπάρχει μεγαλύτερο σφάλμα, τότε θα πρέπει να υπάρχει μεγαλύτερη μείωση. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιείται ο παρακάτω τύπος για το πρακτικό φορτίο:

$$B_1 = 1,7 \times \emptyset - (a_2 H + a_1) \quad (3.18)$$

όπου  $a_1$  (m) είναι το σφάλμα “κολάρου” (σφάλμα λανθασμένης τοποθέτησης διατρητικού),  $a_2$  (m/m) είναι το σφάλμα κλίσης του διατρήματος και  $H$ (m) το μήκος του διατρήματος.

Η γραμμική πυκνότητα γόμωσης εκφράζει την ποσότητα του εκρηκτικού που απαιτείται σε κάθε μέτρο γόμωσης του διατρήματος (Kg/m). Η γραμμική πυκνότητα γόμωσης του πρώτου τετραγώνου δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$l = 55 d \frac{\left(\frac{B}{\emptyset}\right)^{3/2} \left(B - \frac{\emptyset}{2}\right) \left(\frac{c}{0,4}\right)}{S_{ANFO}} \quad (3.19)$$

Όπου:

$d$  (m): διάμετρος διατρημάτων,

$B$  (m): μέγιστο φορτίο (απόσταση από κέντρο σε κέντρο),

$\emptyset$  (m): διάμετρος κενού διατρήματος,

$c$ : σταθερά πετρώματος και

$S_{ANFO}$ : σχετική ισχύς ΕΥ ως προς το ANFO.

### Δεύτερο τετράγωνο

Αν γνωρίζουμε τη γραμμική πυκνότητα του εκρηκτικού και το άνοιγμα της πλευράς του προηγούμενου τετραγώνου  $A$ , μπορούμε να εκφράσουμε το φορτίο  $B$  σύμφωνα με τον τύπο:

$$B = 8,8 \times 10^{-2} \left[ \frac{A l S_{ANFO}}{dc} \right]^{1/2} \quad (3.20)$$

Όπου:

$A$  (m): πλευρά του πρώτου τετραγώνου,

$I$  (Kg/m): γραμμική πυκνότητα γόμωσης,

$d$  (m): διάμετρος διατρημάτων,

$c$ : σταθερά πετρώματος και

$S_{ANFO}$ : σχετική ισχύς ΕΥ ως προς το ANFO.

Η θεωρητική πλευρά του τετραγώνου είναι:

$$A = \sqrt{2}(B_1 - F) \quad (3.21)$$

με  $B_1$  (m), το πρακτικό φορτίο του πρώτου τετραγώνου και

$$F = a_2 H + a_1.$$

όπου  $a_1$  (m) είναι το σφάλμα “κολάρου” (σφάλμα λανθασμένης τοποθέτησης διατρητικού),  $a_2$  (m/m) είναι το σφάλμα κλίσης του διατρήματος και  $H$ (m) το μήκος του διατρήματος.

Το πρακτικό φορτίο είναι:

$$B_2 = B - F \quad (3.22)$$

Όπου  $B$  (m), το φορτίο του πρώτου τετραγώνου και

$$F = a_2 H + a_1.$$

Όμως θα πρέπει  $0,5A < B_2 \leq 2A$ .

Για τα υπόλοιπα τετράγωνα (τρίτο, τέταρτο κλπ.), ο υπολογισμός του φορτίου και της γραμμικής πυκνότητας γόμωσης γίνεται όπως στο δεύτερο τετράγωνο. Το πλήθος των τετραγώνων είναι τέτοιο ώστε η πλευρά του τελευταίου να είναι της τάξης  $A \approx \sqrt{I}$ , όπου  $I$  (m) είναι η προχώρηση.

Η επιγόμευση των διατρημάτων δίνεται από τον τύπο:

$$h_s = 10d \quad (3.23)$$

Όπου  $d$  (m), η διάμετρος των διατρημάτων.

### Διατρήματα Δαπέδου

Τα φορτία για τα διατρήματα δαπέδου υπολογίζονται με τον ίδιο τρόπο όπως τα φορτία για την ανατίναξη των βαθμίδων. Το μέγιστο φορτίο για  $S/B = 1$  υπολογίζεται από τον εξής τύπο:

$$B = 0,9 \sqrt{\frac{l S_{ANFO}}{\hat{c} f}} \quad (3.24)$$

Με  $l$  (Kg/m): γραμμική πυκνότητα γόμωσης,

$c$ : σταθερά πετρώματος και

$S_{ANFO}$ : σχετική ισχύς ΕΥ ως προς το ANFO.

Όπου, το  $f$  είναι ένας συντελεστής με τυπική τιμή  $f=1,45$  και το  $\hat{c}$  είναι η σταθερά του πετρώματος, η οποία υπολογίζεται ως εξής:

$$\hat{c} = \begin{cases} c + 0,05 & \text{αν } B \geq 1,4 \text{ m} \\ c + \frac{0,07}{B} & \text{αν } B < 1,4 \text{ m} \end{cases} \quad (3.25)$$

Τα διατρήματα του δαπέδου που βρίσκονται προς το σύνορο της σήραγγας πρέπει να αποκλίνουν 'προς τα έξω' ώστε να διατηρείται η διατομή της. Συνήθως η γωνία απόκλισης  $\gamma$  λαμβάνει την τιμή  $3^\circ$  κι εξαρτάται από τον διαθέσιμο εξοπλισμό διάτρησης και το μήκος του διατρήματος.

Ο αριθμός των διατρημάτων δίνεται από τον τύπο:

$$N = \frac{T+2H \sin \gamma}{B} + 1 \quad (3.26)$$

Όπου:

$T$  (m): το πλάτος της σήραγγας,

$H$  (m): το μήκος του διατρήματος,

$B$  (m): το φορτίο των διατρημάτων του δαπέδου και

$\gamma$ , η γωνία απόκλισης σε μοίρες.

Το  $N$  στρογγυλοποιείται στον αμέσως μεγαλύτερο ακέραιο.

Η απόσταση των διατρημάτων (εκτός από τα γωνιακά διατρήματα) υπολογίζεται:

$$S_L = \frac{T+2H \sin \gamma}{N-1} \quad (3.27)$$

Όπου:

T (m): το πλάτος της σήραγγας,

H (m): το μήκος του διατρήματος,

N, ο αριθμός των διατρημάτων και

$\gamma$ , η γωνία απόκλισης σε μοίρες.

Η πρακτική απόσταση των γωνιακών διατρημάτων είναι:

$$S'_L = S_L - H \sin \gamma \quad (3.28)$$

Όπου:

$S_L$  (m): η απόσταση των διατρημάτων δαπέδου (εκτός των γωνιακών)

H (m): το μήκος του διατρήματος και

$\gamma$ , η γωνία απόκλισης σε μοίρες.

Το πρακτικό φορτίο θα πρέπει να μειώνεται από τη γωνία απόκλισης και την απόκλιση της διάτρησης, σύμφωνα με τον τύπο:

$$B_L = B - H \sin \gamma - F \quad (3.29)$$

Όπου:

B (m): μέγιστο φορτίο (απόσταση από κέντρο σε κέντρο),

H (m): το μήκος του διατρήματος,

$\gamma$ , η γωνία απόκλισης σε μοίρες και

$$F = a_2 H + a_1.$$

Το μήκος γόμωσης του πυθμένα θα πρέπει να είναι:

$$h_b = 1,25 B_L \quad (3.30)$$

Όπου:

$B_L$  (m): μέγιστο φορτίο (απόσταση από κέντρο σε κέντρο).

Ενώ το μήκος γόμωσης της στήλης:

$$h_c = H - h_b - 10d \quad (3.31)$$

Όπου:

$H$  (m): το μήκος του διατρήματος,

$H_b$  (m): το μήκος γόμωσης του πυθμένα και

$d$  (m): η διάμετρος των διατρημάτων.

Ωστόσο, αυτή η διαδικασία δεν είναι πολύ συνηθισμένη καθώς είναι πολύ χρονοβόρα. Συνήθως χρησιμοποιείται η ίδια συγκέντρωση στον πυθμένα και στη στήλη. Στα διατρήματα δαπέδου, πραγματοποιείται και η επιγόμωση  $h_s = 10d$ .

#### Διατρήματα διευρύνσεως (Stoping holes)

Για περιοχές εκατέρωθεν της προεκσκαφής, ο υπολογισμός γίνεται με τον ίδιο τρόπο όπως τα διατρήματα δαπέδου. Ο συντελεστής περιορισμού  $f$  είναι 1,45. Ο λόγος  $S/B$  είναι 1,25.

Για περιοχές άνωθεν της προεκσκαφής ο συντελεστής περιορισμού  $f$  είναι 1,2 και ο λόγος  $S/B$  είναι 1,25.

#### Διατρήματα οροφής (Roof holes)

Στα διατρήματα οροφής ο σχεδιασμός γίνεται με τη χρήση μεθόδου ελεγχόμενης ανατίναξης και μία από αυτές είναι η ομαλή ανατίναξη (smooth blasting).

Στην ομαλή ανατίναξη η απόσταση των διατρημάτων είναι γραμμική συνάρτηση της διαμέτρου των διατρημάτων και δίνεται από τον τύπο:

$$S = kd \quad (3.32)$$

όπου το  $k$  είναι συντελεστής που εξαρτάται από το πέτρωμα και λαμβάνει τιμές [15,16] και

$d$  (m): η διάμετρος των διατρημάτων.

Ο λόγος  $S/B$  είναι 0,8 και το μήκος επιγόμωσης  $h_s$  είναι μηδέν, καθώς δεν πραγματοποιείται επιγόμωση. Η γραμμική πυκνότητα γόμωσης είναι:

$$l = 90 d^2 \quad (3.33)$$

όπου το  $d$  η διάμετρος του διατρήματος εκφρασμένη σε m (Λιόλιος, 2018).

Στο επόμενο κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων που αναπτύχθηκαν παραπάνω.

#### **4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των δεδομένων τόσο για την μέθοδο ολομέτωπης κοπής (TBM) όσο και για την μέθοδο της διάτρησης – ανατίναξης.

Προκειμένου να γίνει καθορισμός των παραμέτρων για την κάθε μέθοδο και για να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα ορίστηκε ότι θα γίνει σχεδίαση για στοά με ίδιο εμβαδόν (περίπου  $25 \text{ m}^2$ ) συνολικού μήκους 6,7 km και στις δύο περιπτώσεις. Επιλέχθηκε να γίνει έτσι η σύγκριση καθώς η μέθοδος της ολομέτωπης κοπής (TBM) μπορεί να εκσκάψει μόνο κυκλική διατομή σήραγγας, ενώ με τη μέθοδο διάτρησης – ανατίναξης μπορεί να γίνει διάνοιξη οποιασδήποτε γεωμετρίας διατομής.

Επίσης, προκειμένου να μπορέσει να πραγματοποιηθεί σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων, θεωρήθηκαν 2 βάρδιες υπόγειων εργασιών προχώρησης. Με βάση τις τιμές που υπάρχουν στην αγορά για το κόστος κτήσης των μηχανημάτων επιλέχθηκε ένα μέσο κόστος τόσο για το TBM όσο και για το διατρητικό φορείο (Jumbo).

#### 4.1. Αποτελέσματα σχεδίασης μηχανήματος ολομέτωπης κοπής (TBM)

Προκειμένου μία μηχανή ολομέτωπης κοπής (TBM) να είναι αποτελεσματική θα πρέπει να έχει τις κατάλληλες σχεδιαστικές παραμέτρους ανάλογα ωστόσο και με τις επικρατούσες γεωλογικές συνθήκες. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, οι γεωλογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή μελέτης είναι ο βιοτιτικός γνεύσιος ο οποίος παρουσιάζει αντοχή σε μονοαξονική θλίψη 100 μέχρι 190 MPa, με μέσο όρο περίπου στα 126 MPa. Λόγω της αντοχής που παρουσιάζει το πέτρωμα, επιλέχθηκε μηχανήμα ολομέτωπης κοπής ανοιχτού τύπου χωρίς ασπίδα.

Σύμφωνα με τις προδιαγραφές του έργου η διάμετρος της κοπτικής κεφαλής του TBM είναι 5,7 m, ενώ των κοπτικών δίσκων είναι 432 mm. Το βάθος διείσδυσης της κοπτικής κεφαλής είναι 1 cm/rev, η γωνιακή ταχύτητα της κεφαλής είναι 6 rev/min και η απόσταση μεταξύ των κοπτικών δίσκων είναι 7,5 cm. Ο ρυθμός διάτρησης PR με βάση τον τύπο 3.2 υπολογίστηκε στα 3,6 m/h.

Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των δεδομένων του TBM παρουσιάζονται στους πίνακες παρακάτω.

Με βάση τις εξισώσεις που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 3 (εξισώσεις 3.2 έως 3.3 και 3.7 έως 3.12) για την μέθοδο της ολομέτωπης κοπής υπολογίστηκαν οι σχεδιαστικές παράμετροι αυτού όπως φαίνονται στον **Πίνακα 4.1**. Στον **Πίνακα 4.2**, παρουσιάζονται επίσης τα αποτελέσματα της επεξεργασίας της μεθόδου που χρειάστηκαν για τον υπολογισμό των παραμέτρων του μηχανήματος. Για τη παράμετρο της γωνίας επαφής του δίσκου – πετρώματος (2ψ) χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση 3.5 του προηγούμενου κεφαλαίου.

**Πίνακας 4.1:** Αποτελέσματα σχεδιαστικών παραμέτρων του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής (TBM).

Σχεδιαστικές παράμετροι TBM	
Διάμετρος κοπτικής κεφαλής D (m)	5,7
Αριθμός κοπτικών δίσκων N	38
Ακτίνα κοπτικού δίσκου R (mm)	216
Πλάτος αιχμής δίσκου w (cm)	1,25



Μέγιστη ταχύτητα περιστροφής δίσκων $\omega$ (m/min)	150
Απόσταση μεταξύ κοπτικών δίσκων $S$ (cm)	7,5
Γωνιακή ταχύτητα περιστροφής κεφαλής, $\omega$ (rpm)	6
Βάθος κοπής ανά περιστροφή $p$ (cm/rev)	1
Ρυθμός διάτρησης (PR) (m/h)	3,6
Ρυθμός προχώρησης (AR) (m/h)	0,36
Πίεση θραύσης $P_0$ (MPa)	175,5
Ορθή δύναμη ανά δίσκο (KN)	142,5
Συνολική δύναμη ώσης (KN)	5414
Συντελεστής κοπής CC	0,15
Ροπή στρέψης κεφαλής (Torque) (KNm)	1425
Ισχύς TBM Power (kW)	895
Ισχύς TBM P Power (hp)	1200

**Πίνακας 4.2:** Αποτελέσματα σχεδιαστικών παραμέτρων του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής (TBM).

Σταθερά, C	2
Απόσταση μεταξύ κοπτικών δίσκων, $S$ (cm)	7,5
Αντοχή του πετρώματος σε εφελκυσμό, UTS (MPa)	9
Αντοχή του πετρώματος σε ανεμπόδιστη θλίψη, UCS (MPa)	126
Ακτίνα κοπτικού δίσκου, $R$ (cm)	21,6
Πλάτος αιχμής δίσκου, $w$ (cm)	1,25
Βάθος κοπής ανά περιστροφή, $p$ (cm/rev)	1
Γωνιακή ταχύτητα περιστροφής κεφαλής, $\omega$ (rev/min)	6
Γωνία επαφής δίσκου - πετρώματος, $2\psi$ (rad)	0,31

Στον **Πίνακα 4.3**, φαίνονται τα αποτελέσματα που λήφθηκαν μετά τον σχεδιασμό της μεθόδου ολομέτωπης κοπής (TBM) θεωρώντας μια μέση ενιαία ποιότητα βραχομάζας και μια μέση τιμή συντελεστή χρήσης  $U=0,13$  σύμφωνα με το διάγραμμα της **Εικόνας 3.6**. Για δύο βάρδιες σύμφωνα με αυτή την χονδροειδή παραδοχή με ρυθμό προχώρησης τα 6,4 m/ημέρα. Συνεπώς, ο χρόνος όρυξης που θα χρειαστεί γι' αυτή τη μέθοδο με την παραδοχή μέσων

τιμών θα είναι 900 μέρες και θα χρειασθούν συνολικά 2,5 χρόνια για την περάτωση της όρυξης με TBM. Ωστόσο, θα υπάρχει και η τρίτη βάρδια στην οποία θα πραγματοποιούνται εργασίες συντήρησης του μηχανήματος, τόσο στην κεφαλή όσο και στους κοπτικούς δίσκους. Επίσης, στη βάρδια αυτή θα πραγματοποιούνται εργασίες υποστήριξης της στοάς, εάν αυτό απαιτείται.

**Πίνακας 4.3: Εκτιμώμενος προσεγγιστικά χρόνος που απαιτείται για την όρυξη στοάς μήκους 6,7 km με τη μέθοδο ολομέτωπης κοπής (TBM).**

Βάρδιες	2
Ρυθμός προχώρησης (m/day)	6,4
Χρόνος όρυξης (Days)	900
Χρόνος όρυξης (years)	2,5

Σε μια πιο ενδελεχή - σε δεύτερο βαθμό- προσέγγιση θεωρήθηκαν τρία σενάρια 1, 2, 3 κατανομής ποιότητων βραχομάζας κατά μήκος της σχεδιαζόμενης στοάς. Κάθε σενάριο χαρακτηρίζεται από ποσοστά μήκους της στοάς που καταλαμβάνει και τιμές του συντελεστή χρήσης του TBM. Με βάση αυτά τα 3 σενάρια υπολογίσθηκαν οι σταθμικοί μέσοι όροι του ρυθμού προχώρησης με TBM και τελικά ο χρόνος περάτωσης του υπόγειου έργου που κυμαίνεται από 840 έως 1058 ημέρες. Σημειώνεται ότι τα 3 αυτά σενάρια δεν εξετάσθηκαν για την περίπτωση της διάτρησης – ανατίναξης λόγω της ευελιξίας της μεθόδου σε διαφορετικές συνθήκες.

**Πίνακας 4.4: Διαφορετικά σενάρια για εκτίμηση χρόνου όρυξης με τη μέθοδο ολομέτωπης κοπής με διαφορετικές κλάσεις υποστήριξης και συντελεστή χρήσης .**

Κατανομή κλάσεων υποστήριξης		Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3
Σχετικό μήκος στοάς για Κλάση Α	[%]	80	64	40
Σχετικό μήκος στοάς για Κλάση Β	[%]	17	30	40
Σχετικό μήκος στοάς για Κλάση C	[%]	3	6	20
		100%	100%	100%
<b>Συντελεστής χρήσης TBM (utilization)</b>				
Μέσος συντελεστής για Κλάση Α	[%]	15	15	15
Σχετικό μήκος στοάς για Κλάση Β	[%]	10	10	10
Σχετικό μήκος στοάς για Κλάση C	[%]	5	5	5
<b>Πραγματικός ρυθμός προχώρησης (AR)</b>		<b>Σενάριο 1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>

Ωρες εργασίας ανά ημέρα	[h/d]	16	16	16
Κλάση A	[m/d]	8,6	8,6	8,6
Κλάση B	[m/d]	5,8	5,8	5,8
Κλάση C	[m/d]	2,9	2,9	2,9
Σταθμικός μέσος όρος	[m/d]	8,0	7,4	6,3
<b>Σύνολο TBM [days]</b>	[d]	840	902	1058
<b>Σύνολο TBM [years]</b>	[y]	<b>2,3</b>	<b>2,5</b>	<b>2,9</b>

Στη συνέχεια παρατίθενται οι παραδοχές και οι σχέσεις για τον υπολογισμό του μοναδιαίου κόστους κτήσης και λειτουργίας του TBM. Το μοναδιαίο κόστος δεν περιλαμβάνει το κόστος των εργατικών και της υποστήριξης, αερισμού και φωτισμού και άντλησης της στοάς. Για να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα με τον υπολογισμό του μοναδιαίου κόστους της Δ-Α και σε εκείνη την περίπτωση το μοναδιαίο κόστος δεν περιλαμβάνει το κόστος των εργασιών και υλικών που σχετίζονται με υποστήριξη, άντληση, αερισμό και φωτισμό της στοάς. Το κόστος εργατικών είναι συγκρίσιμο στις 2 τεχνικές αφού στην περίπτωση του TBM θα απασχολούνται 2 άτομα/ βάρδια επί 2 βάρδιες ίσο με 4 άτομα συνολικά που αν και λιγότερα από την ομάδα Δ-Α (2 χειριστές διατρητικού/βάρδια συν 2 γομωτές ανά βάρδια επί 2 βάρδιες ίσο με 8 άτομα) που θα απασχολούνται 8 εργαζόμενοι τις 2 βάρδιες, θα έχουν σχεδόν διπλάσιο κόστος οπότε περίπου θα εξισώνεται το εργατικό κόστος στις 2 τεχνικές. Εν τέλει υπολογίζονται το κόστος απόσβεσης, το κόστος λειτουργίας, το κόστος συντήρησης και το κόστος των κοπτικών δίσκων.

Υποθέτοντας γραμμική απόσβεση του μηχανήματος για τον υπολογισμό του ετήσιου κόστους απόσβεσης χρησιμοποιήθηκε ο τύπος [Newnan D.G. Engineering Economic Analysis, Engineering Press Inc, 3rd Edition, San Jose, California]:

$$ADC = \frac{1}{N_y} (P_c - S_c) \quad (4.1)$$

Όπου,

- $ADC$  = ετήσιου κόστους απόσβεσης [€/έτος]
- $N_y$  = αριθμός ετών χρήσης του μηχανήματος
- $P_c$  = κόστος κτήσης του μηχανήματος [€]
- $S_c$  = υπολειπόμενη αξία του μηχανήματος [€]

Για τον υπολογισμό του λειτουργικού κόστους που σχετίζεται με την κατανάλωση καυσίμου του TBM, και συμβολίζεται ως OC (εκφρασμένου σε €/έτος) (το TBM χρησιμοποιεί ηλεκτρογεννήτρια που καταναλώνει πετρέλαιο κατά την λειτουργία της) χρησιμοποιήθηκε η σχέση:

$$OC = FCR \cdot HP \cdot (hours / day) \cdot (days / year) \cdot U \cdot (euros / lt) \quad (4.2)$$

Όπου

- $FCR [t / HP / hour]$  = ρυθμός κατανάλωσης καυσίμου
- $P [HP]$  = ισχύς του TBM
- $U$  = συντελεστής χρήσης του μηχανήματος

Για τον υπολογισμό του λειτουργικού κόστους που σχετίζεται με την κατανάλωση λιπαντικών του TBM και συμβολίζεται ως LC που εκφράζεται σε €/έτος χρησιμοποιήθηκε ο εμπειρικός τύπος:

$$LC = 0.25 \cdot OC \quad (4.3)$$

Το κόστος συντήρησης του TBM (η συντήρηση του γίνεται στην 3<sup>η</sup> βάρδια σε ημερήσια βάση και σε εβδομαδιαία, μηνιαία βάση) υπολογίζεται από τον εμπειρικό τύπο:

$$M = P_c \cdot MC \quad (4.4)$$

Όπου, MC είναι ο συντελεστής χρήσης του μηχανήματος. Για καινούργιο μηχάνημα ο MC λαμβάνει τιμή 0,08 και για μεταχειρισμένο 0,16.

Το συνολικό κόστος αγοράς κοπτικών δίσκων του TBM και της αντικατάστασης τους μετά την ωφέλιμη διάρκεια ζωής τους λόγω φθοράς των που συμβολίζεται ως  $C_{td}$  (σε €) υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο (οι ποσότητες εντός αγκύλης  $[\ ]$  σημαίνει στρογγυλοποίηση προς τον αμέσως μικρότερο ακέραιο αριθμό του δεκαδικού αριθμού που θα βρεθεί από την πράξη εντός της αγκύλης):

$$C_{td} = N \cdot C_d \cdot \left( \left[ \frac{L}{C_{dl}} \right] + 1 \right) \quad (4.5)$$

Όπου

- $C_d$  = κόστος αγοράς του δίσκου [€/δίσκο]
- $L$  = συνολικό μήκος όρυξης της στοάς [m]
- $C_{dl} = 300$  m/disc συμβολίζει τη μέση εκτιμώμενη διάρκεια ζωής των δίσκων πριν την αντικατάστασή τους. Για μήκος στοάς  $L=6700$  m και 300m/disc μπορεί να βρεθεί ότι θα γίνουν 23 αντικαταστάσεις όλων των δίσκων της κεφαλής του TBM μέχρι την ολοκλήρωση του τεχνικού έργου.

Οι ίδιες σχέσεις χρησιμοποιούνται και για τον ταινιόδρομο μεταφοράς του θραυσμένου πετρώματος στην έξοδο της στοάς.

Στον **Πίνακα 4.5.** παρουσιάζονται τα οικονομικά στοιχεία για τη μέθοδο της ολομέτωπης κοπής (TBM). Πιο συγκεκριμένα, το κόστος κτήσης του μηχανήματος ανέρχεται στα 6 εκατομμύρια ευρώ με χρόνο απόσβεσης τα 3 έτη κι εναπομένουσα αξία στα 1,8 εκατομμύρια ευρώ. Από τον παρακάτω πίνακα φαίνεται ότι για τη διάνοιξη του μήκους της στοάς το συνολικό κόστος ανά μέτρο είναι 925 €/m.

**Πίνακας 4.5: Πίνακας οικονομικών στοιχείων για τη μέθοδο ολομέτωπης κοπής (TBM).**

Κόστος κτήσης μηχανήματος TBM	€	6.000.000
Κόστος κτήσης ταινιοδρόμου	€	1.500.000
Χρόνος απόσβεσης	Έτος	3
Υπολλειματική αξία TBM	€	1.800.000
Υπολλειματική αξία ταινιοδρόμου	€	300.000
Κόστος κοπτικών	€	1.311.000
Ετήσιο κόστος απόσβεσης TBM	€	1.400.000
Ετήσιο Κόστος καυσίμων και λιπαντικών γεννήτριας TBM	€	113.880
Ετήσιο Κόστος συντήρησης TBM	€	18.221
Ετήσιο κόστος απόσβεσης ταινιοδρόμου	€	400.000
Ετήσιο Κόστος καυσίμων και λιπαντικών ταινιοδρόμου	€	18.980
Ετήσιο Κόστος συντήρησης ταινιοδρόμου	€	3.037
Κόστος ανά μέτρο	€/m	925

Το ανωτέρω μοναδιαίο κόστος όρυξης-μεταφοράς με το TBM αφορά τις μέσες γεωτεχνικές συνθήκες που θα συναντηθούν στην πορεία του έργου με μέσο συντελεστή απασχόλησης του TBM  $U=13\%$ . Κατόπιν προχωρήσαμε στην εκτίμηση του μοναδιαίου κόστους για τα 3 σενάρια ποιότητας ή κλάσεων υποστήριξης της βραχομάζας στους

παρακάτω πίνακες. Από ό,τι φαίνεται το μοναδιαίο κόστος της μηχανικής όρυξης της συνδετήριας στοάς κυμαίνεται από 875 έως και 1031 €/m.

**Πίνακας 4.6: Γενικά δεδομένα και παραδοχές για τα 3 σενάρια.**

Υποθέσεις		1	2	3
1	Τιμή πετρελαίου (€/lt)	1	1	1
2	Συνολικό μήκος στοάς (m)	6.700	6.700	6.700
3	Χρόνια απόσβεσης εξοπλισμού	3	3	3
4	Αριθμός ωρών εργασίας ανά ημέρα	16	16	16
5	Συντελεστής συντήρησης	0,16	0,16	0,16

**Πίνακας 4.7: Σχεδιαστικά και κοστολογικά δεδομένα TBM για τα 3 σενάρια.**

	1	2	3
Συντελεστής χρήσης μηχανήματος (%)	15	13	11
Κόστος κτήσης TBM (€)	6.000.000	6.000.000	6.000.000
Υπολειμματική αξία TBM (€)	1.800.000	1.800.000	1.800.000
Ιπποδύναμη TBM (HP)	1.200	1.200	1.200
Ρυθμός κατανάλωσης καυσίμου (lt/HP/hr)	0,1	0,1	0,1
Συνολικό μήκος διάτρησης (m)	6.700	6.700	6.700
Αριθμός κοπτικών δίσκων	38	38	38
Ζωή κοπτικών δίσκων (m/δίσκο)	300	300	300
Μοναδιαίο κόστος κοπτικού δίσκου (€/δίσκο)	1.500	1.500	1.500
Κόστος κτήσης μεταφορικής ταινίας (€)	1.500.000	1.500.000	1.500.000
Υπολειμματική αξία ταινιοδρόμου (€)	300.000	300.000	300.000
Ιπποδύναμη ταινιοδρόμου (HP)	200	200	200

**Πίνακας 4.8: Υπολογισμός του μοναδιαίου κόστους μηχανικής όρυξης για τα 3 σενάρια.**

	1	2	3
Αριθμός αντικαταστάσεων κοπτικών δίσκων	23	23	23
Συνολικό κόστος κοπτικών δίσκων (€)	1.311	1.311	1.311
Συνολικό κόστος κοπτικών δίσκων/ χρόνο (€/year)	570.000	524.400	452.069
Λειτουργικό κόστος καυσίμων και λιπαντικών (€/year)	131.400	113.880	96.360
Απόσβεση TBM (€/year)	1.400	1.400	1.400
Συντήρηση TBM (€/year)	21.024	18.221	15.418
Λειτουργικό κόστος καυσίμων και λιπαντικών ταινιοδρόμου (€/year)	21.900	18.980	16.060
Απόσβεση ταινιοδρόμου (€/year)	400.000	400.000	400.000
Συντήρηση ταινιοδρόμου (€/year)	3.504	3.037	2.570

Συνολικό ετήσιο κόστος (€/year)	2.547.828	2.478.518	2.382.476
Συνολικό κόστος (€)	5.860.004	6.196.294	6.909.181
Συνολικό μοναδιαίο κόστος (€/m)	875	925	1.031

## 4.2. Σχεδιασμός διάτρησης – ανατίναξης

Παρακάτω αναλύονται τα αποτελέσματα και οι παράμετροι για τον σχεδιασμό της διάτρησης ανατίναξης για τετραγωνική στοά πλευράς 5 x 5 m. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τον σχεδιασμό της ανατίναξης είναι η μέθοδος Holmberg και τα χαρακτηριστικά της αρχικής κοπής παρουσιάζονται παρακάτω.

### ➤ Αρχική κοπή

Για τη δημιουργία του κενού μετώπου που απαιτείται επιλέχθηκε η περίπτωση δύο κενών διατρημάτων με διάμετρο 102 mm. Ο υπολογισμός της τελικής διαμέτρου που προκύπτει υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\phi = \sqrt{2}d \quad (4.6)$$

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί ο σχεδιασμός της διάτρησης – ανατίναξης ορίστηκαν τα αρχικά δεδομένα αυτής τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω στον **Πίνακα 4.9**.

**Πίνακας 4.9:** Δεδομένα αρχικής κοπής για τον σχεδιασμό της διάτρησης – ανατίναξης.

Αρχική κοπή	
Διάμετρος κενού διατρήματος (mm)	144,2
Γραμμική πυκνότητα γόμωσης (kg/m)	1,36
Σφάλμα κολάρου (m)	0,02
Σφάλμα κλίσης (m/m)	0,01
Επιγόμωση $h_s$ (m)	0,45
Θερμότητα εκρηκτικής ύλης που θα χρησιμοποιηθεί (Kcal/kg)	965



Όγκος αερίων εκρηκτικής ύλης που θα χρησιμοποιηθεί (m <sup>3</sup> /kg)	920
Θερμότητα εκρηκτικής ύλης αναφοράς (ANFO) (Kcal/kg)	920
Αέρια εκρηκτικής ύλης αναφοράς (ANFO) (m <sup>3</sup> /kg)	970
Ισχύς	1,03
Σταθερά πετρώματος c	0,4

Η εκρηκτική ύλη που επιλέχθηκε για να χρησιμοποιηθεί στη συγκεκριμένη διάνοιξη είναι το γαλάκτωμα με πυκνότητα 1200 kg/m<sup>3</sup>. Η γραμμική πυκνότητα γόμωσης υπολογίζεται από το τύπο:

$$l = \frac{\pi d^2}{4} \rho_{εκ} \quad (4.7)$$

Τα διαθέσιμα φυσίγγια που χρησιμοποιήθηκαν για τον σχεδιασμό της διάτρησης – ανατίναξης παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.10.**, όπως και η γραμμική πυκνότητα γόμωσής τους, όπως υπολογίστηκε με βάση την παραπάνω εξίσωση:

**Πίνακας 4.10: Διαστάσεις και γραμμική πυκνότητα γόμωσης διαθέσιμων φυσιγγίων.**

Διαθέσιμα Φυσίγγια (mm)	Γραμμική πυκνότητα Γόμωσης (kg/m <sup>3</sup> )
38x385	1,36
32x420	0,97
28x255	0,74

Για το πρώτο τετράγωνο της διάνοιξης υπολογίστηκε το μήκος διατρήματος, το μέγιστο φορτίο που μπορεί να εξορυχθεί, το πρακτικό φορτίο και το σφάλμα διάτρησης. Ο υπολογισμός αυτών των παραμέτρων έγινε με τις εξισώσεις 3.13, 3.16 και 3.17. Η γραμμική πυκνότητα γόμωσης (Εξίσωση 3.19) υπολογίστηκε στα 0,92 kg/m κι επομένως επιλέχθηκε το φυσίγγιο με τη πιο κοντινή γραμμική πυκνότητα γόμωσης. Τέλος, υπολογίστηκε ο αριθμός των φυσιγγίων, n, που θα χρειαστούν για την ανατίναξη του πρώτου τετραγώνου, καθώς και η ποσότητα εκρηκτικών. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.11.**

**Πίνακας 4.11: Αποτελέσματα πρώτου τετραγώνου αρχικής κοπής της διάτρησης – ανατίναξης.**

Πρώτο τετράγωνο	
Μήκος διατρήματος H (m)	4,25
Μέγιστο Φορτίο τετραγώνου B (m)	0,25
Πρακτικό φορτίο B <sub>1</sub> (m)	0,18
$F = \alpha_1 + \alpha_2 \times H$ (m)	0,06
Πλευρά τετραγώνου A <sub>1</sub> (m)	0,26
Γραμμική πυκνότητα γόμωσης l (kg/m)	0,92
Αριθμός φυσιγγίων n	15
Ποσότητα εκρηκτικού W (kg)	11,31

Στον **Πίνακα 4.12.** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το δεύτερο τετράγωνο της αρχικής κοπής όπου υπολογίστηκε για κάθε διαθέσιμο φυσιγγίο το μέγιστο φορτίο B και επιλέχθηκε αυτό που ήταν πιο κοντά στα δεδομένα της ανατίναξης. Ο υπολογισμός του φορτίου έγινε με βάση την εξίσωση 3.20. Επίσης, όπως και στο πρώτο τετράγωνο υπολογίστηκε ο αριθμός των φυσιγγίων, n, που θα χρειαστούν για την ανατίναξη του δεύτερου τετραγώνου, η πλευρά του τετραγώνου (εξίσωση 3.21) καθώς και η ποσότητα εκρηκτικών.

**Πίνακας 4.12: Αποτελέσματα δεύτερου τετραγώνου αρχικής κοπής της διάτρησης – ανατίναξης.**

Δεύτερο τετράγωνο	
Θεωρητική Πλευρά τετραγώνου A (m)	0,17
Πλευρά τετραγώνου A <sub>2</sub> (m)	0,48
Αριθμός φυσιγγίων n	9
Ποσότητα εκρηκτικού W (kg)	14,59

Στον **Πίνακα 4.12.(α)**, υπολογίστηκε το μέγιστο φορτίο καθώς και το πρακτικό για κάθε διαθέσιμη διάμετρο φυσιγγίου αντίστοιχα. Το πρακτικό φορτίο για την διάμετρο των 28 mm απορρίφθηκε διότι είναι το ίδιο με το πρακτικό φορτίο του πρώτου τετραγώνου και δεν μπορεί να επιτευχθεί μεγαλύτερη πλευρά στο δεύτερο τετράγωνο όπου είναι και το

ζητούμενο. Γι' αυτό το λόγο, επιλέχθηκε το πρακτικό φορτίο που προέκυψε με διάμετρο φυσιγγίου 32 mm.

**Πίνακας 4.12.(α): Τιμές μέγιστου φορτίου και πρακτικού φορτίου δεύτερου τετραγώνου αρχικής κοπής της διάτρησης – ανατίναξης.**

	Μέγιστο Φορτίο B (m)	Πρακτικό Φορτίο B2 (m)
Για $\varphi_{38}$	0,32	0,26
Για $\varphi_{32}$	0,27	0,21
Για $\varphi_{28}$	0,24	0,17

Για το τρίτο τετράγωνο της διάνοιξης ακολουθήθηκε η ίδια ακριβώς διαδικασία με το προηγούμενο τετράγωνο και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω στον **Πίνακα 4.12.**

**Πίνακας 4.13: Αποτελέσματα τρίτου τετραγώνου αρχικής κοπής της διάτρησης – ανατίναξης.**

Τρίτο τετράγωνο	
Θεωρητική Πλευρά τετραγώνου A (m)	0,39
Πλευρά τετραγώνου $A_3$ (m)	0,93
Αριθμός φυσιγγίων n	10
Ποσότητα εκρηκτικού W (kg)	20,96

Στον **Πίνακα 4.13.(α)**, υπολογίστηκε το μέγιστο φορτίο καθώς και το πρακτικό για κάθε διαθέσιμη διάμετρο φυσιγγίου αντίστοιχα. Για να επιτευχθεί μεγαλύτερη πλευρά στο τρίτο τετράγωνο σε σχέση με το δεύτερο επιλέγεται φυσίγγιο με μεγαλύτερη διάμετρο από ότι στο δεύτερο έτσι ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερο φορτίο. Σύμφωνα με τις εξισώσεις που έχουν αναφερθεί παραπάνω παρατηρείται ότι η πλευρά του τετραγώνου είναι ανάλογη με το φορτίο. Γι' αυτό το λόγο, επιλέχθηκε το πρακτικό φορτίο που προέκυψε με την αμέσως επόμενη διαθέσιμη διάμετρο φυσιγγίου, αυτή των 38 mm.

**Πίνακας 4.13.(α): Τιμές μέγιστου φορτίου και πρακτικού φορτίου τρίτου τετραγώνου αρχικής κοπής της διάτρησης – ανατίναξης.**

	Μέγιστο Φορτίο B (m)	Πρακτικό Φορτίο B2 (m)
Για $\varphi_{38}$	0,48	0,42
Για $\varphi_{32}$	0,41	0,35
Για $\varphi_{28}$	0,36	0,29

Τέλος, υπολογίστηκαν οι παράμετροι και του τέταρτου τετραγώνου προκειμένου να ολοκληρωθεί η αρχική κοπή. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η ακριβώς ίδια με τα προηγούμενα βήματα σχεδιασμού της αρχικής κοπής της ανατίναξης και παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.14**.

**Πίνακας 4.14:** Αποτελέσματα τέταρτου τετραγώνου αρχικής κοπής της διάτρησης – ανατίναξης.

Τέταρτο τετράγωνο	
Θεωρητική Πλευρά τετραγώνου A (m)	0,84
Πλευρά τετραγώνου A4 (m)	1,58
Αριθμός φυσιγγίων n	10
Ποσότητα εκρηκτικού W (kg)	20,96

Στον **Πίνακα 4.14.(α)**, υπολογίστηκε το μέγιστο φορτίο καθώς και το πρακτικό για κάθε διαθέσιμη διάμετρο φυσιγγίου αντίστοιχα. Τα φορτία των φυσιγγίων με διάμετρο 28 και 32 mm αντίστοιχα απορρίφθηκαν λόγω του γεγονότος ότι προέκυψαν μικρές τιμές φορτίων που δεν δίνουν τη μέγιστη δυνατή πλευρά του τέταρτου τετραγώνου, η οποία έχει το ρόλο της ελεύθερης επιφάνειας στην κύρια ανατίναξη. Γι' αυτό το λόγο, επιλέχθηκε το πρακτικό φορτίο που προέκυψε με διάμετρο φυσιγγίου 38 mm.

**Πίνακας 4.14.(α):** Τιμές μέγιστου φορτίου και πρακτικού φορτίου δεύτερου τετραγώνου αρχικής κοπής της διάτρησης – ανατίναξης.

	Μέγιστο Φορτίο B (m)	Πρακτικό Φορτίο B2 (m)
Για $\varphi_{38}$	0,71	0,65
Για $\varphi_{32}$	0,60	0,54
Για $\varphi_{28}$	0,53	0,46

➤ Διατρήματα Δαπέδου

Στον **Πίνακα 4.15.** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τα χαρακτηριστικά των διατρημάτων του δαπέδου. Έχει υπολογιστεί το μέγιστο φορτίο που απαιτείται, ο αριθμός αυτών, το μήκος γόμωσης του πυθμένα και της στήλης καθώς και η συνολική ποσότητα εκρηκτικής ύλης που χρειάζονται τα διατρήματα αυτά. Ο υπολογισμός των παραμέτρων αυτών έγινε με τις εξισώσεις 3.24 έως 3.31.

**Πίνακας 4.15: Αποτελέσματα διατρημάτων δαπέδου διάτρησης – ανατίναξης.**

	Διατρήματα Δαπέδου (Lifters)	
	Μέγιστο Φορτίο B (m)	1,32
	f	1,45
	$\hat{c}$	0,45
	Αριθμός διατρημάτων N	5
	$\gamma(^{\circ})$	3
	Απόσταση διατρημάτων $S_L(m)$	1,36
	Απόσταση γωνιακών διατρημάτων $S_L' (m)$	1,14
	Πρακτικό Φορτίο $B_L(m)$	1,04
Πυθμένας	Μήκος (m) $h_b$	1,29
	Αριθμός φυσιγγίων n	3,5
Στήλη	Μήκος (m) $h_c$	2,50
	Γραμμική Πυκνότητα γόμωσης στήλης $l_c$	0,95
	Αριθμός φυσιγγίων n	6
	Ποσότητα εκρηκτικών (Kg)	21,33

➤ Διατρήματα Οροφής

Στον **Πίνακα 4.16.** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τα χαρακτηριστικά των διατρημάτων της οροφής. Έχει υπολογιστεί το φορτίο που απαιτείται, η απόσταση των διατρημάτων, ο αριθμός αυτών, καθώς και η συνολική ποσότητα εκρηκτικής ύλης που χρειάζονται τα διατρήματα αυτά. Οι παράμετροι αυτές υπολογίστηκαν με παρόμοιο τρόπο και εξισώσεις με τα υπόλοιπα τμήματα του μετώπου.

**Πίνακας 4.16: Αποτελέσματα διατρημάτων οροφής διάτρησης – ανατίναξης.**

Διατρήματα Οροφής (roof)	
Απόσταση διατρημάτων S	0,68
Φορτίο B (m)	0,84
Πρακτικό Φορτίο B <sub>r</sub> (m)	0,56
Αριθμός διατρημάτων N	9,07
Απόσταση Διατρημάτων S <sub>r</sub> (m)	0,68
l (Kg/m)	0,18
Αριθμός φυσιγγίων n	17
Ποσότητα εκρηκτικών (Kg)	28,83

➤ Διατρήματα Τοίχου

Στον **Πίνακα 4.17**, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τα χαρακτηριστικά των διατρημάτων του τοίχου, τα οποία υπολογίστηκαν με παρόμοιο τρόπο με τα διατρήματα του δαπέδου. Έχει υπολογιστεί η απόσταση που πρέπει να έχουν, το φορτίο που απαιτείται, ο αριθμός αυτών, το μήκος γόμωσης του πυθμένα και της στήλης καθώς και η συνολική ποσότητα εκρηκτικής ύλης που χρειάζονται τα διατρήματα αυτά.

**Πίνακας 4.17: Αποτελέσματα διατρημάτων τοίχου διάτρησης – ανατίναξης.**

Διατρήματα Τοίχου (wall)		
	Απόσταση (m)	3,41
	f	1,45
	ê	0,45
	Φορτίο B (m)	1,17
	Πρακτικό Φορτίο B <sub>w</sub> (m)	0,89
	Απόσταση διατρημάτων S <sub>w</sub> (m)	1,11
	Αριθμός διατρημάτων N	4
Πυθμένας	Μήκος (m) h <sub>b</sub>	1,11
	Αριθμός φυσιγγίων n	3
Στήλη	Μήκος (m) h <sub>c</sub>	2,69
	Γραμμική Πυκνότητα γόμωσης στήλης l <sub>c</sub>	0,68

	Αριθμός φυσιγγίων n	10
	Ποσότητα εκρηκτικών (Kg)	13,8

➤ Διατρήματα εκατέρωθεν της αρχικής κοπής

Στον **Πίνακα 4.18**, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τα χαρακτηριστικά των διατρημάτων που βρίσκονται δεξιά της εκσκαφής. Έχει υπολογιστεί το φορτίο που απαιτείται και η απόσταση των διατρημάτων. Με βάση τις αποστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία θα χρησιμοποιηθούν τέσσερα διατρήματα δεξιά της εκσκαφής.

**Πίνακας 4.18: Αποτελέσματα διατρημάτων δεξιά της εκσκαφής διάτρησης – ανατίναξης.**

Διατρήματα δεξιά της εκσκαφής (Stopping)	
Απόσταση A (m)	1,64
f	1,45
$\hat{c}$	0,45
Φορτίο B (m)	1,17
Πρακτικό Φορτίο B (m)	1,11
Απόσταση διατρημάτων S (m)	1,39

Στον **Πίνακα 4.19**, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τα χαρακτηριστικά των διατρημάτων που βρίσκονται άνωθεν της εκσκαφής. Έχει υπολογιστεί το φορτίο που απαιτείται και η απόσταση των διατρημάτων, ο αριθμός αυτών, το μήκος γόμωσης του πυθμένα και της στήλης καθώς και η συνολική ποσότητα εκρηκτικής ύλης που χρειάζονται τα διατρήματα αυτά. Με βάση τις αποστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία θα χρησιμοποιηθούν έξι διατρήματα άνωθεν της εκσκαφής. Από τους υπολογισμούς η απαιτούμενη γραμμική πυκνότητα γόμωσης της στήλης είναι 0,68 Kg/m. Από τα διαθέσιμα φυσίγγια η πλησιέστερη τιμή αυτής δίνεται από αυτά με διάμετρο των 28mm.

**Πίνακας 4.19: Αποτελέσματα διατρημάτων άνωθεν της εκσκαφής διάτρησης – ανατίναξης.**

Διατρήματα άνωθεν της εκσκαφής (Stopping)	
Απόσταση Δ (m)	3,22

Απόσταση Γ (m)		1,82	
f		1,2	
$\hat{c}$		0,45	
Φορτίο B (m)		1,29	
Πρακτικό Φορτίο B (m)		1,23	
Απόσταση διατρημάτων S (m)		1,53	
Πυθμένας	Μήκος (m) $h_b$	1,53	
	Αριθμός φυσιγγίων n	4	
Στήλη	Μήκος (m) $h_c$	2,26	
	Γραμμική Πυκνότητα γόμωσης στήλης $l_c$	0,68	Άρα το $l_{28}$
	Αριθμός φυσιγγίων n	9	
	Ποσότητα εκρηκτικών (Kg)	37,9	

Στον **Πίνακα 4.20.** παρουσιάζονται τα δεδομένα και τα αποτελέσματα που αφορούν τη χρονική διάρκεια της διάνοιξης της στοάς με τη μέθοδο της διάτρησης – ανατίναξης. Σύμφωνα με αυτά, επιλέχθηκε η διάνοιξη να πραγματοποιείται σε δύο βάρδιες για την ολοκλήρωση των εργασιών με το μήκος της προχώρησης να προκύπτει στα 8 m/ημέρα. Στην τρίτη βάρδια θα πραγματοποιούνται εργασίες για την υποστήριξη τόσο της οροφής, όσο και των τοιχωμάτων της σήραγγας, εάν αυτή απαιτείται. Συνεπώς, ο χρόνος όρυξης που απαιτείται γι' αυτή τη μέθοδο θα είναι 830 ημέρες και συνολικά 2,8 χρόνια.

**Πίνακας 4.20:** Απαιτούμενος χρόνος που απαιτείται για την όρυξη στοάς μήκους 6,7 km με τη μέθοδο διάτρησης – ανατίναξης.

Βάρδιες	2
Ρυθμός προχώρησης (m/day)	8,07
Χρόνος όρυξης (Days)	830
Χρόνος όρυξης (years)	2,8

Στον **Πίνακα 4.21.** παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των υπολογισμών για τον σχεδιασμό της διάτρησης – ανατίναξης. Πιο συγκεκριμένα, φαίνονται ο αριθμός των διατρημάτων για τα τετράγωνα της αρχικής κοπής καθώς και για τα διατρήματα της υπόλοιπης εκσκαφής. Επίσης, αναγράφεται ο αριθμός των φυσιγγίων που θα πρέπει να



χρησιμοποιηθούν για τα εκάστοτε διατρήματα ανάλογα με αυτά που έχουν επιλεγθεί κατά τους υπολογισμούς και τέλος, η συνολική ποσότητα εκρηκτικής ύλης που απαιτείται για την κάθε ομάδα διατρημάτων ξεχωριστά.

Στον **Πίνακα 4.22**, αναγράφονται τα αποτελέσματα της διάτρησης – ανατίναξης, τα οποία είναι αναγκαία για τον σχεδιασμό της. Πιο συγκεκριμένα, αναφέρεται η συνολική ποσότητα των εκρηκτικών που θα χρησιμοποιηθεί, η προχώρηση όπως αυτή υπολογίστηκε παραπάνω, η ειδική κατανάλωση εκρηκτικών που ανέρχεται στα  $1,82 \text{ kg/m}^3$  καθώς και η ειδική διάτρηση η οποία υπολογίστηκε στα  $2,02 \text{ m/m}^3$ .

**Πίνακας 4.21:** Συγκεντρωτικός πίνακας δεδομένων κατανάλωσης εκρηκτικών κατά τον σχεδιασμό της ανατίναξης.

Διατρήματα	Αριθμός Διατρημάτων	Διαθέσιμα Φυσίγγια			Συνολική Ποσότητα Εκρηκτικών (Kg)
		Φ28	Φ32	Φ38	
1 <sup>ο</sup> Τετράγωνο	4	15			11,31
2 <sup>ο</sup> Τετράγωνο	4		9		14,59
3 <sup>ο</sup> Τετράγωνο	4			10	20,96
4 <sup>ο</sup> Τετράγωνο	4			10	20,96
Δαπέδου	5		6	3,5	21,33
Οροφής	9	17			28,83
Τοίχου	8	10		3	27,6
Stoping	10	9		4	37,9
Σύνολο	48	51	15	30,5	183,54

**Πίνακας 4.22:** Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων της διάτρησης - ανατίναξης.

Συνολική Ποσότητα Εκρηκτικών (Kg)	183,54
Διατομή Επιφάνειας ( $\text{m}^2$ )	25
Προχώρηση/ανατίναξη (m)	4,04
Ειδική κατανάλωση ( $\text{Kg/m}^3$ )	1,82

Συνολικός Αριθμός Διατρημάτων	48
Ειδική Διάτρηση (m/m <sup>3</sup> )	2,02

Στον **Πίνακα 4.23**, παρουσιάζονται τα οικονομικά στοιχεία για τη μέθοδο της διάτρησης – ανατίναξης. Ενδεικτικά αναφέρονται δύο τύποι υδραυλικών σφυρών οι οποίες έχουν διαφορετικά τεχνικά χαρακτηριστικά και μπορούν να δεχθούν διαφορετικές κεφαλές. Επίσης, το κόστος κτήσης του διατρητικού μηχανήματος ανέρχεται στα 500.000 € (για μεταχειρισμένο μηχάνημα διάτρησης) και 650.000 € (για καινούργιο μηχάνημα διάτρησης) με χρόνο απόσβεσης τα 3 έτη κι εναπομένουσα αξία στα 150.000 ευρώ και 195.000 ευρώ αντίστοιχα. Το κόστος αντικατάστασης των κοπτικών άκρων ανέρχεται στα 205.020 ευρώ, το κόστος των καυσίμων με βάση τη κατανάλωση του μηχανήματος ανέρχεται στα 77.503 € και τέλος το κόστος των εκρηκτικών στα 676.432 €. Επομένως, για τη διάνοιξη του μήκους της στοάς το συνολικό κόστος ανά μέτρο είναι 218 έως 233 € μόνο για τη Δ-Α. Αν συμπεριλάβουμε και τη μεταφορά με φορτωτές και φορτηγά τότε με εμπειρικά στοιχεία το κόστος περίπου διπλασιάζεται και φτάνει τα 436 και 480 €/m στις 2 περιπτώσεις.

**Πίνακας 4.23:** Συγκεντρωτικός πίνακας οικονομικών στοιχείων κατά τον σχεδιασμό της ανατίναξης.

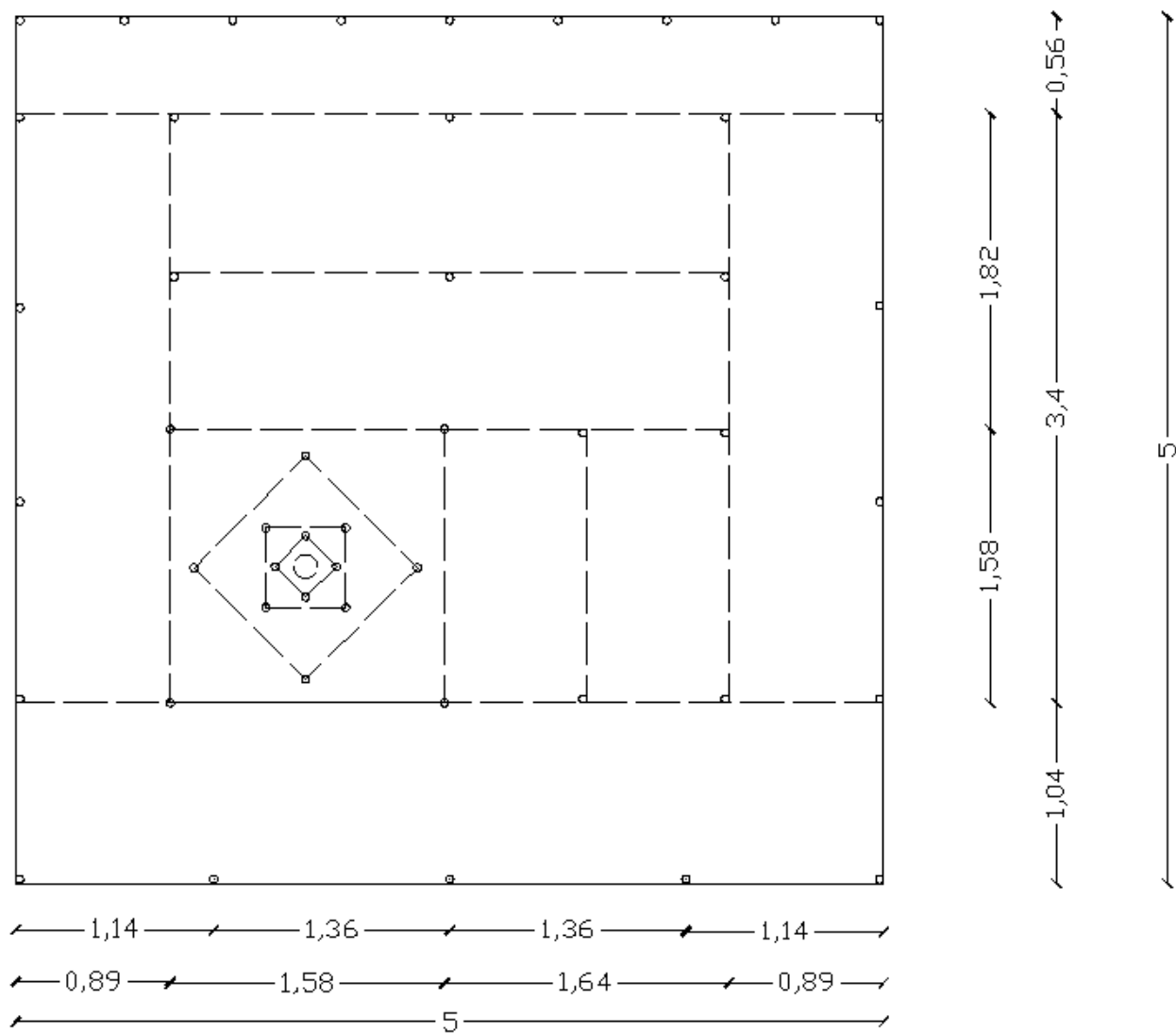
Γενικά στοιχεία	Μονάδες	Τύπος σφύρας	
		1	2
Τρόπος διατρήσεως		υδραυλική	υδραυλική
Τύπος διατρητικής σφύρας		1838 HD	COP MD 20
		2238HD	1638 HD
			1838 HD
			2238 HD
Διάμετρος Διατρήματος κεφαλών	mm	38-64	33-64
		38-76	33-76
			38-64
			38-76
Διάμετρος Διατρημάτων	mm	45	
Κόστος κεφαλαίου			
Κόστος διατρητικού συγκροτήματος	€	500.000	650.000
Χρόνος απόσβεσης	Έτος	3	3
Εναπομένουσα αξία	€	150.000	195.000
Τόκος	%	7	7

Ετήσιο κόστος απόσβεσης	€	190.526	247.684
Κόστος αντικατάστασης κοπτικού άκρου	€	205.020	
Κόστος καυσίμων + λιπαντικών	€	77.503	
Κόστος συντήρησης μηχανήματος	€	80.000	52.000
Κόστος εκρηκτικών	€	676.432	
Σύνολο	€	1.460.533	1.559.006
Κόστος ανά μέτρο (μόνο Δ-Α)	€/m	218	233
Κόστος ανά μέτρο Δ-Α & μεταφοράς	€/m	436	480

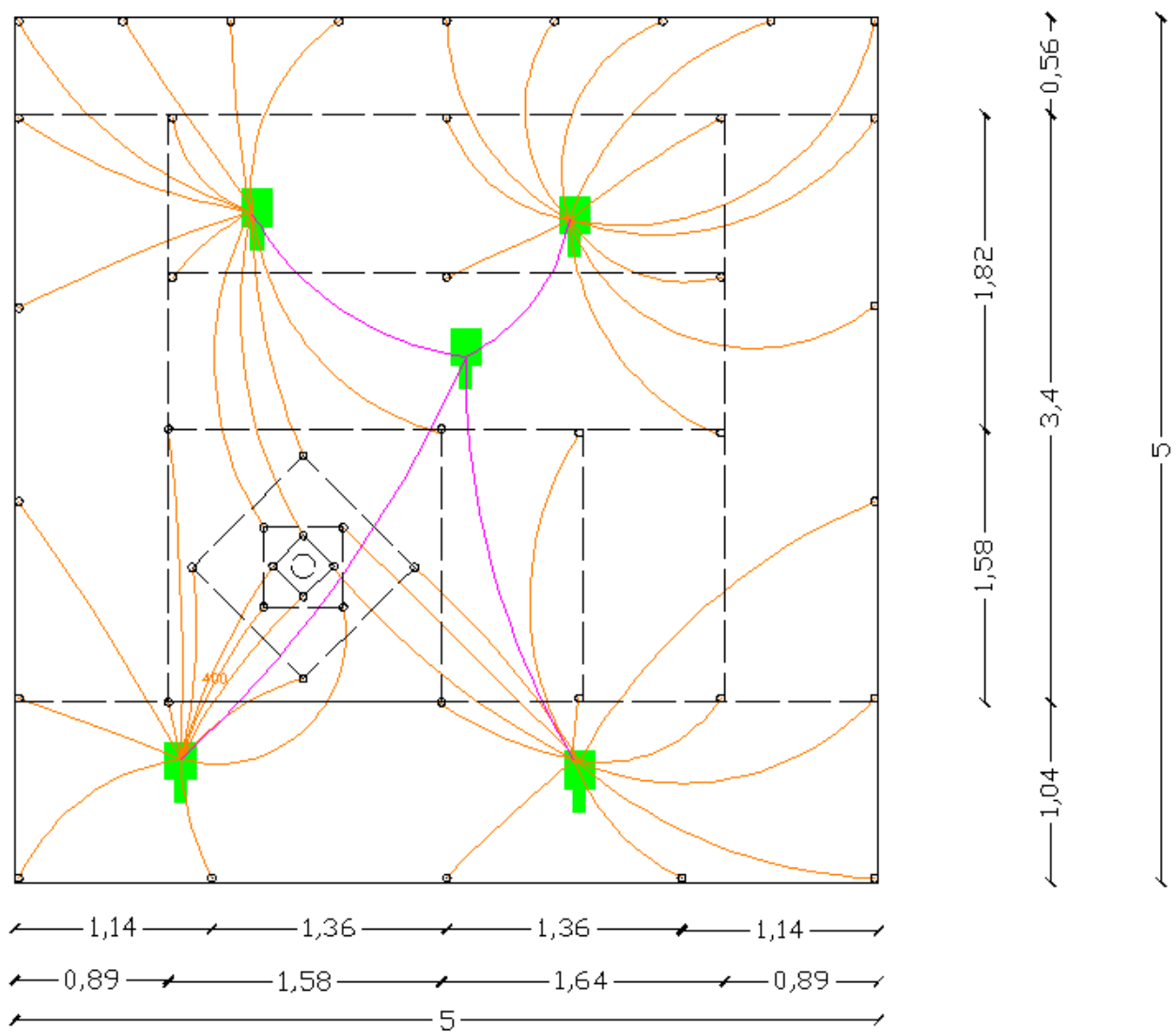
Στην **Εικόνα 4.1** παρουσιάζεται το μέτωπο της τετραγωνικής στοάς διαστάσεων 5×5 m, για την εκσκαφή της οποίας απαιτούνται 48 διατρήματα. Στο σχήμα φαίνεται η αρχική κοπή διαστάσεων 1,58×1,58 m, καθώς και οι αποστάσεις που εξορύχθηκαν σε κάθε στάδιο της κύριας ανατίναξης.

Στην **Εικόνα 4.2** παρουσιάζεται η συνδεσμολογία NONEL της ανατίναξης. Τα καψύλλια τοποθετούνται σε κάθε ένα από τα 48 διατρήματα που έχουν δημιουργηθεί. Κάθε καψύλλιο περιέχει επιβραδυντές οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την καθυστέρηση έναυσης των καψυλλίων με σκοπό την έκρηξη τους σε διαφορετικό χρόνο για να προλαβαίνει να δημιουργείται η απαραίτητη ελεύθερη επιφάνεια που χρειάζεται. Από κάθε καψύλλιο βγαίνει ένας σωλήνας μέσω του οποίου γίνεται η πυροδότηση. Για την συνδεσμολογία αυτών των σωλήνων χρησιμοποιήθηκαν πέντε σύνδεσμοι – δέσμης. Οι τέσσερις περιφερειακοί σύνδεσμοι, συνδέουν 12 διατρήματα ο καθένας κι όλοι μαζί ενώνονται με τον κεντρικό σύνδεσμο ο οποίος επικοινωνεί με τον πυροκροτητή, μέσω του οποίου γίνεται η έναυση. Η έναυση γίνεται από τη μηχανή πυροδοτήσεως, η οποία τοποθετείται σε ασφαλή απόσταση από το μέτωπο. Η παραγωγή ρεύματος στην μηχανή πυροδοτήσεως μπορεί να γίνει είτε χειροκίνητα, περιστρέφοντας τη χειρολαβή του μηχανήματος, είτε από μακριά πατώντας το κουμπί φόρτωσης αρχικά και στη συνέχεια το κουμπί πυροδοτήσεως.

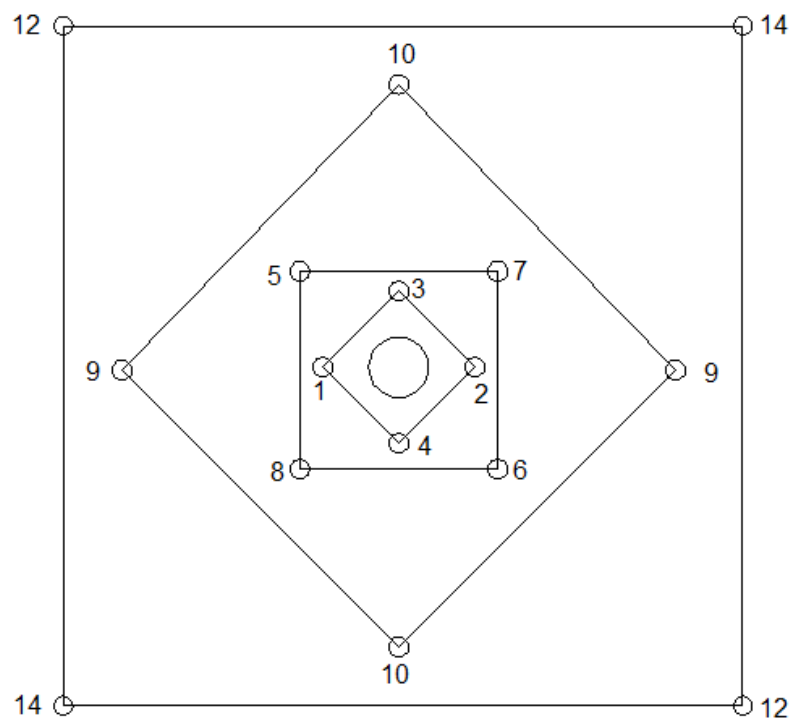
Στις **Εικόνες 4.3 και 4.4** παρουσιάζονται οι χρόνοι έναυσης καθώς και οι επιβραδύνσεις σε ms της αρχικής κοπής και του συνόλου του μετώπου εκσκαφής αντίστοιχα. Ο συνολικός χρόνος της ανατίναξης είναι  $42 \times 100 \text{ ms} = 4,2 \text{ sec}$ .



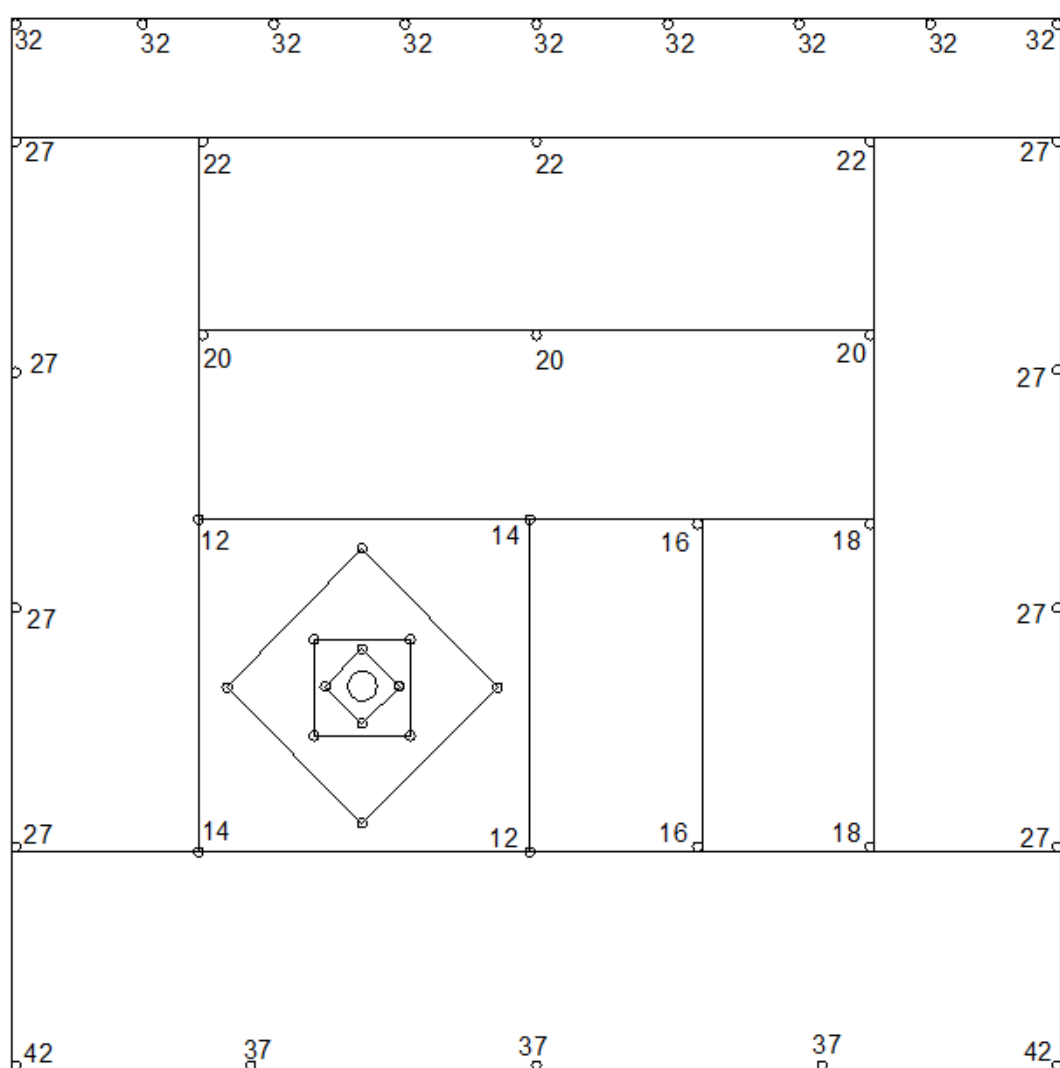
**Εικόνα 4.1: Μέτωπο της στοάς.**



**Εικόνα 4.2:** Συνδεσμολογία NONEL ανατίναξης.



**Εικόνα 4.3: Χρόνοι έναυσης της αρχικής κοπής.**



**Εικόνα 4.4:** Χρόνοι έναυσης του μετώπου εκσκαφής.

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στην παρούσα μελέτη επανεξετάσθηκε το σχέδιο της ανατίναξης εφαρμόζοντας και την τεχνική των λείων τοιχωμάτων (smooth blasting) για την μείωση της θραύσης του πετρώματος περιφερειακά της στοάς. Αφού ολοκληρώθηκε ο σωστός σχεδιασμός της Δ-Α ήταν εφικτό η σύγκριση της με τη τεχνική TBM ως προς τον ρυθμό προχώρησης και το μοναδιαίο κόστος. Για το σκοπό αυτό μελετήθηκε και σχεδιάσθηκε το καταλληλότερο TBM από την αρχή σύμφωνα με τις επί τόπου γεωτεχνικές συνθήκες.

Από τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα προέκυψαν τα εξής:

- Ο ρυθμός προχώρησης για τη μέθοδο ολομέτωπης κοπής (TBM) κυμαίνεται από 6.3 - 8 m/ημέρα, ενώ στη διάτρηση-ανατίναξη είναι 4m/βάρδια, επί 2 βάρδιες/ημέρα ίσο με 8m/ημέρα.
- Ο χρόνος αποπεράτωσης του έργου για τη μέθοδο ολομέτωπης κοπής (TBM) κυμαίνεται από 840 έως 1058 ημέρες, ενώ για τη μέθοδο διάτρηση-ανατίναξη είναι 830 ημέρες.
- Όσον αφορά το μέσο κόστος διάτρησης ανά μέτρο για τη συμβατική μέθοδο Δ-Α ανέρχεται στα 436 €/m (με αγορά μεταχειρισμένου μηχανήματος διάτρησης) μέχρι τα 480 € (με αγορά καινούργιου μηχανήματος διάτρησης), ενώ για τη μέθοδο ολομέτωπης κοπής (TBM) κυμαίνεται από 875 - 1030 €/m.

Με βάση τα ανωτέρω η επιλογή της βέλτιστης μεθόδου με κριτήρια τον ρυθμό προχώρησης και το μοναδιαίο κόστος είναι αυτή της διάτρησης - ανατίναξης. Αυτό επιτεύχθηκε χάρις τον επανασχεδιασμό της Δ-Α που δεν είχε γίνει στην προηγούμενη τεχνική μελέτη και παρουσιάσθηκε στη διπλωματική εργασία (Θεοδωρακόπουλος και Λεκίδης, 2017). Ο επανασχεδιασμός αυτός με κυλινδρική διάταξη διατρημάτων προεκσκαφής και πυκνή διάτρηση στην περιφέρεια της στοάς μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές μειώσεις του κόστους της υποστήριξης και της άντλησης. Ακόμα και με την περαιτέρω πύκνωση των διατρημάτων στην περιφέρεια της στοάς το κόστος της Δ-Α θα είναι σημαντικά μικρότερο από αυτό της μηχανικής διάτρησης με TBM.



## ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Οι προτάσεις που μπορούν να γίνουν για την βελτίωση της τεχνικής εξόρυξης στοάς μεγάλου μήκους όπως αυτή που μελετήθηκε στην παρούσα εργασία και προκύπτουν από αυτήν είναι:

- Καταρχάς πρέπει να γίνει ο βέλτιστος σχεδιασμός της συμβατικής μεθόδου Δ-Α που να λαμβάνει υπόψη της γεωτεχνικές συνθήκες του υπόγειου έργου και να γίνει πρόβλεψη ρυθμού προχώρησης και κόστους,
- Να εφαρμοσθεί για επαρκή αριθμό προχωρήσεων το προτεινόμενο σχέδιο Δ-Α και να γίνουν οι αναγκαίες βελτιώσεις με βάση τα καταγραφέντα δεδομένα.
- Με αυτήν την εμπειρία να σχεδιασθεί το TBM και να συγκριθεί ως προς την απόδοση και το μοναδιαίο κόστος με τη συμβατική μέθοδο.
- Να γίνει η επιλογή της καταλληλότερης τεχνικής εξόρυξης.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Εξαδάκτυλος Γ., Σταυροπούλου Μ. (2005): «Κατασκευή και Μηχανική των σιηράγγων και των υπόγειων έργων». Σημειώσεις μαθήματος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
- Θεοδορακόπουλος Ι., Λεκίδης Γ. (2017): «Σύγκριση δύο εναλλακτικών μεθόδων διάνοιξης συνδετήριας στοάς Ολυμπιάδας – Μαδέμ Λάκου». Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
- Λιόλιος Π., (2018): «Διάτρηση, Ανατίναξη και Εισαγωγή στα Υπόγεια Έργα. Σχεδιασμός ανατινάξεων σιηράγγων». Σημειώσεις μαθήματος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
- Ξηρουδάκης Γ., (2007): «Γεωτεχνικός Χαρακτηρισμός Βραχομαζών με Βάση τη Γεωστατιστική Ανάλυση Δεδομένων από Γεωτρήσεις Δειγματοληψίας και από Μηχανές Ολομέτωπης Κοπής TBM». Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
- Ρόζος Δ., Λουπασάκης Κ. : Σημειώσεις μαθήματος «Γεωτεχνική μηχανική», Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Τσουτρέλης Χ. (2001): «Εκρηκτικές ύλες και τεχνική των ανατινάξεων», Τόμος 2, Αθήνα.
- Χειμωνίδου Α. (2010): «Συγκριτική αξιολόγηση μεθόδων σχεδιασμού υπόγειων ανατινάξεων». Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
- Ateş U. (2013): «A comparative study on the relationships between design parameters of TBMs with two current examples of large section TBMs». M.Sc. thesis Istanbul technical university.

- Barton N., (2000): «TBM tunnelling in jointed and faulted rock».
- Macias J., Bruland A. (2014): «D&B versus TBM: Review of the parameters for a right choice of the excavation method».
- Newnan D.G.: «Engineering Economic Analysis», Engineering Press Inc, 3rd Edition, San Jose, California.
- Persson P., Holmberg R., Lee J. (1996): «Rock Blasting and explosives engineering».