



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Σύγκριση δύο εναλλακτικών Σχεδιασμών Ανατινάξεων Μετώπων
Μορφής Στοάς**

Πενθερουδάκης Βασίλειος

Εξεταστική Επιτροπή

Γεώργιος Εξαδάκτυλος, Καθηγητής (επιβλέπων)

Κωνσταντίνος Κομνίτσας, Καθηγητής

Δόκτωρ Παντελής Λιόλιος

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Καταρχήν θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Γεώργιο Εξαδάκτυλο για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου αναθέτοντας μου το θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Κομνίτσα για την συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή.

Οφείλω όμως ειδικά να ευχαριστήσω και τον Δρ. Παντελή Λιόλιο για την πολύτιμη βοήθεια του στην εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας. Ο κ. Λιόλιος συνείσφερε στην όλη διαδικασία με τις διευκρινήσεις και της επισημάνσεις του.

Η σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, αποτέλεσε έναν χώρο ο οποίος μου προσέφερε πολλά κατά την φοίτηση μου σε αυτήν. Είχα την τύχη να γνωρίσω πολλούς ανθρώπους, καθηγητές και συμφοιτητές.

Στήριγμα μου σε όλα μου τα εγχειρήματα αποτελούν οι γονείς μου, Στέλιος και Τζοβάννα, με την αγάπη και την στοργή που τους διακρίνει. Για τον λόγο αυτό θα ήθελα να αφιερώσω την παρούσα διπλωματική εργασία σε εκείνους.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η σύγκριση δύο εναλλακτικών μεθόδων σχεδιασμού μορφής στοάς. Οι δύο μέθοδοι είναι: η Νορβηγική μέθοδος (μέθοδος NTNU) και η μέθοδος Konya. Στην πρώτη μέθοδο, η οποία προτάθηκε από τον S. Zare στην διδακτορική του διατριβή το 2007, χρησιμοποιήθηκε ένα μήκος διατρήματος της τάξης των 3.0 m με χρήση παράλληλων διατρημάτων. Το σχέδιο γόμωσης προτάθηκε επίσης από τον S. Zare. Στην δεύτερη μέθοδο, η οποία προτάθηκε από τον καθηγητή C. Konya το 1995, χρησιμοποιήθηκε ένα μήκος διατρήματος της τάξης των 2 m με χρήση διατρημάτων υπό γωνία. Καταρτίστηκε ένα εναλλακτικό σχέδιο γόμωσης των διατρημάτων, σύμφωνα με τις προτάσεις του C. Konya. Η μορφή της στοάς και η εγκάρσια διατομή της, λήφθηκε από την διδακτορική διατριβή του S. Zare. Η στοά αυτή έχει επιφάνεια της τάξης των 30 m². Ο σχεδιασμός της στοάς και των παραμέτρων σχεδιασμού έγινε με την χρήση του εμπορικού σχεδιαστικού προγράμματος «Civil 3D» της εταιρείας Autodesk. Στην συνέχεια, το μέτωπο της στοάς διαχωρίστηκε σε επιμέρους επιφάνειες ανάλογα με την κατηγορία των διατρημάτων που τις καλύπτουν. Τα δεδομένα της ανάλυσης αυτής εισήχθησαν στο πρόγραμμα «Excel» της Microsoft και προσεγγίστηκε ο αναμενόμενος θρυμματισμός του μετώπου. Για να επιτευχθεί αυτό χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Kuz-Ram. Επιπροσθέτως, έγινε σύγκριση των χρονικών διαστημάτων πραγματοποίησης ορισμένων εργασιών της μεθόδου διάτρησης-ανατίναξης. Οι εργασίες αυτές είναι: η διάτρηση των διατρημάτων, η γόμωση των διατρημάτων και η διαδικασία ξεσκάρωματος. Για τις ανάγκες της ανάλυσης αυτής, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος προσομοίωσης «TunnSim» που προτάθηκε από το NTNU. Επειδή οι δύο μέθοδοι σχεδιασμού δεν εφαρμόστηκαν σε πραγματικές συνθήκες, αναφέρονται οι διαφοροποιήσεις που μπορούν να παρατηρηθούν στα αποτελέσματα. Επομένως, τα στοιχεία προς εξέταση και σύγκριση είναι: η χρήση των εκρηκτικών υλών (γόμωση), ο χρόνος πραγματοποίησης ενός κύκλου εργασιών διάτρησης ανατίναξης (ο οποίος έχει άμεση σχέση με την διάταξη των διατρημάτων στον χώρο και το μήκος διάτρησης των διατρημάτων) και ο αναμενόμενος θρυμματισμός του μετώπου. Τέλος, παρουσιάζονται υπό την μορφή πινάκων τα συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που διατυπώνονται σε αυτήν την εργασία, εκφράζουν τους συγγραφείς και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής συμφωνούν με αυτές.

ABSTRACT

The purpose of this dissertation is to compare two alternative blast design methods of a tunnel face. The two methods are: the Norwegian method (NTNU method) and the Konya method. The first method, which was proposed by S. Zare in his doctoral dissertation in 2007, utilizes parallel drillholes with a length of 3.0 m. Zare, moreover, proposed the charging pattern. The second method, which was proposed by professor C. Konya in 1995, utilizes angled drillholes with a length of 2.0 m. Consequently, an alternative charging pattern is proposed, according to Konya's method. The tunnel face considered here, namely its shape and its transverse area, was taken from the doctoral dissertation of S. Zare. The tunnel face has an area of 30 m². The design of the tunnel face and of the design parameters was done using the designing program «Civil 3D» of the company Autodesk. Then, the tunnel face was divided in subareas, based on the type of blastholes which covered them. The data of this analysis were inserted in the program «Excel» of Microsoft and a predicted fragmentation prediction. This was achieved using the Kuz-Ram fragmentation model. Additionally, a comparison of the operation times of certain activities of the drill and blast method was made between the two methods. These activities are: the drilling of the blastholes, the charging of the blastholes and the scaling. For the needs of this analysis, the Simulation method «TunnSim» which was presented by NTNU, was used. As the two design methods were not applied in real conditions, some differences are reported, which can alter the results. Therefore, the items for examination and comparison are the following: the usage of explosive materials (charging pattern), the realization time of a round of operations of the drill and blast method (which is related to the drilling pattern and the length of the drillhole or the round length) and the expected fragmentation of the muck pile of the tunnel face. In conclusion, the observations and the remarks of this dissertation are presented in the form of tables.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	ii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	iii
ABSTRACT	iv
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	v
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	viii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	x
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή	1
1.1 Σκοπός της εργασίας	1
1.2 Μηχανισμός της ανατίναξης	3
1.3 Μηχανισμός Θραύσης του Πετρώματος.....	4
1.3.1 Θλίψη των πετρωμάτων	4
1.3.2 Ακτινικές Ρωγματώσεις (Radial Fracturing)	5
1.3.3 Αστοχία λόγω απολέπισης (Spalling)	5
1.3.4 Εκτόνωση αερίων ανατίναξης	6
1.3.5 Απελευθέρωση του φορτίου	6
1.4 Διατάξεις τοποθέτησης διατρημάτων στον χώρο ανατίναξης.....	7
1.5 Ελεγχόμενες Παράμετροι Ανατινάξεων	8
1.5.1 Διάμετρος διατρήματος	8
1.5.2 Μήκος διατρήματος.....	8
1.5.3 Φορτίο (Burden)	8
1.5.4 Διάστημα (Spacing)	9
1.5.5 Επιγύμωση (Stemming).....	9
1.5.6 Βαθμός σύζευξης (Coupling Ratio)	9
1.5.7 Χρόνοι επιβράδυνσης.....	10
1.6 Μοντέλο εκτίμησης του θρυμματισμού	10
Κεφάλαιο 2 Μέθοδοι σχεδιασμού υπογείων ανατινάξεων.....	13
2.1 Νορβηγική Μέθοδος (Μέθοδος NTNU).....	13
2.1.1 Δείκτης εξορυξιμότητας με εκρηκτικές ύλες και γεωλογία	13
2.1.2 Αρχική κοπή ή προεκσκαφή.....	15
2.1.3 Σχεδιασμός αρχικής κοπής	17
2.1.4 Προβλεπόμενη (Θεωρητική) ειδική διάτρηση	19
2.1.5 Συντελεστής k_{bl}	19

2.1.6 Θεωρητικός αριθμός διατρημάτων.....	20
2.1.7 Υπόλοιπα διατρήματα της διάταξης (drilling pattern)	22
2.1.7.1 Διατρήματα Δαπέδου.....	22
2.1.7.2 Περιμετρικά διατρήματα	22
2.1.7.3 Σειρά διατρημάτων πλησιέστερη στο σύνορο.....	22
2.1.7.4 Διατρήματα διεύρυνσης	22
2.1.8 Σχεδιαστικές παράμετροι των διατρημάτων	23
2.1.9 Γόμωση των διατρημάτων	24
2.1.10 Πυροδότηση των διατρημάτων	28
2.1.10.1 Προεκσκαφή.....	28
2.1.10.2 Διατρήματα συνόρου.....	28
2.1.10.3 Διατρήματα διεύρυνσης.....	28
2.1.10.4 Διατρήματα δαπέδου	28
2.1.11 Γενικές οδηγίες σχεδιασμού διάταξης διατρημάτων	29
2.2 Μέθοδος σχεδιασμού υπόγειων ανατινάξεων κατά Konya	30
2.2.1 Αρχική κοπή ή προεκσκαφή.....	30
2.2.3 Υπόλοιπα διατρήματα της διάταξης (drilling pattern)	31
2.2.3.1 Διατρήματα δαπέδου	31
2.2.3.2 Περιμετρικά διατρήματα.....	31
2.2.3.3 Διατρήματα διεύρυνσης	32
2.2.4 Γόμωση των διατρημάτων.....	32
2.2.5 Πυροδότηση των διατρημάτων	33
2.2.5.1 Προεκσκαφή.....	34
2.2.5.2 Διατρήματα διεύρυνσης (οριζόντια)	34
2.2.5.4 Διατρήματα διεύρυνσης (κατακόρυφα)	34
2.2.5.5 Διατρήματα συνόρου (οροφής)	34
2.2.5.6 Διατρήματα δαπέδου.....	34
Κεφάλαιο 3 Ανάλυση κύκλου ανατίναξης (Μέθοδος NTNU)	35
3.1 Υπολογισμός χρόνου διάτρησης.....	36
3.2 Υπολογισμός χρόνου γόμωσης	41
3.3 Υπολογισμός χρόνου αερισμού	43
3.4 Υπολογισμός χρόνου φόρτωσης και μεταφοράς σορού ανατίναξης	44
3.5 Υπολογισμός χρόνου ξεσκαρώματος.....	48
Κεφάλαιο 4 Παραδείγματα σχεδιασμών διατομής στοάς	49
4.1 Παράδειγμα σχεδιασμού με την Νορβηγική μέθοδο (μέθοδο NTNU).....	49

4.1.1 Σχεδιασμός προεκσκαφής	49
4.1.2 Σχεδιαστικές παράμετροι υπόλοιπων διατρημάτων	56
4.1.3 Διάταξη διατρημάτων στην διατομή (drilling pattern)	57
4.1.4 Γόμωση της διατομής.....	58
4.1.5 Κατανομή ειδικής κατανάλωσης στην διατομή.....	59
4.1.6 Κατανομή θρυμματισμού (μοντέλο Kuz-Ram).....	60
4.1.7 Υπολογισμός ρυθμού προχώρησης (advance rate)	63
4.2 Παράδειγμα σχεδιασμού με την μέθοδο κατά Konya	64
4.2.1 Σχεδιασμός προεκσκαφής	64
4.2.2 Σχεδιαστικές παράμετροι υπόλοιπων διατρημάτων	66
4.2.3 Διάταξη διατρημάτων στην διατομή (drilling pattern).....	66
4.2.4 Γόμωση της διατομής	67
4.2.5 Κατανομή ειδικής κατανάλωσης στην διατομή	68
4.2.6 Κατανομή θρυμματισμού (μοντέλο Kuz-Ram)	68
4.2.7 Υπολογισμός ρυθμού προχώρησης (advance rate).....	69
4.3 Σύγκριση των σχεδιασμών	71
4.3.1 Σύγκριση διατρημάτων ανά ζώνη ανατίναξης.....	71
4.3.1.1 Διατρήματα προεκσκαφής.....	71
4.3.1.2 Διατρήματα διεύρυνσης	73
4.3.1.3 Διατρήματα συνόρου	74
4.3.1.4 Διατρήματα δαπέδου	75
4.3.1.5 Σύγκριση συνολικής κατανομής θρυμματισμού	76
4.3.2 Σύγκριση κύκλου διάτρησης-ανατίναξης ανά μέθοδο	77
Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα-Προτάσεις	78
5.1 Γενικά συμπεράσματα.....	78
5.2 Προτάσεις έρευνας-βελτίωσης της μεθοδολογίας	79
Βιβλιογραφία	80
Ελληνική Βιβλιογραφία.....	80
Διεθνής Βιβλιογραφία	80
Παράρτημα Α	83
Παράρτημα Β	84

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1 «Σχηματική απεικόνιση μιας έκρηξης»	4
Σχήμα 2.1 «Εύρος τιμών συντελεστή εξορυξιμότητας με Ε.Υ για υπαίθριες ανατινάξεις, ανάλογα με τον τύπο του πετρώματος» (πηγή: Zare, 2007a)	15
Σχήμα 2.2 «Τυπικές διατάξεις προεκσκαφής, ανάλογα με το κενό διάτρημα» (76 mm αριστερά, 102 mm κέντρο, 127 mm δεξιά) (πηγή: Zare 2007a)	16
Σχήμα 2.3 «Επιλογή πλήθους κενών διατρημάτων συναρτήσει διαμέτρου διατρήματος και μήκους προχώρησης» (πηγή: Zare, 2007a)	17
Σχήμα 2.4 «Προσέγγιση φορτίου προεκσκαφής συναρτήσει βασικού πλάτους» (πηγή: Zare, 2007a)	18
Σχήμα 2.5 «Η θεωρητική ειδική κατανάλωση, εκφρασμένη σε m/m^3 ανάλογα με την διάμετρο γομωμένου διατρήματος και τον δείκτη εξορυξιμότητας με Ε.Υ» (πηγή: Zare, 2007a)	19
Σχήμα 2.6 «Εκτιμώμενο πλήθος διατρημάτων συναρτήσει της επιφάνειας της διατομής και των συνθηκών ανατίναξης, για διάμετρο γομωμένου διατρήματος 48 mm» (πηγή: Zare,2007a)	20
Σχήμα 2.7 «Εκτιμώμενο πλήθος διατρημάτων συναρτήσει της επιφάνειας της διατομής και των συνθηκών ανατίναξης, για διάμετρο γομωμένου διατρήματος 64 mm» (πηγή: Zare,2007a)	21
Σχήμα 2.8 «Ειδική κατανάλωση συναρτήσει της επιφάνειας της διατομής και των συνθηκών ανατίναξης, για διάμετρο γομωμένου διατρήματος 48 mm και φυσίγγια» (πηγή: Zare,2007a)	25
Σχήμα 2.9 «Ειδική κατανάλωση συναρτήσει της επιφάνειας της διατομής και των συνθηκών ανατίναξης, για διάμετρο γομωμένου διατρήματος 48 mm και ANFO» (πηγή: Zare,2007a)	26
Σχήμα 2.10 «Ειδική κατανάλωση συναρτήσει της επιφάνειας της διατομής και των συνθηκών ανατίναξης, για διάμετρο γομωμένου διατρήματος 64 mm και ANFO» (πηγή: Zare,2007a)	27
Σχήμα 2.11 «Τυπική διάταξη V-cut» (πηγή: Konya, 1995)	31
Σχήμα 2.12 «Σχέδιο πυροδότησης κεκλιμένων διατρημάτων» (Πηγή: Konya, 1995)	33
Σχήμα 3.1 «Διάγραμμα υπολογισμού δείκτη διατρησιμότητας DRI» (πηγή: Bruland, 1998)	37
Σχήμα 3.2 «Εύρος τιμών συντελεστή διατρησιμότητας, ανάλογα με τον τύπο του πετρώματος» (Πηγή: Bruland & Zare,2013)	37
Σχήμα 3.3 «Καθαρή ταχύτητα διάτρησης συναρτήσει του συντελεστή DRI και του διατρητικού» (Πηγή: Bruland & Zare,2013)	38
Σχήμα 3.4 «Υπολογισμός στοιχειώδους χρόνου μετακίνησης t_f συναρτήσει του μήκους διάτρησης» (πηγή: Zare,2007b)	39
Σχήμα 3.5 «Συντελεστής f_{sa} συναρτήσει της εγκάρσιας διατομής, του καθαρού ρυθμού διάτρησης και των χειριστών» (πηγή: Zare, 2007b)	40
Σχήμα 3.6 «Χρόνος γόμωσης ανά κύκλο» (πηγή: Zare, 2007b)	42
Σχήμα 3.7 «Υπολογισμός απαιτούμενου χρόνου αερισμού» (πηγή: Zare, 2007b)	43
Σχήμα 3.8 «Υπολογισμός συντελεστή υπερεκσκαφής, συναρτήσει της εγκάρσιας διατομής της στοάς» (πηγή: Zare, 2007b)	45
Σχήμα 3.9 «Υπολογισμός χρόνου ξεσκαρώματος» (πηγή: Zare,2007b)	48

Σχήμα 4.1 «Όγκος προς ανατίναξη για το πρώτο γομωμένο διάτρημα»	50
Σχήμα 4.2 «Φορτίο B ₁ ».....	52
Σχήμα 4.3 «Φορτίο B ₂ ».....	52
Σχήμα 4.4 «Φορτίο B ₃ ».....	53
Σχήμα 4.5 «Φορτία B ₄ , B ₅ και B ₆ ».....	54
Σχήμα 4.6 «Φορτίο B ₇ ».....	54
Σχήμα 4.7 «Φορτίο B ₈ ».....	55
Σχήμα 4.8 «Τελική διαμόρφωση προεκσκαφής»	56
Σχήμα 4.9 «Διάταξη διατρημάτων σύμφωνα με την Νορβηγική μέθοδο» (μέθοδο NTNU)»	57
Σχήμα 4.10 «Κατανομή της ειδικής κατανάλωσης στην εγκάρσια διατομή της στοάς».....	60
Σχήμα 4.11 «Κατανομή θρυμματισμού σύμφωνα με την μέθοδο NTNU»	62
Σχήμα 4.12 «Κατανομή χρονικής διάρκειας κύκλου ανά εργασία, Μέθοδος NTNU»	64
Σχήμα 4.13 «Η διαμόρφωση της προεκσκαφής, σύμφωνα με την μέθοδο Konya».....	65
Σχήμα 4.14 «Η διάταξη των διατρημάτων, σύμφωνα με την μέθοδο Konya»	66
Σχήμα 4.15 «Κατανομή της ειδικής κατανάλωσης στην εγκάρσια διατομή της στοάς, σύμφωνα με την μέθοδο Konya	68
Σχήμα 4.16 «Η κατανομή θρυμματισμού, σύμφωνα με την μέθοδο Konya»	69
Σχήμα 4.17 «Κατανομή χρονικής διάρκειας κύκλου ανά εργασία, Μέθοδος Konya».....	71
Σχήμα 4.18 «Σύγκριση κατανομής θρυμματισμού ανά μέθοδο-Διατρήματα προεκσκαφής»	72
Σχήμα 4.19 «Σύγκριση κατανομής θρυμματισμού ανά μέθοδο-Διατρήματα διεύρυνσης»	73
Σχήμα 4.20 «Σύγκριση κατανομής θρυμματισμού ανά μέθοδο-Διατρήματα συνόρου».....	74
Σχήμα 4.21 Κατανομή θρυμματισμού Διατρημάτων κοντά στο σύνορο, Μέθοδος NTNU».....	75
Σχήμα 4.22 «Σύγκριση Κατανομής Θρυμματισμού-Διατρήματα δαπέδου»	76
Σχήμα 4.23 «Σύγκριση Συνολικής Κατανομής Θρυμματισμού ανά μέθοδο»	77

Παράρτημα Β

Σχήμα 1 «Γεωμετρικά χαρακτηριστικά φορτωτή» (πηγή: Caterpillar Performance Handbook) .	85
Σχήμα 2 «Γεωμετρικά χαρακτηριστικά φορτηγού» (πηγή: www.ritchiespecs.com).....	86

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1 «Τιμές απόστασης a συναρτήσει των διαμέτρων των διατρημάτων» (πηγή: Zare,2007a)	18
Πίνακας 2.2 «Προτεινόμενες παράμετροι σχεδιασμού για $d = 48 \text{ mm}$ » (πηγή: Zare,2007a)	23
Πίνακας 2.3 «Προτεινόμενες παράμετροι σχεδιασμού για $d = 64 \text{ mm}$ » (πηγή: Zare,2007a)	24
Πίνακας 3.1 «Ο συντελεστής πλήρωσης ανάλογα με το υλικό που μεταφέρεται» (πηγή: Peurifoy <i>et al.</i> , 2018 & Κάββου, 2019).....	46
Πίνακας 3.2 «Σταθερός χρόνος κύκλου, ανάλογα με την χωρητικότητα του κάδου του φορτωτή» (πηγή: Peurifoy <i>et al.</i> , 2018).....	47
Πίνακας 4.1 «Σχεδιαστικές Παράμετροι μεθόδου NTNU» (πηγή: Zare,2007a)	56
Πίνακας 4.2 «Σχέδιο γόμωσης της διατομής, Μέθοδος NTNU».....	59
Πίνακας 4.3 «Συνολικά αποτελέσματα, Μέθοδος NTNU».....	63
Πίνακας 4.4 «Σχεδιαστικές Παράμετροι μεθόδου Konya»	66
Πίνακας 4.5 «Σχέδιο γόμωσης της διατομής, Μέθοδος Konya»	67
Πίνακας 4.6 «Συνολικά αποτελέσματα, Μέθοδος Konya».....	70
Παράρτημα Α	
Πίνακας 1 «Τεχνικά χαρακτηριστικά εκρηκτικών υλών της εταιρείας Dyno Nobel»	83
Παράρτημα Β	
Πίνακας 2 «Τεχνικά χαρακτηριστικά μοντέλου φορτωτή της εταιρείας Caterpillar» (πηγή: Caterpillar Performance Handbook)	84
Πίνακας 3 «Τεχνικά χαρακτηριστικά φορτηγού» (πηγή: www.ritchiespecs.com).....	85

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

1.1 Σκοπός της εργασίας

Η κατασκευή σηράγγων και στοών είναι ένα στάδιο το οποίο παρατηρείται σχεδόν σε όλα τα επιχειρηματικά σχέδια προς διεκπεραίωση στους τομείς της Μεταλλευτικής Έρευνας και των Μεταφορών. Όπως σε κάθε επιχειρηματική ενέργεια, η εταιρεία που χρηματοδοτεί το έργο, σχηματίζει έναν κατ' εκτίμηση προϋπολογισμό του έργου.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται δυο μέθοδοι σχεδιασμού ανατινάξεων σε μέτωπα μορφής στοάς: η Νορβηγική μέθοδος και η μέθοδος Κορυα. Τα στοιχεία προς εξέταση είναι: η χρήση των εκρηκτικών υλών (γόμωση), η διάταξη των διατρημάτων στον χώρο, το μήκος διάτρησης των διατρημάτων, ο αναμενόμενος θρυμματισμός του μετώπου και ο χρόνος πραγματοποίησης ενός κύκλου εργασιών διάτρησης ανατίναξης

Ειδικά για την προσέγγιση του θρυμματισμού (fragmentation), χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Kuz-Ram, το οποίο παρουσιάζεται και περιγράφεται στην συνέχεια.

Η μέθοδος της διάτρησης-ανατίναξης

Η διάτρηση-ανατίναξη έχει αναφερθεί ως η ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος εξόρυξης πετρωμάτων τόσο σε υπαίθρια όσο και σε υπόγεια έργα.

Η μέθοδος αυτή αποτελεί μια κυκλική διαδικασία με συγκεκριμένα στάδια τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω. Κάθε κύκλος αναφέρεται ως 'round' στην διεθνή βιβλιογραφία.

Τα στάδια αυτά είναι:

1. Διάτρηση των διατρημάτων (Σχέδιο διάτρησης-drilling pattern)
2. Γόμωση των διατρημάτων και συνδεσμολογία (Charging)
3. Πυροδότηση και εξαερισμός της σήραγγας ή στοάς, με στόχο την απομάκρυνση των αερίων της ανατίναξης. (Blasting & Ventilation)
4. Απομάκρυνση των χαλαρών όγκων του πετρώματος από τις παρειές και τα πλευρά της στοάς, γνωστό και ως ξεσκάρωμα. (Scaling)
5. Τοποθέτηση προσωρινών στηριξεων (πχ εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, πλαίσια, αγκύρια)
6. Απομάκρυνση του θραυσμένου πετρώματος και της σωρού ανατίναξης. (Mucking)

Εφόσον ολοκληρωθεί ένας κύκλος (round), πραγματοποιούνται γεωδαιτικές μετρήσεις και με αυτόν τον τρόπο ελέγχεται η πορεία του έργου σε σχέση με την αρχική χάραξη. Φυσικά, δεν είναι η μόνη μέθοδος διάνοιξης σηράγγων. Έχουν αναπτυχθεί και μέθοδοι με χρήση ειδικών μηχανημάτων γνωστά ως TBM (Tunnel Boring Machines). Όμως η μέθοδος Διάτρησης-Ανατίναξης κοστολογείται έως και 1.5 φορές λιγότερο σε σχέση με τα TBMs και έχει μικρότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Διάτρηση (Drilling)

Η διάτρηση ως διεργασία, διακρίνεται σε κρουστική διάτρηση και σε μηχανική διάτρηση. Η κρουστική διάτρηση πραγματοποιείται με την μεταφορά έργου στο πέτρωμα μέσω διαδοχικών κρούσεων και την διεύδυση του κοπτικού άκρου. Τα κρουστικά διατρητικά συστήματα διακρίνονται σε (Αγιουτάντης, 2009 & Skawina, 2013):

- i. εξωδιατρητικά συστήματα ή συστήματα επιφάνειας (Top-hammer drills), όπου ο παλμός της κρούσης παράγεται έξω από το διάτρημα και στην συνέχεια μεταφέρεται μέσω ενός διατρητικού στελέχους στο κρουστικό άκρο. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται για την όρυξη διατρημάτων μικρής διαμέτρου.
- ii. ενδοδιατρητικά συστήματα (Down-the-hole drills), όπου ο παλμός της κρούσης παράγεται μέσα στο διάτρημα και μεταδίδεται απευθείας στο κρουστικό άκρο. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται για την όρυξη διατρημάτων μεγαλύτερης διαμέτρου.

Η μηχανική διάτρηση (rotary drilling) είναι η πιο ευέλικτη από τις μεθόδους διάτρησης. Είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί σε χαμηλής αντοχής υλικά με συρόμενα κοπτικά άκρα (drag bits) ή σε σκληρά πετρώματα με κυλιόμενα κοπτικά (roller bits).

Στην περίπτωση κατασκευής στοών ή σηράγγων, προτιμάται η χρήση αυτοματοποιημένων υπόγειων συγκροτημάτων διάτρησης (drilling jumbos) (Jimeno *et al.*, 1995). Τα συγκροτήματα αυτά είναι αεροκίνητα ή υδραυλικά και συμπεριλαμβάνουν από έναν έως τρεις βραχίονες (booms), οι οποίοι μπορούν να προσβάλλουν τα μέτωπα εξόρυξης με ένα ευρύ φάσμα γωνιών.

Αερισμός (Ventilation)

Αφού γίνει η ανατίναξη, γίνεται απομάκρυνση των αερίων της ανατίναξης και της σκόνης που ενδεχομένως έχει παραχθεί. Επιτυγχάνεται μέσω αεραγωγών (airducts) που εισάγουν φρέσκο αέρα στην στοά ή σήραγγα. Ο απαιτούμενος χρόνος εξαερισμού ανά κύκλο τοποθετείται μεταξύ 10-30 min (Zare, 2007b). Σε άλλες περιπτώσεις φτάνει και τα 45 min (Skawina, 2013).

Απομάκρυνση υπολειπόμενων θραυσμάτων ή Ξεσκάρωμα (Scaling)

Το ξεσκάρωμα αποτελεί μια χρονοβόρα διεργασία. Η απομάκρυνση θρυμματισμένου πετρώματος από τα τοιχώματα και την κορυφή (crown) της στοάς ή σήραγγας γίνεται με χειρωνακτικό τρόπο είτε με χρήση αερόσφυρων ή υδραυλικών σφυριών. Με το ξεσκάρωμα, προετοιμάζεται η στοά ή σήραγγα ώστε να τοποθετηθούν στηρίξεις και ελέγχεται ο βαθμός υπερθέρμανσης (overbreak).

Φόρτωση και μεταφορά σωρού ανατίναξης (Mucking)

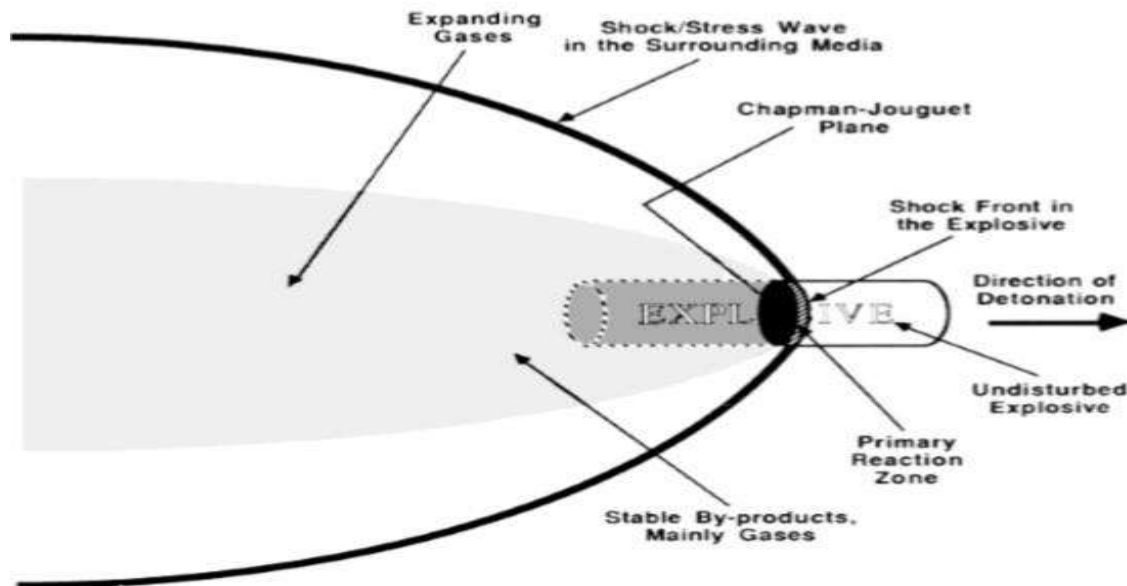
Η φόρτωση και η μεταφορά της σωρού που προκύπτει από την ανατίναξη γίνεται με χρήση οχημάτων με την απαραίτητη χωρητικότητα. Ανάλογα με την μέθοδο εξόρυξης του πετρώματος, είτε με Διάτρηση-Ανατίναξη είτε με μηχανήματα ολομέτωπης κοπής (TBMs), τα οχήματα κινούνται με ελαστικά ή σε ράγες αντίστοιχα. Σε μεγαλύτερα έργα ή σε σήραγγες μεγάλου μήκους τοποθετούνται και επιπρόσθετοι ιμάντες (conveyor belts).

1.2 Μηχανισμός της ανατίναξης

Η έκρηξη αποτελεί μια μορφή ταχείας εκτόνωσης της ύλης σε μεγαλύτερο όγκο σε σχέση με την αρχική κατάσταση. Με τον όρο ανάφλεξη (combustion) περιγράφεται η καύση σε ατμοσφαιρικές συνθήκες.

Η διαδικασία της ανατίναξης ξεκινά με την αύξηση της πίεσης και της θερμοκρασίας της εκρηκτικής ύλης λόγω της δράσης του κρουστικού κύματος. Έτσι, λαμβάνει χώρα μια χημική αντίδραση στο εσωτερικό της εκρηκτικής ύλης, στην ζώνη αντίδρασης (reaction zone). Το πάχος της ζώνης αυτής εξαρτάται από την ισχύ της εκρηκτικής ύλης. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το πάχος αυτό είναι της τάξης ορισμένων χιλιοστών. Κατά την διάρκεια της αντίδρασης παρατηρείται μια πτώση πίεσης. Τα αέρια προϊόντα της αντίδρασης απομακρύνονται από την ζώνη αντίδρασης και εκτονώνονται (ή αραιώνονται) σε κανονικές συνθήκες. Για αυτόν τον λόγο η νέα ζώνη στην οποία βρίσκονται συχνά αναφέρεται ως ζώνη αραιώσης. Το επίπεδο μεταξύ της ζώνης αντίδρασης και της ζώνης αραιώσης είναι γνωστό ως επίπεδο Chapman-Jouguet, όπως

φαίνεται στο σχήμα 1.1. Η πίεση ανατίναξης (detonation pressure) που αποτελεί ένα από τα χαρακτηριστικά της εκάστοτε εκρηκτικής ύλης, υπολογίζεται στο επίπεδο Chapman-Jouguet.



Σχήμα 1.1 «Σχηματική απεικόνιση μιας έκρηξης»

1.3 Μηχανισμός Θραύσης του Πετρώματος

Όταν λαμβάνει χώρα η διαδικασία της ανατίναξης (detonation), επικρατούν δύο φάσεις. Η πρώτη φάση είναι η κρουστική φάση που προκαλείται από το ωστικό κύμα (shock wave). Η δεύτερη φάση είναι η φάση των αερίων της ανατίναξης που ακολουθούν την διεύθυνση του μετώπου της ανατίναξης (detonation front). Υπάρχουν τουλάχιστον οκτώ μηχανισμοί θραύσης των πετρωμάτων. (Jimeno, Jimeno, & Carcedo, 1995)

1.3.1 Θλίψη των πετρωμάτων

Κατά τις πρώτες στιγμές της ανατίναξης παρατηρείται σημαντική αύξηση της πίεσης, σε κυλινδρική μορφή, λόγω του κρουστικού κύματος (strain wave). Η πίεση αυτή ξεπερνά την θλιπτική αντοχή του πετρώματος και οδηγεί στην διαταραχή της κρυσταλλικής δομής και της διάταξης των κόκκων του πετρώματος.

Σχηματίζεται η λεγόμενη ζώνη θλίψης (crushed zone), το πάχος της οποίας είναι πολύ σημαντικό στην διαδικασία της ανατίναξης. Εξαρτάται κυρίως από την πίεση πυροδότησης (detonation pressure) και την συσχέτιση της γόμωσης με το τοίχωμα του διατρήματος. Οι τιμές που συνήθως παρατηρούνται είναι της τάξης των 8D για ισχυρές εκρηκτικές ύλες και 2D-4D για συνηθισμένες εκρηκτικές ύλες. (Όπου D η διάμετρος του διατρήματος). Κατά τον Hagan (1977) ο μηχανισμός αυτός καταναλώνει σημαντικό μέρος της ενέργειας του κύματος μετατόπισης αλλά συμμετέχει ελάχιστα στην ουσιαστική θραύση του πετρώματος.

1.3.2 Ακτινικές Ρωγματώσεις (Radial Fracturing)

Οι ακτινικές ρωγματώσεις οφείλονται σε εφαπτομενικές παραμορφώσεις, ως προς το επίπεδο του μετώπου του κύματος μετατόπισης, που ξεπερνούν αυτές που αντιστοιχούν στην εφελκυστική αντοχή του πετρώματος. Οι παραμορφώσεις αυτές παρατηρούνται κατά την μετάδοση του κρουστικού κύματος και λόγω των θλιπτικών φορτίων που αναπτύσσονται ως αποτέλεσμα της δράσης του.

Το πλήθος και το τελικό εύρος των ρωγμών αυτών εξαρτάται από (Jimeno, Jimeno, & Carcedo, 1995):

- a) Την ένταση του κρουστικού κύματος όταν αυτό προσπίπτει στο τοίχωμα του διατρήματος ή στο εξωτερικό σύνορο της ζώνης θραύσης
- b) Την (δυναμική) εφελκυστική αντοχή του πετρώματος και την απόσβεση της ενέργειας Μετατόπισης (Strain Energy).

Η ταχύτητα διάδοσης των ρωγμών αντιστοιχεί περίπου στο 15 έως 40 % της αντίστοιχης ταχύτητας μετάδοσης του κύματος μετατόπισης. Η παρουσία φυσικών ασυνεχειών οδηγεί σε επέκταση των ρωγμών. Όμως οι ρωγμές αναπτύσσονται, κατά κύριο λόγο, σε διεύθυνση που τέμνει την διεύθυνση γόμωσης.

1.3.3 Αστοχία λόγω απολέπισης (Spalling)

Με την ανάκλαση του θλιπτικού κρουστικού κύματος σε μια ελεύθερη επιφάνεια, σχηματίζεται ένα εφελκυστικό κύμα. Εάν το εφελκυστικό κύμα υπερτερεί της δυναμικής εφελκυστικής αντοχής του πετρώματος, τότε παρατηρείται το φαινόμενο γνωστό ως απολέπιση (spalling). Η εφελκυστική αντοχή των πετρωμάτων αντιστοιχεί στο 5-15 % της θλιπτικής αντοχής. Οι Jimeno *et al.* αναφέρουν ότι η διασπορά του ανακλώμενου κύματος είναι έντονη υπό ορισμένες συνθήκες. Συγκεκριμένα, το μέτωπο του ανακλώμενου κύματος εμφανίζει μεγαλύτερη κύρτωση σε σχέση

με το αρχικό κύμα, εάν η επιφάνεια είναι κυλινδρικής μορφής. Επομένως, ο μηχανισμός αυτός ενδεχομένως να παρατηρηθεί στα διατρήματα προεκσκαφής (cut). Η απολέπιση δεν συνεισφέρει σημαντικά στην συνολική θραύση του πετρώματος. Όμως, παρατηρείται έντονα σε ορισμένες περιοχές. Συγκεκριμένα, σε απόσταση $15D$ (όπου D : η διάμετρος του διατρήματος) από το διάτρημα, η ανάκλαση των κυμάτων είναι σημαντική λόγω της διαφορετικής ακουστικής συμβατότητας σε εσωτερικές ασυνέχειες χωρίς την παρουσία νερού ή άλλων μετέωρων υλικών. Ως ακουστική συμβατότητα νοείται το γινόμενο $\rho \cdot c_p$, όπου ρ : η πυκνότητα του πετρώματος σε $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ και c_p : η ταχύτητα διάδοσης του ηχητικού κύματος στο πέτρωμα (propagation velocity).

1.3.4 Εκτόνωση αερίων ανατίναξης

Αφού παρέλθει το κρουστικό κύμα, παρατηρούνται ψευδοστατικές συνθήκες (quasi-static) περιμετρικά του διατρήματος (blasthole) λόγω της επίδρασης της πίεσης των αερίων. Τα εκτονούμενα αέρια, εισέρχονται στις ακτινικές ρωγμές που έχουν προηγουμένως σχηματιστεί και τις ενισχύουν. Η ανάπτυξη και η διεύθυνση των ακτινικών ρωγμών συνδέεται σε μεγάλο βαθμό με την πίεση της φάσης των αερίων αλλά και με την παραμονή τους στο επίπεδο της ανατίναξης. Εάν τα αέρια αυτά δραπετεύσουν λόγω κακής τοποθέτησης της επιγόμωσης (stemming) ή λόγω παρουσίας επιπέδου αδυναμίας στην ελεύθερη επιφάνεια, τότε η απόδοση της ανατίναξης μειώνεται σημαντικά.

1.3.5 Απελευθέρωση του φορτίου

Όπως συζητήθηκε προηγουμένως, παρατηρούνται ψευδοστατικές συνθήκες, αφού παρέλθει το κρουστικό κύμα. Τα αέρια της ανατίναξης δραπετεύουν μέσω των ρωγμών που σχηματίστηκαν προηγουμένως και της επιγόμωσης. Έτσι, παρατηρείται πτώση της πίεσης εντός του διατρήματος καθώς και μετατοπίσεις όγκων του πετρώματος. Κατά συνέπεια, παρατηρείται χαλάρωση του πετρώματος, η οποία οδηγεί στον σχηματισμό εφελκυστικών τάσεων στο πέτρωμα. Μάλιστα, η υπερεκσκαφή (overbreak), που αποτελεί σημαντική παράμετρο που πρέπει να ελεγχθεί, οφείλεται σε αυτόν τον μηχανισμό θραύσης του πετρώματος.

1.4 Διατάξεις τοποθέτησης διατρημάτων στον χώρο ανατίναξης

Τα διατρήματα (υπόνοιμοι), ανάλογα με την θέση τους ως προς την διατομή και τον χρόνο πυροδότησης ταξινομούνται σε διαφορετικές κατηγορίες.

Οι κατηγορίες αυτές είναι:

- i. Διατρήματα προεκσκαφής (Cut holes)
- ii. Διατρήματα κύριας ανατίναξης ή διατρήματα διευρύνσεως (Stopping holes ή Easers)
- iii. Διατρήματα δαπέδου (Invert holes ή Lifters)
- iv. Διατρήματα συνόρου (Contour Holes)

Η προεκσκαφή (cut), αποτελεί το πρώτο άνοιγμα ή πιο σωστά την πρώτη ελεύθερη επιφάνεια που δημιουργείται. Ο σχεδιασμός της προεκσκαφής είναι ιδιαίτερα σημαντικός και επιδρά στα επόμενα στάδια της ανατίναξης. Συγκεκριμένα, με τα διατρήματα προεκσκαφής καθορίζεται το μήκος διάτρησης. Η ποσότητα εκρηκτικής ύλης (γόμωση) στα διατρήματα αυτά συνήθως είναι υψηλή, διότι η ενέργεια θραύσης που πρέπει να αποδοθεί σε ένα άρρηκτο πέτρωμα είναι αντίστοιχα υψηλή. Η προεκσκαφή, ανάλογα με τον προσανατολισμό των υπονόμων σε σχέση με το μέτωπο, διακρίνεται σε αρχική κοπή υπό γωνία και σε παράλληλη αρχική κοπή. Οι κοπές υπό γωνία είναι οι εξής: πυραμιδοειδής κοπή, σφηνοειδής κοπή ή μορφής V (V-cut ή wedge cut) και μορφής ριπιδίου (Fan cut). Σε γενικές γραμμές, οι κοπές υπό γωνία εάν συγκριθούν με τις παράλληλες κοπές, απαιτούν λιγότερα διατρήματα και λιγότερη γόμωση (ποσότητα εκρηκτικών υλών). Εφαρμόζονται σε όλους των τύπους πετρωμάτων, όμως απαιτείται μεγάλη ακρίβεια από το μέρος του εκάστοτε χειριστή των μηχανημάτων, ώστε να ακολουθηθούν οι σχεδιασμένες γωνίες και διατάξεις. Το μήκος προχώρησης (advance rate ή pull) εξαρτάται από τις διαστάσεις της σήραγγας ή στοάς. Η εφαρμογή μεγαλύτερων μηκών προχώρησης, με διατρήματα υπό γωνία είναι εφικτή εάν εφαρμοστεί η διπλή διάταξη. Από την άλλη, πλέον οι παράλληλες κοπές είναι οι πιο διαδεδομένες και επιλέγονται συχνότερα. Έχουν προταθεί εναλλακτικές διατάξεις αλλά το κοινό τους στοιχείο είναι οι μικρές αποστάσεις μεταξύ των διατρημάτων, Θα πρέπει να αναφερθεί ότι στις παράλληλες κοπές, γίνεται χρήση των λεγόμενων διατρημάτων ανακούφισης ή κενών διατρημάτων.

1.5 Ελεγχόμενες Παράμετροι Ανατινάξεων

Η επίτευξη των καθορισμένων στόχων της ανατινάξης, εξαρτάται από μια σειρά παραγόντων. Κατά Jimeno *et. al.*, (1995), διακρίνονται σε γεωμετρικούς παράγοντες, φυσικοχημικούς παράγοντες και χρονικούς παράγοντες. Στους γεωμετρικούς παράγοντες εντάσσονται: η διάμετρος των διατρημάτων, το μήκος διατρήματος, το φορτίο (Burden) και το διάστημα (Spacing).

1.5.1 Διάμετρος διατρήματος

Μετράται σε mm (SI) ή σε in (αγγλοσαξονικό σύστημα). Η επιλογή της κατάλληλης διαμέτρου σχετίζεται με τον επιθυμητό θρυμματισμό και με την ευκολία ή δυσκολία στην όρυξη των διατρημάτων. Σε γενικές γραμμές, μεγαλύτερες διαμέτροι οδηγούν σε μεγαλύτερη γόμωση, ειδικότερα μεγαλύτερη γόμωση πυθμένα κοντά στο μέτωπο. Ένα πλεονέκτημα της επιλογής μεγαλύτερης διαμέτρου είναι η μείωση του πλήθους των διατρημάτων στο μέτωπο.

1.5.2 Μήκος διατρήματος

Το μήκος διατρήματος επιλέγεται ανάλογα με τις φυσικές ιδιότητες του πετρώματος. Για μικρής αντοχής και χαλαρά πετρώματα επιλέγονται μικρότερα μήκη απ' ό,τι σε άλλες περιπτώσεις. Στις παράλληλες κοπές, το μήκος διατρήματος είναι μεγαλύτερο απ' ό,τι στις κοπές υπό γωνία. Στόχος είναι η επίτευξη της μέγιστης δυνατής προχώρησης ("pull"). Η προχώρηση αυτή δεν ξεπερνά το 95% της συνολικής διάτρησης (Τσουτρέλης, 2001). Οι τυπικές τιμές του μήκους διατρήματος βρίσκονται μεταξύ 4-5 m όσον αφορά τις παράλληλες διατάξεις της προεκσκαφής. Η επιλογή μεγαλύτερων μηκών διατρήματος οδηγεί στην παρουσία ορισμένων σφαλμάτων. Το σημαντικότερο εξ αυτών είναι η παρέκκλιση (drilling deviation). Η παρέκκλιση αναφέρεται στην απόκλιση του εκάστοτε διατρήματος από την καθετότητα σε σχέση με το μέτωπο της στοάς. Ο Τσουτρέλης αναφέρει ότι σε μήκος διατρήματος έως και 2.0 m, η παρέκκλιση αντιστοιχεί σε $20 \frac{\text{mm}}{\text{m}}$, ενώ σε μεγαλύτερα μήκη φθάνει έως και το 3-5 % του μήκους διατρήματος. Βέβαια, υπάρχει και το σφάλμα τοποθέτησης του διατρήματος που μπορεί να επιλυθεί με τις κατάλληλες σημειώσεις στο μέτωπο της στοάς.

1.5.3 Φορτίο (Burden)

Κατά τον Konya, (1995) το φορτίο αποτελεί την πιο σημαντική παράμετρο σχεδιασμού. Ορίζεται ως η απόσταση μεταξύ δυο διαδοχικών διατρημάτων, που δεν έχουν τον ίδιο χρόνο έναυσης. Με άλλα λόγια ως φορτίο λογίζεται η απόσταση μέχρι την επόμενη ελεύθερη επιφάνεια, που στις

ανατινάξεις δημιουργείται από προγενέστερη έναυση. Υπάρχουν εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού του φορτίου, τόσο σε υπαίθριες όσο σε υπόγειες ανατινάξεις. Μικρές τιμές του φορτίου οδηγούν σε μεγάλες εκτοξεύσεις λίθων μακριά από το μέτωπο και σε λεπτόκοκκο θρυμματισμό. Από την άλλη, μεγάλες τιμές του φορτίου, συνεισφέρουν σε σημαντική θραύση της οροφής και των πλευρών του μετώπου. Ο θρυμματισμός ενδέχεται να είναι αδρόκοκκος και ίσως παρατηρηθούν ισχυρές δονήσεις.

1.5.4 Διάστημα (Spacing)

Το διάστημα αφορά την απόσταση μεταξύ διατρημάτων με τον ίδιο χρόνο καθυστέρησης. Το διάστημα αποτελεί συνάρτηση του φορτίου. Εξαρτάται από την σειρά πυροδότησης (initiation sequence) και τους χρόνους καθυστέρησης. Μικρή τιμή του διαστήματος (πυκνή διάταξη), οδηγεί σε ανεπαρκή θρυμματισμό και σε προβλήματα όσον αφορά την συνέχεια της ανατίναξης. Το πηλίκο S/B δηλώνει την γεωμετρία της εκάστοτε διάταξης.

1.5.5 Επιγύμωση (Stemming)

Η επιγύμωση (stemming) αποτελεί αδρανές υλικό το οποίο τοποθετείται πάνω από την γύμωση στήλης του διατρήματος. Ο ρόλος της επιγύμωσης είναι να εγκλωβίζει τα αέρια της ανατίναξης στον χώρο ανατίναξης για επαρκές χρονικό διάστημα ώστε να μην παρατηρηθεί απώλεια της ενέργειας που προέρχεται από αυτά. Στις περιπτώσεις ανεπαρκούς επιγύμωσης, παρατηρούνται φαινόμενα δονήσεων, θορύβου και εκτοξευόμενων λίθων (flyrock). Στην πράξη, ως υλικά επιγύμωσης λαμβάνονται τα αδρανή υλικά που διατρήθηκαν. Όσον αφορά το μήκος επιγύμωσης, στις υπόγειες ανατινάξεις δίνεται συναρτήσει είτε του φορτίου, είτε του μήκους διάτρησης.

1.5.6 Βαθμός σύζευξης (Coupling Ratio)

Εκφράζει το ποσοστό πλήρωσης του διατρήματος από την εκάστοτε εκρηκτική ύλη. Τα καψύλλια (cartridges) έχουν βαθμό σύζευξης μικρότερο της μονάδας, διότι ισχύει ότι $CR = d_e/d$ όπου d_e η διάμετρος της εκρηκτικής ύλης. Εκρηκτικές ύλες που τοποθετούνται χύδην στο διάτρημα όπως πχ το ANFO (πετραμμωνίτες) έχουν $CR = 1$. Η ποσότητα της εκρηκτικής ύλης που τοποθετείται στα διατρήματα εκφράζεται με το μέγεθος της γραμμικής πυκνότητας γύμωσης (Linear charge concentration) L_d . Για $CR = 1$ η γραμμική πυκνότητα γύμωσης βρίσκεται με την εξής σχέση: $L_d = \rho_e \cdot \pi \cdot (D^2/4)$, σε αντίθετη περίπτωση ισχύει ότι $L_d = \rho_e \cdot \pi \cdot (D_e^2/4)$. Ο παράγοντας ρ_e είναι η πυκνότητα γύμωσης της εκρηκτικής ύλης σε g/cm^3 ή σε kg/m^3 .

1.5.7 Χρόνοι επιβράδυνσης

Επιλέγονται κατάλληλα ώστε να δίνεται χρόνος για να απομακρύνονται τα ογκοτεμάχια που αποδεσμεύονται. Στις υπαίθριες ανατινάξεις, επιλέγεται ο χρόνος καθυστέρησης των 25 ms μεταξύ των σειρών. Στις υπόγειες ανατινάξεις, οι χρόνοι καθυστέρησης είναι 100 ms για τα διατρήματα της προεξσκαφής και 200 ms για τα υπόλοιπα διατρήματα. Σε περίπτωση που οι όγκοι που απελευθερώνονται είναι μεγάλοι, επιλέγονται χρόνοι της τάξης των 500 ms. Οι χρόνοι καθυστέρησης ως παράμετρος συνδέονται με το φορτίο, διότι εάν επιλεγούν μικρότεροι από την βέλτιστη τιμή, οδηγούν σε μη ομαλή εκτόνωση της ενέργειας ανατίναξης. Παρατηρούνται φτωχός θρυμματισμός, σημαντικές δονήσεις και εκτοξευόμενοι λίθοι (flyrock). Στην βιβλιογραφία έχουν προταθεί κριτήρια επιλογής των χρόνων καθυστέρησης αλλά και αλγόριθμοι βελτιστοποίησης. Οι Guan *et al.*, 2019 έχουν αναπτύξει έναν τέτοιο αλγόριθμο. Ο κύριος στόχος ανάπτυξης του είναι ο περιορισμός ανεπιθύμητων δονήσεων. Η μέθοδος αυτή έλαβε υπόψιν τους χρόνους καθυστέρησης που χρησιμοποιήθηκαν σε λατομία, τον τύπο του εκάστοτε διατρήματος, τους μηχανισμούς θραύσης των πετρωμάτων και την μηχανική του σεισμικού κύματος.

1.6 Μοντέλο εκτίμησης του θρυμματισμού

Πρώτος ο Kuznetsov μελέτησε την σχέση της εκρηκτικής ύλης και της γεωλογίας με τον θρυμματισμό. Η σχέση που συνδέει αυτά τα μεγέθη με το μέσο μέγεθος θρυμματισμού (\bar{x}), όπως ορίστηκε, είναι η παρακάτω:

$$\bar{x} = A \cdot q^{-0.8} \cdot Q^{0.167} \quad (1.1)$$

Όπου:

- A: παράγοντας του πετρώματος ο οποίος συνδέεται με τον συντελεστή εξορυξιμότητας με εκρηκτικές ύλες (blastability index), με $A = 7$ για τυπικά πετρώματα, $A = 10$ για σκληρά πετρώματα με έντονες ρωγματώσεις και $A = 13$ για σκληρά πετρώματα χωρίς ρωγματώσεις
- q: η ειδική κατανάλωση με $q = \frac{Q}{V}$ και Q: ποσότητα εκρηκτικής ύλης V: όγκος διαρρηχθέντος πετρώματος

Ο Kuznetsov στην έρευνα του χρησιμοποίησε δυναμίτιδα (TNT), οπότε στην σχέση (1.1)

προστέθηκε ο όρος $\left(\frac{115}{RWS}\right)^{\frac{19}{30}}$ ώστε να εφαρμοστεί και σε άλλες εκρηκτικές ύλες. Έτσι προέκυψε η

σχέση (1.2). Ο όρος RWS αφορά την σχετική ισχύ των εκρηκτικών υλών σε σχέση με κάποια εκρηκτική ύλη αναφοράς, όπως το ANFO.

$$\bar{x} = A \cdot q^{-0.8} \cdot Q^{0.167} \cdot \left(\frac{115}{RWS} \right)^{\frac{19}{30}} \quad (1.2)$$

Ο Cunningham το 1987 παρατήρησε αναλύοντας μεγάλο μέρος δειγμάτων, ότι η κατανομή Rosin-Rammler ή Weibull και η καμπύλη της περιέγραφε σε ικανοποιητικό βαθμό τον θρυμματισμό. Το μέσο μέγεθος \bar{x} εμπεριέχεται στην καμπύλη. Ο Cunningham εισήγαγε την έννοια του συντελεστή ομοιομορφίας (uniformity index, n) ώστε να ρυθμίζεται η συνολική μορφή της κατανομής. Οι πληροφορίες αυτές κωδικοποιούνται στην σχέση (1.3)

$$R_x = e^{-\left(\frac{x}{x_c}\right)^n} \quad (1.3)$$

όπου: R_x το παραμένον κλάσμα (%), x το μέγεθος κλάσματος (cm), x_c το χαρακτηριστικό μέγεθος (cm) και n ο συντελεστής ομοιομορφίας.

Το χαρακτηριστικό μέγεθος x_c και το μέσο μέγεθος συνδέονται μεταξύ τους οπότε η σχέση (1.3) γίνεται:

$$R_x = e^{-\ln 2 \cdot \left(\frac{x}{\bar{x}}\right)^n} \quad (1.4)$$

Το μοντέλο αυτό ονομάστηκε Kuz-Ram. Ο Cunningham προκειμένου να ορίσει τον συντελεστή n , πραγματοποίησε μια σειρά πειραμάτων σε υπαίθριες ανατινάξεις και κατέληξε στην σχέση (1.4) που φαίνεται παρακάτω:

$$n = \left(2.2 - 1.4 \cdot \frac{B}{d} \right) \cdot \left(1 - \frac{W}{B} \right) \cdot \left(1 + \frac{A - 1}{2} \right) \cdot \frac{L}{H} \quad (1.5)$$

Όπου n : ο συντελεστής ομοιομορφίας, B : το φορτίο (m), d : η διάμετρος διατρήματος (mm), w : η τυπική απόκλιση ακρίβειας διάτρησης (m), $A = \frac{S}{B}$ με S : το διάστημα (m), L : το μήκος γόμωσης (m) και H : το ύψος της βαθμίδας

Οι τιμές του n κυμαίνονται μεταξύ του 0.8 - 2.2. Το μοντέλο Kuz-Ram μπορεί να προβλέψει με σχετική ακρίβεια τα αδρόκοικα τμήματα της κατανομής αλλά δίνει πτωχά αποτελέσματα στα λεπτόκοικα τμήματα.

Κατά τον Konya, το μοντέλο Kuz-Ram έχει περιορισμούς στην εφαρμογή του. Συγκεκριμένα λαμβάνεται υπόψιν μόνο η διάταξη και όχι οι χρόνοι επιβράδυνσης (timing). Ακόμη, προϋποθέτει την σωστή κατανομή των χρόνων επιβράδυνσης ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Είναι σημαντικό η εκρηκτική ύλη που επιλέγεται να αποδίδει την απαιτούμενη ενέργεια όπως αναγράφεται από την σχετική κατά βάρος ισχύ (Relative Weight Strength- RWS) στην διάμετρο που έχει επιλεχθεί. Τέλος, δεν λαμβάνεται υπόψιν η γεωλογία της περιοχής όσον αφορά την αναλυτική καταγραφή της παρουσίας ασυνεχειών, διακλάσεων και άλλων περιοχών αδυναμίας, συνεκτιμώνται με βάση την επιλογή του συντελεστή πετρώματος A .

Κεφάλαιο 2 Μέθοδοι σχεδιασμού υπογείων ανατινάξεων

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται ανάλυση των μεθόδων και των τεχνικών υπολογισμών όλων των παραμέτρων που σχετίζονται με έργα υπόγειων ανατινάξεων στις στοές. Στην βιβλιογραφία υπάρχουν πολλές μέθοδοι. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι εξής μέθοδοι: η Μέθοδος Konya και η Νορβηγική Μέθοδος (Μέθοδος NTNU).

2.1 Νορβηγική Μέθοδος (Μέθοδος NTNU).

Προτάθηκε από το πολυτεχνείο NTNU στο Trondheim της Νορβηγίας. Η μέθοδος αυτή κάνει χρήση εμπειρικών πινάκων και νομογραμμάτων. Για την προσαρμογή των στοιχείων σχεδιασμού στις ανάγκες του εκάστοτε έργου, η μέθοδος NTNU δέχεται τις εξής παραμέτρους:

1. Την επι τόπου γεωλογία (χαρακτηριστικά του πετρώματος)
2. Το μήκος διάτρησης
3. Ικανότητα χειριστή διατρητικού φορείου και γομωτή

Η μέθοδος αυτή θεωρεί την επιφάνεια του μετώπου της σήραγγας τέτοια ώστε να διακρίνεται σε τέσσερα μέρη. Τα διατρήματα χωρίζονται σε:

- i. Διατρήματα προεκσκαφής (Cut)
- ii. Διατρήματα διεύρυνσης (Easers)
- iii. Περιμετρικά διατρήματα (Contour holes)
- iv. Σειρά διατρημάτων κοντά στην περίμετρο (Row nearest contour)
- v. Διατρήματα Δαπέδου (Invert holes)

2.1.1 Δείκτης εξορυξιμότητας με εκρηκτικές ύλες και γεωλογία

Σύμφωνα με αυτήν την μέθοδο σχεδιασμού, το πρώτο βήμα είναι η αξιολόγηση της επι τόπου βραχομάζας. Η πληροφορία αυτή εμπεριέχεται στον συντελεστή εξορυξιμότητας με εκρηκτικές ύλες (Blastability Index, B.I ή SPR). Κατά τον Zare (2007a): ο συντελεστής SPR (ή B.I.) αποτελεί την ειδική κατανάλωση σε kg/m^3 ώστε να επιτευχθεί θρυμματισμός με $x_{50} = 250 \text{ mm}$.

$$\text{SPR} = \frac{0.736 \cdot I_{\alpha}^{0.6} \cdot L T^{0.7}}{\left(\frac{c}{1000}\right)^{0.4} \cdot \left(\frac{w}{c}\right)^{0.25} \cdot \rho^{0.2}} \quad (2.1)$$

όπου:

- c_n : ταχύτητα διάδοσης του ηχητικού κύματος σε διεύθυνση κάθετη στην στρώση (επί ξηρού) $\left[\frac{m}{s}\right]$
- c_p : ταχύτητα διάδοσης του ηχητικού κύματος σε διεύθυνση παράλληλη στην στρώση $\left[\frac{m}{s}\right]$
- I_x : ανισοτροπία, ισούται με $\frac{c_p}{c_n}$
- c : ταχύτητα διάδοσης ηχητικού κύματος μέσα στο πέτρωμα (επί ξηρού) $\left[\frac{m}{s}\right]$
- w : ταχύτητα ανατίναξης της εκρηκτικής ύλης $\left[\frac{m}{s}\right]$
- ρ : πυκνότητα πετρώματος $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$
- LT : πυκνότητα γόμωσης εκρηκτικής ύλης $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$

Ο συντελεστής αυτός έχει υπολογιστεί σε υπαίθριες ανατινάξεις, επομένως αναμένονται διαφοροποιήσεις σε υπόγεια μέτωπα. Κυρίως, δίνεται προσοχή στον βαθμό ρωγμάτωσης του πετρώματος και στην διεύθυνση των ρωγμών σε σχέση με τον άξονα της στοάς. Συγκεκριμένα, ρωγμές παράλληλες ή σχεδόν παράλληλες στον άξονα της στοάς, οδηγούν σε μειωμένο δείκτη εξορυξιμότητας με Ε.Υ (δηλαδή αποτελούν μια εξαιρετικά δυσμενή περίπτωση).

Εάν $SPR = 0.38 \text{ kg/m}^3$ η εξορυξιμότητα με εκρηκτικές ύλες χαρακτηρίζεται καλή (good blastability).

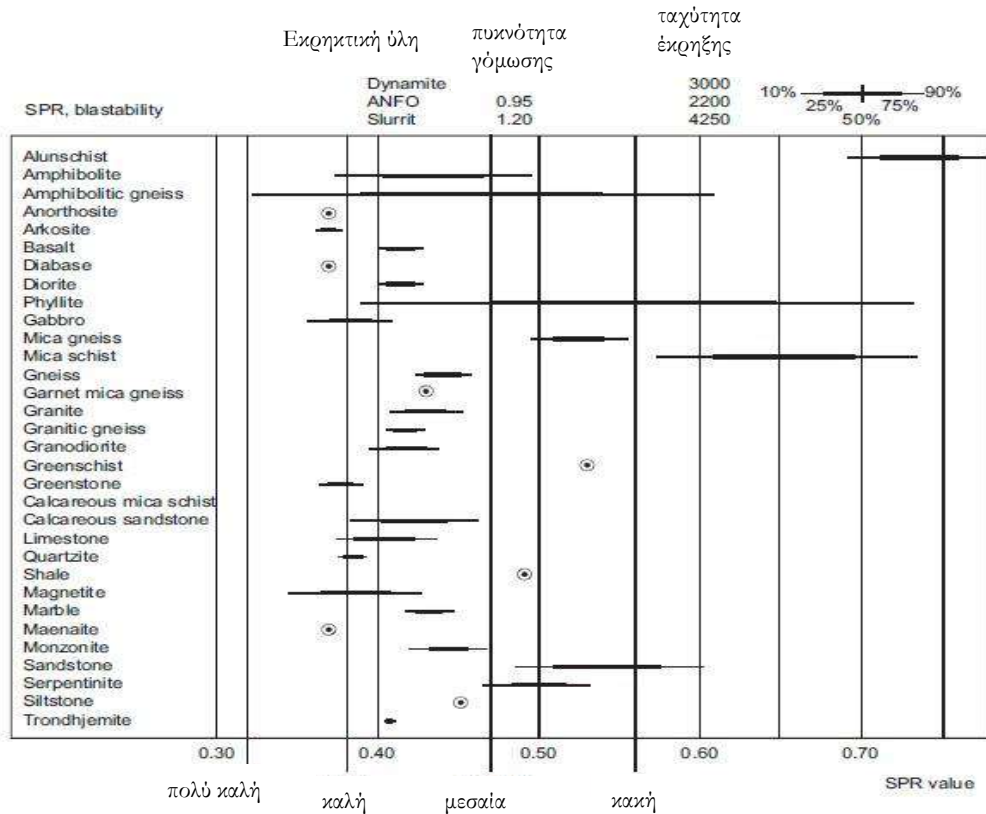
Εάν $SPR = 0.47 \text{ kg/m}^3$ η εξορυξιμότητα με εκρηκτικές ύλες χαρακτηρίζεται μεσαία (medium blastability).

Εάν $SPR = 0.56 \text{ kg/m}^3$ η εξορυξιμότητα με εκρηκτικές ύλες χαρακτηρίζεται κακή (poor blastability).

Η ταξινόμηση αυτή, όπως αναφέρθηκε παραπάνω αφορά την περίπτωση των υπαίθριων ανατινάξεων και χρησιμοποιείται στον χαρακτηρισμό των πετρωμάτων, λόγω της έλλειψης δεδομένων στις υπόγειες ανατινάξεις.

Μια σημαντική παρατήρηση είναι ότι όσο αυξάνεται ο συντελεστής B.I (ή SPR), τόσο χειρότερη χαρακτηρίζεται η εξορυξιμότητα με εκρηκτικές ύλες. Αυτό είναι εμφανές και από τον εναλλακτικό

ορισμό του συντελεστή αυτού που συνδέεται με οικονομικούς παράγοντες, όπως η ποσότητα των εκρηκτικών υλών.



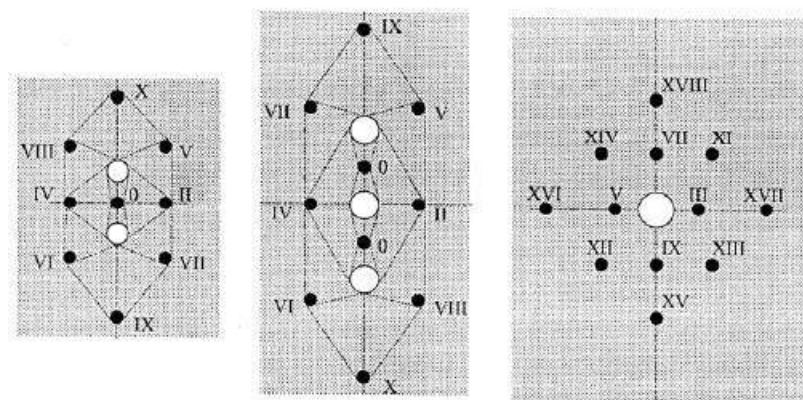
Σχήμα 2.1 «Εύρος τιμών συντελεστή εξορυξιμότητας με Ε.Υ για υπαίθριες ανατινάξεις, ανάλογα με τον τύπο του πετρώματος» (πηγή: Zare, 2007a)

Στην περίπτωση χρησιμοποίησης εκρηκτικών υλών υπό την μορφή γαλακτώματος, χρησιμοποιείται μια απλοποιημένη σχέση υπολογισμού του συντελεστή SPR η οποία φαίνεται παρακάτω: (σχέση 2.2)

$$SPR = \frac{1.342 \cdot I_{\alpha}^{0.6}}{c_o^{0.15} \cdot \rho^{0.2}} \quad (2.2)$$

2.1.2 Αρχική κοπή ή προεκσκαφή

Η μέθοδος NTNU κάνει χρήση μεγάλων κενών διατρημάτων (Large holes), γνωστά και ως διατρήματα ανακούφισης (relief holes). Τα διατρήματα αυτά δίνονται σε συγκεκριμένες διαμέτρους: 76, 102 και 127 mm. Τυπικές διατάξεις προεκσκαφής φαίνονται στο σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2 «Τυπικές διατάξεις προεκσκαφής, ανάλογα με το κενό διάτρημα»

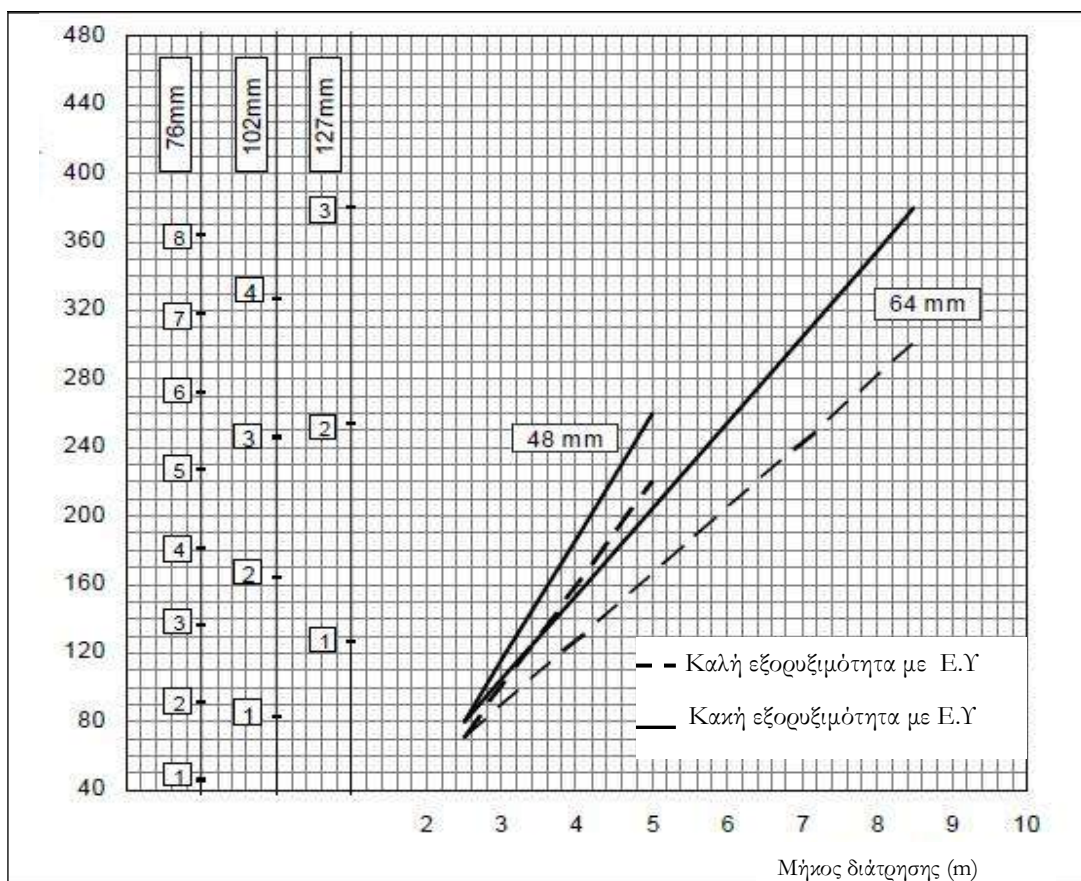
(76 mm αριστερά, 102 mm κέντρο, 127 mm δεξιά)

(πηγή: Zare 2007a)

Οι διατάξεις μεγάλων κενών διατρημάτων επιλέγονται διότι:

1. Μπορούν να ορυχθούν με μηχανικά μέσα (πχ. διατρητικά συγκροτήματα)
2. Είναι κατάλληλες και σε μεγαλύτερα μήκη διάτρησης
3. Επιτυγχάνεται ικανοποιητική προχώρηση
4. Θρυμματίζεται ικανοποιητικά το πέτρωμα

Βασική προϋπόθεση του σχεδιασμού είναι να δίδεται ο κατάλληλος χώρος για την διαστολή του όγκου του πετρώματος. Στην ουσία, γίνεται προσαύξηση κατά 80 % του διαθέσιμου όγκου προς ανατίναξη. Η επιλογή των κατάλληλων κενών διατρημάτων γίνεται σύμφωνα με το σχήμα 2.3. Το σχήμα αυτό δίνει την ελάχιστη απαιτούμενη επιφάνεια που καλύπτεται από κενά διατρήματα, συναρτήσει του μήκους διάτρησης. Στο ίδιο σχήμα, το πλήθος των κενών διατρημάτων διαφέρει ανάλογα με τη διάμετρο γομωμένου διατρήματος και τον δείκτη εξορυξιμότητας με εκρηκτικές ύλες. Τα γομωμένα διατρήματα διακρίνονται σε 48 mm και σε 64 mm.

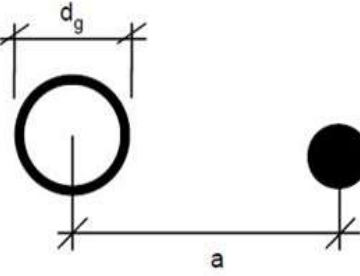


Σχήμα 2.3 «Επιλογή πλήθους κενών διατρημάτων συναρτήσει διαμέτρου διατρήματος και μήκους προχώρησης»
(πηγή: Zare, 2007a)

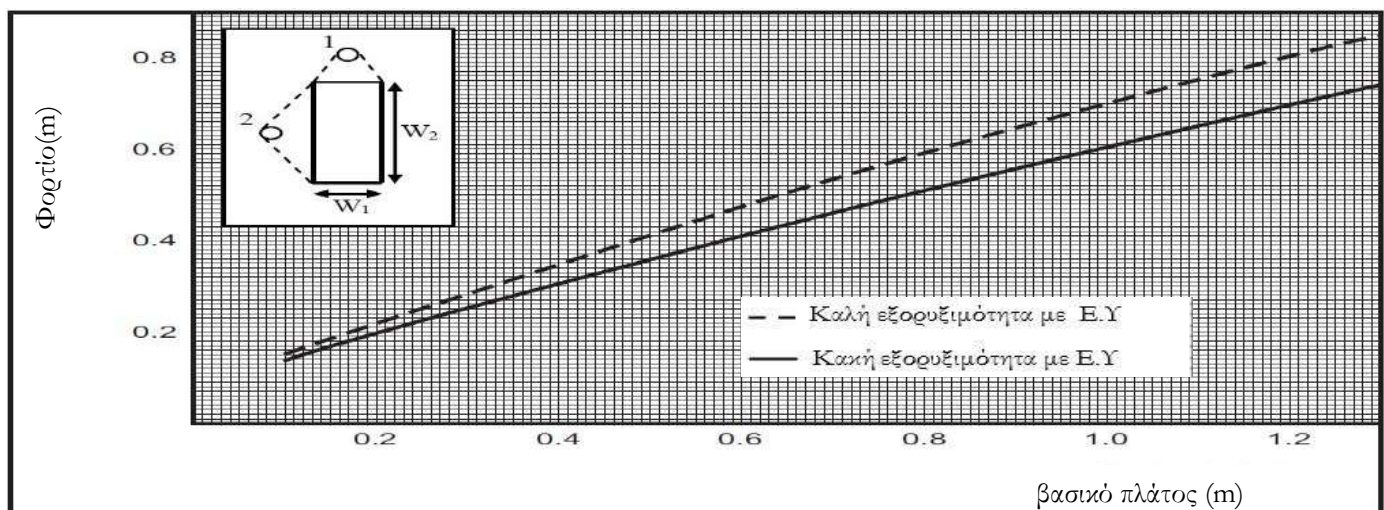
2.1.3 Σχεδιασμός αρχικής κοπής

Αφού επιλεγεί το κατάλληλο κενό διάτρημα, ο σχεδιασμός ξεκινά με τον υπολογισμό της κατάλληλης απόστασης του πρώτου γομωμένου διατρήματος με το κενό διάτρημα. Η απόσταση, a , υπολογίζεται σύμφωνα με τον πίνακα 2.1. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι, όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, να δίδεται επαρκής χώρος εκτόνωσης του όγκου του διαρρηχθέντος πετρώματος. Σε περίπτωση που δεν επαληθεύεται αυτή η συνθήκη, γίνονται οι απαραίτητες αλλαγές στην παράμετρο a . Ο έλεγχος αυτός συνήθως αρκεί να γίνει για τα πρώτα δυο διατρήματα.

Πίνακας 2.1 «Τιμές απόστασης a συναρτήσει των διαμέτρων των διατρημάτων» (πηγή: Zare, 2007a)

	Διάμετρος γομωμένου διατρήματος, d_h (mm)	Διάμετρος γομωμένου διατρήματος, d_g (mm)	Απόσταση, a
	48	76	$1.5 - 2.0 \cdot d_g$
		102	
		127	
	64	76	$2.0 - 2.5 \cdot d_g$
		102	
		127	

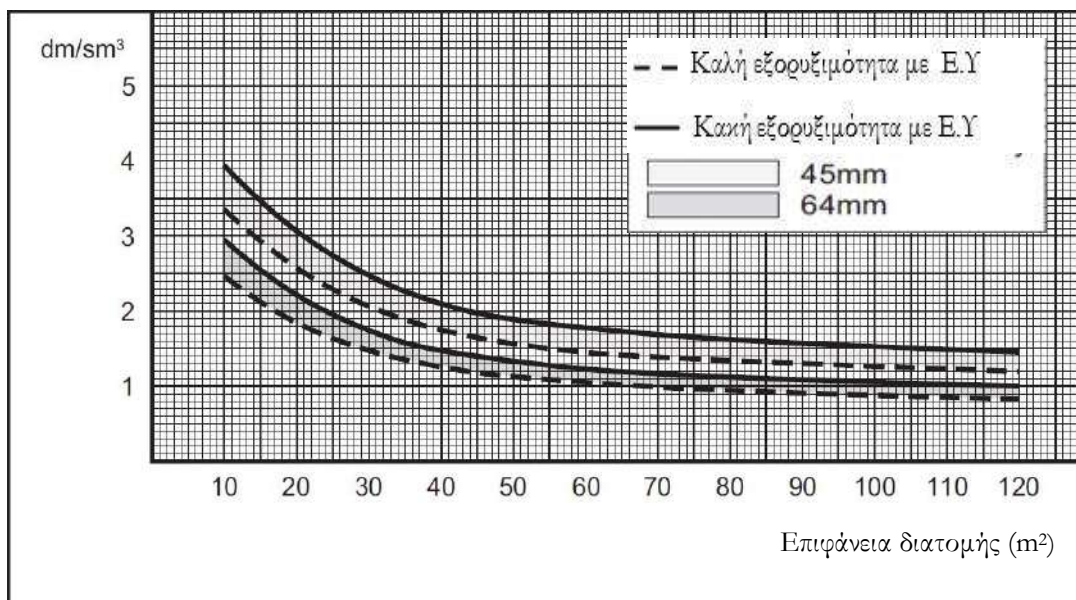
Για την επιλογή των σχεδιαστικών παραμέτρων των υπόλοιπων διατρημάτων της προεκσκαφής, γίνεται χρήση του σχήματος 2.4. Συγκεκριμένα, το φορτίο των υπόλοιπων διατρημάτων προκύπτει συναρτήσει του δείκτη εξορυξιμότητας με Ε.Υ και των ελεύθερων επιφανειών w_1 και w_2 . Στο σχήμα 2.4, φαίνονται δύο περιπτώσεις που αντιστοιχούν σε καλές συνθήκες ανατίναξης (καλός δείκτης εξορυξιμότητας με Ε.Υ) και σε κακές συνθήκες ανατίναξης (κακός δείκτης εξορυξιμότητας με Ε.Υ). Σε ενδιάμεσες συνθήκες απαιτείται παρεμβολή των τιμών. Τα πλάτη w_1 και w_2 δηλώνουν το πλάτος του ανοίγματος που δημιουργείται σε κάθε έναυση. Το σχήμα 2.4, ενδεχομένως να δίνει υψηλές τιμές φορτίου. Επομένως, γίνεται η ανάλογη προσαρμογή σε μικρότερες τιμές του φορτίου.



Σχήμα 2.4 «Προσέγγιση φορτίου προεκσκαφής συναρτήσει βασικού πλάτους» (πηγή: Zare, 2007a)

2.1.4 Προβλεπόμενη (Θεωρητική) ειδική διάτρηση

Ως ειδική διάτρηση, b , ορίζεται το πηλίκο του συνολικού μήκους διάτρησης των διατρημάτων προς τον όγκο που εξορύσσεται ανά κύκλο ανατίναξης. Στον όγκο αυτόν εφαρμόζεται και η ανάλογη προχώρηση (advance). Στο σχήμα 2.5 φαίνεται η θεωρητική ειδική διάτρηση, ανάλογα με τον δείκτη εξορυξιμότητας με Ε.Υ και την διάμετρο γομωμένου πετρώματος. Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν σε μήκος διάτρησης 5 m, επομένως για οποιαδήποτε απόκλιση εφαρμόζεται ο συντελεστής διόρθωσης k_{bl} . Για διατρήματα διαμέτρου 48 mm, η προχώρηση τοποθετείται στο 90 % του μήκους διάτρησης. Για διατρήματα διαμέτρου 64 mm, η προχώρηση τοποθετείται στο 96 % του μήκους διάτρησης. (NTNU Department of Civil and Transport Engineering (2006): Report 2A-05 DRILL AND BLAST TUNNELLING Blast Design)



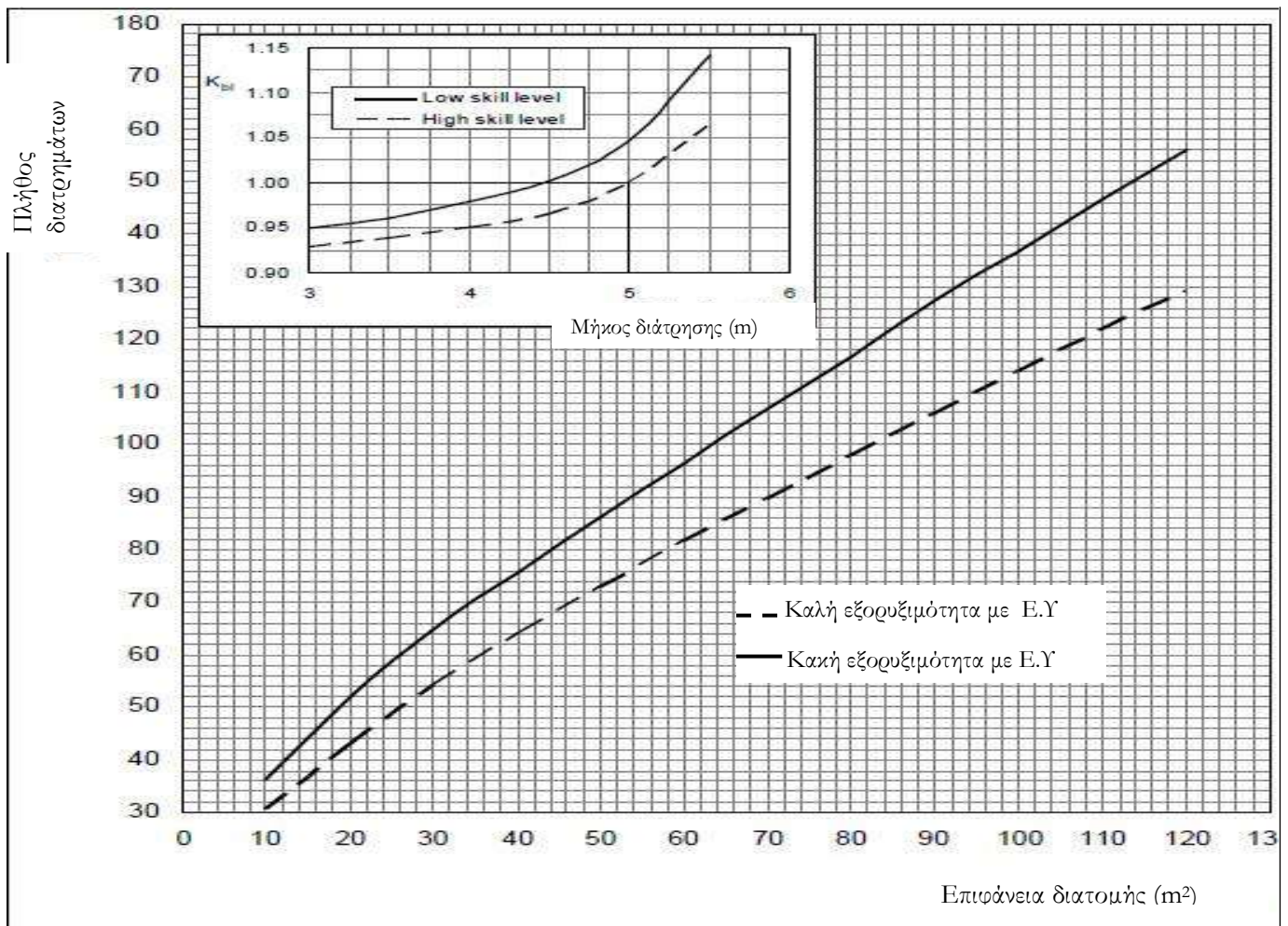
Σχήμα 2.5 «Η θεωρητική ειδική κατανάλωση, εκφρασμένη σε m^3/m^3 ανάλογα με την διάμετρο γομωμένου διατρήματος και τον δείκτη εξορυξιμότητας με Ε.Υ»
(πηγή: Zare, 2007a)

2.1.5 Συντελεστής k_{bl}

Ο συντελεστής k_{bl} αποτελεί έναν διορθωτικό συντελεστή. Εξαρτάται από το μήκος διάτρησης και τα προσόντα του εργατικού προσωπικού. Για εργατικό προσωπικό υψηλών δεξιοτήτων και μήκος διάτρησης 5 m, θεωρείται ότι $k_{bl} = 1.0$. Ο συντελεστής k_{bl} εφαρμόζεται σε ορισμένα από τα εμπειρικά διαγράμματα που παρουσιάζονται παρακάτω.

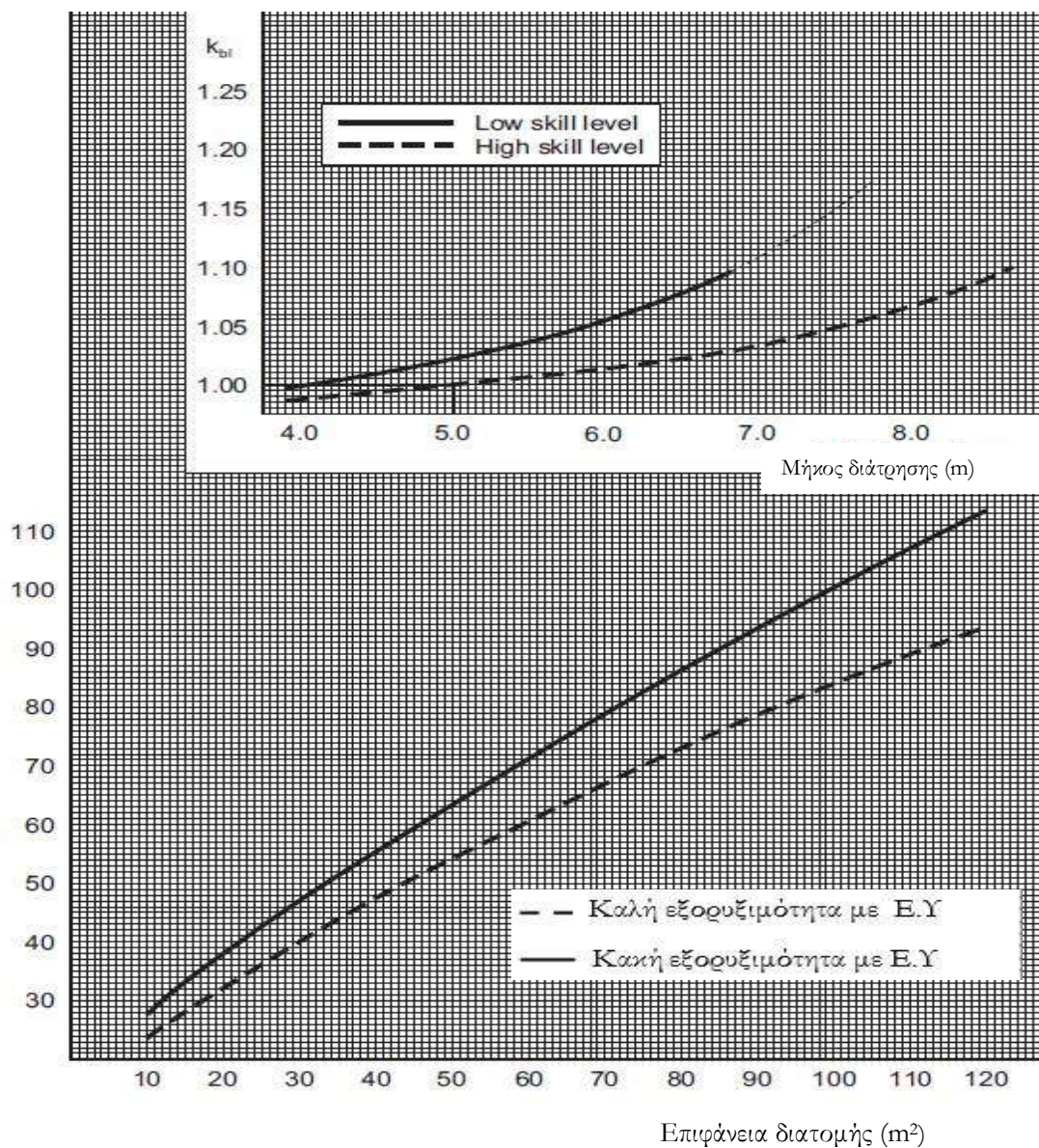
2.1.6 Θεωρητικός αριθμός διατρημάτων

Στο σχήμα 2.6, φαίνεται ο προβλεπόμενος αριθμός γομωμένων διατρημάτων, σε σχέση με το εμβαδόν της εγκάρσιας διατομής της στοάς. Στην μικρογραφία, στο επάνω μέρος του σχήματος αυτού, φαίνεται ο σχετικός συντελεστής διόρθωσης, ανάλογα με τις ικανότητες του εργατικού προσωπικού. Οι δύο ευθείες, αντιστοιχίζονται με καλές συνθήκες ανατίναξης και κακές συνθήκες ανατίναξης αντίστοιχα. Σε περίπτωση που απαιτούνται ενδιάμεσες τιμές, εφαρμόζεται η παρεμβολή αυτών.



Σχήμα 2.6 «Εκτιμώμενο πλήθος διατρημάτων συναρτήσει της επιφάνειας της διατομής και των συνθηκών ανατίναξης, για διάμετρο γομωμένου διατρήματος 48 mm»
(πηγή: Zare,2007a)

Αριθμός
διατρημάτων



Σχήμα 2.7 «Εκτιμώμενο πλήθος διατρημάτων συναρτήσει της επιφάνειας της διατομής και των συνθηκών ανατίναξης, για διάμετρο γομωμένου διατρήματος 64 mm»
(πηγή: Zare,2007a)

2.1.7 Υπόλοιπα διατρήματα της διάταξης (drilling pattern)

2.1.7.1 Διατρήματα Δαπέδου

Η παρέγκλιση των διατρημάτων δαπέδου θα πρέπει να είναι η ίδια με τα διατρήματα συνόρου.

Για τα διατρήματα δαπέδου χρησιμοποιείται η εξής σχέση:

$$N_t = \frac{w_t + 2 \cdot e_k}{S_t} + 1 \quad (2.3)$$

όπου:

w_t : το πλάτος της σήραγγας

S_t : Η απόσταση μεταξύ των διατρημάτων δαπέδου

e_k : η παρέγκλιση στα περιμετρικά διατρήματα

N_t : το πλήθος των διατρημάτων δαπέδου

Το πλήθος, N_t θα πρέπει να είναι ακέραιο.

2.1.7.2 Περιμετρικά διατρήματα

Η συγκεκριμένη κατηγορία διατρημάτων απαιτεί μεγάλη προσοχή. Ο λόγος είναι ότι καθορίζεται το πραγματικό σύνολο της στοάς. Η διαφορά μεταξύ του θεωρητικού και του πραγματικού συνόρου της στοάς λέγεται υπερεκσκαφή (overbreak). Εάν η υπερεκσκαφή αυτή παρατηρείται σε μεγάλο βαθμό, τότε ο χρόνος πραγματοποίησης του ξεσκαρώματος (scaling) αυξάνεται και απαιτούνται περισσότερες στηρίξεις. Σε περίπτωση που παρατηρηθούν ασυνέχειες υπό την μορφή ρηγματώσεων, το φορτίο και η απόσταση μεταξύ των διατρημάτων συνόρου μειώνονται

2.1.7.3 Σειρά διατρημάτων πλησιέστερη στο σύνολο

Κατά τον Zare, (2007a), στα διατρήματα που απαρτίζουν την πλησιέστερη σειρά στο σύνολο (row nearest contour), εφαρμόζεται η ίδια παρέγκλιση που προβλέπεται για τα διατρήματα συνόρου.

2.1.7.4 Διατρήματα διεύρυνσης

Για τα διατρήματα διεύρυνσης, ο Zare αναφέρει την εξής σχέση:

$$F_s = \frac{B_s \cdot S_s}{k_{bl}} \quad (2.4)$$

όπου:

F_s : επιφάνεια διεύρυνσης

B_s : φορτίο διατρημάτων διεύρυνσης

S_s : Απόσταση (Διάστημα) διατρημάτων διεύρυνσης

Για τα διατρήματα διεύρυνσης θεωρείται ότι $S_s/B_s = 1.2$, έτσι η σχέση (2.4) γράφεται ως εξής:

$$F_s = \frac{B_s \cdot 1.2 \cdot B_s}{k_{bl}} \quad (2.5)$$

Όπου k_{bl} : συντελεστής διόρθωσης ανάλογα με το μήκος διάτρησης και το εργατικό προσωπικό.

2.1.8 Σχεδιαστικές παράμετροι των διατρημάτων

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα υπολογιζόμενα φορτία και διαστήματα αναφέρονται στον πυθμένα των διατρημάτων. Οποιοσδήποτε αποκλίσεις στην κορυφή αφαιρούνται. Παρακάτω, παρουσιάζονται οι προτεινόμενες τιμές του φορτίου και του διαστήματος ανά κατηγορία διατρήματος και εξορυξιμότητας με εκρηκτικές ύλες. Οι ελάχιστες τιμές των πινάκων 2.2 και 2.3 αναφέρονται σε εμβαδόν διατομής 20 m² και οι μέγιστες τιμές αναφέρονται σε εμβαδόν διατομής 120 m².

Πίνακας 2.2 «Προτεινόμενες παράμετροι σχεδιασμού για d = 48 mm» (πηγή: Zare,2007a)

Τύπος Διατρήματος	Εξορυξιμότητα με Ε.Υ	Φορτίο, B	Διάστημα, S	Επιφάνεια Διάταξης (Stoping Area)
Διατρήματα Διεύρυνσης	Καλή Εξορυξιμότητα	-	-	$F_s = 1.8 \text{ m}^2$
	Κακή (Πτωχή) Εξορυξιμότητα	-	-	$F_s = 1.3 \text{ m}^2$
Περιμετρικά Διατρήματα	Καλή Εξορυξιμότητα	0.8 - 1.0 m	0.7 - 1.0 m	-
	Κακή (Πτωχή) Εξορυξιμότητα	0.7 - 0.9 m	0.6 - 0.9 m	-
Σειρά Διατρημάτων κοντά στην περίμετρο	Καλή Εξορυξιμότητα	1.0 m	1.1 m	-
	Κακή (Πτωχή) Εξορυξιμότητα	0.9 m	1.0 m	-
Διατρήματα Δαπέδου	Καλή Εξορυξιμότητα	1.0 m	1.0 m	-
	Κακή (Πτωχή) Εξορυξιμότητα	0.8 m	0.8 m	-

Πίνακας 2.3 «Προτεινόμενες παράμετροι σχεδιασμού για d = 64 mm» (πηγή: Zare,2007a)

Τύπος Διατρήματος	Εξορυξιμότητα με Ε.Υ	Φορτίο, B	Διάστημα, S	Επιφάνεια Διάταξης (Stoping Area)
Διατρήματα Διεύρυνσης	Καλή Εξορυξιμότητα	-	-	$F_s = 2.6 \text{ m}^2$
	Κακή (Πτωχή) Εξορυξιμότητα	-	-	$F_s = 1.8 \text{ m}^2$
Περιμετρικά Διατρήματα	Καλή Εξορυξιμότητα	1.0 - 1.2 m	0.9 - 1.2 m	-
	Κακή (Πτωχή) Εξορυξιμότητα	0.9 - 1.1 m	0.8 - 1.0 m	-
Σειρά Διατρημάτων κοντά στην περίμετρο	Καλή Εξορυξιμότητα	1.3 m	1.4 m	-
	Κακή (Πτωχή) Εξορυξιμότητα	1.1 m	1.2 m	-
Διατρήματα Δαπέδου	Καλή Εξορυξιμότητα	1.3 m	1.3 m	-
	Κακή (Πτωχή) Εξορυξιμότητα	1.1 m	1.1 m	-

2.1.9 Γόμωση των διατρημάτων

Η Μέθοδος NTNU εφαρμόζεται θεωρώντας τις εξής εκρηκτικές ύλες:

1. ANFO
2. Φυσίγγια (cartridges)
3. Γαλακτώματα (emulsions)

Κατά τον Zare, το ANFO δεν επιλέγεται σε περίπτωση παρουσίας νερού. Σε περίπτωση που χρησιμοποιούνται φυσίγγια, η ποσότητα δυναμίτη αντιστοιχεί σε ποσοστό έως και 30 % σε σχέση με τις υπόλοιπες εκρηκτικές ύλες. Άλλα φυσίγγια που χρησιμοποιούνται είναι τα εξής (ονομασίες Dyno Nobel):

1. Kemix-A
2. Dynotex
3. Dynorex

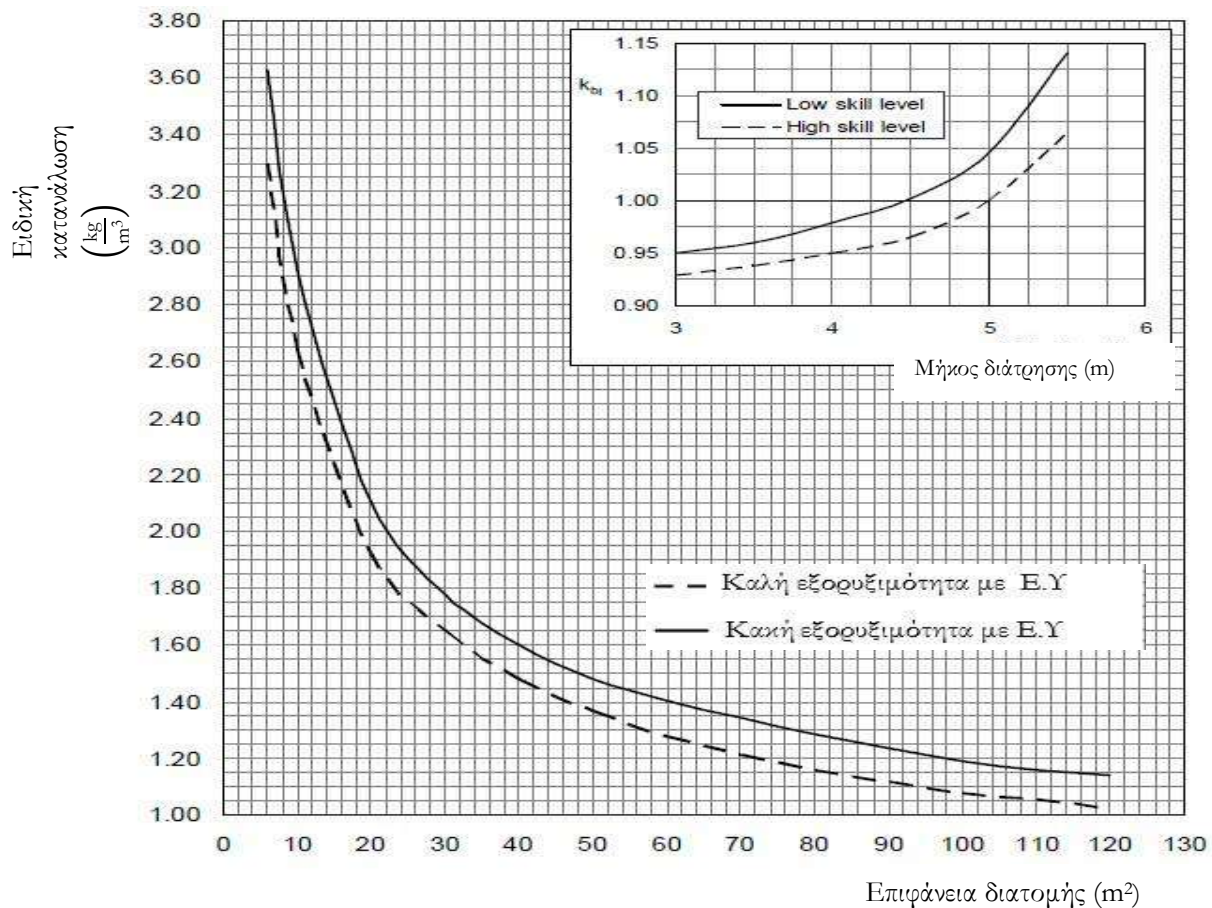
Ως γόμωση πυθμένα (primer) ή εναυσματικό φυσίγγιο χρησιμοποιείται μισό φυσίγγιο δυναμίτη 30x400 για διάμετρο διατρήματος 48 mm. Αντίστοιχα, για διάμετρο 64 mm, χρησιμοποιείται μισό φυσίγγιο 40x400.

Η απαιτούμενη επιγώμωση (stemming ή uncharged length), σύμφωνα με την μέθοδο NTNU, προκύπτει συναρτήσει του μήκους διάτρησης (l_h). Συγκεκριμένα:

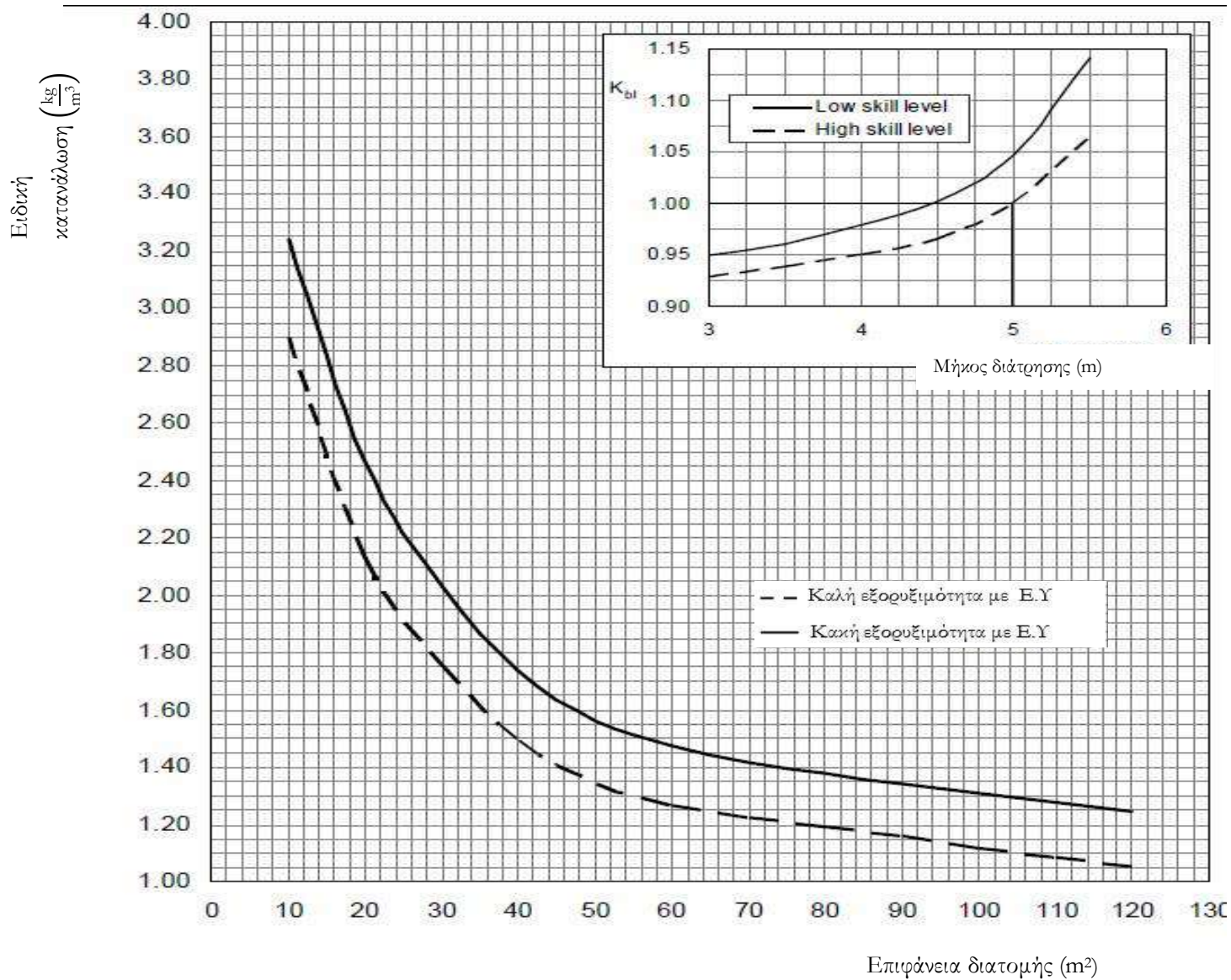
- $UL = 0.1 \cdot l_h$, για τα διατρήματα προεκσκαφής και δαπέδου
- $UL = 0.3 \cdot l_h$, για τα περιμετρικά διατρήματα και τα διατρήματα διεύρυνσης

Στο σχήμα (2.9) φαίνεται η θεωρητική ειδική κατανάλωση, συναρτήσει του δείκτη εξορυξιμότητας με Ε.Υ και της εγκάρσιας διατομής. Στις μετρήσεις εφαρμόζεται ο κατάλληλος συντελεστής διόρθωσης k_{bl} , ανάλογα με το μήκος διάτρησης και τις ικανότητες του εργατικού προσωπικού. Γίνεται αντιστοίχιση των προβλεπόμενων μεγεθών σε καλές συνθήκες ανατίναξης και σε κακές συνθήκες ανατίναξης.

Στα σχήματα (2.9) και (2.10) απεικονίζονται τα ίδια μεγέθη για διάμετρο γομωμένου διατρήματος 48 mm (2.9) και 64 mm (2.10) και εκρηκτική ύλη ANFO.

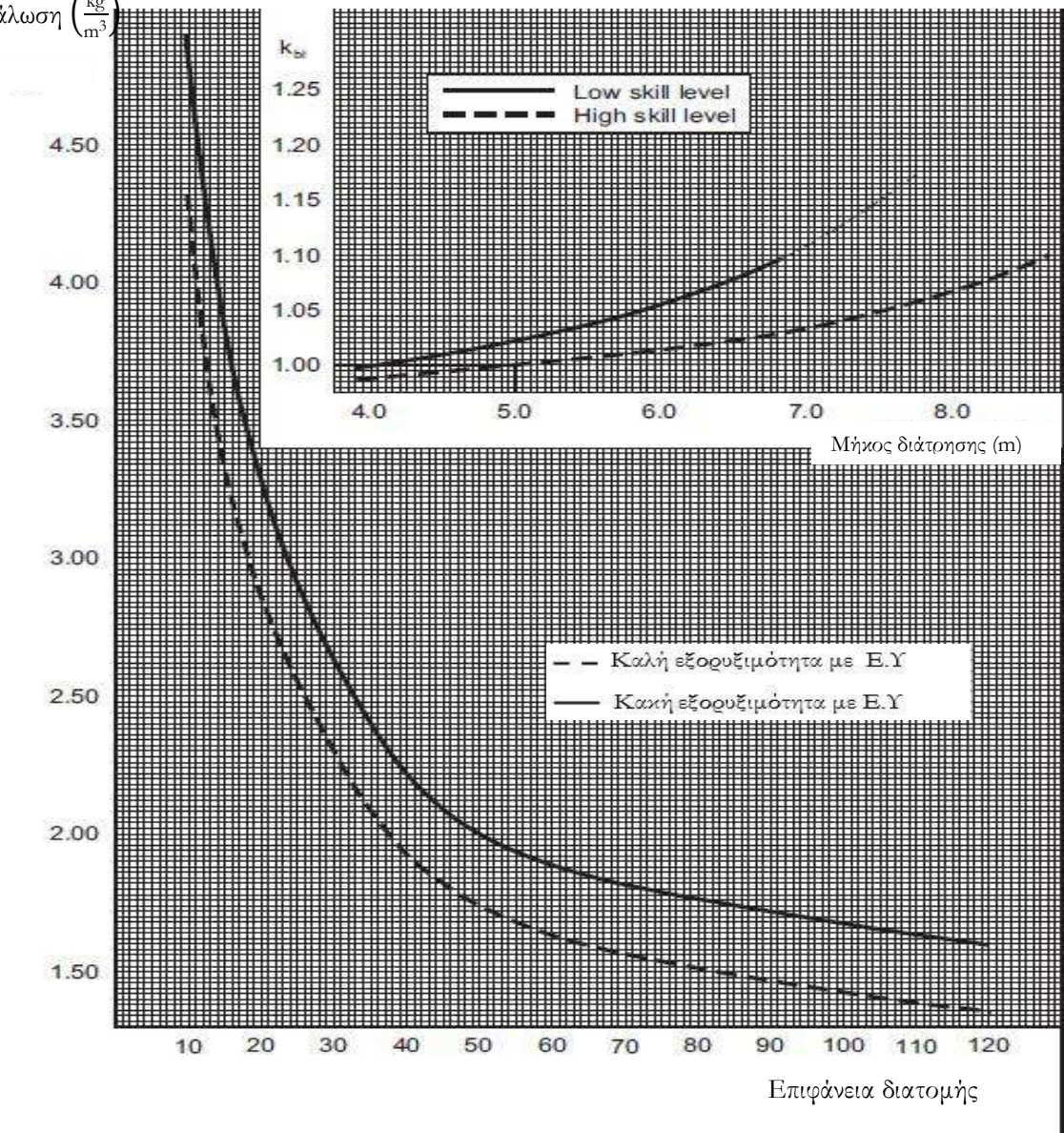


Σχήμα 2.8 «Ειδική κατανάλωση συναρτήσει της επιφάνειας της διατομής και των συνθηκών ανατίναξης, για διάμετρο γομωμένου διατρήματος 48 mm και φυσίγγια»
(πηγή: Zare,2007a)



Σχήμα 2.9 «Ειδική κατανάλωση συναρτήσει της επιφάνειας της διατομής και των συνθηκών ανατίναξης, για διάμετρο γομωμένου διατρήματος 48 mm και ANFO»
(πηγή: Zare,2007a)

Ειδική κατανάλωση ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$)



Σχήμα 2.10 «Ειδική κατανάλωση συναρτήσει της επιφάνειας της διατομής και των συνθηκών ανατίναξης, για διάμετρο γομωμένου διατρήματος 64 mm και ANFO»
(πηγή: Zare,2007a)

2.1.10 Πυροδότηση των διατρημάτων

Στις υπόγειες ανατινάξεις, οι χρόνοι έναυσης-πυροδότησης είναι μεγαλύτεροι απ' ότι στις υπαίθριες ανατινάξεις. Η πυροδότηση των διατρημάτων γίνεται με γνώμονα την επίτευξη κατάλληλων συνθηκών περιορισμού (confinement) και την ανάλογη εκτόξευση (throw) ογκοτεμαχίων πετρώματος. Η τυπική σειρά πυροδότησης των διατρημάτων είναι (Zare,2007a):

1. Η προεκσκαφή (Cut)
2. Τα διατρήματα διεύρυνσης (Easers ή Stopping Holes)
3. Η σειρά διατρημάτων κοντά στο σύνορο της στοάς (Row Nearest Contour Holes)
4. Τα διατρήματα συνόρου (Contour Holes)
5. Τα διατρήματα δαπέδου (Invert Holes)

Στην περίπτωση που απαιτείται ταυτόχρονη πυροδότηση πολλών διατρημάτων, δίνεται προσοχή στους χρόνους απόκλισης των πυροκροτητών. Κάθε κατηγορία διατρημάτων έχει και τους δικούς της χρόνους πυροδότησης.

2.1.10.1 Προεκσκαφή

Για την προεκσκαφή, επιλέγονται χρόνοι της τάξης των 100 ms περίπου για μη ηλεκτρικούς πυροκροτητές (Nonel), ενώ στην περίπτωση ηλεκτρικών πυροκροτητών οι χρόνοι είναι της τάξης των 50 ms.

2.1.10.2 Διατρήματα συνόρου

Τόσο τα διατρήματα του στέμματος (crown), όσο και τα πλευρικά διατρήματα, πυροδοτούνται στον ίδιο χρόνο. Για την ελάττωση όποιων αποκλίσεων από το αρχικό πλάνο πυροδότησης τα άκρα των εκρηκτικών υλών μπορούν να ενωθούν σε έναν πυροκροτητή. Αυτό ισχύει μόνο στην περίπτωση χρήσης ακαριαίας θρυαλλίδας (detonating cord).

2.1.10.3 Διατρήματα διεύρυνσης

Κατά τον Zare, (2007a), οι χρόνοι έναυσης επιλέγονται τέτοιοι ώστε να δημιουργούνται οι κατάλληλες συνθήκες χαλάρωσης του πετρώματος.

2.1.10.4 Διατρήματα δαπέδου

Τα διατρήματα δαπέδου πυροδοτούνται τελευταία, με στόχο την «ανύψωση» της σωρού ανατίναξης (muckpile) και την περαιτέρω ρηγμάτωση της. Τα γωνιακά διατρήματα

πυροδοτούνται μετά τα υπόλοιπα διατρήματα, διότι με αυτόν τον τρόπο μεγιστοποιείται η προχώρηση.

2.1.11 Γενικές οδηγίες σχεδιασμού διάταξης διατρημάτων

1. Η επι τόπου βραχομάζα χαρακτηρίζεται σε σχέση με την εξορυξιμότητα της με Ε.Υ
2. Καθορισμός μήκους διάτρησης.
3. Εύρεση απαραίτητου αριθμού διατρημάτων από τα σχήματα 2.6 και 2.7
4. Επιλογή και σχεδιασμός προεκσκαφής
5. Καθορισμός παραμέτρων φορτίου, απόστασης και παρέκκλισης διατρημάτων συνόρου και της σειράς κοντά σε αυτό.
6. Καθορισμός παραμέτρων φορτίου, απόστασης και παρέκκλισης διατρημάτων δαπέδου
7. Καθορισμός παραμέτρων φορτίου και απόστασης διατρημάτων διεύρυνσης. Η περιοχή που καλύπτεται
8. Έλεγχος τελικού αριθμού διατρημάτων (εξαιρώντας τα κενά διατρήματα). Μια απόκλιση της τάξης του 5 % από τα σχήματα 2.6 και 2.7 κρίνεται αποδεκτή.
9. Πραγματοποίηση πειραματικών ανατινάξεων και εφαρμογή των ανάλογων αλλαγών.

2.2 Μέθοδος σχεδιασμού υπόγειων ανατινάξεων κατά Konya

Η μέθοδος αυτή προτάθηκε από τον Konya. Υπάρχουν δύο παραλλαγές της, οι οποίες κάνουν χρήση παράλληλων και διατρημάτων υπό γωνία. Σε αυτήν την ενότητα, παρουσιάζεται η περίπτωση των διατρημάτων υπό γωνία και ορισμένα πλεονεκτήματα της μεθόδου.

2.2.1 Αρχική κοπή ή προεκσκαφή

Η κοπή V (wedge cut) χαρακτηρίζεται από σημαντικό βαθμό συμμετρίας. Τα διατρήματα της κοπής V καλύπτουν μεγαλύτερη επιφάνεια σε σχέση με τις παράλληλες κοπές που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Το μήκος διάτρησης και κατά συνέπεια προχώρησης που μπορεί να επιτευχθεί εξαρτάται από τις διαστάσεις της στοάς. Το διατρητικό φορτίο που χρησιμοποιείται στην διαδικασία της διάτρησης, ορύσσει τα διατρήματα υπό ορισμένη γωνία, επομένως δεν θα πρέπει να εμποδίζεται από τα πλευρικά τοιχώματα της στοάς. Στο σχήμα 2.12 φαίνεται μια τυπική διάταξη V-Cut.

2.2.2 Σχεδιασμός προεκσκαφής

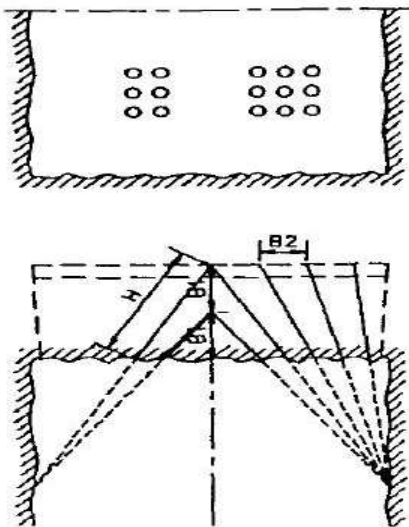
Για τον ορισμό της προεκσκαφής αλλά και τον σχεδιασμό της ο Konya εισάγει δυο μεγέθη: το φορτίο B_1 και το φορτίο B_2 . Τα φορτία αυτά ορίζονται όπως φαίνεται στο σχήμα 2.12.

Το φορτίο B_1 , είναι η απόσταση μεταξύ των «ποδιών» των υπονόμων και το φορτίο B_2 είναι η απόσταση μεταξύ διαφορετικών διατρημάτων, σε σχέση με το πλάτος της σήραγγας. Για γωνία μεταξύ των διατρημάτων της πυραμίδας V, ίση με 60° θεωρείται ότι $B_1 = 2B$. Για τον υπολογισμό του φορτίου χρησιμοποιείται η σχέση 2.6. Το διάστημα S, ορίζεται ως η κατακόρυφη απόσταση για την κοπή V θεωρείται ότι είναι τέτοιο ώστε $S = 1.2 \cdot B$. Στο σχήμα 2.11 φαίνεται μια αρχική κοπή V-Cut.

$$B = 0.012 \cdot \left[\left(\frac{2SG_e}{SG_R} \right) + 1.5 \right] \cdot D_e \quad (2.6)$$

Όπου:

- SG_e : η πυκνότητα γόμωσης της εκρηκτικής ύλης $\left[\frac{g}{cm^3} \right]$
- SG_R : η πυκνότητα του πετρώματος $\left[\frac{g}{cm^3} \right]$
- D_e : η διάμετρος της εκρηκτικής ύλης [mm]



Σχήμα 2.11 «Τυπική διάταξη V-cut»
(πηγή: Konya, 1995)

2.2.3 Υπόλοιπα διατρήματα της διάταξης (drilling pattern)

2.2.3.1 Διατρήματα δαπέδου

Το απαιτούμενο φορτίο δίνεται από την σχέση (2.6).

$$B = 0.012 \cdot \left[\left(\frac{2SG_e}{SG_R} \right) + 1.5 \right] \cdot D_e \quad (2.6)$$

Το διάστημα, S, ή η απόσταση μεταξύ των διατρημάτων δαπέδου βρίσκεται σύμφωνα με την σχέση (2.8).

$$S = 1.1 \cdot B \quad (2.7)$$

Η επιγόμωση, T, προκύπτει σύμφωνα με την σχέση 2.8

$$T = 0.2 \cdot B \quad (2.8)$$

2.2.3.2 Περιμετρικά διατρήματα

Εάν εφαρμόζεται η μέθοδος ελεγχόμενης ανατίναξης (Trim Blasting), τότε ισχύει ότι:

- $S = 0.6 \text{ m}$ και
- $B = 1.3 \cdot S = 0.8 \text{ m}$

Σε διαφορετική περίπτωση το απαιτούμενο φορτίο δίνεται από την σχέση (2.6).

$$B = 0.012 \cdot \left[\left(\frac{2SG_e}{SG_R} \right) + 1.5 \right] \cdot D_e \quad (2.6)$$

Το διάστημα, S, ή η απόσταση μεταξύ των περιμετρικών διατρημάτων βρίσκεται σύμφωνα με την σχέση (2.8).

$$S = 1.1 \cdot B \quad (2.7)$$

Όπου B: το φορτίο

Η επιγόμωση, T, προκύπτει σύμφωνα με την σχέση (2.9)

$$T = 1 \cdot B \quad (2.9)$$

Στα περιμετρικά διατρήματα εφαρμόζεται η «γωνία προς τα έξω» (look-out angle), με στόχο την διατήρηση της διατομής για την επόμενη ανατίναξη. Ο Konya προτείνει την σχέση 2.10

$$LO = 0.1 + H \cdot \tan(2^\circ) \quad (2.10)$$

Όπου:

- H: Το μήκος του διατρήματος [m]

2.2.3.3 Διατρήματα διεύρυνσης

Το απαιτούμενο φορτίο δίνεται από την σχέση (2.6).

$$B = 0.012 \cdot \left[\left(\frac{2SG_e}{SG_R} \right) + 1.5 \right] \cdot D_e \quad (2.6)$$

Το διάστημα, S, ή η απόσταση μεταξύ των διατρημάτων δαπέδου βρίσκεται σύμφωνα με την σχέση (2.8).

$$S = 1.1 \cdot B \quad (2.7)$$

Όπου B: το φορτίο

Η επιγόμωση, T, προκύπτει σύμφωνα με την σχέση 2.11

$$T = 0.5 \cdot B \quad (2.11)$$

2.2.4 Γόμωση των διατρημάτων

Στην γόμωση των διατρημάτων, δίνεται προσοχή στην έναυση (initiation) των εκρηκτικών υλών. Κατά τον Konya, το κατάλληλο σύστημα έναυσης τοποθετείται στον πυθμένα των διατρημάτων.

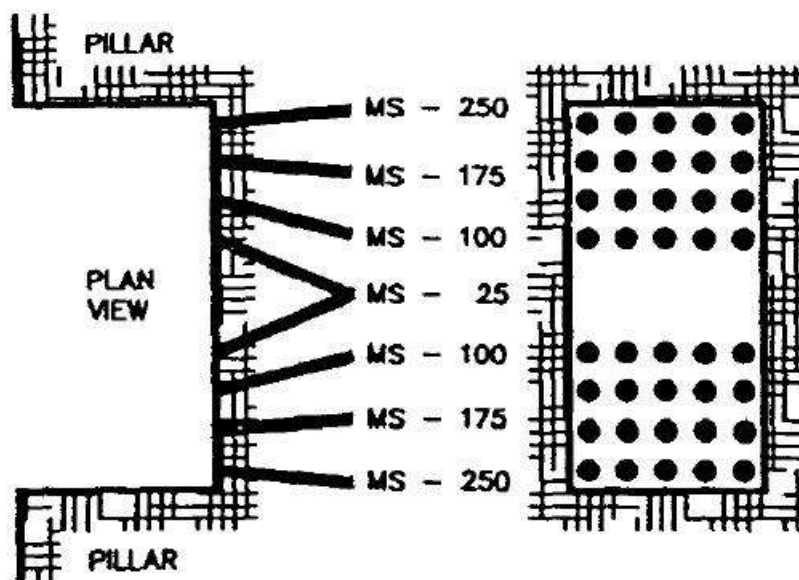
Στην περίπτωση της χρήσης φυσιγγίων, η γραμμική πυκνότητα γόμωσης της εκρηκτικής ύλης που χρησιμοποιείται ως γόμωση στήλης μπορεί να θεωρηθεί μικρότερη από την γόμωση πυθμένα.

2.2.5 Πυροδότηση των διατρημάτων

Η τυπική σειρά πυροδότησης των διατρημάτων είναι (Konya,1995):

1. Η προεκσκαφή (Cut)
2. Τα διατρήματα διεύρυνσης (Easers ή Stopping Holes)
3. Τα διατρήματα συνόρου (Contour Holes)
4. Τα διατρήματα δαπέδου (Invert Holes)

Το σχέδιο πυροδότησης των διατρημάτων προεκσκαφής και των υπόλοιπων διατρημάτων φαίνεται στο σχήμα 2.13. Παρακάτω περιγράφονται οι προτεινόμενες συνθήκες ανατίναξης κατά τον Konya.



Σχήμα 2.12 «Σχέδιο πυροδότησης κεκλιμένων διατρημάτων»
(Πηγή: Konya, 1995)

2.2.5.1 Προεπισκαφή

Τα συμμετρικά διατρήματα της προεπισκαφής πυροδοτούνται ταυτόχρονα.

2.2.5.2 Διατρήματα διεύρυνσης (οριζόντια)

Τα διατρήματα διεύρυνσης που βρίσκονται εκατέρωθεν της προεπισκαφής, πυροδοτούνται ταυτόχρονα και με καθυστέρηση της τάξης των 75 ms σε σχέση με τα διατρήματα προεπισκαφής. Σε περίπτωση που χρησιμοποιηθεί ένα επιπλέον ζεύγος διατρημάτων διεύρυνσης, πυροδοτούνται με καθυστέρηση της τάξης των 100 ms σε σχέση με το προηγούμενο ζεύγος.

2.2.5.3 Διατρήματα συνόρου (πλευρικά)

Τα περιμετρικά διατρήματα εκατέρωθεν των διατρημάτων διεύρυνσης, πυροδοτούνται ταυτόχρονα και με καθυστέρηση της τάξης των 100 ms σε σχέση με τα οριζόντια διατρήματα διεύρυνσης.

2.2.5.4 Διατρήματα διεύρυνσης (κατακόρυφα)

Τα κατακόρυφα (vertical) διατρήματα διεύρυνσης πυροδοτούνται με χρήση του συστήματος Nonel LP (Long Period). Οι χρόνοι πυροδότησης τους διαφέρουν από τα οριζόντια διατρήματα διεύρυνσης. Στόχος είναι η διεύρυνση της διατομής κάνοντας χρήση ενός αρχικού ανοίγματος.

2.2.5.5 Διατρήματα συνόρου (οροφής)

Στην περίπτωση εφαρμογής μεθόδου ελεγχόμενης ανατίναξης, τα διατρήματα της οροφής πυροδοτούνται ταυτόχρονα. Η καθυστέρηση που εφαρμόζεται είναι της τάξης των 200-500 ms σε σχέση με τα κατακόρυφα διατρήματα διεύρυνσης.

2.2.5.6 Διατρήματα δαπέδου

Τα διατρήματα δαπέδου πυροδοτούνται τελευταία. Τα γωνιακά διατρήματα πυροδοτούνται σε διαφορετικό χρονικό διάστημα σε σχέση με τα υπόλοιπα διατρήματα δαπέδου.

Κεφάλαιο 3 Ανάλυση κύκλου ανατίναξης (Μέθοδος NTNU)

Η μέθοδος διάτρησης-ανατίναξης, υπενθυμίζεται ότι αποτελεί μια κυκλική διαδικασία με συγκεκριμένα στάδια και υπενθυμίζεται ότι είναι τα εξής:

1. Διάτρηση των διατρημάτων (Σχέδιο διάτρησης - drilling pattern)
2. Γόμωση των διατρημάτων (Charging)
3. Πραγματοποίηση της ανατίναξης και αερισμός της σήραγγας ή στοάς, με στόχο την απομάκρυνση των αερίων της ανατίναξης. (Blasting & Ventilation)
4. Απομάκρυνση των όγκων του πετρώματος από τις παρειές και τα πλευρά της στοάς, γνωστό και ως ξεσκάρωμα. (Scaling)
5. Τοποθέτηση προσωρινών στηρίξεων (πχ εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, πλαίσια, αγκύρια)
6. Απομάκρυνση του θραυσμένου πετρώματος και της σωρού ανατίναξης. (Mucking)

Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζεται η μέθοδος πρόβλεψης του απαιτούμενου χρόνου ολοκλήρωσης κάθε σταδίου. Η μέθοδος αυτή προτάθηκε από το NTNU με την ονομασία TunSim.

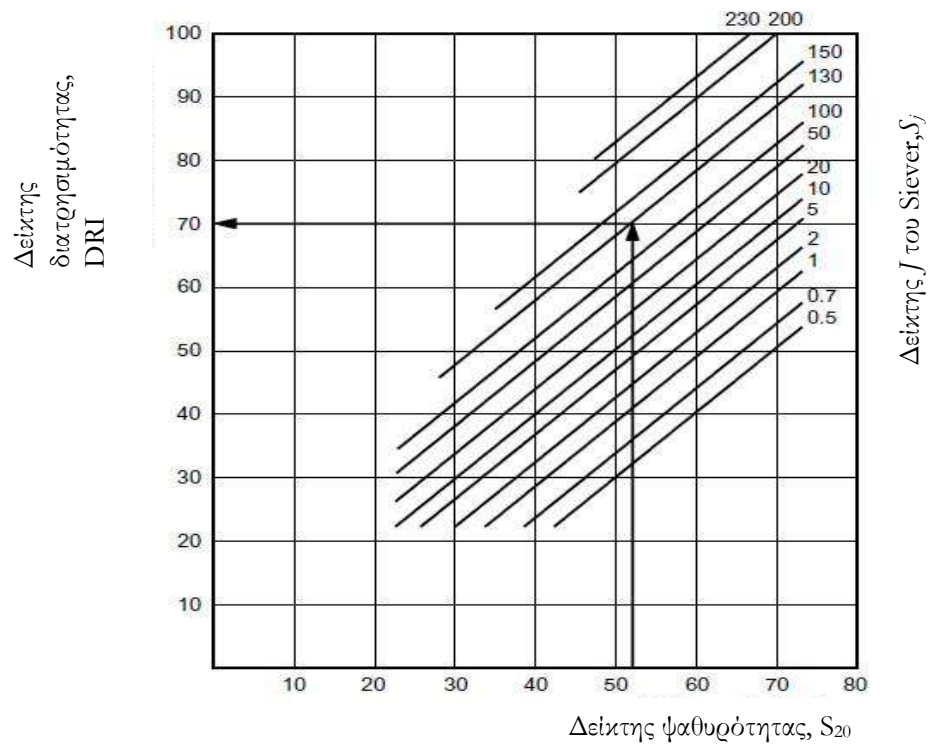
Όπως στην ανατίναξη, όπου προσοχή δόθηκε στην εξορυξιμότητα του πετρώματος με εκρηκτικές ύλες (blastability), έτσι σε αυτήν την μέθοδο η προσοχή εστιάζεται στον παράγοντα διατρησιμότητας του πετρώματος με μηχανικά μέσα (drillability).

3.1 Υπολογισμός χρόνου διάτρησης

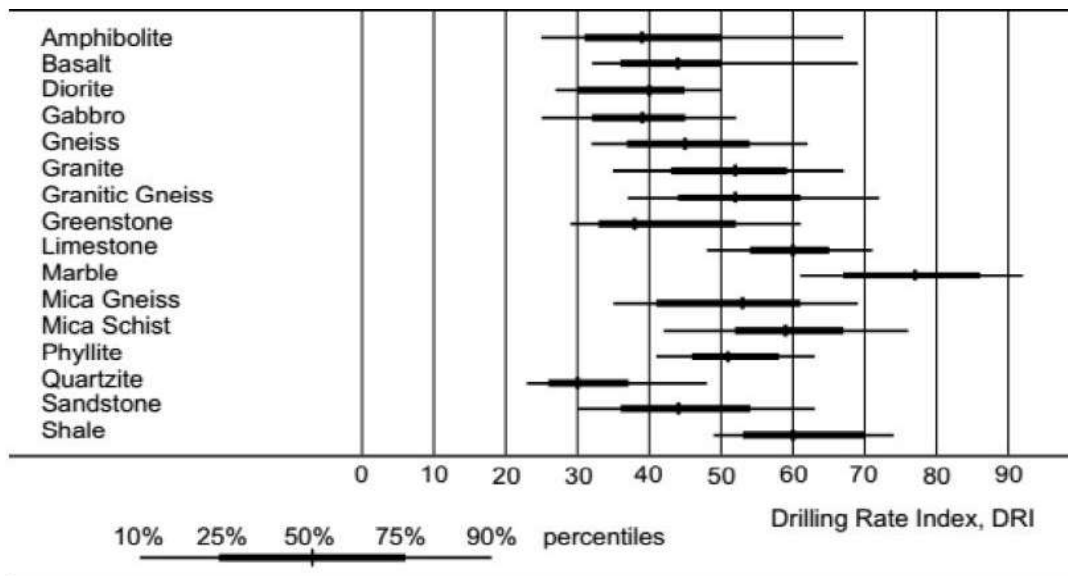
Ο χρόνος διάτρησης εξαρτάται από:

- Τον τύπο του πετρώματος
- Τον αριθμό σφυρών διάτρησης (drilling hammers)
- Τον καθαρό ρυθμό διάτρησης (net penetration rate)

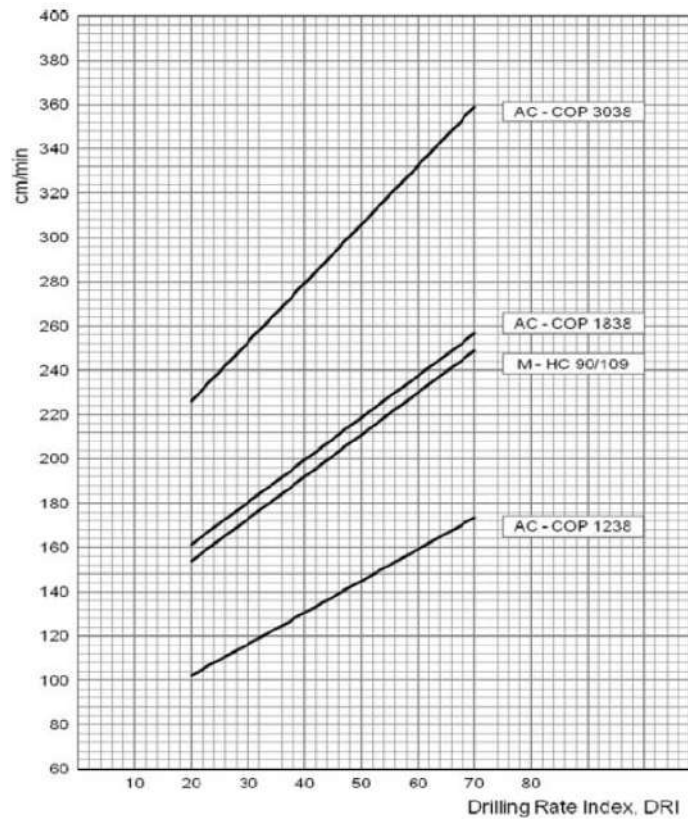
Για τον χαρακτηρισμό της επι τόπου γεωλογίας, όσον αφορά την διάτρηση της, χρησιμοποιείται ο δείκτης διατρησιμότητας (Drilling Rate Index, DRI). Ο δείκτης αυτός προέκυψε από εργαστηριακές μετρήσεις στο τμήμα Πολιτικών μηχανικών του NTNU. Οι μετρήσεις αυτές αναφέρονται στην βιβλιογραφία ως (Bruland,1998): Δοκιμή ψαθυρότητας (Brittleness Test) και Δοκιμές μικροδιάτρησης (Miniature drill test). Με αυτόν τον τρόπο, προκύπτουν δύο μεγέθη: ο δείκτης ψαθυρότητας S_{20} , που αντιστοιχεί στο ποσοστό (% κ.β.) του πετρώματος <11.2 mm μετά από 20 χτυπήματα με σπαστήρα 14 kg των αρχικών δειγμάτων που ανήκουν στο κλάσμα 16-11.2 mm και ο δείκτης J του Siever S_j . Τα μεγέθη αυτά εισάγονται στο σχήμα 3.1, το οποίο αποτελεί ένα εμπειρικό διάγραμμα. Ο δείκτης διατρησιμότητας DRI αποτελεί ένα αδιάστατο μέγεθος και έχει εύρος τιμών 0-100. Στο σχήμα 3.2 φαίνονται οι τιμές του δείκτη DRI, ανάλογα με τον τύπο του πετρώματος. Υψηλές τιμές του δείκτη DRI αντιστοιχούν σε ευνοϊκές συνθήκες διάτρησης. Ο καθαρός ρυθμός διάτρησης, προκύπτει σύμφωνα με το σχήμα 3.3, εάν δοθεί ο συντελεστής διατρησιμότητας (DRI). Κάθε καμπύλη που φαίνεται στο σχήμα αυτό, αντιστοιχεί σε διαφορετικό διατρητικό.



Σχήμα 3.1 «Διάγραμμα υπολογισμού δείκτη διατρησιμότητας DRI» (πηγή: Bruland, 1998)



Σχήμα 3.2 «Εύρος τιμών συντελεστή διατρησιμότητας, ανάλογα με τον τύπο του πετρώματος» (Πηγή: Bruland & Zare, 2013)



Σχήμα 3.3 «Καθαρή ταχύτητα διάτρησης συναρτήσει του συντελεστή DRI και του διατρητικού» (Πηγή: Bruland & Zare, 2013)

Στο μοντέλο αυτό προβλέπονται δυο χρόνοι διάτρησης. Ο ένας χρόνος αφορά τα διατρήματα προς γόμωση και ο άλλος χρόνος αφορά τα κενά διατρήματα.

Ο χρόνος διάτρησης υπολογίζεται σύμφωνα με τις σχέσεις 3.1 και 3.2 για γομωμένα και κενά διατρήματα αντίστοιχα.

$$T_h = \frac{l_h \cdot N_h}{v_h \cdot N_m} \quad (3.1)$$

Όπου:

l_h : Το μήκος διάτρησης [m]

N_h : Το πλήθος των διατρημάτων

v_h : Ο ρυθμός διάτρησης (καθαρός) $\left[\frac{\text{cm}}{\text{min}}\right]$

N_m : Αριθμός των διατρητικών

$$T_h = \frac{l_h \cdot N_g}{v_h \cdot N_m} \cdot 1.25 \quad (3.2)$$

Όπου:

l_h : Το μήκος διάτρησης [m]

N_g : Το πλήθος των κενών διατρημάτων

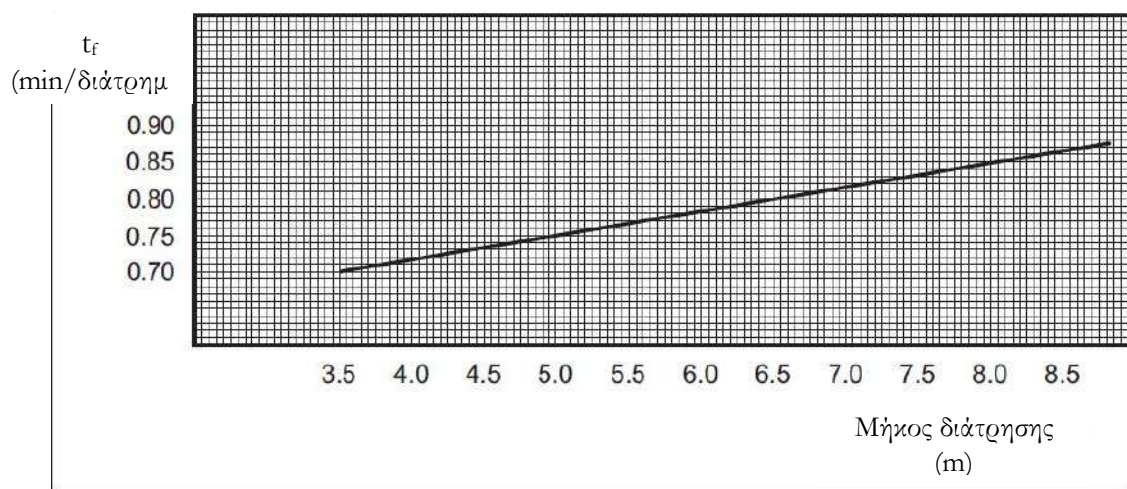
v_h : Ο ρυθμός διάτρησης (καθαρός) $\left[\frac{\text{cm}}{\text{min}}\right]$

N_m : Αριθμός των διατρητικών

Στην συνέχεια, υπολογίζεται ο συνολικός χρόνος που αναμένεται να δαπανηθεί για την μετακίνηση του διατρητικού στελέχους από διάτρημα σε διάτρημα. Ο υπολογισμός γίνεται σύμφωνα με την σχέση (3.3).

$$T_g = \frac{N_h + 2 \cdot N_g}{N_m} \cdot t_f \quad (3.3)$$

Ο στοιχειώδης χρόνος μετακίνησης t_f προκύπτει σύμφωνα με το σχήμα 3.4.

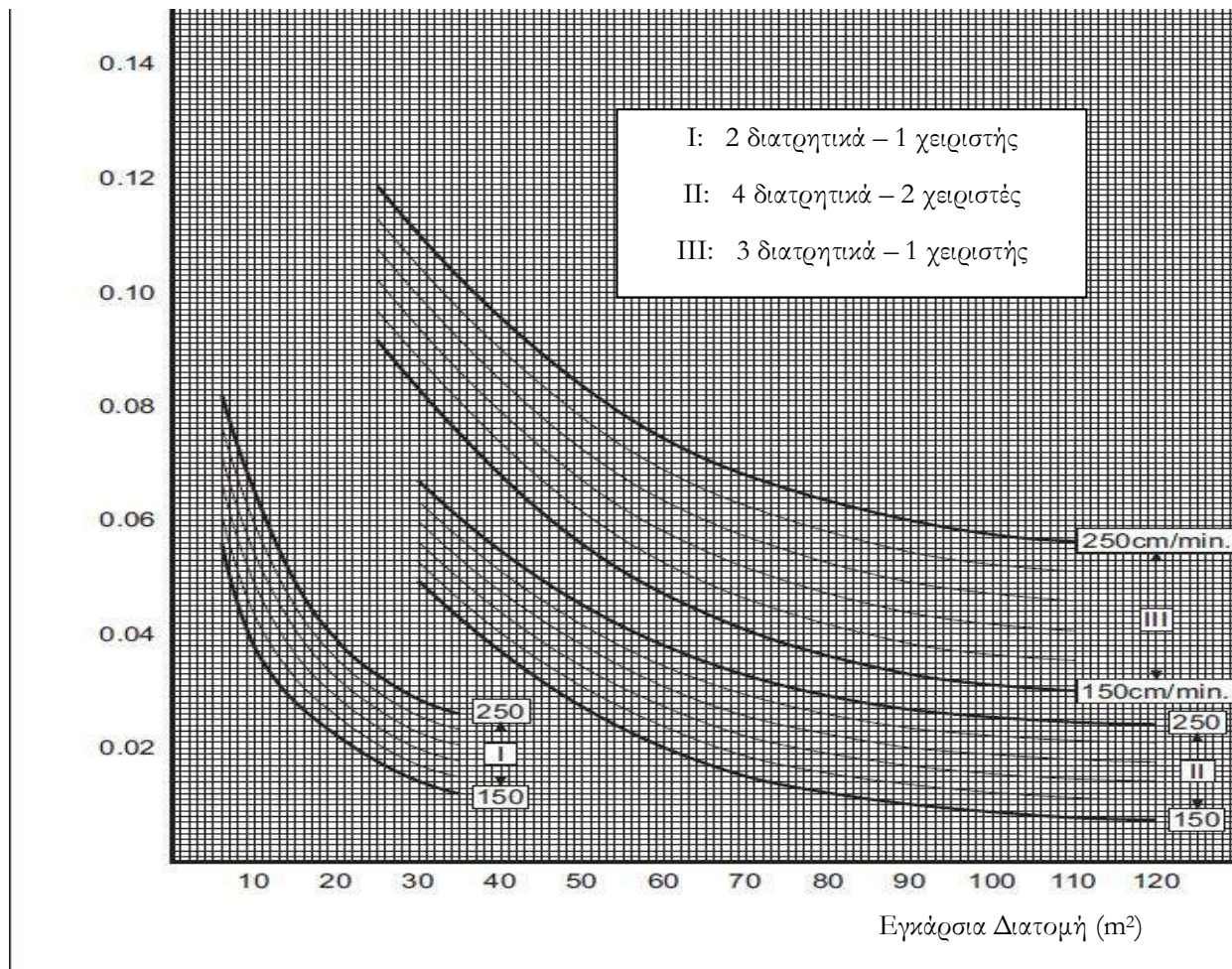


Σχήμα 3.4 «Υπολογισμός στοιχειώδους χρόνου μετακίνησης t_f συναρτήσει του μήκους διάτρησης» (πηγή: Zare,2007b)

Στο μοντέλο προβλέπονται και απώλειες χρόνου, λόγω της σταδιακής ολοκλήρωσης των εργασιών που περιεγράφηκαν παραπάνω. Ο Zare, συμπεριλαμβάνει και τον χρόνο αντικατάστασης του διατρητικού αλλά σε αυτήν την εργασία δεν λαμβάνεται υπόψιν. Το χρονικό αυτό διάστημα βρίσκεται σύμφωνα με την σχέση (3.4).

$$T_{sa} = (T_h + T_g) \cdot f_{sa} \quad (3.4)$$

Ο συντελεστής διόρθωσης f_{sa} εξαρτάται από την εγκάρσια διατομή, τον καθαρό ρυθμό διάτρησης, τον αριθμό των διατρητικών και των χειριστών. Προκύπτει σύμφωνα με το σχήμα 3.5.



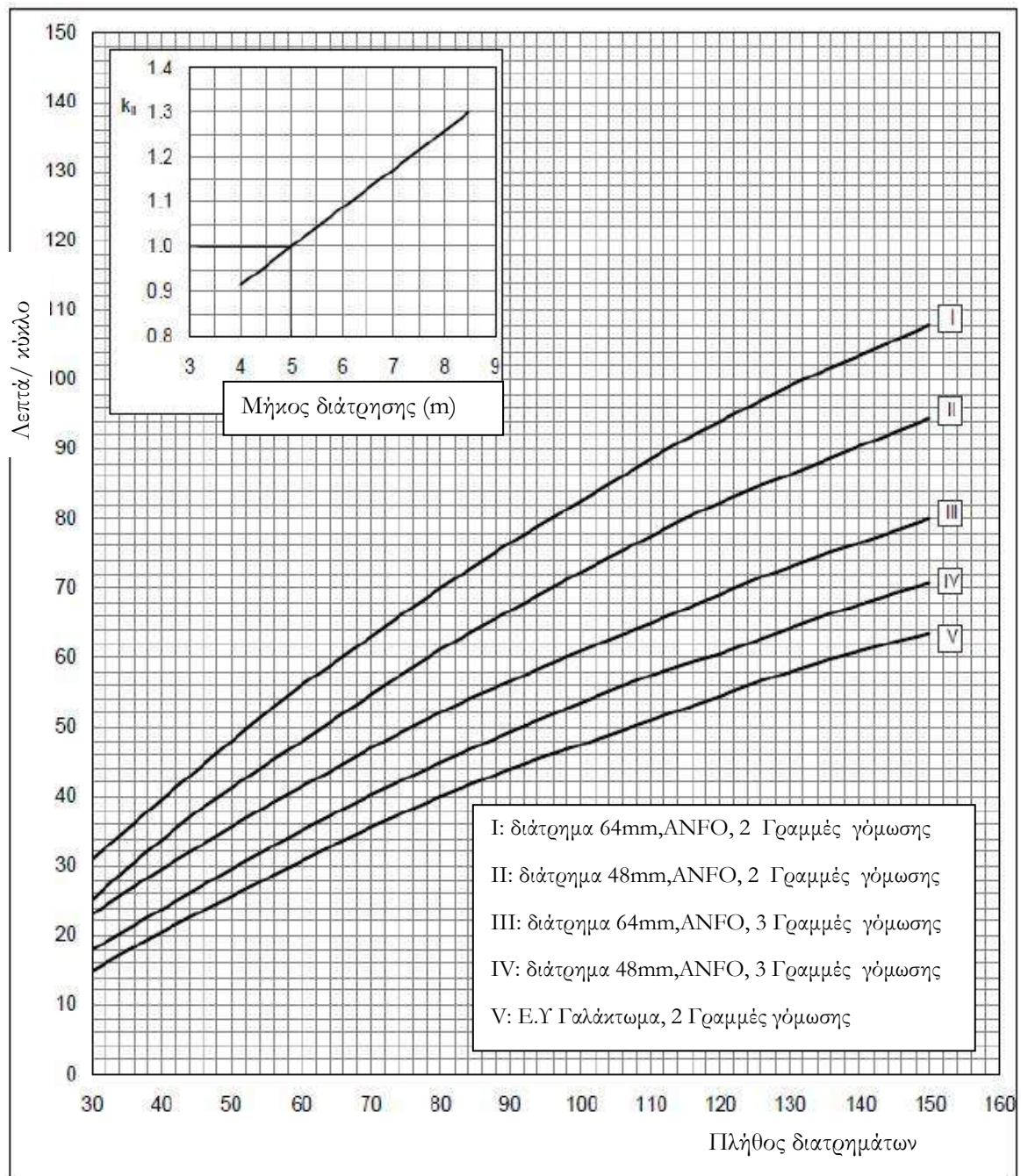
Σχήμα 3.5 «Συντελεστής f_{sa} συναρτήσει της εγκάρσιας διατομής, του καθαρού ρυθμού διάτρησης και των χειριστών» (πηγή: Zare, 2007b)

3.2 Υπολογισμός χρόνου γόμωσης

Ο χρόνος γόμωσης (charging time), σύμφωνα με τον Zare εξαρτάται από τους εξής παράγοντες (Zare,2007b):

- Την ποσότητα των εκρηκτικών υλών
- Το πλήθος των γραμμών γόμωσης (charging lines)
- Το πλήθος των διατρημάτων
- Την διάμετρο των διατρημάτων
- Το μήκος διάτρησης

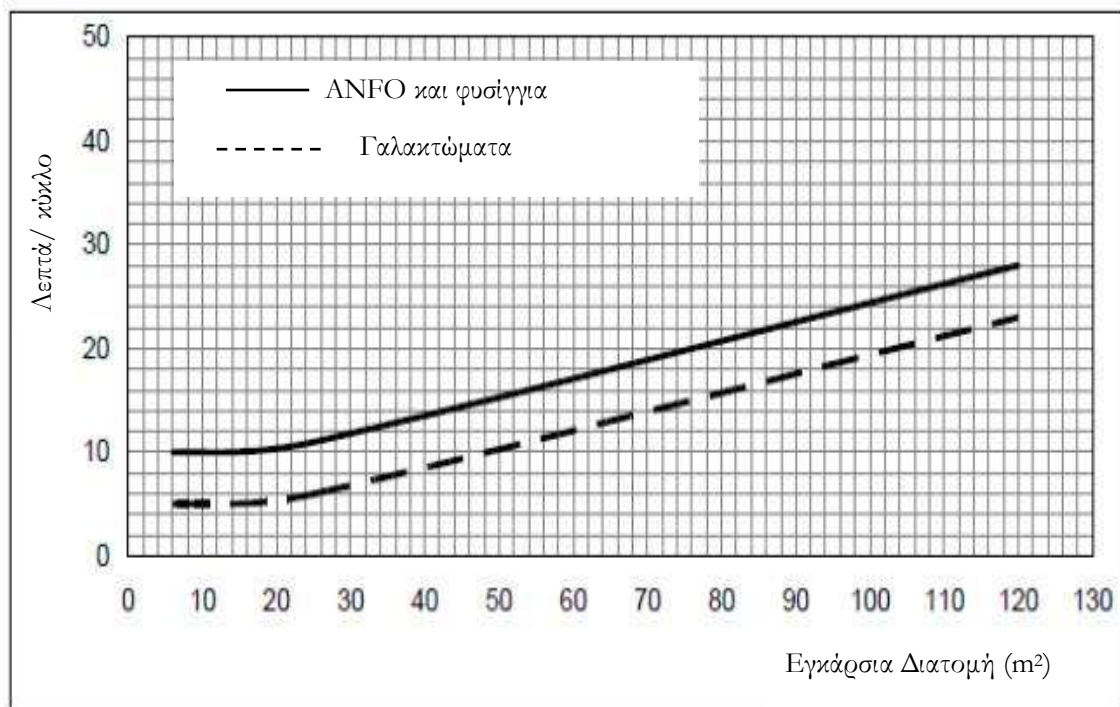
Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι θεωρείται ότι έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία της διάτρησης. Ο χρόνος γόμωσης, βρίσκεται σύμφωνα με το σχήμα 3.6. Αυτό το σχήμα αναπαριστά τον αναμενόμενο χρόνο γόμωσης ανά κύκλο συναρτήσεως του αριθμού των διατρημάτων. Στο διάγραμμα αυτό γίνεται διάκριση σε πέντε κατηγορίες, ανάλογα με την διάμετρο των διατρημάτων, την εκρηκτική ύλη καθώς και τις γραμμές γόμωσης (charging lines). Ως εκρηκτική ύλη αναγράφεται το ANFO αλλά αντιστοιχίζεται και με εκρηκτικές ύλες σε φυσίγγια (cartridge explosives) (Multan,2016). Στον τελικό υπολογισμό εφαρμόζεται ένας συντελεστής διόρθωσης, k_{II} , ο οποίος εξαρτάται από το μήκος διάτρησης.



Σχήμα 3.6 «Χρόνος γόμωσης ανά κύκλο» (πηγή: Zare, 2007b)

3.3 Υπολογισμός χρόνου αερισμού

Στην συνέχεια, το μοντέλο ανάλυσης του κύκλου της ανατίναξης, προβλέπει τον απαιτούμενο χρόνο αερισμού της στοάς (ventilation break). Ο αερισμός της στοάς έχει ως στόχο την μείωση της συγκέντρωσης των αερίων της ανατίναξης (κυρίως αζωτούχες ενώσεις) στην στοά, μέχρις ότου αυτή φτάσει το 1 ppm (parts per million-μέρη ανά εκατομμύριο). Ο Multan, αναφέρει ότι οι σωλήνες αερισμού θα πρέπει να βρίσκονται σε απόσταση 30 έως 70 m από το μέτωπο. Ο χρόνος αερισμού, βρίσκεται σύμφωνα με το σχήμα 3.7. Εξαρτάται από τον τύπο της εκρηκτικής ύλης και την εγκάρσια διατομή.



Σχήμα 3.7 «Υπολογισμός απαιτούμενου χρόνου αερισμού» (πηγή: Zare, 2007b)

3.4 Υπολογισμός χρόνου φόρτωσης και μεταφοράς σορού ανατίναξης

Ο χρόνος φόρτωσης του υλικού της ανατίναξης βρίσκεται σύμφωνα με την σχέση (3.5).

$$T_k = \frac{V_r}{Q \cdot f_{ul}} \cdot 60 \quad (3.5)$$

Όπου:

- V_r : ο όγκος του θρυμματισμένου πετρώματος ανά κύκλο [m^3]
- Q : ωριαία παραγωγικότητα φορτωτή [$\frac{m^3}{h}$]
- f_{ul} : συντελεστής εκμετάλλευσης του μηχανήματος

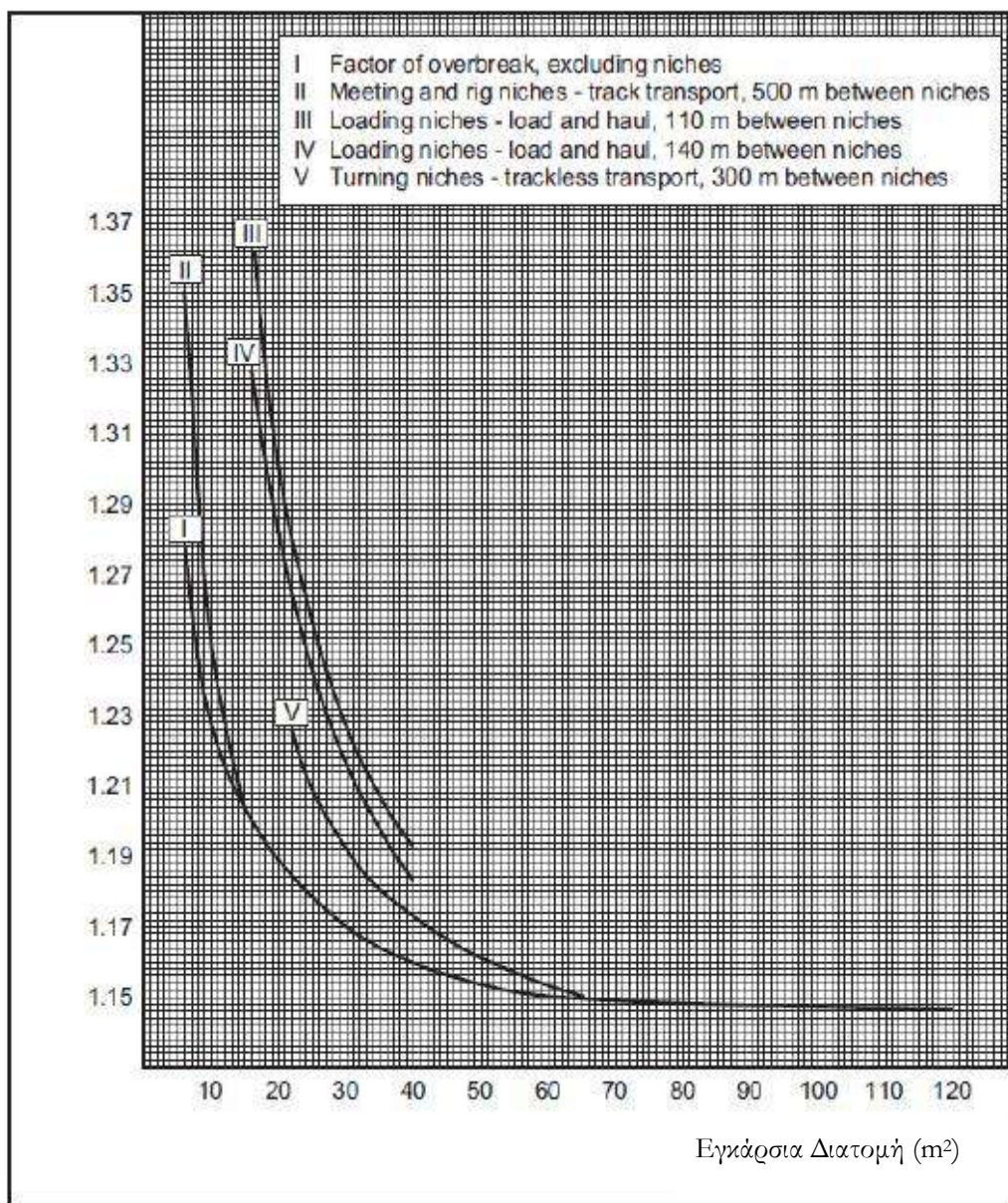
Ο όγκος του διαρρηχθέντος πετρώματος ανά κύκλο, V_r προκύπτει σύμφωνα με την σχέση (3.6)

$$V_r = A_s \cdot l_h \cdot p_r \cdot f_o \quad (3.6)$$

Όπου:

- A_s : το εμβαδόν της εγκάρσιας διατομής της στοάς [m^2]
- l_h : το μήκος διάτρησης [m]
- p_r : ο συντελεστής προχώρησης
- f_o : ο συντελεστής υπερεκσκαφής

Ο συντελεστής υπερεκσκαφής, f_o εκφράζει την απόκλιση του πραγματικού όγκου συμπαγούς πετρώματος που ορύσσεται σε σχέση με τον θεωρητικό όγκο συμπαγούς πετρώματος. Προκύπτει σύμφωνα με το σχήμα 3.7, που φαίνεται παρακάτω. Ο συντελεστής προχώρησης, p_r εξαρτάται από την διάμετρο των διατρημάτων. Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθούν διατρήματα διαμέτρου 48 mm, ο συντελεστής προχώρησης θεωρείται τέτοιος ώστε $p_r = 0.90$. Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθούν διατρήματα διαμέτρου 64 mm, ο συντελεστής προχώρησης θεωρείται τέτοιος ώστε $p_r = 0.96$.



Σχήμα 3.8 «Υπολογισμός συντελεστή υπερεκσκαφής, συναρτήσει της εγκάρσιας διατομής της στοάς» (πηγή: Zare, 2007b)

Η φόρτωση της σωρού ανατίναξης γίνεται με εξειδικευμένο εξοπλισμό. Στις στοές χρησιμοποιούνται:

- Εισκαφείς (Excavators)
- Ελαστιχοφόροι φορτωτές (Wheel loaders)
- Φορτωτές με ερπύστριες (Track Loaders)

Η ωριαία παραγωγικότητα του φορτωτή προκύπτει σύμφωνα με την σχέση 3.7 (Κάββου, 2019).

$$Q = q \cdot \frac{60}{C_m} \quad (3.7)$$

Όπου:

- q : η παραγωγή του φορτωτή ανά κύκλο εργασίας [m^3]
- C_m : η χρονική διάρκεια του κύκλου εργασίας [min]

Η παραγωγή του φορτωτή ανά κύκλο εργασίας προκύπτει σύμφωνα με την σχέση 3.8 (Κάββου, 2019).

$$q = q_1 \cdot K \quad (3.8)$$

Όπου:

- q_1 : η χωρητικότητα του κάδου του φορτωτή [m^3]
- K : ο συντελεστής πλήρωσης του κάδου, ένα αδιάστατο μέγεθος

Ο συντελεστής πλήρωσης εκφράζει το ποσοστό του πραγματικά χρησιμοποιούμενου όγκου του κάδου του φορτωτή και διαφέρει ανάλογα με το υλικό που μεταφέρεται. Στον πίνακα 3.1 φαίνονται τυπικές τιμές του συντελεστή πλήρωσης.

Πίνακας 3.1 «Ο συντελεστής πλήρωσης ανάλογα με το υλικό που μεταφέρεται»
(πηγή: *Peurifoy et al., 2018 & Κάββου, 2019*)

Υλικό	Συντελεστής κάδου K
Χαλαρά υλικά	
Ανάμεικτα αδρανή	0.95 – 1.00
Ομοιόμορφα αδρανή έως 3 mm	0.95 – 1.00
Ομοιόμορφα αδρανή από 3 έως 9 mm	0.90 – 0.95
Ομοιόμορφα αδρανή από 12 έως 20 mm	0.85 – 0.90
Ομοιόμορφα αδρανή από 24 mm και πάνω	0.85 – 0.90
Θρυμματισμένο πέτρωμα	
Καλά θρυμματισμένο	0.80 – 0.95
Μέτρια θρυμματισμένο	0.75 – 0.90
Κακά θρυμματισμένο	0.60 – 0.75

Όσον αφορά την χρονική διάρκεια του κύκλου εργασίας, στον Πίνακα 3.2 φαίνεται ο σταθερός χρόνος κύκλου (fixed time) του εκάστοτε φορτωτή, ανάλογα με την χωρητικότητα του κάδου του. Ο χρόνος αυτός συμπεριλαμβάνει τις στοιχειώδεις εργασίες του φορτωτή, όπως:

- Φόρτωση του κάδου (Loading)
- Ελιγμοί αλλαγής κατεύθυνσης (Maneuvering)
- Απόθεση του υλικού στο φορτηγό (Dumping)

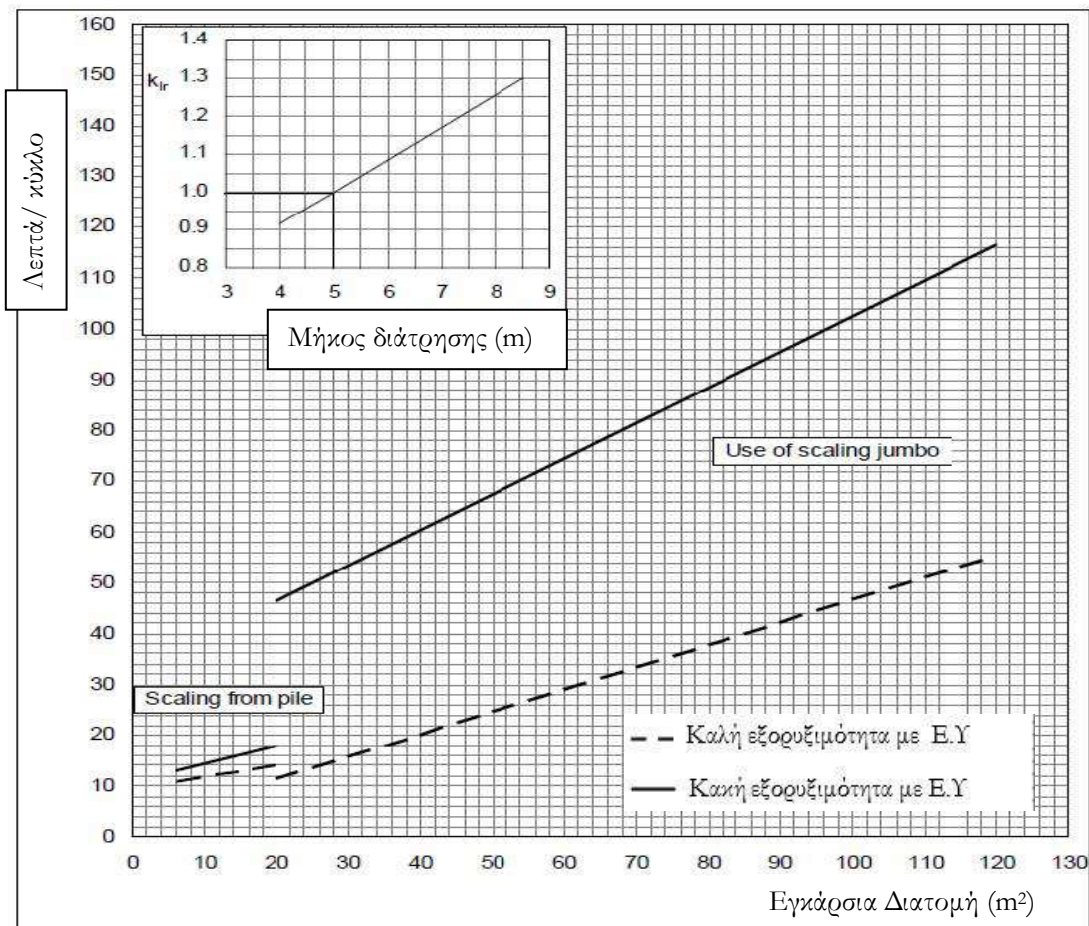
**Πίνακας 3.2 «Σταθερός χρόνος κύκλου, ανάλογα με την χωρητικότητα του κάδου του φορτωτή»
(πηγή: Peurifoy *et al.*, 2018)**

Χωρητικότητα κάδου του φορτωτή (m ³)	Χρόνος κύκλου, Ελαστικοφόρος φορτωτής (min)
0.8 – 2.9	0.45 – 0.50
3.1 – 4.2	0.50 – 0.55
4.6 – 5.4	0.55 – 0.60
10.7 – 17.6	0.60 – 0.70

Για τον υπολογισμό του κύκλου εργασιών, εάν η απόσταση απόθεσης του υλικού δεν μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα, στον σταθερό χρόνο κύκλου προστίθεται και ο χρόνος μετακίνησης του φορτωτή προς το φορτηγό.

3.5 Υπολογισμός χρόνου ξεσκαρώματος

Τέλος, στην ανάλυση του κύκλου ανατίναξης, συμπεριλαμβάνεται και η διαδικασία του ξεσκαρώματος (scaling). Στον τελικό υπολογισμό εφαρμόζεται ένας συντελεστής διόρθωσης, k_{lr} , ο οποίος εξαρτάται από το μήκος διάτρησης.



Σχήμα 3.9 «Υπολογισμός χρόνου ξεσκαρώματος» (πηγή: Zare,2007b)

Κεφάλαιο 4 Παραδείγματα σχεδιασμών διατομής στοάς

Σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάζεται η εφαρμογή των δύο μεθόδων σχεδιασμού σε μια υποθετική διατομή υδραυλικής στοάς. Στην συνέχεια, γίνεται σύγκριση των μεθόδων αυτών και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα. Όσον αφορά τις διαστάσεις της στοάς, αυτές έχουν ως εξής:

- Πλάτος στοάς: $T_w = 5.6 \text{ m}$
- Ύψος στοάς: $T_H = 5.9 \text{ m}$

Όσον αφορά την γεωλογία της περιοχής, θεωρήθηκε ότι συνιστάται από μαρμαρυγιικούς σχιστόλιθους (mica schist).

4.1 Παράδειγμα σχεδιασμού με την Νορβηγική μέθοδο (μέθοδο NTNU)

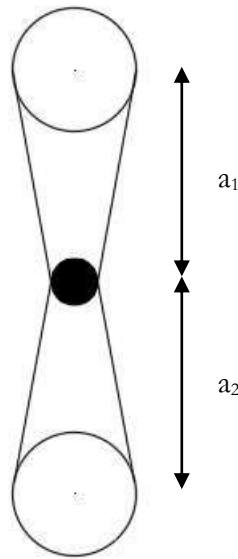
Το εμβάδον της διατομής θεωρήθηκε ίσο με 30 m^2 , με βάση τα στοιχεία που αναφέρθηκαν παραπάνω. Η διάμετρος των διατρημάτων θεωρήθηκε ίση με 48 mm και το μήκος διάτρησης ίσο με 3.0 m . Έγινε επίσης η παραδοχή ότι υπάρχουν πτωχές συνθήκες ανατίναξης του πετρώματος (poor blastability).

4.1.1 Σχεδιασμός προεκσκαφής

Επομένως εάν ακολουθηθεί η μεθοδολογία της παραγράφου 2.1.3 και εισαχθούν τα στοιχεία της διαμέτρου και του μήκους διάτρησης στο σχήμα 2.3 προκύπτει ότι η ελάχιστη συνολική επιφάνεια κενών διατρημάτων είναι ίση με 110 cm^2 . Αυτή η συνθήκη καλύπτεται χρησιμοποιώντας δύο κενά διατρήματα διαμέτρου 102 mm . Η παράμετρος α που για $d_g = 102 \text{ mm}$ βρίσκεται μεταξύ $1.5d_g$ και $2d_g$. Για τον σχεδιασμό της προεκσκαφής θεωρήθηκε ότι $\alpha = 2.0 \cdot d_g$.

Με απλοποίηση της παραπάνω τιμής προέκυψε η απόσταση μεταξύ των κενών διατρημάτων ανακούφισης και του πρώτου γομωμένου διατρήματος να είναι ίση με $\alpha_1 = \alpha_2 = 200 \text{ mm}$. Παρακάτω περιγράφονται αναλυτικά όλα τα βήματα σχεδιασμού της προεκσκαφής.

Η μέθοδος ξεκινά με την τοποθέτηση του γομωμένου διατρήματος. Ο όγκος προς ανατίναξη φαίνεται στο σχήμα 4.1. Είναι ίσος με το άθροισμα των τραπεζίων χωρίς να συμπεριλαμβάνονται οι επιφάνειες των διατρημάτων.



Σχήμα 4.1 «Όγκος προς ανατίναξη για το πρώτο γομωμένο διάτρημα»

$$A_1 = \left(\frac{d_g + d_h}{2} \cdot a_1 \right) + \left(\frac{d_g + d_h}{2} \cdot a_2 \right) - V_g - V_h \quad (4.1)$$

$$A_1 = \left(\frac{102 + 48}{2} \cdot 220 \right) + \left(\frac{102 + 48}{2} \cdot 220 \right) - \frac{\pi \cdot 102^2}{4} - \frac{\pi \cdot 48^2}{4}$$

Εάν εφαρμοστεί ο έλεγχος της εκτόνωσης (δηλαδή προσαύξηση της επιφάνειας A_1 κατά 80%, προκύπτει ότι $A_1 = 36.00 \cdot 10^3 \text{ mm}^2$. Το μέτρο σύγκρισης είναι η διαθέσιμη επιφάνεια. Η επιφάνεια αυτή αντιπροσωπεύει την συνολική διαθέσιμη επιφάνεια και προκύπτει ως εξής:

$$A_{1, \text{διαθέσιμη επιφάνεια}} = \left(\frac{d_g + d_h}{2} \cdot a_1 \right) + \left(\frac{d_g + d_h}{2} \cdot a_2 \right) + \frac{A_g}{2} + \frac{A_h}{2} \quad (4.2)$$

Με αντικατάσταση των τιμών των παραμέτρων της σχέσης (4.2) προκύπτει το εξής

$$A_{1, \text{διαθέσιμη επιφάνεια}} = \left(\frac{102 + 48}{2} \cdot 200 \right) + \left(\frac{102 + 48}{2} \cdot 200 \right) + \frac{\pi \cdot 102^2}{4} = 38.77 \cdot 10^3 \text{ mm}^2$$

Με αυτό το κριτήριο, η τιμή της επιφάνειας A_1 κρίθηκε αποδεκτή. Στην συνέχεια, σύμφωνα με το σχήμα 2.4, εάν θεωρηθεί ως βασικό πλάτος ανοίγματος (basic width) ίσο με $\alpha_1 + \alpha_2 + 2d_g/2 = 0.50$ m, προκύπτει ότι το φορτίο B_1 είναι ίσο με 0.35 m. Οι υπολογισμοί φαίνονται παρακάτω:

$$A_{2, \text{προς ανατίναξη}} = \frac{w_b}{2} \cdot B_1 - \frac{A_{1, \text{διαθέσιμη επιφάνεια}}}{2} \quad (4.3)$$

Η σχέση (4.3), εισάγοντας τις γνωστές παραμέτρους γράφεται ως εξής:

$$A_{2, \text{προς ανατίναξη}} = \frac{500}{2} \cdot 350 - \frac{38.77 \cdot 10^3}{2} = 68.5 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

Με εφαρμογή της προσαύξησης της επιφάνειας προς ανατίναξης κατά 80 % προκύπτει η απαραίτητη επιφάνεια, $A_{2, \text{απαραίτητη επιφάνεια}}$.

$$A_{2, \text{απαραίτητη επιφάνεια}} = 1.8 \cdot A_{2, \text{προς ανατίναξη}} = 123.3 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

Η διαθέσιμη επιφάνεια προκύπτει σύμφωνα με την σχέση (3.22).

$$A_{2, \text{διαθέσιμη επιφάνεια}} = \frac{w_b}{2} \cdot B_1 + \frac{A_{2, \text{διαθέσιμη επιφάνεια}}}{2} \quad (4.4)$$

Η σχέση (4.4), εισάγοντας τις γνωστές παραμέτρους γράφεται ως εξής:

$$A_{2, \text{διαθέσιμη επιφάνεια}} = \frac{500}{2} \cdot 350 + \frac{38.77 \cdot 10^3}{2} = 107.2 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

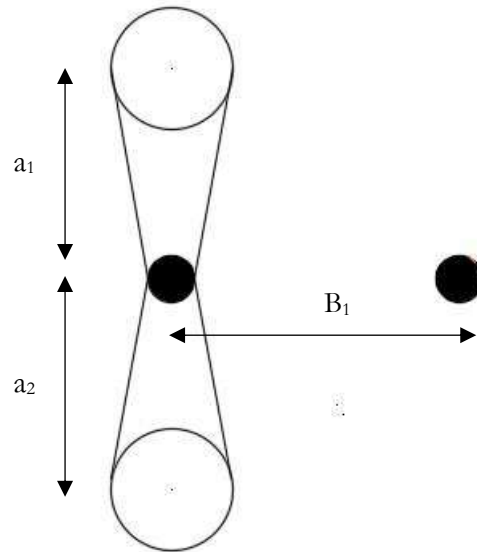
Η διαθέσιμη επιφάνεια κρίθηκε μη επαρκής, διότι είναι μικρότερη από την απαραίτητη, οπότε λαμβάνεται η τιμή $B_1 = 0.25$ m. Επομένως επαναλαμβάνονται οι υπολογισμοί με αυτήν την τιμή. Επομένως, προκύπτει ότι:

$$A_{2, \text{προς ανατίναξη}} = \frac{500}{2} \cdot 250 - \frac{38.77 \cdot 10^3}{2} = 43.4 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$A_{2, \text{απαραίτητη επιφάνεια}} = 1.8 \cdot A_{2, \text{προς ανατίναξη}} = 78.1 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

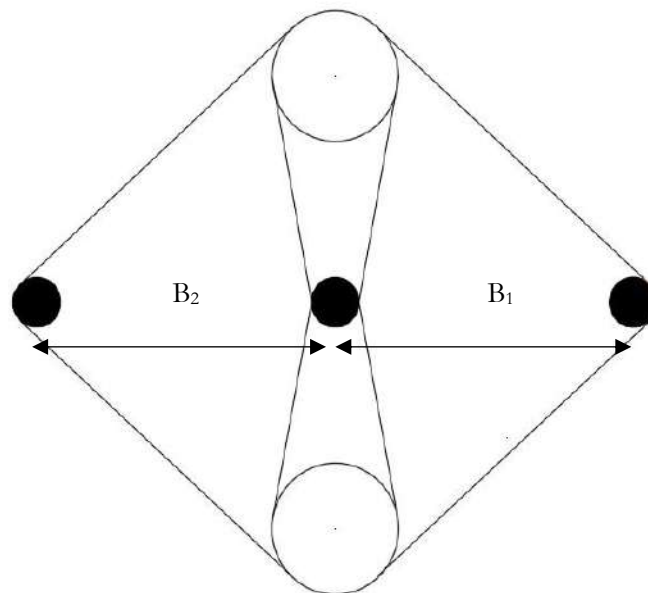
$$A_{2, \text{διαθέσιμη επιφάνεια}} = \frac{500}{2} \cdot 250 + \frac{51.17 \cdot 10^3}{2} = 82.1 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

Η διαθέσιμη επιφάνεια, $A_{2, \text{διαθέσιμη επιφάνεια}}$, είναι μεγαλύτερη από την απαραίτητη επιφάνεια, επομένως η νέα τιμή του φορτίου B_1 είναι αποδεκτή και τελικά αυτή εφαρμόζεται. Στο σχήμα 4.2, φαίνεται το φορτίο B_1 .



Σχήμα 4.2 «Φορτίο B_1 »

Το ίδιο ισχύει, λόγω συμμετρίας και για το φορτίο B_2 , όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.3 «Φορτίο B_2 »

Στην συνέχεια, για τον υπολογισμό του φορτίου B_3 , το επόμενο διάτρημα τοποθετείται σε διεύθυνση κάθετη στην πλευρά του πρώτου τετραγώνου, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.4 παρακάτω. Στο ίδιο σχήμα, η πλευρά ΑΓ αντιστοιχεί στο πλάτος του ανοίγματος για να υπολογιστεί το αντίστοιχο φορτίο.

Συγκεκριμένα:

$$ΟΓ = B_1 + \frac{D_h}{2} \quad (4.5)$$

Όπου D_h : η διάμετρος του γομωμένου διατρήματος.

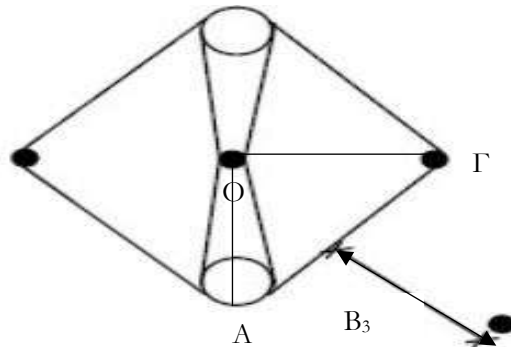
$$ΟΑ = \alpha_1 + \frac{D_g}{2} \quad (4.6)$$

Όπου D_g : η διάμετρος του διατρήματος ανακούφισης και α_1 : η παράμετρος απόστασης.

$$ΑΓ = \sqrt{ΟΓ^2 + ΟΑ^2} \quad (4.7)$$

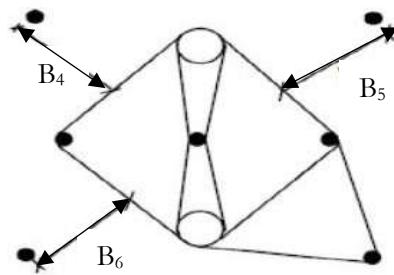
Από τις σχέσεις 4.-, 4.- και 4.- προκύπτει το πλάτος του ανοίγματος τέτοιο ώστε $w_b = 0.37 \text{ m}$.

Άρα συνεπάγεται ότι: $B_3 = 0.3 \text{ m}$.



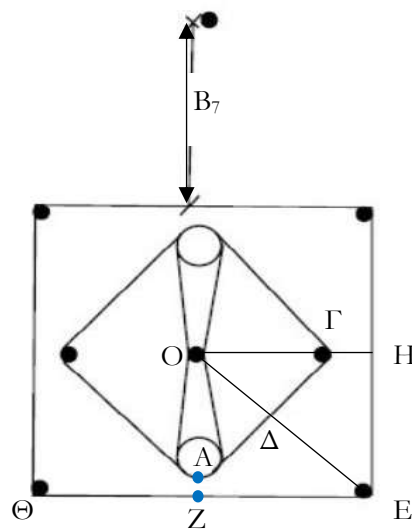
Σχήμα 4.4 «Φορτίο B_3 »

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία, τοποθετούνται άλλα τρία διατρήματα, που αντιστοιχούν στις υπόλοιπες πλευρές της προεπισκαφής. Λόγω συμμετρίας, τα φορτία B_4 , B_5 και B_6 είναι ίσα με το φορτίο B_3 .



Σχήμα 4.5 «Φορτία B_4 , B_5 και B_6 »

Με αυτόν τον τρόπο σχηματίζεται το δεύτερο τετράγωνο της προεκσκαφής με άκρες τα διαστήματα 3, 4, 5 και 6. Το διάστημα 7 τοποθετείται χρησιμοποιώντας και πάλι το σχήμα 2.4, με το πλάτος (basic width) του ανοίγματος να είναι η πλευρά του τετραγώνου που σχηματίζεται. Στο σχήμα 4.6, φαίνεται η γεωμετρία του ανοίγματος και οι υπολογισμοί που αφορούν την εύρεση του φορτίου.



Σχήμα 4.6 «Φορτίο B_7 »

Συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι:

$$O\Delta = \frac{OA \cdot O\Gamma}{\Lambda\Gamma} \quad (4.8)$$

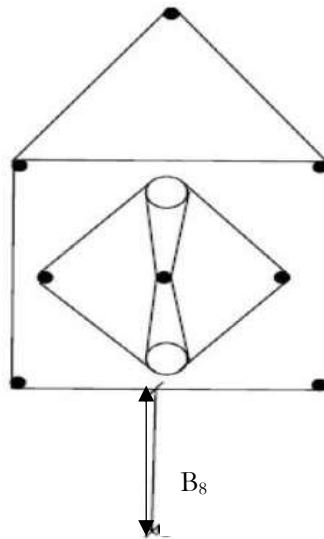
$$OE = O\Delta + \Delta E \quad (4.9)$$

$$ZE = OE \cdot \frac{OA}{\Lambda\Gamma} \quad (4.10)$$

Επομένως, συνεπάγεται ότι: $OE = 2 \cdot ZE = 0.654 \text{ m}$

Σύμφωνα με το σχήμα 2.4, η τιμή του φορτίου B_7 είναι τέτοια ώστε: $B_7 = 0.45 \text{ m}$.

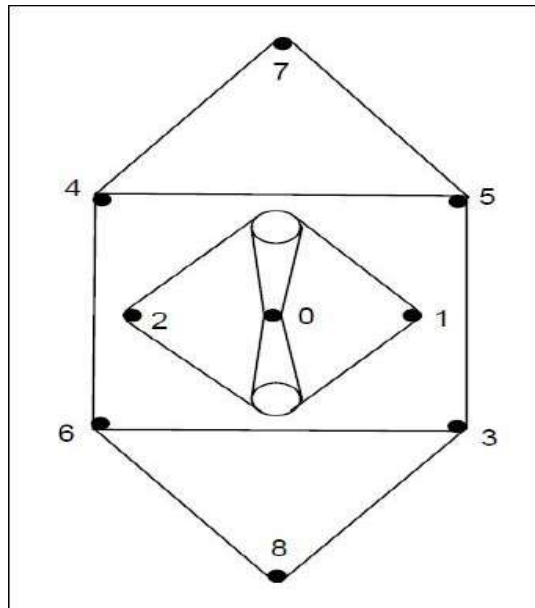
Τέλος, με τον ίδιο τρόπο και λόγω της συμμετρίας της προεκσκαφής, τοποθετείται ένα ακόμα διάτρημα, στην άλλη πλευρά του τετραγώνου.



Σχήμα 4.7 «Φορτίο B_8 »

Με την εφαρμογή όσων παρουσιάστηκαν παραπάνω, δημιουργήθηκε η επιφάνεια της προεκσκαφής που τοποθετήθηκε στην εγκάρσια διατομή της στοάς. Η τελική διαμόρφωση της, φαίνεται στο σχήμα 4.7. Η θέση της προεκσκαφής, επιλέχθηκε τέτοια ώστε να συνεισφέρει σε έναν ικανοποιητικό θρυμματισμό. Συγκεκριμένα, η προεκσκαφή τοποθετήθηκε στο μέσον του

πλάτους της στοάς και σε ύψος στο οποίο να μην αλληλοεπιδρά με τα διατρήματα δαπέδου. Η συνέχεια του σχεδιασμού παρουσιάζεται παρακάτω.



Σχήμα 4.8 «Τελική διαμόρφωση προεκσκαφής»

4.1.2 Σχεδιαστικές παράμετροι υπόλοιπων διατρημάτων

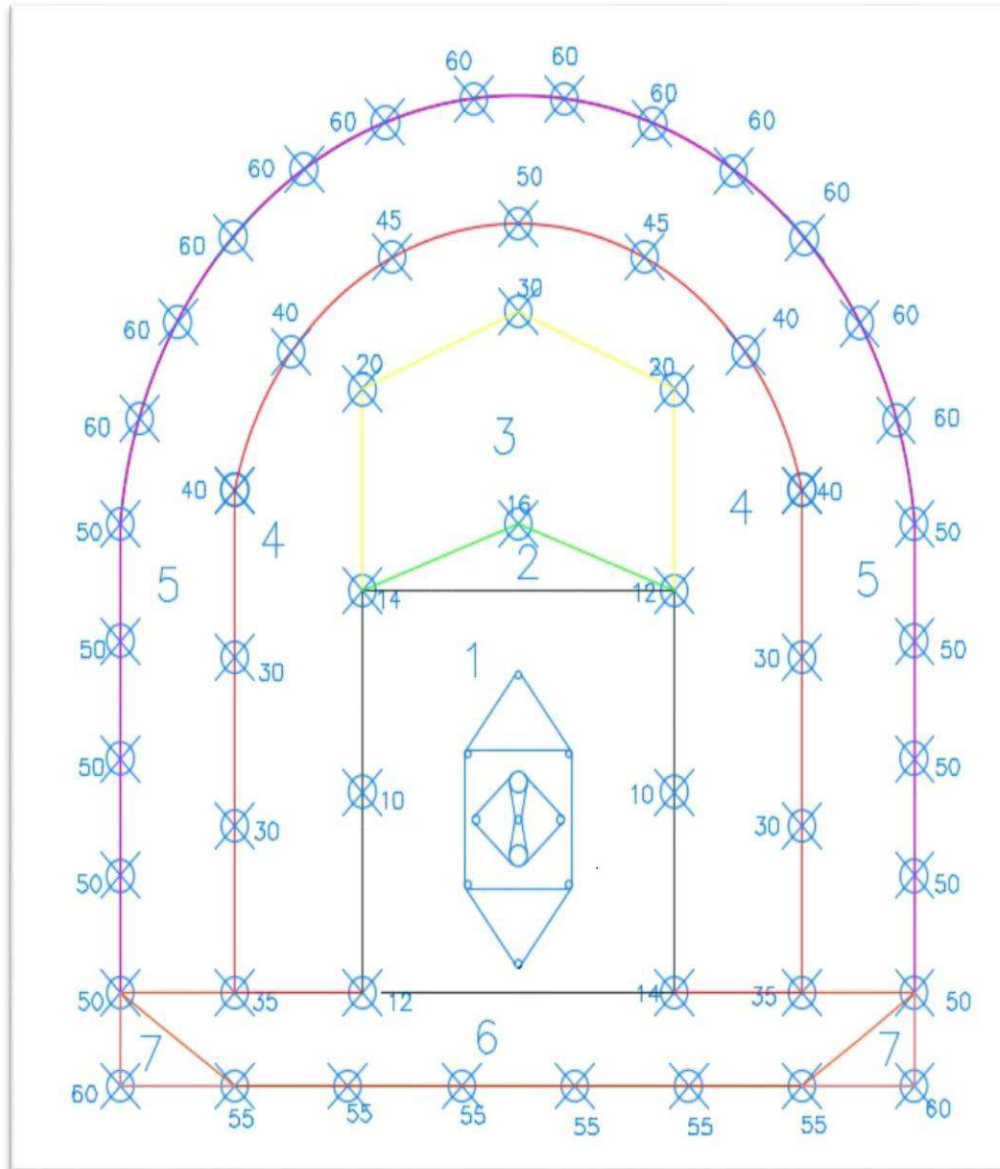
Η σήραγγα όπως έχει ήδη αναφερθεί είναι διατομής 30 m^2 . Για τα υπόλοιπα διατρήματα, οι τιμές διαστήματος S και φορτίου B λαμβάνονται σύμφωνα με τον πίνακα 4.1. Οι τιμές αυτές προέκυψαν από την παρεμβολή του πίνακα 2.3.

Πίνακας 4.1 «Σχεδιαστικές Παράμετροι μεθόδου NTNU» (πηγή: Zare,2007a)

Τύπος διατρήματος	Διάστημα (m)	Φορτίο (m)
Διατρήματα δαπέδου	0.8	0.8
Διατρήματα row nearest contour	1	0.9
Διατρήματα διεύρυνσης (easers)	1.2	1
Διατρήματα συνόρου (contours)	0.7	0.8

4.1.3 Διάταξη διατρημάτων στην διατομή (drilling pattern)

Στο σχήμα 4.9 φαίνεται η τελική διάταξη που σχεδιάστηκε σύμφωνα με τα όσα ειπωθήκαν παραπάνω. Ο συνολικός αριθμός των διατρημάτων είναι 62. Σύμφωνα με το σχήμα 2.6, αναμενόταν το πλήθος των διατρημάτων να είναι 61. Η απόκλιση αυτή δεν κρίθηκε σημαντική οπότε ο σχεδιασμός αυτός θεωρείται αποδεκτός.



Σχήμα 4.9 «Διάταξη διατρημάτων σύμφωνα με την Νορβηγική μέθοδο»
(μέθοδο NTNU)»

4.1.4 Γόμωση της διατομής

Στην προεπισκόπηση, στα διατρήματα διεύρυνσης και στα διατρήματα κοντά στην περίμετρο, χρησιμοποιήθηκε η εκρηκτική ύλη με την εμπορική ονομασία «Kemix-A». Στα διατρήματα δαπέδου, χρησιμοποιήθηκε μια ισχυρή εκρηκτική ύλη, η δυναμίτιδα ή «Dynomit». Τέλος, τα περιμετρικά διατρήματα γομώθηκαν με μια λιγότερο ισχυρή εκρηκτική ύλη, την «Dynotex 2». Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι εκρηκτικές ύλες αυτές αποτελούν φυσίγγια (cartridges). Επομένως, ο βάθος σύζευξης (Coupling Ratio) θα είναι μικρότερος της μονάδας. Οι διαστάσεις των εκρηκτικών υλών είναι τυποποιημένες και δίνονται από τις κατασκευάστριες εταιρείες.

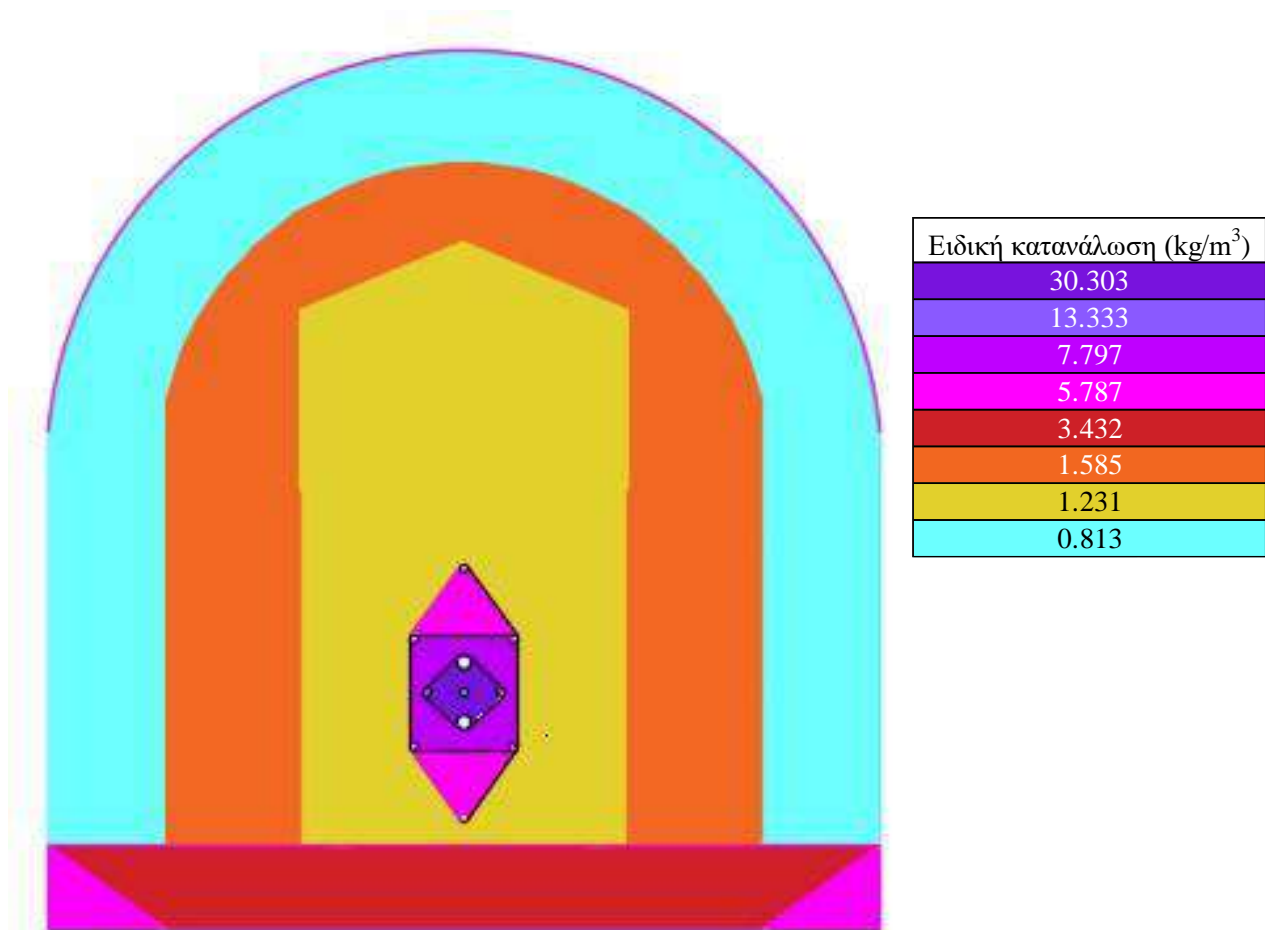
Η τελική γόμωση φαίνεται στον πίνακα 4.2. Η επιγόμωση, όπως παρουσιάστηκε στην παράγραφο 2.1.9, εφαρμόστηκε συναρτήσει του μήκους των διατρημάτων. Ως γόμωση πυθμένα, χρησιμοποιήθηκε είτε ολόκληρο είτε μισό φυσίγγιο Dynomit, ανάλογα με την κατηγορία και την θέση του εκάστοτε διατρήματος σε σχέση με την διατομή. Η γόμωση στήλης, εφαρμόστηκε στο υπολειπόμενο μήκος των διατρημάτων, αγνοώντας την επιγόμωση και την γόμωση πυθμένα. Ως εκρηκτική ύλη της γόμωσης στήλης χρησιμοποιήθηκε η «Kemix-A». Περισσότερες πληροφορίες που αφορούν τις εκρηκτικές ύλες και τα χαρακτηριστικά τους βρίσκονται στο Παράρτημα Α της παρούσας εργασίας.

Πίνακας 4.2 «Σχέδιο γόμωσης της διατομής, Μέθοδος NTNU»

Τύπος Διατρήματος		Προεπισκαφή	Διατρήματα Δαπέδου	Διατρήματα Συνόρου	Σειρά κοντά στο σύνορο	Διατρήματα Διεύρυνσης
Αριθμός διατρημάτων		9	8	22	13	10
Μήκος επιγόμωσης (m)		0.3	0.3	0.9	0.9	0.9
Εκρηκτική ύλη						
Dynomit 35x530	Αριθμός φουσιγγίων	0.5	7	0.5	0.5	1
	kg/διάτρημα	0.25	3.50	0.25	0.25	0.5
Kemix A 36x530	Αριθμός φουσιγγίων	5.00	0	0	3.50	3.00
	kg/διάτρημα	3.35	0	0	3.35	2.01
DynoTex2 22x1000	Αριθμός φουσιγγίων	0	0	2	0	0
	kg/διάτρημα	0	0	0.79	0	0
Σύνολο kg/διάτρημα		3.60	3.5	1.04	2.51	2.51
Σύνολο kg/κύκλο		32.4	28	22.88	25.1	38.5
Dynomit (kg)		2.25	28	5.5	3.25	5
Dynomit (%)		7	100	24.0	9.6	19.9

4.1.5 Κατανομή ειδικής κατανάλωσης στην διατομή

Η προχώρηση (pull) έχει θεωρηθεί ότι αντιστοιχεί στο 90% του όγκου που αναμένεται να εξορυχθεί. Η πρόταση αυτή, εάν υπολογιστεί η μέση ειδική κατανάλωση, βρίσκεται εντός των θεσμοθετημένων ορίων της μεθόδου. Συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι $q_{\text{mean}} = 1.77 \text{ kg/m}^3$. Στο σχήμα 4.10 φαίνεται η κατανομή της ειδικής κατανάλωσης με την χρήση μιας χρωματικής κλίμακας.



Σχήμα 4.10 «Κατανομή της ειδικής κατανάλωσης στην εγκάρσια διατομή της στοάς»

4.1.6 Κατανομή θρυμματισμού (μοντέλο Kuz-Ram)

Για την μελέτη του θρυμματισμού χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Kuz-Ram. Η βασική σχέση που εφαρμόστηκε περιγράφηκε στην ενότητα 1.6. Το σχέδιο ψηφιοποιήθηκε και οι υπολογισμοί των επιφανειών έγιναν με την βοήθεια του υπολογιστικού πακέτου «Civil 3D 2016». Στην συνέχεια, έγινε αναγωγή των επιφανειών σε όγκους, χρησιμοποιώντας το μήκος προχώρησης. Με αυτόν τον τρόπο με δεδομένη γόμωση, υπολογίστηκαν οι επιμέρους ειδικές καταναλώσεις ανά διάτρημα. Για τον υπολογισμό της παραμέτρου x_{50} ανά διάτρημα, στην σχέση (1.2) λήφθηκε η τιμή $\Lambda = 10$ για τον συντελεστή του πετρώματος. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε σκληρό πέτρωμα με αριετό αριθμό ασυνεχειών. Για τον υπολογισμό της σχετικής κατά βάρος ισχύος με βάση το ANFO, χρησιμοποιήθηκε η σχέση κατά Holmberg, που συνδέει την σχετική ισχύ με βάση την δυναμίτιδα με κάποια άλλη εκρηκτική ύλη αναφοράς. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο συντελεστής σχετικής

κατά βάρους ισχύος αντιστοιχήθηκε με την εκρηκτική ύλη που βρίσκεται στις μεγαλύτερες ποσότητες ανά διάτρημα.

$$s = \left(\frac{1}{6} \cdot \frac{V}{V_o} \right) + \left(\frac{5}{6} \cdot \frac{Q}{Q_o} \right) \quad (4.12)$$

όπου V_o : όγκος αερίων εκρηκτικής ύλης αναφοράς και Q_o : Ενέργεια που εκλύεται από την εκρηκτική ύλη αναφοράς

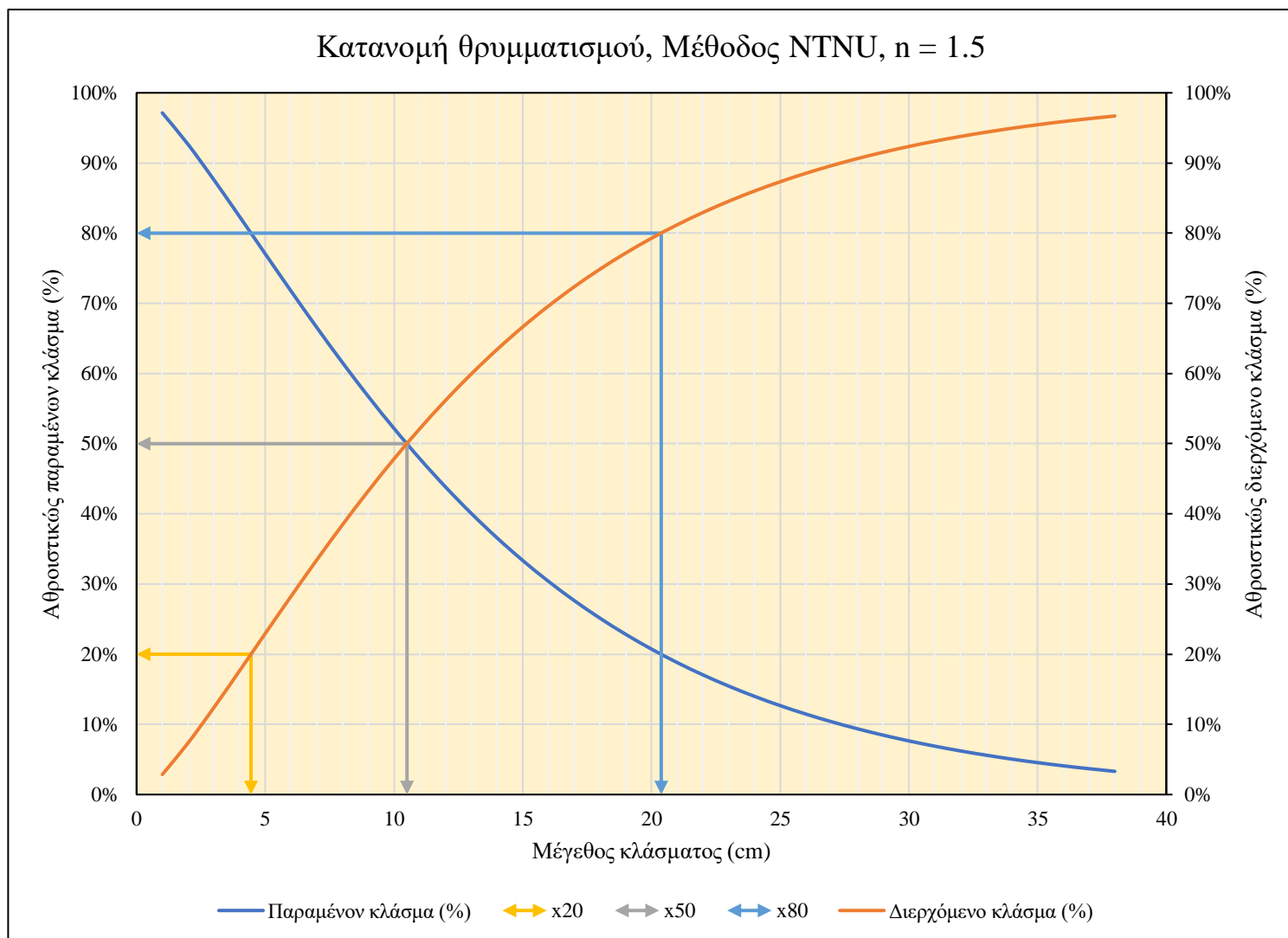
Εάν στην σχέση (4.7) θεωρηθεί ως εκρηκτική ύλη αναφοράς η δυναμίτιδα και ως εκρηκτική ύλη το ANFO, τότε η σχετική κατά βάρους ισχύ με βάση το ANFO, s_{ANFO} υπολογίζεται σύμφωνα με την σχέση 4.8.

$$s_{ANFO} = \frac{s_{LFB}}{0.84} \quad (4.13)$$

Αφού ορίστηκαν τα παραπάνω, χρησιμοποιήθηκε η κατανομή Rosin-Rammler σε κάθε διάτρημα. Το μέσο μέγεθος κλάσματος, x_{50} υπολογίζεται από την σχέση (1.2) και αντιστοιχίζεται σε όλα τα διατρήματα. Για το μέγεθος κλάσματος x , ορίστηκε ένα εύρος τιμών ώστε $x \in [1, 40]$ σε cm. Με αυτόν τον τρόπο, σημειώθηκαν τα αναμενόμενα ποσοστά διερχόμενου κλάσματος, όπως υπολογίστηκαν από το Μοντέλο Kuz-Ram. Η αναγωγή αυτή έγινε με την βοήθεια του συνολικού όγκου εξορυχθέντος πετρώματος.

Όσον αφορά την επεξεργασία των δεδομένων, δημιουργήθηκε μια συνθετική σειρά κοσκίνων με λεπτόκοκκο κλάσμα το $x \leq 1$ cm και μέγιστο όριο το μέγεθος κλάσματος $x = 40$ cm. Για το λεπτόκοκκο κλάσμα, αφαιρέθηκε ο όγκος του παραμένου κλάσματος από τον συνολικό όγκο της περιοχής της διατομής. Για τα υπόλοιπα κλάσματα, αφαιρέθηκαν οι διαδοχικές τιμές των όγκων παραμένου κλάσματος. Για παράδειγμα, στο κλάσμα 12-13 cm, για τον όγκο του κλάσματος, παίρνεται η διαφορά των όγκων $V_{\text{παραμένων, } x=13} - V_{\text{παραμένων, } x=12}$. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο συντελεστής ομοιομορφίας n έχει θεωρηθεί σε όλους τους υπολογισμούς $n = 1.5$.

Η ομαδοποίηση των δεδομένων έγινε με κριτήριο το κάθε κλάσμα x . Δηλαδή, λήφθηκαν αθροιστικά για όλα τα διατρήματα, τα επιμέρους κλάσματα. Τα κλάσματα αυτά αναφέρονται στο διερχόμενο κλάσμα. Τα αποτελέσματα της συνολικής διαδικασίας φαίνονται στο σχήμα 4.10.



Σχήμα 4.11 «Κατανομή θρυμματισμού σύμφωνα με την μέθοδο NTNU»

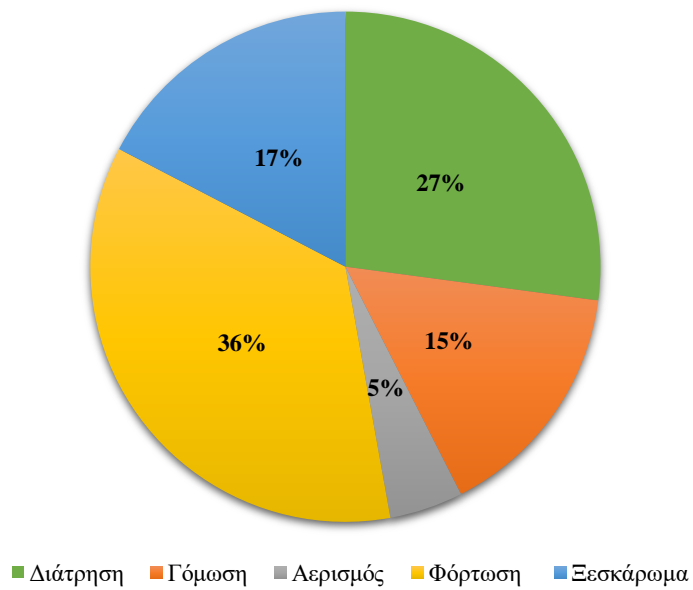
4.1.7 Υπολογισμός ρυθμού προχώρησης (advance rate)

Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, η γεωλογία της περιοχής αντιστοιχήθηκε σε μαρμαρυγιανό σχιστόλιθο. Το πέτρωμα αυτό σύμφωνα με τους ερευνητές του NTNU, έχει συντελεστή ταχύτητας διάτρησης (DRI) που κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 52.5 και 65.5. Επομένως, για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας θεωρήθηκε η μέση τιμή του παραπάνω εύρους, δηλαδή $DRI = 59$. Έτσι, θεωρήθηκαν τα εξής: για τα γομωμένα διατρήματα θεωρήθηκε ταχύτητα διάτρησης τέτοια ώστε $v = 224.4 \text{ cm/min}$ και για τα κενά διατρήματα $v = 93.6 \text{ cm/min}$ αντίστοιχα. Για τους υπολογισμούς στους οποίους έγινε αναφορά στο τρίτο κεφάλαιο, χρησιμοποιήθηκαν τα σχήματα 3.1-3.8 και οι σχέσεις 3.1-3.8. Το μήκος διάτρησης είναι ίσο με 3.0 m, οπότε εφαρμόστηκαν οι προβλεπόμενοι συντελεστές διόρθωσης στους υπολογισμούς. Για τον χρόνο γόμωσης, θεωρήθηκε ότι $k_{||} = 0.93$. Ο μοναδιαίος χρόνος μετακίνησης μεταξύ των διατρημάτων θεωρήθηκε τέτοιος ώστε $t_f = 0.73 \text{ min/διάτρημα}$. Για τον χρόνο ξεσκρώματος, θεωρήθηκε ότι $k_{lf} = 0.93$. Τα τελικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 4.3.

Πίνακας 4.3 «Συνολικά αποτελέσματα, Μέθοδος NTNU»

Αριθμός γομωμένων διατρημάτων	62
Ρυθμός διάτρησης γομωμένων διατρημάτων (cm/min)	224.4
Ρυθμός διάτρησης κενών διατρημάτων (cm/min)	93.64
Χρόνος διάτρησης, γομωμένα διατρήματα (min)	41.4
Χρόνος διάτρησης, κενά διατρήματα (min)	4.0
Χρόνος μετακίνησης (min)	22.42
Χρόνος λόγω έλλειψης συγχρονισμού (min)	1.92
Συνολικός χρόνος διάτρησης (min)	69.8
Χρόνος γόμωσης (min)	39.6
Χρόνος εξαερισμού (min)	12
Χρόνος ξεσκρώματος (min)	44.70
Συνολικός διάρκεια κύκλου (min)	257.3

Στο σχήμα 4.12 φαίνεται η κατανομή (%) των εργασιών ενός κύκλου διάτρησης-ανατίναξης.



Σχήμα 4.12 «Κατανομή χρονικής διάρκειας κύκλου ανά εργασία, Μέθοδος NTNU»

Η ωριαία προχώρηση με την μέθοδο NTNU, σύμφωνα με τα όσα παρουσιάστηκαν, βρέθηκε να είναι ίση με 0.70 m/h.

4.2 Παράδειγμα σχεδιασμού με την μέθοδο κατά Konya

Σε αυτήν την ενότητα, παρουσιάζεται μια εναλλακτική πρόταση σχεδιασμού ανατίναξης της διατομής των 30 m². Σε αυτήν την μέθοδο για τον υπολογισμό των φορτίων και των επιμέρους διαστημάτων για κάθε κατηγορία χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις κατά Konya της ενότητας 2.2. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι θεωρήθηκε γνωστή η γεωλογία που αντιστοιχίζεται με μαρμαρυγιτικούς σχιστόλιθους (mica schist). Κατά συνέπεια, στην σχέση (2.6) λήφθηκε ότι η πυκνότητα του πετρώματος είναι ίση με $\rho = 2.9 \text{ kg/m}^3$. Η προχώρηση θεωρήθηκε και σε αυτήν την περίπτωση της τάξης του 90 %.

4.2.1 Σχεδιασμός προεκσκαφής

Στην προεκσκαφή, σύμφωνα και με την παράγραφο 2.2.1 ορίστηκε η γωνία των διατρημάτων σε σχέση με το μέτωπο να είναι ίση με 60°. Κρίθηκε σκόπιμο να μην εφαρμοστούν οξύτερες γωνίες (έως και 45°) για λόγους οικονομίας. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα διατρήματα συνόρου βρίσκονται παράλληλα στον άξονα της προχώρησης. Όπως έχει συζητηθεί και προηγουμένως, το

μήκος προχώρησης βρίσκεται μεταξύ των 1.68 m και 2.8 m. Δηλαδή αντιστοιχεί στο 30-50% του πλάτους της στοάς που είναι 5.6 m.

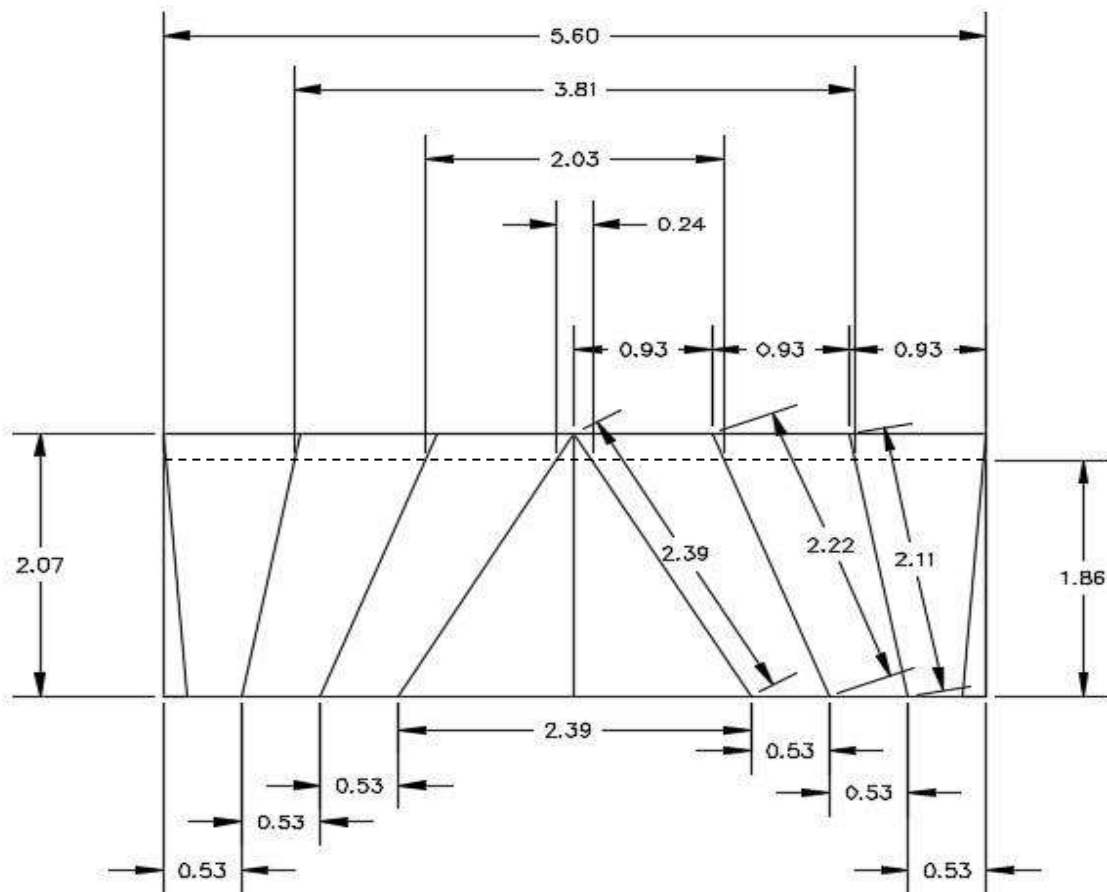
Το φορτίο των διατρημάτων προεκσκαφής βρέθηκε σύμφωνα με την σχέση (2.6). Ως γόμωση πυθμένα θεωρήθηκε η εκρηκτική ύλη Dynomit. Ως εκ τούτου το φορτίο προκύπτει τέτοιο ώστε:

$$B = 1.04 \pm 0.10 \quad (4.14)$$

Και το διάστημα, S θεωρείται τέτοιο ώστε:

$$S = 1.25 \pm 0.13 \quad (4.15)$$

Η τελική διάταξη της προεκσκαφής φαίνεται στο σχήμα 4.13.



Σχήμα 4.13 «Η διαμόρφωση της προεκσκαφής, σύμφωνα με την μέθοδο Κονγιά»

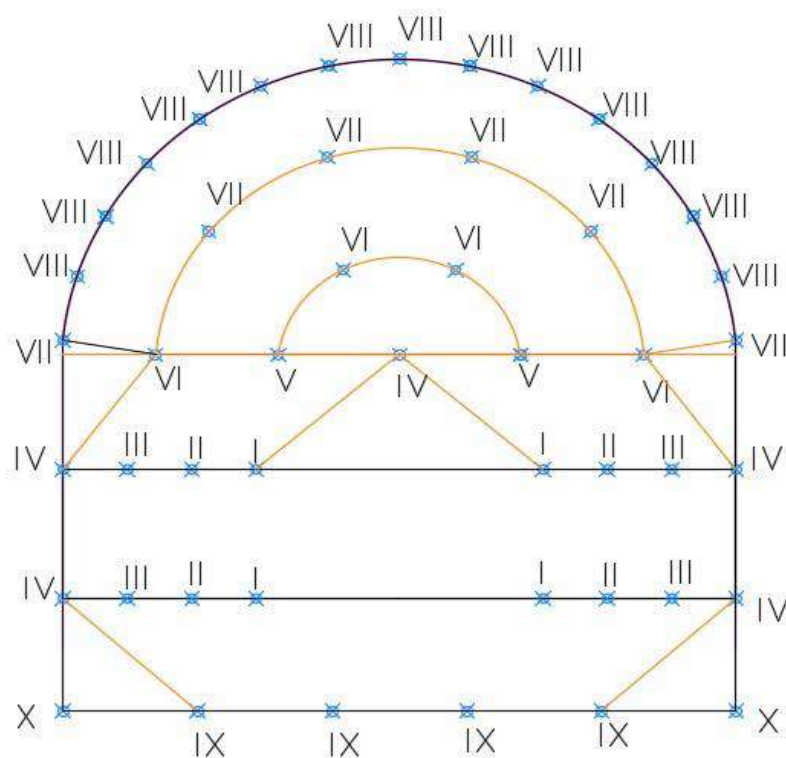
4.2.2 Σχεδιαστικές παράμετροι υπόλοιπων διατρημάτων

Πίνακας 4.4 «Σχεδιαστικές Παράμετροι μεθόδου Konya»

Τύπος διατρήματος	Διάστημα (m)	Φορτίο (m)
Διατρήματα δαπέδου	1.12	1.02
Διατρήματα διεύρυνσης (easers)	1.14	1.04
Διατρήματα συνόρου (contours)	0.60	0.80

4.2.3 Διάταξη διατρημάτων στην διατομή (drilling pattern)

Η διάταξη των διατρημάτων, εφαρμόζοντας όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, φαίνεται στο σχήμα 4.14.



Σχήμα 4.14 «Η διάταξη των διατρημάτων, σύμφωνα με την μέθοδο Konya»

4.2.4 Γόμωση της διατομής

Στην προεπισκαφή, στα διατρήματα διεύρυνσης και στα διατρήματα κοντά στην περίμετρο, χρησιμοποιήθηκε η εκρηκτική ύλη με την εμπορική ονομασία «Kemix-A». Στα διατρήματα δαπέδου, χρησιμοποιήθηκε μια ισχυρή εκρηκτική ύλη, η δυναμίτιδα ή Dynomit. Τέλος, τα περιμετρικά διατρήματα γομώθηκαν με μια λιγότερο ισχυρή εκρηκτική ύλη, την DynoTex 2. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι εκρηκτικές ύλες αυτές αποτελούν φυσίγγια (cartridges). Επομένως, ο βάθος σύζευξης (Coupling Ratio) θα είναι μικρότερος της μονάδας. Οι διαστάσεις των εκρηκτικών υλών είναι τυποποιημένες και δίνονται από τις κατασκευάστριες εταιρείες.

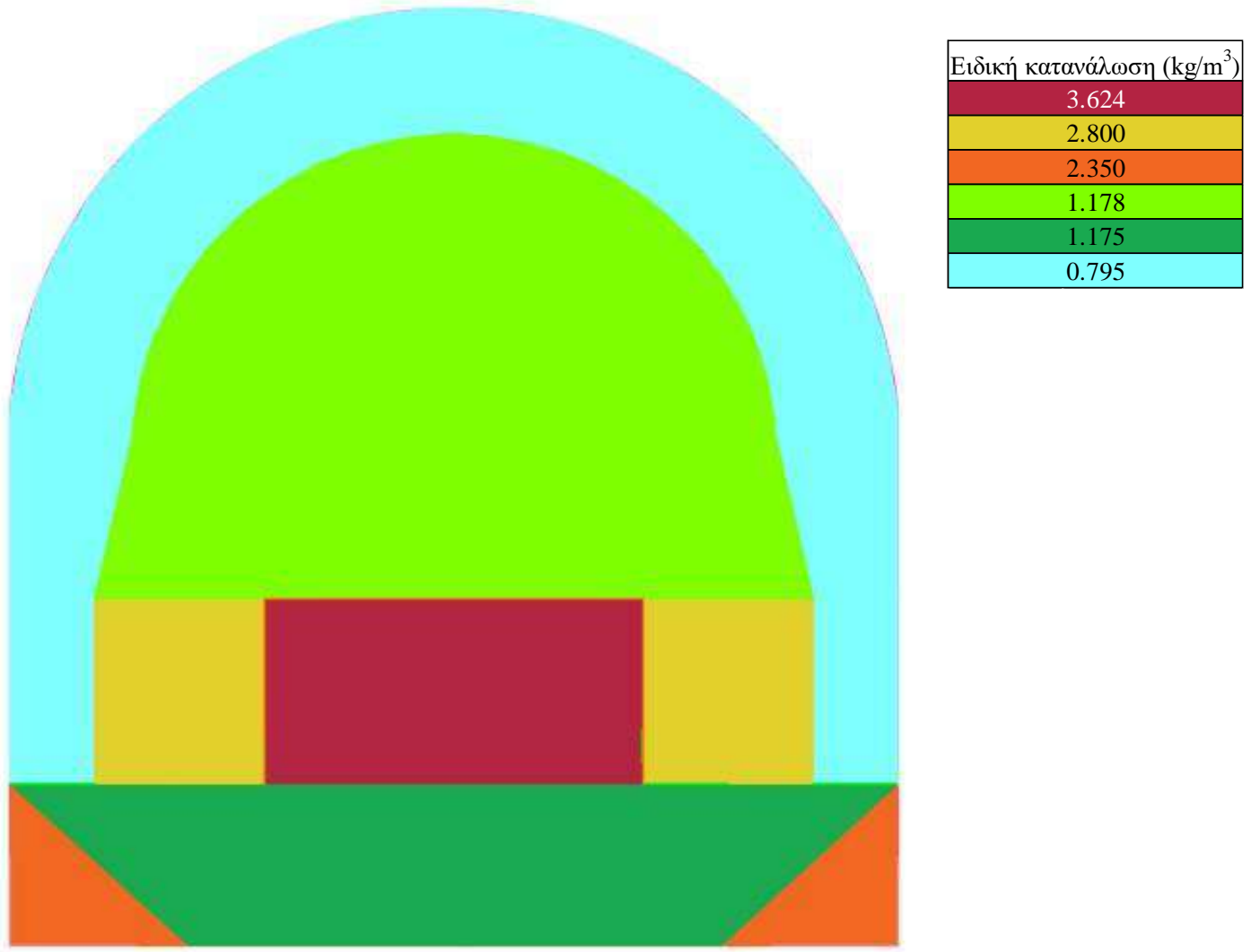
Η τελική γόμωση φαίνεται στον πίνακα 4.5. Η επιγόμωση, όπως παρουσιάστηκε στην ενότητα 2.2, εφαρμόστηκε συναρτήσει του φορτίου των διατρημάτων.

Πίνακας 4.5 «Σχέδιο γόμωσης της διατομής, Μέθοδος Konya»

Τύπος Διατρήματος	Προεπισκαφή	Διατρήματα Δαπέδου	Διατρήματα Συνόρου	Διατρήματα Διεύρυνσης (κεκλιμένα 1)	Διατρήματα Διεύρυνσης (κεκλιμένα 2)	Διατρήματα Διεύρυνσης (παράλληλα)
Αριθμός διατρημάτων	4	6	19	4	4	11
Μήκος επιγόμωσης (m)	0.47	0.20	0.8	0.47	0.47	0.52
Εκρηκτική Ύλη						
Dynomit 35x530	Αριθμός φυσιγγίων	0.5	5	0.5	1	1
	kg/διάτρημα	0.25	2.50	0.25	0.50	0.50
Kemix A 36x530	Αριθμός φυσιγγίων	3.50	0	0	2.50	2.50
	kg/διάτρημα	2.35	0	0.00	1.68	1.68
DynaTex2 22x1000	Αριθμός φυσιγγίων	0	0	1	0	0
	kg/διάτρημα	0	0	0.40	0	0
Σύνολο kg/διάτρημα		2.60	2.50	0.65	2.18	2.18
Σύνολο kg/κύκλο		10.38	15	12.26	8.7	23.93
Dynomit, kg		1	15	4.75	2	5.5
Dynomit, (%)		10	100	39	23	23

4.2.5 Κατανομή ειδικής κατανάλωσης στην διατομή

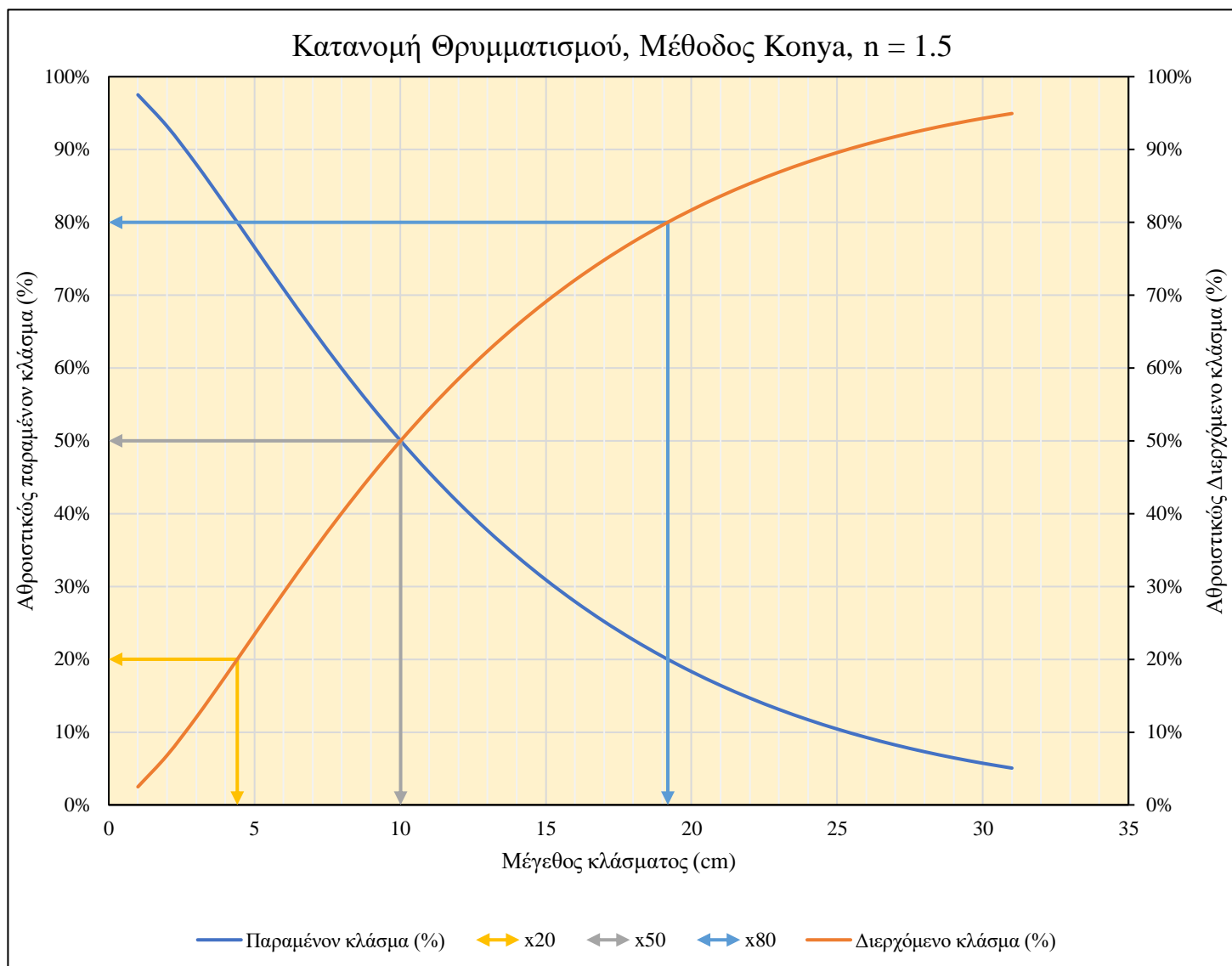
Η προχώρηση (advance) έχει θεωρηθεί ότι αντιστοιχεί στο 90 % του όγκου που αναμένεται να εξορυχθεί. Η μέση ειδική κατανάλωση είναι τέτοια ώστε $q_{\text{mean}} = 1.42 \text{ kg/m}^3$. Στο σχήμα 4.15 φαίνεται η κατανομή της ειδικής κατανάλωσης με την χρήση μιας χρωματικής κλίμακας.



Σχήμα 4.15 «Κατανομή της ειδικής κατανάλωσης στην εγκάρσια διατομή της στοάς, σύμφωνα με την μέθοδο Konya

4.2.6 Κατανομή θρυμματισμού (μοντέλο Kuz-Ram)

Για το επόμενο βήμα της επεξεργασίας των δεδομένων εφαρμόστηκαν εκ νέου τα όσα περιγράφηκαν στην παράγραφο 4.1.6. Έτσι, δημιουργήθηκε το σχήμα 4.16.



Σχήμα 4.16 «Η κατανομή θρυμματισμού, σύμφωνα με την μέθοδο Konya»

4.2.7 Υπολογισμός ρυθμού προχώρησης (advance rate)

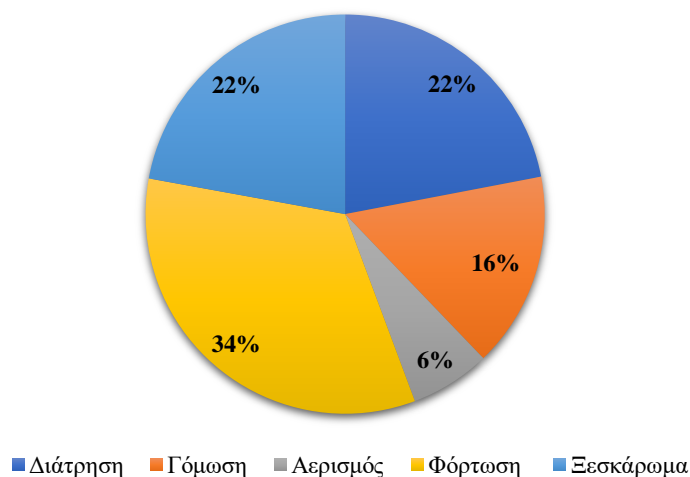
Η διαδικασία υπολογισμών δεν διαφέρει από την ενότητα 4.1.7. Μια σημαντική διαφορά είναι ότι δεν προβλέπονται κενά διατρήματα στην μέθοδο Konya. Για όλα τα διατρήματα θεωρήθηκε ταχύτητα διάτρησης τέτοια ώστε $v = 224.4 \text{ cm/min}$. Το μήκος διάτρησης είναι ίσο με 2.0 m, οπότε εφαρμόστηκαν οι προβλεπόμενοι συντελεστές διόρθωσης στους υπολογισμούς. Επειδή το μήκος διάτρησης βρίσκεται εκτός του εύρους που προβλέπεται από την προσομοίωση κατά NTNU, για την εύρεση όλων των δεικτών διόρθωσης, εφαρμόστηκε η μέθοδος των ελαχίστων

τετραγώνων. Για τον χρόνο γόμωσης, θεωρήθηκε ότι $k_{II} = 0.74$. Ο μοναδιαίος χρόνος μετακίνησης μεταξύ των διατρημάτων θεωρήθηκε τέτοιος ώστε $t_f = 0.65 \frac{\text{min}}{\text{διατρημα}}$. Για τον χρόνο ξεσκρώματος, θεωρήθηκε ότι $k_{If} = 0.74$. Τα τελικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 4.6.

Πίνακας 4.6 «Συνολικά αποτελέσματα, Μέθοδος Konya»

Αριθμός γομωμένων διατρημάτων	48
Ρυθμός διάτρησης γομωμένων διατρημάτων (cm/min)	224.4
Ρυθμός διάτρησης κενών διατρημάτων (cm/min)	0
Χρόνος διάτρησης, γομωμένα διατρήματα (min)	23.8
Χρόνος διάτρησης, κενά διατρήματα (min)	0.00
Χρόνος μετακίνησης (min)	16.03
Χρόνος λόγω έλλειψης συγχρονισμού (min)	0.91
Συνολικός χρόνος διάτρησης (min)	40.7
Χρόνος γόμωσης (min)	29.3
Χρόνος διάτρησης και γόμωσης (min)	70.1
Χρόνος αερισμού (min)	12
Χρόνος ξεσκρώματος (min)	41.0

. Στο σχήμα 4.17 φαίνεται η κατανομή (%) των εργασιών ενός κύκλου διάτρησης-ανατίναξης



Σχήμα 4.17 «Κατανομή χρονικής διάρκειας κύκλου ανά εργασία, Μέθοδος Konya»

Η ωριαία προχώρηση με την μέθοδο Konya, σύμφωνα με τα όσα παρουσιάστηκαν, βρέθηκε να είναι ίση με 0.67 m/h.

4.3 Σύγκριση των σχεδιασμών

Σε αυτήν την ενότητα, γίνεται σύγκριση των δύο μεθόδων, όπως αυτές εφαρμόστηκαν στα παραδείγματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Προσοχή δίνεται στις σχεδιαστικές διαφοροποιήσεις αλλά και στην προβλεπόμενη κατανομή θρυμματισμού. Η σύγκριση αυτή αφορά την κάθε ζώνη της στοάς.

4.3.1 Σύγκριση διατρημάτων ανά ζώνη ανατίναξης

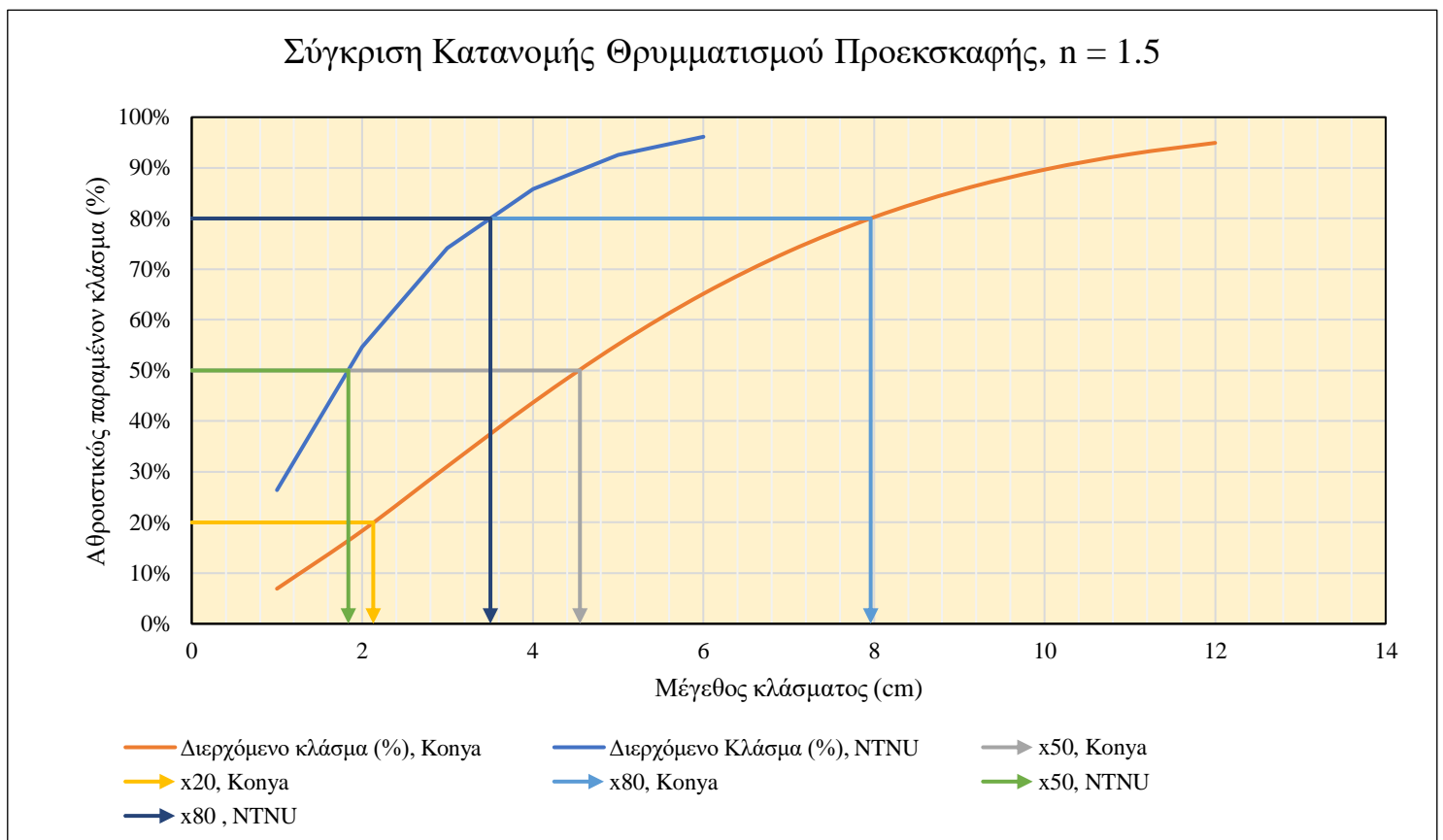
4.3.1.1 Διατρήματα προεκσκαφής

Στην Νορβηγική μέθοδο (μέθοδο NTNU), η επιλογή των σχεδιαστικών παραμέτρων της προεκσκαφής εξαρτάται από την διάμετρο των γομωμένων διατρημάτων, τη διάμετρο του (ή των) κενού διατρήματος και το μήκος διάτρησης. Συγκεκριμένα, με χρήση αυτών των παραμέτρων καθορίζεται ο απαιτούμενος κενός χώρος. (Σχήμα 2.3)

Το φορτίο των υπόλοιπων διατρημάτων προεκσκαφής, καθορίζεται από τις διαστάσεις του ανοίγματος που δημιουργήθηκε από τα κενά διατρήματα και το πρώτο γομωμένο διάτρημα. Η επιλογή αυτή γίνεται με χρήση του εμπειρικού νομογράμματος του σχήματος 2.4. Η θέση της προεκσκαφής δεν αναλογεί πάντα στο μέσον της στοάς αλλά η στοά των παραδειγμάτων αποτελεί μια στοά μεσαίας κατηγορίας.

Στην μέθοδο Konya, με χρήση κεκλιμένων διατρημάτων, η επιλογή του φορτίου στηρίζεται στην εμπειρική σχέση (2.6). Λόγω της συνθήκης συμμετρίας των διατρημάτων, η προεξοικαφή τοποθετείται στο μέσον της στοάς. Η γωνία μεταξύ των διατρημάτων είναι ίση με 60° . Η επιλογή των σχεδιαστικών παραμέτρων με την μέθοδο Konya, βασίζεται αποκλειστικά στην πυκνότητα του πετρώματος, την πυκνότητα γόμωσης της εκρηκτικής ύλης και την διάμετρο της. Ο σχεδιασμός της προεξοικαφής με την μέθοδο Konya είναι πιο απλός, απ' ό,τι με την Νορβηγική μέθοδο, αλλά έχει περισσότερες δυσκολίες στην υλοποίηση του.

Η επιφάνεια που αναλογεί στα διατρήματα προεξοικαφής είναι μικρότερη στην περίπτωση της Νορβηγικής μεθόδου σε σχέση με την μέθοδο Konya. Ταυτόχρονα, ο αριθμός των διατρημάτων, όπως αυτά ορίζονται από την Νορβηγική μέθοδο είναι μεγαλύτερος σε σχέση με την μέθοδο Konya. Αυτό έχει ως συνέπεια, την παραγωγή μεγάλου μέρους λεπτόκοκκων κλασμάτων με την μέθοδο NTNU. Η σύγκριση των κατανομών θρυμματισμού ανά μέθοδο φαίνεται στο σχήμα 4.18.

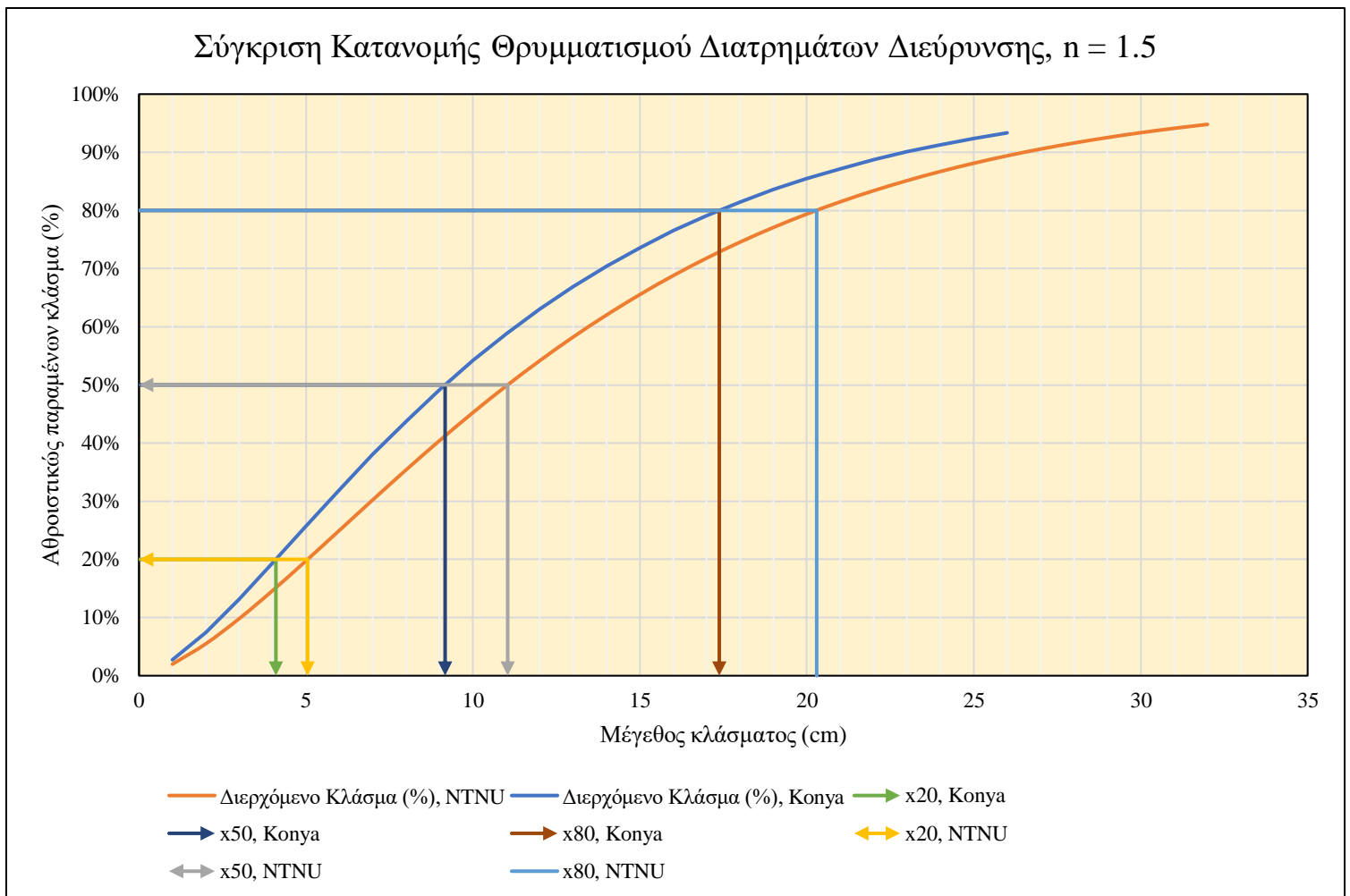


Σχήμα 4.18 «Σύγκριση κατανομής θρυμματισμού ανά μέθοδο-Διατρήματα προεξοικαφής»

4.3.1.2 Διατρήματα διεύρυνσης

Στην Νορβηγική μέθοδο, οι σχεδιαστικές παράμετροι εξαρτώνται από τον συντελεστή k_{bl} που είναι ένας διορθωτικός συντελεστής. Η γεωμετρία του ανοίγματος ορίζεται από τον λόγο S/B , όπου S : η απόσταση μεταξύ των διατρημάτων της ίδιας σειράς και B : το φορτίο των διατρημάτων. Η Νορβηγική μέθοδος θεωρεί τον λόγο S/B τέτοιο ώστε $S/B = 1.2$.

Στην μέθοδο Konya, το φορτίο προκύπτει από την εμπειρική σχέση (2.6). Ο λόγος S/B θεωρείται τέτοιος ώστε $S/B = 1.1$. Στο σχήμα 4.19 φαίνεται η κατανομή θρυμματισμού ανά μέθοδο. Η μέθοδος Konya θεωρεί και κεκλιμένα διατρήματα διεύρυνσης για τα οποία ισχύει ότι $S/B = 1.2$.



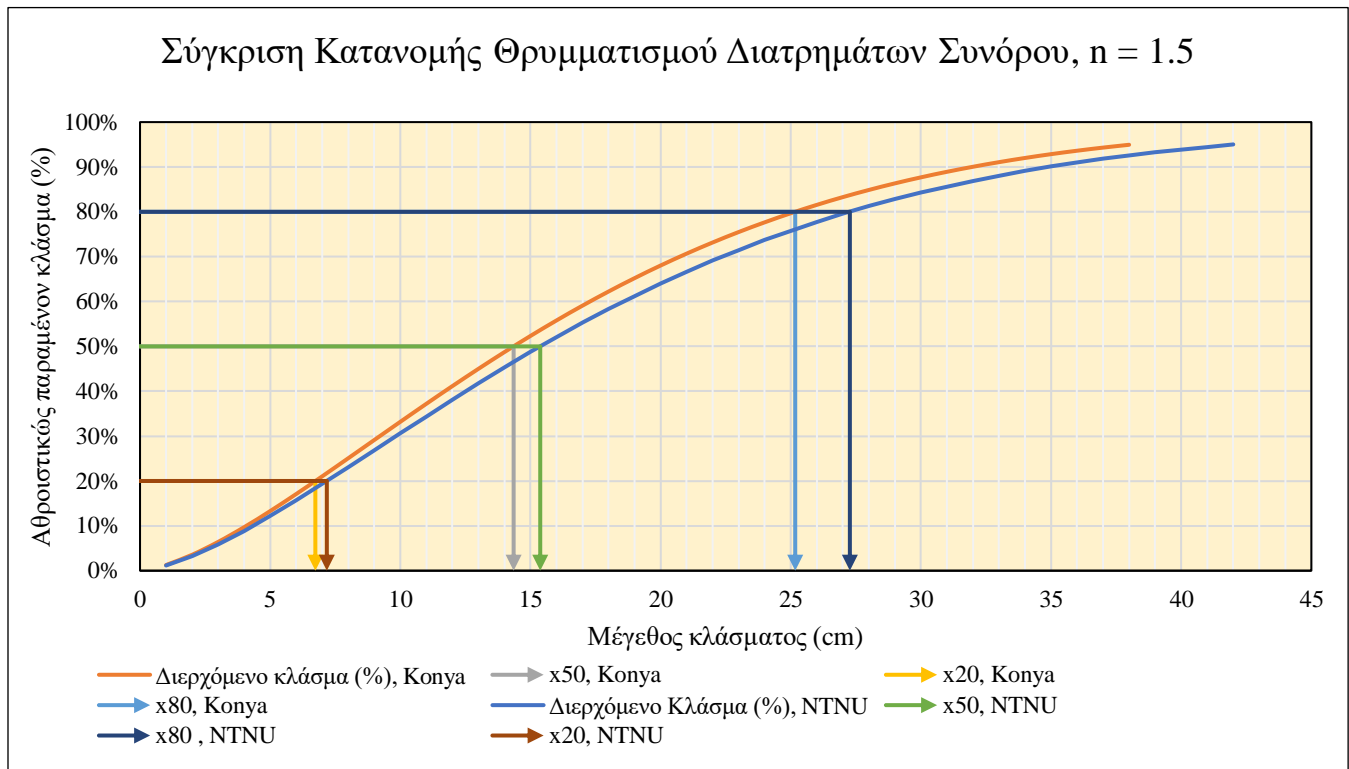
Σχήμα 4.19 «Σύγκριση κατανομής θρυμματισμού ανά μέθοδο-Διατρήματα διεύρυνσης»

4.3.1.3 Διατρήματα συνόρου

Στην Νορβηγική μέθοδο, χρησιμοποιείται η μέθοδος της απαλής ανατίναξης (Smooth Blasting). Δηλαδή, η γραμμική πυκνότητα γόμωσης είναι μικρότερη στα διατρήματα συνόρου απ' ό,τι στα υπόλοιπα διατρήματα. Παράλληλα θεωρείται ότι ο λόγος S/B είναι τέτοιος ώστε $S/B < 1$. Για την επίτευξη καλύτερου θρυμματισμού, η μέθοδος θεωρεί και μια σειρά διατρημάτων που βρίσκεται πλησίον των διατρημάτων συνόρου. Η σειρά αυτή είναι η «σειρά κοντά στο σύνορο» (row nearest contour).

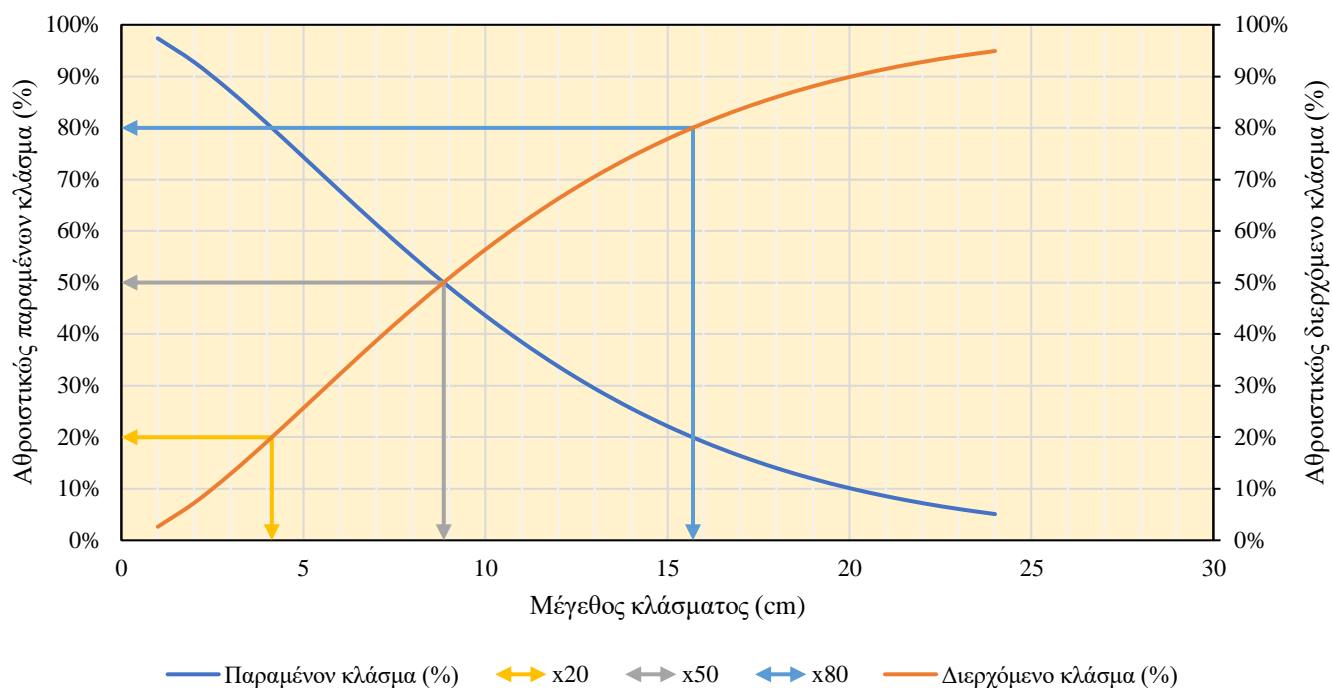
Στην μέθοδο Konya, εφαρμόζεται και πάλι η μέθοδος απαλής ανατίναξης. Όμως, κατά τον Konya, τα διατρήματα συνόρου διακρίνονται σε πλευρικά διατρήματα (rib contour holes) και σε διατρήματα στέμματος (back contour holes ή back contour holes). Κατά συνέπεια, μπορούν να επιλεγθούν διαφορετικές σχεδιαστικές παράμετροι ανά κατηγορία, ανάλογα με τις ανάγκες του έργου.

Στα σχήματα 4.20 και 4.21 φαίνονται οι κατανομές θρυμματισμού ανά μέθοδο και η κατανομή θρυμματισμού της σειράς κοντά στο σύνορο αντίστοιχα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ειδική κατανάλωση είναι παρόμοια ανά μέθοδο.



Σχήμα 4.20 «Σύγκριση κατανομής θρυμματισμού ανά μέθοδο-Διατρήματα συνόρου»

Κατανομή θρυμματισμού Διατρημάτων κοντά στο σύνορο, Μέθοδος NTNU, $n = 1.5$

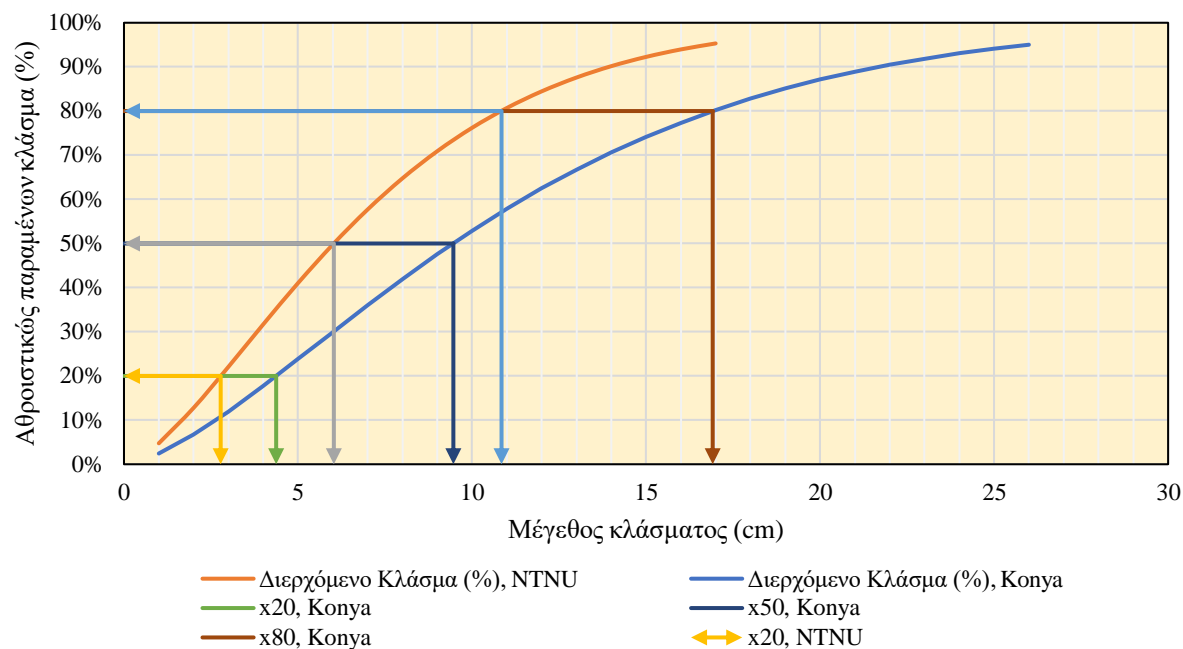


Σχήμα 4.21 Κατανομή θρυμματισμού Διατρημάτων κοντά στο σύνορο, Μέθοδος NTNU»

4.3.1.4 Διατρήματα δαπέδου

Στα διατρήματα δαπέδου, η Νορβηγική μέθοδος θεωρεί ότι ο λόγος S/B είναι τέτοιος ώστε $S/B = 1.0$. Αντιθέτως, η μέθοδος Konya θεωρεί ότι $S > B$ και ότι $S/B = 1.1$. Το φορτίο που προβλέπεται από την κάθε μέθοδο διαφέρει και συγκεκριμένα για την Νορβηγική μέθοδο είναι μικρότερο. Η διαφορά αυτή φαίνεται στην κατανομή θρυμματισμού ανά μέθοδο του σχήματος 4.22. Η ειδική κατανάλωση κατά Konya είναι μικρότερη της Νορβηγικής μεθόδου.

Σύγκριση Κατανομής Θρυμματισμού Διατρημάτων Δαπέδου, $n = 1.5$



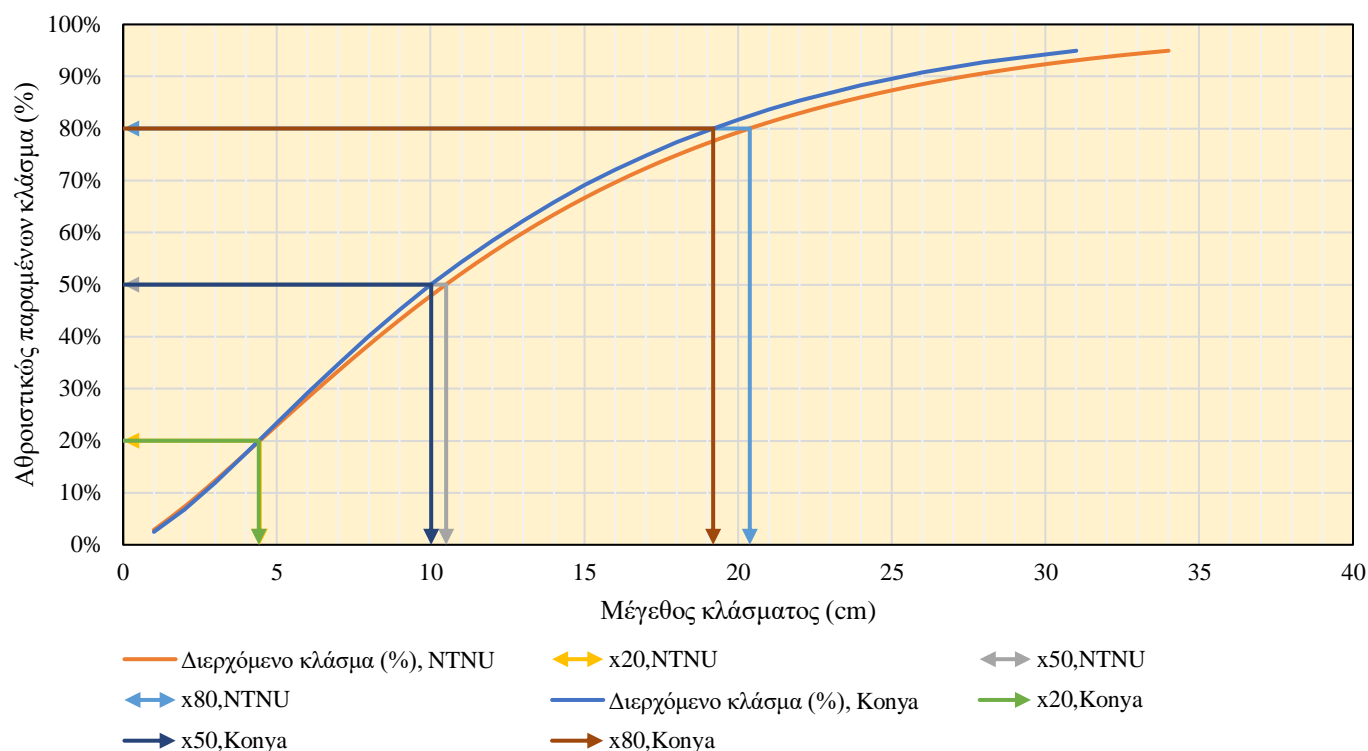
Σχήμα 4.22 «Σύγκριση Κατανομής Θρυμματισμού-Διατρήματα δαπέδου»

4.3.1.5 Σύγκριση συνολικής κατανομής θρυμματισμού

Όσον αφορά την σύγκριση της συνολικής κατανομής θρυμματισμού, αυτή φαίνεται στο σχήμα 4.23. Παρατηρούνται τα εξής:

- Τα μεγέθη κλάσματος, x_{20} , που αντιστοιχούν στο 20 % αθροιστικώς διερχόμενο κλάσμα είναι παρόμοια ανά μέθοδο. Συγκεκριμένα, η μέθοδος NTNU προβλέπει ως αποτέλεσμα ένα μέγεθος κλάσματος x_{20} ίσο με 4.44 cm, έναντι του x_{20} που προβλέπει η μέθοδος Konya που είναι ίσο με 4.41 cm.
- Τα μεγέθη κλάσματος, x_{50} , που αντιστοιχούν στο 50 % αθροιστικώς διερχόμενο κλάσμα διαφέρουν ανά μέθοδο. Συγκεκριμένα, η μέθοδος NTNU προβλέπει ως αποτέλεσμα ένα μέγεθος κλάσματος x_{50} ίσο με 10.51 cm, έναντι του x_{50} που προβλέπει η μέθοδος Konya που είναι ίσο με 10.02 cm.
- Τα μεγέθη κλάσματος, x_{80} , που αντιστοιχούν στο 80 % αθροιστικώς διερχόμενο κλάσμα διαφέρουν ανά μέθοδο. Συγκεκριμένα, η μέθοδος NTNU προβλέπει ως αποτέλεσμα ένα μέγεθος κλάσματος ίσο με 20.38 cm, έναντι του x_{50} που προβλέπει η μέθοδος Konya που είναι ίσο με 19.19 cm.

Σύγκριση Συνολικής Κατανομής Θρυμματισμού, $n = 1.5$



Σχήμα 4.23 «Σύγκριση Συνολικής Κατανομής Θρυμματισμού ανά μέθοδο»

4.3.2 Σύγκριση κύκλου διάτρησης-ανατίναξης ανά μέθοδο

Στην Νορβηγική μέθοδο επιλέχθηκε μήκος προχώρησης (μήκος διατρήματος) ίσο με 3.0 m. Στην μέθοδο Konya, λόγω περιορισμών που σχετίζονται με την γεωμετρία της στοάς, επιλέχθηκε μήκος προχώρησης ίσο με 2.0 m. Η διαφορά αυτή φαίνεται στον απαιτούμενο χρόνο πραγματοποίησης της κάθε εργασίας (πίνακες 4.3 και 4.6). Η σύγκριση όμως αφορά τον καθαρό χρόνο προχώρησης (net advance rate) και δεν συμπεριλαμβάνει τον χρόνο τοποθέτησης της υποστήριξης. Υπό αυτές τις συνθήκες, η Νορβηγική μέθοδος υπερτερεί οριακά της μεθόδου Konya, όσον αφορά τον ρυθμό προχώρησης ανά ώρα. Συγκεκριμένα, η ωριαία προχώρηση για την μέθοδο NTNU είναι $0.70 \frac{\text{m}}{\text{h}}$ έναντι των $0.67 \frac{\text{m}}{\text{h}}$ της μεθόδου Konya.

Όσον αφορά την ειδική κατανάλωση, για την μέθοδο NTNU είναι ίση με $1.77 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, ενώ για την μέθοδο Konya είναι ίση με $1.42 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$. Η ειδική διάτρηση σύμφωνα με την μέθοδο NTNU προκύπτει ίση με $2.31 \frac{\text{m}}{\text{m}^3}$, ενώ σύμφωνα με την μέθοδο Konya προκύπτει ίση με $1.83 \frac{\text{m}}{\text{m}^3}$.

Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα-Προτάσεις

5.1 Γενικά συμπεράσματα

Η Νορβηγική μέθοδος, αποτελεί μια μέθοδο εκπόνησης σχεδίου ανατίναξης, με χρήση πολλών παραμέτρων. Οι παράμετροι αυτές είναι: η εξορυξιμότητα με εκρηκτικές ύλες, το μήκος διάτρησης, η διάμετρος του γομωμένου διατρήματος και η διάμετρος του διατρήματος ανακούφισης. Στην συνέχεια, εφόσον έχει γίνει χαρακτηρισμός της επι τόπου κατάστασης του πετρώματος, η διαδικασία εκπόνησης του σχεδίου ανατίναξης απλοποιείται σημαντικά. Τα σχεδιαστικά δεδομένα προκύπτουν με χρήση σχημάτων και πινάκων και καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος περιπτώσεων. Μπορεί να γίνει επαλήθευση των αποτελεσμάτων και να βρεθούν τυχόν αποκλίσεις από τις θεωρητικές τιμές αριθμού διατρημάτων, ειδικής κατανάλωσης και ειδικής διάτρησης.

Η μέθοδος Konya από την άλλη, στην διαδικασία εκπόνησης του σχεδίου ανατίναξης, βασίζεται στην πυκνότητα του πετρώματος, την πυκνότητα γόμωσης της εκρηκτικής ύλης και την διάμετρο της. Δεν δίνεται η δυνατότητα επαλήθευσης των αποτελεσμάτων και η εύρεση αποκλίσεων από μια θεωρητική τιμή. Αποτελεί μια εμπειρική μέθοδο, η οποία απαιτεί την δοκιμή του εκάστοτε σχεδίου ανατίναξης. Αυτό κρίνεται απαραίτητο, για να γίνουν οι απαραίτητες διορθώσεις.

Η μέθοδος Konya, χρησιμοποιεί μικρότερο αριθμό διατρημάτων και έχει μικρότερο μήκος προχώρησης. Συνεπώς, είναι οικονομικότερη σε σχέση με την Νορβηγική, εάν δοθεί έμφαση στις εκρηκτικές ύλες. Επίσης, η μέθοδος Konya, δίνει την δυνατότητα πραγματοποίησης περισσότερων κύκλων διάτρησης-ανατίναξης ανά βάρδια. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι και οι δύο μέθοδοι χρησιμοποιούν μεθόδους ελεγχόμενης ανατίναξης. Επομένως, η βασική θεώρηση είναι ότι ισχύουν οι ίδιες συνθήκες υπερεκσκαφής (overbreak).

Η επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου εξαρτάται από τις απαιτήσεις του έργου καθώς και από τα διαθέσιμα μέσα. Η κάθε μέθοδος έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της, όπως αυτά παρουσιάστηκαν στην παρούσα εργασία. Όμως και στις δύο μεθόδους θα πρέπει να γίνουν αναπροσαρμογές, εφόσον παρουσιαστούν τεχνικά προβλήματα κατά την εκτέλεση του έργου.

5.2 Προτάσεις έρευνας-βελτίωσης της μεθοδολογίας

Στην παρούσα εργασία, τα δεδομένα που συλλέχθηκαν και παρουσιάστηκαν είναι συνθετικά. Επομένως, βασίζονται σε μια σειρά από παραδοχές που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Συνεπώς, για την επαλήθευση τους προτείνεται η εφαρμογή των δυο σχεδιασμών σε πραγματικές συνθήκες, σε μια σειρά πειραματικών στοών. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να μελετηθεί ο πραγματικός θρυμματισμός του πετρώματος και να συσχετιστεί με τον θεωρητικό θρυμματισμό. Επίσης, μπορεί να εξακριβωθεί ο ακριβής χρόνος πραγματοποίησης του κύκλου διάτρησης-ανατίναξης ανά μέθοδο που θα οδηγήσει και στην τελική επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου.

Επιπλέον, θα πρέπει να ελεγχθεί ότι επιτυγχάνεται η θεωρητική προχώρηση, στο μέτρο του δυνατού και στις δύο μεθόδους. Κατά τον Κορυα, σε περίπτωση μη επίτευξης της επιθυμητής προχώρησης, η γόμωση πυθμένα μπορεί να φτάσει έως και το 1/3 του συνολικού μήκους διατρήματος, για τα διατρήματα προεισκαφής

Ένα σημείο που δεν θίχτηκε στην παρούσα εργασία, αφορά τις δονήσεις που αναμένεται να παρατηρηθούν στο μέτωπο. Τα ασφαλή όρια καθορίζονται από την τοπική νομοθεσία και θα πρέπει να τηρούνται. Άρα, οι δονήσεις θα πρέπει να μελετηθούν μαζί με τις υπόλοιπες παραμέτρους.

Βιβλιογραφία

Ελληνική Βιβλιογραφία

1. Αγιουτάντης, Ζ. (2009). *Στοιχεία Διάτρησης-Ανατίναξης*. Αθήνα: Εκδόσεις "ΙΩΝ".
2. Αγιουτάντης, Ζ. (2010). *Στοιχεία Γεωμηχανικής: Μηχανική Πετρωμάτων*. Αθήνα: Εκδόσεις "ΙΩΝ".
3. Κάββου, Χ. (2019). *Συγκριτική αξιολόγηση μεθοδολογιών λειτουργικής ανάλυσης μηχανημάτων τεχνικών έργων*. (Διπλωματική εργασία). Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο Σχολή Θετικών Επιστημών και τεχνολογίας, Πάτρα.
4. Σαρρής, Ε. (2004). *Προσομοίωση ανατίναξης με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων*. (Διπλωματική εργασία). Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

Διεθνής Βιβλιογραφία

1. Bhandari, S. (1997). *Engineering rock blasting operations*.
2. Bruland, A. (1998). Hard rock tunnel boring: Drillability test methods. *Project report 13A-98, NTNU Trondheim, 21*.
3. Carlos, L. J., Emilio, L. J., & Francisco, J. A. C. (1995). *Drilling and blasting of rocks*. Geomining Technological Institute of Spain, Spain.
4. Chatziangelou, M., & Christaras, B. (2013). Rock mass blastability dependence on rock mass quality. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 47(4), 1694-1705.
5. Cunningham, C. V. B. (2005, September). The Kuz-Ram fragmentation model—20 years on. In *Brighton conference proceedings* (pp. 201-210). European Federation of Explosives Engineers, England.
6. Deković, Z., Ester, Z., & Dobriločić, M. (2003). Optimal Parameters of Blasting in Tunnels Using Patroned and Pumped Explosives with Electric and Non-electric Initiation. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 15(1), 31-37.
7. Guan, X., Guo, C., Mou, B., & Shi, L. (2019). Tunnel millisecond-delay controlled blasting based on the delay time calculation method and digital electronic detonators to reduce structure vibration effects. *PloS one*, 14(3), e0212745.
8. Konya, C. J. (1995). *Blast design*. Intercontinental Development.
9. Multan, M. A. (2016). *E6 STAVSJØFJELLTUNNELLEN-Excavation performance estimation of the new parallel tunnel* (Master's thesis, NTNU).

10. Ouchterlony, F. (2003). *Influence of blasting on the size distribution and properties of muckpile fragments: a state-of-the-art review*.
11. Ouchterlony, F., & Sanchidrián, J. A. (2019). A review of development of better prediction equations for blast fragmentation. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(5), 1094-1109.
12. Persson, P. A., Holmberg, R., & Lee, J. (1993). *Rock blasting and explosives engineering*. CRC press.
13. Peurifoy, R. L., Schexnayder, C. J., Schmitt, R. L., & Shapira, A. (2018). *Construction planning, equipment, and methods*. McGraw-Hill Education.
14. Sanchidrián, J. A., Ouchterlony, F., Segarra, P., & Moser, P. (2014). Size distribution functions for rock fragments. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 71, 381-394.
15. Singh, B., & Goel, R. K. (2011). *Engineering rock mass classification: tunneling, foundations, and landslides*. Waltham, MA: Butterworth-Heinemann.
16. Singh, S. P., & Xavier, P. (2005). Causes, impact and control of overbreak in underground excavations. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20(1), 63-71.
17. Singh, T. D., & Singh, B. (2006). *Elsevier Geo-Engineering Book 5: Tunnelling In Weak Rocks* (Vol. 5). Elsevier.
18. Skawina, B. (2013). *Comparison of mechanical excavation and drilling: A discrete event simulation approach*.
19. *Specification Reference Book: For Heavy Construction Equipment & Cranes* (2nd ed.). (1995). K-III Directory Corporation.
20. Zare, S. (2007). *Drill and Blast Tunnelling, Blast Design* (Doctoral dissertation, Norwegian University of science and Technology).
21. Zare, S. (2007). *Prediction model and simulation tool for time and costs of drill and blast tunnelling*. Department of Civil and Transport Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.
22. Zare, S., & Bruland, A. (2006). Estimation model for advance rate in drill and blast tunnelling. In *Intern. symp. on utilization of underground space in urban areas, 6–7 November 2006*.
23. Zare, S., & Bruland, A. (2013). Applications of NTNU/SINTEF drillability indices in hard rock tunneling. *Rock mechanics and rock engineering*, 46(1), 179-187.

24. Zou, D. (2017). *Theory and Technology of Rock Excavation for Civil Engineering* (p699). Springer Singapore.

Διαδικτυακές πηγές

1. [ESSEEM,\(2010\)-Work Package 6 Blasting theory](#)
2. [Drill and Blast method,\(2015\),RailSystem](#)

Παράρτημα Α

Τεχνικά χαρακτηριστικά των εκρηκτικών υλών των εταιρειών Dyno Nobel και Orica Mines

Πίνακας 1 «Τεχνικά χαρακτηριστικά εκρηκτικών υλών της εταιρείας Dyno Nobel»

(πηγή: Dyno Nobel)

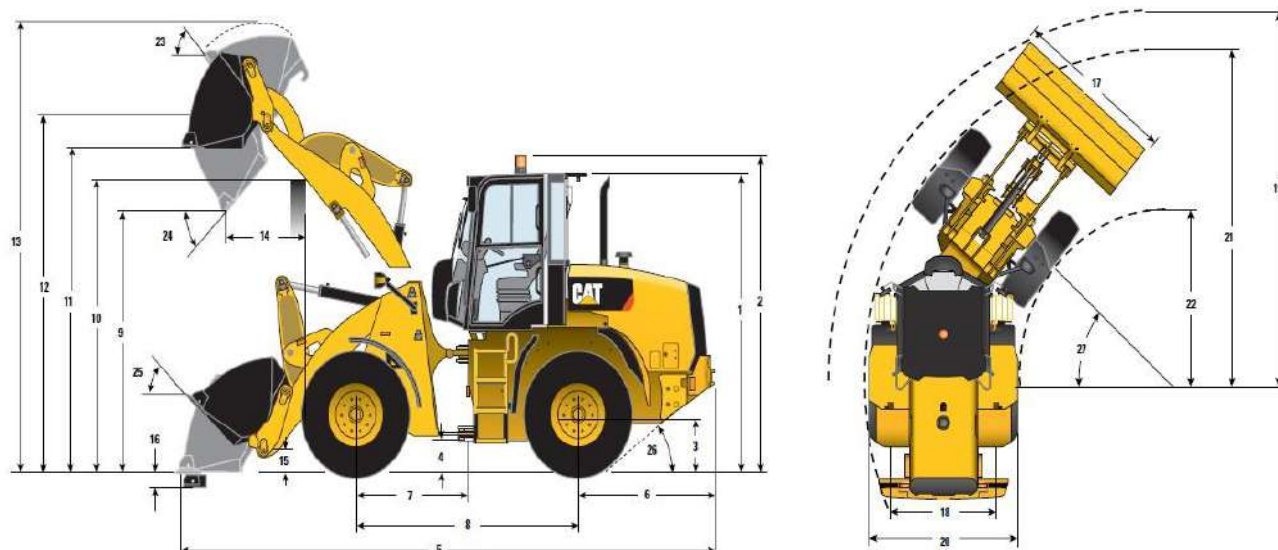
Εμπορική Ονομασία	Dynomit	Kemix-A	DynoTex 2
Όγκος αερίων εκρήξεως [L/kg]	890	920	700
Ισοζύγιο O ₂	1.2 %	- 2.7 %	4.8 %
Θερμική ενέργεια (Θεωρητική) [MJ/kg]	4.5	3.8	2.8
Ταχύτητα έκρηξης (Detonation velocity) [m/s]	2900 - 6200	< 4800	2200
Βάρος φυσιγγίων [kg]	0.53	0.67	0.395
Πυκνότητα γόμωσης [kg/m ³]	1400	1200	1050
Διαστάσεις φυσιγγίου	35x380 mm	36x530 mm	22x1000 mm

Παράρτημα Β

Τεχνικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά φορτωτή (Wheel Loader) και του φορτηγού (Dump Truck)

Πίνακας 2 «Τεχνικά χαρακτηριστικά μοντέλου φορτωτή της εταιρείας Caterpillar»
(πηγή: Caterpillar Performance Handbook)

Τεχνικά χαρακτηριστικά	Μοντέλο φορτωτή 914M
Βάρος (kg)	8360 – 8750
Ισχύς/Στροφές (HP/RPM)	74 – 76/2350
Χωρητικότητα κάδου (m ³)	1.3 – 1.9
Μέγιστο μήκος (mm)	6362
Πλάτος κάδου (mm)	2401
Μέγιστο ύψος (mm)	4674
Ταχύτητα κίνησης (km/h)	Εμπρός 10/20/40 Πίσω 10/20/40

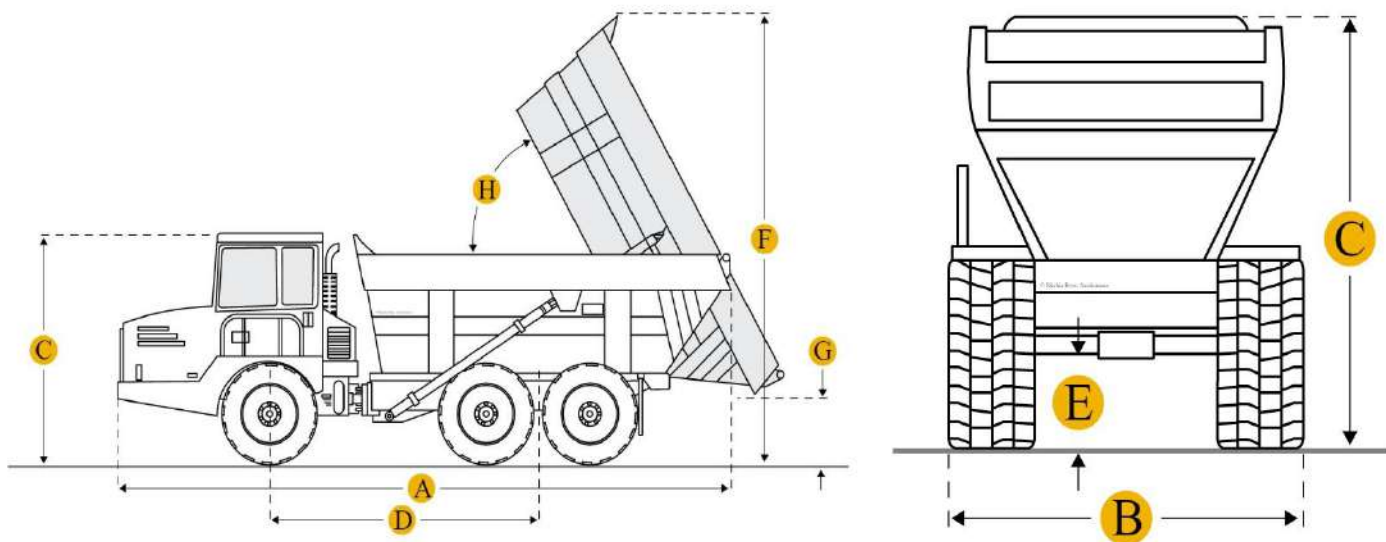


- | | |
|--|---|
| 1: Ύψος μέχρι την καμπίνα | 16: Μέγιστο βάθος εκσκαφής |
| 2: Ύψος μέχρι τον φάρο | 17: Πλάτος κάδου |
| 5: Συνολικό μήκος φορτωτή | 18: Πλάτος μεταξύ των τροχών |
| 8: Απόσταση μεταξύ αξόνων τροχών | 19: Ακτίνα στροφής φορτωτή |
| 12: Μέγιστη ανύψωση άρθρωσης του κάδου | 20: Μέγιστο πλάτος στους τροχούς |
| 13: Μέγιστο ύψος με ανυψωμένο κάδο | 24: Γωνία απόθεσης στην μέγιστη ανύψωση |

Σχήμα 1 «Γεωμετρικά χαρακτηριστικά φορτωτή» (πηγή: Caterpillar Performance Handbook)

Πίνακας 3 «Τεχνικά χαρακτηριστικά φορτηγού» (πηγή: www.ritchiespecs.com)

Τεχνικά Χαρακτηριστικά	Μοντέλο φορτηγού AAA 922hm
Βάρος με άδειο κάδο (kg)	16120.7
Συνολικό βάρος με πλήρες φορτίο (kg)	19989.9
Μέγιστο φορτίο (kg)	3869.2
Ιπποδύναμη (HP)	274
Μέγιστος όγκος (m ³)	12.2
Μέγιστη ταχύτητα (km/h)	49.9
Μέγιστο μήκος (mm)	3535.68
Μέγιστο πλάτος (mm)	2743.2
Μέγιστο ύψος (mm)	3474.72



- A: Συνολικό μήκος φορτηγού
- B: Συνολικό πλάτος φορτηγού
- C: Συνολικό ύψος φορτηγού
- D: Απόσταση μεταξύ αξόνων τροχών
- E: Απόσταση μεταξύ εδάφους και αμαξώματος
- H: Γωνία απόθεσης

Σχήμα 2 «Γεωμετρικά χαρακτηριστικά φορτηγού» (πηγή: www.ritchiespecs.com)